



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Μοντέλα αεριοστροβίλων διδύμων ατράκτων
σε ανοιχτό και συνδυασμένο κύκλο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιάσων Κούβδος

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μοντέλα αεριοστροβίλων διδύμων ατράκτων σε ανοιχτό και συνδυασμένο κύκλο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιάσων Κούβδος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Οκτωβρίου 2015:

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Αρετάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....
Ιάσων Κούβδος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιάσων Κούβδος, 2015

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε υπολογιστική αναπαράσταση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, στις οποίες η γεννήτρια κινείται από αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων με σκοπό την μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας, επομένως της ηλεκτρικής συχνότητας του συστήματος. Μελετήθηκε η συμπεριφορά της μονάδας εάν προστεθεί βρόχος ανάδρασης στο σήμα που καθορίζει την παροχή καυσίμου και το κατά πόσο μια τέτοια εφαρμογή επιτυγχάνει τον στόχο της επιτάχυνσης της απόκρισης του συστήματος σε βηματικές μεταβολές του φορτίου της γεννήτριας. Η διάταξη επανατροφοδότησης σήματος που εισάχθηκε στο μοντέλο ήταν ένα βαθμωτό κέρδος. Προσδιορίστηκε πως μια τέτοια διάταξη επιτυγχάνει όντως τον σκοπό της και η μεταβατική απόκριση του συστήματος βελτιώνεται χωρίς να χρειαστεί να εφαρμοστούν άλλες τεχνικές, όπως π.χ. αύξηση της ροπής αδράνειας των ατράκτων της αεριογόνου ή/και του στροβίλου ισχύος και της γεννήτριας, όπως επιλέχθηκε σε προηγούμενη εργασία.

Μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος εάν δεν υπάρχει σε αυτό διάταξη ελέγχου και ρύθμισης των στροφών της αεριογόνου. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων εισόδου στο συμπιεστή και προσδιορίστηκε, θεωρητικά και μέσω προσομοιώσεων, πως ακόμη και χωρίς έλεγχο αέρα / στροφών αεριογόνου το σύστημα είναι συνολικά ευσταθές. Διαπιστώθηκε πως η μεταβατική απόκριση δεν παρουσιάζει σημαντική επιδείνωση στην περίπτωση που η αεριογόνος αφεθεί σε διάταξη αυτορρύθμισης στροφών αλλά και το γεγονός πως η ρύθμιση των πτερυγίων ελέγχου του αέρα εισόδου επιδρά μόνο στην ταχύτητα της αεριογόνου και όχι στην παροχή αέρα, η οποία καθορίζεται από το επίπεδο ισχύος της αεριογόνου.

Χρησιμοποιήθηκε μια περισσότερο λεπτομερής θερμοδυναμική εξίσωση στην περιγραφή του θαλάμου καύσης, λεπτομερέστερη χρήση των μηχανικών βαθμών απόδοσης συμπιεστή και στροβίλων όπως και πραγματικά δεδομένα οριακών θερμοκρασιών και ροπών αδράνειας στροβιλομηχανών και γεννητριών τα οποία αντλήθηκαν από τη βιομηχανία. Το μοντέλο που προέκυψε ρυθμίστηκε κατάλληλα ώστε να προκύψουν αποδεκτές αποκρίσεις. Φάνηκε πως ένα πραγματικό σύστημα μπορεί με τις διατάξεις που περιγράφηκαν να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να έχει αποδεκτή μεταβατική απόκριση.

Τα μοντέλα οικοδομήθηκαν στο περιβάλλον Simulink, το οποίο είναι ένα γραφικό περιβάλλον που ανήκει στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab και ενδείκνυται για την αναπαράσταση και μελέτη δυναμικών συστημάτων. Επί αυτών των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τα σχετικά εργαλεία /

συναρτήσεις ανάλυσης δυναμικών συστημάτων που παρέχει η Matlab. Προέκυψαν οι πίνακες ιδιοτιμών, συντελεστών συμμετοχής και ιδιοδιανυσμάτων που περιγράφουν τα μοντέλα (σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, καθώς προκύπτουν από την γραμμικοποίησή του). Η χρησιμότητα των μαθηματικών αυτών εργαλείων επαληθεύτηκε μέσω των αποκρίσεων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις.

Τέλος οικοδομήθηκε αναπαράσταση μονάδας συνδυασμένου κύκλου, στην οποία τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου οδηγούν έναν ατμοπαραγωγό, ο ατμός του οποίου κινεί έναν ατμοστρόβιλο. Αποδείχτηκε πως η συνήθης απαίτηση των μονάδων συνδυασμένου κύκλου για σταθερή θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του αεριοστροβίλου, τα οποία παρέχουν την θερμική ισχύ στον ατμοπαραγωγό δεν μπορεί να ικανοποιηθεί σε διατάξεις με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων. Σε αυτή την αναπαράσταση χρησιμοποιήθηκαν επίσης στοιχεία από την βιομηχανία. Συγκρίνοντας τα μοντέλα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο είτε απλής είτε διδύμων ατράκτων φάνηκε πως μια διάταξη διδύμων ατράκτων αποκρίνεται πιο γρήγορα αλλά εμφανίζει μεγαλύτερες ταλαντώσεις και μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση ηλεκτρικής συχνότητας απ' ότι μια διάταξη απλής ατράκτου.

Λέξεις – κλειδιά

Ευστάθεια συχνότητας, προσομοίωση συστήματος, ρύθμιση συχνότητας, μοντέλα αεριοστροβίλων, αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων, αεριογόνος, συμπιεστής, θάλαμος καύσης, στρόβιλος, μοντέλο συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων, ατμοπαραγωγός, ατμοστρόβιλος.

Abstract

In this thesis a computational model of power generating units, in which the generator is driven by a twin-shaft gas-turbine was developed in order to examine the transient behavior of the rotating speed of the generator, therefore the electrical frequency of the system. The behavior of the unit was examined with a feedback added in this fuel delivery module in order to show whether such an application achieves the goal of speeding up the system response to step changes in the electrical load. The feedback introduced consisted of a scalar gain. It was determined that such a device actually achieves its purpose and the transient response of the system is improved without having to apply other techniques, such as increasing the moment of inertia of the shafts of the high-pressure and / or the low-pressure turbine and generator.

The behavior of the system was studied with and without controller and speed regulator of the gas generator. Control is achieved by appropriate adjustment of the opening of the air inlet guide vanes in the compressor. It was determined theoretically as well as through simulations that even without air control the system is globally stable, though less effective. It was found that the air control cannot affect the air flow but only the rotating speed of the gas generator. It was found that the transient response does not present any significant deterioration when the gas generator is allowed to self-regulate its rotational speed.

A more detailed thermodynamic equation was introduced to describe the combustion chamber, along with more detailed use of efficiencies. Furthermore, real temperature limit and moment of inertia data are utilized from sources within the turbomachinery and generator industry and the model were adjusted appropriately to provide acceptable responses. It was shown that a real system can be configured to have acceptable transient responses.

The models were built using Simulink, a graphical interface of the programming language Matlab, appropriate for the study of dynamic systems. Eigenvalues tables, participation factors and eigenvectors describing models (in a particular operating point, due to the linearisation) were calculated. The usefulness of these mathematical tools was verified through the responses generated by extensive simulations.

Finally, a model was created which contained a combined cycle unit, in which the exhaust gases drive a steam generator and the steam in turn drives a steam turbine. It was proved that the normal requirement for stable exhaust-gas temperature of the single-shaft combined cycle power plants could not be satisfied in twin shaft set-ups. Also in this representation industry data was used. Comparing the results of the twin-shaft combined cycle model and the results of a suitable adjusted

single-shaft combined cycle model, it appeared that a twin-shaft set-up can have faster response, though with larger oscillations amplitude and higher transient electrical frequency drop.

Key words

Frequency stability, system simulation, frequency control, gas turbine models, twin shaft gas turbine, gas generator, compressor, combustion chamber, turbine, combined cycle twin shaft gas turbine model, heat recovery steam generator, steam turbine.

Ευχαριστίες

Το κλείσιμο μιας διπλωματικής εργασίας συμπυκνώνει το κλείσιμο μιας φοιτητικής διαδρομής, το κλείσιμο κάποιων χρόνων. Η πρώτη ευχαριστία απευθύνεται στην οικογένειά μου, για την υλική και ηθική συμπαράσταση σε κάθε μου επιλογή.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελευθερία Ναθαναήλ για την μεγάλη και πολύπλευρη στήριξη, για το κίνητρο για νέες σκέψεις και πρακτικές που μου πρόσφερε αυτά τα χρόνια. Μα οφείλω μια εξίσου μεγάλη ευχαριστία σε όλους τους ΑΝ.Α.Φ.Η., για την αποδοχή και την στήριξη που μου πρόσφεραν. Χωρίς αυτούς / αυτές η σχολή θα ήταν ασύγκριτα πιο δύσκολη. Αν έχει νόημα να αφιερωθεί κάπου μια τεχνική εργασία, τότε είναι για όλες και όλους τους προαναφερθέντες.

Στα επί της εργασίας, η πρώτη ευχαριστία δεν μπορεί παρά να απευθυνθεί στην Άρτεμις Ευθυμιάτου για το χαμόγελο, την αισιοδοξία και την κατανόηση που έδειξε κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας. Επίσης στους Παντελή Χατζηπαντελή, Θοδωρή Καρούτσο, Αναστασία Παπαστελιάνου και όλα τα μέλη του συλλόγου ΕΚΑ για τα μικρά μα σημαντικά πεδία συνεισφοράς του καθενός.

Στην κ. Γιώτα Σταθά και στον κ. Μίνωα Κοκογιαννάκη, εκ μέρους της ΔΕΗ, για το ενδιαφέρον που έδειξαν και την εξεύρεση και παραχώρηση τεχνικών δεδομένων αεριοστροβίλων.

Παρ' ότι η σύνδεση πανεπιστημίου και βιομηχανίας είναι ένα μη τετριμμένο ζήτημα, οφείλω να ευχαριστήσω τους κκ. Marc N. Boffo και Josef Mekuta εκ μέρους της εταιρείας Siemens για την παραχώρηση τεχνικών στοιχείων που αφορούν τους στροβίλους, όπως και τον κ. Νίκο Γεωργίου εκ μέρους της εταιρείας ABB, για τεχνικά στοιχεία που αφορούν την γεννήτρια. Τα στοιχεία αυτά κατέστησαν την παρούσα εργασία, εκτός από περισσότερο ρεαλιστική, πολύ πιο έγκυρη.

Πολύ μεγάλη συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα είχαν οι σ/φοι Γιάννης Μάντζαρης και Χάρης Ζήρας, οι οποίοι, χωρίς καμία ιδιοτέλεια, σπατάλησαν αξιόλογο χρόνο στις απορίες μου. Η συνεισφορά και των δύο, ειδικά στα πρώτα στάδια της παρούσας εργασίας, ήταν κομβική.

Στον κ. Σταύρο Παπαθανασίου, για την συμμετοχή του στην τριμελή κριτική επιτροπή, μα πιο πολύ για το υψηλό επίπεδο μαθήματος που πάντα παρείχε στη σχολή.

Στους κκ. Αλέξιο Αλεξίου και Νίκο Αρετάκη, οι οποίοι με πολλή όρεξη και μεράκι ασχολήθηκαν και με καθοδήγησαν στο -άγνωστο για εμένα- πεδίο των θερμικών στροβιλομηχανών. Οι ώρες στο εργαστήριο του κτηρίου Ο ήταν πάντα ευχάριστες και αισιόδοξες!

Τέλος, στον επιβλέποντα αυτής της εργασίας, κ. Κώστα Βουρνά. Για την όρεξη, τις αμέτρητες ώρες και τον επαγγελματισμό του, μα ίσως περισσότερο για τον σεβασμό που μου έδειξε. Πρακτική που αποτέλεσε αυτοτελές μάθημα.

Ιάσων Κούβδος

Οκτώβριος 2015

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Λέξεις – κλειδιά.....	6
Abstract.....	7
Key words.....	8
Ευχαριστίες.....	9
1ο Κεφάλαιο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Ρύθμιση στροφών σύγχρονης γεννήτριας.....	18
1.2.1 Αδρανειακή απόκριση.....	18
1.2.2 Ρυθμιστής στροφών.....	19
1.3 Περιγραφή θερμικών σταθμών.....	21
1.3.1 Ατμοστρόβιλοι.....	21
1.3.1.1 Ατμοπαραγωγός.....	22
1.3.1.2 Ατμοστρόβιλος.....	22
1.3.1.3 Συμπυκνωτής.....	23
1.3.1.4 Αντλίες.....	23
1.3.2 Αεριοστρόβιλοι.....	23
1.3.3 Αεριοστρόβιλοι διδύμων ατράκτων.....	24
1.3.4 Ονομασία θέσεων αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων.....	25
1.3.5 Συνδυασμένος κύκλος.....	26
1.4 Στραγγαλισμένη ροή.....	26
1.4.1 Φαινόμενο Ventouri.....	27
1.4.2 Ολικά μεγέθη.....	28
1.5 Εξισώσεις καύσης.....	31
1.5.1 Αναλυτικά.....	31
1.5.2 Προσεγγιστική μορφή εξισώσεων καύσης.....	33
1.5.3 Ρυθμός απόδοσης θερμότητας.....	34
1.6 Απόδοση ατμοπαραγωγού.....	34
1.7 Εξισώσεις κίνησης περιστρεφόμενων ατράκτων.....	36
1.7.1 Αεριογόνος.....	37
1.7.2 Γεννήτρια.....	37
1.7.3 Παράσταση μειωτήρα στροφών.....	37
1.8 Στοιχεία θεωρίας αυτομάτου ελέγχου.....	38

1.8.1	Εξισώσεις κατάστασης.....	38
1.8.2	Δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα.....	40
1.8.3	Διαγωνιοποίηση του πίνακα A.....	42
1.8.4	Ρυθμοί απόκρισης.....	43
1.8.5	Ελεύθερη απόκριση μεταβλητών κατάστασης.....	44
1.8.6	Ευαισθησία ιδιοτιμών.....	45
1.8.7	Συντελεστές συμμετοχής.....	47
1.9	Σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας.....	49
2ο Κεφάλαιο:	ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΔΙΔΥΜΩΝ ΑΤΡΑΚΤΩΝ.....	53
2.1	Γενική περιγραφή συστήματος.....	53
2.2	Αναπαράσταση συστήματος.....	56
2.2.1	Συμπιεστής.....	57
2.2.2	Θάλαμος καύσης.....	58
2.2.3	Στρόβιλοι.....	58
2.2.3.1	Στρόβιλος υψηλής πίεσης.....	59
2.2.3.2	Στρόβιλος χαμηλής πίεσης.....	60
2.2.4	Μεταβατική συμπεριφορά.....	61
2.2.4.1	Αεριογόνος.....	61
2.2.4.2	Στρόβιλος ισχύος.....	62
2.2.5	Εξισώσεις επιτάχυνσης.....	63
2.2.5.1	Αεριογόνος (συμπιεστής & στρόβιλος ΥΠ).....	63
2.2.5.2	Άτρακτος ισχύος (στρόβιλος ΧΠ & γεννήτρια).....	64
2.3	Διατάξεις ελέγχου.....	64
2.3.1	Ρυθμιστής στροφών.....	65
2.3.2	Έλεγχος υπερθέρμανσης.....	65
2.3.2.1	Μετρητής θερμοκρασίας.....	66
2.3.2.2	Ελεγκτής υπερθέρμανσης.....	67
2.3.3	Επιλογέας ελάχιστης τιμής.....	69
2.4	Ρύθμιση καυσίμου.....	69
2.4.1	Επιτάχυνση συστήματος.....	69
2.4.2	Ελάχιστη παροχή καυσίμου.....	71
2.5	Ρύθμιση παροχής αέρα (άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου).....	73
2.5.1	Πλήρως ανοιχτά πτερύγια.....	73
2.5.2	Ρύθμιση παροχής αέρα για έλεγχο ταχύτητας αεριογόνου.....	74

2.6 Ρυθμίσεις παραμέτρων.....	76
3ο Κεφάλαιο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ GENERAL ELECTRIC LM 2500+.....	79
3.1 Θερμοδυναμικές σχέσεις.....	79
3.1.1 Συμπιεστής.....	80
3.1.2 Θάλαμος καύσης.....	80
3.1.3 Στρόβιλος υψηλής πίεσης.....	81
3.1.4 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης.....	82
3.2 Δεδομένα προσομοιώσεων.....	83
3.2.1 Θερμοδυναμικά δεδομένα.....	83
3.2.1.1 Ονομαστικές τιμές.....	83
3.2.1.2 Λειτουργικές τιμές.....	84
3.2.2 Σταθερές τιμές προσομοιώσεων.....	88
3.3 Ανάλυση συστήματος με ανάδραση παροχής καυσίμου και έλεγχο στροφών αεριογόνου.....	89
3.3.1 Γενική περιγραφή συστήματος.....	89
3.3.2 Διαγράμματα θερμοκρασιών και παροχών μόνιμης κατάστασης.....	92
3.3.3 Παράμετροι συστημάτων ελέγχου.....	93
3.3.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση.....	99
3.3.4.1 Ιδιοτιμές.....	99
3.3.4.2 Συντελεστές συμμετοχής.....	101
3.3.4.3 Ιδιοδιανύσματα.....	102
3.3.5 Αποκρίσεις.....	104
3.4 Προσομοίωση με βρόχο ανάδρασης παροχής καυσίμου χωρίς βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου.....	108
3.4.1 Γενική περιγραφή συστήματος.....	108
3.4.2 Παράμετροι ελέγχου.....	110
3.4.3 Διαγράμματα θερμοκρασιών και παροχών μόνιμης κατάστασης.....	111
3.4.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση.....	113
3.4.4.1 Ιδιοτιμές.....	113
3.4.4.2 Συντελεστές συμμετοχής.....	114
3.4.4.3 Ιδιοδιανύσματα.....	115
3.4.5 Αποκρίσεις.....	116
3.4.5.1 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,9 σε 1 αμ.....	116
3.4.5.2 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,6 σε 0,8 αμ.....	117
3.4.5.3 Βηματική μείωση φορτίου από 0,9 σε 0,6 αμ.....	117

4ο Κεφάλαιο: MONTELO ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ SIEMENS SGT 700.....	119
4.1 Λεπτομερείς θερμοδυναμικές σχέσεις.....	119
4.1.1 Γενικά.....	119
4.1.2 Συμπιεστής.....	121
4.1.3 Θάλαμος καύσης.....	121
4.1.4 Στρόβιλος υψηλής πίεσης.....	122
4.1.5 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης.....	122
4.1.6 Εξισώσεις προσδιορισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας ανά συνιστώσα.....	123
4.2 Δεδομένα προσομοιώσεων.....	124
4.2.1 Θερμοδυναμικά δεδομένα.....	124
4.2.1.1 Ονομαστικές τιμές.....	124
4.2.1.2 Λειτουργικές τιμές.....	125
4.2.2 Ροπές αδράνειας.....	130
4.2.3 Σταθερές τιμές προσομοιώσεων.....	131
4.3 Προσομοίωση με βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου.....	132
4.3.1 Γενική περιγραφή συστήματος.....	132
4.3.2 Παράμετροι συστημάτων ελέγχου.....	132
4.3.3 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης.....	135
4.3.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση.....	138
4.3.4.1 Ιδιοτιμές.....	138
4.3.4.2 Συντελεστές συμμετοχής.....	139
4.3.4.3 Ιδιοδιανύσματα.....	141
4.3.5 Αποκρίσεις.....	143
4.4 Προσομοίωση με βρόχο ανάδρασης παροχής καυσίμου χωρίς βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου.....	148
4.4.1 Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου.....	148
4.4.2 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης.....	149
4.4.3 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση.....	150
4.4.3.1 Ιδιοτιμές.....	150
4.4.3.2 Συντελεστές συμμετοχής.....	151
4.4.3.3 Ιδιοδιανύσματα.....	152
4.4.4 Αποκρίσεις.....	153
4.4.4.1 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,9 σε 1 αμ.....	153
4.4.4.2 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,6 σε 0,8 αμ.....	154
4.4.4.3 Βηματική μείωση φορτίου από 0,9 σε 0,6 αμ.....	156

5ο Κεφάλαιο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	157
5.1 Εισαγωγή.....	157
5.2 Εξισώσεις.....	158
5.2.1 Συμπιεστής.....	158
5.2.2 Θάλαμος καύσης.....	158
5.2.3 Στρόβιλος ΥΠ.....	158
5.2.4 Στρόβιλος ΧΠ.....	159
5.2.5 Ατμοπαραγωγός - Ατμοστρόβιλος.....	160
5.2.6 Κανονικοποίηση μεγεθών.....	161
5.2.7 Θερμοχωρητικότητες αερίων.....	161
5.3 Αλγεβρικά δεδομένα προσομοιώσεων.....	162
5.3.1 Ονομαστικές τιμές.....	162
5.3.2 Λειτουργικές τιμές.....	162
5.3.3 Αλγεβρικές εξισώσεις στο Simulink.....	164
5.4 Σταθερές συστήματος.....	166
5.5 Παράμετροι ελέγχου.....	169
5.6 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης.....	170
5.6.1 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση.....	172
5.6.1.1 Ιδιοτιμές.....	173
5.6.1.2 Συντελεστές συμμετοχής.....	174
5.6.1.3 Ιδιοδιανύσματα.....	175
5.7 Προσομοίωση συστήματος.....	176
5.8 Αποκρίσεις.....	179
5.9 Σύγκριση αποκρίσεων διαφορετικών διατάξεων μονάδων συνδυασμένου κύκλου.....	182
5.9.1 Σταθερές συστήματος.....	184
5.9.2 Ονομαστικές τιμές.....	184
5.9.3 Λειτουργικές τιμές.....	186
5.9.4 Ρύθμιση παραμέτρων.....	187
5.9.5 Γραμμικοποίηση συστήματος.....	188
5.9.6 Αποκρίσεις.....	190
6ο Κεφάλαιο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	193
6.1 Συμπεράσματα.....	193
6.1.1 Ρυθμίσεις παραμέτρων.....	193
6.1.2 Αποκρίσεις αεριοστροβίλου General Electric LM 2500+.....	193

6.1.3 Αποκρίσεις αεριοστροβίλου Siemens SGT 700.....	195
6.1.4 Αποκρίσεις σταθμού συνδυασμένου κύκλου.....	195
6.2 Προοπτικές.....	197
Βιβλιογραφία.....	199
Παράρτημα Α: Κώδικες Matlab.....	201
Αρχεία υπολογισμού ειδικών θερμοχωρητικότητων.....	201
Αρχικοποίηση αρχείου προσομοίωσης.....	201
Εκτέλεση και γραμμικοποίηση της προσομοίωσης, απεικόνιση αποτελεσμάτων.....	207
Απεικόνιση διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης.....	211
Ρύθμιση παραμέτρων.....	213
Παράρτημα Β: Αποτελέσματα δοκιμών ρύθμισης.....	214
Παράρτημα Γ: Πεδία χαρακτηριστικών αεριοστροβίλου.....	216
Παράρτημα Δ: Διαγράμματα βαθμίδων.....	219
Παράρτημα Ε: Στοιχεία γεννήτριας ABB AMS 1120LK 4PBS.....	222
Παράρτημα ΣΤ: Διερεύνηση του μηχανισμού καυσίμου.....	224

1ο Κεφάλαιο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Εισαγωγή

Η ανά χειράς διπλωματική εργασία παρουσιάζει κατάλληλα μοντέλα για την παράσταση του αυτόματου ελέγχου της ηλεκτρικής συχνότητας γεννήτριας η οποία οδηγείται από αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων. Το πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων που αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον Matlab – Simulink. Το πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο αναλύεται στην σχετική βιβλιογραφία [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 17].

Η μεταβολή της συχνότητας των ηλεκτρικών μεγεθών μιας γεννήτριας οφείλεται στην διαφορά μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης από την γεννήτρια ισχύος. Εάν κάποια στιγμή η ισχύς που ζητηθεί από την γεννήτρια είναι μεγαλύτερη από αυτή που της παρέχει η κινητήρια μηχανή, τότε η γεννήτρια θα αρχίσει να μετατρέπει σε ηλεκτρική την κινητική ενέργεια που έχει αποθηκευμένη στην άτρακτό της με αποτέλεσμα να χάνει κινητική ενέργεια και επομένως να αρχίσει να επιβραδύνεται. Αυτό γίνεται αντιληπτό στην συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου της γεννήτριας, στο ρεύμα εξόδου, στην γωνιακή της ταχύτητα κ.λπ., μεγέθη που πλέον θα συνοψιστούν ως η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας.

Το ειδικό πρόβλημα που μελετήθηκε είναι η απόκριση συχνότητας σε ενδεχόμενη βηματική μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας, φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί είτε εάν εισέλθει απότομα κάποιος μεγάλος καταναλωτής στο δίκτυο είτε εάν μια μονάδα παραγωγής τεθεί εκτός δικτύου. Με την όλο και αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πιθανό η μεταβολή του ισοζυγίου παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος να μην οφείλεται σε σφάλμα αλλά στον εγγενώς στοχαστικό χαρακτήρα των μονάδων παραγωγής που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δηλαδή, είναι πλέον πιθανό η παραγόμενη ισχύς να μειωθεί απότομα λόγω απότομης αλλαγής των συνθηκών παραγωγής (αέρας, ηλιοφάνεια, ισχύς κυμάτων κλπ). Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει οι θερμικοί σταθμοί να μπορούν να αναλάβουν γρήγορα το αναγκαίο φορτίο ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα απόκλισης συχνότητας. Θα πρέπει επίσης η ανάληψη φορτίου να μπορεί να πραγματοποιηθεί γρήγορα και χωρίς έντονες ταλαντώσεις ηλεκτρικής συχνότητας.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στο πρόβλημα της απόκρισης της ηλεκτρικής συχνότητας, άρα στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Δεν εξετάζεται εδώ το πρόβλημα αύξησης ή μείωσης της τάσης, φαινόμενο που αφορά περισσότερο το ισοζύγιο αέργου ισχύος (ευστάθεια τάσης). Καθώς όμως το πρόβλημα της ευστάθειας τάσης έχει πολύ μικρότερη σταθερά χρόνου από το πρόβλημα ευ-

στάθειας συχνότητας, τα δύο φαινόμενα μπορούν, σε πρώτη προσέγγιση, να θεωρηθούν αποζευγμένα.

Τα κρίσιμα μεγέθη είναι η ταχύτητα με την οποία μπορεί να αποσβεστεί μια διαταραχή καθώς και ο χαρακτήρας του μεταβατικού αυτού φαινομένου. Ζητούμενο είναι η κατά το δυνατόν πιο ομαλή απόσβεση, χωρίς δηλαδή να παρουσιαστεί ούτε μεγάλη βύθιση της συχνότητας, ούτε μεγάλες και πολλές ταλαντώσεις της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας μέχρι την τελική κατάσταση ισορροπίας, η οποία, όπως θα φανεί στην ενότητα που εξετάζει τον στατισμό μιας γεννήτριας, είναι πάντα λίγο διαφορετική από την ονομαστική των 50 Hz.

1.2 Ρύθμιση στροφών σύγχρονης γεννήτριας

1.2.1 Αδρανειακή απόκριση

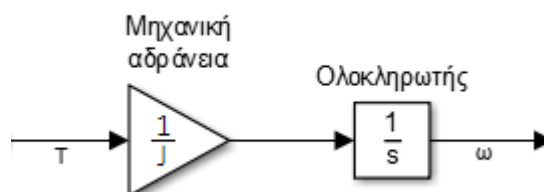
Η λειτουργία του ρυθμιστή στροφών είναι διαφορετική στην περίπτωση όπου η γεννήτρια λειτουργεί απομονωμένη απ' ό,τι θα ήταν εάν λειτουργούσε ενταγμένη σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την μηχανική συμπεριφορά της γεννήτριας είναι η

$$J \frac{d\omega}{dt} = T \quad (1.1)$$

η οποία στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s θα γίνει

$$T = s J \omega \quad (1.2)$$

Η παράσταση αυτής με διαγράμματα βαθμίδων παρουσιάζεται στο Σχ. 1.1.



Σχήμα 1.1: Παράσταση γεννήτριας στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s

όπου στην υποενότητα 1.7.2 θα μετατραπούν σε ανά μονάδα τιμές τόσο η ροπή εισόδου όσο και η ροπή αδράνειας. Εδώ παρουσιάζονται σε φυσικές τιμές και πρέπει να κανονικοποιηθούν για χρήση

σε σύστημα αυτόματου ελέγχου.

Εάν η μηχανική ισχύς (η οποία αποτελεί το σήμα εισόδου στο μοντέλο της γεννήτριας) είναι ίση με την ηλεκτρική τότε η γεννήτρια δεν αντιλαμβάνεται κάποια επιταχύνουσα (ή επιβραδύνουσα) ροπή οπότε δεν μεταβάλλει την ταχύτητα περιστροφής της. Εάν όμως αυτό το ισοζύγιο πάρει τιμή διαφορετική από το μηδέν θα προκληθεί αλλαγή στην ταχύτητα περιστροφής της. Εάν αυξηθεί το ηλεκτρικό φορτίο τότε η γεννήτρια θα αρχίσει να δίνει ενέργεια από αυτή που έχει ήδη αποθηκευμένη με τη μορφή κινητικής ενέργειας περιστροφής και με αυτό τον τρόπο θα αρχίσει να χάνει στροφές, ενώ εάν το ηλεκτρικό φορτίο μειωθεί τότε η γεννήτρια θα αρχίσει να αποθηκεύει την πλεονάζουσα μηχανική ισχύ που παραλαμβάνει υπό μορφή κινητικής ενέργειας, η οποία, αφού δεν διαχέεται κάπου, θα αρχίσει να επιταχύνει την άτρακτο της γεννήτριας.

1.2.2 Ρυθμιστής στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών είναι μια διάταξη η οποία μετράει την απόκλιση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας από την ονομαστική, δηλαδή το σφάλμα ταχύτητας και το πολλαπλασιάζει με κάποιο προκαθορισμένο κέρδος, άρα αποτελείται από έναν συγκριτή και έναν ενισχυτή σήματος. Στο σήμα που προκύπτει προστίθεται μια σταθερή ποσότητα (το σήμα ονομαστικής παροχής καυσίμου) και το αποτέλεσμα οδηγεί το σύστημα καυσίμου. Σε περίπτωση μη μηδενικού σφάλματος ταχύτητας το σήμα εξόδου του ρυθμιστή στροφών θα είναι τέτοιο ώστε να ανακτηθούν (ή να μειωθούν) οι στροφές, δηλαδή θα είναι σήμα αύξησης ή μείωσης της παροχής καυσίμου. Όσο η γεννήτρια πλησιάζει τον ονομαστική της ταχύτητα τόσο το σφάλμα αρχίζει να μειώνεται οπότε το σήμα που δίνει ο ελεγκτής μειώνεται μέχρι που φτάνει στο ονομαστικό. Ο ελεγκτής, ως ηλεκτρονική διάταξη μπορεί να δίνει και αρνητικά σήματα αλλά στην έξοδό του υπάρχει περιοριστής ο οποίος έχει τιμή κατωφλίου το μηδέν.

Το αντίστροφο του πολλαπλασιαστικού παράγοντα του σφάλματος ταχύτητας ονομάζεται *στατισμός* (droop) της μονάδας παραγωγής. Θεωρώντας πως το σήμα εισόδου του ρυθμιστή είναι το σφάλμα ταχύτητας, $\Delta\omega$, και έξοδος του είναι το σήμα ελέγχου παροχής καυσίμου, F_C , τότε η συνάρτηση μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών θα είναι

$$\frac{F_C}{\Delta\omega} = K \frac{1}{1 + T_{gov}s} = \frac{1}{R} \frac{1}{1 + T_{gov}s} \quad (1.3)$$

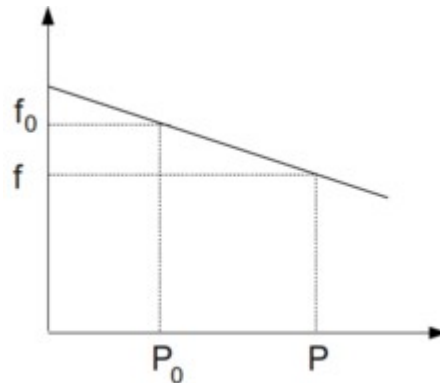
όπου K είναι το κέρδος ενίσχυσης του σήματος σφάλματος και R το αντίστροφό του, ο στατισμός.

Για το σφάλμα ταχύτητας ισχύει πως

$$\Delta\omega = 1 - N + N_{ref}.$$

όπου N είναι οι ανηγμένες στην μονάδα στροφές (οι στροφές διαιρεμένες με την ονομαστική τους τιμή) ενώ N_{ref} είναι, ουσιαστικά, το μόνιμο σφάλμα που θα έχει η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Η σημασία του φαίνεται κατά την λειτουργία της γεννήτριας ως μέρους ενός αρκετά μεγαλύτερου ΣΗΕ και έχει να κάνει με την δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου. Ως T_{gov} συμβολίζεται η σταθερά χρόνου του ρυθμιστή στροφών ως σύστημα (βλ. και ενότητα 2.4).

Ο ρυθμιστής στροφών (δηλαδή ο στατισμός) ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα αναλάβει η γεννήτρια την οποιαδήποτε μεταβολή φορτίου.



Σχήμα 1.2: Στατισμός

Όταν η συχνότητα είναι ίση με την ονομαστική f_0 δηλαδή ισχύει πως $N = 1$, τότε ο αεριοστρόβιλος παράγει ισχύ P_0 . Για να παραχθεί αυτή η ισχύς, σύμφωνα όσα αναφέρθηκαν, απαιτείται παροχή καυσίμου ίση με

$$F_c^o = N_{ref} \frac{1/R}{1 + T_{gov}s} \quad (1.4)$$

όπου ο άνω δείκτης o συμβολίζει ονομαστικό μέγεθος. Άρα στην μόνιμο κατάσταση, όπου το s τείνει στο μηδέν, θα έχουμε ότι

$$\lim_{s \rightarrow 0} N_{ref} = F_c^o R \quad (1.5)$$

Και αν θεωρήσουμε ότι, σε ανά μονάδα τιμές, η παραγόμενη ισχύς P είναι ίση με την παροχή καυσίμου F_c , τότε

$$N_{ref} = P^o R \quad (1.6)$$

Το N_{ref} είναι η τιμή της εισόδου του ελεγκτή στροφών προκειμένου να παράγεται ισχύς P^o (δηλαδή η έξοδος του ρυθμιστή στροφών να είναι F_c^o) όταν η συχνότητα είναι ονομαστική. Η πα-

ράμετρος αυτή καθορίζει την κανονικοποιημένη συχνότητα όταν $P = 0$.

Από το Σχ. 1.2 φαίνεται ο ορισμός του στατισμού:

$$R \equiv -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.7)$$

Ο στατισμός επομένως είναι η κλίση της ευθείας συσχέτισης φορτίου – συχνότητας. Ο στατισμός αναφέρεται συνήθως ως ποσοστό επί τοις εκατό, δηλαδή στατισμός 2% σημαίνει ότι η μονάδα θα μεταβάλλει την συχνότητά της κατά 2% (1 Hz για ΣΗΕ 50 Hz) για μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική της ισχύ. Το N_{ref} είναι το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα $y'y$, της συχνότητας. Εάν επομένως μεταβληθεί το N_{ref} η καμπύλη μετακινείται παράλληλα (πάνω – κάτω), εάν πάλι μεταβληθεί το R η καμπύλη στρέφεται γύρω από το σημείο λειτουργίας. Άρα ο στατισμός δείχνει πόσο θα μεταβάλλει την συχνότητά της μια μονάδα για ανάληψη (ή απόρριψη) κάποιου φορτίου, επομένως δείχνει πώς θα συνεργαστούν δύο και παραπάνω μονάδες παραγωγής (τελικά όλες οι μονάδες ενός ΣΗΕ).

Ο ρυθμιστής στροφών δεν κάνει ολοκληρωτικό έλεγχο παρά μόνο αναλογικό ούτως ώστε να παραμένει πάντοτε ένα σφάλμα στην συχνότητα το οποίο θα εκμηδενιστεί με την αναπροσαρμογή του N_{ref} . Αυτή η εντολή δίνεται από τον κεντρικό έλεγχο όλου του ΣΗΕ, ονομάζεται δευτερεύουσα ρύθμιση και καθορίζει το ποσό (ποσοστό) του φορτίου που θα αναλάβει η κάθε μονάδα.

1.3 Περιγραφή θερμικών σταθμών

Οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος κατατάσσονται ανάλογα με τον τύπο της κινητήριας μηχανής της γεννήτριας. Οι γενικές κατηγορίες κινητήριων μηχανών είναι οι ατμοστρόβιλοι, οι αεριοστρόβιλοι και οι εμβολοφόρες.

1.3.1 Ατμοστρόβιλοι

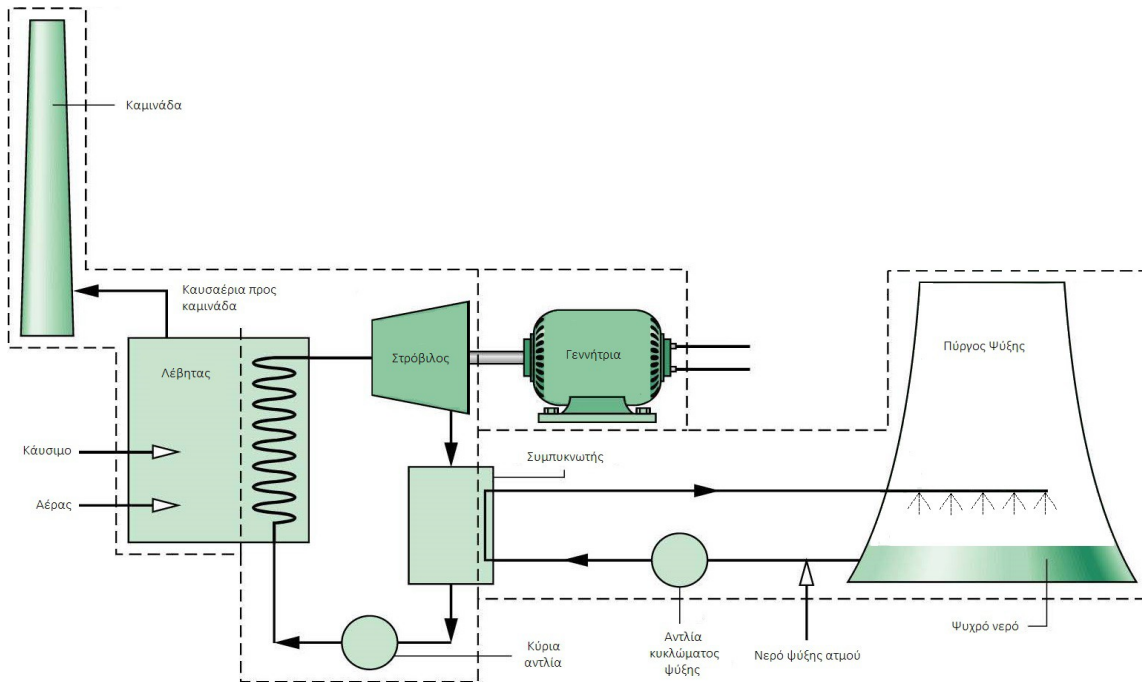
Η βασική συγκρότηση ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής παρουσιάζεται στο Σχ. 1.3. Το καύσιμο καίγεται στον ατμοπαραγωγό (λέβητα), το οποίο μπορεί να είναι είτε ορυκτό καύσιμο είτε πυρηνικό (όπου η θερμότητα δεν προέρχεται μέσω καύσης αλλά μέσω πυρηνικής αντίδρασης). Ο ατμός που παράγεται κινεί τον στρόβιλο ο οποίος με την σειρά του κινεί την ηλεκτρογεννήτρια με την οποία είναι δεμένος. Μετά τον στρόβιλο ο ατμός περνάει στον συμπυκνωτή όπου μετατρέπεται πάλι σε υγρό νερό και στην συνέχεια επιστρέφει στον ατμοπαραγωγό.

Η βασική αρχή λειτουργίας του ατμοστρόβιλου είναι η εκτόνωση εντός αυτού ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, όπου όσο πιο χαμηλή είναι η πίεση και η θερμοκρασία στις οποίες βρί-

σκεται ο ατμός κατά την έξοδό του από τον στρόβιλο, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξαγωγή μηχανικού έργου. Οι κύριες διατάξεις που διαμορφώνουν τον κύκλο ατμού είναι ο ατμοπαραγωγός, ο ατμοστρόβιλος, ο συμπυκνωτής και οι αντλίες τροφοδοσίας.

1.3.1.1 Ατμοπαραγωγός

Στον ατμοπαραγωγό παράγεται ο ατμός που απαιτείται για την κίνηση του ατμοστρόβιλου. Για την θέρμανση του νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα καύσιμα (στερεά, υγρά, αέρια καθώς και πυρηνικά). Το νερό εισάγεται σε υγρή φάση και μετατρέπεται σε ατμό καθώς απορροφά θερμότητα από τα καύσιμα. Το νερό στον προθερμαντή μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό φτάνοντας στο σημείο ζέσης και έπειτα μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό στον κυρίως λέβητα. Αν η διάταξη λειτουργεί με υπέρθερμο ατμό ακολουθεί ο υπερθερμαντής όπου ο κορεσμένος ατμός μετατρέπεται σε υπέρθερμο.



Σχήμα 1.3: Βασικά στοιχεία ατμοηλεκτρικού σταθμού

1.3.1.2 Ατμοστρόβιλος

Ο κορεσμένος (ή ο υπέρθερμος) ατμός εκτονώνεται πάνω στα περύγια του στρόβιλου θέτοντάς τον σε κίνηση, παράγοντας τεχνικό έργο. Στον στρόβιλο γίνεται μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ατμού σε κινητική ενέργεια της ατράκτου του στρόβιλου. Το έργο που παράγεται είναι ανάλογο με την παροχή ατμού και την διαφορά ενθαλπίας του ατμού μεταξύ εισόδου και εξόδου του στρόβιλου, σύμφωνα με την σχέση

$$\dot{W}_t = \dot{m}(h_{\text{εισόδου}} - h_{\text{εξόδου}}) \quad (1.8)$$

όπου φαίνεται πως όσο μικρότερη είναι η ενθαλπία εξόδου τόσο μεγαλύτερο είναι το έργο που παράγεται.

1.3.1.3 Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής συλλέγει τον ατμό μετά την έξοδό του από τον στρόβιλο και είναι η διάταξη που καθορίζει τις συνθήκες στο σημείο εξόδου του στρόβιλου, άρα και την ενθαλπία εξόδου του ατμού. Για να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη η ενθαλπία εξόδου ο συμπυκνωτής πρέπει να μειώσει πολύ την θερμοκρασία του ατμού (ενώ η πίεσή του δια μέσου του συμπυκνωτή θεωρείται σχεδόν σταθερή) και επομένως να απορρίψει μεγάλα ποσά θερμότητας στο περιβάλλον. Ενώ η απόρριψη ισχύος είναι μεγάλη, αυτός είναι ο μόνος τρόπος ώστε ο στρόβιλος να παράγει αρκετή ισχύ. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που μέση απόδοση ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού δεν ξεπερνάει το 35%.

1.3.1.4 Αντλίες

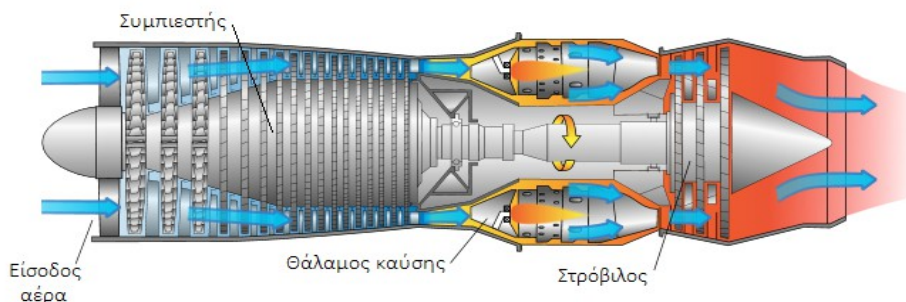
Οι αντλίες αυξάνουν την πίεση του υπόψυκτου νερού που εξέρχεται από τον ατμοπαραγωγό και τροφοδοτούν με αυτό τον ατμοπαραγωγό, κλείνοντας τον κύκλο. Το έργο που δαπανάται σε αυτές θεωρείται αμελητέο σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις, και είναι ακριβώς το στοιχείο που κάνει τον ατμοστροβιλικό κύκλο να υπερτερεί του αεριοστροβιλικού.

1.3.2 Αεριοστρόβιλοι

Η βασική αρχή λειτουργίας του αεριοστρόβιλου είναι η ίδια με τον ατμοστρόβιλο. Για να παραχθεί μηχανική ισχύς πρέπει ένα αέριο σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία να περάσει μέσα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη πτερωτή. Για να παραχθεί αυτό το αέριο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός δοχείου υψηλής πίεσης σε σχέση με το περιβάλλον. Το δοχείο αυτό θα πρέπει να τροφοδοτείται διαρκώς έτσι ώστε το ρεύμα αέρα το οποίο κινεί τον στρόβιλο να είναι συνεχές. Αυτός ακριβώς είναι ο ρόλος του συμπιεστή σε έναν αεριοστρόβιλο. Αν ο αέρας που περιέχεται στο δοχείο είναι θερμός και η πίεση είναι αυξημένη, τότε η ορμή του, κατά την εκτόνωση, άρα και η ενέργεια που αποδίδεται στο στρόβιλο αυξάνεται. Η αλλαγή των καταστατικών μεγεθών του εργαζόμενου μέσου (μείγμα καυσίμου - αέρα) επιτυγχάνεται με την καύση του.

Στην περίπτωση του ατμοστρόβιλου ως εργαζόμενο μέσο θεωρείται ο ατμός ενώ στην περίπτωση του αεριοστρόβιλου εργαζόμενο μέσο θεωρούνται τα καυσαέρια που παράγονται από την καύση του μείγματος καυσίμου - αέρα. Άρα ο αεριοστρόβιλος είναι μηχανή εσωτερικής καύσης.

Στο Σχ. 1.4 φαίνονται τα βασικά μέρη ενός αεριοστροβίλου, τα οποία είναι ο συμπιεστής, ο θάλαμος καύσης και ο στρόβιλος.



Σχήμα 1.4: Αεριοστρόβιλος μονής ατράκτου

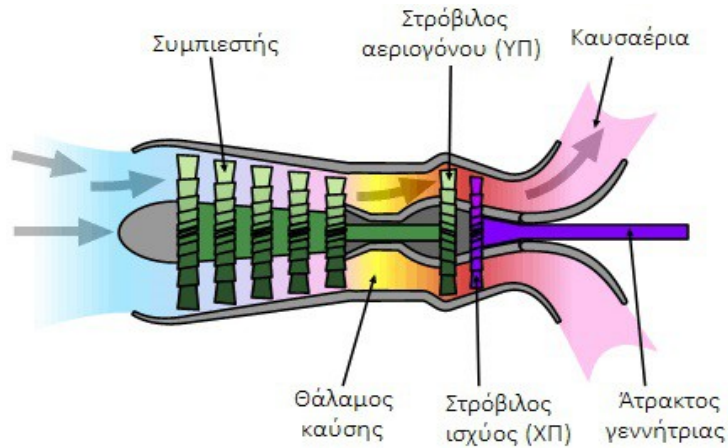
Ο συμπιεστής αυξάνει την πίεση του εργαζόμενου μέσου καταναλώνοντας ισχύ από αυτή που παράγεται στον στρόβιλο. Ο θάλαμος καύσης αυξάνει την θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου (που πλέον δεν είναι μόνο ο αέρας αλλά και τα καυσαέρια) καθώς καίει το καύσιμο που εγχέεται σε αυτόν. Ο στρόβιλος παράγει την ωφέλιμη ισχύ όπως και την ισχύ που ζητά ο συμπιεστής καθώς σε αυτόν εκτονώνονται τα καυσαέρια και αποβάλλονται σε χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία.

Το κύριο χαρακτηριστικό ενός αεριοστροβίλου είναι πως η ροή είναι συνεχής, δηλαδή σε μια συγκεκριμένη θέση της διάταξης υπάρχουν συνεχώς οι ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό των αεριοστροβίλων είναι πως τα κινούμενα μέρη τους εκτελούν μόνο περιστροφικές και όχι παλινδρομικές κινήσεις, γεγονός που τους καθιστά περισσότερο στιβαρές και ανθεκτικές κατασκευές.

Οι αεριοστρόβιλοι παρουσιάζουν χαμηλό βαθμό απόδοσης, περίπου 32%, αλλά εκτός από το χαμηλό τους κόστος κατασκευής και ιδιοκατανάλωσης (κάτω από 1%) έχουν κύριο πλεονέκτημα την γρήγορη ανάληψη φορτίου. Γι' αυτό και δεν χρησιμοποιούνται ως μονάδες βάσης αλλά ως μονάδες αιχμής (ρυθμίζουσες).

1.3.3 Αεριοστρόβιλοι διδύμων ατράκτων

Μια κύρια παραλλαγή ενός αεριοστροβίλου είναι η διάταξη με δύο ατράκτους όπου στην πρώτη είναι δεμένος ο συμπιεστής και ο στρόβιλος που παρέχει την αναγκαία ισχύ στον συμπιεστή (στρόβιλος Υψηλής Πίεσης) ενώ στην δεύτερη είναι δεμένος ο στρόβιλος που παράγει ωφέλιμο έργο (στρόβιλος Χαμηλής Πίεσης) και η γεννήτρια. Το συγκρότημα συμπιεστή-στροβίλου ΥΠ ονομάζεται *αεριογόνος*, καθώς παρέχει τα αναγκαία καυσαέρια για την κίνηση του στροβίλου ΧΠ. Η ζεύξη μεταξύ των δύο στροβίλων είναι θερμοϋδραυλική και όχι μηχανική. Η μορφή του παρουσιάζεται στο Σχ. 1.5 ενώ το σχηματικό του διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχ. 1.6.



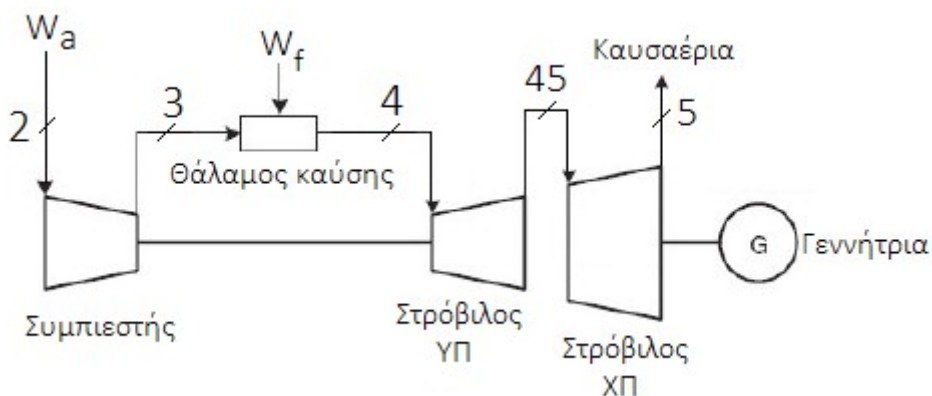
Σχήμα 1.5: Αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων

1.3.4 Ονομασία θέσεων αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων

Η περιγραφή μιας στροβιλομηχανής απαιτεί την ονομασία διαφόρων θέσεων κατά μήκος της. Στην παρούσα εργασία ακολουθείται η αρίθμηση των θέσεων που έχει οριστεί από την ASME [4] και παρατίθεται στον Πίν. 1.1:

Πίνακας 1.1: Αρίθμηση θέσεων στροβιλομηχανής

Αρίθμηση	Θέση
0	Ατμόσφαιρα
1	Είσοδος αγωγού εισόδου
2	Είσοδος συμπιεστή
3	Έξοδος συμπιεστή
4	Είσοδος στροβίλου
5	Έξοδος στροβίλου
6	Έξοδος μηχανής



Σχήμα 1.6: Ονομασία θέσεων αεριοστροβίλου κατά ASME

Οι ενδιάμεσες θέσεις ονομάζονται με διψήφιους αριθμούς. Το σχηματικό διάγραμμα του αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων παρουσιάζεται στο Σχ. 1.6. Στην παρούσα εργασία όμως, για λόγους απλότητας η θέση 45 ονομάζεται 5 και η θέση 5 ονομάζεται 6, όπως θα φανεί και παρακάτω (βλ. ενδ. Σχ. 2.1).

1.3.5 Συνδυασμένος κύκλος

Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου στηρίζονται στην αρχή της αξιοποίησης της θερμότητας των καυσαερίων ενός ή περισσότερων αεριοστροβίλων ώστε να παράξουν ατμό χωρίς επιπλέον δαπάνη καυσίμου. Τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου αντί να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα οδηγούνται σε έναν αμοπαγωγό / εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος, αξιοποιώντας την θερμική τους ισχύ παράγει ατμό που στη συνέχεια οδηγείται σε έναν αμοστρόβιλο.

Τα πλεονεκτήματα των μονάδων συνδυασμένου κύκλου είναι τα ακόλουθα:

- παρουσιάζουν αυξημένο θερμικό βαθμό απόδοσης, φτάνοντας πλέον το 60%, άρα εκτός από οικονομικότεροι θεωρούνται και φιλικότεροι προς το περιβάλλον,
- παρουσιάζουν γρήγορη απόκριση σε διαταραχές, δυνατότητα που οφείλεται στην ύπαρξη αεριοστροβίλου,
- παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία καυσίμου.

Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου διαφοροποιούνται με βάση διάφορα χαρακτηριστικά. Ένας κύριος διαχωρισμός έχει να κάνει με το πλήθος των αεριοστροβίλων και την μηχανική σύνδεση μεταξύ των στροβίλων και των γεννητριών. Εάν υπάρχουν δύο ή περισσότεροι αεριοστρόβιλοι και τα καυσαέρια τους καταλήγουν σε έναν αμοπαγωγό, ο οποίος κινεί έναν αμοστρόβιλο, τότε θα υπάρχουν αντίστοιχες γεννήτριες όπου η κάθε μία θα είναι δεμένη σε έναν στρόβιλο. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιούταν στο παρελθόν, ενώ τώρα τείνει να καθιερωθεί η συνδεσμολογία δύο αεριοστροβίλων που οδηγούν έναν αμοπαγωγό και έναν αμοστρόβιλο. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο αεριοστρόβιλοι και ο αμοστρόβιλος οδηγούν *μία* γεννήτρια.

Ως τώρα η συντριπτική πλειοψηφία των μονάδων συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιεί αεριοστρόβιλους απλής ατράκτου. Όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφ. 5, έχουν εμφανιστεί μονάδες συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων, σχεδιασμός που θα αποτελέσει και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

1.4 Στραγγαλισμένη ροή

Στην λειτουργία των στροβιλομηχανών διδύμων ατράκτων εμφανίζεται το φαινόμενο της στραγγαλισμένης ροής σε αγωγό, φαινόμενο το οποίο πρέπει να παρουσιαστεί αυτοτελώς. Αναλυτι-

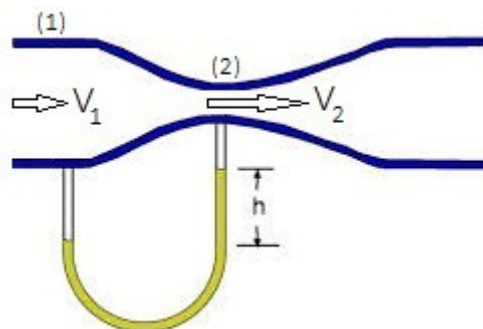
κότερη παρουσίαση μπορεί να βρεθεί στη σχετική βιβλιογραφία [4, 5, 6, 7, 19]. Το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε στην ροή των καυσαερίων διαμέσου του στροβίλου XII, όπως θα φανεί παρακάτω. Για την καλύτερη κατανόησή του πρέπει πρώτα να παρουσιαστεί το φαινόμενο Ventouri.

1.4.1 Φαινόμενο Ventouri

Το φαινόμενο Ventouri γενικά εμφανίζεται σε συμπιεστές ροές. Η παράμετρος που στραγγαλίζεται είναι η ταχύτητα του ρευστού και εμφανίζεται σε περιπτώσεις στένωσης αγωγού, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.7, όπου η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού συνοδεύεται από πτώση της στατικής του πίεσης. Συνδυάζοντας την εξίσωση Bernoulli με την εξίσωση συνέχειας προκύπτει ότι

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) \quad (1.9)$$

όπου με p συμβολίζεται η πίεση, με ρ η πυκνότητα και με V η ταχύτητα του ρευστού. Οι δείκτες στις πιέσεις και στις ταχύτητες αντιστοιχούν σε θέσεις ροής. Προκύπτει ότι η πίεση στο σημείο (2) θα είναι χαμηλότερη απ' ό,τι στο σημείο (1). Το φαινόμενο Ventouri απεικονίζεται στο σχήμα 1.7,



Σχήμα 1.7: Φαινόμενο Ventouri

όπου φαίνεται πως η πίεση του ρευστού στη θέση (2) είναι αρκετά μικρότερη απ' ό,τι στη θέση (1).

Ο στραγγαλισμός της ροής είναι ένα ρευστομηχανικό φαινόμενο το οποίο σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο Ventouri. Κρίσιμη για την κατανόηση του φαινομένου είναι η εξίσωση που δίνει την παροχή ενός ρευστού διαμέσου ενός αγωγού, όπου A είναι η διατομή του αγωγού, V η ταχύτητα του ρευστού και α η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας με την κάθετη στην επιφάνεια (το διάνυσμα της επιφάνειας):

$$\dot{m} = \rho A V \cos(\alpha) \quad (1.10)$$

Όταν ένα κινούμενο ρευστό, με δεδομένη πίεση και θερμοκρασία, διέλθει μέσω ενός αγωγού σε περιβάλλον χαμηλότερης πίεσης, τότε η ταχύτητά του αυξάνεται. Με υποχηητικές συνθήκες στα ανάντη της ροής, η αρχή διατήρησης της μάζας απαιτεί την αύξηση της ταχύτητας όπως αυτό ρέει

προς την έξοδο του αγωγού. Ταυτόχρονα, το φαινόμενο Ventouri επιβάλλει την μείωση της στατικής πίεσης, και έτσι, της πυκνότητας, στα κατάντη της ροής, μετά τον αγωγό.

1.4.2 Ολικά μεγέθη

Ο α' θερμοδυναμικός νόμος γράφεται για έναν όγκο αναφοράς [5] ως

$$\delta Q + \delta W = \underbrace{u_2 - u_1}_{\Delta U} + \underbrace{\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}}_{\Delta K} + \underbrace{g z_2 - g z_1}_{\Delta G} + \underbrace{v_2 p_2 - v_1 p_1}_{\Delta \text{εργ. εξ.}} \quad (1.11)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την διαφορά εσωτερικής ενέργειας, ο δεύτερος διαφορά κινητικής (με V συμβολίζεται η ταχύτητα του ρευστού), ο τρίτος διαφορά βαρυτικής (με z συμβολίζεται η υψομετρική διαφορά των ροών) και ο τέταρτος διαφορά έργων εξώθησης του ρευστού από τον όγκο ελέγχου. Όλα τα ενεργειακά μεγέθη είναι ειδικά (έχουν αναχθεί στην μάζα του ρευστού).

Θεωρώντας γνωστό τον ορισμό της ενθαλπίας, αγνοώντας τις ενεργειακές μεταβολές λόγω βαρύτητας και ορίζοντας ρυθμούς μεταβολής της θερμότητας και του έργου μέσω του γινομένου του β' μέλους της (1.11) με την ροή μάζας, προκύπτει πως

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[h + \frac{V^2}{2} \right]_{in}^{out} \quad (1.12)$$

Το μέγεθος στις αγκύλες ονομάζεται ολική ενθαλπία (total enthalpy) και συμβολίζεται ως h_t . Η ολική ενθαλπία ορίστηκε επειδή δεν μπορούν να αγνοηθούν οι ενεργειακές μεταβολές λόγω διαφοράς κινητικής ενέργειας αφού, λόγω της αλλαγής της πυκνότητας, οι αλλαγές στην ταχύτητα δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Κατά τους ίδιους συλλογισμούς [5], η ολική θερμοκρασία ορίζεται ως

$$T_t = T + \frac{V^2}{2 C_p} \quad (1.13)$$

Ο αριθμός Mach ορίζεται ως

$$M \equiv \frac{V}{\sqrt{\gamma R_g T}} \quad (1.14)$$

όπου γ είναι ο ισεντροπικός εκθέτης, R_g η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η στατική θερμοκρασία. Επομένως η σχέση που συνδέει την ολική και την στατική θερμοκρασία μέσω του αριθμού Mach θα είναι

$$T_t = T \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \quad (1.15)$$

η οποία ισχύει τόσο για ασυμπίεστο όσο και για συμπιεστό ρευστό. Με αφετηρία την (1.15) και τις σχέσεις ισεντροπικής ροής, δηλαδή τις

$$\begin{aligned} \frac{T_t}{T} &= 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \\ \frac{p_t}{p} &= \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{\rho_t}{\rho} &= \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \end{aligned} \quad (1.16)$$

και την εξίσωση των τελείων αερίων,

$$\frac{p}{\rho} = R_g T \quad (1.17)$$

η (1.10) θα γίνει

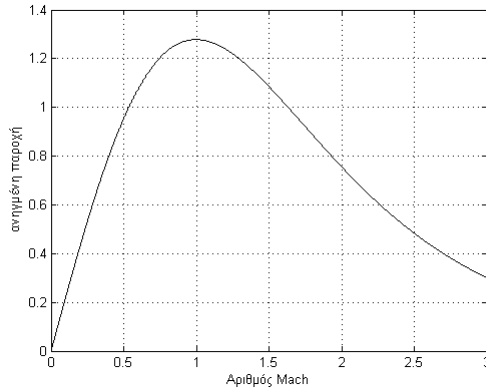
$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho A M \sqrt{\gamma R_g T} \cos(a) = \rho_t \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} A M \sqrt{\gamma R_g T} \cos(a) \Rightarrow \\ \dot{m} &= p_t \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-1} \frac{1}{R_g T} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} A M \sqrt{\gamma R_g T} \cos(a) \Rightarrow \\ \dot{m} &= A p_t \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{\gamma}{R_g T}} \cos(a) M \Rightarrow \\ \dot{m} &= A p_t \sqrt{\frac{\gamma}{R_g T_t}} \cos(a) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} M \end{aligned} \quad (1.18)$$

Η τελευταία από τις (1.18) μπορεί να γραφτεί και ως

$$\frac{\dot{m} \sqrt{T_t}}{p_t} = A \sqrt{\frac{\gamma}{R_g}} \cos(a) \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} M \quad (1.19)$$

Θεωρώντας μια σταθερή διατομή A και μια σταθερή γωνία εισόδου α , τότε προκύπτει πως το μέγεθος $\frac{\dot{m} \sqrt{T_t}}{p_t}$, το οποίο ονομάζεται ανηγμένη παροχή, παραμένει σταθερό κατά μήκος ενός αγωγού, ανεξάρτητα από το πόσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ή η πίεσή του. Η μόνη του εξάρτησή είναι από τον αριθμό Mach κατά τρόπο όμως ο οποίος παρουσιάζει ολικό μέγιστο. Η (1.19) έχει

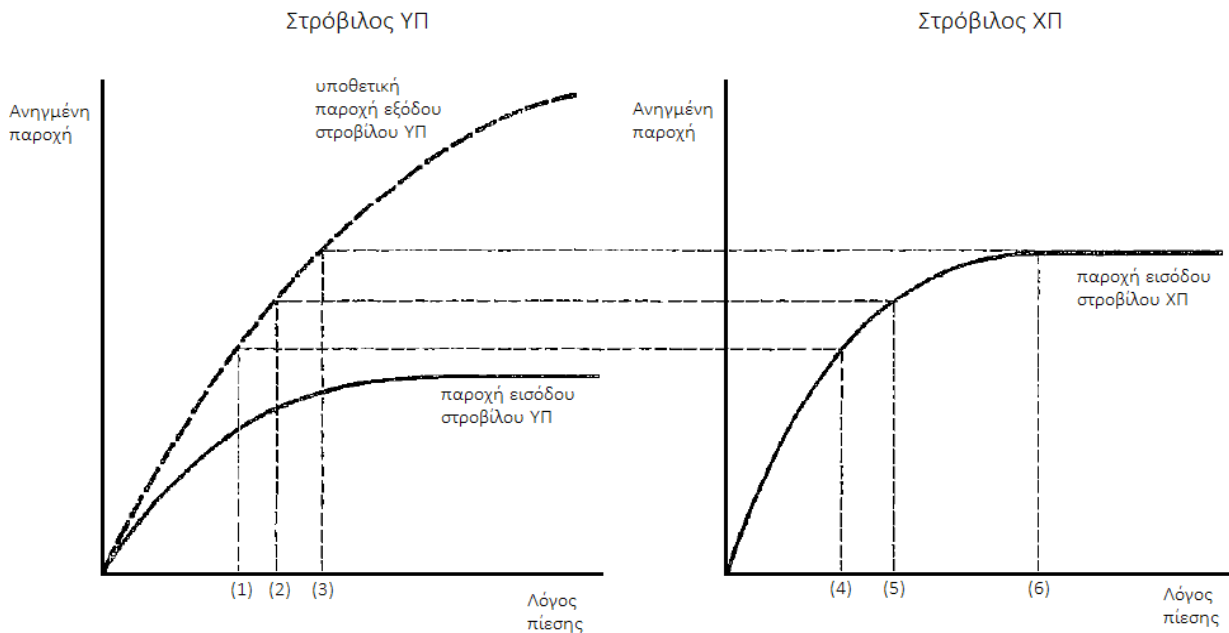
τη μορφή του Σχ. 1.8, για $\gamma = 1,4$ και $R_g = 0,287$.



Σχήμα 1.8: Σχέση ανηγμένης παροχής - αριθμού Mach

με μέγιστη τιμή ανηγμένης παροχής την τιμή 1,278.

Η συμπεριφορά της παροχής μπορεί να αναδειχτεί και με το παρακάτω σχήμα [6, 4] το οποίο αναφέρεται σε συνεχόμενους αγωγούς, ή, στην παρούσα εργασία, σε συνεχόμενους στρόβιλους (βλ. και υποενότητα 2.2.3).



Σχήμα 1.9: Στραγγαλισμένη ροή σε διαδοχικούς στρόβιλους

Ενώ η καμπύλη συσχέτισης ανηγμένης παροχής – λόγου πίεσης του στρόβιλου ΧΠ θα έπρεπε να είναι η διακεκομμένη γραμμή του πρώτου σχήματος, λόγω του στραγγαλισμού της ροής είναι η συνεχής του δεύτερου. Όπως φαίνεται, για λόγους αποτόνωσης του στρόβιλου ΧΠ πάνω από το σημείο (6) ο λόγος αποτόνωσης του στρόβιλου ΥΠ και η ανηγμένη παροχή αμφοτέρων των στρόβιλων θα έχουν κλειδωμένη τιμή, αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο (3) του πρώτου διαγράμματος. Γι'

αυτό έγινε η παραδοχή πως ο λόγος αποτόνωσης του στροβίλου ΥΠ είναι σταθερός και ίσος με τον ονομαστικό για υψηλά φορτία και πως ο μόνος που αλλάζει είναι ο λόγος αποτόνωσης του στροβίλου ΧΠ (βλ. παρ. 2.2.3.1).

Η σχέση που συνδέει τον λόγο συμπίεσης με τους λόγους αποτόνωσης κάθε στροβίλου είναι η

$$\pi_C = \pi_{T1} \pi_{T2} \quad (1.20)$$

Αν γίνει η παραδοχή πως ο λόγος πίεσης / αποτόνωσης είναι ανάλογος με την παροχή αέρα [23, 24, 31, 2], θα ισχύει ότι

$$\pi_i = \pi_i^o W_a \quad (1.21)$$

όπου i μπορεί να είναι ο συμπίεστής ή ένας στροβίλος. Πολλαπλασιάζοντας κάθε μέλος με την παροχή αέρα προκύπτει πως

$$W_a \pi_C = \pi_{T1} (\pi_{T2} W_a) \quad (1.22)$$

Άρα με την παραδοχή (1.21) ο ένας λόγος πρέπει να μένει ανεπηρέαστος.

1.5 Εξισώσεις καύσης

1.5.1 Αναλυτικά

Μια λεπτομερής ανάλυση του θαλάμου καύσης δίνεται στο [4]. Ξεκινώντας από τον 1^ο θερμοδυναμικό νόμο, η εφαρμογή του στον θάλαμο καύσης όπου η ροή είναι άεργη, δίνει

$$Q = H_{ig4} - (H_{ia3} + H_f) \quad (1.23)$$

όπου Q είναι η θερμότητα που συναλλάσσεται με το περιβάλλον, H_{ig4} και H_{ia3} είναι οι απόλυτες ενθαλπίες του μέσου καθώς εξέρχεται και εισέρχεται στον θάλαμο καύσης, αντίστοιχα, ενώ H_f είναι η ενθαλπία του καυσίμου. Οι αριθμοί υποδηλώνουν θέση μέτρησης της ενθαλπίας, το 3 αντιστοιχεί στην είσοδο του θαλάμου καύσης και το 4 στην έξοδό του (βλ. υποενότητα 1.3.4), ο δείκτης i υποδηλώνει τιμή αναφοράς (reference) ενώ οι δείκτες g , a και f υποδηλώνουν αντίστοιχα αέριο (gas), αέρα (air) και καύσιμο (fuel).

Η ενθαλπία του καυσίμου εξαρτάται τόσο από την πίεση και την θερμοκρασία του ως ρευστού που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης, όσο, πολύ περισσότερο, από την θερμογόνο δύναμή του,

η οποία προσδιορίζεται πειραματικά: η θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση μιας μονάδας μάζας του καυσίμου σε μια θερμοκρασία αναφοράς T_r αποτελεί την θερμογόνο δύναμή του. Άρα ισχύει ότι

$$Q = \underbrace{(H_{ig4} - H_{igr})}_{\text{ενθαλπία καυσαερίων}} - \underbrace{(H_{ia3} - H_{iar})}_{\text{ενθαλπία αέρα}} - \underbrace{(H_f - H_{fr})}_{\text{φυσική ενθαλπία καυσίμου}} + \underbrace{(H_{igr} - H_{iar} - H_{fr})}_{\text{χημική ενθαλπία καυσίμου}} \quad (1.24)$$

όπου τα σύμβολα H_{igr} , H_{iar} , H_{fr} υποδηλώνουν την απόλυτη ενθαλπία κάθε ρευστού σε συνθήκες αναφοράς, και χρησιμοποιούνται για την χρήση δεδομένων για τα ρευστά από πίνακες.

Ενώ η φυσική ενθαλπία του καυσίμου θα αφαιρεθεί, η χημική προφανώς θα προστεθεί, αφού το καύσιμο συνεισφέρει με την καύση του στην αύξηση της ενθαλπίας των προϊόντων (καυσαέρια). Ο τελευταίος όρος αποτελεί την χημική ενθαλπία του καυσίμου και όπως φαίνεται προκύπτει για καύση του καυσίμου σε συνθήκες αναφοράς, άρα είναι εξ ορισμού ίση με την θερμογόνο δύναμη του καυσίμου. Εισάγοντας τον λόγο καυσίμου προς αέρα, f , ο οποίος ορίζεται ως

$$f \equiv \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (1.25)$$

και για αδιαβατική καύση, δηλαδή για $Q = 0$, θα έχουμε:

$$\begin{aligned} 0 &= (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_{ig4} - h_{iar}) - \dot{m}_a(h_{ia3} - h_{iar}) - \dot{m}_f(h_f - h_r) + [(\dot{m}_a + \dot{m}_f)h_{igr} - \dot{m}_a h_{iar} - \dot{m}_f h_{fr}] \Rightarrow \\ &(1 + f)(h_{ig4} - h_{iar}) - (h_{ia3} - h_{iar}) - f(h_f - h_r) + [(1 + f)h_{igr} - h_{iar} - f h_{fr}] = 0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

όπου και στις δύο σχέσεις εμφανίζονται ειδικές ενθαλπίες πολλαπλασιαζόμενες με τις παροχές και όλη η δεύτερη σχέση διαιρέθηκε με την παροχή αέρα, \dot{m}_a . Ο τελευταίος όρος της (1.26), ο οποίος βρίσκεται σε αγκύλες, μπορεί να ξαναγραφτεί ως $-f q_f$. Επίσης, εισάγεται και ο βαθμός απόδοσης της καύσης, η_b , ο οποίος απεικονίζει την πραγματική ωφέλιμη θερμότητα που λαμβάνεται από μια καύση, δεδομένου ότι συνήθως εμφανίζονται και προϊόντα που θα μπορούσαν να αποδώσουν θερμική ισχύ (CO, αιθάλη), αλλά και επειδή λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τα προϊόντα της καύσης διασπώνται απορροφώντας ωφέλιμη θερμότητα. Τότε η (1.26) θα γίνει

$$(1 + f)(h_{ig4} - h_{iar}) = (h_{ia3} - h_{iar}) + f(h_f - h_r) + \eta_b f q_f \quad (1.27)$$

ή, για σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα, C_p , ισχύει ότι

$$(1+f)C_P^{gas}(T_{t4}-T_{tar})=C_P^{air}(T_{t3}-T_{tar})+fC_P^{fuel}(T_f-T_r)+\eta_b f q_f \quad (1.28)$$

Άρα αγνοώντας τα δεδομένα από πίνακες, αξιοποιώντας την σχέση αυτή υπολογιστικά μόνο θεωρώντας την καύση ως τέλεια διαδικασία (δηλαδή ότι $\eta_b = 1$) και αγνοώντας την φυσική ενθαλπία του καυσίμου, προκύπτει η [4]

$$(1+f)C_P^{gas}T_{t4}-C_P^{air}T_{t3}=f q_f \quad (1.29)$$

Η, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο λόγος καυσίμου προς αέρα, f ,

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_f)C_P^{gas}T_{t4}=\dot{m}_a C_P^{air}T_{t3} + \dot{m}_f q_f \quad (1.30)$$

Αυτή είναι η σχέση που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση του αεριοστροβίλου SGT 700 στο Κεφ. 4 καθώς για την χρήση του ήταν αναγκαίες κάποιες τιμές μεγεθών (μια από τις τρεις παροχές, αέρα, καυσίμου ή καυσαερίων) που δεν ήταν γνωστές για τον LM 2500+, όπως θα παρουσιαστεί στο Κεφ. 3.

Η T_{t4} δίνεται από την (1.29) ως συνάρτηση της παροχής αέρα. Η γενικότερη μορφή της θα είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} (\dot{m}_a + \dot{m}_f)C_P^{gas}T_{t4} &= \dot{m}_a C_P^{air}T_{t3} + \dot{m}_f q_f \Rightarrow \\ C_P^{gas}T_{t4} &= \frac{\dot{m}_a C_P^{air}T_{t3}}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} + \frac{\dot{m}_f q_f}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} \simeq C_P^{air}T_{t3} + \frac{\dot{m}_f q_f}{\dot{m}_a} \Rightarrow \\ T_{t4} &= A + \frac{B}{\dot{m}_a} \end{aligned} \quad (1.31)$$

όπου για να προκύψει μια εύληπτη σχέση θεωρήθηκε αμελητέα η παροχή του καυσίμου ως προς την παροχή αέρα.

Προέκυψε ένα εύλογο συμπέρασμα: Εάν αυξηθεί η παροχή αέρα τότε η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης θα μειωθεί, αφού θα υπάρχει περίσσεια αέρα η οποία θα ψύχει τα καυσαέρια. Το αντίθετο θα συμβεί εάν μειωθεί η παροχή: η θερμοκρασία θα αυξηθεί. Αυτός ο συλλογισμός θα αναπτυχθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο όπου προσομοιώνεται ο αεριοστροβίλος LM 2500+, καθώς θα πρέπει να αναπτυχθεί μια σχέση για τον θάλαμο καύσης ελλείψει άλλων στοιχείων.

1.5.2 Προσεγγιστική μορφή εξισώσεων καύσης

Η θερμοκρασία ενός σώματος εκφράζει την κινητική ενέργεια των μορίων του λόγω θερμικής

κίνησης. Εάν λοιπόν σε ένα σώμα (π.χ. στον αέρα που βρίσκεται στον θάλαμο καύσης) προσδοθεί ποσότητα θερμότητας (μέσω της καύσης), η ενέργεια αυτή θα κατανεμηθεί στο σύνολο των μορίων του αερίου αυξάνοντας την κινητική ενέργεια των μορίων, αυξάνοντας δηλαδή την θερμοκρασία. Για μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, το κλάσμα αυτής που θα απορροφήσει κάθε μόριο είναι αντιστρόφως ανάλογο του πλήθους των μορίων. Θεωρώντας επομένως μακροσκοπικά το φαινόμενο, παρατηρείται πως η αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητάς του για δεδομένο ποσό εκλυόμενης ενέργειας, ή αλλιώς, για το συγκεκριμένο παράδειγμα, για δεδομένη ποσότητα καυσίμου. Στην πραγματικότητα, εργαζόμενο μέσο είναι το μείγμα των καυσαερίων άρα η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας $W_a + W_f$, ωστόσο λόγω του γεγονότος ότι η ποσότητα καυσίμου είναι πολύ μικρή σχετικά με την ποσότητα με την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης μπορεί να αμεληθεί το W_f χωρίς σημαντικό σφάλμα [2, 1]. Τότε θα ισχύει ότι

$$T_{t4} = T_{t3} + (T_{t4}^o - T_{t3}^o) \frac{W_f}{W_a} \quad (1.32)$$

Στις αναπαραστάσεις των στροβιλομηχανών που θα ακολουθήσουν, θα χρησιμοποιηθεί άλλοτε η σχέση (1.29) και άλλοτε η (1.32) επειδή δεν ήταν σε όλες τις περιπτώσεις γνωστή κάποια πραγματική παροχή, ώστε να χρησιμοποιείται η ακριβέστερη (1.29).

1.5.3 Ρυθμός απόδοσης θερμότητας

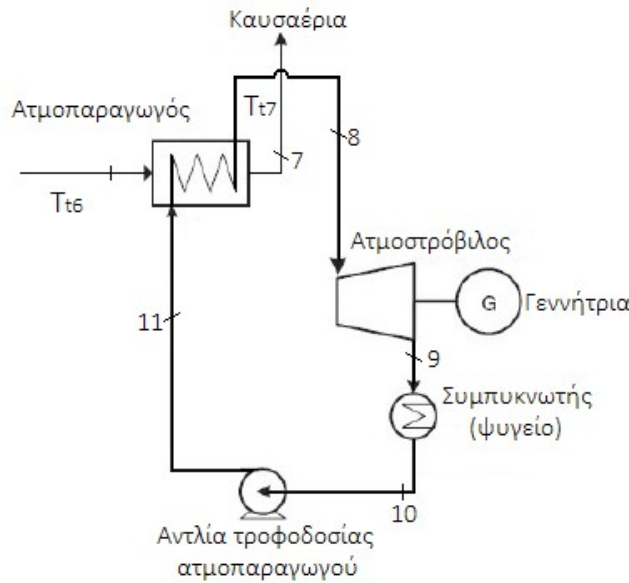
Ο ρυθμός απόδοσης θερμότητας ορίζεται ως το ηλίκο της παρεχόμενης ενέργειας (στο καύσιμο) προς την αποδιδόμενη ισχύ μιας μηχανής, και μετράται σε kJ/kWh [17, 18]. Η σχέση που τον προσδιορίζει είναι η

$$Q_{rate} = \frac{3.600 W_f q_f}{P_{T2}} \quad (1.33)$$

Ο ρυθμός απόδοσης θερμότητας είναι δείκτης απόδοσης μιας μηχανής.

1.6 Απόδοση ατμοπαραγωγού

Στο Κεφ. 5 παρουσιάζεται προσομοίωση σταθμού συνδυασμένου κύκλου. Η προσομοίωση στηρίζεται στην αναφορά [2], όπου παρατίθεται αναλυτική περιγραφή ενός τέτοιου τύπου σταθμού. Εδώ παρουσιάζεται ειδικά το κομμάτι που αφορά την απόδοση του συγκροτήματος ατμοπαραγωγού – ατμοστροβίλου. Το σχηματικό του διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχ. 1.10.



Σχήμα 1.10: Διάταξη παραγωγής και χρήσης ατμού

Η αρίθμηση των θέσεων για λόγους σαφήνειας ακολουθεί την αρίθμηση του αεριοστροβίλου, παρ' ότι οι δύο κύκλοι είναι ξεχωριστοί (αερίου / ατμού). Ατμοπαραγωγός θεωρείται ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος αναφέρεται ως ανακομιστής θερμότητας (heat recovery steam generator, HRSG) καθώς δεν καίγεται καύσιμο σε αυτόν αλλά παράγει ατμό χρησιμοποιώντας την θερμική ισχύ των καυσαερίων του αεριοστροβίλου.

Εάν θεωρηθεί πως τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου βρίσκονται σε μια θερμοκρασία T_{16} τότε μπορούν να αποδώσουν ισχύ ίση με

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ex} (h_{16} - h_{17}) \approx \dot{m}_{ex} C_{PT2} (T_{16} - T_{17}) \quad (1.34)$$

όπου η T_{17} είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων όταν εξέρχονται από τον ανακομιστή θερμότητας και απελευθερώνονται στο περιβάλλον.

Θεωρώντας πως η T_{17} είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την T_{16} και ακόμη ότι από την διαθέσιμη θερμική ισχύ ο ανακομιστής θερμότητας μπορεί να αντλήσει και να μεταφέρει στον ατμό ένα συγκεκριμένο ποσοστό αυτής, έστω η_{HRSG} , τότε ο ατμός θα παραλάβει θερμική ισχύ ίση με

$$\dot{Q}_{41} = \eta_{HRSG} \dot{m}_{ex} C_{PT2} T_{16} \quad (1.35)$$

όπου έχει αμεληθεί η T_{17} .

Εάν, τέλος, θεωρηθεί πως ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συγκροτήματος ατμοπαραγωγού – ατμοστροβίλου έχει σταθερό θερμικό βαθμό απόδοσης, έστω η_{θ} , η μηχανική ισχύς που θα αποδίδεται από τον ατμοστροβίλο θα είναι, σε φυσικές μονάδες, ίση με

$$P_{ST}^{[kW]} = \eta_{\theta} \eta_{HRSG} \dot{m}_{ex} C_{PT2} T_{16} \quad (1.36)$$

Επειδή η προσομοίωση πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ανηγμένων στη μονάδα παροχών, η ισχύς εξόδου του αμοστροβίλου θα είναι

$$P_{ST}^{[kW]} = \eta_{\theta} \eta_{HRSG} \underbrace{W_{ex} \dot{m}_{ex}^{ovo\mu.}}_{\dot{m}_{ex}} C_{PT2} T_{16} \quad (1.37)$$

Τέλος, η ισχύς του συγκροτήματος ατμού σε ανά μονάδα τιμές θα είναι

$$P_{ST} = \frac{\eta_{\theta} \eta_{HRSG} \dot{m}_{ex}^{ovo\mu.} C_{PT2}}{P_{\text{μονάδας}}^{[kW]}} W_{ex} T_{16} = K W_{ex} T_{16} \quad (1.38)$$

με προφανή τον ορισμό της σταθεράς K .

Φαίνεται πως η παραγωγή του συγκροτήματος ατμού είναι συνάρτηση τόσο της παροχής των καυσαερίων (ουσιαστικά της παροχής αέρα, αφού η παροχή καυσίμου μεταβάλλεται πολύ λίγο σε σχέση με την παροχή αέρα) όσο και της θερμοκρασίας τους. Στα συστήματα συνδυασμένου κύκλου υπάρχουν ελεγκτές που διατηρούν σταθερή την T_{16} , όπως θα φανεί όμως παρακάτω, σε διατάξεις με αεριοστροβίλο διδύμων ατράκτων, αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί.

1.7 Εξισώσεις κίνησης περιστρεφόμενων ατράκτων

Η κινητική ενέργεια μιας ατράκτου, στην περίπτωση που μελετάται της ατράκτου της γεννήτριας είτε της αεριογόνου, μπορεί να εκφραστεί ως [8]:

$$\frac{1}{2} J \omega_0^2 = H P_0 \quad (1.39)$$

όπου H είναι η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της ατράκτου, ω_0 η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας και P_0 η ονομαστική της ισχύς. Άρα η ανηγμένη σταθερά αδράνειας θα είναι

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_0^2}{P_0} \quad \text{και} \quad J = \frac{2 H P_0}{\omega_0^2} \quad (1.40)$$

Η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση μιας περιστρεφόμενης ατράκτου είναι ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα προσαρμοσμένος σε περιστροφικές κινήσεις:

$$J \frac{d\omega}{dt} \equiv J \dot{\omega} = T = \frac{P_m}{\omega} \quad (1.41)$$

όπου J είναι η ροπή αδράνειας, ω η γωνιακή ταχύτητα, T η ροπή και P_m η μηχανική ισχύς.

1.7.1 Αεριογόνος

Η (1.39) θα γίνει:

$$\frac{2 H_{gg} P_0 \dot{\omega}}{\omega_0^2} = \frac{P_m}{\omega} \Rightarrow 2 H_{gg} \frac{\dot{\omega}}{\omega_0} = \frac{P_m}{P_0} \frac{1}{\frac{\omega}{\omega_0}} \Rightarrow 2 H_{gg} \dot{N}_1 = \frac{P^{[pu]}}{N_1} \quad (1.42)$$

όπου το H δίνεται από την (1.40) και ως P_0 ορίζεται η ονομαστική ισχύς του στροβίλου ΥΠ, η οποία είναι ίση με την ισχύ του συμπιεστή. N_1 είναι οι στροφές της αεριογόνου σε ανά μονάδα τιμές.

1.7.2 Γεννήτρια

Η εξίσωση επιτάχυνσης της γεννήτριας είναι πιο απλή επειδή μπορεί να αμεληθεί το σφάλμα στροφών, αφού αυτό δεν υπερβαίνει το 2%. Άρα η (1.42) θα γίνει

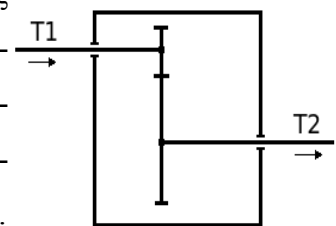
$$2 H_{pt} \dot{N}_2 = P^{[pu]} \quad (1.43)$$

αφού η ταχύτητα της γεννήτριας είναι πάντα ονομαστική, 1 α.μ.

1.7.3 Παράσταση μειωτήρα στροφών

Ένας μειωτήρας στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων) λειτουργεί όπως ένας μετασχηματιστής: η ισχύς που διέρχεται μέσω αυτού δεν μεταβάλλεται (αν εξαιρέσουμε τις απώλειες τριβών κλπ), όπως όμως σε έναν μετασχηματιστή μεταβάλλονται η τάση και το ρεύμα, σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων μεταβάλλονται οι στροφές και η ροπή που φέρουν οι άτρακτοι.

Η σχεδιαστική μορφή ενός κιβωτίου ταχυτήτων παρουσιάζεται παραπλεύρως, στο Σχ. 1.11, με τα βέλη να αναπαριστούν την ροή της ισχύος.



Σχήμα 1.11: Τυπικό διάγραμμα κιβωτίου ταχυτήτων

Ο οδοντωτός τροχός (γρανάζι) 1 ονομάζεται *πινιόν* ενώ ο οδοντωτός τροχός 2 ονομάζεται *κορώνα* ή *συνεργαζόμενος* [20].

Εάν αμεληθούν οι απώλειες, η διατήρηση της ισχύος (δηλαδή της ενέργειας) επιβάλλει ότι η ισχύς που εισέρχεται από το πινιόν θα είναι ίση με την ισχύ που εξέρχεται από τον συνεργαζόμενο, δηλαδή

$$T_1 \omega_1 = T_2 \omega_2 \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \alpha \quad (1.44)$$

Για να αθροιστούν οι ροπές αδράνειας θα πρέπει να αναχθούν στην ίδια πλευρά του μειωτήρα. Η (1.41) θα γίνει, από το πινιόν στον συνεργαζόμενο

$$J_2 \dot{\omega}_2 = T_2 \Rightarrow J_2 \alpha \dot{\omega}_1 = \frac{T_1}{\alpha} \Rightarrow J_2 \alpha^2 \dot{\omega}_1 = T_1 \quad (1.45)$$

Άρα οι ροπές αδράνειας σε κάθε πλευρά του μειωτήρα θα είναι

$$\begin{aligned} J_1'' &= J_2 \alpha^2, \\ J_2' &= \frac{J_1}{\alpha^2} \end{aligned} \quad (1.46)$$

όπου J_1'' είναι η ροπή αδράνειας του πινιόν στην πλευρά του συνεργαζόμενου και J_2' είναι η ροπή αδράνειας του συνεργαζόμενου στην πλευρά του πινιόν. Για να υπολογιστεί η συνολική ροπή αδράνειας θα πρέπει να προστεθούν οι ροπές υπολογισμένες στην ίδια πλευρά, δηλαδή

$$J_{\text{ολ.}} = \begin{cases} J_1 + J_1'' , & \text{ή} \\ J_2 + J_2' \end{cases} \quad (1.47)$$

ανάλογα με την πλευρά στην οποία γίνεται ο υπολογισμός.

1.8 Στοιχεία θεωρίας αυτομάτου ελέγχου

1.8.1 Εξισώσεις κατάστασης

Θεωρείται ένα γραμμικό (ή γραμμικοποιημένο σε κάποιο σημείο) χρονικά αμετάβλητο σύστημα με n μεταβλητές κατάστασης το οποίο περιγράφεται εν γένει από τις ακόλουθες, πρώτης τάξης, διαφορικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{z} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{z} \end{aligned} \quad (1.48)$$

\mathbf{x} : $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή t ,

\mathbf{y} : $q \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου τη χρονική στιγμή t ,

\mathbf{z} : $r \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου τη χρονική στιγμή t ,

\mathbf{A} : $n \times n$ πίνακας κατάστασης,

B : $n \times r$ πίνακας εισόδου,

C : $q \times n$ πίνακας εξόδου

D : $q \times r$ πίνακας πρόσω τροφοδότησης (feedforward matrix).

Εάν θεωρηθεί μηδενική είσοδος, δηλαδή $z=0$ τότε η πρώτη από τις (1.48) θα γίνει

$$\dot{x} = A x \quad (1.49)$$

η οποία τώρα περιγράφει την ελεύθερη απόκριση του συστήματος (απόκριση για μηδενική είσοδο).

Ο πίνακας κατάστασης A έχει λ ιδιοτιμές οι οποίες προκύπτουν από τις λύσεις της εξίσωσης

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (1.50)$$

Οι λύσεις της εξίσωσης (1.50) είναι οι ιδιοτιμές του συστήματος (1.48) και συμβολίζονται με λ . Στη θεωρία των γραμμικών αλγεβρικών συστημάτων οι ιδιοτιμές αποκαλούνται και χαρακτηριστικές τιμές. Οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι μοναδικές και ανεξάρτητες από την επιλογή των μεταβλητών κατάστασης και συμβολίζονται ως

$$\lambda_i = a_i + j b_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.51)$$

Οι ιδιοτιμές του συστήματος έχουν φυσική σημασία καθώς με τον μετασχηματισμό της συνάρτησης μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου οι ιδιοτιμές του πίνακα A γίνονται οι εκθέτες στις χρονικές συναρτήσεις που περιγράφουν την χρονική εξέλιξη του συστήματος. Εάν υπάρχει έστω και μια θετική ιδιοτιμή τότε το σύστημα (1.48) είναι ασταθές. Εάν υπάρχουν μιγαδικές ιδιοτιμές (πάντα σε συζυγή ζεύγη, αφού ο πίνακας A είναι πάντα πραγματικός καθώς περιγράφει φυσικό σύστημα) τότε το σύστημα παρουσιάζει ταλαντώσεις στην έξοδό του. Εάν όλες του οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος τότε είναι πάντα ευσταθές.

Ένα ζεύγος μιγαδικών ιδιοτιμών, έστω $\lambda_i = a_i \pm j b_i$, στο πεδίο του χρόνου εισάγει μια απόκριση της μορφής

$$y(t) = y(0) e^{a_i t} \cos(b_i t + \varphi_i) \quad (1.52)$$

σχέση η οποία ικανοποιεί μια διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξης, με τη γενική μορφή

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = 0 \quad (1.53)$$

Ο λόγος απόσβεσης ζ δείχνει το πόσο γρήγορα θα αποσβεστεί η ταλάντωση που περιγράφει η

μιγαδική ιδιοτιμή, ενώ το μέτρο ω_n ονομάζεται φυσική συχνότητα, μετράται σε r/s και εκφράζει την συχνότητα της ταλάντωσης που προκύπτει από την συγκεκριμένη ιδιοτιμή. Η χαρακτηριστική εξίσωση της (1.53) είναι η

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = (\lambda + \zeta\omega_n - j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})(\lambda + \zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (1.54)$$

άρα ισχύει ότι

$$a_i \pm j b_i = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (1.55)$$

όπου τα ζ και ω_n προκύπτουν ως

$$\zeta = \frac{-a}{\sqrt{a^2+b^2}}, \quad \omega_n = \sqrt{a^2+b^2} = |\lambda_i| \quad (1.56)$$

Αν αναπαρασταθεί ο μιγαδικός αριθμός λ_i σε πολικό διάγραμμα, το ω_n δείχνει το μέτρο του μιγαδικού αριθμού ενώ το ζ το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται με τον αρνητικό ημιάξονα των πραγματικών αριθμών. Η συχνότητα της ταλάντωσης, σε Hz, που θα επιφέρει ένας τέτοιος όρος, καθώς και η περίοδος της, σε s, θα είναι

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}, \quad T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (1.57)$$

Τέλος, εάν μια ιδιοτιμή είναι πραγματική, ορίζεται η αντίστοιχη σταθερά χρόνου τ , για την οποία ισχύει ότι

$$\tau_k = \frac{1}{|\lambda_k|} \quad (1.58)$$

1.8.2 Δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα

Τα δεξιά ιδιοδιανύσματα ενός πίνακα \mathbf{A} έχουν την ιδιότητα

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \lambda\mathbf{u} \quad (1.59)$$

δηλαδή εάν ικανοποιείται η (1.59) τότε ικανοποιείται η (1.50). Τότε η λ είναι η ιδιοτιμή του δεξιού ιδιοδιανύσματος \mathbf{u} . Για κάθε λύση της (1.50), δηλαδή για κάθε λ_i θα υπάρχει και το αντίστοιχό του ιδιοδιάνυσμα \mathbf{u}_i , ήτοι

$$\mathbf{A} \mathbf{u}_i = \lambda_i \mathbf{u}_i \quad (1.60)$$

Τα ιδιοδιανύσματα \mathbf{u} ονομάζονται *δεξιά ιδιοδιανύσματα* επειδή πολλαπλασιάζονται απ' τα δεξιά με τον πίνακα \mathbf{A} στην (1.60).

Ο πίνακας \mathbf{A} μπορεί να πολλαπλασιαστεί και από αριστερά με ένα διάνυσμα σειράς

$$\mathbf{v}_i \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{v}_i \quad (1.61)$$

Όπως και πριν ισχύει η (1.50) και το διάνυσμα \mathbf{v} ονομάζεται *αριστερό ιδιοδιάνυσμα* με ιδιοτιμή λ_i . Το αριστερό ιδιοδιάνυσμα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το δεξί ιδιοδιάνυσμα του ανάστροφου πίνακα \mathbf{A} , δηλαδή να θεωρηθεί το δεξί ιδιοδιάνυσμα του \mathbf{A}^T , αναστρέφοντας την (1.60).

Να αποσαφηνίσουμε εδώ ρητά πως στην παρούσα εργασία το δεξί ιδιοδιάνυσμα \mathbf{u} θεωρείται διάνυσμα-στήλη ενώ το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{v} θεωρείται διάνυσμα-γραμμή.

Εάν οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι διακριτές μεταξύ τους τότε για τα δεξιά και αριστερά ιδιοδιανύσματα \mathbf{u} και \mathbf{v} ισχύει ότι

$$\mathbf{v}_i \mathbf{u}_j = [v_{i1} \quad v_{i2} \quad \cdots \quad v_{in}] \begin{bmatrix} u_{1j} \\ u_{2j} \\ \vdots \\ u_{nj} \end{bmatrix} = \delta_{ij} \quad (1.62)$$

όπου το δ_{ij} είναι το δ του Kronecker, θεωρώντας ότι τα αριστερά ιδιοδιανύσματα είναι κανονικοποιημένα κατά συντελεστή τέτοιο ώστε το μη μηδενικό γινόμενο των δύο να είναι 1. Η μπορεί να γραφτεί επομένως ως

$$\mathbf{v}_i \mathbf{u}_i = 1 \quad (1.63)$$

Μπορεί τώρα να οριστεί ο $n \times n$ πίνακας \mathbf{U} ο οποίος έχει ως στήλες τα δεξιά ιδιοδιανύσματα και ο επίσης $n \times n$ πίνακας \mathbf{V} με γραμμές τα αριστερά ιδιοδιανύσματα του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} :

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n]^T = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (1.64)$$

Από τις σχέσεις (1.62) - (1.64) προκύπτει ότι

$$UV=VU=I \quad (1.65)$$

δηλαδή οι πίνακες U και V είναι αντίστροφοι.

1.8.3 Διαγωνιοποίηση του πίνακα A

Ο πίνακας A μπορεί πλέον να διαγωνιοποιηθεί ως εξής:

$$A=U^{-1}AU=VAU \quad (1.66)$$

Όταν οι ιδιοτιμές λ_i είναι διακριτές [22] ο πίνακας A θα είναι διαγώνιος με στοιχεία τις ιδιοτιμές του πίνακα A , δηλαδή

$$A=\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (1.67)$$

Η διαγωνιοποίηση προκύπτει ως εξής: Έστω ο μετασχηματισμός

$$x(t)=U\xi(t) \quad (1.68)$$

Από την (1.49) προκύπτει ότι

$$U\dot{\xi}=AU\xi \quad (1.69)$$

άρα

$$\dot{\xi}=VAU\xi \quad (1.70)$$

Το διαγώνιο σύστημα διαφορικών εξισώσεων (1.70) είναι πολύ εύκολο να λυθεί καθώς ορίζει n ανεξάρτητες διαφορικές εξισώσεις. Προκύπτει συνεπώς ότι

$$\xi_k(t)=\xi_k(0)e^{\lambda_k t}, \quad k=1,2,\dots,n \quad (1.71)$$

Το μέγεθος $\xi_k(t)$ εξαρτάται μόνο από τις ιδιοτιμές του συστήματος λ_i και ονομάζεται *ρυθμός απόκρισης*. Οι ιδιοτιμές του συστήματος προκύπτουν ως οι λύσεις της (1.50) αλλά η χρονική εξέλιξη μιας μεταβλητής κατάστασης, έστω της x_k , καθορίζεται από έναν γραμμικό συνδυασμό των ρυθμών απόκρισης.

Με το διάνυσμα ξ μπορεί να κατασκευαστεί κατά απλό και εμφανή τρόπο μια συνάρτηση ως

προς τον χρόνο με μία μόνο ιδιοτιμή του συστήματος αντί να βρίσκονται όλες οι ιδιοτιμές σε όλες τις συναρτήσεις. Αυτή η ανάλυση ανά ιδιοτιμή μοιάζει με φασματική ανάλυση, όπου το αποτέλεσμα της συνύπαρξης διαφόρων συχνοτήτων σε ένα σήμα μπορεί να αναλυθεί ως η συνισταμένη διαφόρων επιμέρους μονοχρωματικών συχνοτήτων (όπως είναι, π.χ., η ανάλυση Fourier). Καθώς στο αντικείμενο του αυτόματου ελέγχου υπάρχουν μεταβλητές κατάστασης και όχι μόνο σήματα συχνότητας, η ανάλυση αυτή ονομάζεται *ανάλυση ρυθμών* (modal analysis). Ο ρυθμός απόκρισης είναι η απεικόνιση στο πεδίο του χρόνου των αποκρίσεων που αντιστοιχούν στις ιδιοτιμές του συστήματος.

1.8.4 Ρυθμοί απόκρισης

Το διάνυσμα ξ ορίστηκε στην (1.68) και θα είναι

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{U} \xi(t) = \sum_{k=1}^n \mathbf{u}_k \xi_k(t) \quad (1.72)$$

ή, αναλυτικότερα,

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{bmatrix} \quad (1.73)$$

Λόγω της (1.65) προκύπτει ότι

$$\xi_k(t) = \mathbf{v}_k \mathbf{x}(t) \quad (1.74)$$

ή, αναλυτικότερα

$$\begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad (1.75)$$

Ο πρώτος δείκτης κάθε στοιχείου των πινάκων απεικονίζει το ρυθμό ενώ το δεύτερο την μεταβλητή κατάσταση. Από τις (1.72) - (1.75) προκύπτει η σημασία των δεξιών (\mathbf{u}) και αριστερών (\mathbf{v}) ιδιοδιανυσμάτων, καθώς και η ομοιότητα της ανάλυσης που θα γίνει με την φασματική ανάλυση. Η χρονική εξέλιξη κάθε μεταβλητής κατάστασης αναλύεται σε ένα άθροισμα ρυθμών και ο κάθε ρυθμός αναλύεται σε ένα άθροισμα μεταβλητών κατάστασης. Ειδικότερα, τα δεξιά ιδιοδιανύ-

σματα εκφράζουν το πόσο εμφανίζεται η κάθε μεταβλητή κατάστασης σε κάθε ρυθμό (παρατηρησιμότητα ρυθμού), ενώ τα αριστερά ιδιοδιανύσματα εκφράζουν το πόσο καθορίζεται ο κάθε ρυθμός από τις μεταβλητές κατάστασης (ελεγχισιμότητα ρυθμού).

Ο k ρυθμός εμφανίζεται σε κάθε μία από τις μεταβλητές κατάστασης x_i με μέγεθος ανάλογο προς το i στοιχείο του αντίστοιχου δεξιού ιδιοδιανύσματος \mathbf{u} . Αντίστροφα, το j στοιχείο του αριστερού ιδιοδιανύσματος \mathbf{v} δείχνει το πόσο επηρεάζει η μεταβλητή κατάστασης x_i την εμφάνιση του ρυθμού k , δηλαδή το πόσο συντελεί η μεταβλητή κατάστασης x_i στην διέγερση του ρυθμού k [8].

Με τον ορισμό του ρυθμού υπάρχει πλέον μια αναλυτική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης και των ιδιοτιμών του συστήματος στο πεδίο του χρόνου, όπου μέσω του κάθε ρυθμού μία μεταβλητή κατάσταση αντιστοιχίζεται με μία ιδιοτιμή. Άρα με κάποιες μαθηματικές διεργασίες μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την σχέση που έχουν κάθε φορά οι ιδιοτιμές με τις μεταβλητές κατάστασης. Ο ρυθμός είναι, μπορούμε να πούμε, μια μετασχηματισμένη μεταβλητή κατάσταση η οποία εμπεριέχει με σαφή τρόπο την απόκριση του συστήματος ανά κάθε ιδιοτιμή στο πεδίο του χρόνου. Ο μετασχηματισμός όμως αυτός δεν είναι 1-1 ώστε να συσχετίζει μία ιδιοτιμή με μία μεταβλητή κατάσταση παρά πραγματοποιείται με το σύνολο των τιμών των μεταβλητών κατάστασης και των ιδιοτιμών.

1.8.5 Ελεύθερη απόκριση μεταβλητών κατάστασης

Από την (1.73) φαίνεται ότι

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^n u_{ik} \zeta_k(t) \Rightarrow \quad (1.76)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= \sum_{k=1}^n u_{k1} \zeta_k(t) \\ x_2 &= \sum_{k=1}^n u_{k2} \zeta_k(t) \\ &\vdots \\ x_n &= \sum_{k=1}^n u_{kn} \zeta_k(t) \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ \vdots \\ u_{kn} \end{bmatrix} \zeta_k(t) = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ \vdots \\ u_{kn} \end{bmatrix} \zeta_k(0) e^{\lambda_k t} \quad (1.77)$$

όπου όλες οι ποσότητες στις (1.76) και (1.77) είναι βαθμωτές.

Για την ειδική περίπτωση των αρχικών τιμών η (1.74) δίνει, για κάθε k ρυθμό, ότι

$$\zeta_k(t) = \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{x}(t) \quad (1.78)$$

ή, αναλυτικότερα,

$$\xi_k(0) = \mathbf{v}_k \mathbf{x}(0) = [v_{k1} \ v_{k2} \ \cdots \ v_{kn}] \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ \vdots \\ x_n(0) \end{bmatrix} \quad (1.79)$$

Άρα η τελευταία των (1.77) θα γίνει

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ \vdots \\ u_{kn} \end{bmatrix} \xi_k(0) e^{\lambda_k t} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} u_{k1} \\ u_{k2} \\ \vdots \\ u_{kn} \end{bmatrix} [v_{k1} \ v_{k2} \ \cdots \ v_{kn}] \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ \vdots \\ x_n(0) \end{bmatrix} e^{\lambda_k t} = \sum_{k=1}^n \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \\ \vdots \\ x_n(0) \end{bmatrix} e^{\lambda_k t} \quad (1.80)$$

Τελικά η ελεύθερη απόκριση των μεταβλητών κατάστασης για αρχικές τιμές $\mathbf{x}(0)$ προκύπτει ως

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^n \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k \mathbf{x}(0) e^{\lambda_k t} \quad (1.81)$$

Είναι πλέον προφανές ότι η θέση μόνιμης κατάστασης $\mathbf{x}=\mathbf{0}$ του –γραμμικοποιημένου– συστήματος θα είναι ασυμπτωτικά ευσταθής εάν και μόνο εάν τα πραγματικά μέρη των ιδιοτιμών λ_k είναι όλα αρνητικά. Γεωμετρικά η συνθήκη αυτή είναι ισοδύναμη με την απαίτηση να βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιπίπεδο όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} .

Συμπερασματικά, η ελεύθερη απόκριση του χρονικά αμετάβλητου γραμμικοποιημένου συστήματος (1.48) είναι γραμμικός συνδυασμός n εκθετικών συναρτήσεων της μορφής $e^{\lambda_k t}$ που περιγράφουν τους n ρυθμούς ελεύθερης απόκρισης του συστήματος. Η μορφή του ρυθμού k (δηλαδή το πόσο εμφανίζεται σε κάθε μεταβλητή κατάσταση) περιγράφεται από το αντίστοιχο δεξιό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{u}_k του πίνακα \mathbf{A} και η απόκριση στο πεδίο του χρόνου από την αντίστοιχη ιδιοτιμή λ_k . Αντίστοιχα, το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{v}_k καθορίζει την επίδραση της κάθε μεταβλητής κατάστασης στον ρυθμό k [8].

1.8.6 Ευαισθησία ιδιοτιμών

Ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} προφανώς εξαρτάται από όλα τα κέρδη ενίσχυσης, τις σταθερές χρόνου κ.λπ. που υπάρχουν στο σύστημα. Για να φανεί πόσο επηρεάζει η κάθε παράμετρος μια

ιδιοτιμή πρέπει να προσδιοριστεί η ευαισθησία των ιδιοτιμών στις παραμέτρους (κέρδη, σταθερές χρόνου κλπ) που επηρεάζουν τον πίνακα κατάστασης \mathbf{A} .

Ο πιο απλός τρόπος για να γίνει αυτό είναι να υπολογιστεί η πρώτη παράγωγος της ιδιοτιμής ως προς τις παραμέτρους του συστήματος. Εάν η παράγωγος της ιδιοτιμής ως προς κάποια παράμετρο είναι μηδενική τότε η παράμετρος αυτή δεν επηρεάζει καθόλου την ιδιοτιμή. Εάν η παράγωγος είναι θετική τότε πρέπει να μειωθεί η εν λόγω παράμετρος για να μειωθεί η αλγεβρική ιδιοτιμή. Εάν η παράγωγος είναι μιγαδική και έχει μεγάλο πραγματικό μέρος τότε επηρεάζει έντονα το πραγματικό μέρος της ιδιοτιμής. Εάν έχει μικρό φανταστικό μέρος τότε η παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα της ταλάντωσης.

Η μέθοδος υπολογισμού της ευαισθησίας μιας ιδιοτιμής λ_k ως προς κάποια παράμετρο F του πίνακα \mathbf{A} υπολογίζεται με την μέθοδο που ανέπτυξαν οι Fadeev και Fadeeva η οποία παρουσιάστηκε από τον Van Ness και στην παρούσα εργασία αντλήθηκε από το [9].

Αρχικά παραγωγίζεται η (1.60) για την ιδιοτιμή k ως προς την επιθυμητή παράμετρο, έστω F . Η παράμετρος αυτή μπορεί να είναι, π.χ., κάποιο κέρδος ενίσχυσης.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} \mathbf{u}_k + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial F} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial F} \mathbf{u}_k + \lambda_k \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial F} \quad (1.82)$$

Στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται από αριστερά και τα δύο μέλη της (1.82) επί \mathbf{v}_k :

$$\mathbf{v}_k \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial F} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial F} \mathbf{v}_k \mathbf{u}_k + \lambda_k \mathbf{v}_k \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial F} \quad (1.83)$$

Οι δεύτεροι όροι του πρώτου και του δεύτερου μέλους είναι ίσοι σύμφωνα με την (1.61). Επομένως θα ισχύει ότι

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial F} = \frac{\mathbf{v}_k \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} \mathbf{u}_k}{\mathbf{v}_k \mathbf{u}_k} \quad (1.84)$$

Εάν, όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 1.8.2 το αριστερό ιδιοδιάνυσμα έχει κανονικοποιηθεί κατάλληλα ώστε να ισχύει η (1.63), ο παρονομαστής της (1.84) μπορεί να παραλειφθεί, άρα

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial F} = \mathbf{v}_k \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} \mathbf{u}_k \quad (1.85)$$

Ειδικότερα, η ευαισθησία της ιδιοτιμής λ_k ως προς το στοιχείο a_{ij} του πίνακα \mathbf{A} είναι

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial a_{ij}} = \mathbf{v}_k \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{ij}} \mathbf{u}_k = \mathbf{v}_{ki} \mathbf{u}_{kj} \quad (1.86)$$

καθώς

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial a_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} j\text{-στήλη} \\ \\ i\text{-γραμμή} \\ \\ \end{matrix} \quad (1.87)$$

άρα θα επιλεγθεί το i στοιχείο του διανύσματος \mathbf{v} και το j στοιχείο του διανύσματος \mathbf{u} . Αν η παράμετρος F επηρεάζει μόνο το στοιχείο a_{ij} η (1.85) θα απλοποιηθεί περαιτέρω:

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial F} = \mathbf{v}_{ki} \mathbf{u}_{kj} \frac{\partial a_{ij}}{\partial F} \quad (1.88)$$

Η ευαισθησία του στοιχείου a_{ij} ως προς την παράμετρο F μπορεί να βρεθεί είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά, καθώς

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} \simeq \frac{\mathbf{A}(F + \Delta F) - \mathbf{A}(F)}{\Delta F} \quad (1.89)$$

αφού

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial F} = \left[\frac{\partial a_{ij}}{\partial F} \right] \quad (1.90)$$

1.8.7 Συντελεστές συμμετοχής

Η (1.81) μπορεί να γραφτεί και ως

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^n \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k \mathbf{x}(0) e^{\lambda_k t} = \sum_{k=1}^n \mathbf{P}^k \mathbf{x}(0) e^{\lambda_k t} \quad (1.91)$$

Με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στην υποενότητα 1.8.5, το γινόμενο $\mathbf{P}^k = \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k$ είναι ένας πίνακας $n \times n$ διαστάσεων ο οποίος δείχνει, όπως φαίνεται από τις (1.80) και (1.81), το πόσο συμμετέχει η κάθε μεταβλητή κατάστασης σε κάθε ρυθμό k . Ο πίνακας \mathbf{P}^k ονομάζεται *πίνακας συντελεστών συμμετοχής* της ιδιοτιμής λ_k :

$$P^k = \begin{bmatrix} u_{k1} v_{k1} & u_{k1} v_{k2} & \cdots & u_{k1} v_{kn} \\ u_{k2} v_{k1} & u_{k2} v_{k2} & \cdots & u_{k2} v_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{kn} v_{k1} & u_{kn} v_{k2} & \cdots & u_{kn} v_{kn} \end{bmatrix} \quad (1.92)$$

Το πρώτο γράμμα της αρίθμησης των στοιχείων του κάθε ιδιοδιανύσματος συμφωνεί με τον ρυθμό ενώ το δεύτερο με την μεταβλητή κατάσταση.

Ειδικότερα, το διαγώνιο στοιχείο p_{ii}^k ορίζει το συντελεστή συμμετοχής της i μεταβλητής κατάστασης στον k ρυθμό και δίνεται από το γινόμενο του i στοιχείου του αριστερού επί το i στοιχείο του δεξιού ιδιοδιανύσματος που αφορούν τον k ρυθμό.

Με βάση όσα αναπτύχθηκαν για την ευαισθησία των ιδιοτιμών, εάν $i=j$ και $F=a_{ii}$ τότε, με βάση την (1.88), η ευαισθησία της ιδιοτιμής λ_k στο διαγώνιο στοιχείο a_{ij} είναι

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial a_{ii}} = v_{ki} u_{ki} = p_{ki} \quad (1.93)$$

δηλαδή είναι ίση με τον συντελεστή συμμετοχής.

Φαίνεται εδώ ότι ο συντελεστής συμμετοχής δείχνει το πόσο εξαρτάται μια ιδιοτιμή από το διαγώνιο στοιχείο του πίνακα \mathbf{A} , το οποίο, ως γνωστόν, δείχνει την εξάρτηση της παραγώγου μιας μεταβλητής κατάστασης από τον εαυτό της.

Ως δείκτης ευαισθησίας των ιδιοτιμών, το μέτρο του συντελεστή συμμετοχής καθορίζει ποιά μεταβλητή κατάσταση επηρεάζει περισσότερο τη μετατόπιση μιας ιδιοτιμής. Μικρή τιμή του μέτρου σημαίνει μικρή επίδραση της συγκεκριμένης μεταβλητής κατάστασης στον εν λόγω ρυθμό, δηλαδή η μεταβολή του αντίστοιχου διαγώνιου στοιχείου του πίνακα κατάστασης αφήνει ανεπηρέαστο το ρυθμό. Το πρόσημο του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής καθορίζει το προς τα πού θα μετατοπιστεί η ιδιοτιμή σε μια μεταβολή του διαγώνιου στοιχείου του πίνακα κατάστασης. Μεγάλη τιμή του φανταστικού μέρους δείχνει ότι η συχνότητα του ρυθμού θα επηρεαστεί σημαντικά. Μεγάλη αρνητική τιμή του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής δείχνει πως εάν το διαγώνιο στοιχείο a_{ii} αυξηθεί τότε η ιδιοτιμή θα μετατοπιστεί προς τα αριστερά οπότε θα αυξηθούν τα περιθώρια ευστάθειας του συστήματος. Αντίθετα, μεγάλη θετική τιμή του πραγματικού μέρους του συντελεστή συμμετοχής δείχνει ότι το διαγώνιο στοιχείο a_{ii} θα πρέπει να μειωθεί για να μετατοπιστεί προς τα αριστερά η ιδιοτιμή και έτσι να αυξηθεί το περιθώριο ευστάθειας του συστήματος [11].

1.9 Σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην αναλυτικότερη μελέτη και πιθανή βελτίωση του μοντέλου αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων, όπως αυτό έχει παρουσιαστεί στην αναφορά [1] καθώς επίσης και στην οικοδόμηση μοντέλου σταθμού συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων, στηριζόμενη στην αναφορά [2]. Για την ανάλυση της ευστάθειας των μοντέλων η παρούσα εργασία στηρίχθηκε στα εργαλεία ανάλυσης δυναμικών συστημάτων όπως αυτά αντλήθηκαν στις αναφορές [3, 9, 11].

Η απόπειρα βελτίωσης του μοντέλου διδύμων ατράκτων κινήθηκε στις ακόλουθες κατευθύνσεις:

1. Αναζητήθηκαν στοιχεία πραγματικών μηχανών από την βιομηχανία αεριοστροβίλων και γεννητριών, με σκοπό η παρούσα εργασία να κατασταθεί περισσότερο ρεαλιστική, άρα και περισσότερο έγκυρη. Ας μας επιτραπεί όμως να σημειώσουμε κατ' αρχήν πως η συνεργασία πανεπιστημίου και βιομηχανίας, παρ' ότι από τεχνικής άποψης είναι σίγουρα ευκαταία, δεν θα πρέπει να γίνεται χωρίς καμία περίσκεψη [32, 33].

Βρέθηκαν οι ροπές αδράνειας, οι ονομαστικές θερμοκρασίες λειτουργίας, οι βαθμοί απόδοσης (ισεντροπικοί και θερμικοί) και οι παροχές αέρα και καυσίμου που αφορούν τον αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων SGT 700 και τον ατμοστρόβιλο SST 150, αμφότερων προϊόντων της εταιρείας Siemens, και η ροπή αδράνειας και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της γεννήτριας AMS 1120LK 4PBS, η οποία είναι προϊόν της εταιρείας ABB. Αναζητήθηκαν στοιχεία ειδικά για αυτή τη γεννήτρια καθώς είναι η προτεινόμενη προς συνεργασία με τα προαναφερθέντα μοντέλα στροβιλομηχανών από την εταιρεία Siemens. Εκτός από την ροπή αδράνειας του δρομέα της γεννήτριας βρέθηκαν μάλιστα επιπλέον στοιχεία (X_d , X_d' κ.λπ.), τα οποία παρατίθενται στο Παράρτημα Ε.

Για τον αεριοστρόβιλο LM 2500+, της εταιρείας General Electric δυστυχώς δεν βρέθηκαν ανάλογα στοιχεία, καθώς η αναφορά [30] είναι εγχειρίδιο λειτουργίας και συντήρησης.

2. Προστέθηκε κλάδος ανάδρασης στο σύστημα καυσίμου με σκοπό την ταχύτερη απόκρισή του. Η ανάδραση έχει την μορφή που παρουσιάζεται στις αναφορές [23, 24, 25], δηλαδή είναι ένα βαθμωτό κέρδος, το οποίο όμως ενώ απεικονίζεται στα διαγράμματα βαθμίδων, λαμβάνει την τιμή μηδέν – άρα ο βρόχος ανάδρασης είναι ανοιχτός. Στις αναφορές δεν απεικονίζεται η αναγκαία προσθετική σταθερά ώστε η διάταξη να αρχικοποιηθεί σωστά. Στην παρούσα εργασία προστέθηκε και η κατάλληλη διάταξη αρχικοποίησης ώστε το σύστημα να λειτουργεί ομαλά. Το ζήτημα όμως διερευνάται στο Παράρτημα ΣΤ και προτείνεται στα Συμπεράσματα, στην ενότητα 6.2, μια εναλλακτική προσέγγιση του κλάδου ανάδρασης του σήματος καυσίμου.

3. Χρησιμοποιήθηκε πιο λεπτομερής αλγεβρική θερμοδυναμική σχέση στην περιγραφή του θαλάμου καύσης, όπως επίσης εντάχθηκαν με περισσότερη ακρίβεια οι μηχανικοί βαθμοί απόδοσης συμπιεστή και στροβίλου υψηλής πίεσης στις σχετικές εξισώσεις. Η χρησιμοποιούμενη στις αναφορές στις οποίες στηρίζεται αυτή η εργασία [1, 2] εξίσωση είναι η προτεινόμενη από τις αναφορές [23, 24, 25] αλγεβρική σχέση περιγραφής της λειτουργίας του θαλάμου καύσης, η οποία, ενώ είναι λογική, δεν είναι θερμοδυναμική. Αντ' αυτής, χρησιμοποιήθηκε η σχέση που προτείνεται στην αναφορά [4], όχι στην πλήρη της αναλυτική έκφραση μα σε μια μορφή που, σύμφωνα με την αναφορά [4], δίνει ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελέσματα. Με μία μόνο δοσμένη παροχή (είτε αέρα, είτε καυσίμου, είτε καυσαερίων), μπορούν να υπολογιστούν οι άλλες οπότε η προσομοίωση, με την εισαγωγή της νέας σχέσης για την περιγραφή του θαλάμου καύσης, μπορεί να διαχειριστεί και να αξιοποιήσει στοιχεία πραγματικών παροχών και όχι ανά μονάδα μεγεθών, επομένως και πραγματικών τιμών ισχύος (σε kW).

4. Μελετήθηκε η ευστάθεια του συστήματος χωρίς κλάδο ελέγχου των στροφών της αεριογόνου. Στην αναφορά [1] είχε προστεθεί κλάδος ελέγχου της ταχύτητας της αεριογόνου καθώς είχε γίνει θεώρηση ότι η αεριογόνος δεν είναι ευσταθές σύστημα. Στην παρούσα εργασία αποδεικνύεται ότι η αεριογόνος είναι ευσταθής και γενικά δεν χρειάζεται εξωτερικό έλεγχο, προκύπτει όμως ακόμη πως η ρύθμιση της παροχής αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον έλεγχο της ταχύτητας της αεριογόνου και όχι για τον έλεγχο της θερμοκρασίας των καυσαερίων, όπως μπορεί να γίνει σε αεριοστροβίλους απλής ατράκτου. Η ταχύτητα της αεριογόνου μπορεί να μην έχει τόσο μεγάλο εύρος διακύμανσης εάν αξιοποιηθεί η μεταβολή του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων του αέρα εισόδου.

5. Προσδιορίστηκε μια απλή μέθοδος ρύθμισης των παραμέτρων της κάθε αναπαράστασης ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική λειτουργία. Στην παρούσα εργασία δεν καταστρώθηκαν συναρτήσεις βελτιστοποίησης οπότε δεν γίνεται αναφορά σε “βελτιστοποίηση” του εκάστοτε συστήματος, αλλά σε ικανοποιητική απόδοση και λειτουργία του. Για να γίνει η ρύθμιση ήταν αναγκαία η γραμμικοποίηση του εκάστοτε μοντέλου στο σημείο λειτουργίας απ' όπου ξεκινούσε η προσομοίωση και ο προσδιορισμός των ιδιοτιμών του και των λόγων απόσβεσης ζ που εμφανίζει κάθε μοντέλο. Ως ένα δεύτερο, ανεξάρτητο κριτήριο όμως αξιοποιήθηκαν και στατιστικές μέθοδοι. Λόγω των διαφορετικών κριτηρίων που ορίστηκαν, η τελική επιλογή γινόταν με επισκόπηση της απόκρισης στην οποία οδηγούσε κάθε απαίτηση.

Το μοντέλο σταθμού συνδυασμένου κύκλου με αεριοστροβίλο διδύμων ατράκτων αποτελείται από το μοντέλο αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων ανοιχτού κύκλου στο οποίο προστίθενται οι

σταθερές χρόνου που αναπαριστούν τον αμοπαγωγό και τον αμοστρόβιλο.

Η διάρθρωση των κεφαλαίων γίνεται ως εξής: στο 1ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ειδικές θεωρητικές αρχές στις οποίες στηρίχθηκε η παρούσα εργασία. Το γενικό πλαίσιο αρχών λειτουργίας των στροβιλομηχανών παρατίθεται στην βιβλιογραφία [4, 5, 6, 7] ενώ το αντίστοιχο αυτομάτου ελέγχου στις αναφορές [13, 14, 15, 16]. Παρουσιάζονται κάποια ειδικά ζητήματα ρευστομηχανικής, όπως το φαινόμενο Ventougi και ο στραγγαλισμός της ροής, και κάποια ειδικά ζητήματα αυτομάτου ελέγχου, όπως μέθοδοι γραμμικοποίησης συστημάτων και ανάλυσής τους μέσω ανάλυσης ρυθμών, ιδιοδιανυσμάτων και συντελεστών συμμετοχής. Γίνεται επίσης αναφορά στον τρόπο ρύθμισης των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος.

Στο 2ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πλαίσιο εντός του οποίου οικοδομήθηκαν οι αναπαραστάσεις προσομοίωσης, σε περιβάλλον Simulink. Παρουσιάζονται οι αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν τις στροβιλομηχανές και τα στοιχεία αυτομάτου ελέγχου (μετρητές, ρυθμιστές, ελεγκτές), τόσο ως προς την φυσική τους συμπεριφορά όσο και ως προς την μαθηματική τους περιγραφή. Στο τέλος του 2ου κεφαλαίου παρουσιάζονται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής αναφοράς [1] τα οποία κλήθηκε η παρούσα εργασία να μελετήσει.

Στο 3ο κεφάλαιο προσομοιώνεται αρχικά το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην [1] όπου έχει προστεθεί κλάδος ανάδρασης στο σύστημα καυσίμου, μέσω του οποίου επιχειρείται να βελτιωθεί η απόκριση όλου του συστήματος. Κατόπιν, προσομοιώνεται το σύστημα χωρίς την ύπαρξη κλάδου ελέγχου στροφών αεριογόνου και μελετάται το κατά πόσο αυτό παραμένει ευσταθές.

Στο 4ο κεφάλαιο χρησιμοποιείται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο 3ο όπου ο θάλαμος καύσης περιγράφεται με λεπτομερέστερη εξίσωση και για τις ροπές αδράνειας των ατράκτων κάθε συνιστώσας εισάγονται δεδομένα από τη βιομηχανία [28, 29], σε μια προσπάθεια να γίνει περισσότερο ρεαλιστική η προσομοίωση. Πλέον τα μεγέθη των παροχών (αέρα και καυσίμου) υπολογίζονται σε φυσικές μονάδες και όχι σε κανονικοποιημένες.

Στο 5ο κεφάλαιο οικοδομείται η αναπαράσταση του συστήματος συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων. Στο κομμάτι της αμοπαγωγής χρησιμοποιήθηκαν επίσης στοιχεία από τη βιομηχανία [28], στο κομμάτι των μεγίστων θερμοκρασιών και του βαθμού απόδοσης του αμοπαγωγού. Οι θεωρούμενες σταθερές χρόνου αντλήθηκαν από την σχετική βιβλιογραφία [2, 23, 24, 25].

Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ευρήματα και τα συμπεράσματα της εργασίας, τα καθήκοντα που απορρέουν από την παρούσα μελέτη και οι δυνατότητες που εμφανίζονται στο πεδίο της προσομοίωσης συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

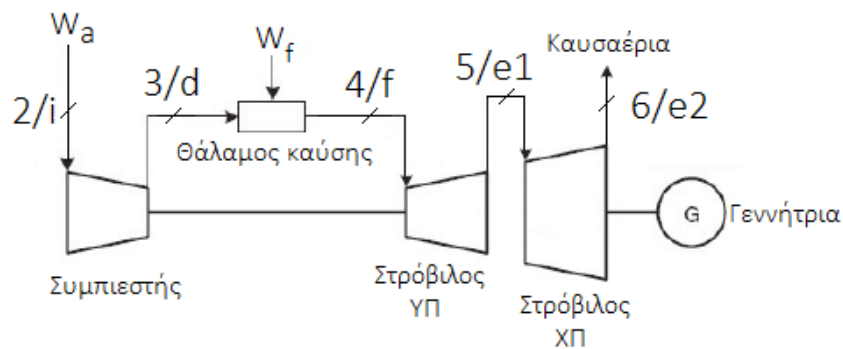
Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κώδικες Matlab που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων, ενώ στο Παράρτημα Β τα αποτελέσματα της διαδικασίας ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας του ίδιου συστήματος. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα πεδία χαρακτηριστικών του αεριοστροβίλου Siemens SGT 700 όπως αυτά διαμορφώθηκαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης αεριοστροβίλων Proosis, το οποίο προτείνεται ως προοπτική της παρούσας εργασίας. Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζονται το συμβολικά και τα φυσικά διαγράμματα βαθμίδων των προγραμμάτων Simulink και Proosis, που αφορούν τον τρόπο συνεργασίας των δύο προγραμμάτων, την υλοποίηση της συνεργασίας στο Simulink και την προσομοίωση του αεριοστροβίλου στο Proosis. Στο Παράρτημα Ε παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία της γεννήτριας ABB AMS 1120 LK 4PBS, και στο Παράρτημα ΣΤ επιχειρείται μια διερεύνηση του μηχανισμού τροφοδοσίας καυσίμου, διερεύνηση που παρουσιάζεται επίσης ως μια δυνάμει προοπτική της παρούσας εργασίας.

2ο Κεφάλαιο: ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΔΙΔΥΜΩΝ ΑΤΡΑΚΤΩΝ

Ο γενικός τρόπος παράστασης των στροβιλομηχανών, των γεννητριών και των ελεγκτών τους ακολουθεί την εργασία [1] όπου και εκτίθεται αναλυτική θερμοδυναμική και ρευστομηχανική ανάλυση.

2.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Ο αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων έχει την μορφή του Σχ. 2.1. Οι αριθμοί και τα γράμματα απεικονίζουν την ονομασία κάθε θέσης στην μηχανή. Οι αριθμοί ακολουθούν την ονομασία κατά ASME [4] (βλ. υποενότητα 1.3.4) με εξαίρεση τις θέσεις 5 (όπου έπρεπε να ονομαστεί 45) και 6 (η οποία έπρεπε να ονομαστεί 5), επιλογή που λήφθηκε για λόγους ευκολίας κατανόησης.



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση αεριοστρόβιλου διδύμων ατράκτων

Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος που περιγράφεται στην παρούσα εργασία έχει την μορφή του Σχ. 2.2. Υπάρχουν δύο κύριοι κλάδοι ελέγχου (κλάδοι 1 και 2), οι οποίοι ρυθμίζουν την παροχή καυσίμου, W_f , και δύο υποκλάδοι (κλάδοι 3 και 4) οι οποίοι ρυθμίζουν την παροχή αέρα, W_a . Η λεπτομερής παρουσίαση του κάθε στοιχείου / κλάδου γίνεται σε επόμενο σημείο της εργασίας.

Πυρήνας του διαγράμματος του Σχ. 2.2 είναι οι θερμοδυναμικές εξισώσεις. Αυτές αναπαριστούν την θερμική στροβιλομηχανή, είτε αυτή είναι αεριοστρόβιλος απλής ατράκτου, είτε αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων. Όλα τα δυναμικά φαινόμενα θερμικών μεταβολών, όπως φαινόμενα μεταφοράς ενέργειας και μάζας, θερμοχωρητικότητες των μεταλλικών στοιχείων της μηχανής, μεταβολές μεγεθών λόγω διαστολών / συστολών κ.λπ., περιγράφονται με την εισαγωγή σταθερών χρόνου (συναρτήσεις μεταφοράς πρώτης τάξης), οι οποίες προσομοιώνουν τη μη ακαριαία μεταβολή από τη μία θέση θερμοδυναμικής ισορροπίας στην επόμενη κατά τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας.

Η γεννήτρια αναπαρίσταται ως μηχανική αδράνεια και δεν λαμβάνονται υπ' όψη τα ηλεκτρι-

κά της χαρακτηριστικά. Ο λόγος είναι ότι οι ηλεκτρικές σταθερές χρόνου είναι πολύ μικρότερες από τις μηχανικές οπότε τα ηλεκτρικά και τα μηχανικά μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να θεωρηθούν αποζευγμένα.

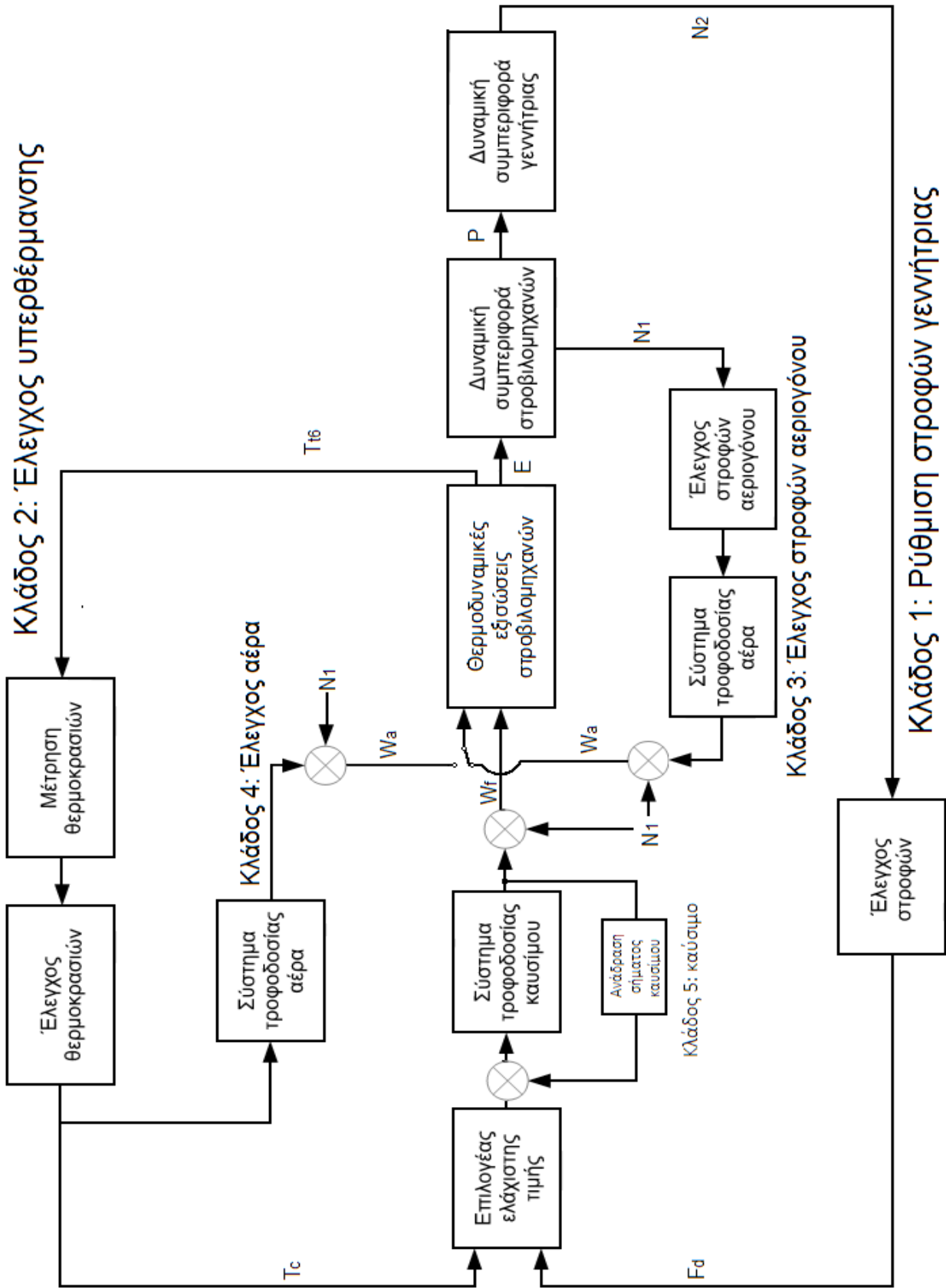
Τα στοιχεία ελέγχου χωρίζονται εν γένει σε μετρητικές και ελεγκτικές διατάξεις. Οι μετρητικές διατάξεις αναπαρίστανται κατά κύριο λόγο ως φυσικά συστήματα μίας σταθεράς χρόνου (συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης) ενώ οι ελεγκτές είναι κατά κύριο λόγο συγκριτές, ενισχυτές σημάτων και ενίοτε ολοκληρωτές σφάλματος.

Είναι σημαντικό να αποφανθούμε πως οι δύο υποκλάδοι ελέγχου *αέρα* (κλάδοι 3 και 4) που παρουσιάζονται στο Σχ. 2.2 δεν λειτουργούν ταυτόχρονα και δεν εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό. Σε δύο προσομοιώσεις συστήματος διδύμων ατράκτων ανοιχτού κύκλου εφαρμόζεται ο έλεγχος αέρα ούτως ώστε να ρυθμιστεί μέσω αυτού η ταχύτητα της αεριογόνου ενώ σε άλλες δύο γίνεται δοκιμή να λειτουργήσουν χωρίς έλεγχο αέρα (διατηρώντας σταθερό το άνοιγμα πτερυγίων). Ο υποκλάδος (4) χρησιμοποιείται σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, και όχι διδύμων ατράκτων. Παρουσιάζεται για λόγους καλύτερης εποπτείας.

Οι θερμοδυναμικές εξισώσεις των στροβιλομηχανών καθορίζουν την ισχύ των στροβίλων και του συμπιεστή καθώς και τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Ορίζονται εντός αυτοτελών χωριστών βαθμίδων. Είσοδοί τους είναι η παροχή αέρα, W_a , η παροχή καυσίμου, W_f και η ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πίεση. Καθώς όλες οι εξισώσεις είναι ορισμένες με βάση τους λόγους συμπίεσης και αποτόνωσης σε κάθε συνιστώσα της στροβιλομηχανής, η ατμοσφαιρική πίεση λαμβάνεται ουσιαστικά κανονικοποιημένη με τιμή 1 αμ. Έξοδοι των βαθμίδων των θερμοδυναμικών εξισώσεων είναι η μηχανική ισχύς και οι θερμοκρασίες λειτουργίας. Η ισχύς εξόδου καταλήγει στην γεννήτρια, όπου, σε περίπτωση αναντιστοιχίας μεταξύ προσφερόμενης μηχανικής ισχύος και ζητούμενης ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζει μεταβατική μηχανική συμπεριφορά (επιβράδυνση ή επιτάχυνση), ενώ οι θερμοκρασίες καταλήγουν σε αισθητήρες, αρχικά, και σε ελεγκτές, τελικά, ούτως ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα παραβιαστούν τα θερμικά όρια των υλικών της στροβιλομηχανής, δηλαδή τα θερμικά όρια των πρώτων βαθμίδων των στροβίλων.

Σε περίπτωση απόκλισης από την σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας, N_2 , ενεργοποιείται ο κλάδος 1 του Σχ. 2.2 (έλεγχος στροφών γεννήτριας), ο οποίος δίνει εντολή μεταβολής της παροχής καυσίμου. Εάν οι στροφές μειωθούν τότε το σήμα ανάδρασης είναι θετικό και η παροχή του καυσίμου αυξάνεται.

Σε περίπτωση υπερθέρμανσης των στροβίλων ενεργοποιείται ο κλάδος (2) του Σχ. 2.2, ο οποίος σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου δίνει σήμα μείωσης του καυσίμου.



Σχήμα 2.2: Γενικό διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου

Τα δύο αυτά σήματα ελέγχου δίνονται ως είσοδοι σε έναν επιλογέα ελάχιστης τιμής ώστε σε κάθε περίπτωση να επιλέγεται η μικρότερη παροχή καυσίμου για να αποφευχθούν φαινόμενα υπερθέρμανσης και άρα φθοράς του στροβίλου. Ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης είναι σχεδιασμένος κατάλληλα ώστε στην μόνιμο κατάσταση να επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή παροχή καυσίμου, επομένως ο επιλογέας είναι αρχικά στη θέση του κλάδου 1.

Τέλος, ο έλεγχος του αέρα μπορεί να γίνεται εναλλακτικά με βάση ένα από δύο σήματα, είτε από την δυναμική συμπεριφορά των μηχανών (συγκεκριμένα από τις στροφές της αεριογόνου) είτε από τον κλάδο υπερθέρμανσης. Μπορεί επίσης να αφηθεί και χωρίς έλεγχο (αυτορρυθμιση). Εδώ απεικονίζονται οι δύο δυνατές μορφές, δεν χρησιμοποιούνται όμως ποτέ ταυτόχρονα. Στην ειδική περιγραφή κάθε συστήματος θα αναφέρεται τόσο σχηματικά όσο και ρητά η διάταξη ελέγχου του αέρα που χρησιμοποιείται.

2.2 Αναπαράσταση συστήματος

Αφού παρουσιάστηκε στο Σχ. 2.2 το γενικό δομικό διάγραμμα του συστήματος στροβιλογεννήτριας και διατάξεων ελέγχου, θα παρουσιαστούν, ειδικά, τα επιμέρους στοιχεία του. Η βαθμίδα των θερμοδυναμικών εξισώσεων περιέχει μόνο αλγεβρικές σχέσεις ενώ η δυναμική συμπεριφορά αποδίδεται σε ξεχωριστή βαθμίδα. Το σχηματικό διάγραμμα ενός αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων παρουσιάστηκε ήδη στο Σχ. 2.1. Ας σημειωθεί πως όλες οι θερμοκρασίες θεωρούνται σε φυσικές τιμές (βαθμοί Kelvin) στις εξισώσεις και κανονικοποιούνται στο τέλος των αλγεβρικών βαθμίδων. Τα σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις που ακολουθούν συνοψίζονται στον Πίν. 2.1.

Πίνακας 2.1: Σύμβολα εξισώσεων

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_i	K	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΥΠ	π_{T1}	-
Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή	T_d	K	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΧΠ	π_{T2}	-
Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου ΥΠ	T_f	K	Ειδική θερμοχ/τα αέρα συμπιεστή	C_{PC}	kJ/(kg·K)
Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου ΧΠ	T_{e1}	K	Ειδική θερμοχ/τα αέρα στροβίλου ΥΠ	C_{PT1}	kJ/(kg·K)
Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_{e2}	K	Ειδική θερμοχ/τα αέρα στροβίλου ΧΠ	C_{PT2}	kJ/(kg·K)
Ισεντροπικός β.α. συμπιεστή	η_c	α.μ.	Ανηγμένη παροχή αέρα	W_a	α.μ.
Ισεντροπικός β.α. στροβίλου ΧΠ	η_{T1}	α.μ.	Ανηγμένη παροχή καυσίμου	W_f	α.μ.
Ισεντροπικός β.α. στροβίλου ΥΠ	η_{T2}	α.μ.	Παροχή αέρα	\dot{m}_a	kg/s
Λόγος συμπίεσης	π_c	-	Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f	kg/s

2.2.1 Συμπιεστής

Ο ρόλος του συμπιεστή είναι να αυξάνει την πίεση του αέρα πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Εάν ο αέρας δεν συμπιεστεί η στροβιλομηχανή δεν μπορεί να ξεκινήσει να λειτουργεί, η καύση του αέρα δεν είναι επαρκής ως πηγή ισχύος, γι' αυτό για την εκκίνηση ενός αεριοστροβίλου χρησιμοποιείται ηλεκτροκινητήρας ως εκκινήτης (μίζα). Ο συμπιεστής είναι δεμένος πάνω σε κοινή άτρακτο με τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και μαζί αποτελούν την *αεριογόνο*, συνιστώσα η οποία έχει ως αποστολή να τροφοδοτεί τον στρόβιλο ισχύος με ισχύ υπό την μορφή κινητικής ενέργειας ρευστού (καυσαερίων). Η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου της αεριογόνου ορίζεται ως N_1 . Θεωρείται πως στο ονομαστικό φορτίο του αεριοστροβίλου η ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου βρίσκεται στο 100% της ονομαστικής της ταχύτητας, δηλαδή σε τιμή 1 αμ.

Οι θερμοδυναμικές σχέσεις παρατίθενται στην σχετική βιβλιογραφία [1, 2, 4] αλλά παρουσιάζονται ξανά για λόγους πληρότητας. Η πρώτη εξίσωση με την οποία περιγράφεται ο συμπιεστής είναι η εξίσωση πολυτροπικής μεταβολής, η οποία δίνει την θερμοκρασία εξόδου από αυτόν:

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{\eta_c} (x - 1) \right] \quad (2.1)$$

$$x = (\pi_c)^{\frac{Ra}{C_{pc}}}$$

Θεωρείται πως ο λόγος συμπίεσης π_c είναι ανάλογος της παροχής αέρα, W_a και πως η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα είναι σταθερή και ίση με αυτή που προσδιορίζεται για μια μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διέλευσή του από τον συμπιεστή. Θεωρήθηκε ακόμη πως η παροχή αέρα ως κανονικοποιημένο μέγεθος δίνεται ως το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής του συμπιεστή, N_1 , επί το άνοιγμα των οδηγών πτερυγίων εισόδου (inlet guide vanes, IGVs, ενώ το άνοιγμά τους συμβολίζεται ως g), όπου τόσο το άνοιγμα των πτερυγίων όσο και η ταχύτητα της αεριογόνου αναφέρονται σε κανονικοποιημένες (ανά μονάδα) τιμές [1]. Άρα θα ισχύει ότι

$$\pi_c = \pi_c^o W_a \quad (2.2)$$

$$W_a = g N_1$$

Να σημειωθεί ακόμη ότι ως άνοιγμα των πτερυγίων, g , αναφέρεται η μεταβολή της γωνίας την οποία σχηματίζουν ως προς τον άξονα της ροής αέρα με αποτέλεσμα να αλλάζουν την γωνία εισόδου τον αέρα και με αυτόν τον τρόπο να περιορίζεται η ποσότητά του.

Η ισχύς που καταναλώνει ο συμπιεστής δίνεται από την σχέση [1]:

$$E_c = \dot{m}_a (h_d - h_i) = \dot{m}_a C_{PC} (T_d - T_i) \quad (2.3)$$

Θεωρείται πως η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση για τον αέρα, C_{PC} , είναι σταθερή κατά την πολυτροπική μεταβολή στον συμπιεστή. Η δυναμική συμπεριφορά του συμπιεστή θα παρουσιαστεί στην υποενότητα 2.2.5.

2.2.2 Θάλαμος καύσης

Θεωρήθηκε [1] πως η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται από την καύση είναι ανάλογη της ποσότητας καυσίμων. Έγινε επίσης η παραδοχή πως ο αέρας βρίσκεται σε επαρκή ποσότητα ώστε η καύση να είναι πλήρης. Η στοιχειομετρική τιμή του λόγου f (βλ. εξ. 1.25) για τέλεια καύση είναι περίπου 1:15 [17, 18], ενώ η τιμή του στους αεριοστρόβιλους είναι συνήθως 1:50 [4, 18], οπότε η παραδοχή είναι επαρκώς ασφαλής και σωστή. Καθώς ο αέρας βρίσκεται σε περίσσεια, αντιδρά το σύνολο της ποσότητας του καυσίμου, επομένως η ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται από την καύση είναι ανάλογη της ποσότητας του καυσίμου. Η καύση θεωρείται αδιαβατική γιατί τα ποσά θερμότητας που συναλλάσσονται μέσω των τοιχωμάτων είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά που συναλλάσσονται μέσα στην ροή.

Επειδή η μάζα του καυσίμου είναι πολύ μικρή σε σχέση με την μάζα του αέρα θεωρείται με ικανοποιητική ακρίβεια πως η ροή μάζας των καυσαερίων (που εμπεριέχουν και την μάζα του καυσίμου) ισούται προσεγγιστικά με την ροή μάζας αέρα, δηλαδή να ταυτίσουμε τις παροχές συμπιεστή και στρόβιλου. Ένας ακόμη λόγος που συνηγορεί σε αυτή την παραδοχή είναι πως οι απομαστεύσεις στον συμπιεστή (οι οποίες στην παρούσα περιγραφή δεν λαμβάνονται υπ' όψη) μπορούν να θεωρηθούν ίσες με την παροχή καυσίμου [4]. Έτσι θα θεωρούμε ότι η ροή μάζας του αέρα W_a δεν επηρεάζεται από την μάζα του καυσίμου.

Θεωρώντας τις παροχές αέρα και καυσίμου, W_a και W_f , σε ανά μονάδα τιμές προκύπτει η (1.32), η οποία, μετά την αλλαγή των δεικτών της θερμοκρασίας θα γραφεί ως

$$T_f = T_d + (T_f^o - T_d^o) \frac{W_f}{W_a} \quad (2.4)$$

όπου οι άνω δείκτες o συμβολίζουν ονομαστικά μεγέθη.

2.2.3 Στρόβιλοι

Οι μηχανές διδύμων ατράκτων αποτελούνται από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης (ονομάζεται και στρόβιλος αεριογόνου ή στρόβιλος πυρήνα [4]) ο οποίος κινεί τον συμπιεστή, και τον στρόβιλο

χαμηλής πίεσης (ή στρόβιλο ισχύος, [4]) ο οποίος κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Η μεταξύ τους ζεύξη είναι θερμοϋδραυλική και όχι μηχανική, οπότε σε τέτοια διάταξη υπάρχουν πολύ μεγαλύτερα περιθώρια διακύμανσης των στροφών της ατράκτου ισχύος. Η εισερχόμενη ποσότητα αέρα εξαρτάται μόνο από τις στροφές του συμπιεστή ο οποίος είναι μηχανικά αποζευγμένος από τον στρόβιλο ισχύος, άρα οι διακυμάνσεις περιστροφής της ατράκτου του στροβίλου ισχύος δεν επηρεάζουν άμεσα την παροχή εργαζόμενου μέσου.

2.2.3.1 Στρόβιλος υψηλής πίεσης

Ο ρόλος του στροβίλου ΥΠ είναι να μετατρέπει την δυναμική ενέργεια των καυσαερίων που προέρχονται από τον θάλαμο καύσης σε περιστροφική κινητική, την οποία παραδίδει μέσω της ατράκτου του στο συμπιεστή. Η δυναμική ενέργεια των καυσαερίων οφείλεται στην υψηλή πίεση και θερμοκρασία τους που οφείλονται στον συμπιεστή και στον θάλαμο καύσης, αντίστοιχα. Ο στρόβιλος υψηλής πίεσης είναι συζευγμένος σε κοινή άτρακτο με τον συμπιεστή οπότε η ταχύτητά τους είναι κοινή. Η εξίσωση που περιγράφει τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του στροβίλου είναι η πολυτροπική θερμοδυναμική μεταβολή του ρευστού κατά μήκος του στροβίλου [1, 4, 5]:

$$T_{el} = T_f \left[1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{y} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$y = (\pi_{TI})^{\frac{Ra}{C_{PTI}}}$$

Έγινε παραδοχή στραγγαλισμένης ροής στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης (βλ. ενότητα 1.4), επομένως ο λόγος αποτόνωσης του στροβίλου υψηλής πίεσης είναι κλειδωμένος σε σταθερή τιμή και δεν εξαρτάται από την παροχή αέρα [6, 7, 4]. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα, C_{PTI} , θεωρήθηκε σταθερή και ίση με αυτή που προσδιορίζεται σε μια μέση θερμοκρασία στον στρόβιλο ΥΠ.

Η ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο ΥΠ είναι ίση με [1]:

$$E_{TI} = \dot{m}_a (h_f - h_{el}) = \dot{m}_a C_{PTI} (T_f - T_{el}) \quad (2.6)$$

Άρα εάν θεωρηθεί αμελητέα η παροχή καυσίμου, προκύπτει πως σε συνθήκες ισορροπίας, όπου η ταχύτητα της αεριογόνου είναι σταθερή (καθώς η ισχύς του στροβίλου ΥΠ είναι ίση με την ισχύ του συμπιεστή) ότι

$$\eta_{tc} C_{PTI} (T_f^o - T_{el}^o) = C_{PC} (T_d^o - T_i) \quad (2.7)$$

Εάν εμφανιστεί διαταραχή, η αεριογόνος θα παρουσιάσει επιτάχυνση –ή επιβράδυνση– η

οποία θα οφείλεται στην μη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Τότε η ισχύς που θα επιταχύνει (ή που θα επιβραδύνει, εάν είναι αρνητική) θα είναι η διαφορά μεταξύ του αριστερού και του δεξιού μέλους της (2.7). Σε ανηγμένες στη μονάδα τιμές, η εξίσωση επιτάχυνσης έχει τη μορφή:

$$E_{TI} = \frac{W_a \dot{m}_a [\eta_{tc} C_{PTI} (T_f - T_{el}) - C_{PC} (T_d - T_i)]}{P_N} \Rightarrow$$

$$E_{TI} = W_a K_{hp} [\eta_{tc} C_{PTI} (T_f - T_{el}) - C_{P,C} (T_d - T_i)]$$
(2.8)

όπου ο παρονομαστής δίνει την ισχύ εξόδου του συστήματος των στροβίλων διδύμων ατράκτων, όχι το άθροισμα των ισχύων των δύο στροβίλων. Τα K_{hp} και P_N θα οριστούν παρακάτω.

2.2.3.2 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

Ο στρόβιλος που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια έπεται του στροβίλου που κινεί τον συμπιεστή, οπότε δέχεται ρευστό χαμηλότερης πίεσης. Είναι ο στρόβιλος που παρέχει την αξιοποιήσιμη ισχύ του συστήματος, οπότε ονομάζεται και στρόβιλος ισχύος. Ο στρόβιλος ΧΠ παραλαμβάνει στην είσοδό του ρευστό το οποίο εκτός από δυναμική ενέργεια έχει και κινητική και αποδίδει στην έξοδό του μηχανική (περιστροφική κινητική) ενέργεια. Συνδέεται μηχανικά με την ηλεκτρογεννήτρια μέσω κιβωτίου ταχυτήτων (οι ταχύτητες στροβίλου ΧΠ και γεννήτριας θεωρούνται ίσες σε ανά μονάδα τιμές) οπότε η ταχύτητά του είναι κλειδωμένη από την συχνότητα του δικτύου.

Μια ειδική λεπτομέρεια του στροβίλου ΧΠ είναι πως λειτουργεί υπό στραγγαλισμένη *ανηγμένη* ροή. Αυτό σημαίνει, όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 1.4 πως εάν μεταβληθεί ο λόγος αποτόνωσής του δεν μεταβάλλεται η ανηγμένη του ροή. Λόγω συμβιβαστότητας παροχών με την προηγούμενη βαθμίδα (στρόβιλος ΥΠ) ο στρόβιλος ΧΠ καθορίζει την ανηγμένη παροχή του στροβίλου ΥΠ. Αυτός είναι ο λόγος που ο στρόβιλος ΥΠ λειτουργεί (στην περιοχή σχεδίασής του, γιατί σε πολύ χαμηλά φορτία της τάξης του 50% και κάτω η ροή δεν είναι πια στραγγαλισμένη) με σταθερό λόγο αποτόνωσης.

Η εξίσωση που δίνει την θερμοκρασία στην έξοδό του είναι η ακόλουθη:

$$T_{e2} = T_{el} \left[1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \right]$$

$$z = \left(\pi_{T2} \right)^{\frac{Ra}{C_{pT2}}}$$
(2.9)

όπου ο λόγος αποτόνωσης, όπως και στον συμπιεστή, εξαρτάται από την παροχή αέρα, W_a , δηλαδή ισχύει ότι

$$\pi_{T2} = \pi_{t2}^o W_a \quad (2.10)$$

Η μάζα του καυσίμου στο μείγμα των καυσαερίων αμελείται όπως παραπάνω. Η ισχύς που αποδίδει ο στρόβιλος ΧΠ (σε kW) είναι

$$E_{T2}^{[kW]} = \dot{m}_a \eta_{gt} (h_{e1} - h_{e2}) = \dot{m}_a^o W_a C_{PT2} \eta_{gt} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (2.11)$$

θεωρώντας σταθερή τη C_{PT2} . Η μηχανική ισχύς του στροβίλου ΧΠ σε κατάσταση ισορροπίας ισούται με την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδει η γεννήτρια. Η κανονικοποίηση της ισχύος γίνεται με την ακόλουθη σχέση.

$$E_{T2} = \frac{\dot{m}_a C_{PT2} (T_{e1} - T_{e2}) \eta_{gt}}{P_N} = W_a K_{lp} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (2.12)$$

αφού η ονομαστική ισχύς δίνεται από την (2.11) με ονομαστικές τιμές μεγεθών:

$$P_N = \dot{m}_a^o C_{PT2} \eta_{gt} (T_{e1}^o - T_{e2}^o) \quad (2.13)$$

Για το K_{hp} ισχύει ότι

$$K_{hp} = \frac{1}{\eta_{gt} C_{P, T2} (T_{e1}^o - T_{e2}^o)} \quad (2.14)$$

και για το K_{lp} ότι

$$K_{lp} = \frac{1}{T_{e1,0} - T_{e2,0}} \quad (2.15)$$

2.2.4 Μεταβατική συμπεριφορά

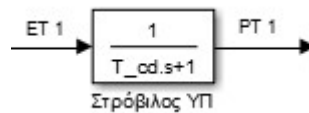
2.2.4.1 Αεριογόνος

Η δυναμική συμπεριφορά της αεριογόνου ως σύνολο ως προς τις θερμοδυναμικές (και όχι κινηματικές μεταβολές της) περιγράφεται από μια συνάρτηση μεταφοράς ενός πόλου (πρώτης τάξης), δηλαδή από μια σταθερά χρόνου T_{cd} . Η χρονική καθυστέρηση οφείλεται στη συμπίεστικότητα του αέρα (ή των καυσαερίων) και εξαρτάται από τον όγκο της κάθε συνιστώσας της αεριογόνου και το μέσο ειδικό όγκο [8]. Αυτή αναφέρεται σε όλες τις θερμοδυναμικές μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην διαδρομή συμπίεστης – θάλαμος καύσης – στρόβιλος ΥΠ. Η μορφή της είναι

$$\frac{P_{T1}}{E_{T1}} = \frac{1}{1 + T_{cd}s} \quad (2.16)$$

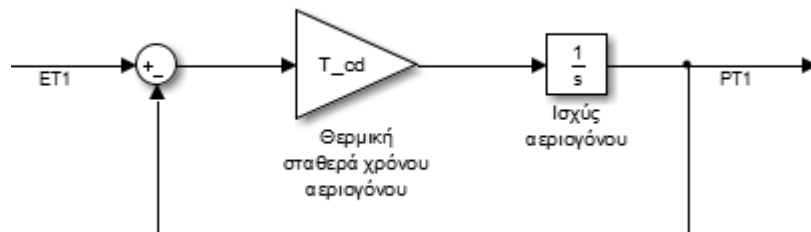
όπου P_{T1} η καθαρή ισχύς επιτάχυνσης που παρέχεται στον άξονα της αεριογόνου και E_{T1} η ισχύς από τις θερμοδυναμικές εξισώσεις. Η δυναμική συμπεριφορά κάθε συνιστώσας χωριστά υπερβαίνει τους στόχους της παρούσας εργασίας καθώς απαιτείται να χρησιμοποιηθούν τα πεδία χαρακτηριστικών των στροβιλομηχανών (χάρτες).

Το αντίστοιχο δομικό στοιχείο στο Simulink που προσομοιώνει τη μεταβατική συμπεριφορά της αεριογόνου φαίνεται στο Σχ. 2.3 και η αναλυτική του μορφή στο περιβάλλον Simulink στο Σχ. 2.4.



Σχήμα 2.3: Χρονική σταθερά θερμικών μεταβολών αεριογόνου

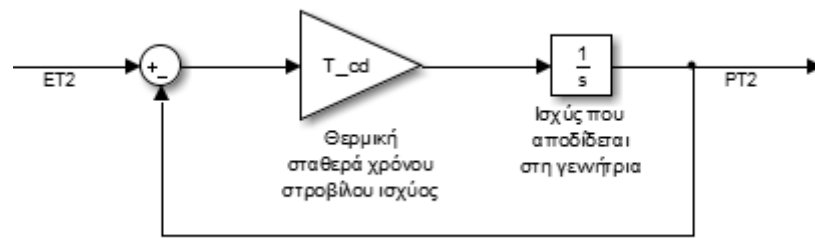
Ως E_{T1} συμβολίζεται η ισχύς από τις αλγεβρικές εξισώσεις ενώ ως P_{T1} η ισχύς που καταλήγει στην γεννήτρια, μετά τη σταθερά χρόνου. Είναι και οι δύο σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 2.4: Υλοποίηση θερμικής χρονικής σταθεράς αεριογόνου στο Simulink

2.2.4.2 Στρόβιλος ισχύος

Η θερμοδυναμική μεταβατική συμπεριφορά του στροβίλου ΧΠ περιγράφεται επίσης με μια συνάρτηση μεταφοράς μίας σταθεράς χρόνου. Η συνάρτηση μεταφοράς του στροβίλου ΧΠ έχει την μορφή του Σχ. 2.3, ενώ η υλοποίησή της φαίνεται στο Σχ. 2.5. Θεωρήθηκε σταθερά χρόνου ίδιας τιμής, T_{cd} και για τους δύο στροβίλους.



Σχήμα 2.5: Υλοποίηση θερμικής χρονικής σταθεράς στροβίλου ΧΠ στο Simulink

Η κινηματική μεταβατική συμπεριφορά του στροβίλου ΧΠ προσομοιώνεται σε κοινό στοιχείο με την κινηματική μεταβατική συμπεριφορά της γεννήτριας.

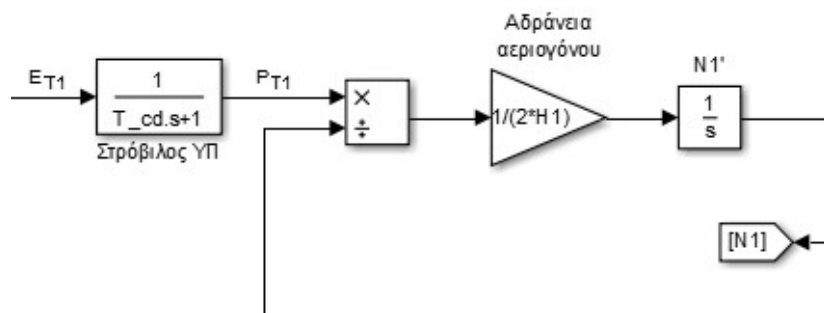
2.2.5 Εξισώσεις επιτάχυνσης

2.2.5.1 Αεριογόνος (συμπιεστής & στρόβιλος ΥΠ)

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην υποενότητα 1.7.1, οι κινηματικές μεταβολές της αεριογόνου περιγράφονται (σε ανά μονάδα τιμές) από τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα για περιστροφικές κινήσεις

$$\frac{P_{TI}}{N_1} = 2H_1 \dot{N}_1 \quad (2.17)$$

όπου εδώ υπεισέρχεται η ανηγμένη σταθερά αδράνειας, H_1 , του συστήματος συμπιεστή – στροβίλου ΥΠ, του οποίου η μορφοποίηση στο Simulink έγινε με το διάγραμμα του Σχ. 2.6.



Σχήμα 2.6: Απεικόνιση εξίσωσης επιτάχυνσης αεριογόνου στο Simulink

Η αεριογόνος είναι ως μηχανική διάταξη εγγενώς ευσταθές σύστημα. Σε περίπτωση αύξησης του φορτίου (στον στρόβιλο ΧΠ) ο ρυθμιστής στροφών δίνει σήμα αύξησης της παροχής καυσίμου. Ανεβαίνει τότε η ισχύς εξόδου του στροβίλου ΥΠ, αυξάνονται επομένως και οι στροφές του συμπιεστή. Αφού όμως αυξήθηκαν οι στροφές του στροβίλου ΥΠ αυξάνονται και οι στροφές του συμπιε-

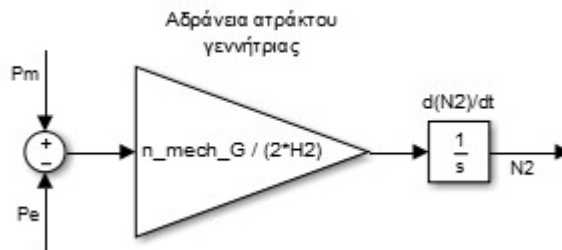
στή, ο οποίος αναρροφά μεγαλύτερη ποσότητα αέρα, άρα καταναλώνει περισσότερη ισχύ. Επειδή αυξάνεται ο λόγος συμπίεσης στον συμπιεστή, σύμφωνα με την (2.2), η αυξημένη ισχύς που αποδίδει ο στρόβιλος ΥΠ εξισορροπείται από την αυξημένη κατανάλωση ισχύος του συμπιεστή και η αεριογόνος σταματάει να επιταχύνεται και ισορροπεί σε υψηλότερες στροφές.

2.2.5.2 Ατράκτος ισχύος (στρόβιλος ΧΠ & γεννήτρια)

Η κινηματική μεταβατική συμπεριφορά του στροβίλου ΧΠ προσομοιώνεται σε κοινό στοιχείο με την κινηματική μεταβατική συμπεριφορά της γεννήτριας. Η αναπαράσταση της γεννήτριας αφορά μόνο τα μηχανικά της χαρακτηριστικά και όχι τα ηλεκτρομαγνητικά, άρα θα αναπαρασταθεί μόνο ως μια ροπή αδράνειας, επί κοινής ατράκτου με τον στρόβιλο ΧΠ, άρα οι ροπές αδράνειας γεννήτριας και στροβίλου ΧΠ θα αθροιστούν. Η διαφορική εξίσωση κίνησης είναι η ακόλουθη

$$P_{T2} - P_e = 2 H_2 \dot{N}_2 \quad (2.18)$$

όπου P_e είναι η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει η γεννήτρια, H_2 η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της γεννήτριας και του στροβίλου ΧΠ και N_2 οι ανηγμένες στροφές της γεννήτριας. Η ισχύς δεν διαιρείται με τις κανονικοποιημένες στροφές καθώς αποκλίνουν πολύ λίγο από τη μονάδα (βλ. υποενότητα 1.7.2). Η αναπαράσταση της (2.18) στο Simulink παρουσιάζεται στο Σχ. 2.7.



Σχήμα 2.7: Αδράνεια στροβίλου ΧΠ & γεννήτριας

Όταν η μηχανική ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρική η γεννήτρια υπερταχύνεται, ενώ όταν η ηλεκτρική υπερβαίνει την μηχανική, επιβραδύνεται.

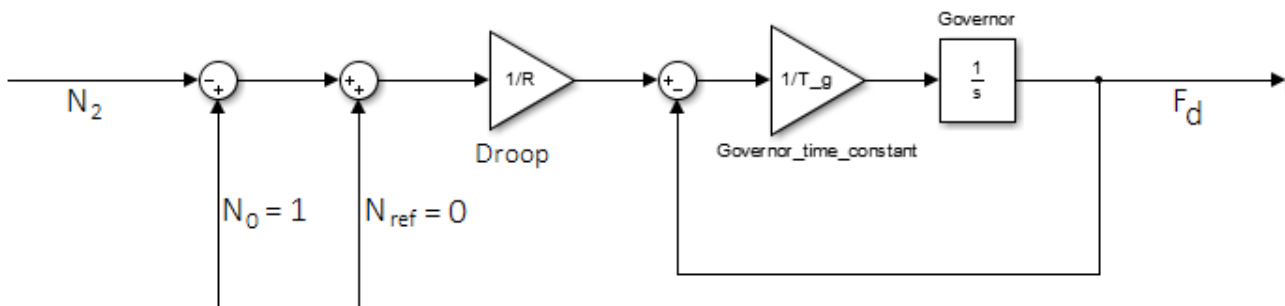
2.3 Διατάξεις ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που εποπτεύουν την διαδικασία παραγωγής ισχύος. Οι διατάξεις ελέγχου, όπως απεικονίστηκε στο Σχ. 2.2, χωρίζονται σε δύο κύριους κλάδους: τον κλάδο ρύθμισης ταχύτητας περιστροφής και τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Ο κάθε κύριος κλάδος καταλήγει στον επιλογέα ελάχιστης τιμής που ορίζει την παροχή καυσίμου, ενώ η παροχή αέρα (ή οι στροφές της αεριογόνου) ρυθμίζονται, ανάλογα με την διάταξη αεριο-

στροβίλου, από τους εναλλακτικά λειτουργούντες κλάδους 3 ή 4.

2.3.1 Ρυθμιστής στροφών

Η ανάλυση της λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών έγινε στην ενότητα 1.2. Εδώ ορίζεται η φυσική μορφή του ως ελεγκτή. Η συνάρτηση μεταφοράς του υλοποιείται όπως φαίνεται στο Σχ. 2.8:



Σχήμα 2.8: Ρυθμιστής στροφών

Ο ρυθμιστής στροφών είναι αναλογικός ελεγκτής. Το σήμα εισόδου N_2 αφαιρείται από τις ονομαστικές στροφές N_0 αλλά σε αυτό προστίθεται το N_{ref} το οποίο είναι το σήμα δευτερεύουσας ρύθμισης. Εδώ δεν μελετάται δευτερεύουσα ρύθμιση οπότε θεωρείται ότι $N_{ref} = 0$ (βλ. ενότητα 1.2). Μετά το κέρδος $1/R$ (αντίστροφος στατισμός) ακολουθεί το κομμάτι που περιγράφει την δυναμική του ρυθμιστή, δηλαδή την σταθερά χρόνου T_g .

2.3.2 Έλεγχος υπερθέρμανσης

Ο έλεγχος υπερθέρμανσης πραγματοποιείται από δύο κύριες συνιστώσες: αφ' ενός από τον μετρητή της θερμοκρασίας, αφ' ετέρου από τον ελεγκτή. Η μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του αεριοστροβίλου είναι ζωτικής σημασίας για τον στρόβιλο, καθώς οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πολύ υψηλές και ενδέχεται να υπερβαίνουν τις ονομαστικές. Μάλιστα στους σύγχρονους αεριοστροβίλους, καθώς λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν οι θερμοκρασίες σε κάποιες θέσεις, ιδίως στην είσοδο του στροβίλου.

Την μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση δέχεται η πρώτη βαθμίδα ακίνητων περυγίων του στροβίλου (ακροφύσια εισόδου) [4] και κατόπιν τα πρώτα περιστρεφόμενα πτερύγια (1^η βαθμίδα δρομέα στροβίλου). Παρ' ότι τα σύγχρονα υλικά είναι ανθεκτικά σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και παράλληλα εφαρμόζονται εξελιγμένες τεχνικές ψύξης [4] ο έλεγχος είναι αναγκαίος ώστε να αποσοβήσει υπερθερμάνσεις και επομένως φθορά του στροβίλου.

2.3.2.1 Μετρητής θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται, λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων του θαλάμου καύσης, στην έξοδο των στροβίλων, και συγκεκριμένα στην έξοδο του στροβίλου XII. Από την τιμή που θα βρεθεί υπολογίζεται η τιμή των καυσαερίων στην είσοδο του στροβίλου, εμπέσω. Αλλά και αυτή η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν μετράται άμεσα παρά μέσω μιας θερμικής ασπίδας, η οποία χρησιμοποιείται για την προστασία του μετρητή. Έτσι, το πρώτο στάδιο του μετρητή περιγράφει την ασπίδα θερμότητας. Θεωρείται πως ένα ποσοστό της μέτρησης θα γίνει ακαριαία αντιληπτό από τον αισθητήρα καθώς μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας, ενώ ένα άλλο, μεγαλύτερο, θα εμφανιστεί με μια καθυστέρηση καθώς μεταδίδεται με συναγωγικό τρόπο [17]. Η συνάρτηση μεταφοράς του πρώτου σταδίου είναι

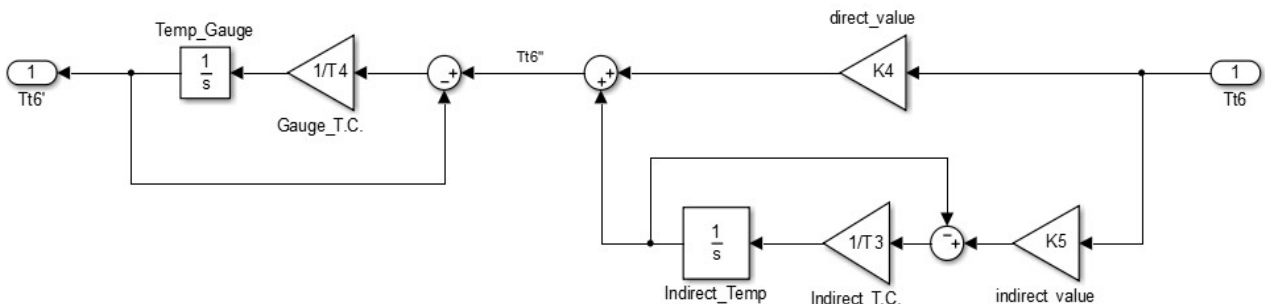
$$\frac{T_{i6}''}{T_{i6}} = \underbrace{K_4}_{\text{ακτινοβολία}} + \underbrace{K_5 \frac{1}{1+T_3s}}_{\text{συναγωγή}} \quad (2.19)$$

όπου $K_4 + K_5 = 1$, εξ ορισμού, T_3 είναι η σταθερά χρόνου της ασπίδας θερμότητας και οι θερμοκρασίες T_{i6}'' , T_{i6}' παρουσιάζονται στο Σχ. 2.9.

Μετά την ασπίδα θερμότητας ακολουθεί συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει την δυναμική συμπεριφορά του ίδιου του αισθητήρα / θερμοστοιχείου, καθώς δεν θα αντιδράσει ακαριαία στο σήμα θερμοκρασίας που θα δεχτεί. Το πρώτο μέρος δηλαδή του μετρητή αναπαριστά το πώς φτάνει το σήμα σε αυτόν και το δεύτερο το πώς μεταδίδεται. Το θερμοστοιχείο ονομάζεται *μορφοτροπέας* καθώς μετατρέπει την θερμοκρασία σε ηλεκτρικό σήμα, δηλαδή της αλλάζει μορφή. Η συνάρτηση μεταφοράς του δεύτερου σταδίου είναι

$$\frac{T_{i6}'}{T_{i6}''} = \frac{1}{1+T_4s} \quad (2.20)$$

ενώ το δομικό διάγραμμα στο Simulink φαίνεται στο Σχ. 2.9:



Σχήμα 2.9: Ασπίδα θερμότητας - μορφοτροπέας

2.3.2.2 Ελεγκτής υπερθέρμανσης

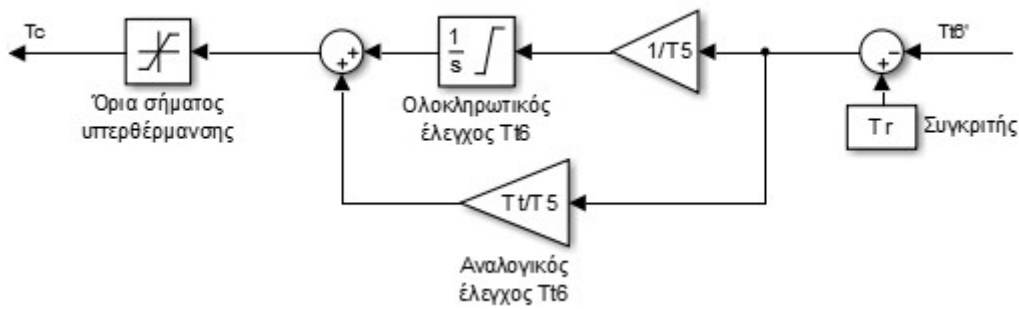
Ο έλεγχος υπερθέρμανσης γίνεται στην επόμενη βαθμίδα και επεμβαίνει σε περιπτώσεις όπου ο ρυθμιστής στροφών δίνει σήμα αύξησης της παροχής καυσίμου οπότε η θερμοκρασία των καυσαερίων μεταβατικά αυξάνεται περισσότερο από την ονομαστική. Ο έλεγχος της υπερθέρμανσης είναι αντίθετος από τον έλεγχο στροφών: ενώ ο ελεγκτής στροφών προσπαθεί να αυξήσει την παροχή καυσίμου για να αντιμετωπίσει ένα μεταβατικό φαινόμενο, ο ελεγκτής υπερθέρμανσης την περιορίζει. Όπως είναι προφανές, ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης μπορεί να συμβάλει στην αποσταθεροποίηση του συστήματος εάν η αεριοστροβλική μονάδα λειτουργεί απομονωμένη.

Στα συστήματα συνδυασμένου κύκλου (με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου) μέρος του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης συμβάλει στο διατήρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στο επιθυμητό για τον ανακομιστή θερμότητας επίπεδο, αλλά για αυτό τον σκοπό συνεργάζεται με τον ρυθμιστή παροχής αέρα.

Ο ελεγκτής υπερθέρμανσης πραγματοποιεί τόσο αναλογικό όσο και ολοκληρωτικό έλεγχο, προκειμένου να εξαλείψει το σφάλμα. Ο ελεγκτής αυτός μηδενίζει, μέσω του ολοκληρωτικού ελέγχου, την προς τα πάνω απόκλιση των θερμοκρασιών από τις ονομαστικές τους τιμές. Επειδή η θερμοκρασία αναφοράς είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία λειτουργίας σε μερικό φορτίο, χρησιμοποιείται ένας περιοριστής για να αναστείλει την λειτουργία του ολοκληρωτή, ο οποίος, χωρίς αυτόν, δίνει συνεχώς αυξανόμενο σήμα σφάλματος. Ο δεύτερος περιοριστής χρησιμεύει ώστε να μην αποκλίνει εκτός ορίων το αθροιστικό σήμα του ολοκληρωτικού και του αναλογικού ελεγκτή, καθήκον που δεν μπορεί να επιτελεστεί από τον περιοριστή του ολοκληρωτή και μόνο. Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή έχει μορφή της (2.21).

$$\frac{T_c}{T_{16}'} = \frac{1}{T_t s} + \frac{T_s}{T_t} = \frac{1 + T_s s}{T_t s} \quad (2.21)$$

όπου T_c είναι το σήμα που θα καταλήξει στο σύστημα καυσίμου (μέσω του επιλογέα ελάχιστης τιμής) και T_{16}' είναι η έξοδος της μετρητικής διάταξης. Η αναπαράστασή της στο Simulink, όπου φαίνονται ο συγκριτής και οι περιοριστές φαίνεται στο Σχ. 2.10.



Σχήμα 2.10: PI ελεγκτής θερμοκρασίας

Ενώ ο δεύτερος περιοριστής έχει προφανή ρόλο, να μην υπερβεί τα όρια το σήμα του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, ο περιοριστής του ολοκληρωτή ορίζει άνω όριο στην έξοδο του ολοκληρωτή ούτως ώστε το αναλογικό σήμα να αφαιρεθεί από μια σχετικά μικρή τιμή, και επομένως να την επηρεάσει. Εάν η θερμοκρασία T_{16} υπερβεί την θερμοκρασία αναφοράς T_r τότε η είσοδος στον PI ελεγκτή είναι αρνητική. Η έξοδος του αναλογικού μέρους θα είναι και αυτή αρνητική και άρα θα αφαιρεθεί από το σήμα εξόδου του ολοκληρωτικού ελεγκτή, το οποίο όμως θα παραμείνει θετικό ενώ θα αρχίσει να μειώνεται (λόγω της αρνητικής εισόδου στον ολοκληρωτή). Εάν δεν υπήρχε ο περιοριστής του ολοκληρωτή, μέχρι την διαταραχή το σήμα εξόδου του ολοκληρωτή θα είχε γίνει τόσο μεγάλο ώστε η αφαίρεση του αναλογικού σήματος να μην επηρεάζει καθόλου την τελική έξοδο του ελεγκτή συνολικά, καθώς θα επικρατούσε το άνω όριο του τελικού περιοριστή.

Ακόμη σημαντικότερη είναι όμως μια ειδική λεπτομέρεια του συγκριτή: η θερμοκρασία αναφοράς δεν είναι η μέγιστη επιτρεπτή, δηλαδή σε ανά μονάδα τιμές η $T_r = 1$, αλλά είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε αυστηρά όρια υπερθέρμανσης, επομένως ορίστηκε πως $T_r = 1,01$, δηλαδή επιτρέπεται υπερθέρμανση κατά 1% στα τελικά καυσάερια.

Από τη σταθερή τιμή του συγκριτή προκύπτει ο χαρακτήρας του ελεγκτή. Δεν κάνει έλεγχο παρά μόνο όταν η T_{16} υπερβεί την ονομαστική της τιμή. Επομένως ο ελεγκτής αυτός εμπλέκεται μόνο κατά περίπτωση, και όχι σε διακυμάνσεις της T_{16} κάτω από την μέγιστη επιτρεπτή της τιμή. Εκτός του ότι υπάρχει ενδεχόμενο κατά μεταβολή φορτίου ακόμη και προς μη ονομαστική τιμή, λόγω της απότομης αύξησης της παροχής καυσίμου, να παρατηρηθεί υπέρβαση του ορίου της T_{16} , οπότε και θα εμπλακεί ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης, η κύρια χρήση της προσαύξησης της θερμοκρασίας αναφοράς έχει να κάνει με την απαίτηση επίτευξης της ονομαστικής παραγωγής ισχύος βηματικά. Εάν γίνει απότομη αύξηση και δεν επιτρέπεται καμία υπερθέρμανση, τότε η μετάβαση είναι, τις περισσότερες φορές, αδύνατη, καθώς ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης δεν επιτρέπει καθόλου μεταβατική αύξηση της παραγωγής ισχύος στον στρόβιλο. Η ύπαρξη όμως ενός μικρού περι-

θωρίου υπέρβασης των ορίων της T_{16} (άρα και των ορίων της T_{14}) επιτρέπει την αντιμετώπιση μεταβατικών μεταβολών φορτίου που καταλήγουν στο ονομαστικό με ελάχιστη επιπλέον φθορά των στροβίλων λόγω υπερθέρμανσης.

Τα όρια και των δύο περιοριστών, τόσο του τελικού όσο και του ολοκληρωτή είναι κοινά. Άνω όριο είναι η μέγιστη επιτρεπτή υπερθέρμανση ενώ κάτω όριο είναι το μηδέν. Το άνω όριο έχει οριστεί ως αρχική συνθήκη εξόδου για τον ολοκληρωτή, καθώς πρέπει, στην μόνιμο κατάσταση, να αφήνει ανεπηρέαστο το σήμα παροχής καυσίμου (βλ. αμέσως παρακάτω).

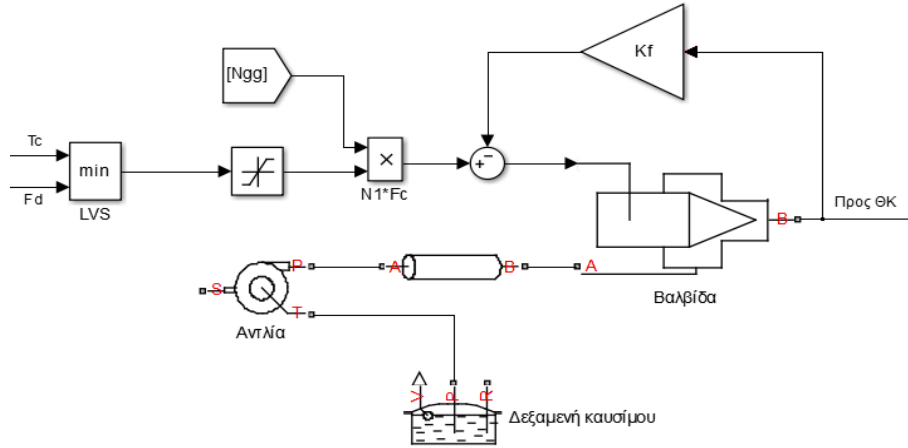
2.3.3 Επιλογέας ελάχιστης τιμής

Οι δύο ελεγκτές που παρουσιάστηκαν ως τώρα λειτουργούν παράλληλα και καταλήγουν και σε έναν επιλογέα ελάχιστης τιμής, ο οποίος επιλέγει την αριθμητικά μικρότερη. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που δοθεί σήμα από τον ρυθμιστή στροφών για αύξηση της παροχής καυσίμου και επίσης ανιχνευτεί υπερθέρμανση, θα επέμβει ο ελεγκτής υπερθέρμανσης και θα περιορίσει το καύσιμο. Είναι η μόνη ασφαλής διαχείριση των σημάτων, παρ' ό,τι, όταν υπερέχει το σήμα του ελεγκτή υπερθέρμανσης είναι πιθανό το σύστημα να υποπέσει σε αστάθεια. Ο επιλογέας ελάχιστης τιμής είναι που ορίζει τον διακοπτικό / υβριδικό χαρακτήρα του υπό εξέταση συστήματος αυτομάτου ελέγχου.

2.4 Ρύθμιση καυσίμου

2.4.1 Επιτάχυνση συστήματος

Ένα από τα κύρια ζητήματα με τα οποία ασχολήθηκε η παρούσα εργασία ήταν το πρόβλημα της επιτάχυνσης ενός μηχανικού συστήματος, συγκεκριμένα του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου. Η λύση που προκρίθηκε ήταν η δημιουργία συστήματος κλειστού βρόχου, με την προσθήκη κλάδου ανάδρασης στην είσοδο του συστήματος του σήματος εξόδου του, το οποίο αφαιρούταν από την είσοδο αφού πολλαπλασιαζόταν με έναν παράγοντα K_f . Η φυσική μορφή του συστήματος καυσίμου απεικονίζεται στο Σχ. 2.11.



Σχήμα 2.11: Φυσική μορφή συστήματος καυσίμου

Δημιουργώντας έναν κλάδο ανάδρασης σήματος, όπως θα φανεί και από τις εξισώσεις, το σύστημα επιταχύνθηκε. Η αναπαράσταση του συστήματος καυσίμου του στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας (s-πεδίο) απεικονίζεται στο Σχ. 2.12, όπου ο όρος πάνω δεξιά είναι αναγκαίος για την σωστή αρχικοποίηση του συστήματος.

Εάν ονομαστεί W_{err} το σήμα μετά τον συγκριτή, προκύπτει ότι

$$\begin{aligned}
 W_f &= W_{err} \frac{1}{1+T_v s} \frac{1}{1+T_f s} = (F_d + K_f W_{f0} - K_f W_f) \frac{1}{1+T_v s} \frac{1}{1+T_f s} \Rightarrow \\
 W_f &= \frac{F_d + K_f W_{f0}}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} - \frac{K_f}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} W_f \Rightarrow \\
 W_f \left(1 + \frac{K_f}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} \right) &= \frac{F_d + K_f W_{f0}}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} \Rightarrow \\
 W_f \left(\frac{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2 + K_f}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} \right) &= \frac{F_d + K_f W_{f0}}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2} \Rightarrow \\
 \frac{W_f}{F_d + K_f W_{f0}} &= \frac{1}{1+(T_v+T_f)s+T_v T_f s^2 + K_f}
 \end{aligned}$$

Για την μελέτη της απόκρισης του συστήματος με τον κλάδο ανάδρασης αγνοείται η αρχική ποσότητα καυσίμου. Ακόμη θεωρείται πως

$$T_v \ll T_f \Rightarrow \begin{cases} T_v + T_f \approx T_f \\ T_v T_f \approx 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

άρα προκύπτει ότι

$$\frac{W_f}{F_d} = \frac{1}{1 + T_f s + K_f} = \frac{\frac{1}{1 + K_f}}{1 + \frac{T_f}{1 + K_f} s} = \frac{1}{1 + K_f} \frac{1}{1 + T_f' s}, \quad T_f' = \frac{T_f}{1 + K_f} < T_f \quad (2.23)$$

Φαίνεται δηλαδή ότι η νέα σταθερά χρόνου του συστήματος είναι μικρότερη από την αρχική κατά έναν παράγοντα $1 + K_f$, ενώ ταυτόχρονα το κέρδος του συστήματος μειώθηκε κατά τον ίδιο παράγοντα. Το σύστημα δηλαδή επιταχύνθηκε με κόστος το μειωμένο κέρδος του.

Ουσιαστικά, με την προσθήκη ανάδρασης μειώθηκε η τελική τιμή του συστήματος, την οποία, επομένως, φτάνει πιο γρήγορα. Εάν όμως του δοθεί ως είσοδος σήμα μεγαλύτερου πλάτους τότε όντως θα αποκρίνεται ταχύτερα. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και στα δύο μοντέλα αεριοστροβίλων που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

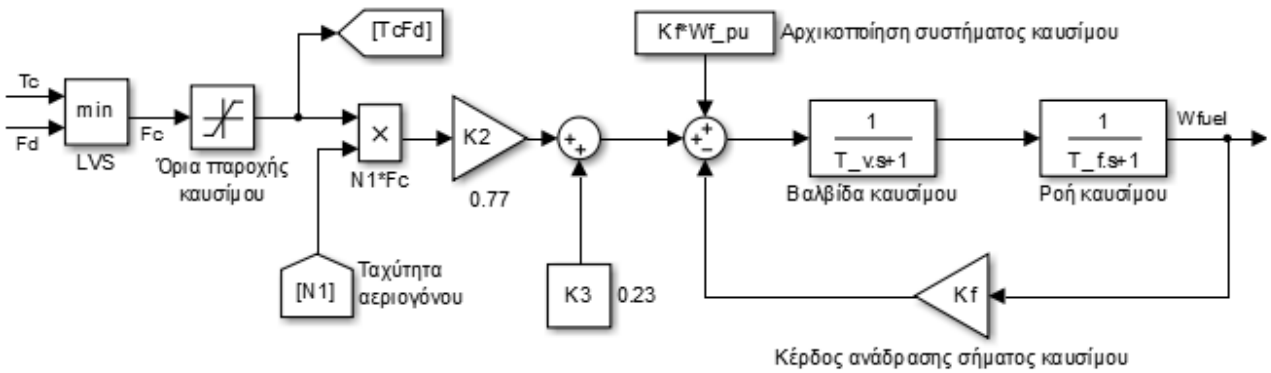


Σχήμα 2.12: Αναπαράσταση συστήματος καυσίμου στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s

2.4.2 Ελάχιστη παροχή καυσίμου

Μετά τον επιλογέα ελάχιστης τιμής ακολουθεί το σύστημα παροχής καυσίμου, στο οποίο καταλήγει το σήμα εξόδου του επιλογέα ελάχιστης τιμής, F_c . Θεωρήθηκε ότι οι αντλίες του καυσίμου κινούνται από την αεριογόνο οπότε η ροή καυσίμου είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου. Γι' αυτό το σήμα του επιλογέα ελάχιστης τιμής πολλαπλασιάζεται με τις στροφές της αεριογόνου, N_I .

Το καθ' αυτό σύστημα τροφοδοσίας προσομοιώνεται με δύο βαθμίδες στη σειρά, όπου η κάθε μία είναι μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης. Η πρώτη περιγράφει τον μηχανισμό αλλαγής θέσης της βαλβίδας του καυσίμου και έχει μικρή σταθερά χρόνου, ενώ η δεύτερη περιγράφει το σύστημα ροής και διανομής του καυσίμου. Το δομικό διάγραμμα στο Simulink φαίνεται στο Σχ. 2.13:



Σχήμα 2.13: Επιλογέας ελάχιστης τιμής και σύστημα παροχής καυσίμου

Η σταθερά K_3 απεικονίζει την ελάχιστη αναγκαία παροχή καυσίμου, το τεχνικό ελάχιστο του αεριοστροβίλου. Όπως φάνηκε από το Σχ. 2.12 και γενικότερα στο Σχ. 2.13, ο σταθερός όρος που χρησιμοποιείται για την ορθή αρχικοποίηση του συστήματος εισάγει μια σταθερή ποσότητα στο σύστημα καυσίμου, η οποία, μετά από κάποια διαταραχή, είναι απλώς ένας σταθερός αυξητικός όρος της τιμής που λαμβάνει το καύσιμο. Θεωρώντας μηδενική είσοδο στο σύστημα αυτό, θεωρώντας δηλαδή μηδενικό το σήμα μετά τον ενισχυτή K_2 , προκύπτει ότι η μόνιμη έξοδος του συστήματος θα είναι

$$\begin{aligned}
 W_f &= d \left(\frac{1}{1+T_v s} \right) = e \left(\frac{1}{1+T_v s} \right) \left(\frac{1}{1+T_f s} \right) \Rightarrow \\
 W_f &= (K_3 + K_f W_{f,op} - K_f W_f) \left(\frac{1}{1+T_v s} \right) \left(\frac{1}{1+T_f s} \right) \Rightarrow \\
 W_f (1 + K_f) &= (K_3 + K_f W_{f,op}) \left(\frac{1}{1+T_v s} \right) \left(\frac{1}{1+T_f s} \right) \Rightarrow \\
 W_f &= \frac{K_3 + K_f W_{f,op}}{1 + K_f} \left(\frac{1}{1+T_v s} \right) \left(\frac{1}{1+T_f s} \right)
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Άρα, για τη μόνιμη τιμή, όταν $t \rightarrow \infty \Rightarrow s \rightarrow 0$, θα ισχύει ότι

$$W_{f,\infty} = \frac{K_3 + K_f W_{f,op}}{1 + K_f} \tag{2.25}$$

Η σταθερά K_3 εκφράζει την ελάχιστη παροχή καυσίμου για λειτουργία του αεριοστροβίλου στο τεχνικό του ελάχιστο, άρα ο παράγοντας ενίσχυσης K_2 καθορίζεται ως $K_2 = 1 - K_3$. Η σχετικά μεγάλη κατανάλωση καυσίμου σε χαμηλά φορτία είναι ένας λόγος για τον οποίο οι αεριοστροβιλικές μονάδες ενδείκνυται να λειτουργούν κοντά στο μέγιστο φορτίο. Ειδική διερεύνηση πραγματο-

ποιείται στο Παράρτημα ΣΤ.

Η προσθήκη ανάδρασης μείωσε το κέρδος ενίσχυσης κατά έναν παράγοντα $1+K_f$ αλλά επιτάχυνε το σύστημα καθώς μείωσε τη σταθερά χρόνου κατά τον ίδιο παράγοντα. Το κέρδος ενίσχυσης που μειώθηκε δεν είναι άλλο από το κέρδος του ρυθμιστή στροφών (ή το κέρδος του ελεγκτή υπερθέρμανσης). Αν εξεταστεί η διάταξη του Σχ. 2.13, προκύπτει πως ο πραγματικός στατισμός, δηλαδή το ισοδύναμο κέρδος ενίσχυσης του σήματος που μεταφέρει το σφάλμα στροφών της γεννήτριας, έστω ΔN_2 , θα έχει την τιμή

$$\left(\frac{1}{R} K_2 \Delta N_2 + K_3 \right) \frac{1}{1 + K_f} \quad (2.26)$$

Συνεπώς το κέρδος εξαρτάται τόσο από την ανάδραση του συστήματος καυσίμου όσο και από τον μηχανισμό που εξασφαλίζει την ελάχιστη παροχή καυσίμου.

2.5 Ρύθμιση παροχής αέρα (άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου)

Η ρύθμιση της παροχής του εισερχόμενου αέρα είναι ένας κλάδος ελέγχου ο οποίος επεμβαίνει απευθείας στη στροβιλομηχανή χωρίς να περάσει από τον επιλογέα ελάχιστης τιμής συνεπώς λειτουργεί ταυτόχρονα με τον έλεγχο του συστήματος παροχής του καυσίμου. Η ρύθμιση του αέρα πραγματοποιείται μέσω του καθορισμού του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων εισόδου, σύμφωνα με την (2.2).

Στην παρούσα εργασία προτείνονται 2 τρόποι διαχείρισης του αέρα:

α. πλήρως ανοιχτά πτερύγια, όπου τότε η ρύθμιση του αέρα αναλαμβάνεται έμμεσα από την αεριογόνο μέσω της μεταβολής των στροφών της,

β. ρύθμιση των πτερυγίων ελέγχοντας τις στροφές της αεριογόνου,

Εξετάστηκε επίσης η δυνατότητα ελέγχου του ανοίγματος των πτερυγίων ούτως ώστε να ρυθμιστεί την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, που όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου. Σε αυτές τις διατάξεις ο αέρας συμβάλλει στην διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου θερμοκρασίας στην είσοδο του ανακομιστή θερμότητας. Όπως όμως θα φανεί στα επόμενα, τέτοιου τύπου ελεγκτής δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε διατάξεις με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων.

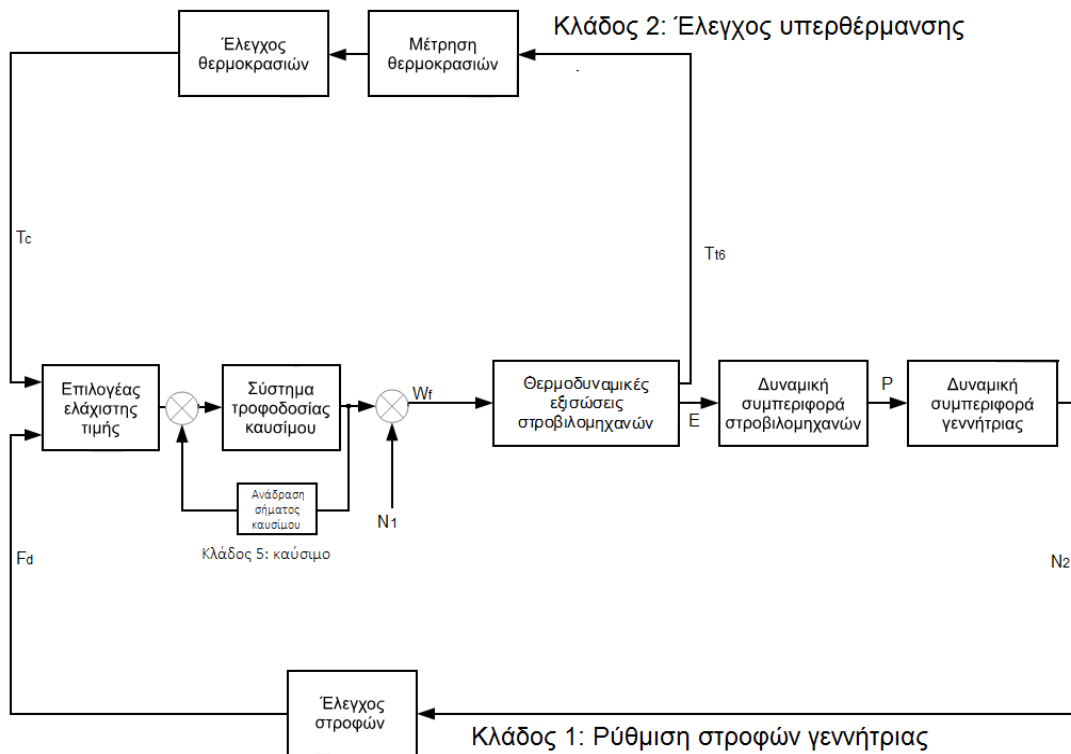
2.5.1 Πλήρως ανοιχτά πτερύγια

Απουσιάζουν και οι δύο κλάδοι ελέγχου αέρα του Σχ. 2.2 και η ροή αέρα ισούται, ως κανονικοποιημένη τιμή (ανά μονάδα) με την ανά μονάδα τιμή της ταχύτητας της αεριογόνου. Το λειτουργ-

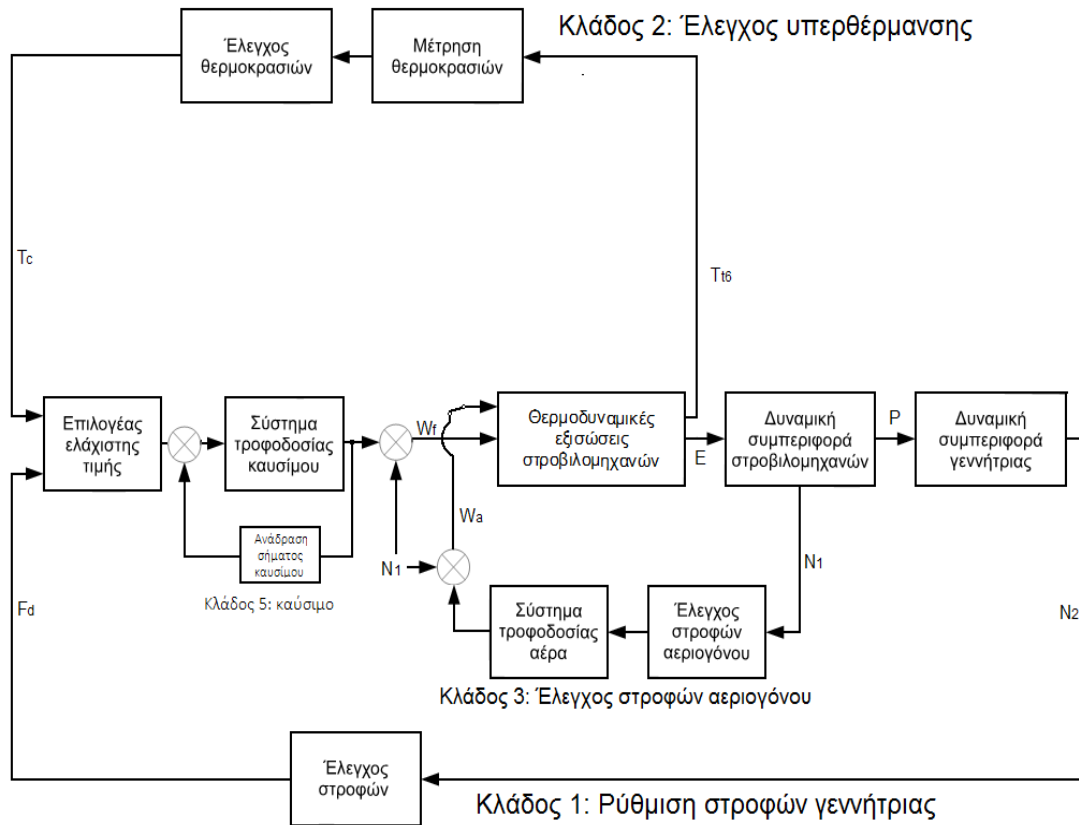
γικό διάγραμμα παρουσιάζεται για καλύτερη εποπτεία στο Σχ. 2.14. Η προσομοίωση κατά το πρότυπο του Σχ. 2.14 πραγματοποιείται για να επιβεβαιωθεί η εγγενής ευστάθεια της αεριογόνου. Η αεριογόνος έχει πολύ μεγάλη διακύμανση στην ταχύτητά της, γεγονός όμως που δεν είναι απαγορευτικό για την λειτουργία της [4].

2.5.2 Ρύθμιση παροχής αέρα για έλεγχο ταχύτητας αεριογόνου

Σε περίπτωση που υπάρχει περιορισμός στο εύρος διακύμανσης της ταχύτητας της αεριογόνου, τότε η ταχύτητα ελέγχεται μέσω της παροχής του αέρα και τα πτερύγια ανοίγουν κατάλληλα ώστε να την ρυθμίσουν στο επιθυμητό επίπεδο. Όταν επιταχύνεται η άτρακτος ανοίγουν τα πτερύγια για να εισαχθεί περισσότερος αέρας, οπότε η ταχύτητά της περιορίζεται λόγω της αύξησης του φορτίου του συμπιεστή. Το γενικό διάγραμμα λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχ. 2.15.

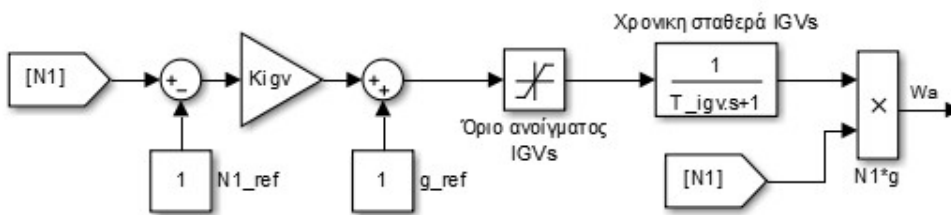


Σχήμα 2.14: Σύστημα ελέγχου χωρίς ρύθμιση ανοίγματος πτερυγίων



Σχήμα 2.15: Λειτουργία με έλεγχο ταχύτητας αεριογόνου μέσω ρύθμισης ανοίγματος πτερυγίων

Ο κλάδος ελέγχου των πτερυγίων έχει την μορφή του Σχ. 2.16, όπου είσοδος σήματος είναι η ταχύτητα της αεριογόνου και έξοδος η παροχή αέρα. Όλα τα μεγέθη (ταχύτητα αεριογόνου και άνοιγμα πτερυγίων) είναι σε ανά μονάδα τιμές.



Σχήμα 2.16: Ρύθμιση πτερυγίων μέσω ελέγχου στροφών αεριογόνου

Όπως φαίνεται από το Σχ. 2.16, η ταχύτητα της αεριογόνου, $N1$, αφαιρείται από την ονομαστική της τιμή και η διαφορά τους πολλαπλασιάζεται με το κέρδος ενίσχυσης σήματος K_{IGV} . Σε φορτίο μικρότερο από το ονομαστικό η είσοδος στον ενισχυτή είναι μικρότερη της μονάδας και αρνητική, οπότε αφαιρείται από τη μονάδα και εισέρχεται στην βαθμίδα της σταθεράς χρόνου. Αυτή η τιμή έχει δοθεί και ως αρχική τιμή στον ολοκληρωτή της συνάρτησης μεταφοράς, τιμή η οποία είναι και το ανά μονάδα άνοιγμα των πτερυγίων. Εάν προσομοιώνεται λειτουργία ονομαστικού φορ-

τίου η είσοδος στον ενισχυτή είναι μηδενική οπότε η είσοδος στην βαθμίδα της χρονικής σταθεράς είναι 1, όσο δηλαδή πρέπει να είναι το άνοιγμα των πτερυγίων στο ονομαστικό (μέγιστο) φορτίο. Ο περιοριστής επιβάλλει μέγιστο άνοιγμα προφανώς το 1 αμ (100%) ενώ το ελάχιστο διαφοροποιείται για κάθε τύπο μηχανής ώστε να αντιστοιχεί σε επαρκή παροχή αέρα, αφ' ενός για το τεχνικό ελάχιστο της μηχανής, αφ' ετέρου για την ελάχιστη επιτρεπτή μεταβολή της ταχύτητας της αεριογόνου.

Σε περίπτωση μείωσης του φορτίου απαιτείται μικρότερη παροχή ρευστού στον στρόβιλο οπότε κλείνουν τα πτερύγια, μειώνεται η παροχή αέρα στον συμπιεστή, ο οποίος μεταβατικά υπερταχύνεται, αλλά, καθώς ο στρόβιλος ΥΠ αξιοποιεί μικρότερη ροή μάζας, μειώνεται η ισχύς που παρέχει στον συμπιεστή οπότε η αεριογόνος ισορροπεί σε νέα, μικρότερη ταχύτητα περιστροφής. Η σχέση μεταβολής της ταχύτητας της αεριογόνου και μεταβολής του ανοίγματος των πτερυγίων καθορίζεται από την τιμή του κέρδους K_{IGV} . Η εξίσωση που δίνει το άνοιγμα των πτερυγίων στην μόνιμο κατάσταση είναι:

$$\left. \begin{aligned} (N_1 - 1) K_{IGV} + 1 &= g \\ W_a &= N_1 g \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (2.27)$$

$$W_a = [(N_1 - 1) K_{IGV} + 1] N_1$$

Με βάση τις (2.27), οι στροφές της αεριογόνου, N_1 , θα δίνονται ως συνάρτηση της παροχής αέρα από τη σχέση:

$$N_1 = \frac{K_{IGV} - 1 + \sqrt{(K_{IGV} - 1)^2 + 4 K_{IGV} W_a}}{2 K_{IGV}} \quad (2.28)$$

Η (2.28) είναι αναγκαία για την αρχικοποίηση του συστήματος, όπως θα φανεί παρακάτω.

2.6 Ρυθμίσεις παραμέτρων

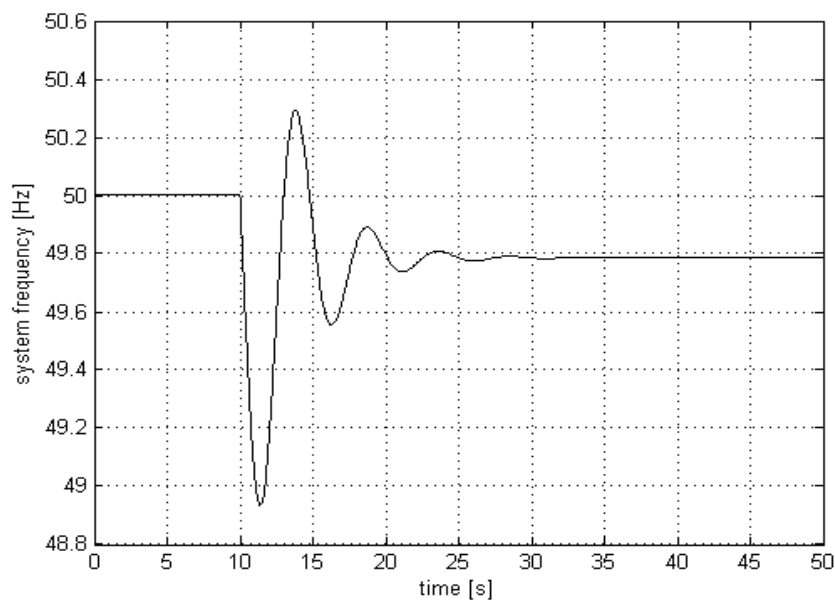
Για τον αεριοστρόβιλο με τα στοιχεία του Πίν. 2.2 και τις αρχικές ρυθμίσεις που περιγράφονται στην εργασία [1], η απόκριση της συχνότητας της γεννήτριας σε μια βηματική αύξηση ηλεκτρικού φορτίου 0,1 αμ παρατίθεται στο Σχ. 2.17. Τα πλήρη στοιχεία της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Κεφ. 3, στον Πίν. 3.2.

Πίνακας 2.2: Δεδομένα ρυθμιστή στροφών αεριοστροβίλου [1]

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδα	Πρώτη ρύθμιση	Βελτιστοποίηση
Στατισμός	R	α.μ.	0,05	0,03
Σταθερά χρόνου μηχανισμού καυσίμου	T_f	s	0,4	0,1
Αδράνεια γεννήτριας και στροβίλου ΧΠ	H	s	2,2	4,2
Διαφορικό κέρδος ρυθμιστή στροφών	D_K	-	-	20

Η απόκριση αυτή δεν θεωρήθηκε αποδεκτή, καθώς παρουσιάζει μεγάλη μεταβατική βύθιση και πολλές ταλαντώσεις. Οι επιλογές που είχαν γίνει για την βελτίωση της απόκρισης ήταν οι ακόλουθες:

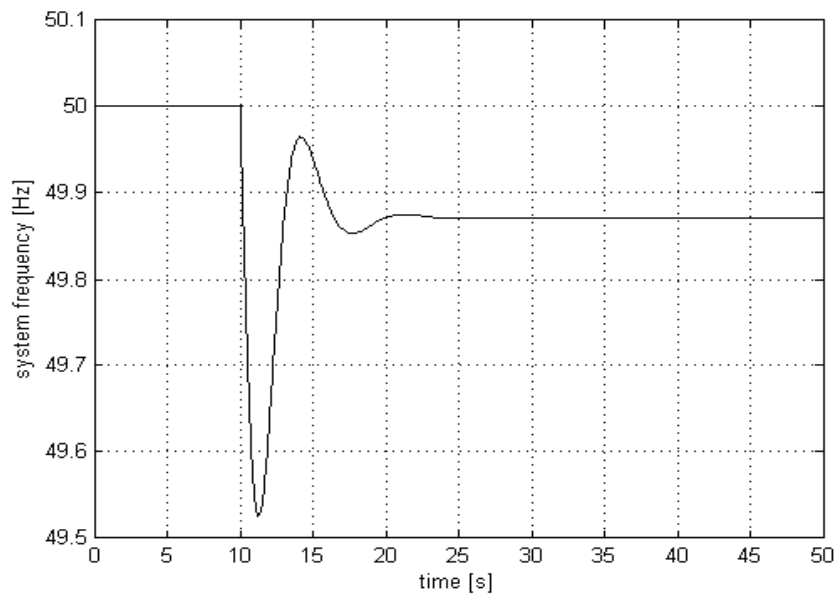
- α. μείωση της σταθεράς χρόνου του συστήματος καυσίμου
- β. αύξηση της αδράνειας της ατράκτου του στροβίλου ισχύος – γεννήτριας
- γ. προσθήκη διαφορικού ελέγχου στον ρυθμιστή στροφών.

**Σχήμα 2.17:** Απόκριση ηλεκτρικής συχνότητας με αρχικές ρυθμίσεις

Η τρίτη επιλογή σήμαινε αλλαγή της συνάρτησης μεταφοράς του ρυθμιστή στροφών (που παρουσιάζεται στο Σχ. 2.8) ώστε να γίνει

$$G'(s) = \left(D_K s + \frac{1}{R} \right) \frac{1}{T_{gov} s + 1} \quad (2.29)$$

Η απόκριση της ηλεκτρικής συχνότητας που προέκυψε με τις αλλαγές που φάνηκαν στον Πίν. 2.2 παρουσιάζεται στο Σχ. 2.18 και είναι εμφανώς βελτιωμένη.



Σχήμα 2.18: Απόκριση ηλεκτρικής συχνότητας με βελτιωμένες ρυθμίσεις και σταθερές χρόνου

Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι οι σταθερές χρόνου του συστήματος παροχής καυσίμου δεν μπορούν να μεταβληθούν, όπως επίσης και η ροπή αδράνειας των ατράκτων, H . Τέλος, δεν θα χρησιμοποιηθεί διαφορικός ελεγκτής στροφών.

Αντίθετα θα εξεταστεί η προσθήκη ανάδρασης στο σύστημα καυσίμου ώστε να επιτευχθούν αποκρίσεις αντίστοιχες του Σχ. 2.18, ρυθμίζοντας μόνο το κέρδος ανάδρασης του συστήματος καυσίμου, το κέρδος του κλάδου ελέγχου των περυγίων και το στατισμό. Η μεθοδολογία ρύθμισης που ακολουθήθηκε θα αναλυθεί στα επόμενα.

3ο Κεφάλαιο: MONTEAO ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ GENERAL ELECTRIC LM 2500+

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 2 θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση συστήματος αεριοστροβίλου – γεννήτριας. Τα δεδομένα αντιστοιχούν στον αεριοστρόβιλο LM 2500+ της εταιρείας General Electric και περιλαμβάνουν τις μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας και τα όρια ταχύτητας περιστροφής της ατράκτου της αεριογόνου. Οι τιμές ροπών αδράνειας, στροφών αεριογόνου και παροχών εκτιμώνται από την βιβλιογραφία.

Αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα προσομοίωσης του GE LM 2500+ ελαφρώς διαφορετικά μεταξύ τους. Το πρώτο αναπτύχθηκε στην αναφορά [1] και στην παρούσα εργασία έχει προστεθεί κλάδος ανάδρασης στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου με σκοπό να επιταχυνθεί η απόκρισή του. Στο δεύτερο μοντέλο δεν χρησιμοποιείται κλάδος ελέγχου ταχύτητας αεριογόνου μέσω της ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων ούτως ώστε να μελετηθεί η ευστάθεια της αεριογόνου σε τέτοια διάταξη, αλλά και το κατά πόσον η ρύθμιση του ανοίγματος των πτερυγίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλο σκοπό, όπως θα εξεταστεί στο Κεφ. 5.

3.1 Θερμοδυναμικές σχέσεις

Ακολουθείται η σύμβαση συμβολισμών θέσεων στροβιλομηχανής που διατυπώθηκε στην υποενότητα 1.3.4. Η αντιστοιχία συμβόλων και μεγεθών συνοψίζεται στον Πίν. 3.1.

Πίνακας 3.1: Σύμβολα

Νέοι συμβολισμοί			Παραμένοντες συμβολισμοί	
Μέγεθος	Παλαιά ονομασία	Νέα ονομασία	Μέγεθος	Κοινή ονομασία
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_i	T_{12}	Λόγος συμπίεσης	π_c
Θερμοκρασία εξόδου συμπίεστη	T_d	T_{13}	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΥΠ	π_{T1}
Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου ΥΠ	T_f	T_{14}	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΧΠ	π_{T2}
Θερμοκρασία εισόδου στροβίλου ΧΠ	T_{e1}	T_{15}	Ειδική θερμοχ/τα αέρα συμπίεστη	C_{PC}
Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_{e2}	T_{16}	Ειδική θερμοχ/τα αέρα στροβίλου ΥΠ	C_{PT1}
Μηχανικός β.α. συμπίεστη	η_c	$\eta_{\mu c}$	Ειδική θερμοχ/τα αέρα στροβίλου ΧΠ	C_{PT2}
Μηχανικός β.α. στροβίλου ΥΠ	η_{ic}	$\eta_{\mu T1}$	Παροχή αέρα	W_a
Μηχανικός β.α. στροβίλου ΧΠ	η_{gt}	$\eta_{\mu T2}$	Παροχή καυσίμου	W_f
			Ισεντροπικός β.α. συμπίεστη	η_c
			Ισεντροπικός β.α. στροβίλου ΥΠ	η_{T1}
			Ισεντροπικός β.α. στροβίλου ΧΠ	η_{T2}

3.1.1 Συμπιεστής

Η (2.1) του προηγούμενου κεφαλαίου, η οποία περιγράφει την θερμοδυναμική (πολυτροπική) μεταβολή του αέρα στον συμπιεστή και δίνει την θερμοκρασία στην έξοδό του, είναι η ακόλουθη

$$T_d = T_i \left[1 + \frac{1}{\eta_C} (x-1) \right], \quad x = (\pi_C W_a)^{\frac{Ra}{C_{pc}}}$$

Μετά τις αλλαγές συμβόλων γράφεται ως:

$$T_{i3} = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^o \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{pc}}} - 1}{\eta_C} \right) = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^o W_a \right)^{\frac{Ra}{C_{pc}}} - 1}{\eta_C} \right) \quad (3.1)$$

Η (2.2) παραμένει ίδια:

$$W_a = g N_1 \quad (3.2)$$

Ενώ για τον πραγματικό λόγο πίεσης ισχύει ότι

$$\pi_C = \pi_C^o W_a \quad (3.3)$$

Η ισχύς που καταναλώνει ο συμπιεστής δίνεται από τη σχέση (2.3), η οποία είναι η

$$E_C = \dot{m} (h_d - h_i) = \dot{m} C_{PC} (T_d - T_i)$$

και πλέον γράφεται ως

$$E_C^{[kW]} = W_a \dot{m}_a^o C_{PC} (T_{i3} - T_{i2}) \quad (3.4)$$

3.1.2 Θάλαμος καύσης

Η εξίσωση που δίνει τις θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης δεν έχει διαφοροποιηθεί στην αναπαράσταση του αεριοστροβίλου GE LM 2500+ επειδή δεν υπάρχουν στοιχεία σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου. Χρησιμοποιήθηκε επομένως η (2.4)

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W_a}$$

η οποία πλέον γράφεται ως

$$T_{i4} = T_{i3} + (T_{i4}^o - T_{i3}^o) \frac{W_f}{W_a} \quad (3.5)$$

3.1.3 Στρόβιλος υψηλής πίεσης

Η θερμοδυναμική μεταβολή των καυσαερίων, πλέον, στον στρόβιλο υψηλής πίεσης δινόταν από την (2.5), δηλαδή από την

$$T_{e1} = T_f \left[1 - \eta_{TI} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right]$$

$$n = (\pi_{TI})^{\frac{Ra}{C_{PTI}}}$$

η οποία πλέον γράφεται ως

$$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{TI} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{TI}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PTI}}} \right] \right) \quad (3.6)$$

Η ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο ΥΠ είναι, στο σημείο ισορροπίας, ίση με την ισχύ που καταναλώνει ο συμπιεστής, ισορροπία που δίνεται από τις (2.6) - (2.7):

$$C_{PC}(T_d - T_i) = C_{PTI}(T_f - T_{e1})\eta_{tc}$$

η οποία γράφεται ως

$$C_{PC}(T_{i3} - T_{i2}) = C_{PTI}(T_{i4} - T_{i5})\eta_{\mu TI} \quad (3.7)$$

Συνδυάζοντας τις (3.6) και (3.7) προκύπτει η η οποία δίνει την ονομαστική θερμοκρασία των καυσαερίων που εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης:

$$T_{i4}^o = \frac{C_{PC}}{C_{PTI}} \left(\frac{\pi_C^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_C} \right) \frac{T_{i2}}{\eta_{\mu C} \left[\eta_{TI} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{TI}^o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right]} \quad (3.8)$$

Σε περίπτωση μεταβατικού φαινομένου η (3.7) δεν θα ικανοποιείται, επομένως η ισχύς που θα καταναλώνει ο συμπιεστής θα είναι ίση με την (2.8), ήτοι

$$E_{T1} = W_a K_{hp} [\eta_{ic}(T_f - T_{e1}) - T_d + T_i], \quad K_{hp} = \frac{1}{\eta_{gt}(T_{e10} - T_{e20})}$$

η οποία γράφεται ως

$$E_{T1} = W_a K_{hp} [\eta_{\mu T1}(T_{t4} - T_{t5}) - (T_{t3} - T_{t2})] \quad (3.9)$$

$$K_{hp} = \frac{1}{\eta_{\mu T2}(T_{t5} - T_{t6})}$$

και δίνει την ισχύ επιτάχυνσης της αεριογόνου σε ανά μονάδα τιμές.

3.1.4 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

Η εξίσωση που δίνει την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον στρόβιλο ΧΠ είναι η (2.9):

$$T_{e2} = T_{e1} \left[1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{z} \right) \right]$$

$$z = (\pi_{T2})^{\frac{Ra}{C_{pT2}}}$$

η οποία πλέον γράφεται ως

$$T_{t6} = T_{t5} \left(1 - \eta_{T2} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2}^o W_a} \right)^{\frac{Ra}{C_{pT2}}} \right] \right) \quad (3.10)$$

Ο λόγος αποτόνωσης, όπως και στον συμπιεστή, εξαρτάται από την παροχή αέρα, W_a . Για τους λόγους συμπίεσης / αποτόνωσης ισχύει η (1.20):

$$\pi_C = \pi_{T1} \pi_{T2} \quad (3.11)$$

Άρα θα ισχύει ότι

$$\pi_{T2} = \pi_{T2}^o W_a \quad (3.12)$$

Η παροχή καυσίμου αμελείται, όπως και στο Κεφ. 2. Η ισχύς που αποδίδει ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης στην άτρακτό του δίνεται από τις (2.12) - (2.15):

$$E_{T2} = W_a K_{lp} (T_{e1} - T_{e2})$$

$$K_{lp} = \frac{1}{T_{e10} - T_{e20}}$$

οι οποίες γράφτηκαν ως

$$E_{T2} = W_a K_{lp} (T_{i5} - T_{i6})$$

$$K_{lp} = \frac{1}{T_{i5}^o - T_{i6}^o} \quad (3.13)$$

3.2 Δεδομένα προσομοιώσεων

Τα ονομαστικά μεγέθη του αεριοστροβίλου ορίζονται μέσω των πολυτροπικών εξισώσεων και των εξισώσεων συμβιβαστότητας παροχών και ισχύων. Οι εξισώσεις επιλύονται ξανά για το επίπεδο φορτίου στο οποίο είναι επιθυμητό να λειτουργεί η μονάδα και στο τέλος των υπολογισμών διαιρούνται οι λειτουργικές τιμές με τις ονομαστικές ώστε να βρεθούν οι ανηγμένες τιμές του κάθε μεγέθους (οι ανά μονάδα τιμές). Κατόπιν επιβάλλεται μια εξωτερική διαταραχή στο σύστημα, μια βηματική αύξηση ή μείωση του φορτίου της γεννήτριας, οπότε προσομοιώνεται η απόκριση του συστήματος σε αυτή τη διαταραχή. Προφανώς τα πρώτα δευτερόλεπτα, πριν την διαταραχή, η μονάδα θα πρέπει να δίνει συχνότητα εξόδου 50 Hz για οποιοδήποτε φορτίο.

3.2.1 Θερμοδυναμικά δεδομένα

3.2.1.1 Ονομαστικές τιμές

Οι σταθερές του συστήματος χωρίζονται σε δύο ομάδες: τις θερμοδυναμικές σταθερές και τις σταθερές χρόνου. Ενώ οι σταθερές χρόνου υπεισέρχονται στα δομικά στοιχεία χωρίς αναγκαίους υπολογισμούς (κυρίως ως εκτιμήσεις ή μετρήσεις), οι θερμοδυναμικές σταθερές αξιοποιούνται για τον καθορισμό των ονομαστικών και λειτουργικών τιμών. Οι θερμοδυναμικές σταθερές είναι 13 και παρουσιάζονται στον Πίν. 3.2.

Οι ονομαστικές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι σταθερές τιμές, απαραίτητες για την κανονικοποίηση των λειτουργικών τιμών θερμοκρασίας. Οι εξισώσεις (3.14) δίνουν τις ονομαστικές τιμές των θερμοκρασιών T_{i3} , T_{i4} , T_{i5} και T_{i6} και παρατίθεται εδώ για λόγους καλύτερης εποπτείας. Σε ονομαστική λειτουργία (πλήρες φορτίο) θεωρείται ότι όλες οι θερμοκρασίες και οι παροχές έχουν την τιμή 1 αμ.

Όπως φαίνεται οι εξισώσεις αυτές δεν χρειάζονται αριθμητική επίλυση αλλά μπορούν να

προσδιοριστούν αναλυτικά. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.4 έχει γίνει η παραδοχή πως η ανηγμένη παροχή στον στρόβιλο ισχύος είναι στραγγαλισμένη, επομένως κλειδώνει το λόγο αποτόνωσης του στροβίλου ΥΠ στην ονομαστική της τιμή για κάθε επίπεδο φορτίου. Τα θερμοδυναμικά μεγέθη, δεδομένα και υπολογισμένα, συνοψίζονται στον Πίν. 3.2.

$$\left. \begin{array}{l} \text{εξισώσεις} \\ \text{ονομαστικών} \\ \text{τιμών} \end{array} \right\} \begin{cases} T_{i3}^o = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^o \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}}} - 1}{\eta_C} \right) \\ T_{i4}^o = \frac{C_{PC}}{C_{PT1}} \left(\frac{\pi_C^{\gamma-1} - 1}{\eta_C} \right) \frac{T_{i2}}{\eta_{\mu C} \left[\eta_{T1} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right]} \\ T_{i5}^o = T_{i4}^o \left(1 - \eta_{T1} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right] \right) \\ T_{i6}^o = T_{i5}^o \left(1 - \eta_{T2} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right] \right) \end{cases} \quad (3.14)$$

3.2.1.2 Λειτουργικές τιμές

Λειτουργικές ονομάστηκαν οι τιμές των θερμοδυναμικών μεγεθών που αυτά λαμβάνουν όταν η μονάδα δεν παράγει την ονομαστική της ισχύ αλλά μέρος αυτής. Τότε οι θερμοκρασίες και οι παροχές δεν έχουν την ονομαστική τους τιμή αλλά μια μικρότερη η οποία προκύπτει από την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των λειτουργικών τιμών είναι 6 καθώς οι άγνωστοι του προβλήματος είναι επίσης 6: 4 θερμοκρασίες, στα σημεία 3, 4, 5 και 6 της στροβιλομηχανής και 2 παροχές, καυσίμου (W_f) και αέρα, (W_a). Η πέμπτη εξίσωση είναι η (3.5) που διέπει τον θάλαμο καύσης και η έκτη είναι η εξίσωση συμβιβαστότητας ισχύων στροβίλου ΧΠ – γεννήτριας. Οι θερμοκρασίες δίνονται σε φυσικές μονάδες ενώ οι παροχές σε ανά μονάδα (%) τιμές. Η ισχύς θεωρείται επίσης σε ανά μονάδα τιμή.

Οι εξισώσεις που δίνουν τις λειτουργικές τιμές είναι οι (3.15), οι οποίες επιλύονται αριθμητικά. Είναι προφανές ότι η 2^η και η 6^η από τις (3.15) σε ονομαστική λειτουργία είναι ταυτοτικές. Η ενσωμάτωση των παραπάνω εξισώσεων στο Simulink απεικονίζεται στα Σχ. 3.1 και 3.2.

$$\begin{aligned}
 & T_{i3} = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^o W_a \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}-1}}}{\eta_C} \right) \\
 & T_{i3} = T_{i4} + (T_{i3}^o - T_{i4}^o) \frac{W_f}{W_a} \\
 & C_{PC} (T_{i3} - T_{i2}) = \eta_\mu C_{PT1} (T_{i4} - T_{i5}) \\
 & T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{T1} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right) \\
 & T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^o W_a} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right) \\
 & P_e = W_a \frac{T_{i5} - T_{i6}}{T_{i6}^o - T_{i5}^o}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

εξισώσεις λειτουργικών τιμών

Πίνακας 3.2: Θερμοδυναμικές ονομαστικές τιμές

A/A	Ονομασία σταθεράς	Σύμβολο εξισώσεων	Σύμβολο Matlab	Τιμή	Μονάδα
1	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	η_C	nt1	88	%
2	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΥΠ	η_{T1}	nt2	88	%
3	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	η_{T2}	nc	81	%
4	Λόγος συμπίεσης	π_C	pc	18	-
5	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΥΠ	π_{T1}	pt1	4,5	-
6	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΧΠ	π_{T2}	pt2	4	-
7	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{i2}	Tt2	288	Kelvin
8	Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή – εισόδου θαλάμου καύσης	T_{i3}	Tt3	728	Kelvin
9	Θερμοκρασία εξόδου θαλάμου καύσης – εισόδου στροβίλου ΥΠ	T_{i4}	Tt4	1439	Kelvin
10	Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΥΠ – εισόδου στροβίλου ΧΠ	T_{i5}	Tt5	1051	Kelvin
11	Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_{i6}	Tt6	774	Kelvin
12	Παγκόσμια σταθερά αερίων	Ra	Ra	0,287	kJ/(K·kg)
13	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του συμπιεστή	C_{PC}	Cpa	1,03	kJ/(K·kg)
14	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του στροβίλου ΥΠ	C_{PT1}	Cpt	1,18	kJ/(K·kg)
15	Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του στροβίλου ΧΠ	C_{PT2}	Cpg	1,12	kJ/(K·kg)
16	Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	$\eta_{\mu T1}$	n_mech_t	99	%
17	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	$\eta_{\mu T2}$	n_tc	99	%
18	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	$\eta_{\mu T2}$	n_tc	99	%
19	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	$\eta_{\mu T2}$	n_tc	99	%

Στην διάταξη με έλεγχο στροφών αεριογόνου, επομένως με ρυθμιστή ανοίγματος πτερυγίων, η αρχική ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου, σε ανά μονάδα τιμές, δίνεται από την

$$N_1 = \frac{K_{IGV} - 1 + \sqrt{(K_{IGV} - 1)^2 + 4 K_{IGV} W_a}}{2 K_{IGV}} \quad (3.16)$$

και το άνοιγμα των πτερυγίων είναι, σε ανά μονάδα τιμές,

$$g = \frac{W_a}{N_1} \quad (3.17)$$

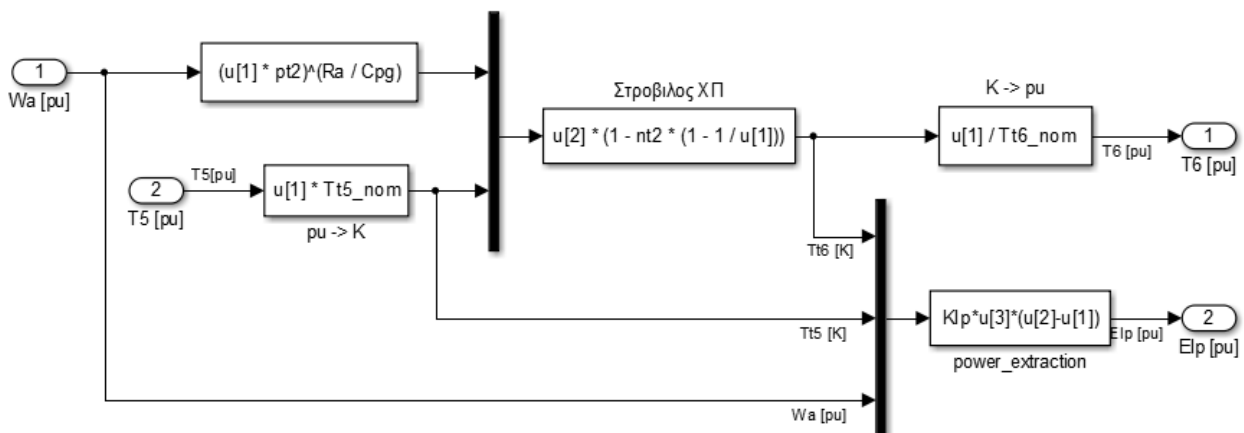
Στην διάταξη χωρίς έλεγχο ταχύτητας αεριογόνου, ισχύει πως

$$g = 1 \Leftrightarrow N_1 = W_a \quad (3.18)$$

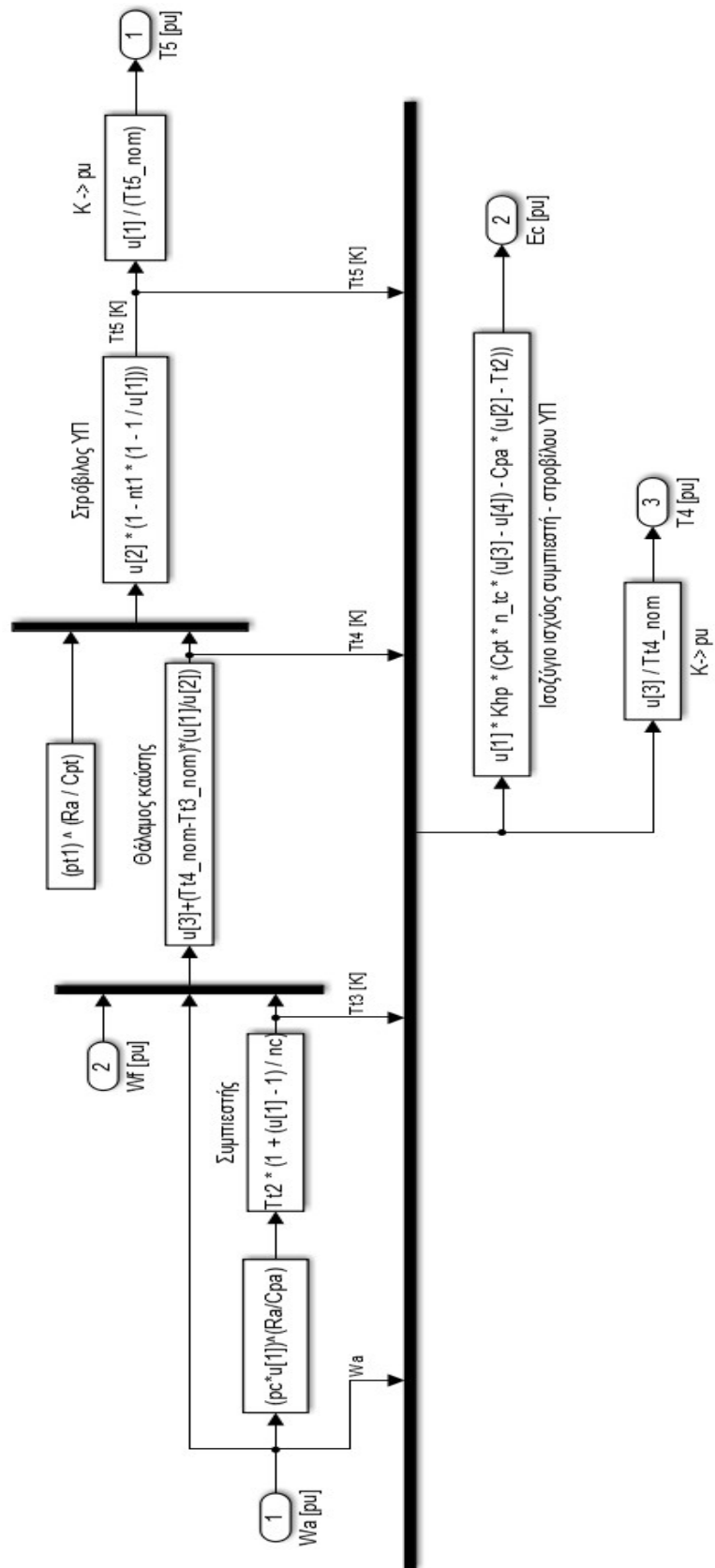
Ακολουθεί η κανονικοποίηση των θερμοκρασιών. Οι 4 θερμοκρασίες που βρέθηκαν διαιρούνται η κάθε μία με την αντίστοιχη ονομαστική της,

$$T_i \equiv \frac{T_{ii}}{T_{ii}^o}, \quad i = 3, 4, 5, 6 \quad (3.19)$$

Με τον συμβολισμό T_i θα συμβολίζονται οι θερμοκρασίες σε ανά μονάδα τιμές, ενώ ο συμβολισμός T_{ii} θα είναι σε βαθμούς Kelvin. Οι αλγεβρικές εξισώσεις χωρίζονται σε δύο ομάδες, της αεριογόνου και του στροβίλου ισχύος και ενσωματώνονται στα δύο αντίστοιχα στοιχεία. Οι όροι K_{hp} και K_{lp} που εμφανίζονται είναι οι παράγοντες κανονικοποίησης της ισχύος που παρουσιάστηκαν στις (3.9) και (3.13).



Σχήμα 3.1: Αλγεβρικές εξισώσεις στροβίλου ΧΠ (ισχύος)



Σχήμα 3.2: Αλγεβρικές εξισώσεις αεριογόνου

3.2.2 Σταθερές τιμές προσομοιώσεων

Στον Πίν. 3.3 παρουσιάζονται οι σταθερές χρόνου και των δύο προσομοιώσεων που θα πραγματοποιηθούν στο Κεφ. 3. Το μοντέλο χωρίς έλεγχο πτερυγίων δεν έχει σταθερά χρόνου ρύθμισης των πτερυγίων. Οι σταθερές είναι 10 καθώς η σταθερά θερμικών μεταβολών του στροβίλου ΧΠ (T_{cd}) θεωρήθηκε ίση με την αντίστοιχη της αεριογόνου. Επίσης παρουσιάζονται οι σταθερές του συστήματος μέτρησης θερμοκρασίας, μεταξύ του ακτινοβολούμενου και του συναγωγικού μέρους (όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.3.2.1) όπως και οι σταθερές ελάχιστου καυσίμου. Οι σταθερές αυτές διέπονται από προφανείς σχέσεις, δηλαδή $K_2 + K_3 = 1$ και $K_4 + K_5 = 1$. Στην ίδια ομάδα κατατάσσονται, τέλος, τα όρια ανοίγματος των πτερυγίων. Οι τελευταίες σταθερές δεν συμμετέχουν σε ολοκληρωτές αλλά είναι εξωτερικά καθορισμένες λόγω μηχανικών / θερμικών περιορισμών.

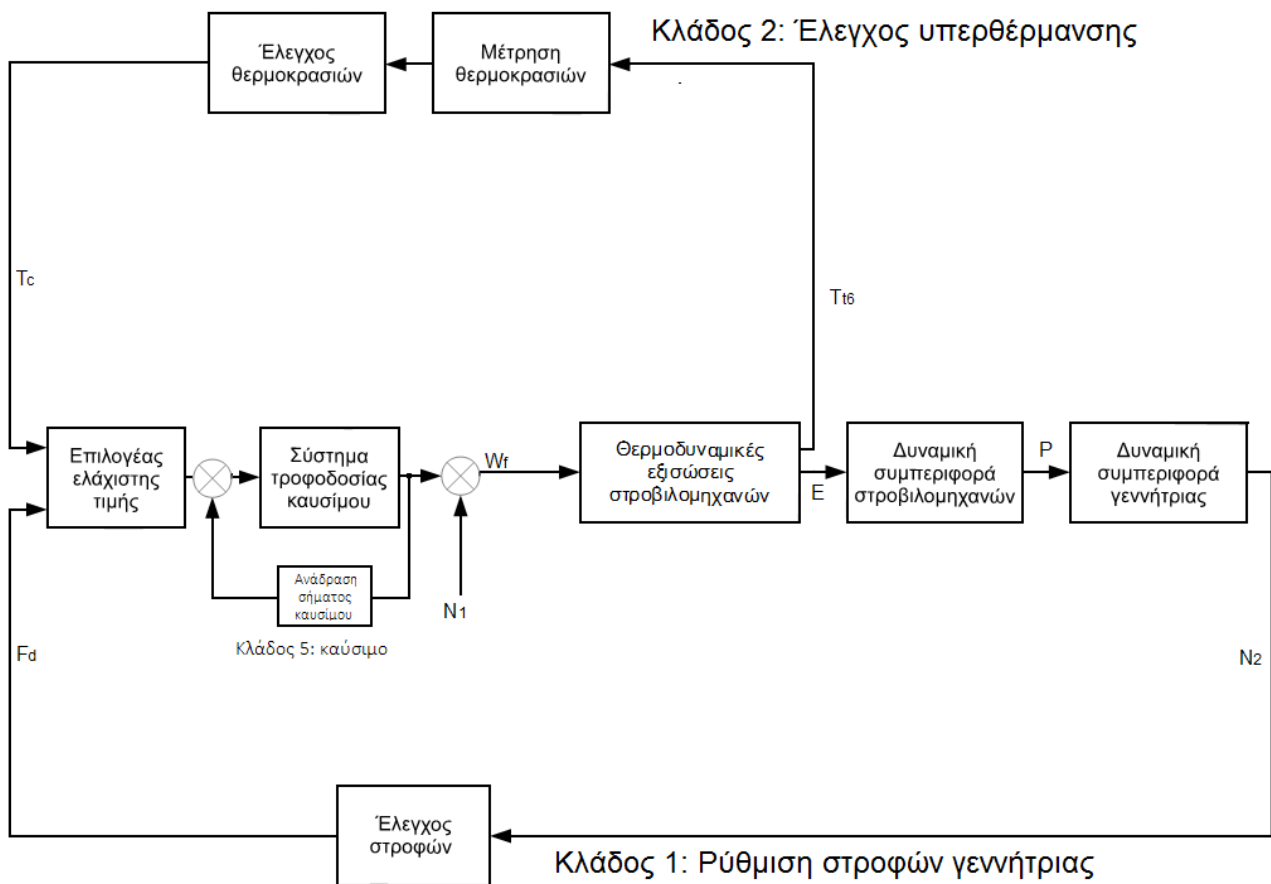
Πίνακας 3.3: Σταθερά μεγέθη προσομοίωσης LM 2500+

Ονομασία	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Αδράνεια αεριογόνου	H1	3,5	sec
Αδράνεια στροβίλου ισχύος και γεννήτριας	H2	2,2	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικού μέρους συστήματος καυσίμου	Tv	0,05	sec
Σταθερά χρόνου ροϊκού μέρους συστήματος καυσίμου	Tf	0,4	sec
Σταθερά χρόνου θερμικών μεταβολών αεριογόνου & στροβίλου ισχύος – γεννήτριας.	Tcd	0,2	sec
Σταθερά χρόνου πτερυγίων (IGVs)	Tigv	1	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικής συμπεριφοράς οδηγών πτερυγίων	Tgov	0,1	sec
Σταθερά χρόνου θερμικής ασπίδας προστασίας θερμομέτρου	T3	1,0	sec
Σταθερά χρόνου απόκρισης θερμομέτρου	T4	15	sec
Σταθερά χρόνου ολοκληρωτικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T5	0,4699	sec
Συντελεστής μείωσης παροχής καυσίμου	K2	0,77	pu
Ποσοστό μόνιμης παροχής καυσίμου	K3	0,23	pu
Ποσοστό έμμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K4	0,8	pu
Ποσοστό άμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K5	0,2	pu
Μέγιστο άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs)	gmax	1,0	pu
Ελάχιστο άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs)	gmin	0,87	pu

3.3 Ανάλυση συστήματος με ανάδραση παροχής καυσίμου και έλεγχο στροφών αεριογόνου

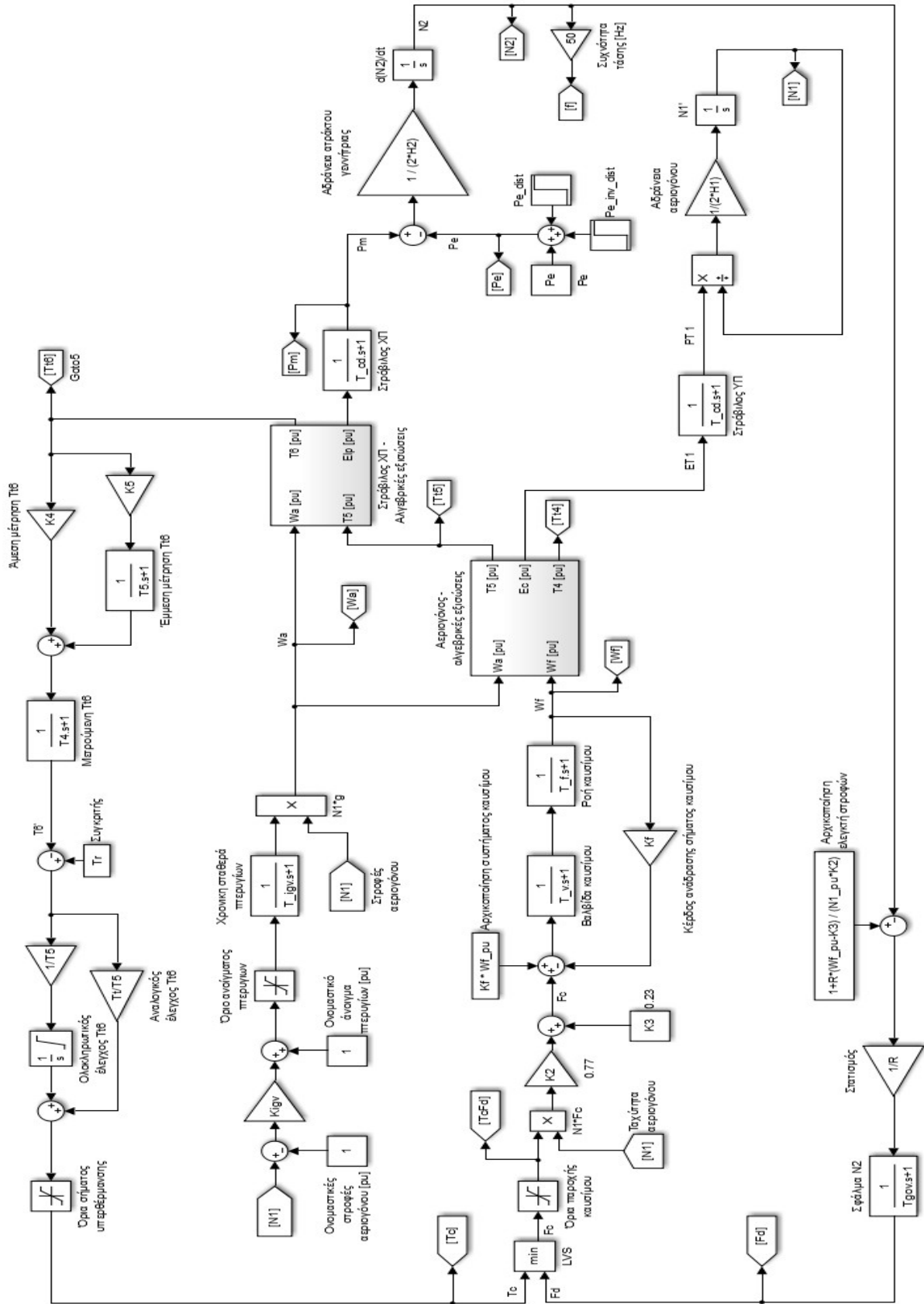
3.3.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Το γενικό διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου του υπό μελέτη συστήματος παρατίθεται στο Σχ. 3.3. Απεικονίζεται η ρύθμιση του αέρα μέσω του ελέγχου της ταχύτητας της αεριογόνου. Η αναπαράστασή του στο Simulink έγινε με το διάγραμμα βαθμίδων που φαίνεται στο Σχ. 3.4.



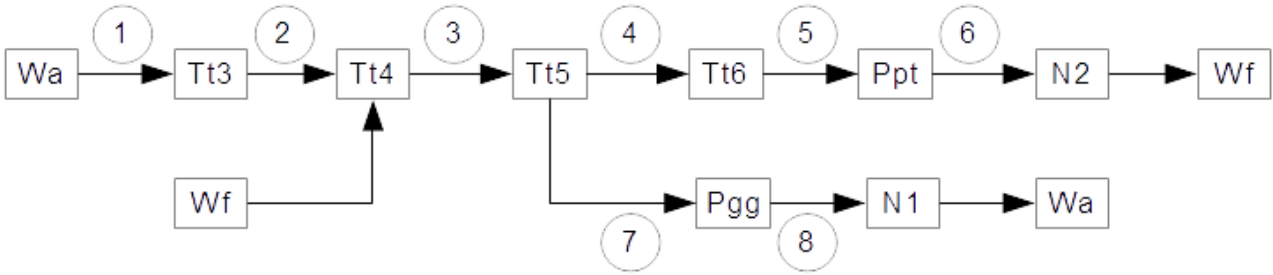
Σχήμα 3.3: Γενικό διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου αεριοστροβίλου GE LM 2500+

Τα δύο μεγαλύτερα στοιχεία που αναφέρονται ως *aeroderivative* και *power_turbine* είναι οι βαθμίδες των αλγεβρικών εξισώσεων της αεριογόνου και του στροβίλου ισχύος αντίστοιχα, όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.2.1.2 και ειδικότερα στα σχήματα 3.1 και 3.2. Αυτές υλοποιούν τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς σε ενδεχόμενη διαταραχή μέσω των θερμοδυναμικών αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.4: Γενικό διάγραμμα αναπαράστασης του GE LM 2500+ στο περιβάλλον Simulink

Τα διάφορα μηχανικά και θερμοδυναμικά μεγέθη στο Simulink μεταβάλλονται όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής σημάτων στο περιβάλλον προσομοίωσης Simulink

Οι εξισώσεις σε κάθε σημείο είναι οι (3.15) και επιλύονται ως προς την μεταβλητή που απαιτείται να υπολογιστεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν:

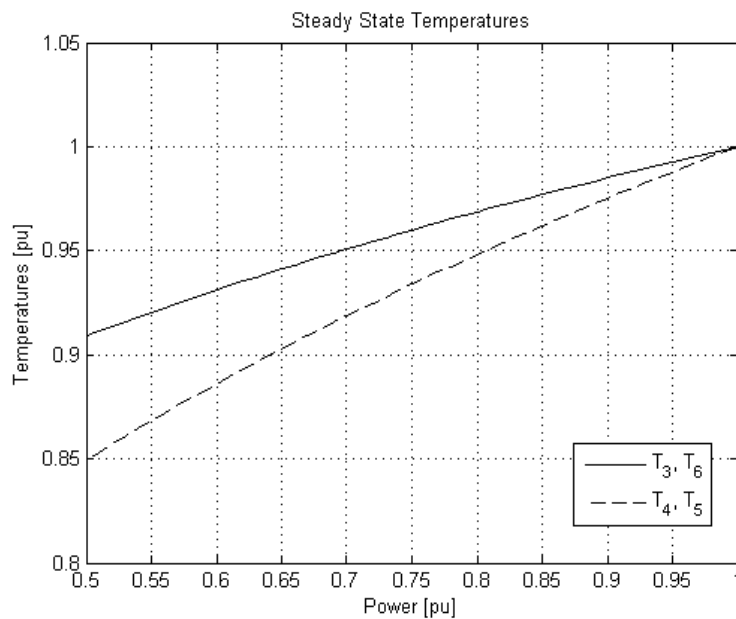
$$\begin{aligned}
 (1): \quad T_{t3} &= T_{t2} \left(1 + \frac{(\pi_C^o W_a)^{\frac{Ra}{C_{pc}}} - 1}{\eta_C} \right) \\
 (2): \quad T_{t4} &= T_{t3} - (T_{t3}^o - T_{t4}^o) \frac{W_f}{W_a} \\
 (3): \quad T_{t5} &= T_{t4} \left(1 - \eta_{T1} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{pT1}}} \right) \\
 (4): \quad T_{t6} &= T_{t5} \left(1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^o W_a} \right)^{\frac{Ra}{C_{pT2}}} \right) \\
 (5): \quad P_{pt} &= P_e = W_a \frac{T_{t5} - T_{t6}}{T_{t6}^o - T_{t5}^o} \\
 (6): \quad P_{gg} &= W_a K_{HP} [\eta_{\mu T2} (T_{t4} - T_{t5}) - (T_{t3} - T_{t2})] \\
 (7): \quad \frac{P_{gg}}{N_1} &= 2H_1 \dot{N}_1 \\
 (8): \quad P_m - P_e &= 2H_2 \dot{N}_2
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Με ολοκλήρωση των (3.20-7) και (3.20-8) προκύπτουν οι στροφές κάθε ατράκτου. Οι θερμοκρασίες και οι στροφές καταλήγουν στους αντίστοιχους ελεγκτές, οι οποίοι καθορίζουν τις παροχές αέρα και καυσίμου, και έτσι κλείνει ο κύκλος.

Η ιδιαιτερότητα αυτής της αναπαράστασης είναι ο κλάδος ρύθμισης του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων εισόδου. Ο σκοπός της παρούσας διάταξης είναι να εξετάσει τον συγκεκριμένο τρόπο ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων.

3.3.2 Διαγράμματα θερμοκρασιών και παροχών μόνιμης κατάστασης

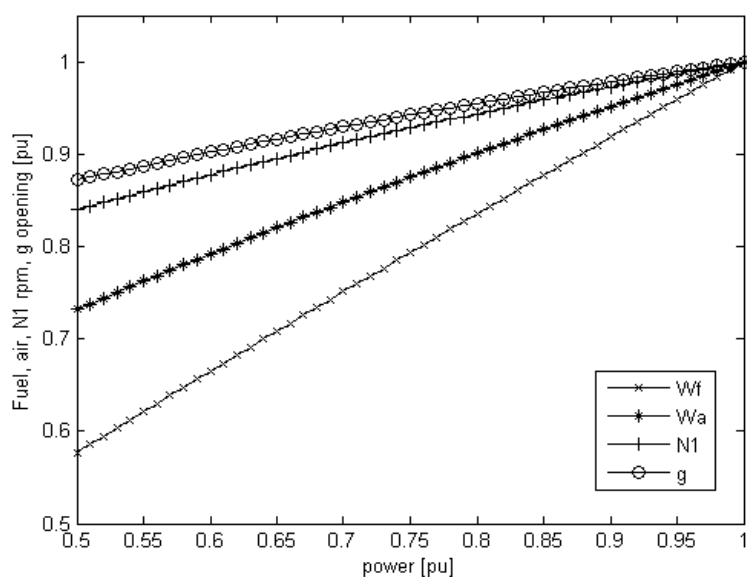
Με τις τιμές των παραμέτρων που παρουσιάστηκαν στον Πίν. 3.3 μπορούν να εξαχθούν τα διαγράμματα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του συστήματος. Για να εξαχθούν τα διαγράμματα αυτά από την Matlab προφανώς χρειάζονται και στοιχεία που θα αναφερθούν στα επόμενα (βλ. Πίν. 3.7) οι τιμές όμως των στοιχείων του Πίν. 3.7 δεν επηρεάζουν τα διαγράμματα που παρατίθενται εδώ. Για οποιαδήποτε τιμή των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον Πίν. 3.7 τα διαγράμματα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας θα ήταν ίδια, καθώς περιγράφουν αδιατάρακτη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 3.6: Θερμοκρασίες λειτουργίας αεριοστροβίλου, ανά μονάδα τιμές

Τα σημεία λειτουργίας του αεριοστροβίλου, όσον αφορά τις θερμοκρασίες λειτουργίας του, τις στροφές των ατράκτων και τις παροχές καυσίμου και αέρα απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα ως συναρτήσεις της ισχύος λειτουργίας του. Όλες οι τιμές είναι κανονικοποιημένες και είναι εμφανές ότι όλες αυξάνονται όσο αυξάνεται και η ισχύς εξόδου του συστήματος.

Η παρούσα αναπαράσταση του αεριοστροβίλου δεν καλύπτει τιμές ισχύος κάτω από το 50% της ονομαστικής του. Ας σημειωθεί ότι οι T_{13} και T_{16} είναι ίσες σε ανά μονάδα τιμές ($T_3 = T_6$), όπως το ίδιο συμβαίνει και με τις T_{14} και T_{15} ($T_4 = T_5$).



Σχήμα 3.7: Παροχές καυσίμου και αέρα, ταχύτητα αεριογόνου, άνοιγμα πτερυγίων

Στο Σχ. 3.20 φαίνεται πως στο μισό φορτίο η ταχύτητα της αεριογόνου έχει τιμή 0,84 αμ, αποτέλεσμα που οφείλεται στον κλάδο ελέγχου των στροφών της (βλ. υποενότητα 2.5.2).

3.3.3 Παράμετροι συστημάτων ελέγχου

Ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι να υποδειχθούν κατάλληλες ρυθμίσεις για κάθε μοντέλο ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατά το δυνατόν απόκριση. Δεν καταστρώθηκαν εξισώσεις βελτιστοποίησης, οπότε η κατά το δυνατόν καλύτερη ρύθμιση επιτυγχάνεται μέσω διαδοχικών δοκιμών μέχρι να θεωρηθεί ικανοποιητική η συμπεριφορά του συστήματος.

Η έννοια “ικανοποιητική συμπεριφορά συστήματος” είναι προφανώς σχετική. Στην παρούσα εργασία θεωρείται ως διαταραχή μια βηματική μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας κατά 10%, και πιο συγκεκριμένα βηματική αύξηση του φορτίου από το 90% στο 100% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας, για την οποία θεωρείται αποδεκτή η μεταβατική βύθιση της ηλεκτρικής συχνότητας ως τα 49 Hz, ενώ ως ελάχιστη τελική τιμή της ηλεκτρικής συχνότητας θεωρήθηκαν τα 49,7 Hz (για σύστημα 50 Hz). Ένα δεύτερο κριτήριο επιλογής είναι ο ελάχιστος λόγος απόσβεσης ζ της ταλάντωσης της ηλεκτρικής συχνότητας. Επειδή μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι ταλαντωτικοί ρυθμοί στο σύστημα, εξετάζεται πάντα η ταλάντωση με τον μικρότερο λόγο απόσβεσης.

Η ρύθμιση επιτυγχάνεται εκτελώντας πολλαπλές προσομοιώσεις όπου κάθε φορά δοκιμάζεται ένας διαφορετικός συνδυασμός των παραμέτρων που είναι υπό ρύθμιση (στατισμός, κέρδος ανάδρασης βρόχου καυσίμου, κέρδος ελέγχου ανοίγματος πτερυγίων). Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης καταγράφονταν σε λογιστικό φύλλο και κατόπιν αυτά ταξινομούσαν

με βάση τις προκαθορισμένες απαιτήσεις.

Καθώς όλα τα μοντέλα προσομοίωσης αναπτύχθηκαν στο γραφικό περιβάλλον *Simulink* της γλώσσας προγραμματισμού *Matlab*, τα αποτελέσματα προκύπτουν από την χρήση συναρτήσεων ανάλυσης δυναμικών συστημάτων της *Matlab*. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδικές συναρτήσεις, η `linmod('sys')` και η `damp(A)`, όπου *sys* είναι το όνομα του μοντέλου στο *Simulink* και *A* ο πίνακας κατάστασης **A** του γραμμικοποιημένου συστήματος. Μέσω της συνάρτησης `linmod`, η οποία γραμμικοποιεί το σύστημα γύρω από κάποιο σημείο ισορροπίας, προσδιορίζονται με αριθμητικές μεθόδους οι πίνακες **A**, **B**, **C** και **D** της αναπαράστασής του στον χώρο καταστάσεων:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{z} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{z}\end{aligned}\tag{3.21}$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{z} , το διάνυσμα μεταβλητών εισόδου και \mathbf{y} το διάνυσμα μεταβλητών εξόδου.

Οι λόγοι απόσβεσης ζ για κάθε ταλαντωτικό ρυθμό προσδιορίζονται από την συνάρτηση `damp(A)`. Καθώς υπάρχουν, όπως προαναφέρθηκε, περισσότεροι από ένας ταλαντωτικοί ρυθμοί, αποθηκεύεται ο μικρότερος λόγος απόσβεσης μεταξύ των ιδιοτιμών που προσδιορίζονται για κάθε συνδυασμό τιμών στατισμού, κερδών κλπ, αφού αυτός θα επηρεάσει το σύστημα. Η ανάλυση όλων των ρυθμών απόκρισης θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα (3.3.4), καθώς εκεί θα παρουσιαστούν όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επιλογή των παραμέτρων που ρυθμίστηκαν.

Οι τιμές του λόγου απόσβεσης εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας του συστήματος καθώς αφορούν το γραμμικοποιημένο σύστημα. Η γραμμικοποίηση γίνεται στο 90% του ονομαστικού φορτίου του συστήματος καθώς αυτό αποτελεί το σημείο εκκίνησης των προσομοιώσεων οπότε σε αυτό το σημείο προσδιορίστηκε ο συνδυασμός παραμέτρων με την πιο γρήγορη απόσβεση για το μεταβατικό φαινόμενο που μελετάται, δηλαδή με τον μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης μεταξύ των αποδεκτών αποκρίσεων.

Επειδή το σύστημα είναι μη-γραμμικό, η ελάχιστη τιμή του λόγου απόσβεσης δεν είναι επαρκής πληροφορία. Αποθηκεύεται, συνεπώς, και ένα ακόμη μέγεθος: η τυπική απόκλιση της ηλεκτρικής συχνότητας από την τελική της τιμή [21]. Συγκρατήθηκαν δύο τιμές: η τυπική απόκλιση στο τελευταίο 1/4 και στα τελευταία 3/4 του χρόνου διάρκειας της προσομοίωσης, θεωρώντας πως στο τελευταίο 1/4 καταγράφεται η γραμμική απόκριση του συστήματος, καθώς εκεί είναι ενεργός μόνο ο κλάδος ρύθμισης στροφών, ενώ στα τελευταία 3/4 περιλαμβάνεται και η μη γραμμική απόκριση, η οποία οφείλεται στη μετάβαση, στο διάστημα αυτό, από τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης στον

κλάδο ρύθμισης στροφών.

Όλες αυτές οι τιμές (δεδομένα, μέγιστη βύθιση και τελική τιμή ηλεκτρικής συχνότητας, λόγος απόσβεσης γραμμικοποιημένου συστήματος και οι δύο τυπικές αποκλίσεις των χρονικών διαστημάτων αποθηκεύονται, όπως προαναφέρθηκε, σε ένα φύλλο εργασίας. Κατόπιν οι τιμές αυτές ταξινομούνται ώστε να γίνει η επιλογή των παραμέτρων που ικανοποιούν τις απαιτήσεις. Η πρώτη ταξινόμηση γίνεται ως προς την μέγιστη βύθιση ώστε να απορριφθούν συνδυασμοί παραμέτρων που δίνουν χαμηλότερη βύθιση από την αποδεκτή. Τα αποδεκτά αποτελέσματα ταξινομούνται πρώτα ως προς την ελάχιστη αποδεκτή μεταβατική βύθιση της ηλεκτρικής συχνότητας, κατόπιν ως προς την τελική τιμή της ηλεκτρικής συχνότητας και έπειτα είτε ως προς τον λόγο απόσβεσης, είτε ως προς τις τυπικές αποκλίσεις των τιμών της συχνότητας, είτε ως προς την ελάχιστη χρονική στιγμή όπου ενεργοποιείται ξανά ο κλάδος ρύθμισης στροφών, αφού ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης είναι εγγενώς ασταθής και οδηγεί σε μεγάλες διαταραχές. Όπως θα φανεί παρακάτω, η τυπική απόκλιση στο μικρότερο διάστημα δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την ταξινόμηση ως προς τον λόγο απόσβεσης, αφού προς το τέλος του μεταβατικού φαινομένου επικρατεί ο γραμμικός χαρακτήρας του μοντέλου καθώς δεν εμπλέκεται πλέον ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Η ταξινόμηση ως προς την τυπική απόκλιση στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα οδηγεί σε ρυθμίσεις που δεν δίνουν πάντα το μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης, δίνουν όμως καλύτερες αποκρίσεις λόγω της ταχύτερης μεταγωγής στον κλάδο ρύθμισης στροφών.

Ανάλογα με την τελική ταξινόμηση προκύπτουν οι αποδεκτοί συνδυασμοί ρυθμίσεων. Η τελική επιλογή πραγματοποιήθηκε με επισκόπηση αυτών των αποκρίσεων οι οποίες είχαν ελάχιστες διαφορές. Σε αυτή την ενότητα ρυθμίζονται μόνο ο στατισμός, R , και το κέρδος του κλάδου ανάδρασης του συστήματος καυσίμου, K_f . Οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρήθηκαν δεδομένες και παρουσιάζονται συνολικά στον Πίν. 3.7. Στη βιβλιογραφία [23, 24, 2] τα όρια των ελεγκτών θερμοκρασίας και στροφών είναι υψηλότερα (1,5 αμ), αλλά στην παρούσα εργασία προτιμήθηκαν οι χαμηλότερες τιμές, ως περισσότερο ρεαλιστικές. Προφανώς, με μεγαλύτερα περιθώρια υπερφόρτισης η απόκριση του συστήματος ήταν ακόμη πιο ομαλή.

Η υλοποίηση της μεθόδου ρύθμισης παραμέτρων που περιγράφηκε ως τώρα έγινε με χρήση ένθετων βρόχων:

```

for R=0.02:0.001:0.05
for Kf=0:0.05:4
sim('SGT700_Kf_IGV',50)
G = linmod('SGT700_Kf_IGV');
[wn,zeta,va1] = damp(G.a);
aux_mat=zeros(10,1);
for k=1:(size(G.a,1))
aux_mat(k,1)=abs(zeta(k));
end
end

```

Στον Πίν. 3.4 παρουσιάζεται το πλήθος των τιμών που λαμβάνουν οι παράμετροι που ρυθμίζονται, καθώς και το αυξητικό βήμα κατά το οποίο μεταβάλλονται.

Πίνακας 3.4: Ρυθμιζόμενες παράμετροι

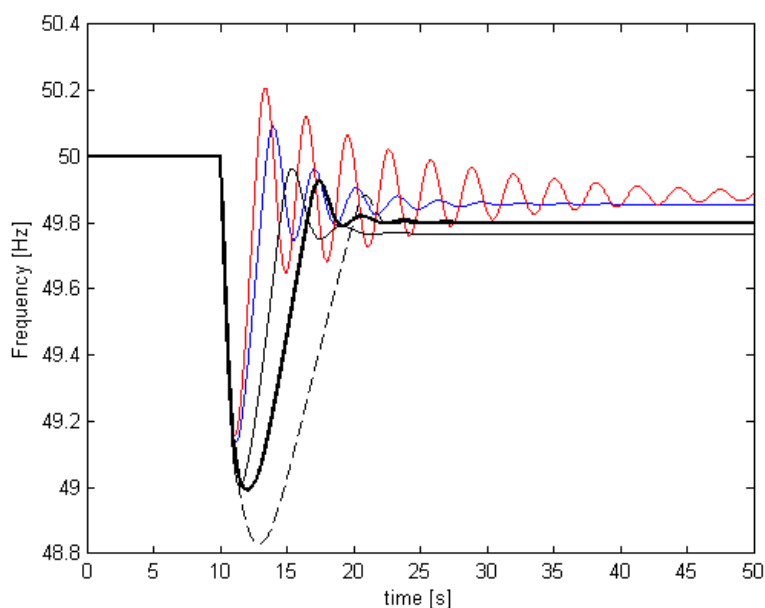
Παράμετρος	Από	Έως	Βήμα	Πλήθος τιμών
R	0,02	0,05	0,001	31
K _f	0	4	0,05	81

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά $31 \times 81 = 2.511$ δοκιμές. Στον Πίν. 3.5 παρουσιάζονται διάφορες επιλογές παραμέτρων, οι οποίες προέκυψαν από τις διαφορετικές ταξινομήσεις των στοιχείων. Η ταξινόμηση έχει γίνει κάθε φορά ως προς το μέγεθος που παρουσιάζεται με έντονα γράμματα, ενώ η στήλη “σειρά επιλογής” δείχνει την κατάταξη των αποκρίσεων με βάση τις απαιτήσεις που τέθηκαν. Κοινή αρίθμηση δείχνει πως οι αποκρίσεις των συνδυασμών αυτών δεν διέφεραν σχεδόν καθόλου. Οι αποκρίσεις που προκύπτουν από κάθε συνδυασμό αξιολογήθηκαν οπτικά και τελικά επιλέχθηκαν οι ρυθμίσεις που περιγράφονται στον Πίν. 3.7.

Πίνακας 3.5: Εναλλακτικές ρυθμίσεις

	Σειρά επιλογής	R	K _f	Ελάχιστη συχνότητα	Τελική συχνότητα	Τυπική απόκλιση 75% - 100%	Τυπική απόκλιση 25% - 100%	ζ	χρόνος απεμπλοκής	Απεικόνιση
Ελάχιστο 49,7	-	0,030	0,65	49,0007	49,7749	0,0000	0,1246	0,4506	15,35	
	4	0,028	0,20	49,1355	49,8568	0,0003	0,0494	0,1466	13,01	Μπλε
	2	0,036	0,45	49,0036	49,7681	0,0000	0,0872	0,4686	14,21	Συνεχής
	5	0,029	0,00	49,1576	49,8826	0,0190	0,0910	0,0629	12,44	Κόκκινη
Ελάχιστο 49,8	1	0,024	0,8	48,9920	49,8009	0,0000	0,1604	0,3676	16,46	Έντονη
	4	0,028	0,2	49,1355	49,8568	0,0003	0,0494	0,1466	13,01	Μπλε
	3	0,020	1,1	48,8289	49,8022	0,0000	0,2658	0,3851	19,97	Διακεκομμένη
	5	0,029	0	49,1576	49,8826	0,0190	0,0910	0,0629	12,44	Κόκκινη

Οι αποκρίσεις που αξιολογήθηκαν με επισκόπηση παρουσιάζονται στο Σχ. 3.8, ενώ η απόκριση με αρχικές και τελικές ρυθμίσεις παρουσιάζεται στο Σχ. 3.9.



Σχήμα 3.8: Αποκρίσεις εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων ελέγχου

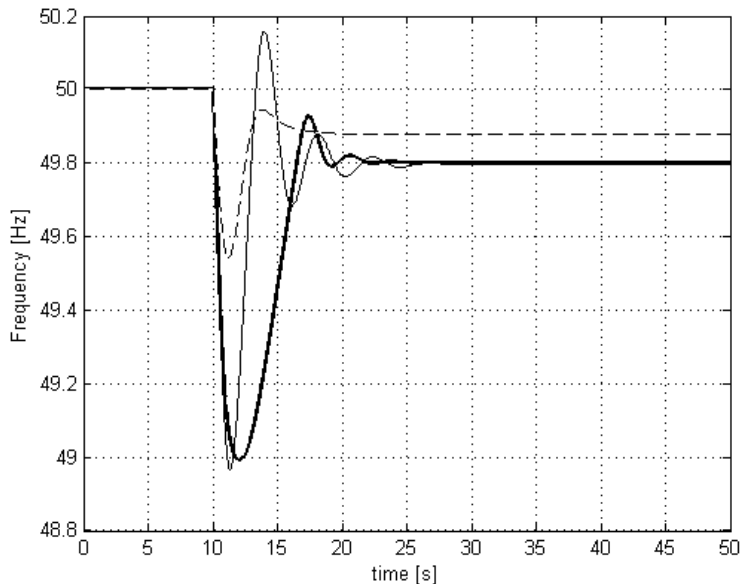
Όπως φαίνεται, η καλύτερη επιλογή δεν είναι αυτή με τον υψηλότερο λόγο απόσβεσης αλλά αυτή που προέκυψε από τη στατιστική μελέτη, λόγω μη γραμμικότητας, η οποία οφείλεται στη μεταγωγή από τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης στον κλάδο ρύθμισης στροφών. Συνδυασμοί παραμέτρων με μικρότερο μόνιμο σφάλμα παρουσιάζουν επίσης μικρότερη μεταβατική βύθιση αλλά μεγαλύτερες ταλαντώσεις, ο συνδυασμός με τον μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης, και επομένως με τις μικρότερες ταλαντώσεις, παρουσιάζει πιο μεγάλο μόνιμο σφάλμα, ενώ ο συνδυασμός με το δεύτερο μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης παρουσιάζει μεγάλη μεταβατική βύθιση.

Πίνακας 3.6: Σύγκριση συνδυασμών παραμέτρων

Ονομασία μεγέθους	Σύμβολο	Πρώτη τιμή [1]	Βελτιωμένη τιμή [1]	Ρύθμιση παρούσας εργασίας
Στατισμός	R	0,05	0,03	0,024
Κέρδος ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	0	0	0,8
Ανηγμένη ροπή αδράνειας ατράκτου ισχύος	H_2	2,2	4,2	2,2
Σταθερά χρόνου ροής καυσίμου	T_v	0,4	0,1	0,4
Μορφή γραμμής απεικόνισης		Συνεχής	Διακεκομμένη	Έντονη

Φαίνεται πως ο πραγματικός στατισμός στην αρχική ρύθμιση και στην ρύθμιση που προτείνεται στην παρούσα εργασία είναι ίδιοι, λόγω του κέρδους K_f που υπάρχει στην παρούσα εργασία. Η ρύθμιση που επιτεύχθηκε δεν έχει τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο η βελτιωμένη της βιβλιο-

γραφίας, αλλά επιτεύχθηκε χωρίς να γίνει επέμβαση στη σταθερά χρόνου του συστήματος καυσίμου και στη ροπή αδράνειας της ατράκτου ισχύος, παρά μόνο στο σύστημα ελέγχου. Στον Πίν. 3.6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι επιλογές τιμών ρυθμίσιμων παραμέτρων.



Σχήμα 3.9: Σύγκριση αποκρίσεων βιβλιογραφίας και παρούσας εργασίας

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν τελικά, μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία ελέγχου του συστήματος, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 3.7.

Πίνακας 3.7: Ρυθμισμένες παράμετροι ελέγχου LM 2500+ με έλεγχο πτερυγίων

Ονομασία	Σύμβολο	Τιμή
Στατισμός	R	0,024
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	0,80
Κέρδος κλάδου ελέγχου ταχύτητας αεριογόνου – ρύθμισης ανοίγματος πτερυγίων	K _{IGV}	0,8
Θερμοκρασία αναφοράς της T ₁₆	T _r	1,01
Κέρδος αναλογικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T _t	2,3
Μέγιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc_min	0
Μέγιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd_min	0

3.3.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση

3.3.4.1 Ιδιοτιμές

Η ευστάθεια ενός γραμμικού συστήματος, όπως αναφέρθηκε ήδη, αναδεικνύεται από τους πόλους του, δηλαδή από τις ιδιοτιμές του πίνακα **A**. Επειδή όμως το σύστημα αποτελείται από δύο κύριους κλάδους, εκ των οποίων μόνο ο ένας μπορεί να είναι κάθε στιγμή ενεργός, η γραμμικοποίηση δίνει τους πόλους του συστήματος ανάλογα με τη θέση του επιλογέα ελάχιστης τιμής. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.3 η γραμμικοποίηση γίνεται με την συνάρτηση *linmod* έχοντας αντικαταστήσει τον επιλογέα ελάχιστης τιμής με έναν χειροκίνητο διακόπτη (manual switch), ώστε να γραμμικοποιηθούν και οι δύο κλάδοι. Προκύπτουν δύο πίνακες ιδιοτιμών, ένας για κάθε ενεργό κλάδο.

Από το Σχ. 3.4 φαίνεται ότι ο κλάδος ελέγχου στροφών έχει 3 μεταβλητές κατάστασης, ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης έχει 3 και το υπόλοιπο σύστημα έχει 5, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίν. 3.8.

Πίνακας 3.8: Μεταβλητές κατάστασης

A/A	Κλάδος	Μεταβλητή κατάστασης
1	Κύριος	Σύστημα καυσίμου 1
2		Σύστημα καυσίμου 2
3		Στρόβιλος ΥΠ
4		Στροφές αεριογόνου
5		Σήμα ρύθμισης ανοίγματος IGVs
6	Ελέγχου στροφών	Στρόβιλος ΧΠ
7		Στροφές γεννήτριας
8		Σφάλμα στροφών γεννήτριας
9	Ελέγχου υπερθέρμανσης	Έμμεση μέτρηση T ₁₆
10		Μετρούμενη T ₁₆
11		Σφάλμα T ₁₆

Ο Πίν. 3.9 απεικονίζει τις ιδιοτιμές του συστήματος όταν είναι ενεργός ο κλάδος ελέγχου στροφών. Η γραμμικοποίηση έχει γίνει στο 90% του ονομαστικού φορτίου του συστήματος το οποίο λειτουργεί υπό τις παραμέτρους που έχουν παρουσιαστεί στους Πίν. 3.3 και 3.7. Φαίνεται πως όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος. Οι ιδιοτιμές 5-6 φαίνεται πως έχουν μικρό πραγματικό μέρος και επομένως μικρό λόγο απόσβεσης, άρα αντιστοιχούν στον ρυθμό που εμφανίζεται στην μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος. Οι ιδιοτιμές 7-8 έχουν σχετικά μεγάλο λόγο απόσβεσης οπότε ο αντίστοιχος ρυθμός δεν εμφανίζεται τόσο έντονα. Οι πραγματικές ιδιοτιμές,

τέλος, είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μην δημιουργούν προβλήματα στην ευστάθεια του συστήματος.

Πίνακας 3.9: Ιδιοτιμές κλάδου ρύθμισης στροφών, LM 2500+ με έλεγχο ανοίγματος πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-18,178	0	-	-	-	-	0,06
2	-9,090	3,220	0,943	0,652	1,535	9,643	-
3		-3,220					
4	-4,622	0	-	-	-	-	0,22
5	-0,588	1,883	0,298	3,185	0,314	1,973	-
6		-1,883					
7	-0,672	0,811	0,638	5,963	0,168	1,054	-
8		-0,811					

Ο Πίν. 3.10 περιγράφει τους ρυθμούς του συστήματος όταν είναι ενεργός ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Οι ιδιοτιμές 2-3 και 4-5 έχουν πολύ υψηλούς λόγους απόσβεσης οπότε δεν συμμετέχουν σε ταλαντωτικά φαινόμενα. Οι ιδιοτιμές 6 και 7 έχουν μικρή πραγματική τιμή η οποία ενδεχομένως να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, αλλά το κυριότερο πρόβλημα είναι η 8^η ιδιοτιμή, η οποία απεικονίζει το γεγονός πως ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης καθιστά το σύστημα εγγενώς ασταθές. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης αποτελείται από ελεύθερο ολοκληρωτή, χωρίς κλάδο ανάδρασης. Επομένως, η λειτουργία του κλάδου υπερθέρμανσης πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο. Εάν παραμείνει σε λειτουργία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το ανεκτό, το σύστημα καταρρέει.

Πίνακας 3.10: Ιδιοτιμές κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, LM 2500 με IGVs

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-17,990	0	-	-	-	-	0,06
2	-4,484	0,528	0,993	1,392	0,719	4,515	-
3		-0,528					
4	-0,875	0,303	0,945	6,784	0,147	0,926	-
5		-0,303					
6	-0,188	0	-	-	-	-	5,31
7	-0,070	0	-	-	-	-	14,25
8	0	0	-	-	-	-	-

Οι ταλαντωτικές ιδιοτιμές του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης δεν θα διερευνηθούν περαιτέρω, όπως οι αντίστοιχες του κλάδου ελέγχου στροφών, λόγω του πολύ υψηλού λόγου απόσβεσης που παρουσιάζουν.

3.3.4.2 Συντελεστές συμμετοχής

Στον Πίν. 3.11 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής της κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ρυθμό με ενεργό τον κλάδο ελέγχου στροφών. Με γκριζο φόντο απεικονίζονται οι μεταβλητές κατάστασης που δεν συμμετέχουν στο σύστημα, καθώς ανήκουν στον κλάδο που αποκλείει ο επιλογέας ελάχιστης τιμής.

Οι ιδιοτιμές 5-6, οι οποίες έχουν τον πιο μικρό λόγο απόσβεσης ζ, εξαρτώνται κυρίως από τις στροφές της γεννήτριας και επίσης αρκετά έντονα από την ισχύ που αποδίδει ο στρόβιλος ΧΠ. Επίσης εξαρτώνται έντονα από το σήμα καυσίμου, άρα από την παροχή καυσίμου. Άρα η αδράνεια της γεννήτριας και οι σταθερές χρόνου του στροβίλου ΧΠ και του συστήματος καυσίμου έχουν άμεση σχέση με την ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος.

Ο τρίτος ταλαντωτικός ρυθμός εξαρτάται κυρίως από τις στροφές της αεριογόνου ενώ ο πρώτος από τον ρυθμιστή στροφών (του οποίου είσοδος είναι το σφάλμα στροφών γεννήτριας), ο οποίος όμως, όπως φαίνεται από τον Πίν. 3.9 έχει πολύ μεγάλο λόγο απόσβεσης, επομένως δεν επιφέρει ταλαντωτική συμπεριφορά.

Στον Πίν. 3.12 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης στις ιδιοτιμές του συστήματος όταν είναι ενεργός ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Σε γκριζο φόντο απεικονίζονται οι μεταβλητές κατάστασης που δεν συμμετέχουν στο σύστημα, καθώς ανήκουν στον κλάδο ρύθμισης στροφών, που τώρα έχει αποκλείσει ο επιλογέας ελάχιστης τιμής. Με έντονα γράμματα απεικονίζεται η μεταβλητή κατάστασης που καθορίζει την μηδενική ιδιοτιμή η οποία και χαρακτηρίζει το σύστημα ως ασταθές. Είναι το σήμα που δίνει ο ολοκληρωτικός ελεγκτής στο σύστημα καυσίμου, το οποίο είναι και αυτό που θα οδηγήσει στην αποσταθεροποίηση του συστήματος.

Πίνακας 3.11: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ρύθμισης στροφών

Ιδιοτιμές		-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	-
		-0,400	-0,067	-18,178	-9,090	±j3,220	-4,622	-0,588	±j1,883	-0,672	±j0,811	0
Μεταβλητές κατάστασης		Συντελεστές συμμετοχής										
1	Στροφές αεριογόνου	0	0	0,00	0,01	0,08	0,26	1	0			
-	Μετρούμενη Τt6	1	0	0	0	0	0	0	0			
-	Σφάλμα Τt6	0	0	0	0	0	0	0	0			1
2	Ρυθμιστής στροφών	0	0	0,03	1	0,00	0,21	0,04	0			
3	Άνοιγμα περυσίων	0	0	0,00	0,00	0,03	0,09	0,67	0			
4	Ροή καυσίμου	0	0	0,12	0,74	0,00	0,48	0,11	0			
5	Στροφές γεννήτριας	0	0	0,02	0,35	0,00	1	0,40	0			
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0,02	0,64	0,01	0,41	0,10	0			
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0,00	0,01	1	0,11	0,24	0			
8	Βαλβίδα καυσίμου	0	0	1	0,48	0,00	0,07	0,01	0			
-	Ολοκληρωτική μέτρηση Τt6	0	1	0	0	0	0	0	0			

Πίνακας 3.12: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης

Ιδιοτιμές		-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8
		-10	0	-5	-17,990	-4,484	±0,528	-0,875	±0,303	-0,188	-0,070	0
Μεταβλητές κατάστασης		Συντελεστές συμμετοχής										
1	Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0,00	0,14	0,38	1	0,05	0		
2	Μετρούμενη Τt6	0	0	0	0,01	0,13	0,95	0,18	0,01	0		
3	Σφάλμα Τt6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Άνοιγμα πτερυγίων	0	0	0	0,00	0,01	1	0,13	0,00	0		
5	Ροή καυσίμου	0	0	0	0,13	1,00	0,14	0,02	0,00	0		
-	Στροφές γεννήτριας	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0	0,00	0,84	0,09	0,04	0,00	0		
7	Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	1	0,13	0,01	0,00	0,00	0		
8	Ολοκληρωτική μέτρηση Τt6	0	0	0	0,00	0,00	0,01	0,05	1	0		

Από τα στοιχεία αυτά μπορούμε να ονομάσουμε τους ρυθμούς ανάλογα με το ποιά μεταβλητή κατάστασης συμμετέχει κατά τον μεγαλύτερο βαθμό. Έτσι, ο ρυθμός 2-3 ονομάστηκε ρυθμός ρυθμιστή στροφών, ο ρυθμός 5-6 ονομάστηκε ρυθμός γεννήτριας και ο ρυθμός 7-8 ονομάστηκε ρυθμός αεριογόνου. Οι ταλαντωτικοί ρυθμοί του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης δεν θα εξεταστούν.

3.3.4.3 Ιδιοδιανύσματα

Οι ταλαντωτικοί ρυθμοί θα διερευνηθούν πιο αναλυτικά ως προς τις μεταβλητές κατάστασης στις οποίες εμφανίζονται. Γι' αυτή την ανάλυση χρειάζεται να παρουσιαστούν τα ιδιοδιανύσματα κάθε ρυθμού. Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.8.4, τα μεν δεξιά ιδιοδιανύσματα εκφράζουν το πόσο εμφανίζεται η κάθε μεταβλητή κατάστασης στην εξέλιξη ενός ρυθμού, ενώ τα δε αριστερά εκφράζουν το πώς επηρεάζεται ο κάθε ρυθμός μια μεταβλητή κατάσταση.

Παρουσιάζονται τα ιδιοδιανύσματα που αφορούν μόνο τους ταλαντωτικούς ρυθμούς. Σε κάθε πίνακα παρουσιάζονται με έντονα γράμματα οι μεταβλητές κατάστασης που συμμετέχουν κατά περισσότερο από 20% στον ρυθμό.

Πίνακας 3.13: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 2-3, $(-9,090 \pm j3,220)$, ρυθμιστή στροφών

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Στροφές αεριογόνου	0,00	-97,0	1	-91,8	0	-174,2
2	Ρυθμιστής στροφών	0,47	10,7	1,02	-25,3	1	0
3	Άνοιγμα πτερυγίων	0,00	104,7	1,31	-104,2	0,00	15,1
4	Ροή καυσίμου	0,34	-154,0	1,04	-116,0	0,74	104,7
5	Στροφές γεννήτριας	0,00	-95,1	44,07	-44,8	0,35	-125,3
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,16	65,4	1,92	97,0	0,64	177,0
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,24	63,5	0,02	49,9	0,01	128,1
8	Βαλβίδα καυσίμου	1	0	0,23	-99,5	0,48	-84,9

Στον Πίν. 3.13 απεικονίζονται τα στοιχεία του ρυθμού ρυθμιστή στροφών. Ο λόγος απόσβεσης αυτού του ρυθμού είναι πολύ υψηλός, 94%, επομένως δεν αναμένεται να εμφανιστεί στις αποκρίσεις η αντίστοιχη ταλάντωση. Η μεταβλητή κατάστασης που περιγράφει τον ρυθμιστή στροφών είναι η μεταβλητή που κατόπιν καθορίζει την παροχή καυσίμου. Η μεταβλητή κατάστασης που περιγράφει την ροή του καυσίμου είναι το τελικό αποτέλεσμα της δράσης της πρώτης, όπου μετά ακολουθούν οι θερμοδυναμικές εξισώσεις. Είναι επίσης ενδιαφέρον, όπως προκύπτει από τους συντελεστές συμμετοχής, πως ο ρυθμός επηρεάζεται περισσότερο από την ισχύ του στροβίλου ΧΠ παρά από τις στροφές της γεννήτριας, γεγονός που δείχνει πως η σταθερά χρόνου του στροβίλου ΧΠ είναι σημαντικότερη από την ροπή αδράνειας της γεννήτριας για αυτόν τον ρυθμό.

Πίνακας 3.14: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 5-6 $(-0,588 \pm j1,883)$: στροφών γεννήτριας

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Στροφές αεριογόνου	0,03	-158,8	7,44	26,8	0,26	159,4
2	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,17	-50,1	0,21	-118,7
3	Άνοιγμα πτερυγίων	0,01	123,5	5,88	-25,4	0,09	29,5
4	Ροή καυσίμου	0,47	-31,7	0,85	-66,9	0,48	-167,2
5	Στροφές γεννήτριας	0,02	-168,7	36,02	-122,7	1	0
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,20	-61,3	1,71	-99,6	0,41	130,5
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,39	-51,5	0,23	49,9	0,11	-70,2
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,50	12,9	0,11	-61,4	0,07	-117,1

Ο ρυθμός γεννήτριας έχει λόγο απόσβεσης $\zeta = 0,3$ (βλ. Πίν. 3.9) οπότε είναι αυτός που θα εμφανιστεί κατά κύριο λόγο στις αποκρίσεις, οι οποίες αναμένεται να έχουν περίοδο την περίοδο του ρυθμού αυτού, δηλαδή 3,2 s. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις στροφές της γεννήτριας και κατά λιγότερο από 50% από το σήμα καυσίμου. Επομένως για να αντιμετωπιστεί η εμφάνισή του, όπως φαίνεται από τους συντελεστές συμμετοχής, θα πρέπει είτε να αυξηθεί η ροπή αδράνειας της ατράκτου της γεννήτριας, είτε να επιταχυνθεί το σύστημα καυσίμου, είτε να αυξηθεί

η σταθερά χρόνου του στροβίλου ΧΠ, είτε να αυξηθεί η ροπή αδράνειας της αεριογόνου, είτε να αλλάξει ο στατισμός. Όπως φάνηκε στην υποενότητα 2.4.1, η μείωση της σταθεράς χρόνου του συστήματος καυσίμου θα υλοποιηθεί μέσω βρόχου ανάδρασης και θα ρυθμιστεί κατάλληλα και ο στατισμός.

Πίνακας 3.15: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 7-8 ($-0,672 \pm j0,811$): αεριογόνου

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Στροφές αεριογόνου	0,08	-153,4	9,98	-131,5	1	0
2	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,04	109,5	0,04	34,4
3	Άνοιγμα πτερυγίων	0,07	138,6	7,32	134,5	0,67	-162,0
4	Ροή καυσίμου	0,50	-16,4	0,18	102,1	0,11	10,7
5	Στροφές γεννήτριας	0,02	-175,0	14,51	59,1	0,40	169,1
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,10	-45,4	0,75	69,7	0,10	-50,7
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,59	-23,8	0,33	-120,9	0,24	140,3
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,40	7,6	0,02	104,5	0,01	37,0

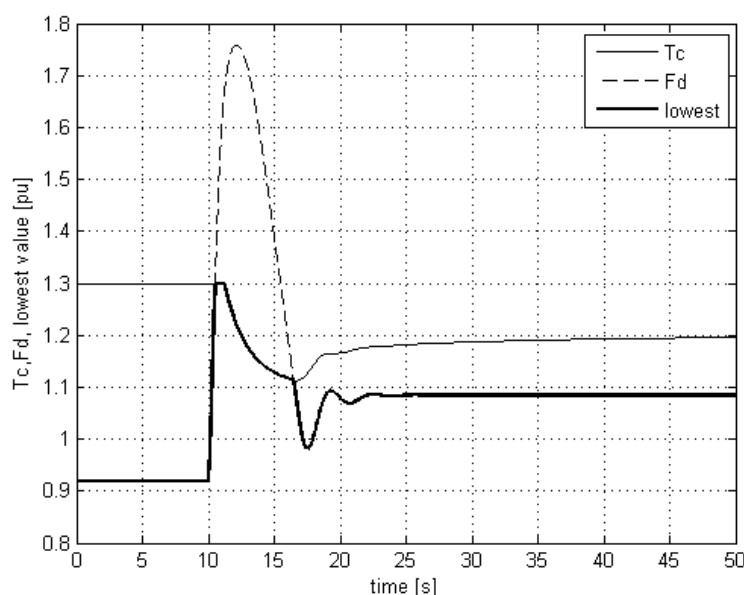
Τέλος, στον Πίν. 3.15 παρουσιάζεται ο ρυθμός αεριογόνου, ο οποίος έχει λόγο απόσβεσης $\zeta = 0,64$, επομένως ούτε αυτός αναμένεται να εμφανιστεί. Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται κυρίως από την αεριογόνο και, όπως ίσως αναμένεται, από τον τρόπο ελέγχου της ταχύτητά της, από το άνοιγμα των οδηγών πτερυγίων του αέρα εισόδου. Φαίνεται ακόμη ότι εξαρτάται από τις στροφές της γεννήτριας. Αυτός ο ταλαντωτικός ρυθμός θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί επίσης με αύξηση της ροπής αδράνειας της αεριογόνου, είτε με αύξηση της απόκρισης των πτερυγίων, αλλά δεν εμφανίζεται στην απόκριση του συστήματος οπότε τέτοιες παρεμβάσεις δεν χρειάστηκαν.

3.3.5 Αποκρίσεις

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση αύξησης φορτίου κατά 0,1 αμ, από το 0,9 της ονομαστικής του παραγωγής στο 1 αμ. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε στα 50 δευτερόλεπτα και η διαταραχή εμφανίζεται την χρονική στιγμή $t = 10$ s. Οι παράμετροι λειτουργίας είναι αυτές που καθορίστηκαν στους Πίν. 3.3 και 3.7.

Στο Σχ. 3.10 απεικονίζονται τα σήματα εισόδου στον επιλογέα ελάχιστης τιμής για την παροχή καυσίμου. Με συνεχόμενη γραμμή είναι το σήμα εξόδου του κλάδου υπερθέρμανσης, με διακεκομμένη γραμμή είναι το σήμα εξόδου του κλάδου ελέγχου στροφών και με έντονη γραμμή η κάθε φορά ελάχιστη τιμή. Φαίνεται ότι λόγω του μικρού στατισμού (0,02) το κέρδος του ελεγκτή στροφών είναι πολύ μεγάλο (50) οπότε μόλις εμφανίζεται το σφάλμα ο ελεγκτής στροφών δίνει σήμα για άμεση μεγάλη αύξηση της παροχής καυσίμου. Σε ένα δευτερόλεπτο όμως υπερβαίνει την τιμή του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, ο οποίος ενεργοποιείται και δίνει σήμα μείωσης του καυσί-

μου. Κατά τη χρονική στιγμή $t = 15$ s αλλάζει ξανά η έξοδος του επιλογέα ελάχιστης τιμής οπότε καθίσταται πάλι ενεργός ο κλάδος ρύθμισης στροφών.



Σχήμα 3.10: Σήματα ροής καυσίμου

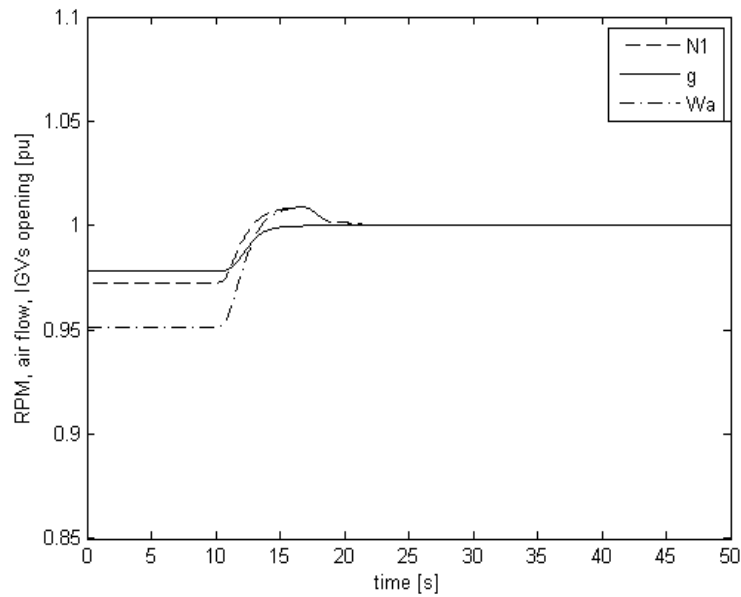
Παράλληλα το σήμα του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης επιστρέφει αργά προς τη μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει, λόγω του ολοκληρωτικού ελέγχου, μέχρι που παραμένει στο άνω όριο του περιοριστή του.

Στο Σχ. 3.11 απεικονίζονται για την ίδια διαταραχή οι στροφές της αεριογόνου, το άνοιγμα των περυγίων και η παροχή αέρα. Καθώς η μονάδα οδηγείται στο ονομαστικό της φορτίο, το άνοιγμα των περυγίων οδηγείται στην τιμή 1 αμ. Η αεριογόνος υπερταχύνεται λόγω της αύξησης της παροχής καυσίμου και καταλήγει στην τελική τιμή στροφών (εν προκειμένω στις ονομαστικές της στροφές) υπό την επίδραση και της αυξημένης παροχής αέρα. Δεν επιλέχθηκε απεικόνιση πλέγματος για καλύτερη εποπτεία των αποκρίσεων.

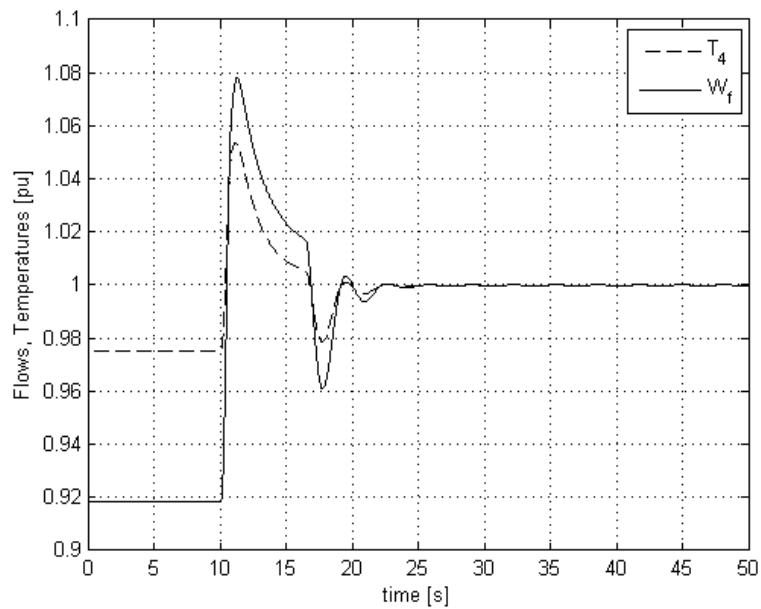
Στο Σχ. 3.12 απεικονίζεται η παροχή καυσίμου και η θερμοκρασία T_4 (σε ανά μονάδα τιμές), η οποία είναι αυτή που επιτηρεί ο έλεγχος υπερθέρμανσης μέσω της T_6 . Φαίνεται πως η T_4 υπερβαίνει την τιμή 1 αμ για περίπου 6 δευτερόλεπτα επειδή δεν μετράται άμεσα η T_4 οπότε, συνυπολογίζοντας και τις σταθερές χρόνου κάθε μετρητικής και ελεγκτικής διάταξης, δεν μπορεί να παραμείνει μικρότερη από την ονομαστική. Η μέγιστη υπερθέρμανση είναι περίπου 5% επί της ονομαστικής και θεωρείται ανεκτή λόγω της μικρής χρονικής της διάρκειας.

Στο Σχ. 3.13 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων που εξέρχονται από κάθε στρόβιλο, ΥΠ και ΧΠ. Η καμπύλη μετάβασής τους ακολουθεί τη γενική μορφή που ορίζουν τα σή-

ματα ροής καυσίμου και ο επιλογέας ελάχιστης τιμής. Στο Σχ. 3.14 απεικονίζεται η προσαρμογή της μηχανικής ισχύος στην ζητούμενη ηλεκτρική.

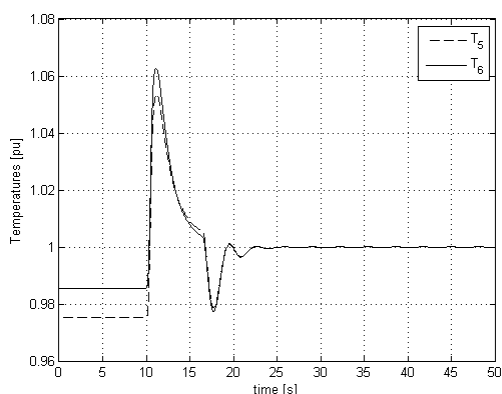


Σχήμα 3.11: Στροφές αεριογόνου, άνοιγμα πτερυγίων, παροχή αέρα

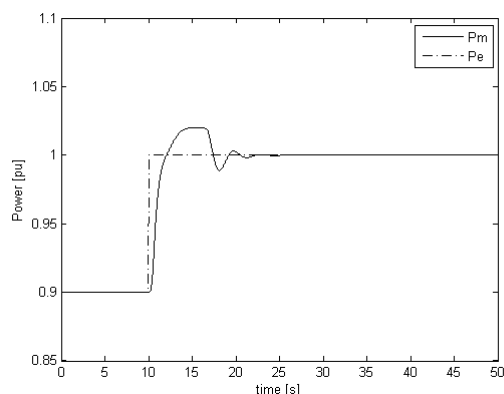


Σχήμα 3.12: Θερμοκρασία καυσαερίων εισόδου στον στρόβιλο ΥΠ, παροχή καυσίμου

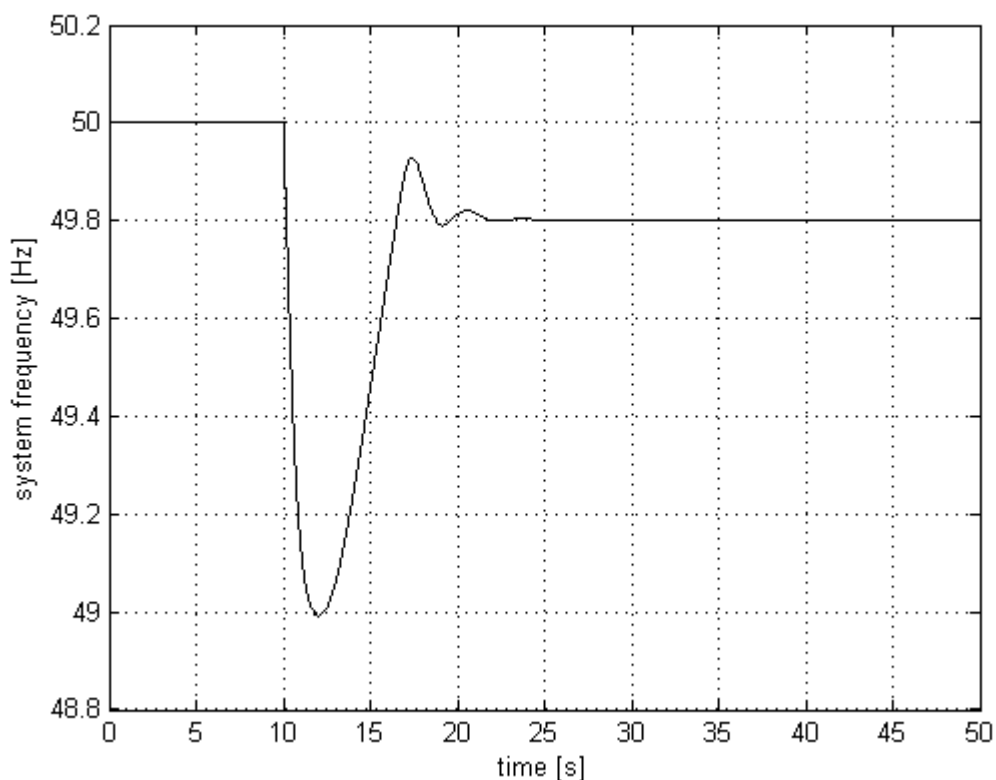
Τέλος, στο Σχ. 3.15 απεικονίζεται η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας.



Σχήμα 3.13: Θερμοκρασίες καυσαερίων εξόδου στροβίλων



Σχήμα 3.14: Μηχανική και ηλεκτρική ισχύς



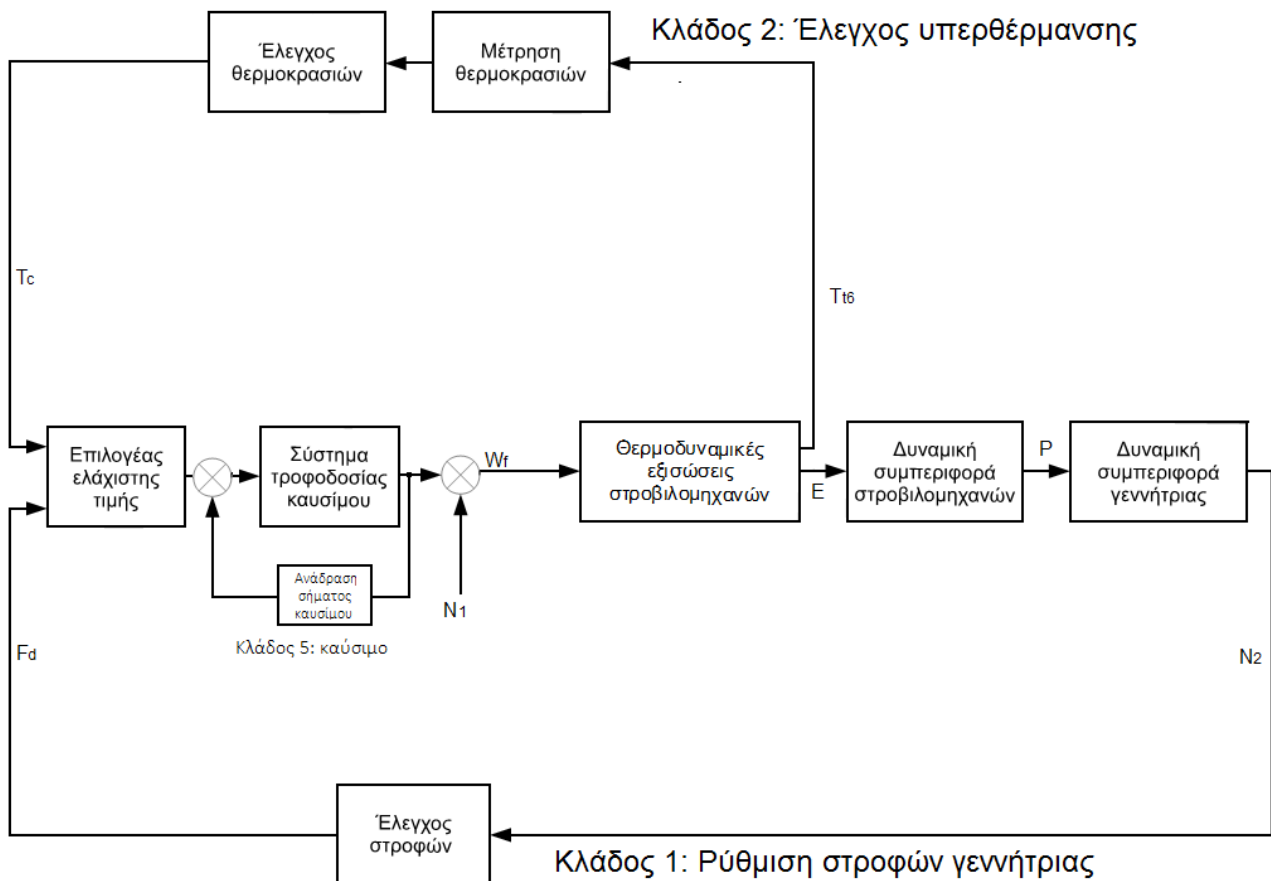
Σχήμα 3.15: Συχνότητα τάσης εξόδου

Η μόνιμη κατάσταση αποκαθίσταται σε 15 s μετά τη διαταραχή. Η μεγάλη πρώτη βύθιση συχνότητας οφείλεται στην ενεργοποίηση του ελεγκτή υπερθέρμανσης, ενώ αργότερα εμφανίζεται πολύ μικρότερο πλάτος ταλάντωσης. Από την αρχή του μεταβατικού φαινομένου ως την αποκατάστασή του φαίνεται να μεσολαβούν περίπου 7 s μετά την επανεμπλοκή του κλάδου ρύθμισης στροφών. Ανάμεσα στα επόμενα διαδοχικά μέγιστα των ταλαντώσεων μεσολαβούν περίπου 3 s, σε

συμφωνία με τον Πίν. 3.9, όπου ο ταλαντωτικός ρυθμός εμφανίζεται να έχει περίοδο ίση με 3,2 s. Η τελική τιμή συχνότητας είναι 49,80 Hz και η μέγιστη βύθιση 48,99 Hz.

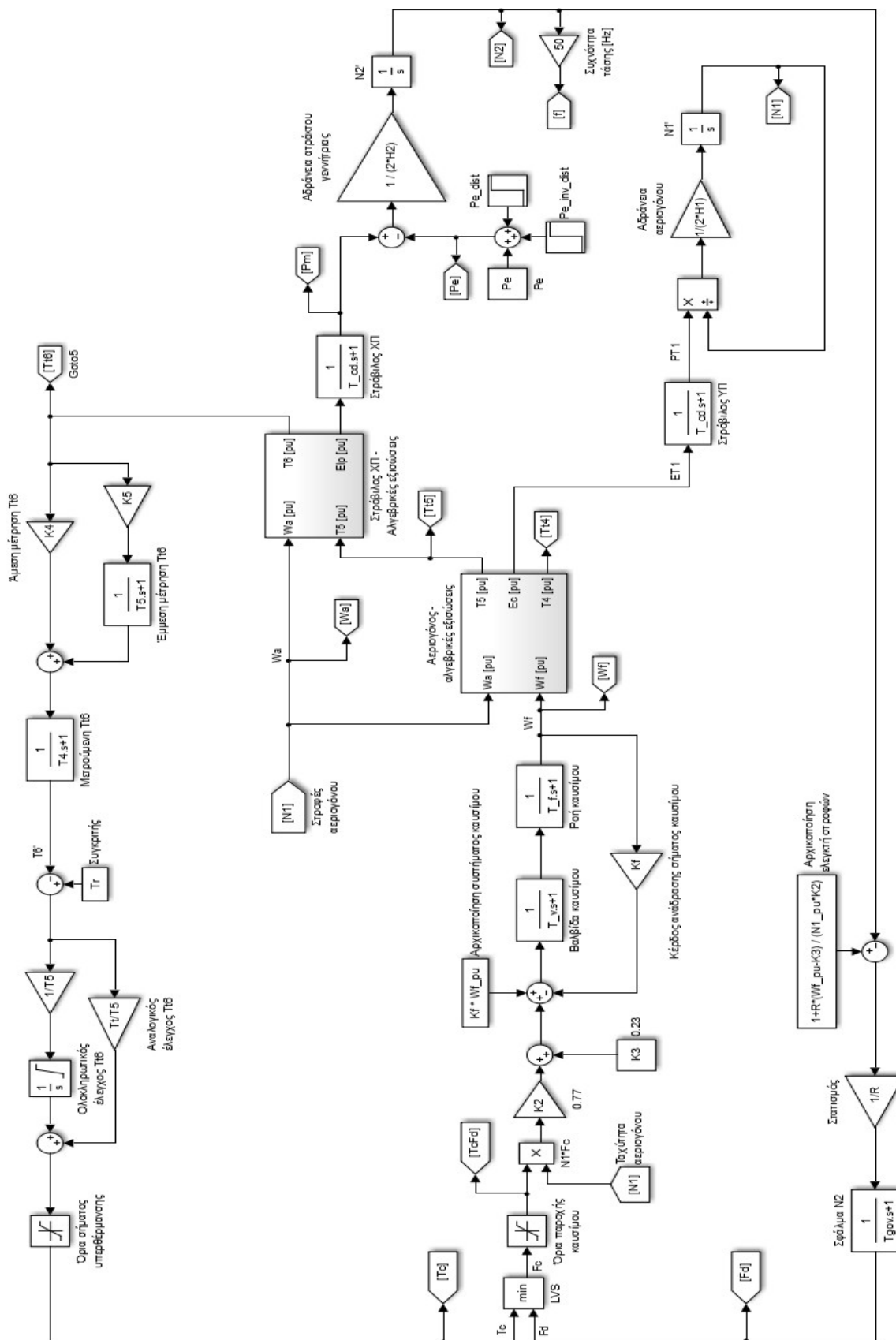
3.4 Προσομοίωση με βρόχο ανάδρασης παροχής καυσίμου χωρίς βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου

3.4.1 Γενική περιγραφή συστήματος



Σχήμα 3.16: Γενικό διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου αεριοστροβίλου GE LM 2500+ χωρίς ρύθμιση στροφών αεριογόνου

Στην ενότητα αυτή επαναλαμβάνεται η προσομοίωση της ενότητας 3.3 χωρίς τον κλάδο ελέγχου στροφών αεριογόνου. Το γενικό διάγραμμα λειτουργίας και ελέγχου του υπό μελέτη συστήματος παρατίθεται στο Σχ. 3.16. Η ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου δεν ρυθμίζεται αλλά επιβεβαιώνεται πως είναι ένα εγγενώς ευσταθές υποσύστημα, το οποίο ισορροπεί σε διαφορετικές στροφές ανάλογα με το φορτίο. Ωστόσο, στην παρούσα εκδοχή οι στροφές στα μερικά φορτία διαφέρουν περισσότερο από τις ονομαστικές, καθώς η παροχή του αέρα καθορίζεται μόνο από την ταχύτητα της αεριογόνου και όχι και από το άνοιγμα των πτερυγίων, άρα χρειάζεται διαφορετική αρχικοποίηση.



Σχήμα 3.17: Αναπαράσταση του LM2500+ στο Simulink χωρίς κλάδο ρύθμισης περυγίων

Το αντίστοιχο δομικό διάγραμμα του Simulink παρουσιάζεται στο Σχ. 3.17. Όπως φαίνεται, έχει αποκοπεί ο κλάδος ρύθμισης του ανοίγματος των πτερυγίων. Πλέον το σύστημα έχει μια ιδιοτιμή λιγότερη (υπάρχουν συνολικά 10 ιδιοτιμές) αφού αφαιρέθηκε η μεταβλητή κατάσταση που αντιστοιχεί στην απόκριση των οδηγών πτερυγίων. Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό το μοντέλο είναι ακριβώς αυτές της ενότητας 3.3, με μόνη διαφορά πως πλέον η ταχύτητα της αεριογόνου είναι ίση, σε κανονικοποιημένες τιμές, με την παροχή αέρα, W_a , καθώς $g = 1$.

3.4.2 Παράμετροι ελέγχου

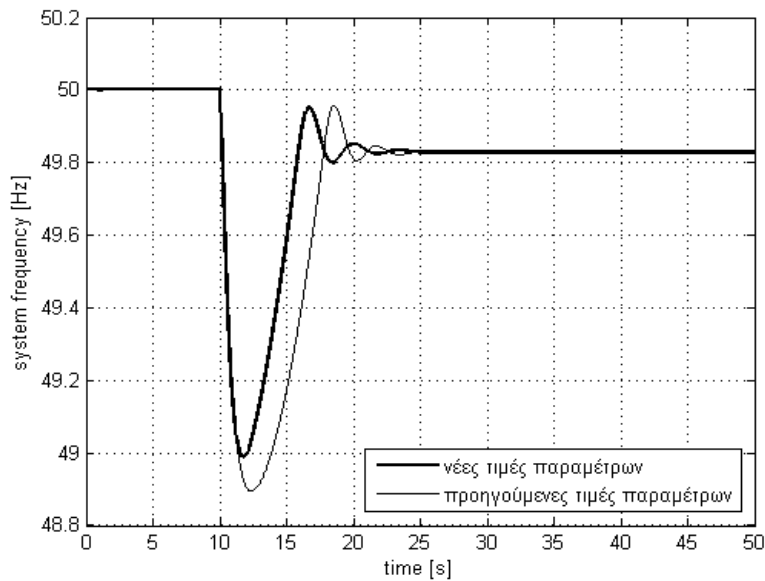
Οι παράμετροι του συστήματος που ρυθμίστηκαν ξανά είναι ο στατισμός R και το κέρδος του βρόχου ανάδρασης καυσίμου K_f , σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.3.3. Τα κέρδη ενίσχυσης ρυθμίστηκαν, όπως αναφέρθηκε, ώστε να ικανοποιούν τρεις απαιτήσεις: Υψηλή τελική τιμή της συχνότητας της τάσης εξόδου της γεννήτριας, μικρή βύθιση της συχνότητας κατά το μεταβατικό φαινόμενο και γρήγορη απόσβεση, συνολικά, του μεταβατικού φαινομένου. Οι τιμές που επιλέχθηκαν συνοψίζονται στον Πίν. 3.17. Όπως φαίνεται, δεν διαφέρουν σημαντικά από τις προηγούμενες.

Πίνακας 3.16: Ρυθμιζόμενες παράμετροι ελέγχου LM 2500+, χωρίς έλεγχο πτερυγίων

Ονομασία μεγέθους	Σύμβολο	Παλιά Τιμή	Νέα τιμή
Στατισμός	R	0,024	0,028
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	0,80	0,57

Στο Σχ. 3.18 απεικονίζονται σε κοινό διάγραμμα οι αποκρίσεις του συστήματος με τις ρυθμίσεις της προηγούμενης ενότητας (λεπτή γραμμή) και με αυτές που προσδιορίστηκαν ως ικανοποιητικές στην παρούσα ενότητα (έντονη γραμμή). Φαίνεται πως με τη νέα ρύθμιση το μεταβατικό φαινόμενο ολοκληρώνεται πιο γρήγορα, με ελαφρώς μικρότερο πλάτος κυματισμού αλλά και με μικρότερη μεταβατική βύθιση.

Οι υπόλοιπες παράμετροι λειτουργίας διατήρησαν τις τιμές που είχαν στην προηγούμενη ενότητα, όπως φαίνεται στον Πίν. 3.17. Σημειώνεται ότι ο στατισμός αυξήθηκε ενώ το κέρδος της ανάδρασης καυσίμου μειώθηκε, οπότε, όπως φάνηκε στην (2.26), ο πραγματικός στατισμός έχει αλλάξει πολύ λίγο.



Σχήμα 3.18: Σύγκριση αποκρίσεων

Πίνακας 3.17: Μη ρυθμιζόμενες παράμετροι ελέγχου LM 2500+, χωρίς έλεγχο πτερυγίων

Ονομασία μεγέθους	Σύμβολο	Τιμή
Θερμοκρασία αναφοράς της T_6	T_r	1,01
Κέρδος αναλογικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T_t	2,3
Μέγιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	T_c_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	T_c_min	0
Μέγιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	F_d_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	F_d_min	0

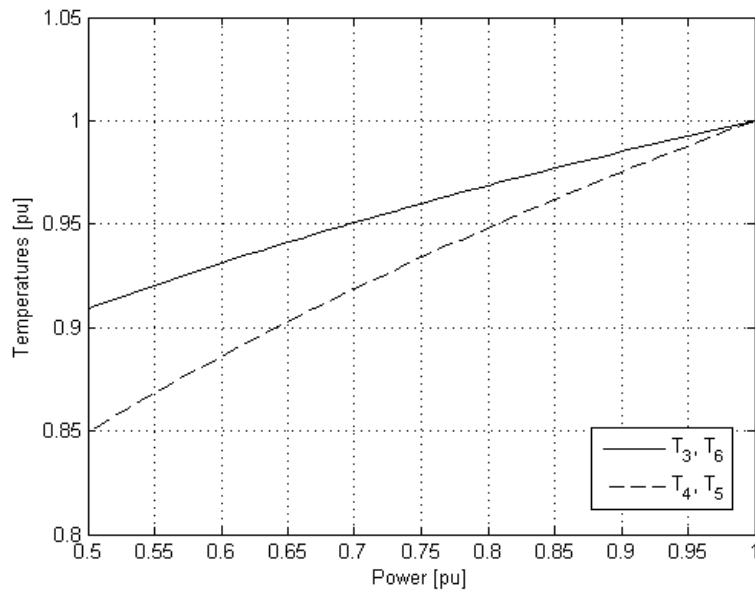
3.4.3 Διαγράμματα θερμοκρασιών και παροχών μόνιμης κατάστασης

Αρχικά φαίνεται πως όλα τα μεγέθη καταλήγουν στην τιμή 1 αμ αφού το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για λειτουργία ως το ονομαστικό του φορτίο (όχι για υπερφόρτιση).

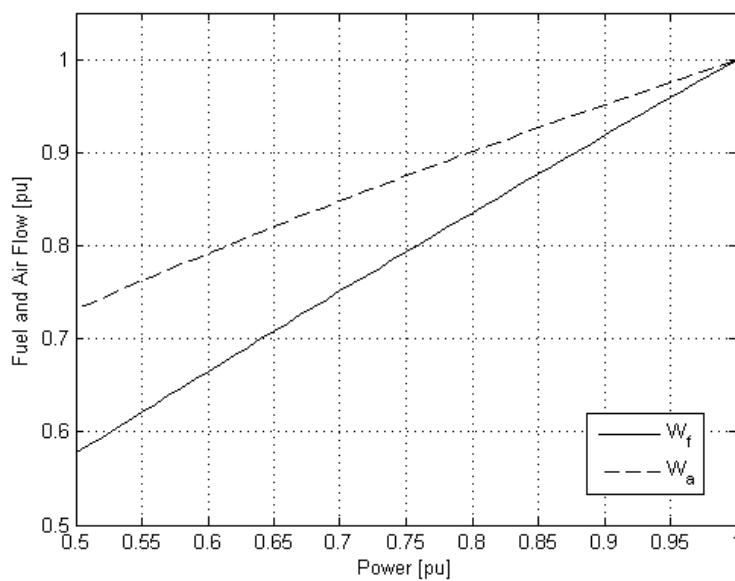
Το Σχ. 3.19 απεικονίζει τις τιμές μόνιμης κατάστασης των θερμοκρασιών αέρα εισόδου στον στρόβιλο (T_3), των καυσαερίων εξόδου από τον θάλαμο καύσης (T_4) και των καυσαερίων εξόδου από τους στροβίλους, ΥΠ (T_5) και ΧΠ (T_6), όλες σε ανά μονάδα τιμές. Δεν διαφέρουν από τα αντίστοιχα της υποενότητας 3.3.2 καθώς δεν εξαρτώνται από τον τρόπο ελέγχου της ταχύτητας της αεριογόνου αλλά μόνο από τις θερμοδυναμικές εξισώσεις, οι οποίες παραμένουν ίδιες. Εδώ δεν απεικονίζεται το άνοιγμα των πτερυγίων αφού σε αυτή την προσομοίωση είναι πάντα πλήρως ανοιχτά.

Στο Σχ. 3.20 απεικονίζονται οι παροχές καυσίμου και αέρα. Οι τιμές μόνιμης κατάστασης της παροχής αέρα είναι αριθμητικά ίσες με την ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου,

αφού $g = 1$. Συνεπώς, στο μισό φορτίο του συστήματος η παροχή καυσίμου έχει την τιμή 0,577 αμ ενώ η παροχή αέρα –και η ταχύτητα της αεριογόνου– έχουν την τιμή 0,732 αμ. Στο Σχ. 3.7 ενώ η παροχή αέρα έχει ίδια τιμή, όπως είναι αναμενόμενο, η αεριογόνος έχει ταχύτητα περιστροφής 0,840 αμ, τιμή αναμενόμενα μεγαλύτερη, αφού στην προηγούμενη προσομοίωση η αρχική τιμή του ανοίγματος των πτερυγίων είναι 0,872 (και όχι 1) και επομένως η αεριογόνος πρέπει να αυξήσει ταχύτητα για να παράσχει την αναγκαία ποσότητα αέρα.



Σχήμα 3.19: Θερμοκρασίες λειτουργίας



Σχήμα 3.20: Παροχές αέρα και καυσίμου μόνιμης λειτουργίας

3.4.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση

3.4.4.1 Ιδιοτιμές

Ο αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων εξετάζεται, σε αυτή την παράγραφο, ως προς την ευστάθεια της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου. Παρ' ότι, σύμφωνα με τη θεωρία, που αναπτύχθηκε και στην υποενότητα 3.4.1, η αεριογόνος είναι δομικά ευσταθές σύστημα, στην βιβλιογραφία [1] παρατηρήθηκε πως η ταχύτητά της χρειάζεται εξωτερική ρύθμιση. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος συνολικά με την εξέταση του γραμμικοποιημένου μοντέλου του συστήματος. Η γραμμικοποίηση γίνεται γύρω από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

Οι ιδιοτιμές του συστήματος είναι συνολικά 10 καθώς έχει αφαιρεθεί η μεταβλητή κατάσταση που περιγράφει την κίνηση των πτερυγίων, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.4.1. Αυτές κατανέμονται ως εξής: 5 κοινές ιδιοτιμές (κύριου κλάδου), 3 ιδιοτιμές του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης και 2 του κλάδου ρύθμισης στροφών. Όπως και στην υποενότητα 3.3.4, παρουσιάζονται μόνο οι ιδιοτιμές που ανήκουν στον κλάδο που είναι κάθε φορά ενεργός.

Ο Πίν. 3.18 απεικονίζει τις ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργό τον κλάδο ελέγχου στροφών (7 ιδιοτιμές).

Πίνακας 3.18: Ιδιοτιμές κλάδου ρύθμισης στροφών, LM 2500+ χωρίς έλεγχο πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω _n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-18,432	0	-	-	-	-	0,05
2	-8,921	2,845	0,953	0,671	1,490	9,363	-
3		-2,845					
4	-4,477	0	-	-	-	-	0,22
5	-0,547	1,780	0,294	3,374	0,296	1,862	-
6		-1,780					
7	-0,657	0	-	-	-	-	1,52

Οι ταλαντωτικοί ρυθμοί αυτής της διάταξης είναι δύο και όχι τρεις, όπως στην προηγούμενη ενότητα. Ο ταλαντωτικός ρυθμός 2-3 έχει πολύ υψηλό λόγο απόσβεσης, ενώ ο ρυθμός 5-6 έχει μικρό λόγο απόσβεσης οπότε αναμένεται ταλαντωτική συμπεριφορά με περίοδο 3,3 s. Οι περίοδοι των δύο ρυθμών είναι παρόμοιες με αυτές των ρυθμών του προηγούμενου μοντέλου, δεν υπάρχει όμως ο ρυθμός με περίοδο 5,9 s.

Στον Πίν. 3.19 απεικονίζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργό τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Υπάρχει μόνο ένας ταλαντωτικός ρυθμός, σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο, στο οποίο οι ταλαντωτικοί ρυθμοί ήταν δύο (βλ. Πίν. 3.10). Καθώς ο συντελεστής απόσβεσης του ταλαντωτικού ρυθμού έχει τιμή σχεδόν 1 δεν παρατηρείται ταλάντωση. Υπάρχουν δύο

ιδιοτιμές με μικρό αρνητικό μέρος καθώς και μία μηδενική, η οποία αποσταθεροποιεί το σύστημα, όπως και στην ενότητα 3.3.

Πίνακας 3.19: Ιδιοτιμές κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, LM 2500+ χωρίς έλεγχο πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-18,310	0	-	-	-	-	0,05
2	-4,286	0,377	0,996	1,46	0,68	4,30	-
3		-0,377					
4	-0,923	0	-	-	-	-	1,08
5	-0,066	0	-	-	-	-	15,14
6	-0,096	0	-	-	-	-	10,45
7	0	0	-	-	-	-	-

Ο ταλαντωτικός ρυθμός του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης έχει περίοδο 1,4 s, όσο και ο αντίστοιχος στην προηγούμενη προσομοίωση.

3.4.4.2 Συντελεστές συμμετοχής

Αντίστοιχα με την παρ. 3.3.4.2, παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής της κάθε μεταβλητής σε κάθε ρυθμό.

Πίνακας 3.20: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ελέγχου στροφών

	ιδιοτιμές	-	-	1	2	3	4	5	6	7	-
		-0,400	-0,067	-18,432	-8,921	$\pm j2,845$	-4,477	-0,547	$\pm j1,780$	-0,657	0
Μεταβλητές κατάστασης		Συντελεστές συμμετοχής									
-	Σφάλμα T6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
-	Μετρούμενη T6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Ρυθμιστής στροφών	0	0	0,03	1	0,00	0,19	0,02	0	0	0
2	Στροφές αεριογόνου	0	0	0,00	0,01	0,12	0,22	1	0	0	0
3	Ροή καυσίμου	0	0	0,10	0,66	0,01	0,48	0,04	0	0	0
4	Στροφές γεννήτριας	0	0	0,01	0,32	0,00	1	0,25	0	0	0
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0,02	0,63	0,01	0,39	0,04	0	0	0
6	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0,00	0,01	1	0,09	0,15	0	0	0
7	Βαλβίδα καυσίμου	0	0	1	0,41	0,00	0,06	0,00	0	0	0
-	Ολοκληρωτική μέτρηση T6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Στον Πίν. 3.20 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή με ενεργό τον κλάδο ρύθμισης στροφών, ενώ στον Πίν. 3.21 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή με ενεργό τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Εάν γίνει σύγκριση με τον Πίν. 3.11 φαίνεται πως ο ρυθμός που λείπει είναι ο ρυθμός της αεριογόνου, ο οποίος επηρεαζόταν κατά 67% από το άνοιγμα των πτερυγίων. Σε αυτό το μοντέλο είναι σημαντικό να παρατηρηθεί το γεγονός πως δεν υπάρχει ταλαντωτικός ρυθμός στον

οποίο να συμμετέχει κατά 100% η αεριογόνος. Όπως και πριν, οι ταλαντωτικοί ρυθμοί χαρακτηρίστηκαν ως οι ρυθμοί της επικρατούσας μεταβλητής κατάστασης. Έτσι, ο ταλαντωτικός ρυθμός 2-3 ονομάστηκε ρυθμός ρυθμιστή στροφών και ο ταλαντωτικός ρυθμός 5-6 ονομάστηκε ρυθμός γεννήτριας.

Με γκρίζο φόντο απεικονίζονται οι μεταβλητές κατάστασης που δεν συμμετέχουν σε κάθε θέση λειτουργίας του επιλογέα ελάχιστης τιμής, δηλαδή οι πίνακες αυτοί θα μπορούσαν να παρουσιαστούν χωρίς τις γραμμές και τις στήλες που έχουν γκρίζο κελί. Κρατήθηκαν σε αυτή τη μορφή για λόγους καλύτερης εποπτείας του συστήματος, καθώς φαίνεται ο απόλυτος καθορισμός μιας ιδιοτιμής από κάποια συγκεκριμένη μεταβλητή κατάσταση.

Πίνακας 3.21: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης

Ιδιοτιμές	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7
	-10	0	-5	-18,310	-4,286	$\pm j0,377$	-0,923	-0,066	-0,096	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής									
1 Σφάλμα T6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2 Μετρούμενη T6	0	0	0	0,01	0,15	1	0,00	0,04	0	0
- Ρυθμιστής στροφών	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0,00	0,17	0,02	0,47	1,00	0	0
4 Ροή καυσίμου	0	0	0	0,11	1	0,15	0,00	0,02	0	0
- Στροφές γεννήτριας	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
- Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0	0,00	0,89	0,01	0,01	0,02	0	0
6 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	1	0,12	0,01	0,00	0,00	0	0
7 Ολοκληρωτική μέτρηση T6	0	0	0	0,00	0,00	0,01	1,00	1	0	0

Φαίνεται πάλι στον Πίν. 3.21 ότι η μεταβλητή κατάσταση που περιγράφει το σφάλμα μέτρησης της T6 οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια καθώς αυτό είναι το σήμα που θα έδινε την εντολή για συνεχή μείωση της παροχής καυσίμου.

3.4.4.3 Ιδιοδιανύσματα

Αναλύονται μόνο ο ταλαντωτικός ρυθμός με χαμηλό συντελεστή απόσβεσης του κλάδου ελέγχου στροφών. Ο ταλαντωτικός ρυθμός του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης δεν είναι κρίσιμος ενώ η μηδενική ιδιοτιμή φαίνεται ότι καθορίζεται πλήρως από την απόκλιση της T6.

Ο ρυθμός γεννήτριας είναι ο ρυθμός που θα εμφανιστεί πιο έντονα, καθώς έχει λόγο απόσβεσης $\zeta = 0,31$. Η ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος, όπως φαίνεται στον Πίν. 3.22, επηρεάζεται πιο έντονα από τις στροφές της γεννήτριας. Επίσης, φαίνεται ότι επηρεάζεται κατά 47% από το σήμα του καυσίμου άρα η μείωση της σταθεράς χρόνου του συστήματος καυσίμου θα βελτίωνε την απόκριση του ρυθμού.

Πίνακας 3.22: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 5-6 ($-0,547 \pm j1,780$): γεννήτριας

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,14	-56,5	0,19	-117,7
2	Στροφές αεριογόνου	0,03	-155,8	5,17	0,2	0,22	143,1
3	Ροή καυσίμου	0,48	-31,8	0,74	-72,4	0,48	-165,4
4	Στροφές γεννήτριας	0,03	-169,3	27,48	-129,4	1	0
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,22	-62,3	1,30	-107,6	0,39	128,9
6	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,39	-48,7	0,16	22,0	0,09	-88,0
7	Βαλβίδα καυσίμου	0,51	10,6	0,09	-67,1	0,06	-117,8

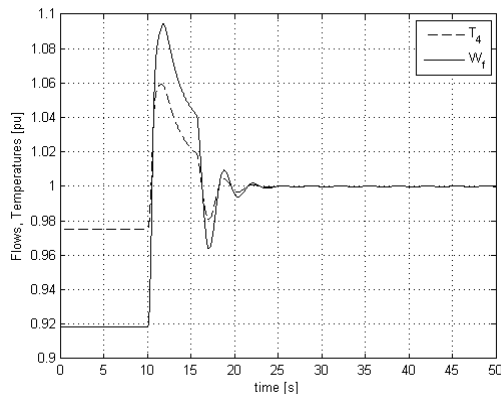
Σε ότι αφορά όμως την εξάρτηση του ρυθμού 5-6 από την αεριογόνο, οι στροφές της τον επηρεάζουν λίγο, ενώ η ισχύς του στροβίλου ΥΠ δεν τον επηρεάζει σχεδόν καθόλου.

3.4.5 Αποκρίσεις

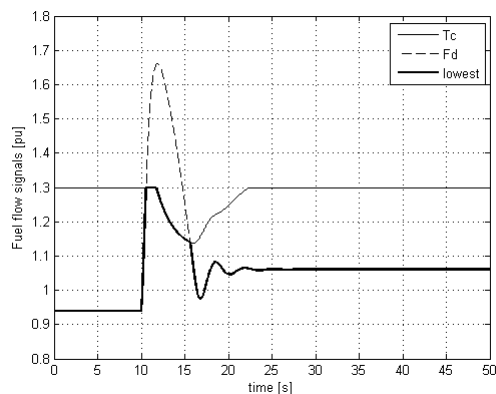
Οι προσομοιώσεις που έγιναν σε αυτό το μοντέλο αφορούν κυρίως την συμπεριφορά της αεριογόνου, οπότε πραγματοποιήθηκαν περισσότερες προσομοιώσεις ώστε να εξαχθούν κάποια ασφαλή συμπεράσματα. Προσομοιώνονται βηματικές μεταβολές του ηλεκτρικού φορτίου.

3.4.5.1 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,9 σε 1 αμ

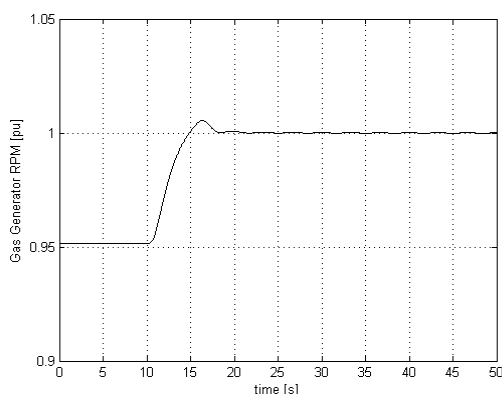
Συγκρίνοντας αυτή τη μεταβολή με την απόκριση αυτής που παρουσιάζεται στην υποενότητα 3.3.5 και ειδικά στο Σχ. 3.15, φαίνεται πως ο έλεγχος της αεριογόνου δεν είναι απαραίτητος και πως όντως η αεριογόνος συγκροτεί ένα ευσταθές σύστημα. Το περιθώριο υπερθέρμανσης είναι 1%. Φαίνεται πως η T_4 υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή κατά 5% για περίπου 7 δευτερόλεπτα άρα η υπέρβαση αυτή είναι αποδεκτή. Όλα τα μεγέθη καταλήγουν στις ονομαστικές τους τιμές αφού ζητάται ονομαστική ηλεκτρική ισχύς.



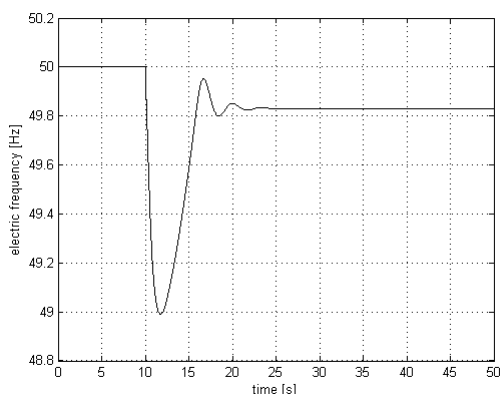
Σχήμα 3.21: Παροχή καυσίμου, θερμοκρασία καυσαερίων εισόδου στον στρόβιλο ΥΠ



Σχήμα 3.22: Σήματα καυσίμου από κάθε κλάδο ελέγχου προς επιλογή ελάχιστης τιμής



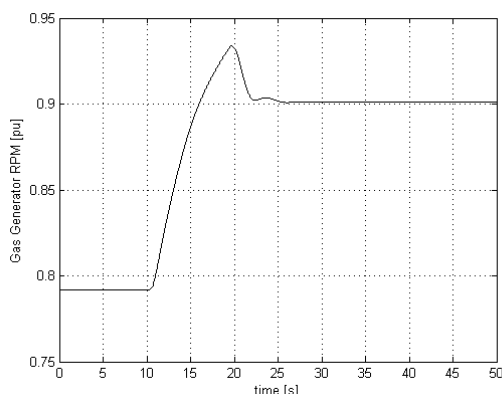
Σχήμα 3.23: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου



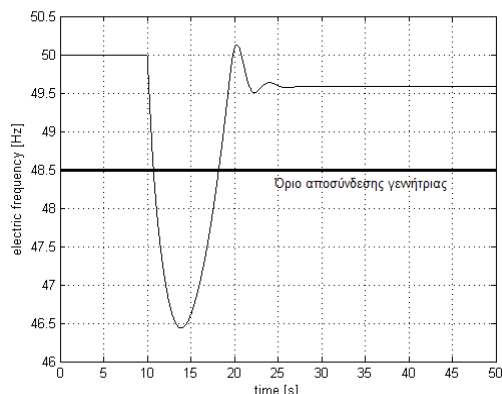
Σχήμα 3.24: Ηλεκτρική συχνότητα

Η βελτίωση της απόκρισης είναι εμφανής, και λόγω της συμπεριφοράς της θερμοκρασίας θεωρούμε πως είναι αποδεκτή η ρύθμιση της θερμοκρασίας αναφοράς σε επίπεδο 1% ανώτερο.

3.4.5.2 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,6 σε 0,8 αμ



Σχήμα 3.25: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου

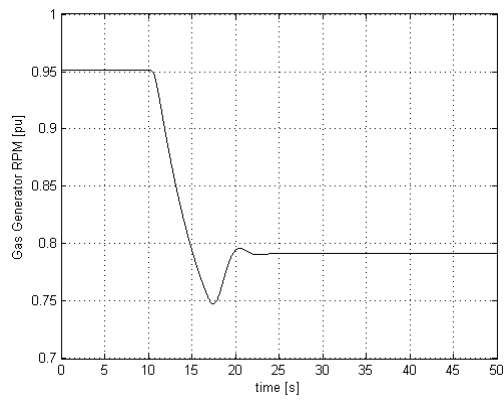


Σχήμα 3.26: Ηλεκτρική συχνότητα

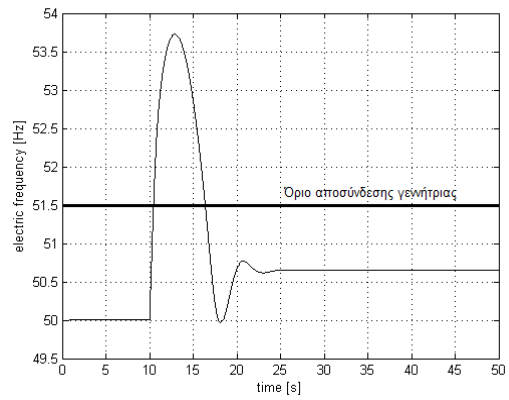
Η βηματική αλλαγή φορτίου κατά 20% δεν είναι εφικτή για το σύστημα, καθώς παρατηρείται μεγάλη βύθιση στην συχνότητα, η οποία δεν είναι ανεκτή (η μονάδα θα είχε τεθεί εκτός δικτύου). Παρ' όλ' αυτά επιβεβαιώνεται η ευσταθής συμπεριφορά της αεριογόνου. Η αρχική τιμή της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου είναι 0,7917 αμ και η τελική της τιμή, στο τέλος του μεταβατικού φαινομένου, είναι 0,9009 αμ. Εάν είχε αρχικοποιηθεί σε τιμή 0,8 αμ, η Matlab δίνει ακριβώς την ίδια τιμή για την ταχύτητα περιστροφής, 0,9009 αμ.

3.4.5.3 Βηματική μείωση φορτίου από 0,9 σε 0,6 αμ

Στην τελευταία δοκιμή η συχνότητα υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια διακύμανσής της αλλά η ταχύτητα της αεριογόνου επιβεβαιώνεται και πάλι πως δεν αποκλίνει. Η τελική τιμή της είναι 0,7917 αμ, ακριβώς όση ήταν και η αρχική τιμή της στην προηγούμενη προσομοίωση, όπου το μεταβατικό φαινόμενο άρχισε από το επίπεδο ισχύος 0,6 αμ.



Σχήμα 3.27: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου



Σχήμα 3.28: Ηλεκτρική συχνότητα

4ο Κεφάλαιο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΥ SIEMENS SGT 700

Στο παρόν κεφάλαιο αναπαρίσταται σε περιβάλλον προσομοίωσης ο αεριοστρόβιλος SGT 700 της Siemens [28]. Η ροπή αδράνειας της ατράκτου, οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης, οι ονομαστικές ταχύτητες περιστροφής της κάθε ατράκτου (αεριογόνου και ισχύος), οι μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας και η παροχή καυσαερίων στον στρόβιλο ισχύος σε kg/s έχουν δοθεί από την βιομηχανία [28]. Η γεννήτρια που προτείνεται να συνδεθεί σε αυτόν είναι η μηχανή AMS 1120LK 4PBS της ABB [29]. Οι τεχνικές προδιαγραφές της γεννήτριας που βρέθηκαν παρουσιάζονται συνολικά στο Παράρτημα Ε.

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα του 3ου Κεφαλαίου, αναπτύχθηκαν δύο αναπαραστάσεις του SGT 700, μία με έλεγχο ανοίγματος πτερυγίων και μία χωρίς, ώστε να εξακριβωθεί το εάν μπορεί να ενταχθεί αυτή η μηχανή σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου.

4.1 Λεπτομερείς θερμοδυναμικές σχέσεις

4.1.1 Γενικά

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην συνέχεια, ακολουθούν την ονοματολογία της ASME (βλ. υποενότητα 1.3.4). Στην προσομοίωση του SGT 700 έχει τροποποιηθεί η εξίσωση που περιγράφει τον θάλαμο καύσης, άρα με δεδομένη την παροχή καυσαερίων μπορεί να υπολογιστεί η παροχή αέρα και καυσίμου. Επομένως τροποποιήθηκαν οι εξισώσεις ισχύος των στρόβιλων, ώστε να συμπεριληφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αύξηση της ροής μάζας των αέρα, καθώς προστίθεται σε αυτήν και η μάζα του καυσίμου. Ισχύει δηλαδή ότι

$$\dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_{ex} \quad (4.1)$$

όπου οι ροές μάζας είναι αντίστοιχα η παροχή αέρα, η παροχή καυσίμου και η παροχή καυσαερίων. Στην (4.1) αμελούνται οι απομαστεύσεις αέρα στον συμπιεστή. Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις περιγραφής της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του αεριοστρόβιλου παρατίθενται στον Πίν. 4.1.

Σε αυτή την προσομοίωση οι αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις επιλύθηκαν με τα μεγέθη να έχουν όλα φυσικές τιμές. Η κανονικοποίηση των μεγεθών σε ανά μονάδα τιμές (αναγωγή στα ονομαστικά μεγέθη) γίνεται μετά τις αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις, διαιρώντας κάθε μέγεθος με την ονομαστική του τιμή. Για τις ισχείς ισχύει ότι

$$P_i^{pu} = \frac{P_i}{P_{\text{ονομαστικό}}^{\text{Συστήματος}}} \quad (4.2)$$

όπου ο δείκτης i μπορεί να αντιστοιχεί σε συμπιεστή ή στρόβιλο. Ας σημειωθεί πως η κανονικοποίηση γίνεται *όχι* στην βάση ισχύος της υπό εξέταση συνιστώσας (π.χ. του στρόβιλου ΥΠ) αλλά επί της ονομαστικής ισχύος εξόδου του συστήματος (δηλαδή ανάγεται στην ισχύ του στρόβιλου ΧΠ).

Οι θερμοκρασίες κανονικοποιούνται σύμφωνα με την (3.19), η οποία ξαναγράφεται:

$$T_{ii} \equiv T_{ii}^{pu} = \frac{T_{ii}^{[K]}}{T_{ii}^{o[K]}}, \quad i=3,4,5,6 \quad (4.3)$$

Η κάθε παροχή διαιρείται με την δική της ονομαστική τιμή στο τέλος των αλγεβρικών εξισώσεων στις οποίες εμφανίζεται, δηλαδή ισχύει αντίστοιχα ότι

$$W_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o}, \quad W_f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f^o}, \quad W_{ex} = \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \quad (4.4)$$

όπου W_a είναι η ανά μονάδα παροχή αέρα, W_f η ανά μονάδα παροχή καυσίμου και W_{ex} η ανά μονάδα παροχή καυσαερίων, η οποία σε φυσικές τιμές θεωρείται ίση με το άθροισμα των παροχών αέρα και καυσίμου. Στον Πίν. 4.1 συνοψίζονται τα μεγέθη και τα σύμβολά τους.

Πίνακας 4.1: Συμβολισμοί μεγεθών που χρησιμοποιούνται στις αλγεβρικές / θερμοδυναμικές εξισώσεις

Όνομα μεγέθους	Σύμβολο	Όνομα μεγέθους	Σύμβολο
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{12}	Ονομαστικός λόγος συμπίεσης	π_c
Θερμοκρασία εξόδου συμπιεστή	T_{13}	Ονομαστικός λόγος αποτόνωσης στρόβιλου ΥΠ	π_{T1}
Θερμοκρασία εισόδου στρόβιλου ΥΠ	T_{14}	Ονομαστικός λόγος αποτόνωσης στρόβιλου ΧΠ	π_{T2}
Θερμοκρασία εισόδου στρόβιλου ΧΠ	T_{15}	Μέση ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα συμπιεστή	C_{PC}
Θερμοκρασία εξόδου στρόβιλου ΧΠ	T_{16}	Μέση ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα στρόβιλου ΥΠ	C_{PT1}
Ολική ενθαλπία αέρα περιβάλλοντος	h_{12}	Μέση ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα στρόβιλου ΧΠ	C_{PT2}
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	η_c	Ανά μονάδα παροχή αέρα	W_a
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου ΧΠ	η_{T1}	Ανά μονάδα παροχή καυσίμου	W_f
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου ΥΠ	η_{T2}	Ανά μονάδα παροχή καυσαερίων	W_{ex}
Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	$\eta_{\mu c}$	Παροχή αέρα	\dot{m}_a
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου ΥΠ	$\eta_{\mu T1}$	Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου ΧΠ	$\eta_{\mu T2}$	Παροχή καυσαερίων	\dot{m}_{ex}
Μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{\mu G}$	Θερμογόνος δύναμη καυσίμου	q_f
Σταθερά των αερίων	R_a	Λόγος μάζας καυσίμου προς μάζα αέρα	f

4.1.2 Συμπιεστής

Η σχέση που περιγράφει την μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα στο συμπιεστή είναι η (3.1), η οποία παρατίθεται παρακάτω:

$$T_{t3} = T_{t2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^{\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o}} \right)^{\frac{R_a}{C_{PC}}} - 1}{\eta_C} \right) \quad (4.5)$$

Στην (3.1) είχε χρησιμοποιηθεί η ανά μονάδα παροχή αέρα, μέγεθος που θα αξιοποιηθεί και σε αυτή την προσομοίωση. Η παροχή αέρα σε ανά μονάδα τιμές δίνεται από το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου επί το άνοιγμα των πτερυγίων (όλα σε ανά μονάδα τιμές)

$$W_a \equiv \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} = g N_1 \quad (4.6)$$

όπου g είναι το άνοιγμα των πτερυγίων και N_1 οι στροφές της αεριογόνου, ενώ ο πραγματικός λόγος πίεσης είναι μεταβλητός και εξαρτάται από την παροχή αέρα

$$\pi_C = \pi_C^o W_a \quad (4.7)$$

Η ισχύς (σε kW) που καταναλώνει ο συμπιεστής, δίνεται από την (3.4), η οποία παρατίθεται ξανά:

$$P_C^{[kW]} = W_a \dot{m}_a^o C_{PC} (T_{t3} - T_{t2}) \quad (4.8)$$

4.1.3 Θάλαμος καύσης

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις παροχές αέρα και καυσίμου η εξίσωση του θαλάμου καύσης γράφεται, ακολουθώντας την υποενότητα 1.5.1 και την (1.29), ως

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PTI} T_{t4} = \dot{m}_a C_{PC} T_{t3} + \dot{m}_f q_f \quad (4.9)$$

όπου q_f είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, μετρούμενη σε kJ/kg. Διαιρώντας κάθε όρο με την παροχή αέρα, \dot{m}_a , προκύπτει [4] πως

$$\left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \right) C_{PTI} T_{t4} - C_{PC} T_{t3} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} q_f \quad (4.10)$$

Η (4.10) συμπεριλήφθηκε στις εξισώσεις αρχικοποίησης σε λειτουργία σε ονομαστικό φορ-

τίο. Η παροχή καυσαερίων είναι γνωστή [28], ενώ για η τιμή της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου λήφθηκε από σχετικό λογισμικό [27], σε συμφωνία με τις αναφορές [17, 18, 4].

4.1.4 Στρόβιλος υψηλής πίεσης

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις πολυτροπικές μεταβολές σε κάθε συνιστώσα του αεριοστροβίλου είναι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για τον στρόβιλο ΥΠ εξακολουθεί να ισχύει η (3.6):

$$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{TI} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{TI}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PTI}}} \right] \right) \quad (4.11)$$

Η ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο ΥΠ δίνεται από τη (3.7), η οποία παρατίθεται ξανά:

$$P_{TI} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PTI} (T_{i4} - T_{i5}) \eta_{\mu TI} \quad (4.12)$$

όπου $\eta_{\mu TI}$ είναι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου ΥΠ. Στη μόνιμη κατάσταση η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος ΥΠ είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνει ο συμπιεστής, οπότε η (3.7) θα γραφτεί εδώ ως

$$P_C = P_{TI} \quad (4.13)$$

άρα ισχύει πως

$$\frac{\dot{m}_a C_{PC} (T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PTI} (T_{i4} - T_{i5}) \eta_{\mu TI} \quad (4.14)$$

όπου $\eta_{\mu C}$ είναι ο μηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή. Επίσης έχει γίνει διάκριση μεταξύ των παροχών αέρα, καυσίμου και καυσαερίων οπότε οι παροχές δεν απλοποιούνται.

4.1.5 Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

Η εξίσωση που διέπει την θερμοδυναμική (πολυτροπική) μεταβολή στον στρόβιλο ΧΠ είναι η (3.10), η οποία παρατίθεται ξανά:

$$T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2}^o} \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right] \right) \quad (4.15)$$

Για τους λόγους πίεσης θα ισχύει και εδώ η (3.11):

$$\pi_C = \pi_{T1} \pi_{T2} \quad (4.16)$$

άρα και για τον λόγο αποτόνωσης του στροβίλου ΧΠ θα ισχύει, αντίστοιχα, πως

$$\pi_{T2} = \pi_{T2}^o W_{ex} = \pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \quad (4.17)$$

Η ισχύς που αποδίδει στην άτρακτό του ο στροβίλος ΧΠ, δίνεται σε φυσικές τιμές (kW) ως

$$P_{T2}^{[kW]} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT2} (T_{i5} - T_{i6}) \eta_{\mu T2} \quad (4.18)$$

Επομένως η ισχύς εξόδου της γεννήτριας, συνυπολογίζοντας και τον μηχανικό βαθμό απόδοσής της, είναι

$$P_e^{[kW]} = P_{T2}^o \eta_{\mu G} = 30.738,18 \text{ kW} \quad (4.19)$$

4.1.6 Εξισώσεις προσδιορισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας ανά συνιστώσα

Στην προσομοίωση του αεριοστροβίλου SGT700 χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις υπολογισμού της ειδικής θερμοχωρητικότητας για κάθε συνιστώσα του αεριοστροβίλου [26, 1], οι οποίες την προσδιορίζουν ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αερίου:

$$\begin{aligned} C_p &= 1.018,9 - 0,13784 T + 1,9843 \cdot 10^{-4} T^2 + 4,2399 \cdot 10^{-7} T^3 - 3,7632 \cdot 10^{-10} T^4, \\ &\quad 200\text{K} \leq T \leq 800\text{K} \\ C_p &= 798,65 + 0,5339 T - 2,2882 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,7421 \cdot 10^{-8} T^3, \\ &\quad 800\text{K} < T \leq 2.200\text{K} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Σε αυτές δόθηκε μια μέση τιμή θερμοκρασίας αερίου σε κάθε συνιστώσα και μέσω αυτών των συναρτήσεων προέκυψε μια μέση τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας για κάθε μεταβολή.

Πίνακας 4.2: Μέσες θερμοχωρητικότητες ανά συνιστώσα αεριοστροβίλου

Συνιστώσα	Θεωρούμενη μέση τιμή θερμοκρασίας	Υπολογισμένη μέση τιμή C_p
Συμπιεστής	500 K	1,0291
Στρόβιλος ΥΠ	1200 K	1,1745
Στρόβιλος ΧΠ	900 K	1,1211

4.2 Δεδομένα προσομοιώσεων

Ακολουθείται και εδώ η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2. Για την προσομοίωση είναι γνωστές οι εξής ονομαστικές τιμές: οι θερμοκρασίες T_{13} , T_{14} , T_{16} , (βλ. Σχ. 2.1) οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης κάθε συνιστώσας (3 βαθμοί), ο λόγος συμπίεσης και η παροχή καυσαερίων. Επομένως πρέπει να προσδιοριστούν η θεωρούμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_{12} , η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον στρόβιλο ΥΠ, T_{15} , οι χωριστές παροχές αέρα και καυσίμου και τέλος οι λόγοι αποτόνωσης σε κάθε στρόβιλο (ΥΠ και ΧΠ). Όλες οι παραπάνω τιμές αυτές αναφέρονται σε ονομαστική λειτουργία.

4.2.1 Θερμοδυναμικά δεδομένα

4.2.1.1 Ονομαστικές τιμές

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω πρέπει να προσδιοριστούν 6 άγνωστοι, οπότε απαιτούνται 6 εξισώσεις. Η T_{12} ορίζεται από την T_{13} , μέσω της (4.5), της πολυτροπικής εξίσωσης του συμπιεστή, αφού είναι γνωστός και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσής του και ο λόγος συμπίεσης. Οι παροχές αέρα και καυσίμου προσδιορίζονται από την (4.10) που είναι η εξίσωση του θαλάμου καύσης, αφού ήταν γνωστές οι T_{13} , T_{14} . Τέλος, θεωρήθηκε γνωστή η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, q_f .

Η T_{15} μπορούσε να βρεθεί από την εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου του θαλάμου καύσης, ο λόγος π_{T1} από την πολυτροπική μεταβολή στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και ο λόγος π_{T2} από την πολυτροπική μεταβολή στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, αφού τα π_{T1} και π_{T2} όταν πολλαπλασιαστούν μεταξύ τους δίνουν το λόγο συμπίεσης π_c . Επειδή τα στοιχεία που μας δόθηκαν είναι πραγματικά αυτό ήταν προφανώς αδύνατο να συμβεί μέσω των απλών θερμοδυναμικών εξισώσεων, οπότε, για να λυθεί το πρόβλημα εντός των πλαισίων μαθηματικής προσομοίωσης, έπρεπε να θεωρηθεί ένα ακόμη μέγεθος ως άγνωστος, γιατί ως τώρα υπάρχουν 7 εξισώσεις για 6 αγνώστους. Θεωρήθηκε ως άγνωστος ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου χαμηλής πίεσης, ως το στοιχείο με την μικρότερη απόκλιση από τη δεδομένη τιμή.

Θα μπορούσε να θεωρηθεί άγνωστος η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, επειδή όμως μας είχε δοθεί η ονομαστική παροχή καυσαερίων (του αθροίσματος παροχής αέρα και καυσίμου), οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμογόνο δύναμη επηρέαζε πολύ λίγο τα αποτελέσματα επειδή μείωση της θερμογόνου δύναμης επέφερε αύξηση της παροχής καυσίμου στις (4.9) - (4.10).

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των ονομαστικών μεγεθών συνοψίζονται στον Πίν. 4.3. Ο άνω δείκτης o παραλείπεται από όλα τα μεγέθη ως πλεονασμός, καθώς όλα είναι ονομαστικά. Οι θερμοδυναμικές σταθερές συνοψίζονται στον Πίν. 4.4.

Πίνακας 4.3: Προσδιορισμός ονομαστικών στοιχείων αεριοστροβίλου SGT 700

Άγνωστος	Εξίσωση	Αναλυτική έκφραση	Προέλευση εξίσωσης
T_{t2}	(4.5)	$T_{t2} = T_{t3} \frac{\eta_C}{\eta_C - 1 + (\pi_C)^{\frac{R_a}{C_{PC}}}}$	Συμπίεστής
\dot{m}_a	(4.9)	$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{ex}}{1 + \frac{C_{PC} T_{t3} - C_{PTI} T_{t4}}{C_{PTI} T_{t4} - q_f}}$	Θάλαμος καύσης
\dot{m}_f	(4.1)	$\dot{m}_f = \dot{m}_{ex} - \dot{m}_a$	Ισοζύγιο μάζας
T_{t5}	(4.14)	$T_{t5} = T_{t4} - \frac{C_{PC} \dot{m}_a (T_{t3} - T_{t2})}{C_{PTI} \dot{m}_{ex} \eta_{\mu TI} \eta_{\mu C}}$	Ισορροπία ισχύος συμπίεστή – στροβίλου ΥΠ
π_{TI}	(4.11)	$\pi_{TI} = \left[\frac{T_{t4}}{T_{t4} - \frac{T_{t4} - T_{t5}}{\eta_{TI}}} \right]^{\frac{C_{PTI}}{R_a}}$	Στρόβιλος υψηλής πίεσης
π_{T2}	(4.16)	$\pi_{T2} = \frac{\pi_C}{\pi_{T2}}$	Συμβιβαστότητα πιέσεων
η_{T2}	(4.15)	$\eta_{T2} = \frac{T_{t5} - T_{t6}}{T_{t5} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2}} \right)^{\frac{R_a}{C_{PT2}}} \right]}$	Στρόβιλος χαμηλής πίεσης

4.2.1.2 Λειτουργικές τιμές

Αφού βρέθηκαν οι ονομαστικές τιμές όλων των μεγεθών, το πρόβλημα λειτουργίας σε μερικό φορτίο μπορούσε να λυθεί με τον ίδιο τρόπο όπως για τον αεριοστροβίλο GE LM 2500+, αφού τα άγνωστα μεγέθη θα προέκυπταν από τις ίδιες εξισώσεις, αλλά επιλυμένες για άλλη μεταβλητή. Οι εξισώσεις αρχικοποίησης παρουσιάζονται όλες μαζί για καλύτερη εποπτεία. Η εξίσωση ισορροπίας ισχύος στροβίλου ΧΠ – ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζεται σε κανονικοποιημένη μορφή, δηλαδή η (4.18) έχει διαιρεθεί με τον εαυτό της αλλά με ονομαστικά μεγέθη.

Πίνακας 4.4: Σταθερά – ονομαστικά θερμοδυναμικά μεγέθη αεριοστροβίλου SGT700

Ονομασία σταθεράς	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή [28]	η_c	88	%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΥΠ [28]	η_{T1}	86	%
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ [28]	η_{T2}	82,4	%
Λόγος συμπίεσης [28]	π_c	18,5	-
Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΥΠ	π_{T1}	3,93	-
Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΧΠ	π_{T2}	4,70	-
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (υπολογισμένο)	T_{t2}	288,64	K
Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή [28]	T_{t3}	703,15	K
Θερμοκρασία αέρα εξόδου θαλάμου καύσης [28]	T_{t4}	1461,15	K
Θερμοκρασία αέρα εξόδου στροβίλου υψηλής πίεσης (υπολογισμένο)	T_{t5}	1103,80	K
Θερμοκρασία αέρα εξόδου στροβίλου χαμηλής πίεσης [28]	T_{t6}	806,15	K
Σταθερά ατμοσφαιρικού αέρα	R_a	0,287	$\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του συμπιεστή	C_{pC}	1,03	$\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του στροβίλου ΥΠ	C_{pT1}	1,17	$\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
Ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα κατά μήκος του στροβίλου ΧΠ	C_{pT2}	1,12	$\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή (εκτιμώμενος)	$\eta_{\mu c}$	99	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ (εκτιμώμενος)	$\eta_{\mu T1}$	99	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΥΠ (εκτιμώμενος)	$\eta_{\mu T2}$	99	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας [29]	$\eta_{\mu G}$	98,33	%
Παροχή αέρα (υπολογισμένη)	\dot{m}_a	91,8	kg/sec
Παροχή καυσίμου (υπολογισμένη)	\dot{m}_f	2,2	kg/sec
Παροχή καυσαερίων [28]	\dot{m}_{ex}	94,0	kg/sec
Ανά μονάδα παροχή αέρα	W_a	1	αμ
Ανά μονάδα παροχή καυσίμου	W_f	1	αμ
Ανά μονάδα παροχή καυσαερίων	W_{ex}	1	αμ
Ονομαστική ισχύς μονάδας [28, 29]	P_e	30.738	kW

Ορίζονται 6 εξισώσεις για 6 αγνώστους: 4 θερμοκρασίες (T_{t3} , T_{t4} , T_{t5} , T_{t6}) και 2 παροχές (αέρα και καυσίμου, \dot{m}_a και \dot{m}_f). Η πρώτη εξίσωση αναφέρεται στον συμπιεστή, η δεύτερη στο θάλαμο καύσης, η τρίτη στην ισορροπία ισχύος συμπιεστή – στροβίλου ΥΠ, η τέταρτη στο στρόβιλο ΥΠ, η πέμπτη τον στρόβιλο ΧΠ και η έκτη στην ισορροπία ηλεκτρικής ισχύος – ισχύος στροβίλου ΧΠ. Αυτές επιλύονται αριθμητικά από την Matlab και τα αποτελέσματα εκχωρούνται στους ολοκληρωτές ως αρχικές τιμές.

$$\begin{aligned}
 T_{i3} &= T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^o \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}}} - 1}{\eta_C} \right) \\
 \left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \right) C_{PTI} T_{i4} - C_{PC} T_{i3} &= \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} q_f \\
 \frac{C_{PC}(T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} &= \eta_{\mu TI} C_{PTI} (T_{i4} - T_{i5}) \\
 T_{i5} &= T_{i4} \left(1 - \eta_{TI} \left(1 - \frac{1}{\pi_{TI}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PTI}}} \right) \\
 T_{i6} &= T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right) \\
 P_e^{pu} &= \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \frac{T_{i5} - T_{i6}}{T_{i5}^o - T_{i6}^o}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

εξισώσεις
λειτουργικών
τιμών
και
αρχικοποίησης

Όλα τα αποτελέσματα είναι σε πραγματικές τιμές οπότε πρέπει να κανονικοποιηθούν σύμφωνα με την υποενότητα 4.1.1.

Το άνοιγμα των πτερυγίων προσδιορίζεται σύμφωνα με την (2.28), σχέση που απορρέει από τη μορφή του ρυθμιστή ανοίγματος πτερυγίων – ελεγκτή στροφών αεριογόνου.

$$N_1 = \frac{K_{IGV} - 1 + \sqrt{(K_{IGV} - 1)^2 + 4 K_{IGV} W_a}}{2 K_{IGV}} \tag{4.22}$$

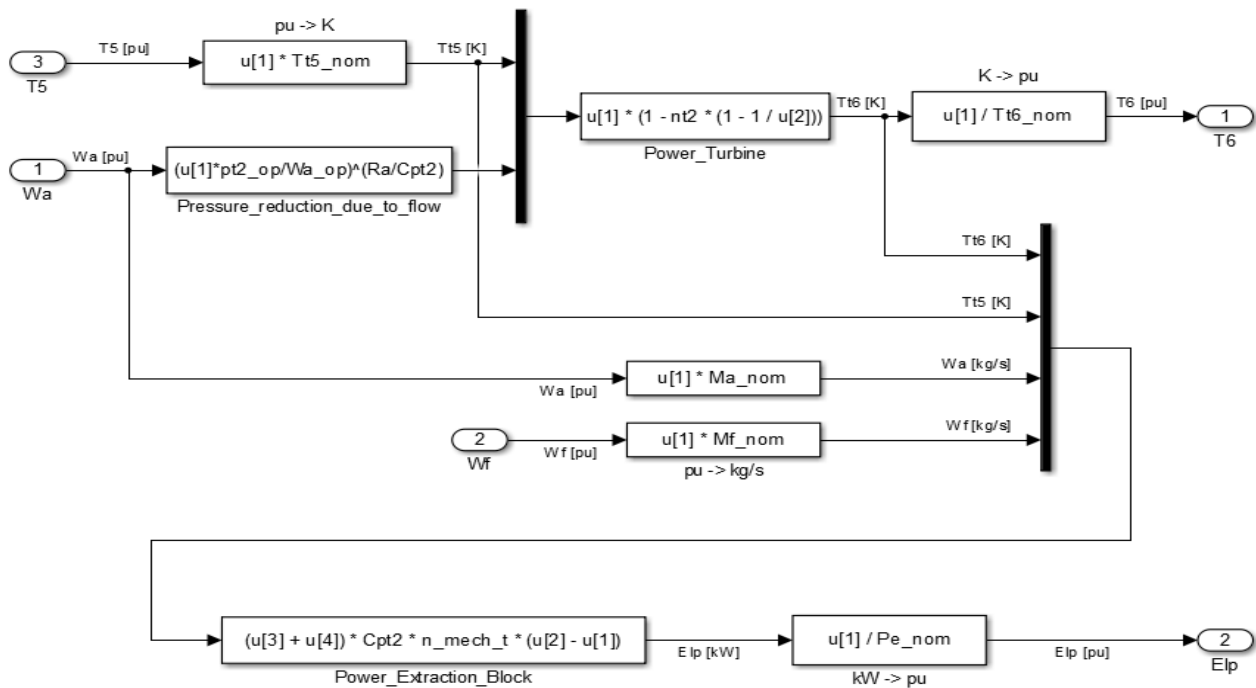
Όπου από την (4.6) ισχύει πως

$$W_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \tag{4.23}$$

και το άνοιγμα των πτερυγίων, σε ανά μονάδα τιμές, από την ίδια σχέση προκύπτει ως

$$g = \frac{W_a}{N_1} \tag{4.24}$$

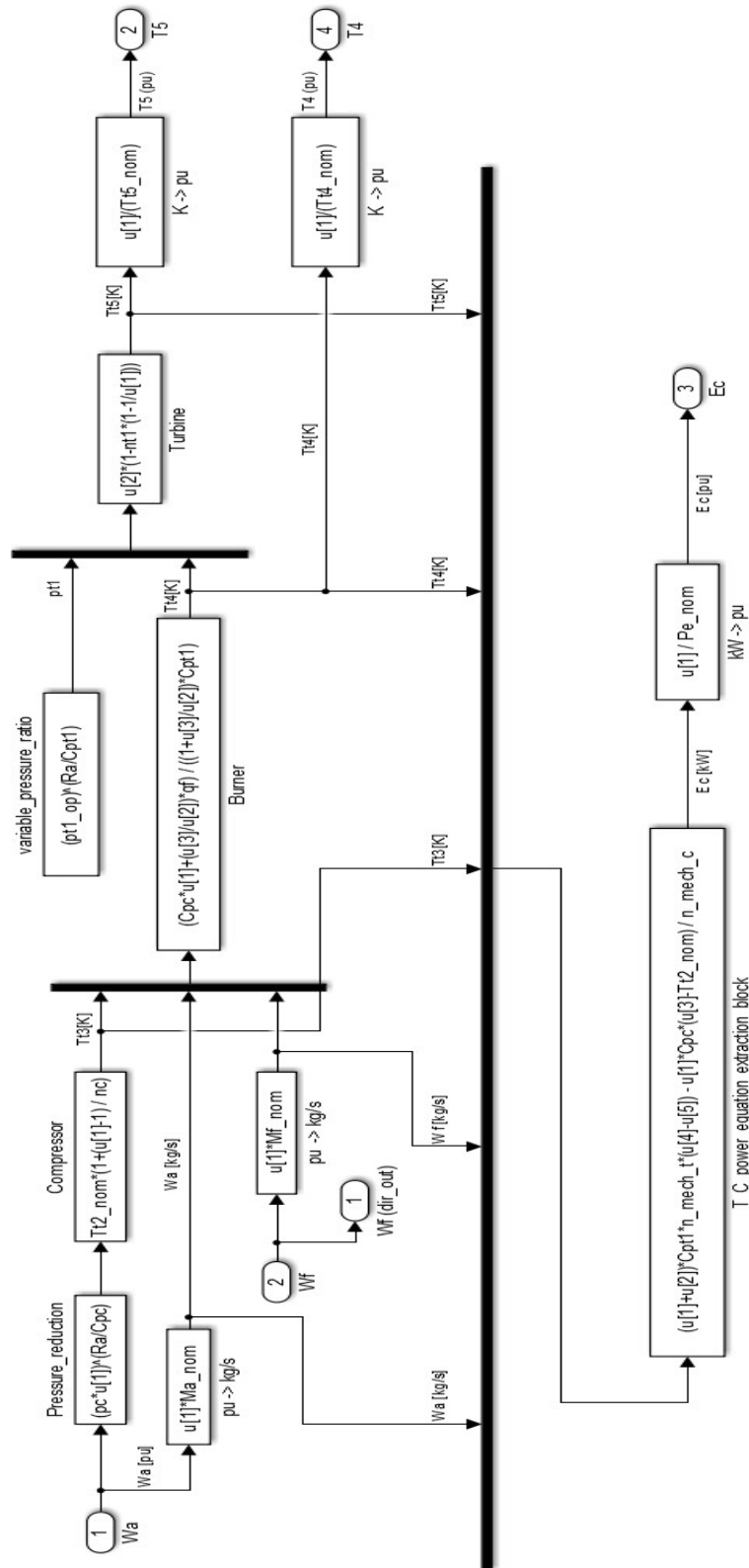
Οι ομάδες εξισώσεων που δίνουν τις θερμοδυναμικές μεταβολές στην στροβιλομηχανή παρουσιάζονται στα Σχ. 4.1 και 4.2, με την μορφή που έχουν στο Simulink, και αναλυτικά στον Πίν. 4.5.



Σχήμα 4.1: Αλγεβρικές / θερμοδυναμικές εξισώσεις βαθμίδας στροβίλου ισχύος (XII)

Πίνακας 4.5: Αναλυτική περιγραφή εξισώσεων αλγεβρικών βαθμίδων προσομοίωσης

Βαθμίδα	Άγνωστο μέγεθος	Σύμβολο	Γνωστά μεγέθη	Εξίσωση
Αεριο-γόνου	Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπεσστή	T_3	T_2, W_a	$T_{i3} = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_c^o \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{pc}}} - 1}{\eta_c} \right)$
	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_4	T_3, W_a, W_f	$T_{i4} = \frac{\dot{m}_a C_{pc} T_{i3} + \dot{m}_f q_f}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1}}$
	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΥΠ	T_5	T_4, W_a, W_f	$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{T1} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right)$
	Ισχύς αεριογόνου (διαφορά ισχύος συμπεσστή – στροβίλου ΥΠ)	E_C	$T_2, T_3, T_4, T_5, W_a, W_f$	$E_C = \frac{C_{PC} (T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} - \eta_{\mu T1} C_{PT1} (T_{i4} - T_{i5})$
Στροβίλου ισχύος (XII)	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου XII	T_6	T_5, W_a, W_f	$T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right)$
	Ισχύς στροβίλου XII - γεννήτριας	E_{lp}	T_5, T_6, W_a, W_f	$E_{lp} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT2} \eta_{\mu T2} (T_{i5} - T_{i6})$



Σχήμα 4.2: Αλγεβρικές / θερμοδυναμικές εξισώσεις αεριογόνου

Στις πρώτες δύο εξισώσεις η θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_2 , θεωρείται γνωστή ενώ οι παροχές αέρα, W_a , και καυσίμου, W_f , έχουν προέλθει από την αρχικοποίηση. Οι θερμοκρασίες που

κατόπιν προκύπτουν κανονικοποιούνται σύμφωνα με τις (4.3), ενώ οι ισχείς σύμφωνα με τις (4.2). Οι στροφές κάθε άτρακτου προκύπτουν από ολοκλήρωση της διαφοράς μεταξύ της ισχύος που παραλαμβάνει η κάθε άτρακτος και της ισχύος που καταναλώνει (σε ανά μονάδα τιμές). Οι εξισώσεις αυτές πραγματοποιούνται στο Simulink, δεν έχουν δηλαδή ρητή έκφραση (βλ. Σχ. 3.4). Οι στροφές και οι θερμοκρασίες καταλήγουν στους αντίστοιχους ελεγκτές οι οποίοι καθορίζουν τις παροχές αέρα και καυσίμου, οπότε κλείνει ο υπολογιστικός κύκλος.

4.2.2 Ροπές αδράνειας

Εδώ αξιοποιείται η ανάλυση που έγινε στην ενότητα 1.7. Η τιμή της αδράνειας κάθε μηχανικής συνιστώσας παρατίθεται στον Πίν. 4.6.

Πίνακας 4.6: Ροπές αδράνειας συνιστωσών συστήματος

Άτρακτος	Στοιχείο	Ροπή αδράνειας [kg·m ²]	Στροφές ανά λεπτό
Αεριογόνου	Αεριογόνος	60,8	9800
Στροβίλου Ισχύος	Στρόβιλος XII	96,2	6516
	Ελαστικός σύνδεσμος	2,3	6516
	Πινιόν	7,8	6516
	Σύνολο	106,3	6516
Γεννήτριας	Κιβώτιο	1601	1500
	Άξονας μετάδοσης	8	1500
	Γεννήτρια	2652,7	1500
Σύνολο άτρακτου ισχύος		4261,7	1500

Καθώς η ονομαστική ταχύτητα του στροβίλου είναι 6.516 ΣΑΛ ενώ η γεννήτρια έχει ονομαστική ταχύτητα 1.500 ΣΑΛ η οποία έχει κλειδωμένη από το δίκτυο (η γεννήτρια είναι 4-πολική), με βάση την (1.44), ο λόγος μείωσης στροφών θα είναι

$$\alpha = 0,2302$$

Η ροπή αδράνειας θα αναχθεί στην πλευρά της γεννήτριας (έξοδος κιβωτίου ταχυτήτων), οπότε σύμφωνα με την (1.45), θα ισχύει ότι

$$J_2^{\text{ολικό}} = J_1'' + J_2 = \frac{J_1}{\alpha^2} + J_2 = \frac{106,3}{0,2302^2} + 4261,7 = 6267,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.25)$$

Άρα η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της αεριογόνου θα είναι, σύμφωνα με την (1.40):

$$H_1 = \frac{\frac{1}{2} J_1 \omega_{1\text{ονομ.}}^2}{P_G^o} = \frac{\frac{1}{2} J_1 \left(\frac{2\pi \cdot 9800}{60} \right)^2}{P_G^o} = \frac{0,5 \cdot 60,8 \cdot 1026,3^2}{30.738.186} = 1,0416 \text{ s} \quad (4.26)$$

Επισημαίνεται και πάλι πως η κανονικοποίηση γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ εξόδου του συστήματος και όχι ως προς την ονομαστική ισχύ του στροβίλου ΥΠ. Η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της γεννήτριας είναι:

$$H_2 = \frac{\frac{1}{2} J_2 (\omega_2^o)^2}{P_{T2}^o} = \frac{\frac{1}{2} J_2 \left(\frac{2\pi \cdot 1500}{60} \right)^2}{P_{T2}^o} = \frac{0,5 \cdot 6267,7 \cdot 157,08^2}{30.738.186} = 2,5156 \text{ s} \quad (4.27)$$

όπου η ονομαστική ισχύς της διάταξης έχει προκύψει από την (4.18).

4.2.3 Σταθερές τιμές προσομοιώσεων

Καθώς θα υλοποιηθούν δύο μοντέλα (ένα με έλεγχο πτερυγίων και ένα χωρίς) οι σταθερές χρόνου που είναι κοινές και για τα δύο παρουσιάζονται στον Πίν. 4.7. Η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων είναι πως αυτό χωρίς έλεγχο πτερυγίων δεν θα έχει την αντίστοιχη σταθερά χρόνου. Το μοντέλο με έλεγχο πτερυγίων έχει 11 σταθερές χρόνου, όπου η σταθερά χρόνου του στροβίλου ΧΠ θεωρήθηκε ίση με την αντίστοιχη της αεριογόνου.

Επίσης παρουσιάζονται οι σταθερές διαμοιρασμού του σήματος θερμοκρασίας μεταξύ του άμεσα και του έμμεσα αντιληπτού σήματος θερμοκρασίας καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΧΠ, T_6 , όπως και οι σταθερές ελάχιστου καυσίμου. Τα ζεύγη αυτά σταθερών τιμών διέπονται από τις προφανείς σχέσεις πως $K_2 + K_3 = 1$ και $K_4 + K_5 = 1$.

Στην ίδια ενότητα εντάσσονται, τέλος, τα όρια ανοίγματος των πτερυγίων.

Πίνακας 4.7: Σταθερές SGT 700

Όνομασία	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Αδράνεια αεριογόνου (συμπιεστής και στρόβιλος ΥΠ)	Hgg	1,042	sec
Αδράνεια στροβίλου ΧΠ και γεννήτριας	Hpt	2,516	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικού μέρους συστήματος καυσίμου	Tv	0,05	sec
Σταθερά χρόνου ροϊκού μέρους συστήματος καυσίμου	Tf	0,4	sec
Σταθερά χρόνου θερμικών μεταβολών αεριογόνου & στροβίλου ισχύος – γεννήτριας.	Tcd	0,2	sec
Σταθερά χρόνου πτερυγίων (IGVs)	Tigv	1	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικής συμπεριφοράς οδηγών πτερυγίων	Tgov	0,1	sec
Σταθερά χρόνου θερμικής ασπίδας προστασίας θερμομέτρου	T3	15,0	sec
Σταθερά χρόνου απόκρισης θερμομέτρου	T4	2,5	sec
Σταθερά χρόνου ολοκληρωτικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T5	0,4699	sec
Συντελεστής μείωσης παροχής καυσίμου	K2	0,77	pu
Ποσοστό μόνιμης παροχής καυσίμου	K3	0,23	pu
Ποσοστό έμμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K4	0,8	pu
Ποσοστό άμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K5	0,2	pu
Μέγιστο άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs)	gmax	1,0	pu
Ελάχιστο άνοιγμα οδηγών πτερυγίων εισόδου (IGVs)	gmin	0,87	pu

4.3 Προσομοίωση με βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου

4.3.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Το γενικό διάγραμμα λειτουργίας είναι το ίδιο με αυτό του αεριοστροβίλου GE LM 2500+, το οποίο παρουσιάστηκε στο Σχ. 3.3 του Κεφ. 3, ενώ το δομικό διάγραμμα είναι και αυτό ίδιο με αυτό που παρουσιάστηκε στο Σχ. 3.4. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων έγκεινται στο κομμάτι των αλγεβρικών εξισώσεων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.1.3 και στα Σχ. 4.1 και 4.2.

4.3.2 Παράμετροι συστημάτων ελέγχου

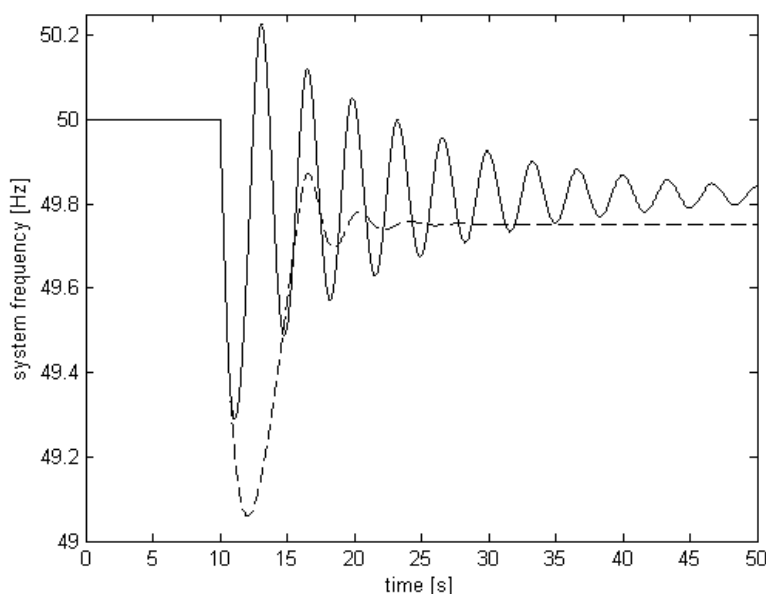
Ακολουθήθηκε η μέθοδος που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.3.3 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στην παρούσα προσομοίωση, εκτός από το στατισμό, R , και το κέρδος ανάδρασης βρόχου καυσίμου, K_f , ρυθμίστηκε επιπλέον και το κέρδος του ρυθμιστή στροφών της αεριογόνου δηλαδή το κέρδος του σήματος ανοίγματος των πτερυγίων, K_{IGV} . Αυτός είναι και ο λόγος που η επιλογή των παραμέτρων, στην παρούσα ενότητα, προηγείται των διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης καθώς η

σταθερά ελέγχου K_{IGV} τα διαμορφώνει μέσω του καθορισμού του ανοίγματος των πτερυγίων για κάθε επίπεδο φορτίου.

Ως αρχικές τιμές αυτών των παραμέτρων λήφθηκαν οι ρυθμίσεις της υποενότητας 3.3.3, που συνοψίζονται, μαζί με αυτές που τελικά επιλέχθηκαν στην παρούσα υποενότητα, στον Πίν. 4.8. Στις προσομοιώσεις έγιναν δεκτά, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.3.3, ως κατώτατο όριο βύθισης της ηλεκτρικής συχνότητας τα 49 Hz και ως ελάχιστη τελική τιμή της τα 49,7 Hz, για βηματική αύξηση του φορτίου κατά 10% και αρχικό σημείο λειτουργίας το 90% του ονομαστικού φορτίου του συστήματος. Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα η απόκριση του μοντέλου με τις ρυθμίσεις της υποενότητας 3.3.3 και η απόκριση με τις ρυθμίσεις που επιλέγονται στη συνέχεια. Οι ρυθμίσεις της υποενότητας 3.3.3 προφανώς απορρίφθηκαν καθώς οδηγούν σε πολύ έντονες μεταβατικές ταλαντώσεις.

Πίνακας 4.8: Παλιές και νέες τιμές παραμέτρων

Ονομασία μεγέθους	Σύμβολο	Παλιά Τιμή	Νέα τιμή
Στατισμός	R	0,028	0,020
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	0,57	1,75
Κέρδος κλάδου ελέγχου ανοίγματος πτερυγίων	K_{IGV}	0,8	0,1



Σχήμα 4.3: Αποκρίσεις συστήματος. Ρυθμίσεις υπ/τας 3.3.3 (συνεχής γραμμή), υπ/τας 4.3.3 (διακεκομμένη γραμμή)

Η ρύθμιση επιτεύχθηκε εκτελώντας πολλαπλές προσομοιώσεις όπου κάθε φορά δοκιμαζόταν ένας διαφορετικός συνδυασμός των παραμέτρων που είναι υπό ρύθμιση (στατισμός, κέρδος

ανάδρασης βρόχου καυσίμου, κέρδος ελέγχου ανοίγματος πτερυγίων). Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης καταγράφονται σε λογιστικό φύλλο και κατόπιν ταξινομούνται με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν. Ως δεδομένα της κάθε προσομοίωσης θεωρούνται οι τιμές που υποβάλλονται σε ρύθμιση, τα οποία έχουν ένα σταθερό αυξητικό βήμα. Η υλοποίηση έγινε με χρήση ένθετων βρόχων, όπου όμως τώρα είναι τρεις, καθώς ρυθμίζονται τρεις παράμετροι.

```

for R=0.02:0.001:0.05
    for Kf=0:0.05:4
        for Kigv=0.10:0.01:1
            data_SGT700_Kf_IGV;
            sim('SGT700_Kf_IGV',50)
            G = linmod('SGT700_Kf_IGV');
            [wn,zeta,val] = damp(G.a);
            aux_mat=zeros(10,1);
            for k=1:(size(G.a,1))
                aux_mat(k,1)=abs(zeta(k));
            end
        end
    end
end

```

Στον Πίν. 4.9 παρουσιάζεται το πλήθος των τιμών που λαμβάνουν οι παράμετροι που ρυθμίζονται, καθώς και το αυξητικό βήμα κατά το οποίο μεταβάλλονται.

Πίνακας 4.9: Ρυθμιζόμενες παράμετροι

Παράμετρος	Από	Έως	Βήμα	Πλήθος δοκιμών
R	0,02	0,05	0,001	31
K _f	0	4	0,05	81
K _{IGV}	0,1	1	0,01	91

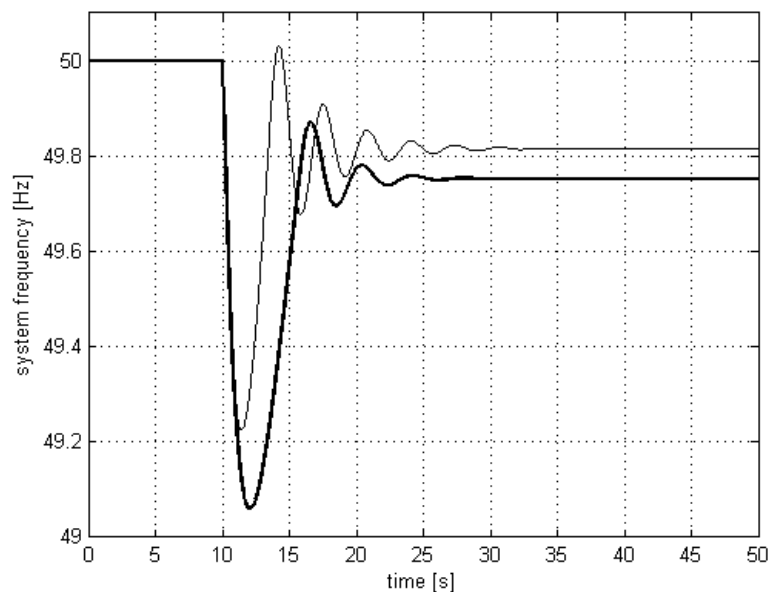
Πραγματοποιήθηκαν $31 \times 81 \times 91 = 228.501$ δοκιμές. Ο τελευταίος βρόχος for πραγματοποιεί την επιλογή του ελάχιστου λόγου απόσβεσης ζ, καθώς η γραμμικοποίηση θα δώσει τρεις λόγους, αφού το σύστημα έχει τρία ζεύγη ταλαντωτικών ιδιοτιμών. Τα αποτελέσματα που εξετάστηκαν με επισκόπηση των αντίστοιχων αποκρίσεων παρουσιάζονται στον Πίν. 4.10. Σε αυτή τη δοκιμή όλα τα κριτήρια συγκλίνουν σε μία επιλογή, δηλαδή ο συνδυασμός των παραμέτρων με το μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης δίνει και τις μικρότερες τυπικές αποκλίσεις, και στα δύο χρονικά διαστήματα που εξετάζονται. Παρατίθεται, ενδεικτικά, ο συνδυασμός παραμέτρων που θα είχε επιλεγεί εάν το κριτήριο τελικής συχνότητας ήταν 49,8 Hz αντί για 49,7 Hz.

Η απόκριση του δεύτερου συνδυασμού (απεικονίζεται με λεπτή συνεχή γραμμή), σε

σύγκριση με τον πρώτο, ο οποίος και επιλέχθηκε, παρουσιάζεται στο Σχ. 4.4. Φαίνεται πως ο δεύτερος συνδυασμός παρουσιάζει μικρότερο λόγο απόσβεσης, γεγονός που αποτυπώνεται και στην τυπική απόκλιση των τιμών της ηλεκτρικής συχνότητας από την τελική της τιμή. Φαίνεται ακόμη πως ενώ με τον δεύτερο συνδυασμό ο εγγενώς ασταθής κλάδος απεμπλέκεται πιο γρήγορα, το κριτήριο αυτό δεν είναι πάντα χαρακτηριστικό της καλύτερης απόκρισης. Ο πρώτος συνδυασμός επιλέχθηκε επειδή ικανοποιούσε τα κριτήρια μεταβατικής βύθισης και μόνιμου σφάλματος που θεσπίστηκαν αρχικά. Οι τελικές επιλογές μαζί με τις παραμένουσες ρυθμίσεις συνοψίζονται στον Πίν. 4.11.

Πίνακας 4.10: Ρυθμιζόμενες παράμετροι

Σειρά επιλογής	R	K_f	K_{IGV}	Ελάχιστη συχνότητα	Τελική συχνότητα	τυπική απόκλιση 75% – 100%	τυπική απόκλιση 25% – 100%	ζ	Χρόνος απεμπλοκής
1	0,02	1,75	0,1	49,103	49,733	0,000	0,011	0,220	15,63
2	0,02	1,15	0,1	49,233	49,801	0,000	0,019	0,139	13,32



Σχήμα 4.4: Σύγκριση αποκρίσεων

4.3.3 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης

Όπως και για τις προσομοιώσεις του αεριοστροβίλου GE LM 2500+, απεικονίζονται εδώ τα σημεία λειτουργίας για μερικό φορτίο του αεριοστροβίλου SGT 700. Το κάθε σημείο λειτουργίας

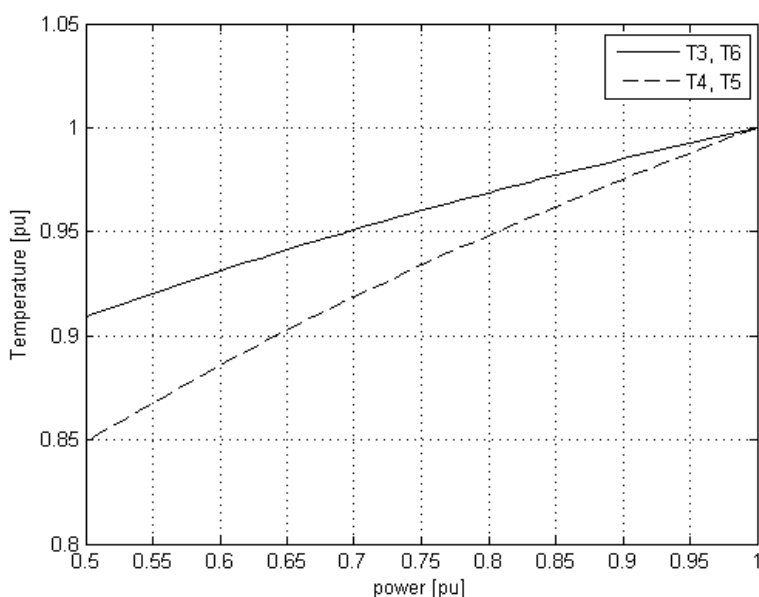
αφορά τις θερμοκρασίες λειτουργίας, την ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου και τις παροχές καυσίμου και αέρα, μεγέθη τα οποία απεικονίζονται σε διαγράμματα ως συναρτήσεις της ισχύος εξόδου του αεριοστροβίλου. Όλες οι τιμές είναι κανονικοποιημένες και είναι εμφανές ότι όλες αυξάνονται γραμμικά όσο αυξάνεται και η ισχύς εξόδου του συστήματος. Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί η τιμή του κέρδους ενίσχυσης του σήματος ελέγχου του ανοίγματος των πτερυγίων, K_{IGV} .

Πίνακας 4.11: Παράμετροι ελέγχου SGT 700 με έλεγχο ανοίγματος πτερυγίων

Ονομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Τιμή
Στατισμός	R	0,020
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	1,75
Κέρδος κλάδου ελέγχου ταχύτητας αεριογόνου – ρύθμισης ανοίγματος πτερυγίων	K_{IGV}	0,1
Θερμοκρασία αναφοράς της T_6	T_r	1
Κέρδος αναλογικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T_t	2,3
Μέγιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc_min	0
Μέγιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd_max	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd_min	0

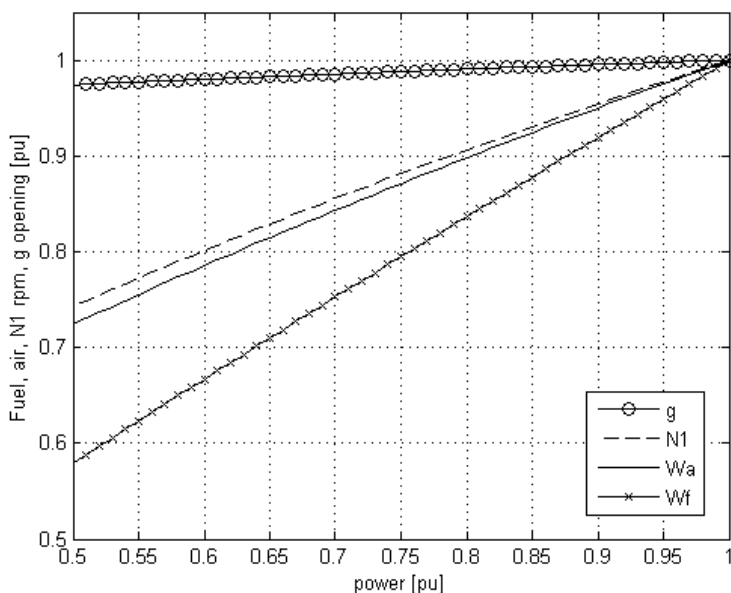
Η παρούσα αναπαράσταση του αεριοστροβίλου δεν καλύπτει τιμές ισχύος κάτω από το 50% της ονομαστικής του. Θεωρήθηκε πως για τέτοιες τιμές ισχύος η ροή αποστραγγάζεται οπότε πρέπει να προσδιοριστούν διαφορετικά οι λόγοι αποτόνωσης σε κάθε στρόβιλο, φαινόμενο που δεν εξετάζεται εδώ. Ισχύει, όπως και στην υποενότητα 3.3.2 ότι οι T_{13} και T_{16} είναι ίσες σε ανά μονάδα τιμές, όπως το ίδιο συμβαίνει και με τις T_{14} και T_{15} .

Εάν συγκριθεί το Σχ. 4.6 με το Σχ. 3.20 του Κεφ. 3 φαίνεται πως το άνοιγμα των πτερυγίων παρουσιάζει πολύ μικρό εύρος μεταβολής σε σχέση με το άνοιγμα των πτερυγίων στην προσομοίωση της ενότητας 3.3. Αυτό συμβαίνει καθώς εδώ ρυθμίστηκε και το κέρδος ενίσχυσης του σήματος ελέγχου των πτερυγίων.



Σχήμα 4.5: Ανά μονάδα θερμοκρασίες μόνιμης κατάστασης λειτουργίας αεριοστροβίλου

Όπως φαίνεται από το εύρος διακύμανσης της ταχύτητας της αεριογόνου, το κύριο βάρος της προσαρμογής του συστήματος στο νέο επίπεδο ισχύος έχει αναληφθεί από την αεριογόνο επειδή μπορεί να μεταβάλλει την ταχύτητά της πιο γρήγορα απ' ό,τι μπορούν να μεταβάλλουν τα πτερύγια το άνοιγμά τους.



Σχήμα 4.6: Παροχές καυσίμου, αέρα και άνοιγμα πτερυγίων

4.3.4 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση

4.3.4.1 Ιδιοτιμές

Σε αντιστοιχία με την υποενότητα 3.3.4 παρουσιάζονται εδώ οι πίνακες ιδιοτιμών του συστήματος. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι οι ίδιες με αυτές που εκτίθενται στον Πίν. 3.8 και, ομοίως, θα παρουσιαστούν δύο πίνακες ιδιοτιμών, ένας για κάθε κλάδο. Έχουν αφαιρεθεί οι ιδιοτιμές που αφορούν μεταβλητές κατάστασης που περιγράφουν σήματα του ανενεργού κλάδου.

Στον Πίν. 4.12 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος όταν είναι ενεργοποιημένος μόνο ο κλάδος ελέγχου στροφών. Φαίνεται πως υπάρχουν δύο πραγματικές ιδιοτιμές, αρκετά μακριά από το 0, καθώς, ακόμη και η 8^η ιδιοτιμή είναι αρκετά μεγαλύτερη (περίπου 4 φορές) από το πραγματικό μέρος των ιδιοτιμών 6-7, επομένως κυριαρχεί η ταλαντωτική απόκριση του ρυθμού 6-7.

Πίνακας 4.12: Ιδιοτιμές κλάδου ρύθμισης στροφών, SGT 700 με έλεγχο πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-14,211	0	-	-	-	-	0,07
2	-10,523	5,503	0,886	0,529	1,890	11,875	-
3		-5,503					
4	-3,180	1,329	0,923	1,823	0,549	3,447	-
5		-1,329					
6	-0,356	1,586	0,219	3,866	0,259	1,625	-
7		-1,586					
8	-1,171	0	-	-	-	-	-

Φαίνονται ακόμη 6 μιγαδικές ιδιοτιμές, σε τρία συζυγή ζεύγη, οι οποίες περιγράφουν ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος. Οι ιδιοτιμές 2-3 και 4-5 έχουν μεγάλο λόγο απόσβεσης και μεγάλο αρνητικό πραγματικό μέρος, οπότε ούτε σε αστάθεια οδηγούν το σύστημα, ούτε σε έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά.

Στον Πίν. 4.13 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος όταν είναι ενεργοποιημένος μόνο ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Εδώ φαίνονται δύο ζεύγη συζυγών μιγαδικών ιδιοτιμών με μεγάλο λόγο απόσβεσης ζ, άνω του 0,95 και για τις δύο, επομένως δεν αναμένεται ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος εάν ενεργοποιηθεί αυτός ο κλάδος. Παραμένει η μηδενική ιδιοτιμή που δείχνει αστάθεια εάν δεν ενεργοποιηθεί ξανά ο κλάδος ρύθμισης στροφών.

Πίνακας 4.13: Ιδιοτιμές κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, SGT 700 με έλεγχο περυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω _n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-10,977	2,640	0,972	0,557	1,797	11,290	-
2		-2,640					
3	-4,744	0	-	-	-	-	0,21
4	-0,939	0,245	0,968	6,478	0,154	0,970	-
5		-0,245					
6	-0,322	0	-	-	-	-	3,11
7	-0,070	0	-	-	-	-	14,30
8	0	0	-	-	-	-	-

Επομένως φαίνεται και σε αυτό το μοντέλο πως κρίσιμος παράγοντας για την ευστάθεια του συστήματος είναι η όσο το δυνατό συντομότερη απεμπλοκή του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης.

4.3.4.2 Συντελεστές συμμετοχής

Στον Πίν. 4.14 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή, ανά ενεργό κλάδο. Εδώ παρουσιάζονται όμως και οι ιδιοτιμές που συμμετέχουν σε ιδιοτιμές του ανενεργού κλάδου, για καλύτερη εποπτεία.

Πίνακας 4.14: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ελέγχου στροφών

	Ιδιοτιμές										
	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	-
	-0,400	-0,067	-14,211	-10,523	±j5,503	-3,180	±j1,329	-0,356	±j1,586	-1,171	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής										
1 Στροφές γεννήτριας	0	0	0,12	0,16	0,26	1	0,08	0	0	0	0
2 Στροφές αεριογόνου	0	0	0,01	0,00	0,65	0,67	0,13	0	0	0	0
3 Έλεγχος περυγίων	0	0	0,00	0,00	0,03	0,03	1	0	0	0	0
4 Ροή καυσίμου	0	0	0,49	1	0,17	0,24	0,01	0	0	0	0
- Σφάλμα Tt6 (έξοδος συγκρ.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
- Μετρούμενη Tt6 (έξοδος μορφ.)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Ρυθμιστής στροφών	0	0	0,39	0,34	0,13	0,17	0,01	0	0	0	0
6 Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0,18	0,24	0,40	0,33	0,02	0	0	0	0
7 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0,01	0,00	1	0,22	0,04	0	0	0	0
8 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	1	0,89	0,02	0,03	0,00	0	0	0	0
- Ολοκληρωτική μέτρηση Tt6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Στον Πίν. 4.14 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή του συστήματος με ενεργοποιημένο τον κλάδο ρύθμισης στροφών. Φαίνεται πως το πρώτο ζεύγος συζυγών ιδιοτιμών, το οποίο ορίζει τον ρυθμό 2-3 (βλ. και υποενότητα 1.8.4) καθορίζεται κυρίως από την μεταβλητή κατάστασης που περιγράφει τη ροή καυσίμου (βλ. Σχ. 3.4) οπότε αυτός ο ρυθμός θα ονομαστεί ρυθμός συστήματος καυσίμου. Ομοίως, ο ρυθμός 4-5 θα ονομαστεί αεριογόνου (αφού ο στροβίλος ΥΠ κινεί την αεριογόνο) και ο ρυθμός 6-7 θα ονομαστεί ρυθμός γεν-

νήτριας. Αξίζει να παρατηρηθεί η εξάρτηση της μικρότερης πραγματικής ιδιοτιμής: η 8^η ιδιοτιμή, περίπου $-1,2$, ορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τα οδηγία πτερύγια εισόδου, τα οποία έχουν αργή απόκριση. Εάν το κέρδος του σήματος ελέγχου τους μεταβληθεί τότε το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια.

Στον Πίν. 4.15 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή του συστήματος με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Το κρίσιμο στοιχείο είναι οι εξαρτήσεις των μικρών και της μηδενικής ιδιοτιμής. Η 6^η ιδιοτιμή, ενώ εξαρτάται κύρια από τις στροφές της αεριογόνου, επηρεάζεται κατά 79% από την τελικά μετρούμενη θερμοκρασία T_6 , άρα από τις μετρητικές διατάξεις. Η ιδιοτιμή αυτή πιθανώς θα έτεινε προς θετική τιμή εάν μεταβαλλόταν το κέρδος του σήματος ελέγχου των πτερυγίων, το οποίο, με τη σειρά του, ελέγχει την ταχύτητα της αεριογόνου.

Η 7^η ιδιοτιμή, εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την ολοκληρωτική μέτρηση της T_6 , δηλαδή από την θερμοκρασία που γίνεται αντιληπτή μέσω συναγωγής. Η σταθερά χρόνου της μετρητικής διάταξης είναι δεδομένη οπότε δεν τείνει προς θετική τιμή.

Πίνακας 4.15: Συντελεστές συμμετοχής μεταβλητών κατάστασης με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης

Ιδιοτιμές	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8
	-10	0	-5	-10,977	±2,640	-4,744	-0,939	±0,245	-0,322	-0,070	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής										
- Στροφές γεννήτριας	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0,01	0,05	0,59	1	0,01	0	0	
2 Έλεγχος πτερυγίων	0	0	0	0,00	0,00	1	0,07	0,00	0	0	
3 Ροή καυσίμου	0	0	0	1	0,12	0,03	0,02	0,00	0	0	
4 Σφάλμα T_6 (έξοδος συγκρ.)	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	
5 Μετρούμενη T_6 (έξοδος μορφ.)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
- Ρυθμιστής στροφών	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
- Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
6 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0	0,02	1	0,14	0,07	0,00	0	0	
7 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	0,94	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0	
8 Ολοκληρωτική μέτρηση T_6	0	0	0	0,00	0,00	0,01	0,02	1	0	0	

Η 8^η ιδιοτιμή, η οποία είναι αυτή που αποσταθεροποιεί το σύστημα, φαίνεται πως εξαρτάται μόνο από την τελική έξοδο του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, δηλαδή από το σφάλμα της T_6 το οποίο περνάει μέσα από ολοκληρωτή ανοιχτού βρόχου (το ολοκληρωτικό μέρος το PI ελεγκτή) ο οποίος επομένως παρουσιάζει αστάθεια, καθώς πραγματοποιεί σύγκριση της T_6 με την μονάδα, άρα πάντα αντιλαμβάνεται σφάλμα και αυξάνει μόνιμα την τιμή εξόδου του (βλ. Σχ. 3.4).

4.3.4.3 Ιδιοδιανύσματα

Οι ταλαντωτικοί ρυθμοί θα διερευνηθούν πιο αναλυτικά ως προς τις μεταβλητές κατάστασης στις οποίες εμφανίζονται και οι οποίες τους καθορίζουν. Γι' αυτή την ανάλυση χρειάζεται να παρουσιαστούν τα αριστερά και τα δεξιά ιδιοδιανύσματα κάθε ρυθμού.

Πίνακας 4.16: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 2-3 ($-10,523 \pm j5,503$), συστήματος καυσίμου

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Στροφές γεννήτριας	0,00	-71,1	63,37	-12,7	0,16	172,4
2	Στροφές αεριογόνου	0,01	-74,8	0,27	-5,5	0,00	175,9
3	Έλεγχος πτερυγίων	0,00	135,2	0,71	-87,7	0,00	-56,3
4	Ροή καυσίμου	0,26	-145,6	2,48	-110,7	1	0
5	Ρυθμιστής στροφών	0,14	13,5	1,50	14,9	0,34	-75,4
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,10	81,3	1,60	122,4	0,24	99,9
7	Ισχύς αεριογόνου	0,12	77,6	0,02	129,6	0,00	103,4
8	Βαλβίδα καυσίμου	1	0	0,57	-80,5	0,89	175,7

Όπως φαίνεται από τον Πίν. 4.16, ο ρυθμός 2-3 εμφανίζεται κυρίως στην μεταβλητή κατάσταση που περιγράφει το τελικό σήμα καυσίμου, ενώ φαίνεται να καθορίζεται επίσης από τη βαλβίδα καυσίμου και από τον ρυθμιστή στροφών. Σημειώνεται ότι τα αριστερά και δεξιά ιδιοδιανύσματα δεν είναι ανεξάρτητα από τις μονάδες των μεταβλητών κατάστασης οπότε τα μεγέθη τους δεν είναι πλήρως ενδεικτικά του αποτελέσματος.

Αντίθετα οι συντελεστές συμμετοχής είναι αδιάστατοι και ανεξάρτητοι από μονάδες. Φαίνεται πως ο ρυθμός 2-3 καθορίζεται κυρίως από την τελική τιμή του σήματος καυσίμου (που αναπαριστά την χρονική υστέρηση λόγω ροής του καυσίμου), άρα και από την σταθερά χρόνου T_f . Σε δεύτερο βαθμό φαίνεται ότι επηρεάζεται από την είσοδο της πρώτης βαθμίδας του συστήματος καυσίμου, άρα και από την σταθερά χρόνου T_v , ενώ επηρεάζει αυτόν τον ρυθμό και ο ρυθμιστής στροφών ο οποίος καθορίζει την έγχυση καυσίμου.

Πίνακας 4.17: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 4-5 ($-3,180 \pm j1,329$), αεριογόνου

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωμία [deg]
		Μέτρο	Γωμία [deg]	Μέτρο	Γωμία [deg]		
1	Στροφές γεννήτριας	0,01	-113,6	19,94	53,9	0,26	9,4
2	Στροφές αεριογόνου	0,15	-157,3	4,35	-105,3	0,65	166,5
3	Έλεγχος περυγίων	0,01	54,1	5,50	-113,1	0,03	10,1
4	Ροή καυσίμου	0,38	44,8	0,44	61,0	0,17	175,0
5	Ρυθμιστής στροφών	0,92	55,3	0,14	76,6	0,13	-158,9
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,22	43,7	1,74	90,0	0,40	-157,1
7	Ισχύς αεριογόνου	1	0	0,97	-69,1	1	0
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,23	161,9	0,06	65,6	0,02	-63,4

Στον Πίν. 4.17 φαίνεται πως ο ταλαντωτικός ρυθμός 4-5 καθορίζεται κυρίως από την ισχύ της αεριογόνου και δευτερευόντως από τις στροφές της. Καθορίζεται επίσης από την ισχύ και τις στροφές της γεννήτριας, αλλά σε αρκετά μικρότερο βαθμό.

Πίνακας 4.18: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 6-7 ($-0,356 \pm j1,586$), γεννήτριας

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωμία [deg]
		Μέτρο	Γωμία [deg]	Μέτρο	Γωμία [deg]		
1	Στροφές γεννήτριας	0,0195	-170,7	31,39	-160,7	1	0
2	Στροφές αεριογόνου	0,0766	-118,1	5,38	-53,2	0,67	159,9
3	Έλεγχος περυγίων	0,0045	174,0	4,57	-96,9	0,03	48,4
4	Ροή καυσίμου	0,2697	-19,1	0,53	-97,3	0,24	-145,1
5	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,10	-83,3	0,17	-112,0
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,1615	-68,0	1,26	-141,8	0,33	121,5
7	Ισχύς αεριογόνου	0,2475	-15,5	0,55	-34,4	0,22	-78,6
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,2877	17,3	0,07	-92,6	0,03	-104,0

Τέλος, ο ρυθμός γεννήτριας αναλύεται στον Πίν. 4.18. Είναι ο σημαντικότερος προς μελέτη, καθώς έχει μικρό πραγματικό μέρος και μικρό λόγο απόσβεσης, $\zeta = 0,219$ (βλ. Πίν. 4.12), επομένως κυριαρχεί στην απόκριση του συστήματος. Καθορίζεται κυρίως από τις στροφές της γεννήτριας, αλλά και από τις στροφές της αεριογόνου και την ισχύ του στροβίλου ΧΠ. Είναι ο ρυθμός που έχει την περισσότερο διεσπαρμένη εξάρτηση.

Μεταβάλλοντας την παράμετρο K_{IGV} κατά 0,1 (η αρχική της τιμή ήταν 0,1) και εφαρμόζοντας την (1.89) προκύπτει πως

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial K_{IGV}} \simeq \frac{\mathbf{A}(K_{IGV} + \Delta K_{IGV}) - \mathbf{A}(K_{IGV})}{\Delta K_{IGV}} \quad (4.28)$$

Άρα η παράγωγος του πίνακα \mathbf{A} ως προς την παράμετρο K_{IGV} θα είναι

Πίνακας 4.19: Μεταβολή του πίνακα κατάστασης **A** μεταβαλλόμενου του κέρδους K_{IGV}

		1	2	3	4	5	6	7	8
		Στροφές γεννήτριας	Στροφές αεριογόνου	Έλεγχος πτερυγίων	Ροή καυσίμου	Ρυθμιστής στροφών	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	Βαλβίδα καυσίμου
1	Στροφές γεννήτριας	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Έλεγχος πτερυγίων	0	1	0	0	0	0	0	0
4	Ροή καυσίμου	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Ρυθμιστής στροφών	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Ισχύς αεριογόνου	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	0	0	0	0	0

όπου στις γραμμές αντιστοιχεί το γράμμα i και στις στήλες το γράμμα j . Καθώς για την σταθερά χρόνου των πτερυγίων ισχύει πως $T_{IGV} = 1$ s, προκύπτει επομένως και από την μεταβολή του πίνακα **A** πως η παράμετρος K_{IGV} επηρεάζει μόνο το στοιχείο a_{43} του πίνακα **A**, άρα η ιδιοτιμή 6 (και η συζυγής της, 7) παρουσιάζουν ευαισθησία από το στοιχείο K_{IGV} κατά το γινόμενο του αντίστοιχου αριστερού επί το αντίστοιχο δεξί ιδιοδιάνυσμα. Άρα η (1.88) θα γίνει

$$\frac{\partial \lambda_6}{\partial K_{IGV}} = v_{6i} u_{6j} \frac{\partial a_{ij}}{\partial K_{IGV}} = v_{63} u_{62} \frac{\partial a_{32}}{\partial K_{IGV}} = v_{63} u_{62} \quad (4.29)$$

Άρα ισχύει ότι

$$\begin{aligned} S_6 &= \frac{\partial \lambda_6}{\partial K_{IGV}} = (4,57 \angle -96,9^\circ) \times (0,0766 \angle -118,1^\circ) = \\ &= -0,287 + j0,2 = 0,35 \angle 145^\circ \end{aligned} \quad (4.30)$$

Άρα, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.8.6, αφού το πραγματικό μέρος είναι αρνητικό, αύξηση της τιμής της παραμέτρου θα επιφέρει μετατόπιση προς τα αριστερά της ιδιοτιμής. Επίσης, δεδομένου ότι η ευαισθησία έχει μικρό φανταστικό μέρος τότε η παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα της ταλάντωσης.

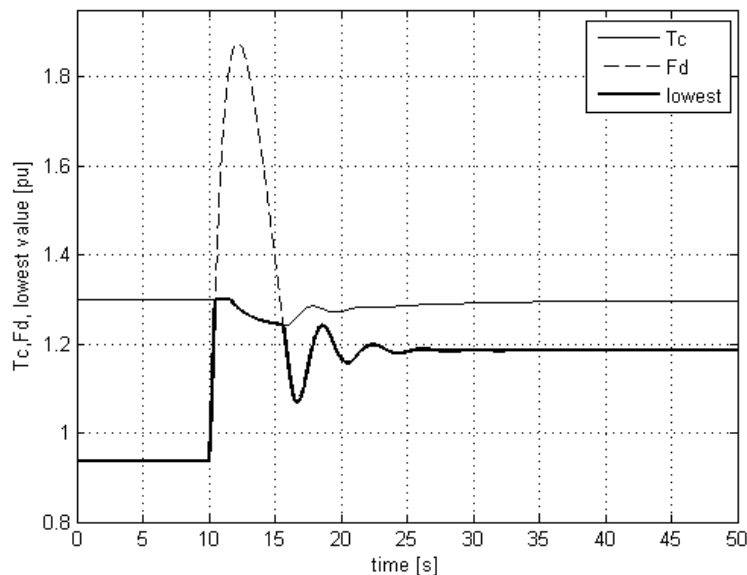
4.3.5 Αποκρίσεις

Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση αύξησης φορτίου κατά 0,1 αμ, από το 0,9 της ονομαστικής του παραγωγής στο 1 αμ. Ο χρόνος προσομοίωσης ορίστηκε στα 50 δευτερόλεπτα και η διαταραχή εμφανίζεται στη χρονική στιγμή $t = 10$ s. Επειδή το φορτίο αυξάνεται, εγχέεται περισσότερο καύσιμο οπότε είναι αναμενόμενο να ενεργοποιηθεί ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης, άρα αναμένεται παρεμβολή των σημάτων ελέγχου έγχυσης καυσίμου.

Στο Σχ. 4.7 απεικονίζονται τα σήματα παροχής καυσίμου, το σήμα που δίνει ο ελεγκτής στροφών και το σήμα που δίνει ο ελεγκτής υπερθέρμανσης. Σε σύγκριση με το Σχ. 3.10, φαίνεται πως η έξοδος του ελεγκτή υπερθέρμανσης μειώνεται με μικρότερο ρυθμό. Δεδομένου πως δεν έχει αλλάξει καμία μεταβλητή του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης (ούτε τα κέρδη ενίσχυσης σήματος, ούτε οι σταθερές χρόνου, καθώς θεωρήθηκε πως το σύστημα ελέγχου υπερθέρμανσης παραμένει το ίδιο), θεωρούμε πως η διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων των σημάτων ρύθμισης ροής καυσίμου οφείλεται στην διαφορετική μορφή της εξίσωσης που διέπει τον θάλαμο καύσης.

Η ταλάντωση που εμφανίζει το προερχόμενο από τον ελεγκτή στροφών σήμα ρύθμισης παροχής καυσίμου φαίνεται ότι στην παρούσα προσομοίωση παρουσιάζει μικρότερο εύρος ταλάντωσης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές ροπές αδράνειας των περιστρεφόμενων ατράκτων (αεριογόνου και γεννήτριας).

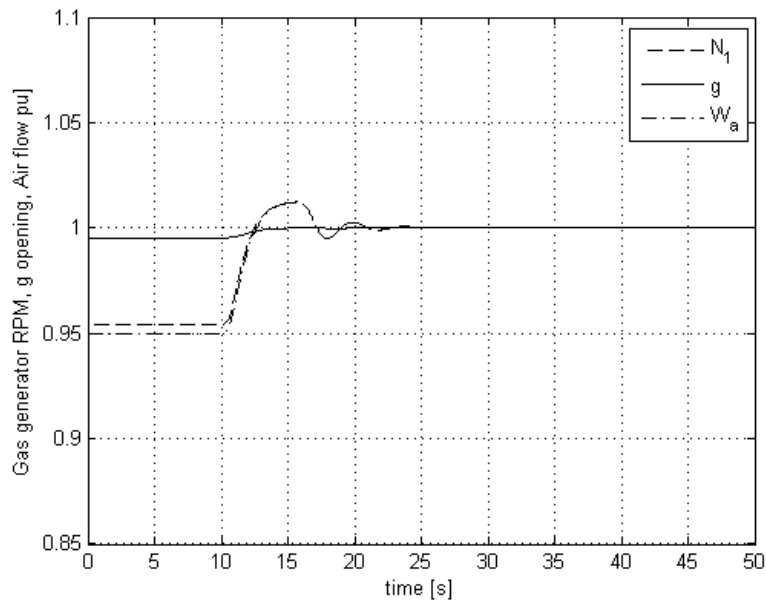
Στο Σχ. 4.8 παρουσιάζονται οι στροφές της αεριογόνου, N_1 , το άνοιγμα των οδηγών πτερυγίων αέρα εισόδου, g , και η παροχή αέρα, W_a , όλα σε ανά μονάδα τιμές. Επειδή έχει μεταβληθεί το κέρδος ενίσχυσης του σήματος ρύθμισης ανοίγματος των πτερυγίων, η μεταβολή τους είναι μικρή. Φαίνεται δηλαδή εδώ πως το κύριο έργο της ανάληψης φορτίου το αναλαμβάνει η αεριογόνος, η οποία έχει ταχύτερη απόκριση από τα πτερύγια. Γι' αυτό φαίνεται πως η ταχύτητα της αεριογόνου υπερβαίνει περισσότερο την ονομαστική της ταχύτητα εδώ, σε σύγκριση με την συμπεριφορά της στην ενότητα 3.3, όπως αυτή αποτυπώνεται στο Σχ. 3.11.



Σχήμα 4.7: Σήματα ροής καυσίμου

Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζονται η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον θάλαμο καύσης,

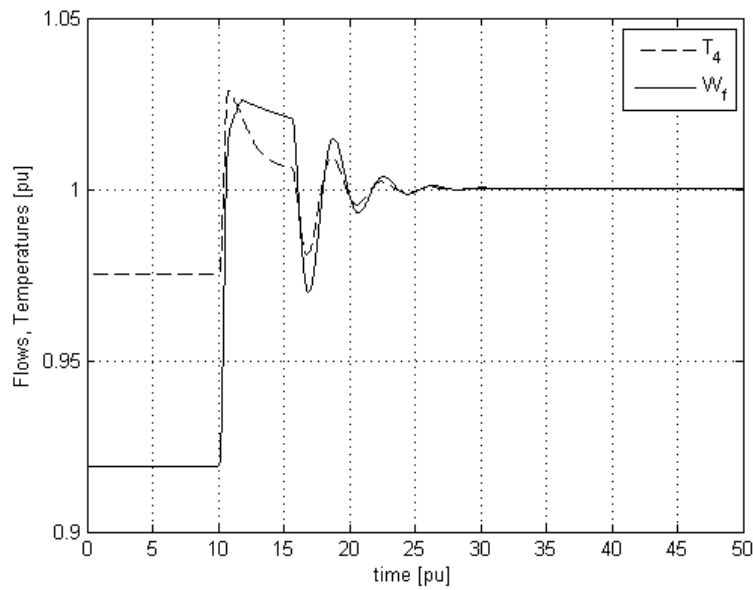
T_4 , και η παροχή καυσίμου, W_f , σε ανά μονάδα τιμές. Προφανώς, η ανά μονάδα τιμή του καυσίμου, για ονομαστικό φορτίο μονάδας θα πάρει την τιμή 1 αμ.



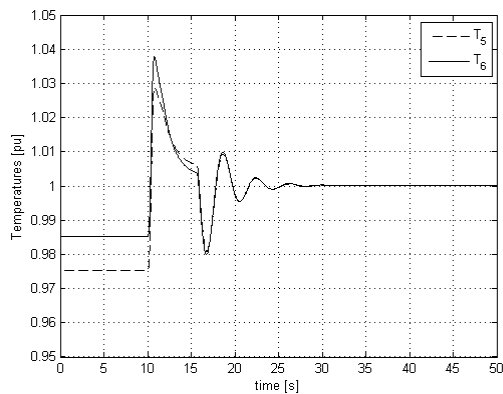
Σχήμα 4.8: Στροφές αεριογόνου, άνοιγμα πτερυγίων, παροχή αέρα. SGT 700 με έλεγχο ανοίγματος πτερυγίων

Όπως παρουσιάστηκε ήδη, λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς του θαλάμου καύσης, της διαφορετικής απόδοσης της μηχανής και των διαφορετικών ταχυτήτων των ατράκτων λόγω των διαφορετικών ροπών αδράνειας, η εξέλιξη της θερμοκρασίας T_4 είναι αρκετά πιο ομαλή σε αυτή την προσομοίωση, δεν παρουσιάζει κορυφή όπως στο μοντέλο της ενότητας 3.3. Με παρόμοιο, ομαλότερο τρόπο, συμπεριφέρεται και η παροχή καυσίμου. Ας παρατηρηθεί πως η παροχή καυσίμου, τόσο στο Σχ. 3.12 όσο και στο Σχ. 4.9 ακολουθεί σχεδόν ίδιες τιμές. Φαίνεται επομένως πως η εισαγωγή του μεγέθους της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου επηρέασε πολύ λίγο το αποτέλεσμα.

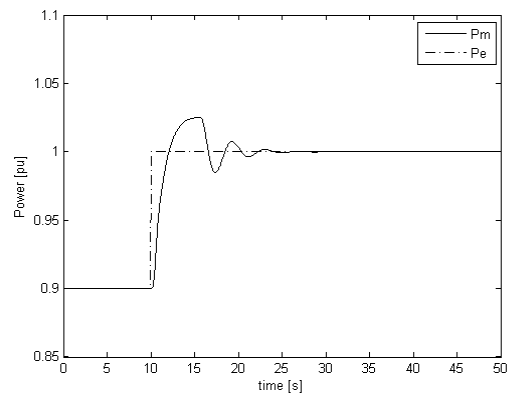
Στα Σχ. 4.10 και 4.11 απεικονίζονται οι θερμοκρασίες καυσαερίων από κάθε στρόβιλο, T_5 για τον ΥΠ και T_6 για τον ΧΠ και η παρεχόμενη μηχανική ισχύς από το σύστημα, σε σύγκριση με την ζητούμενη ηλεκτρική.



Σχήμα 4.9: Θερμοκρασία καυσαερίων εισόδου στον στρόβιλο ΥΠ, παροχή καυσίμου



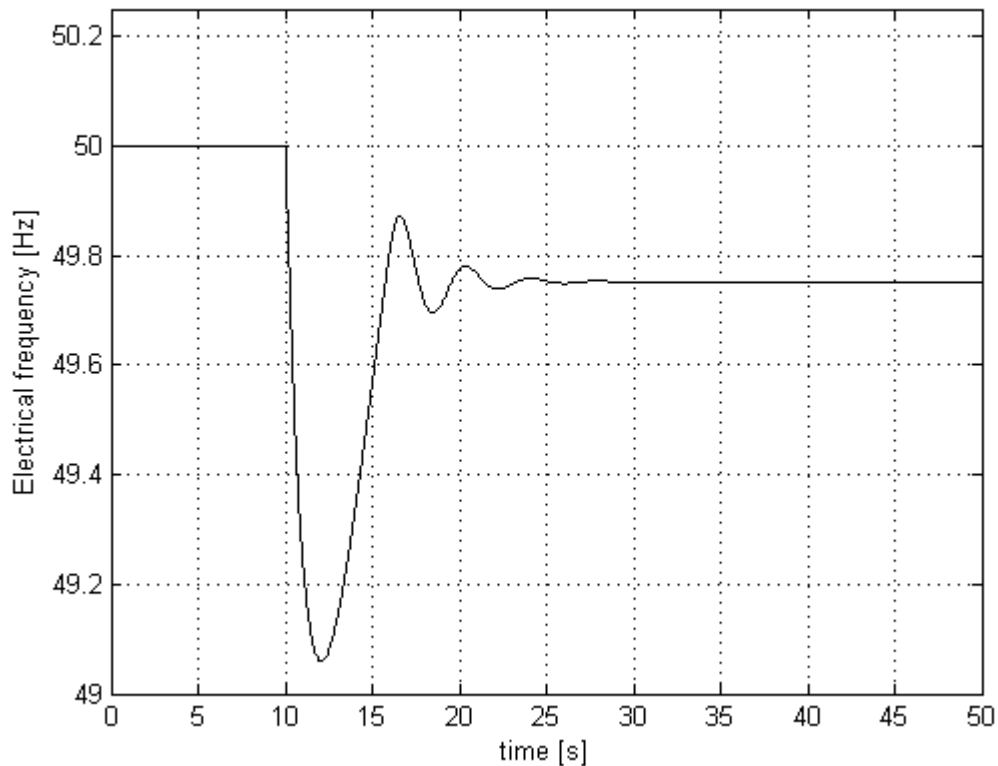
Σχήμα 4.10: Θερμοκρασίες καυσαερίων εξόδου στροβίλων



Σχήμα 4.11: Μηχανική και ηλεκτρική ισχύς

Δεν παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές από τα αντίστοιχα της ενότητας 3.3, ήτοι τα Σχ. 3.13 και 3.14 αντίστοιχα, εκτός από το ότι στην παρούσα προσομοίωση οι θερμοκρασίες καυσαερίων έχουν μικρότερο εύρος διακύμανσης.

Τέλος, στο Σχ. 4.12 παρουσιάζεται η ηλεκτρική συχνότητα της γεννήτριας.



Σχήμα 4.12: Ηλεκτρική συχνότητα γεννήτριας

Σε σύγκριση με το Σχ. 3.15 φαίνεται ότι η συχνότητα, σε αυτή την προσομοίωση παρουσιάζει μεγαλύτερη βύθιση αλλά χαμηλότερη τελική τιμή. Αυτό είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών ρυθμίσεων στατισμού, ο οποίος, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.4, είναι αποτέλεσμα όχι μόνο του αντίστροφου κέρδους R του ρυθμιστή στροφών αλλά εξαρτάται και από το κέρδος ανάδρασης K_f όπως και από τις σταθερές παροχής καυσίμου, K_2 και K_3 . Με την αλλαγή του K_f , ο πραγματικός στατισμός έχει αλλάξει, οπότε άλλαξε και η τελική τιμή της συχνότητας. Η μέγιστη βύθιση συχνότητας είναι 49,06 Hz ενώ η τελική συχνότητα είναι 49,75 Hz.

4.4 Προσομοίωση με βρόχο ανάδρασης παροχής καυσίμου χωρίς βρόχο ελέγχου στροφών αεριογόνου

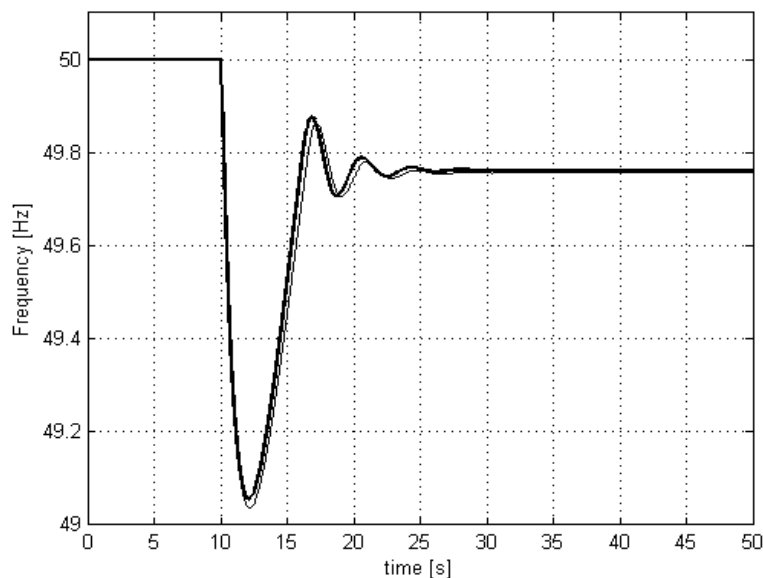
Το γενικό διάγραμμα λειτουργίας είναι ίδιο με αυτό που παρουσιάστηκε στο Σχ. 3.16, ενώ το δομικό του διάγραμμα είναι ίδιο με αυτό που παρουσιάστηκε στο Σχ. 3.17. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων έγκεινται στο κομμάτι των αλγεβρικών εξισώσεων του θαλάμου καύσης.

4.4.1 Ρύθμιση παραμέτρων ελέγχου

Τα κέρδη ενίσχυσης ρυθμίστηκαν με την μέθοδο που αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.3.2. Σε αυτή την προσομοίωση ρυθμίστηκαν ο στατισμός R και το κέρδος του βρόχου ανάδρασης καυσίμου K_f για βηματική αύξηση του φορτίου της γεννήτριας από το 90% στο 100% του ονομαστικού της. Στον Πίν. 4.20 παρουσιάζονται οι τιμές που είχαν οι παράμετροι που ρυθμίζονται στην προηγούμενη ενότητα όπως και οι τιμές που έλαβαν και στην παρούσα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίν. 4.21.

Πίνακας 4.20: Παλιές και νέες τιμές παραμέτρων

Ονομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Παλιά Τιμή	Νέα τιμή
Στατισμός	R	0,020	0,020
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	K_f	1,75	1,7
Κέρδος κλάδου ελέγχου ανοίγματος περυγίων	K_{IGV}	0,8	-



Σχήμα 4.13: Σύγκριση αποκρίσεων

Στο Σχ. 4.13 φαίνεται πως η διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων είναι εξαιρετικά μικρή. Η μικρή διαφορά αυτή δεν ήταν αποτέλεσμα εποπτικής εξέτασης των αποκρίσεων αλλά της ταξινόμησης των στοιχείων που καταγράφονται.

Πίνακας 4.21: Παράμετροι ελέγχου SGT 700 χωρίς έλεγχο ανοίγματος πτερυγίων

Ονομασία παραμέτρου	Σύμβολο	Τιμή
Στατισμός	R	0,020
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	Kf	1,7
Θερμοκρασία αναφοράς της T_{i6}	T_r	1,01
Κέρδος αναλογικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T_t	2,3
Μέγιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	T_{c_max}	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	T_{c_min}	0
Μέγιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	F_{d_max}	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	F_{d_min}	0

4.4.2 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης

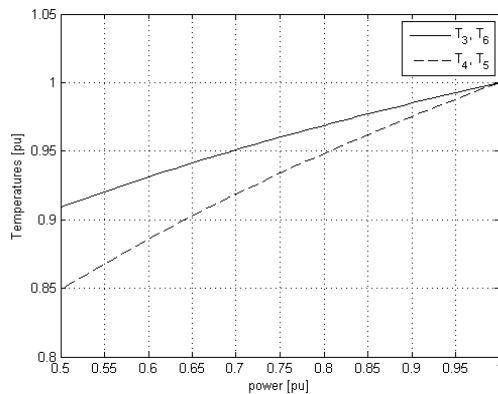
Τα σημεία λειτουργίας του αεριοστροβίλου, όσον αφορά τις θερμοκρασίες λειτουργίας του, τις στροφές των ατράκτων και τις παροχές καυσίμου και αέρα απεικονίστηκαν σε διαγράμματα ως συναρτήσεις της ισχύος λειτουργίας του. Όπως σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα, τα μεγέθη που αποτυπώνονται εδώ φτάνουν ως την τιμή 1 αμ, καθώς κανένα μοντέλο δεν έχει σχεδιαστεί για προσομοίωση υπερφόρτισης.

Στο Σχ. 4.14 απεικονίζονται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή, T_3 , η θερμοκρασία των καυσαερίων του θαλάμου καύσης, T_4 , η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου ΥΠ, T_5 , και η θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου ΧΠ, T_6 . Φαίνεται πως σε ανά μονάδα τιμές ισχύει πως $T_3 = T_6$ και $T_4 = T_5$. Στο Σχ. 4.15 απεικονίζονται οι πραγματικές παροχές αέρα, W_a , και καυσίμου, W_f . Φαίνεται πως όταν ο αεριοστροβίλος λειτουργεί στο μισό φορτίο, όλες οι θερμοκρασίες είναι πάνω από το 85% της ονομαστικής τους τιμής.

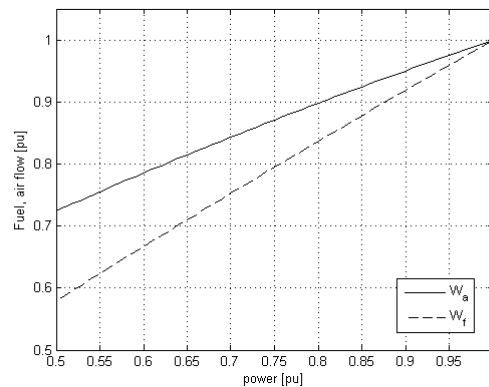
Το άνοιγμα των πτερυγίων, g , παραμένει σταθερό στην ονομαστική του τιμή ($g = 1$) καθώς τα πτερύγια σε αυτή την προσομοίωση είναι πλήρως ανοιχτά.

Η ανά μονάδα ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου ταυτίζεται με την ανά μονάδα παροχή αέρα, σύμφωνα με την (2.2). Εάν συγκριθεί με το Σχ. 4.6, φαίνεται πως η διαφορά στην ελάχιστη τιμή της ταχύτητας περιστροφής της αεριογόνου στο 50% του φορτίου (τεχνικό ελάχιστο) είναι μικρή επομένως η επιλογή μέγιστου ανοίγματος πτερυγίων δεν είναι υπερβολική. Η ταχύτητα της αε-

ριογόνου στο μισό φορτίο είναι 0,7411 αμ στο μοντέλο με ρύθμιση ανοίγματος περυγίων και 0,7217 αμ στο μοντέλο χωρίς ρύθμιση ανοίγματος περυγίων.



Σχήμα 4.14: Θερμοκρασίες αέρα εισόδου και εξόδου από τον θάλαμο καύσης



Σχήμα 4.15: θερμοκρασίες καυσαερίων εξόδου στροβίλων ΥΠ και ΧΠ

4.4.3 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση

4.4.3.1 Ιδιοτιμές

Σε αυτή την αναπαράσταση έχει αφαιρεθεί ο κλάδος ελέγχου των IGVs και επομένως έχει εκλείψει η σταθερά χρόνου που χαρακτηρίζει την κίνησή τους, άρα θα υπάρχει μια ιδιοτιμή λιγότερο – όπως και στην ενότητα 3.4. Οι ιδιοτιμές της παρούσας αναπαράστασης είναι συνολικά 10, όπου όμως και πάλι είναι χωρισμένες σε κλάδους. Υπενθυμίζεται πως ο κύριος κλάδος έχει 4 μεταβλητές κατάστασης (δύο για το καύσιμο, την ισχύ του στροβίλου ΥΠ και τις στροφές της αεριογόνου), ο κλάδος ελέγχου στροφών 3 (ισχύς στροβίλου ΧΠ, στροφές γεννήτριας, σταθερά χρόνου ρυθμιστή στροφών) και ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης επίσης 3 (σταθερά χρόνου συναγωγικής μέτρησης θερμοκρασίας, σταθερά χρόνου μετρητικής διάταξης, σταθερά χρόνου PI ελεγκτή). Επομένως το σύστημα θα περιγραφεί και πάλι από δύο συστήματα τιμών όπου το κάθε ένα θα θεωρεί μόνο τον ένα από τους δύο κλάδους ενεργοποιημένο. Άρα τελικά θα εμφανίζονται μόνο 7 ιδιοτιμές.

Οι ιδιοτιμές 6-7 της ενότητας 4.3 έχουν μεταφερθεί στις θέσεις 4-5. Κατά τα άλλα όμως, φαίνεται μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των Πίν. 4.12 και 4.22, με μόνη διαφορά την απαλοιφή μιας πραγματικής ιδιοτιμής. Ο Πίν. 4.23 περιγράφει τις ιδιοτιμές του συστήματος όταν είναι ενεργοποιημένος μόνο ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Ο αντίστοιχος της προηγούμενης παραγράφου, Πίν. 4.13, έχει ένα μιγαδικό ζεύγος ιδιοτιμών παραπάνω, αλλά και σε αυτή την περίπτωση ενδιαφέρον παρουσιάζουν όχι οι ταλαντωτικοί ρυθμοί μα οι εκθετικοί, καθώς υπάρχει μηδενική ιδιοτιμή, η οποία οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια.

Πίνακας 4.22: Ιδιοτιμές κλάδου ρύθμισης στροφών, SGT 700 χωρίς έλεγχο πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω _n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-14,387	0	-	-	-	-	0,07
2	-10,460	5,368	0,890	0,53	1,87	11,76	-
3		-5,368					
4	-0,376	1,617	0,227	3,78	0,26	1,66	-
5		-1,617					
6	-3,220	1,394	0,918	1,79	0,56	3,51	-
7		-1,394					

Πίνακας 4.23: Ιδιοτιμές κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, SGT 700 χωρίς έλεγχο πτερυγίων

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω _n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-10,964	2,072	0,983	0,56	1,78	11,16	-
2		-2,072					
3	-4,742	0	-	-	-	-	0,21
4	-0,070	0	-	-	-	-	14,29
5	-0,294	0	-	-	-	-	3,40
6	-0,933	0	-	-	-	-	1,07
7	0	0	-	-	-	-	-

4.4.3.2 Συντελεστές συμμετοχής

Στον Πίν. 4.24 παρατίθενται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης στους ρυθμούς που εμφανίζονται με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου στροφών.

Πίνακας 4.24: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ρύθμισης στροφών

Ιδιοτιμές	-	-	1	2	3	4	5	6	7	-
	-0,400	-0,067	-14,387	-10,460	±j5,358	-0,376	±j1,617	-3,220	±j1,394	0,000
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής									
1 Στροφές γεννήτριας	0	0	0,10	0,17		1		0,24		0
2 Στροφές αεριογόνου	0	0	0,01	0,00		0,63		0,64		0
3 Ροή καυσίμου	0	0	0,47	1		0,24		0,17		0
- Σφάλμα Tt6	0	0	0	0		0		0		1
- Μετρούμενη Tt6	1	0	0	0		0		0		0
4 Ρυθμιστής στροφών	0	0	0,34	0,36		0,17		0,12		0
5 Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0,16	0,26		0,34		0,38		0
6 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0,01	0,00		0,21		1		0
7 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	1	0,88		0,03		0,02		0
- Ολοκληρωτική μέτρηση Tt6	0	1	0	0		0		0		0

Όπως φαίνεται, ο ρυθμός 2-3 μπορεί να ονομαστεί ρυθμός καυσίμου, ο 4-5 ρυθμός γεννήτριας και ο 6-7 ρυθμός αεριογόνου.

Στον Πίν. 4.25 παρατίθενται οι συντελεστές συμμετοχής κάθε μεταβλητής κατάστασης σε κάθε ιδιοτιμή του συστήματος με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Ο ταλαντωτικός ρυθμός 1-2 θα μπορούσε να ονομαστεί ρυθμός συστήματος καυσίμου. Είναι αξιοπρόσεκτο πως και με αυτό τον κλάδο ενεργοποιημένο, ταλάντωση προκαλεί το σύστημα καυσίμου. Φαίνεται επίσης πως η μηδενική ιδιοτιμή εξαρτάται μόνο (και απόλυτα) από το σφάλμα της θερμοκρασίας καυσαερίων του στροβίλου ΧΠ, δηλαδή από το σήμα που τελικά θα καθορίσει την έγχυση καυσίμου.

Πίνακας 4.25: Συντελεστές συμμετοχής κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης

Ιδιοτιμές	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7
	-10,000	0,000	-5,000	-10,964	$\pm 2,072$	-4,742	-0,070	-0,294	-0,934	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής									
- Στροφές γεννήτριας	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1 Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0,01	0,05	0,01	1	0,62	0	0
2 Ροή καυσίμου	0	0	0	1	0,14	0,00	0,02	0,04	0	0
3 Σφάλμα Τt6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4 Μετρούμενη Τt6	0	0	0	0,03	0,00	0,01	0,57	1	0	0
- Ρυθμιστής στροφών	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0	0,02	1	0,00	0,06	0,14	0	0
6 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	0,94	0,02	0,00	0,00	0,00	0	0
7 Ολοκληρωτική μέτρηση Τt6	0	0	0	0,00	0,00	1	0,02	0,01	0	0

Αναλυτικότερα θα διερευνηθεί μόνο ο ρυθμός 4-5 του Πίν. 4.22, ο οποίος έχει τον μικρότερο συντελεστή απόσβεσης και είναι αυτός που κατά κύριο λόγο εμφανίζεται στις αποκρίσεις.

4.4.3.3 Ιδιοδιανύσματα

Στον Πίν. 4.26 αναλύεται ο ρυθμός 4-5 του Πίν. 4.22, ο οποίος παρουσιάζει και το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Πίνακας 4.26: Ιδιοδιανύσματα ρυθμού 4-5 ($-0,376 \pm j1,617$): γεννήτριας

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Στροφές γεννήτριας	0,02	-170,5	32,16	32,2	1	0
2	Στροφές αεριογόνου	0,08	-120,2	5,22	5,2	0,63	156,7
3	Ροή καυσίμου	0,27	-19,7	0,56	0,6	0,24	-146,5
4	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,11	0	0,17	-113
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,16	-67,4	1,29	1,3	0,34	122,4
6	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,25	-17,1	0,54	0,5	0,21	-80,9
7	Βαλβίδα καυσίμου	0,29	17,6	0,07	0,1	0,03	-104,5

Όπως και προηγουμένως, το μεγαλύτερο στοιχείο αντιστοιχεί στην μεταβλητή κατάσταση που περιγράφει τις στροφές της γεννήτριας. Από τις γωνίες των αριστερών ιδιοδιανυσμάτων φαίνε-

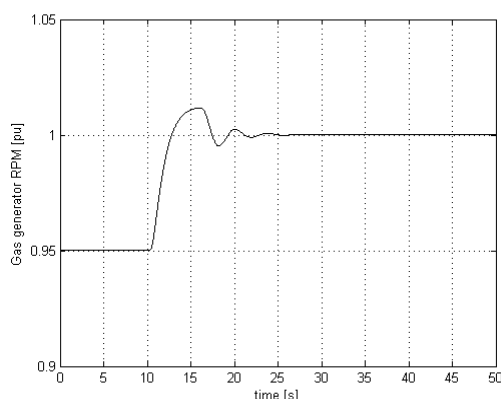
ται πως η αεριογόνος καθορίζει τον ρυθμό προπορευόμενη περίπου 107 μοίρες από τις ταλαντώσεις της γεννήτριας. Αντίθετα η ισχύς της γεννήτριας είναι σχεδόν συμφασική με τις στροφές της. Από τις γωνίες των δεξιών ιδιοδιανυσμάτων φαίνεται πως στον ρυθμό εμφανίζεται προπορευόμενη κατά 50 περίπου μοίρες η μεταβλητή κατάστασης που περιγράφει τις στροφές της αεριογόνου από τις στροφές της γεννήτριας και κατά 100 περίπου μοίρες η ισχύς της γεννήτριας.

4.4.4 Αποκρίσεις

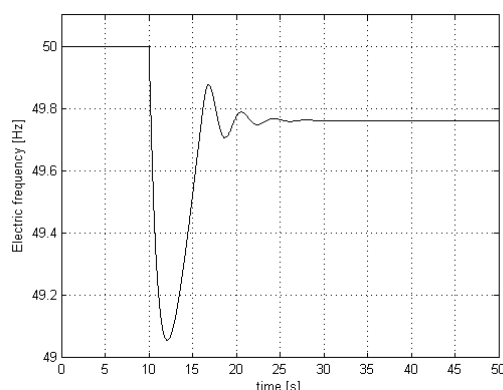
Οι προσομοιώσεις που έγιναν σε αυτό το μοντέλο αφορούν κυρίως την συμπεριφορά της αεριογόνου, οπότε προσομοιώθηκαν περισσότερες διαταραχές, από τις αποκρίσεις των οποίων όμως παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα που αφορούν την αεριογόνο και την συχνότητα εξόδου του συστήματος. Οι μεταβάσεις αφορούν αρχικό και τελικό επίπεδο ισχύος, σε ανά μονάδα τιμές.

4.4.4.1 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,9 σε 1 αμ

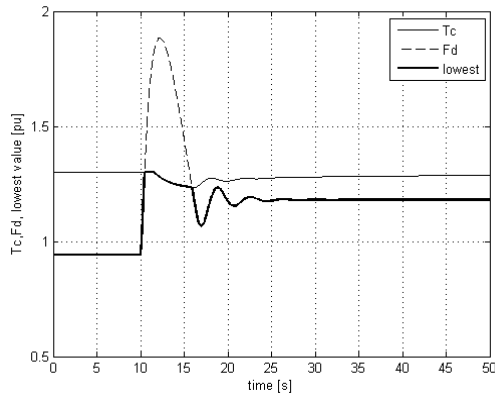
Αυτή η μεταβολή, στην συγκεκριμένη προσομοίωση είναι η πιο χαρακτηριστική. Στο Σχ. 4.16 φαίνεται πως ακόμη και χωρίς έλεγχο πτερυγίων η ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου μετά από μια ταλάντωση διάρκειας 15 s καταλήγει στην ονομαστική της ταχύτητα περιστροφής.



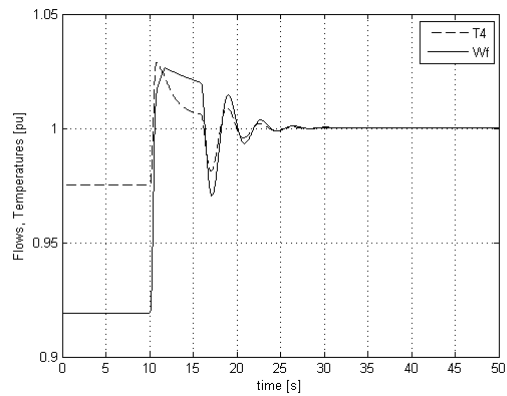
Σχήμα 4.16: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου



Σχήμα 4.17: Ηλεκτρική συχνότητα



Σχήμα 4.18: Σήματα ροής καυσίμου



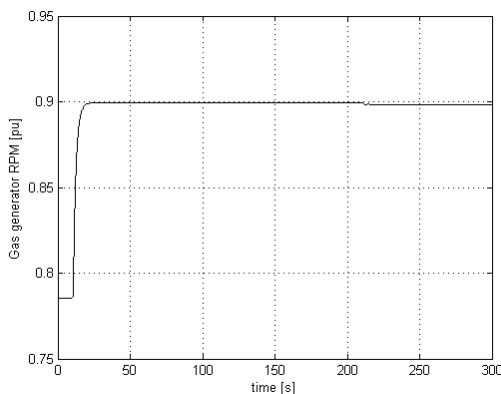
Σχήμα 4.19: Παροχή καυσίμου, T4

Η ηλεκτρική συχνότητα, όπως φαίνεται από το Σχ. 4.17, σταθεροποιείται μετά από περίπου 18 s στην ίδια τελική τιμή όπως και στην υποενότητα 4.3.5, γεγονός αναμενόμενο, αφού δεν μεταβλήθηκε κάποιο στοιχείο που να επηρεάζει τον πραγματικό στατισμό (βλ. εξ. 2.26).

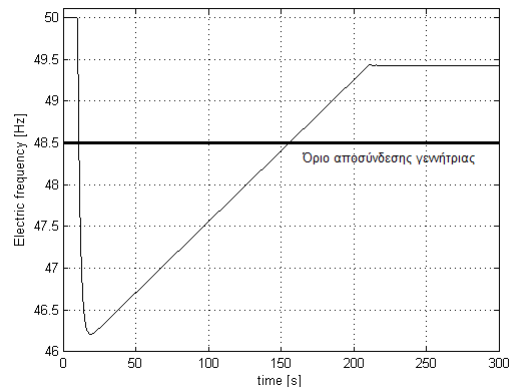
Στο Σχ. (4.20) φαίνονται τα σήματα παροχής καυσίμου στην αρχή του κύριου κλάδου του μοντέλου, ενώ στο Σχ. (4.21) φαίνεται η πραγματική παροχή καυσίμου όπως και η θερμοκρασία των καυσαερίων του θαλάμου καύσης, T4, σε ανά μονάδα τιμές. Είναι όμοια με τα αντίστοιχα της υποενότητας 4.3.5, τα Σχ. 4.7 και 4.9 αντίστοιχα.

4.4.4.2 Βηματική αύξηση φορτίου από 0,6 σε 0,8 αμ

Από το Σχ. 4.21 φαίνεται πως η αύξηση του φορτίου κατά 0,2 αμ, πηγαίνοντας από το 60% στο 80% της ονομαστικής ικανότητας της μονάδας, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες. Η μέγιστη βύθιση της συχνότητας φτάνει τα 46,21 Hz ενώ επιτυγχάνει την τελική της τιμή (49,43 Hz) μετά από 3,5 λεπτά. Ενώ η μετάβαση αυτή δεν μπορεί να γίνει ανεκτή από το δίκτυο, η ταχύτητα περιστροφής της αεριογόνου, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.20 φαίνεται πως και πάλι δεν καταρρέει αλλά σταθεροποιείται, χωρίς ελεγκτή.



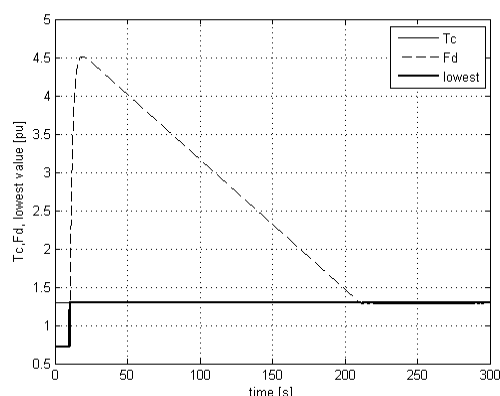
Σχήμα 4.20: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου



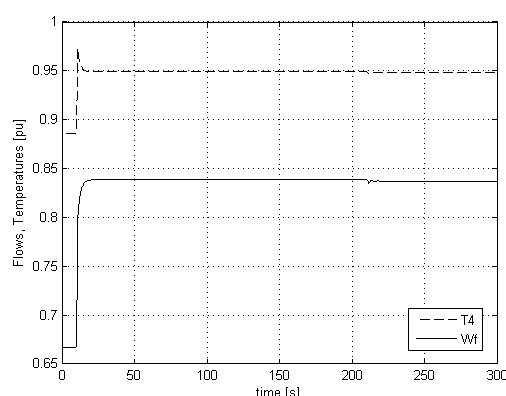
Σχήμα 4.21: Ηλεκτρική συχνότητα

Από το Σχ. 4.22 ερμηνεύεται η συμπεριφορά της αεριογόνου. Στο Σχ. 4.22 απεικονίζονται τα σήματα παροχής καυσίμου από κάθε κλάδο ελέγχου (με συνεχή γραμμή το σήμα από τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης, με διακεκομμένη το σήμα από τον κλάδο ελέγχου στροφών και με έντονη γραμμή το κάθε φορά μικρότερο). Ενώ η διαταραχή είναι τόσο μεγάλη ώστε κανονικά να απαιτούνταν 4,5 φορές το ονομαστικό καύσιμο, η παροχή του διατηρείται σταθερή έως τη χρονική στιγμή $t = 230$ s, λόγω της επέμβασης του περιοριστή (βλ. και Σχ. 3.17). Επομένως η ταχύτητα της αεριογόνου παραμένει σταθερή αφού παρέχεται σταθερή ισχύς στο σύστημα η οποία, καθώς η αεριογόνος (και ειδικά ο συμπιεστής) περιστρέφονται ανεξάρτητα από τη γεννήτρια, επαρκεί ώστε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα να αποσοβήσει την διαταραχή. Κατά τη χρονική στιγμή $t = 230$ s ενεργοποιείται ξανά ο κλάδος ελέγχου στροφών, γι' αυτό και η συχνότητα της τάσης εξόδου διατηρείται, πλέον, στα 49,42 Hz.

Στο Σχ. 4.23 παρουσιάζονται η πραγματική παροχή καυσίμου και η θερμοκρασία των καυσαερίων θαλάμου καύσης, σε ανά μονάδα τιμές. Φαίνεται πως το καύσιμο έχει σταθερή τιμή, 0,837 αμ, επομένως επιβάλλει σταθερή τιμή και στην T_4 , 0,949 αμ, αφού το άνοιγμα των πτερυγίων δεν μεταβάλλεται.



Σχήμα 4.22: Σήματα καυσίμου

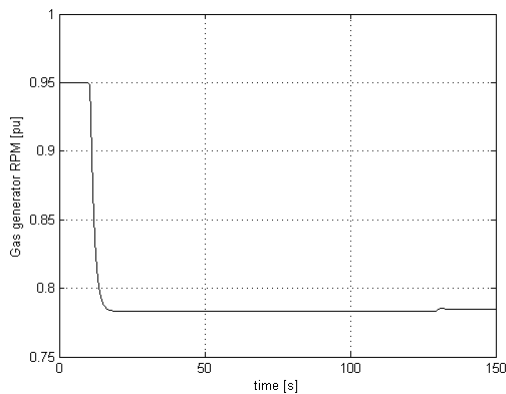


Σχήμα 4.23: Παροχή καυσίμου, T_4

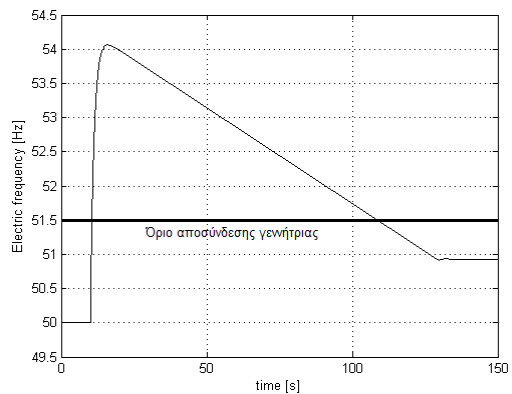
Η ελάχιστη αλλαγή στην ταχύτητα της αεριογόνου, όταν $t = 230$ s οφείλεται ακριβώς στην μετάβαση από το σήμα του ενός κλάδου στο σήμα του άλλου. Φαίνεται πως παρά την απαίτηση του φορτίου, η ταχύτητα της αεριογόνου ποτέ δεν φτάνει την τιμή 0,9 αμ αλλά παραμένει σταθερή, με ενδιάμεση τιμή 0,898 και τελική 0,897 αμ.

Η μεταβολή του φορτίου κατά 30% βηματικά, όπως είναι αναμενόμενο από την προηγούμενη παράγραφο, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από το σύστημα καθώς υπερβαίνονται πάλι τα όρια της ηλεκτρικής συχνότητας της γεννήτριας. Η ταχύτητα της αεριογόνου όμως καταλήγει σε σταθερή τιμή, 0,785 αμ.

4.4.4.3 Βηματική μείωση φορτίου από 0,9 σε 0,6 αμ

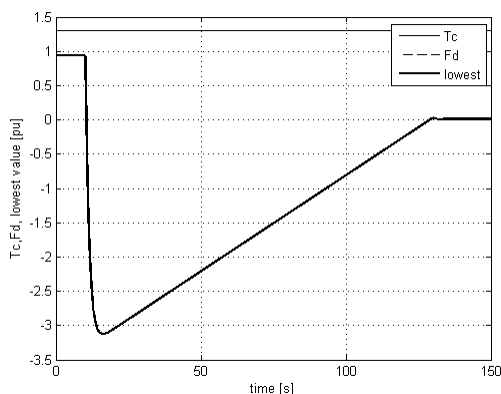


Σχήμα 4.24: Ταχύτητα περιστροφής αεριογόνου

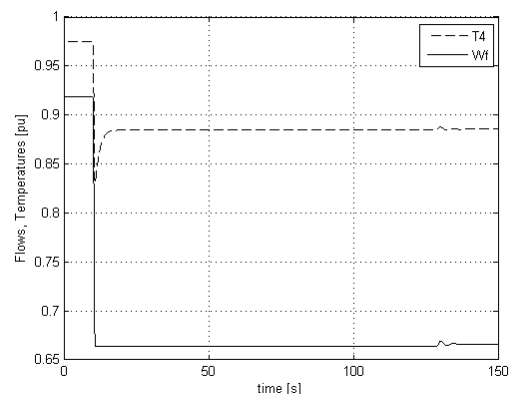


Σχήμα 4.25: Ηλεκτρική συχνότητα

Η τελική συχνότητα είναι 50,93 Hz, όσο επιτρέπει ο στατισμός του συστήματος, αλλά η μέγιστη τιμή της φτάνει τα 54,27 Hz, τιμή απαγορευτική σε πραγματικές συνθήκες. Το μεταβατικό φαινόμενο απαλείφεται σε αυτή την προσομοίωση σε περίπου 1,5 min.



Σχήμα 4.26: Σήματα καυσίμου



Σχήμα 4.27: Παροχή καυσίμου, T_4

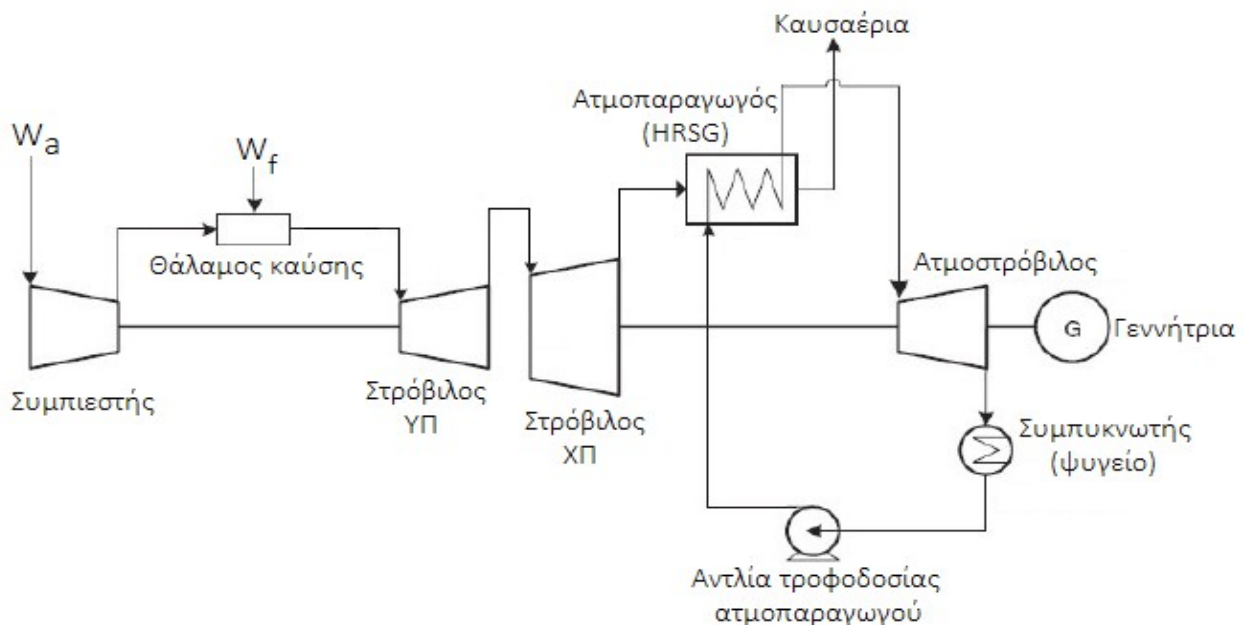
Το Σχ. 4.26 απεικονίζει τα σήματα καυσίμου ενώ το Σχ. 4.27 δείχνει την πραγματική παροχή καυσίμου και την θερμοκρασία των καυσαερίων του θαλάμου καύσης σε ανά μονάδα τιμές. Εφ' όσον η μετάβαση είναι προς μικρότερο φορτίο, όπως είναι προφανές ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης δεν εμπλέκεται. Ο περιοριστής μετά τον επιλογέα ελάχιστης τιμής θα δώσει $F_c = 0$, φαίνεται όμως ότι αυτό δεν ισχύει λόγω της διάταξης εξασφάλισης ελάχιστης παροχής καυσίμου και της διάταξης αρχικοποίησης του βρόχου ανάδρασης του συστήματος καυσίμου. (βλ. Σχ. 3.17). Στο Σχ. 4.27 φαίνεται η πραγματική παροχή καυσίμου, η οποία είναι 0,666 αμ, ενώ η θερμοκρασία των καυσαερίων του θαλάμου καύσης έχει τιμή 0,886 αμ. Η τελική ταχύτητα της αεριογόνου είναι 0,784 αμ, ενώ πριν την μετάβαση είχε επίσης σταθερή ταχύτητα, 0,783 αμ.

5ο Κεφάλαιο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Η ως τώρα μελέτη αποσκοπούσε στην διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων ώστε να οικοδομηθεί αναπαράσταση σταθμού συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων. Θα αξιοποιηθούν τα συμπεράσματα από τη μελέτη της συμπεριφοράς της αεριογόνου και του ελέγχου του αέρα, καθώς και τα συμπεράσματα από την μέθοδο ελέγχου του συστήματος καυσίμου με στόχο την γρηγορότερη απόκρισή του. Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί όμως θα διαφέρει από τα αναφερόμενα στην βιβλιογραφία μοντέλα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, καθώς σε αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων ο έλεγχος του αέρα, όπως παρουσιάστηκε στα Κεφ. 3 και 4 δεν μπορεί να μεταβάλλει την παροχή του αέρα αλλά μόνο την ταχύτητα της αεριογόνου, επομένως τέτοιου τύπου έλεγχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την ρύθμιση της ταχύτητας της αεριογόνου και όχι για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

Ως συνιστώσες του συστήματος θα θεωρηθούν ο αεριοστρόβιλος Siemens SGT 700 που μελετήθηκε στο Κεφ. 4 και ο ατμοστρόβιλος Siemens SST 150, για τον οποίο θα παρατεθούν στοιχεία σε αυτό το κεφάλαιο. Το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας συνδυασμένου κύκλου

Το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο ακολουθεί την εργασία [2]. Εδώ θα παρατεθούν μόνο όσα στοιχεία θεωρηθούν καινούρια.

5.2 Εξισώσεις

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τον συμπιεστή, τον θάλαμο καύσης και τους στροβίλους είναι οι ακόλουθες, ανά συνιστώσα της μηχανής:

5.2.1 Συμπιεστής

Ισχύει η (4.5), η οποία έχει παρουσιαστεί στο Κεφ. 4:

$$T_{t3} = T_{t2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C^{\frac{1}{\gamma}} \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{R\alpha}{C_{PC}} - 1}}{\eta_C} \right) \quad (5.1)$$

Η ανά μονάδα παροχή αέρα δίνεται από την (4.6)

$$W_a \equiv \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} = g N_1 \quad (5.2)$$

ενώ ο πραγματικός λόγος πίεσης δίνεται από την (4.7)

$$\pi_C = \pi_C^o W_a \quad (5.3)$$

Η ισχύς, τέλος, που καταναλώνει ο συμπιεστής, δίνεται από τη σχέση (4.8):

$$P_C = W_a \dot{m}_a^o C_{PC} (T_{t3} - T_{t2}) \quad (5.4)$$

5.2.2 Θάλαμος καύσης

Ισχύει η (4.9) η οποία περιγράφει το ισοζύγιο ισχύος στον θάλαμο καύσης. Έχει αναλυθεί στην ενότητα 1.5 και παρουσιάζεται ξανά, σε μορφή ισοζυγίου ισχύος εισόδου – εξόδου:

$$(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PTI} T_{t4} = \dot{m}_a C_{PC} T_{t3} + \dot{m}_f q_f \quad (5.5)$$

όπου για τις παροχές αέρα, καυσίμου και καυσαερίων ισχύει προφανώς η (4.1):

$$\dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_{ex} \quad (5.6)$$

5.2.3 Στρόβιλος ΥΠ

Ισχύει η (4.11) η οποία παρουσιάστηκε στην υποενότητα 4.1.4:

$$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{T1} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T1}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right] \right) \quad (5.7)$$

Η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος ΥΠ σε συνθήκες ισοροπίας καταναλώνεται από τον συμπιεστή. Το ισοζύγιο ισχύος δίνεται από την (4.13) και είναι, προφανώς:

$$P_C = P_{T1} \quad (5.8)$$

Η (5.8) ισχύει τόσο σε φυσικό σύστημα μονάδων όσο και σε ανά μονάδα σύστημα επομένως δεν απεικονίζεται άνω δείκτης [kW]. Η (5.8) συνεπάγεται ότι

$$\frac{\dot{m}_a C_{PC} (T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1} (T_{i4} - T_{i5}) \eta_{\mu T1} \quad (5.9)$$

5.2.4 Στρόβιλος ΧΠ

Ισχύει η (4.15) η οποία παρουσιάστηκε στην υποενότητα 4.1.5:

$$T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right] \right) \quad (5.10)$$

Για τους λόγους συμπίεσης / αποτόνωσης (ονομαστικούς και λειτουργικούς) ισχύει η (4.16)

$$\pi_C = \pi_{T1} \pi_{T2} \quad (5.11)$$

όπου για τον λόγο αποτόνωσης του στροβίλου ΧΠ ισχύει η (4.17)

$$\pi_{T2} = \pi_{T2}^o W_{ex} = \pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \quad (5.12)$$

Ως W_{ex} συμβολίζεται η ανά μονάδα παροχή καυσαερίων, για την οποία ισχύει η (4.4)

$$W_{ex} = \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \quad (5.13)$$

Η ισχύς εξόδου, η οποία αθροίζεται με την ισχύ του αμοστροβίλου, δίνεται από την (4.18) και είναι, σε φυσικές μονάδες (kW), ίση με

$$P_{GT}^{[kW]} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT2} (T_{15} - T_{16}) \eta_{\mu T2} \quad (5.14)$$

5.2.5 Ατμοπαραγωγός - Ατμοστρόβιλος

Ο ατμοστρόβιλος εμφανίζεται σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου, όπου μετά τον αεριοστρόβιλο ακολουθεί ανακομιστής θερμότητας – ατμοπαραγωγός και αυτόν ακολουθεί ατμοστρόβιλος. Οι υπολογισμοί της θερμοϋδραυλικής μεταβολής στον ατμοστρόβιλο γίνονται αρκετά αδρά, καθώς για να γίνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτούνται πίνακες μεταβολής των θερμοδυναμικών καταστάσεων του νερού (ή ισοδύναμα, τα διαγράμματα Mollier).

Καθώς η χρήση πινάκων νερού (ή χάρτη Mollier) απαιτεί εξειδικευμένο λογισμικό, με βάση τις απλοποιητικές παραδοχές που έγιναν στην ενότητα 1.6 προκύπτει ότι η ισχύς που αποδίδει ο ατμοστρόβιλος (σε kW) θα είναι

$$P_{ST}^{[kW]} = \eta_{\theta,ST} \eta_{HRSG} (\dot{m}_{ex}^o W_{ex}) C_{PT2} T_{16} \quad (5.15)$$

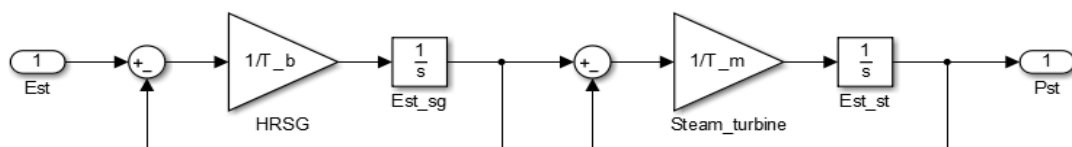
όπου οι δύο βαθμοί απόδοσης αναφέρονται στον ατμοστρόβιλο και στον ατμοπαραγωγό αντίστοιχα ενώ όλα τα άλλα μεγέθη στον αεριοστρόβιλο. Ως $\eta_{\theta,ST}$ ονομάστηκε ο βαθμός απόδοσης όλου του κύκλου ατμού ο οποίος θεωρείται σταθερός, ενώ ως η_{HRSG} ονομάστηκε ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται στα κατάντη της ροής των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου.

Η ολική ισχύς της διάταξης θα είναι, προφανώς, το άθροισμα της ισχύος που παράγεται στον αεριοστρόβιλο και της ισχύος που παράγεται στον ατμοστρόβιλο, άρα ισχύει πως

$$P_e = P_{ST} + P_{GT} \quad (5.16)$$

όπου η (5.16) ισχύει τόσο σε σύστημα φυσικών μονάδων όσο και σε σύστημα ανά μονάδα (γι' αυτό δεν απεικονίζονται οι άνω δείκτες [kW]).

Ένα λεπτομερές μοντέλο ατμοπαραγωγού δίνεται στην αναφορά [8]. Στην παρούσα εργασία ο ανακομιστής θερμότητας, HRSG (Heat Recovery Steam Generator) [17, 18] θα αναπαρασταθεί με μία σταθερά χρόνου μεγάλης τιμής [23, 24], σε σειρά με τον ατμοστρόβιλο, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.2.



Σχήμα 5.2: Σταθερές χρόνου ανακομιστή θερμότητας και ατμοστρόβιλου

Είσοδος του διαγράμματος είναι η ισχύς που προκύπτει από τις αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις και έξοδος του η ισχύς όπως προκύπτει από την συμπερίληψη των όρων που αναπαριστούν την δυναμική συμπεριφορά του ατμοπαραγωγού και του ατμοστροβίλου.

5.2.6 Κανονικοποίηση μεγεθών

Η κανονικοποίηση όλων των μεγεθών ισχύος γίνεται με βάση την ισχύ της όλης της μονάδας (αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου) και όχι του κάθε στροβίλου προς την ίδια ισχύ. Έτσι, σύμφωνα με την υποενότητα 4.1.1 και την (4.2) θα ισχύει πως:

$$P_i = \frac{P_i^{[kW]}}{P_{\text{Ονομ. Συστ.}}^{[kW]}} \quad (5.17)$$

όπου

$$P_{\text{Ονομ. Συστ.}}^{[kW]} = (\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o) [C_{PT2}(T_{i5}^o - T_{i6}^o)\eta_{\mu T2} + \eta_{\theta, ST} \eta_{HRSG} C_{PT2} T_{i6}^o] \quad (5.18)$$

με τους άνω δείκτες o να υποδηλώνουν ονομαστικά μεγέθη.

Οι θερμοκρασίες κανονικοποιούνται σύμφωνα με την (3.19):

$$T_{ii}^{pu} \equiv T_i = \frac{T_{ii}^{[K]}}{T_{ii}^{\text{ονομ.}[K]}}, \quad i=3,4,5,6 \quad (5.19)$$

Για τις παροχές μάζας, όπως αναφέρθηκε, ισχύει η (4.4):

$$W_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o}, \quad W_f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_f^o}, \quad W_{ex} = \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o} \quad (5.20)$$

5.2.7 Θερμοχωρητικότητες αερίων

Χρησιμοποιήθηκαν και εδώ οι σχέσεις (4.20), προσεγγιστικού υπολογισμού των ειδικών θερμοχωρητικότητας:

$$C_p = 1.018,9 - 0,13784 T + 1,9843 \cdot 10^{-4} T^2 + 4,2399 \cdot 10^{-7} T^3 - 3,7632 \cdot 10^{-10} T^4, \quad 200\text{K} \leq T \leq 800\text{K} \quad (5.21)$$

$$C_p = 798,65 + 0,5339 T - 2,2882 \cdot 10^{-4} T^2 + 3,7421 \cdot 10^{-8} T^3, \quad 800\text{K} < T \leq 2.200\text{K}$$

Οι μέσες θερμοχωρητικότητες παρατίθενται στον Πίν. 5.2, οι οποίες προέκυψαν θεωρώντας μια μέση τιμή θερμοκρασίας σε κάθε συνιστώσα του αεριοστροβίλου, όπως στην υποενότητα 4.1.6.

5.3 Αλγεβρικά δεδομένα προσομοιώσεων

5.3.1 Ονομαστικές τιμές

Εδώ ακολουθήθηκε ο συλλογισμός της παρ. 4.2.1.1, καθώς πρόκειται για το ίδιο σύστημα, ο οποίος συμπυκνώνεται στον Πίν. 4.3, ενώ στον Πίν. 4.4 συνοψίζονται οι ονομαστικές αριθμητικές τιμές των θερμοδυναμικών μεγεθών (αμφότεροι δεν επαναλαμβάνονται καθώς παραμένουν ίδιοι και για την αναπαράσταση αυτού του κεφαλαίου). Θεωρώντας πως τα ονομαστικά στοιχεία του SGT 700 έχουν προσδιοριστεί στην υποενότητα 4.2.1, δεχτήκαμε ως ονομαστική παραγωγή του αεριοστροβίλου την τιμή που προέκυψε από την (4.19), ενώ η ονομαστική παραγωγή του ατμοστροβίλου λήφθηκε από την βιβλιογραφία [28] ίση με 20 MW. Οι ονομαστικές τιμές λειτουργίας της διάταξης συνδυασμένου κύκλου συνοψίζονται στον Πίν. 5.2.

5.3.2 Λειτουργικές τιμές

Τα μεγέθη που πρέπει να προσδιοριστούν σε αυτή την προσομοίωση είναι οχτώ: τέσσερις θερμοκρασίες, δύο παροχές μάζας και δύο ισχύεις. Παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 5.1.

Πίνακας 5.1: Άγνωστοι συστήματος συνδυασμένου κύκλου

A/A	Ονομασία	Σύμβολο	A/A	Ονομασία	Σύμβολο
1	Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή	T_{t3}	5	Παροχή αέρα	\dot{m}_a
2	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_{t4}	6	Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f
3	Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_{t5}	7	Ισχύς αεριοστροβίλου	P_{GT}
4	Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΥΠ	T_{t6}	8	Ισχύς ατμοστροβίλου	P_{ST}

Οι εξισώσεις επίλυσης του συστήματος όμως είναι επίσης οχτώ, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 5.3. Είναι εμφανές πως δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ad hoc ένα από αυτά τα μεγέθη, καθώς το σύστημα είναι πλήρως προσδιορισμένο. Άρα η απαίτηση για σταθερή θερμοκρασία καυσαερίων δεν μπορεί να ικανοποιηθεί σε διάταξη συνδυασμένου κύκλου. Όπως έχει φανεί από τις προηγούμενες προσομοιώσεις, η μεταβολή της παροχής του αέρα (μέσω του ελέγχου του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων εισόδου) μπορεί μόνο να επηρεάσει την ταχύτητα της αεριογόνου σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να έχει μικρότερο εύρος διακύμανσης. Αυτό οφείλεται στο ότι το άνοιγμα των πτερυγίων, g , και η ταχύτητα της αεριογόνου, N_I , συσχετίζονται σε μία μόνο εξίσωση, την (5.2), επομένως είτε θα καθοριστούν με δεύτερη σχετική εξίσωση είτε θα διατηρήσουν σχετική ελευθερία, με το ένα μέγεθος να επηρεάζει μόνο το άλλο.

Πίνακας 5.2: Ονομαστικές τιμές λειτουργίας διάταξης συνδυασμένου κύκλου

Όνομα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα	Όνομα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{12}	288,64	K	Λόγος συμπίεσης	π_c	18,5	-
Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή	T_{13}	703,15	K	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΥΠ	π_{T1}	3,93	-
Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_{14}	1461,15	K	Λόγος αποτόνωσης στροβίλου ΧΠ	π_{T2}	4,70	-
Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_{15}	1103,80	K	Ροπή αδράνειας αεριογόνου	J_{gg}	60,8	kg·m ²
Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου ΥΠ	T_{16}	806,15	K	Ροπή αδράνειας στροβίλου ισχύος (ΧΠ)	J_{gt}	4261,7	kg·m ²
Θερμοκρασία ατμών εισόδου ατμοστροβίλου	T_{17}	723,15	K	Ροπή αδράνειας ατμοστροβίλου	J_{st}	8250	kg·m ²
Παροχή αέρα	\dot{m}_a	91,8	kg/s	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα αέρα συμπιεστή	C_{PC}	1,0291	-
Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f	2,2	kg/s	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα αέρα στροβίλου ΥΠ	C_{PT1}	1,1745	-
Παροχή καυσαερίων	\dot{m}_{ex}	94	kg/s	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα αέρα στροβίλου ΧΠ	C_{PT2}	1,1211	-
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	η_c	88	%	Σταθερά ατμοσφαιρικού αέρα	R_a	0,287	kJ / (K·kg)
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΥΠ	η_{T1}	86	%				
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	η_{T2}	82,4	%	Βαθμός απόδοσης ατμοπαραγωγού (HRSG)	η_{HRSG}	80	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	$\eta_{\mu c}$	99	%	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΥΠ	$\eta_{\mu T2}$	99	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου ΧΠ	$\eta_{\mu T1}$	99	%	Μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{\mu G}$	99	%
Ονομαστική ισχύς αεριοστροβίλου	P_{GT}	30.738	kW	Ονομαστική ισχύς ατμοστροβίλου	P_{ST}	20.000	kW

Στα συστήματα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου η ταχύτητα του συμπιεστή είναι κλειδωμένη από το δίκτυο επομένως ο έλεγχος του αέρα δεν επηρεάζει την ταχύτητά του, άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταβάλλει τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Σε διάτα-

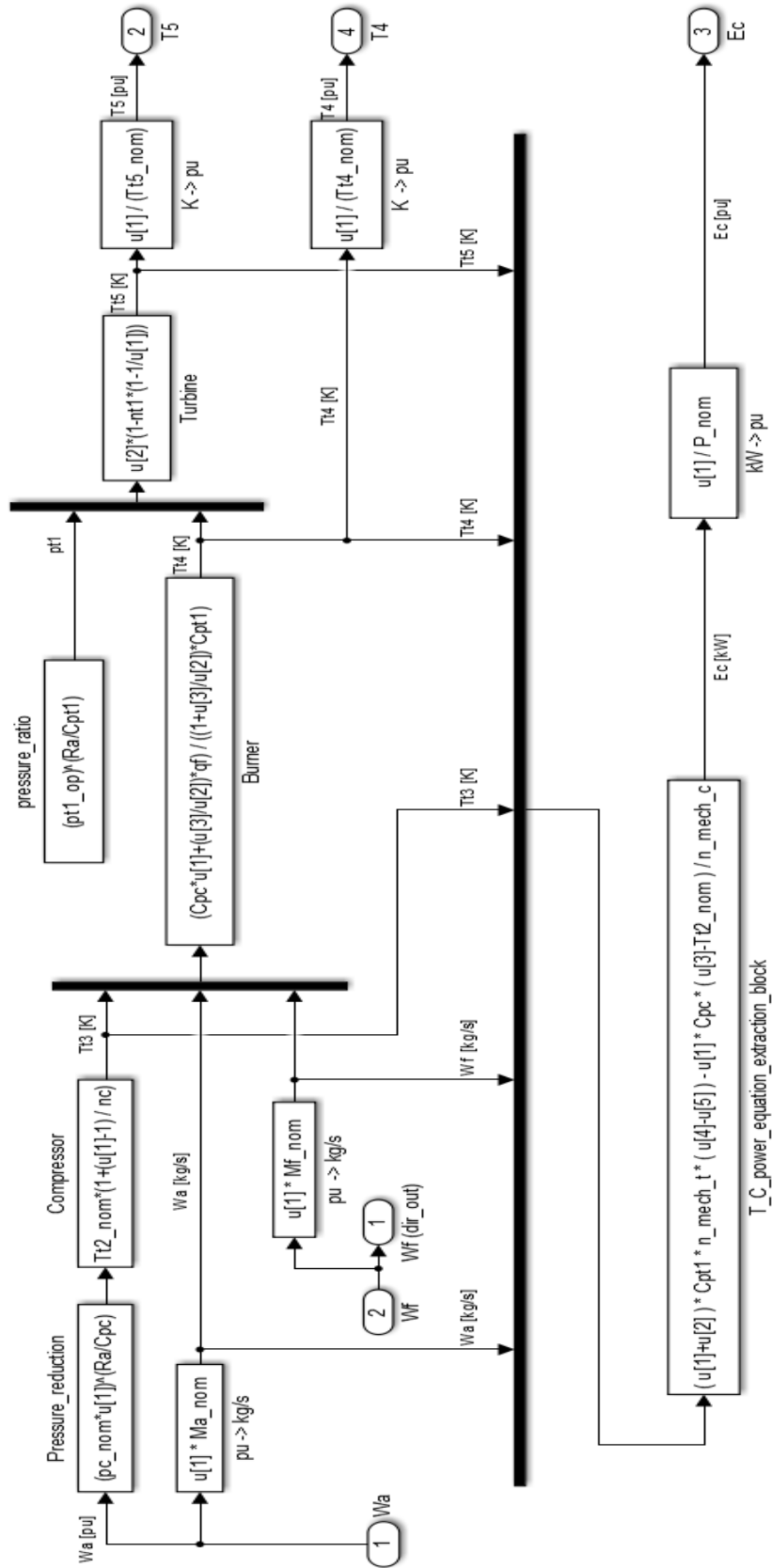
ξη διδύμων ατράκτων όμως, μεταβολή της παροχής του αέρα θα μεταβάλλει την ταχύτητα της αεριογόνου καθώς η τελευταία αποτελεί ευσταθές σύστημα, επομένως θα ισορροπήσει σε κάθε επίπεδο παροχής αέρα. Εάν η παροχή αυξηθεί (ανοίγοντας τα πτερύγια) ο συμπιεστής θα δεχτεί περισσότερο αέρα οπότε θα αρχίσει να καταναλώνει περισσότερη ισχύ, άρα θα μειώσει τις στροφές του, επομένως παρ' ότι άνοιξαν τα πτερύγια, η παροχή, λόγω της (5.2) θα παραμείνει σταθερή. Το αντίστροφο θα συμβεί εάν τα πτερύγια κλείσουν. Ο συμπιεστής θα αυξήσει ταχύτητα οπότε και πάλι η παροχή θα μείνει ίδια. Θεωρήθηκε, ως γενικότερη περίπτωση, πως τα πτερύγια θα λειτουργούν στο μέγιστο άνοιγμά τους και η θερμοκρασία των καυσαερίων θα μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο του αεριοστροβίλου.

Πίνακας 5.3: Εξισώσεις προσομοίωσης συστήματος αεριοστροβίλου - ατμοστροβίλου

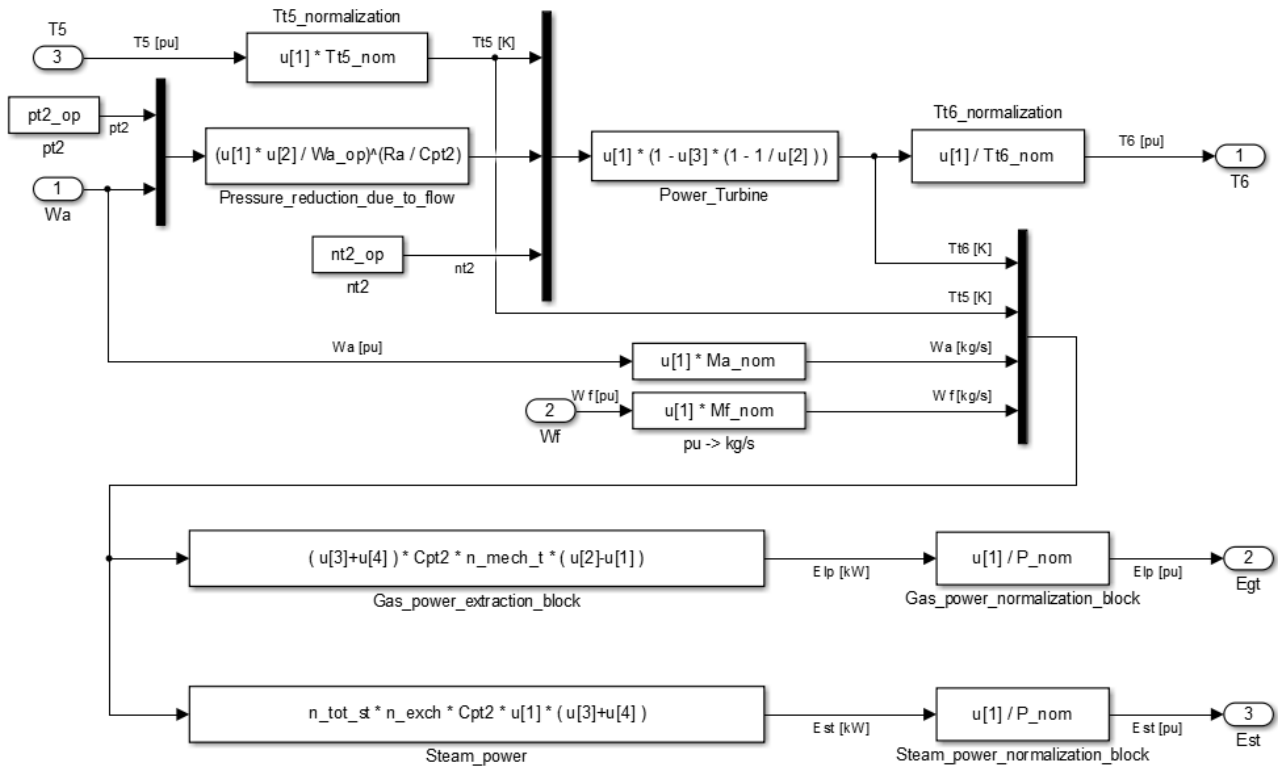
A/A	Εξίσωση	Αναλυτική έκφραση	Προέλευση
1	(5.1)	$T_{i3} = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C W_a \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}}} - 1}{\eta_C} \right)$	Συμπιεστής
2	(5.5)	$(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1} T_{i4} = \dot{m}_a C_{PC} T_{i3} + \dot{m}_f q_f$	Θάλαμος καύσης
3	(5.7)	$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{T1} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T1}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right] \right)$	Στρόβιλος ΥΠ
4	(5.10)	$T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{T2} W_a} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right] \right)$	Στρόβιλος ΧΠ
5	(5.8)	$\frac{\dot{m}_a C_{PC} (T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1} (T_{i4} - T_{i5}) \eta_{\mu T1}$	Ισορροπία συμπιεστή – στροβίλου ΥΠ
6	(5.11)	$P_{GT}^{[kW]} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT2} (T_{i5} - T_{i6}) \eta_{\mu T2}$	Ισχύς αεριοστροβίλου
7	(5.14)	$P_{ST}^{[kW]} = \eta_{\theta, ST} \eta_{HRSG} (\dot{m}_{ex}^o W_{ex}) C_{PT2} T_{i6}$	Ισχύς ατμοστροβίλου
8	(5.16)	$P_e = P_{ST} + P_{GT}$	Ισοζύγιο ισχύων

5.3.3 Αλγεβρικές εξισώσεις στο Simulink

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται οι βαθμίδες αλγεβρικών εξισώσεων στο Simulink. Είναι αυτές που παρουσιάστηκαν συνοπτικά στον Πίν. 5.3. Η βαθμίδα που αναπαριστά την αεριογόνο παρουσιάζεται στο Σχ. 5.3 και είναι ίδια με αυτή του Σχ. 4.2, ενώ η βαθμίδα του στροβίλου ισχύος παρουσιάζεται στο Σχ. 5.4 και δίνει επίσης την ισχύ του αμοπαγωγικού μέρους. Οι εξισώσεις των αλγεβρικών βαθμίδων, μαζί με τις δυναμικές εξισώσεις, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 5.4.



Σχήμα 5.3: Αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις αεριογόνου



Σχήμα 5.4: Αλγεβρικές - θερμοδυναμικές εξισώσεις στροβίλου XII (ισχύος)

5.4 Σταθερές συστήματος

Οι σταθερές ανηγμένης αδράνειας H των ατράκτων έχουν μεταβληθεί καθώς άλλαξε η συνολική ισχύς του συστήματος, μετά την προσθήκη του ζεύγος αμοπαγωγού – αμοστροβίλου. Υπάρχουν 12 σταθερές χρόνου. Η T_{cd} θεωρήθηκε δύο φορές καθώς εμφανίζεται τόσο στην αεριογόνο όσο και στον στρόβιλο XII του αεριοστροβίλου. Οι ροπές αδράνειας των υπόλοιπων μηχανικών συνιστωσών είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στον Πίν. 4.6, επομένως για την ανηγμένη ροπή αδράνειας στην πλευρά της γεννήτριας (έξοδος κιβωτίου ταχυτήτων) θα ισχύει ότι

$$J_{γενν}^{ολικό} = J_1'' + J_2 + J_{αμ} = \frac{J_1}{a^2} + J_2 = \frac{106,3}{0,2302^2} + 4261,7 + 8250 \Rightarrow$$

$$J_{γενν}^{ολικό} = 6267,7 + 8250 = 14.518,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.22)$$

τιμή στην οποία θα πρέπει να προστεθεί και η ροπή αδράνειας του αμοστροβίλου, καθώς θεωρήθηκε πως οι δύο στρόβιλοι οδηγούν κοινή γεννήτρια. Η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της αεριογόνο είναι, σύμφωνα με την (1.40):

Πίνακας 5.4: Εξισώσεις αλγεβρικών βαθμίδων και βαθμίδων δυναμικών όρων

Βαθμίδα	Άγνωστο μέγεθος	Σύμβολο	Γνωστά μεγέθη	Εξίσωση
Αλγεβρικές εξισώσεις αεριογόνου	Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπίεστη	T_3	T_2, W_a	$T_{i3} = T_{i2} \left(1 + \frac{\left(\pi_c^o \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}} - 1}}{\eta_C} \right)$
	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_4	T_3, W_a, W_f	$T_{i4} = \frac{\dot{m}_a C_{PC} T_{i3} + \dot{m}_f q_f}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1}}$
	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΥΠ	T_5	T_4, W_a, W_f	$T_{i5} = T_{i4} \left(1 - \eta_{TI} \left(1 - \frac{1}{\pi_{TI}^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT1}}} \right)$
	Ισχύς αεριογόνου (διαφορά ισχύος συμπίεστη – στροβίλου ΥΠ)	E_C	$T_2, T_3, T_4, T_5, W_a, W_f$	$E_C = \frac{C_{PC}(T_{i3} - T_{i2})}{\eta_{\mu C}} - \eta_{\mu TI} C_{PT1}(T_{i4} - T_{i5})$
Θερμική συμπεριφορά αεριογόνου	Επιταχύνουσα ισχύς αεριογόνου	P_C	E_C	$P_C = \frac{E_C}{1 + T_{cd} s}$
Δυναμική συμπεριφορά αεριογόνου	Στροφές αεριογόνου	N_1	P_C	$N_1 = \int \frac{P_c}{2 N_1 H_1} dt$
Αλγεβρικές εξισώσεις στροβίλου ισχύος (ΧΠ)	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΧΠ	T_6	T_5, W_a, W_f	$T_{i6} = T_{i5} \left(1 - \eta_{T2} \left(1 - \frac{1}{\pi_{T2}^o \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT2}}} \right)$
	Ισχύς στροβίλου ΧΠ - γεννήτριας	E_{lp}	T_5, T_6, W_a, W_f	$E_{lp} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT2} \eta_{\mu T2} (T_{i5} - T_{i6})$
	Ισχύς ατμοπαραγωγού - ατμοστροβίλου	E_{st}	T_6, W_a, W_f	$E_{st} = \eta_{\theta, ST} \eta_{HRSG} (\dot{m}_{ex}^o W_{ex}) C_{PT2} T_{i6}$
Θερμική συμπεριφορά στροβίλου ΧΠ	Επιταχύνουσα ισχύς στροβίλου ΧΠ - γεννήτριας	P_{lp}	E_{lp}	$P_{lp} = \frac{E_{lp}}{1 + T_{cd} s}$
Θερμική συμπεριφορά ατμών	Επιταχύνουσα ισχύς ατμοστροβίλου	P_{st}	E_{st}	$P_{st} = E_{st} \frac{1}{1 + T_b s} \frac{1}{1 + T_m s}$
Δυναμική συμπεριφορά ατράκτου ισχύος	Στροφές γεννήτριας	N_2	$T_5, T_6, W_a, W_f, E_{lp}, P_e$	$N_2 = \int \frac{(P_{lp} + P_{st}) - P_e}{2 H_2} dt$

Οι δυναμικές εξισώσεις επιλύονται υπό μορφή διαγραμμάτων ροής σήματος, εκτός των αλγεβρικών βαθμίδων.

$$H_{gg} = \frac{\frac{1}{2} J_1 \omega_1^2}{P_G^o} = \frac{\frac{1}{2} J_1 \left(\frac{2\pi \cdot 9800}{60} \right)^2}{P_G^o} = \frac{0,5 \cdot 60,8 \cdot 1026,3^2}{50.738.186} = 0,6319 s \quad (5.23)$$

Επισημαίνεται και πάλι πως η κανονικοποίηση γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ εξόδου του συστήματος. Η ανηγμένη σταθερά αδράνειας της γεννήτριας είναι:

$$H_2 = H_{gt} + H_{st} = \frac{\frac{1}{2} (J_{gt} + J_{st}) (\omega_2^o)^2}{P_{T2}^o} = \frac{\frac{1}{2} (6267,7 + 8250) \left(\frac{2\pi \cdot 1500}{60} \right)^2}{P_{T2}^o} \Rightarrow \quad (5.24)$$

$$H_2 = \frac{0,5 \cdot (6267,7 + 8250) \cdot 157,08^2}{50.738.186} = 1,5260 + 2,0086 = 3,5346 s$$

Τα δεδομένα συνοψίζονται στον Πίν. 5.5.

Πίνακας 5.5: Σταθερές χρόνου

Ονομασία	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Ροπή αδράνειας αεριογόνου	H _{gg}	0,632	sec
Ροπή αδράνειας στροβίλου ισχύος και γεννήτριας	H _{pt}	1,526	sec
Ροπή αδράνειας ατμοστροβίλου	H _{st}	2,009	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικού μέρους συστήματος καυσίμου	T _v	0,05	sec
Σταθερά χρόνου ροϊκού μέρους συστήματος καυσίμου	T _f	0,4	sec
Σταθερά χρόνου θερμικών μεταβολών αεριογόνου & στροβίλου ισχύος – γεννήτριας.	T _{cd}	0,2	sec
Σταθερά χρόνου ανακομιστή θερμότητας (HRSG)	T _b	20	sec
Σταθερά χρόνου ατμοστροβίλου	T _m	5	sec
Σταθερά χρόνου ρυθμιστή στροφών	T _{gov}	0,1	sec
Σταθερά χρόνου θερμικής ασπίδας προστασίας θερμομέτρου	T _{hs}	15,0	sec
Σταθερά χρόνου απόκρισης θερμομέτρου	T _{ts}	2,5	sec
Ρυθμός ολοκλήρωσης PI ελεγκτή	T _t	0,4699	sec
Συντελεστής μείωσης παροχής καυσίμου	K ₂	0,23	pu
Ποσοστό μόνιμης παροχής καυσίμου	K ₃	0,77	pu
Ποσοστό έμμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K ₄	0,8	pu
Ποσοστό άμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K ₅	0,2	pu

5.5 Παράμετροι ελέγχου

Οι παράμετροι ελέγχου του συστήματος επιλέχθηκαν με βάση τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στις ενότητες 3.3.3 και 4.3.2. Οι μόνες δύο παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν είναι ο στατισμός και το κέρδος του κλάδου ανάδρασης του συστήματος καυσίμου. Οι παράμετροι αυτές κυμάνθηκαν στο εύρος που παρουσιάζεται στον Πίν. 5.6.

Πίνακας 5.6: Ρυθμιζόμενες παράμετροι

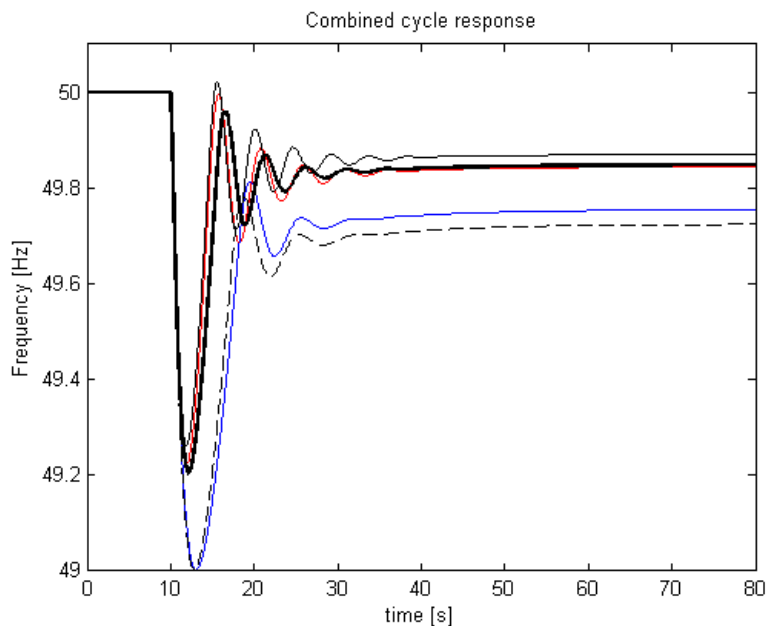
Παράμετρος	Από	Έως	Βήμα	Πλήθος δοκιμών
R	0,020	0,025	0,001	6
K _f	0,5	1,5	0,01	101

Άρα έγιναν 606 δοκιμές. Οι τελικές τιμές που προέκυψαν, πριν αξιολογηθούν κατά την επισκόπηση των αποκρίσεων που παράγουν, παρουσιάζονται στον Πίν. 5.7, ενώ οι αποκρίσεις ηλεκτρικής συχνότητας του κάθε συνδυασμού παρουσιάζονται στο Σχ. 5.5. Μεγαλύτερο μέρος αυτών παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Παράρτημα Β. Φαίνεται πως οι δύο συνδυασμοί, (3) και (5), που δίνουν τους μεγαλύτερους λόγους απόσβεσης δίνουν και το μεγαλύτερο μόνιμο σφάλμα, οπότε απορρίφθηκαν. Σε αυτό το μοντέλο επιλέχθηκε ο συνδυασμός παραμέτρων (1) του Πίν. 5.7, που δίνουν μικρή μεταβατική βύθιση και τέσσερεις ταλαντώσεις προτού ολοκληρωθεί το μεταβατικό φαινόμενο. Ο συνδυασμός (2) δίνει πέντε ταλαντώσεις και, με αυτές τις ρυθμίσεις, αργεί περισσότερο να ολοκληρωθεί το μεταβατικό φαινόμενο, παρ' ότι το σύστημα έχει μικρότερο μόνιμο σφάλμα. Από την εποπτεία των αποτελεσμάτων ο συνδυασμός (4) κρίθηκε ελαφρώς χειρότερος από τον (1) επειδή παρουσιάζει μεγαλύτερο πλάτος ταλαντώσεων.

Πίνακας 5.7: Τελικοί συνδυασμοί παραμέτρων

Σειρά επιλογής	R	K _f	Ελάχιστη συχνότητα	Τελική συχνότητα	Τυπική απόκλιση 25% – 100%	Τυπική απόκλιση 75% – 100%	ζ	Χρόνος απ εμπλοκής	Μορφή απεικόνισης
1	0,020	0,68	49,2049	49,8477	0,0108	0,0003	0,1773	15,22	Έντονη
2	0,020	0,50	49,2611	49,8699	0,0144	0,0003	0,1354	14,33	Συνεχής
3	0,025	1,04	49,0014	49,7543	0,0189	0,0005	0,2752	17,80	Μπλε
4	0,024	0,50	49,2232	49,8439	0,0137	0,0003	0,1608	14,33	Κόκκινη
5	0,030	0,94	49,0027	49,7236	0,0216	0,0006	0,2839	16,86	Διακεκομμένη

Οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος, μετά την επιλογή παραμέτρων ελέγχου, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 5.8.



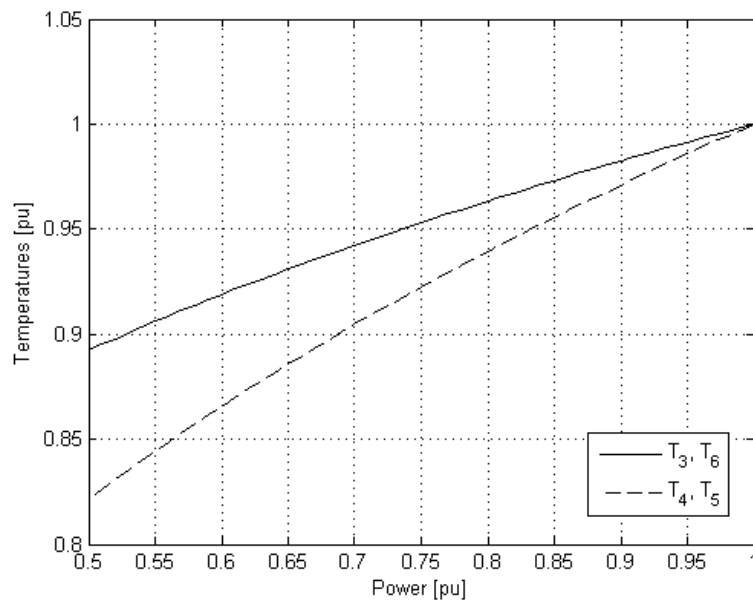
Σχήμα 5.5: Σύγκριση αποκρίσεων

Πίνακας 5.8: Παράμετροι ελέγχου

Ονομασία	Σύμβολο	Τιμή
Στατισμός	R	0,020
Κέρδος κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου	Kf	0,68
Θερμοκρασία αναφοράς της T ₁₆	Tr	1
Επαύξηση T ₁₆ (T _{off})	T _{off}	0,010
Μέγιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc _{max}	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω θερμικής υπερφόρτισης	Tc _{min}	0
Μέγιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd _{max}	1,3
Ελάχιστο σήμα λόγω υστέρησης στροφών	Fd _{min}	0
Κέρδος αναλογικού μέρους PI ελεγκτή θερμοκρασίας	T _{atc}	2,3

5.6 Διαγράμματα μόνιμης κατάστασης

Τα διαγράμματα μόνιμης κατάστασης είναι τρία, τα οποία περιγράφουν τις θερμοκρασίες λειτουργίας, τις παροχές αέρα και καυσίμου και την παραγόμενη ισχύ από κάθε στρόβιλο, για κάθε επίπεδο παραγωγής ισχύος από την διάταξη συνδυασμένου κύκλου. Ο x-άξονας σε όλα τα διαγράμματα λαμβάνει τιμές από 0,5 ως 1,0 αμ.

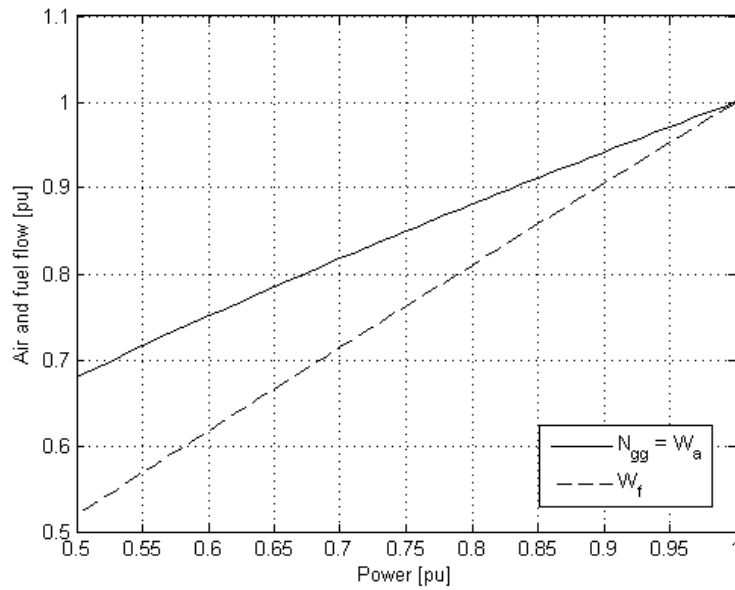


Σχήμα 5.6: Θερμοκρασίες λειτουργίας, ανά μονάδα τιμές

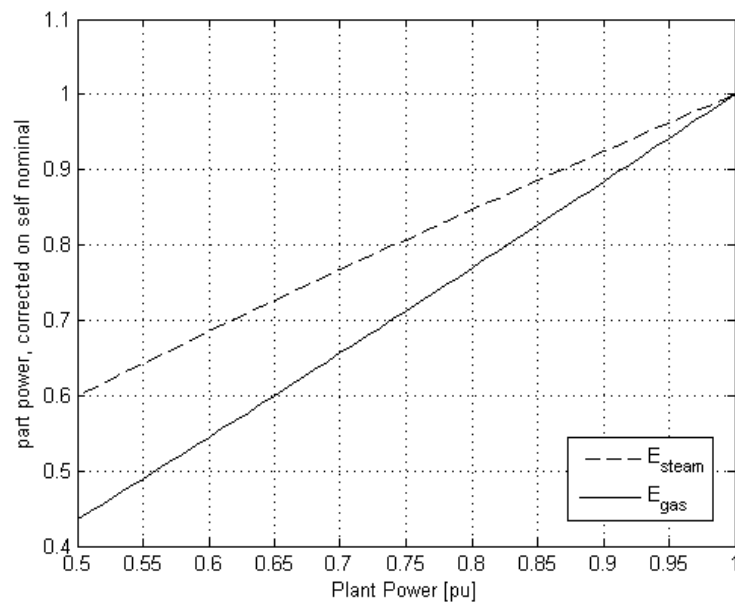
Το διάγραμμα του Σχ. 5.6 απεικονίζει τη θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή, T_3 , τη θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης, T_4 , τη θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΥΠ, T_5 και τη θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΧΠ, T_6 , σε ανά μονάδα τιμές. Οι θερμοκρασίες είναι ελαφρώς χαμηλότερες από αυτές του Σχ. 4.14, καθώς μέρος της απαιτούμενης ισχύος παράγεται από τον αμοστρόβιλο, επομένως δεν χρειάζεται να είναι τόσο υψηλές οι θερμοκρασίες στον αεριοστρόβιλο.

Στο Σχ. 5.7 απεικονίζονται οι παροχές αέρα και καυσίμου. Και οι δύο παροχές είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του Σχ. 4.15. Ενώ η παροχή αέρα εμφανίζει μικρή μείωση, η παροχή καυσίμου εμφανίζει πιο έντονη μείωση, γεγονός που καταδεικνύει το γεγονός πως για την ίδια παραγωγή ισχύος –σε ανά μονάδα τιμές, άρα αναλογικά– απαιτείται λιγότερο καύσιμο σε διατάξεις συνδυασμένου κύκλου.

Τέλος, στο Σχ. 5.8 απεικονίζονται οι παραγόμενες ισχύεις από κάθε στρόβιλο. Η κανονικοποίησή τους γίνεται επί της ονομαστικής ισχύος κάθε στροβίλου, δεν έχει αναχθεί η παραγωγή κάθε στροβίλου στην ολική ονομαστική, γι' αυτό και το άθροισμά τους δεν είναι ίσο με 1. Φαίνεται πως ο αμοστρόβιλος αυξάνει με μικρότερο ρυθμό το φορτίο του. Αυτό οφείλεται στις μεγαλύτερες σταθερές χρόνου που έχουν αποδοθεί στο ζεύγος αμοπαραγωγού – αμοστρόβιλου.



Σχήμα 5.7: Παροχές αέρα και καυσίμου, ανά μονάδα τιμές



Σχήμα 5.8: Παραγωγή ισχύος ανά συνιστώσα, ανά μονάδα τιμές

5.6.1 Ανάλυση μικρών διαταραχών - γραμμικοποίηση

Ακολουθώντας το υπόδειγμα της παρουσίασης των προηγούμενων διατάξεων, παρατίθενται οι πίνακες ιδιοτιμών του συστήματος. Οι ιδιοτιμές του υπό μελέτη συστήματος είναι συνολικά 12 καθώς έχουν προστεθεί οι σταθερές χρόνου του αμοπαραγωγού και του αμοστροβίλου. Η τοπολογία του συστήματος είναι ίδια με αυτήν που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.4. Η κατανομή των

μεταβλητών κατάστασης ανά κλάδο παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίν. 5.9.

Πίνακας 5.9: Μεταβλητές κατάστασης μοντέλου συνδυασμένου κύκλου

A/A	Κλάδος	Μεταβλητή κατάστασης
1	Κύριος	Σύστημα καυσίμου 1
2		Σύστημα καυσίμου 2
3		Στρόβιλος ΥΠ
4		Στροφές αεριογόνου
5	Ελέγχου στροφών	Στρόβιλος ΧΠ
6		Ατμοπαραγωγός
7		Ατμοστρόβιλος
8		Στροφές γεννήτριας
9		Σφάλμα στροφών γεννήτριας
10	Ελέγχου υπερθέρμανσης	Έμμεση μέτρηση T ₁₆
11		Μετρούμενη T ₁₆
12		Σφάλμα T ₁₆

Όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, θα θεωρείται πως σε κάθε γραμμικοποίηση είναι ενεργός μόνο ο ένας κλάδος ελέγχου οπότε οι ιδιοτιμές που αφορούν τον άλλο κλάδο δεν θα παρουσιάζονται.

5.6.1.1 Ιδιοτιμές

Πίνακας 5.10: Ιδιοτιμές συστήματος με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου στροφών

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω _n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-18,048	0	-	-	-	-	0,06
2	-8,780	2,291	0,968	0,692	1,444	9,074	-
3		-2,291					
4	-3,223	1,225	0,935	1,822	0,549	3,448	-
5		-1,225					
6	-0,222	1,259	0,174	4,915	0,203	1,278	-
7		-1,259					
8	-0,165	0	-	-	-	-	6,04
9	-0,087	0	-	-	-	-	11,50

Υπάρχουν, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, 3 ταλαντωτικά ζεύγη ιδιοτιμών, ένα εκ των οποίων έχει μικρό πραγματικό μέρος και άρα μικρό συντελεστή απόσβεσης. Στον Πίν. 5.11 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές που αφορούν τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης. Αυτές είναι 7 καθώς έχουν αφαιρεθεί οι μεταβλητές κατάστασης που ανήκουν στον κλάδο ελέγχου στροφών. Υπάρχει ένας

μόνο ταλαντωτικός ρυθμός αλλά έχει πολύ μεγάλο λόγο απόσβεσης, επομένως δεν θα εμφανιστεί. Υπάρχει όμως και εδώ μηδενική ιδιοτιμή η οποία δείχνει πως εάν ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης δεν απεμπλακεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, το σύστημα θα οδηγηθεί σε αστάθεια.

Πίνακας 5.11: Ιδιοτιμές συστήματος με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-18,026	0	-	-	-	-	0,06
2	-4,275	1,303	0,957	1,406	0,711	4,469	-
3		-1,303					
4	-1,066	0	-	-	-	-	0,94
5	-0,254	0	-	-	-	-	3,94
6	-0,072	0	-	-	-	-	13,81
7	0	0	-	-	-	-	-

5.6.1.2 Συντελεστές συμμετοχής

Στον Πίν. 5.12 παρατίθενται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης στους ρυθμούς με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου στροφών.

Πίνακας 5.12: Συντελεστές συμμετοχής με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου στροφών

Ιδιοτιμές	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-
	-0,400	-0,067	-18,048	-8,780	$\pm j$ 2,291	-3,223	$\pm j$ 2,291	-0,222	$\pm j$ 1,259	-0,165	-0,087	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής											
- Σφάλμα Τt6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
- Μετρούμενη η Τt6 (έξ. μορφ.)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 Ρυθμιστής στροφών	0	0	0,02	1	0,09	0,13	0,00	0,00	0,00	0	0	0
2 Στροφές αεριογόνου	0	0	0,00	0,01	0,63	0,65	0,02	0,02	0	0	0	0
3 Ροή καυσίμου	0	0	0,13	0,66	0,27	0,30	0,00	0,00	0	0	0	0
4 Στροφές γεννήτριας	0	0	0,01	0,29	0,17	1	0,01	0,01	0	0	0	0
5 Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	0,01	0,59	0,27	0,26	0,01	0,01	0	0	0	0
6 Ισχύς ατμοστροβίλου	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	0,33	0	0	0
7 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0,00	0,02	1	0,17	0,00	0,00	0	0	0	0
8 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	1	0	0,02	0,04	0,00	0,00	0	0	0	0
9 Ισχύς ατμοπαραγωγού	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1	0	0	0
- Έμμεση μέτρηση Τt6 (συν.)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Απεικονίζονται και οι ιδιοτιμές που έχουν αφαιρεθεί από τον Πίν. 5.10. Φαίνεται εδώ πως η ιδιοτιμή -0,087 καθορίζεται και εξαρτάται πλήρως από τον ατμοπαραγωγό και δευτερευόντως από τον ατμοστροβίλο, ενώ για την δεύτερη μικρότερη, -0,165, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Όπως θα φανεί στις αποκρίσεις παρακάτω, η συμπεριφορά του ζεύγους ατμών είναι αργή και πάντα ομαλή.

Ο ταλαντωτικός ρυθμός 2-3 θα ονομαστεί ρυθμός ρυθμιστή στροφών, ο 4-5 ρυθμός αεριογόνου και ο 6-7, ο οποίος παρουσιάζει το μικρότερο πραγματικό μέρος και άρα τον μικρότερο συντελεστή απόσβεσης θα ονομαστεί ρυθμός γεννήτριας, καθώς εξαρτάται κυρίως από τις στροφές της γεννήτριας, από την ισχύ του στροβίλου που την κινεί (ΧΙΙ) αλλά, έντονα, και από τις στροφές της αεριογόνου.

Στον Πίν. 5.13 παρατίθενται οι συντελεστές συμμετοχής του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης. Απεικονίζονται, και εδώ, οι μεταβλητές κατάστασης που αφορούν τον ανενεργό βρόχο.

Πίνακας 5.13: Συντελεστές συμμετοχής με ενεργοποιημένο τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης

Ιδιοτιμές	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7
	-10	0	-5	-0,2	-0,05	-18,026	-4,275	$\pm j 1,303$	-1,066	-0,254	-0,072	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής											
1 Σφάλμα Τt6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2 Μετρούμενη Τt6 (έξ. μορφ.)	0	0	0	0	0	0,01	0,16	1	0,24	0,01	0,01	0
- Ρυθμιστής στροφών	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Στροφές αεριογόνου	0	0	0	0	0	0,00	0,31	0,15	1	0,02	0,02	0
4 Ροή καυσίμου	0	0	0	0	0	0,13	1	0,09	0,03	0,00	0,00	0
- Στροφές γεννήτριας	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Ισχύς αμμοστροβίλου	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0	0	0	0	0	0	0,93	0	0	0	0	0
6 Βαλβίδα καυσίμου	0	0	0	0	0	1	0,14	0,01	0,00	0,00	0,00	0
- Ισχύς αμμοπαραγωγού	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7 Έμμεση μέτρηση Τt6 (συν.)	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	1	0

Η 6η ιδιοτιμή είναι μικρή, αλλά σε κάθε περίπτωση κυριαρχεί η 7η ιδιοτιμή, η οποία είναι μηδενική και δείχνει, όπως αναφέρθηκε, την εγγενή αστάθεια που επιφέρει ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης στο σύστημα.

5.6.1.3 Ιδιοδιανύσματα

Πίνακας 5.14: Στοιχεία ρυθμού 2-3 ($-8,780 \pm j 2,291$): ρυθμιστή στροφών

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Ρυθμιστής στροφών	0,46	7,0	1,27	-40,0	1	0
2	Στροφές αεριογόνου	0,02	-117,1	0,41	-84,3	0,01	-168,4
3	Ροή καυσίμου	0,37	-160,0	1,04	-113,5	0,66	119,6
4	Στροφές γεννήτριας	0,00	-111,1	69,74	-54,6	0,29	-132,7
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,15	54,3	2,23	94,2	0,59	-178,5
6	Ισχύς αμμοστροβίλου	0,00	-129,3	1,11	110,5	0,00	14,2
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,18	48,3	0,08	64,5	0,02	145,8
8	Βαλβίδα καυσίμου	1	0	0,23	-101,9	0,38	-68,9
9	Ισχύς αμμοπαραγωγού	0,00	35,7	0,02	-84,2	0,00	-15,5

Στον Πίν. 5.14 παρουσιάζονται τα στοιχεία του ρυθμού ρυθμιστή καυσίμου, ενώ τα στοιχεία του ρυθμού αεριογόνου παρουσιάζονται στον Πίν. 5.15.

Πίνακας 5.15: Στοιχεία ρυθμού 4-5 ($-3,223 \pm j 1,225$): αεριογόνου

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Ρυθμιστής στροφών	0,57	66,2	0,13	84,3	0,09	-146,3
2	Στροφές αεριογόνου	0,24	-159,2	2,31	-97,9	0,63	166,2
3	Ροή καυσίμου	0,57	43,9	0,43	69,8	0,27	177,0
4	Στροφές γεννήτριας	0,01	-103,6	19,49	63,4	0,17	23,2
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,19	55,6	1,28	98,0	0,27	-143,1
6	Ισχύς αμμοστροβίλου	0,00	94,0	0,85	-138,6	0,00	18,7
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	1	0	0,90	-63,3	1	0
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,33	164,4	0,06	74,0	0,02	-58,2
9	Ισχύς αμμοπαραγωγού	0,00	-108,0	0,05	20,3	0,00	-24,5

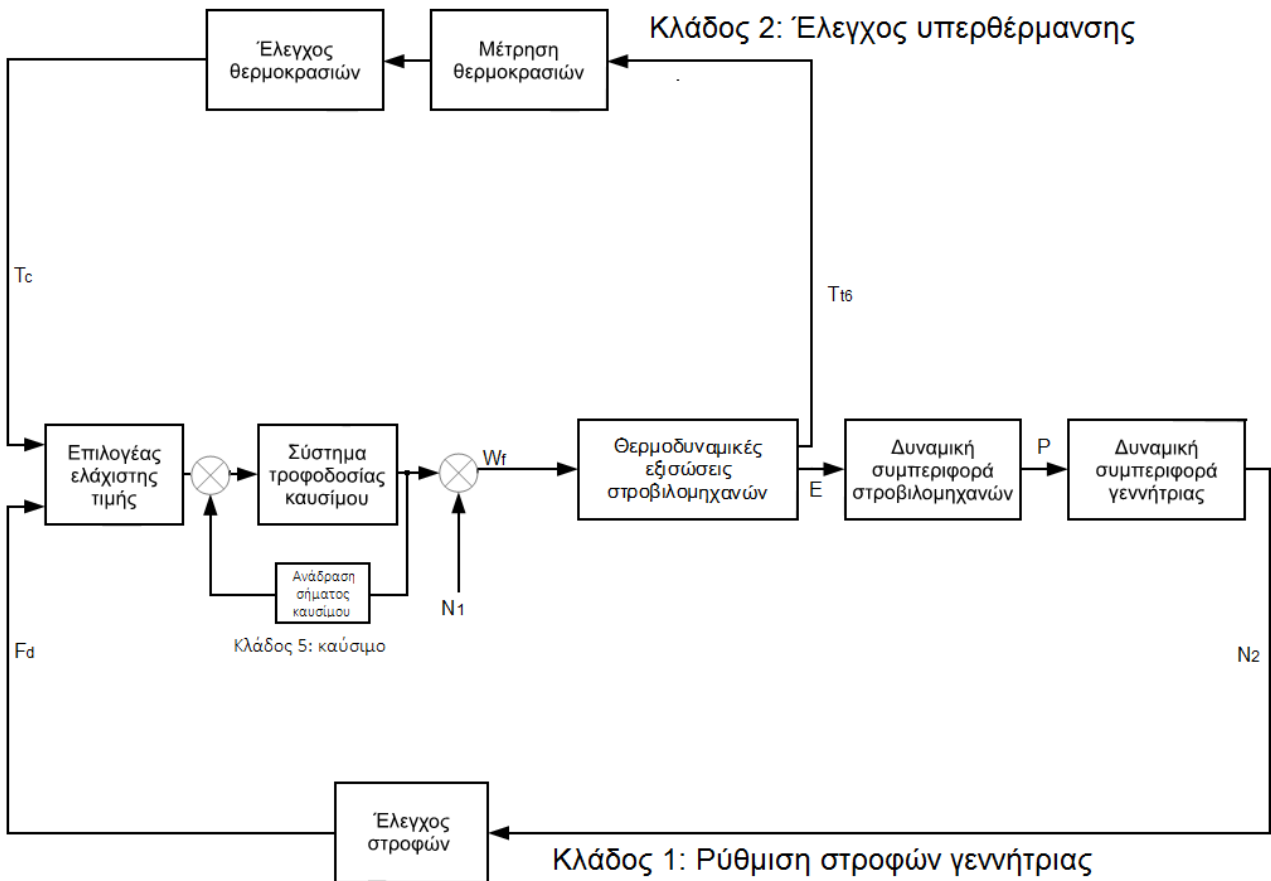
Τέλος, στον Πίν. 5.16 παρουσιάζονται τα στοιχεία του ρυθμού γεννήτριας.

Πίνακας 5.16: Στοιχεία ρυθμού 6-7 ($-0,222 \pm j 1,259$): γεννήτριας

		Ιδιοδιανύσματα				Συντελεστές συμμετοχής	
		Δεξί		Αριστερό		Μέτρο	Γωνία [deg]
		Μέτρο	Γωνία [deg]	Μέτρο	Γωνία [deg]		
1	Ρυθμιστής στροφών	1	0	0,07	-78,4	0,13	-107,3
2	Στροφές αεριογόνου	0,14	-113,5	2,61	-61,0	0,65	156,6
3	Ροή καυσίμου	0,42	-27,7	0,40	-89	0,30	-146,1
4	Στροφές γεννήτριας	0,02	-172,7	28,96	-158	1	0
5	Ισχύς στροβίλου ΧΠ	0,18	-72,6	0,83	-143,6	0,26	114,9
6	Ισχύς αμμοστροβίλου	0,00	132,9	3,25	-67,4	0,00	36,5
7	Ισχύς στροβίλου ΥΠ	0,22	-13,5	0,44	-46,2	0,17	-88,7
8	Βαλβίδα καυσίμου	0,44	1,2	0,05	-85,7	0,04	-113,5
9	Ισχύς αμμοπαραγωγού	0,00	-136,1	0,51	30,4	0,00	-134,7

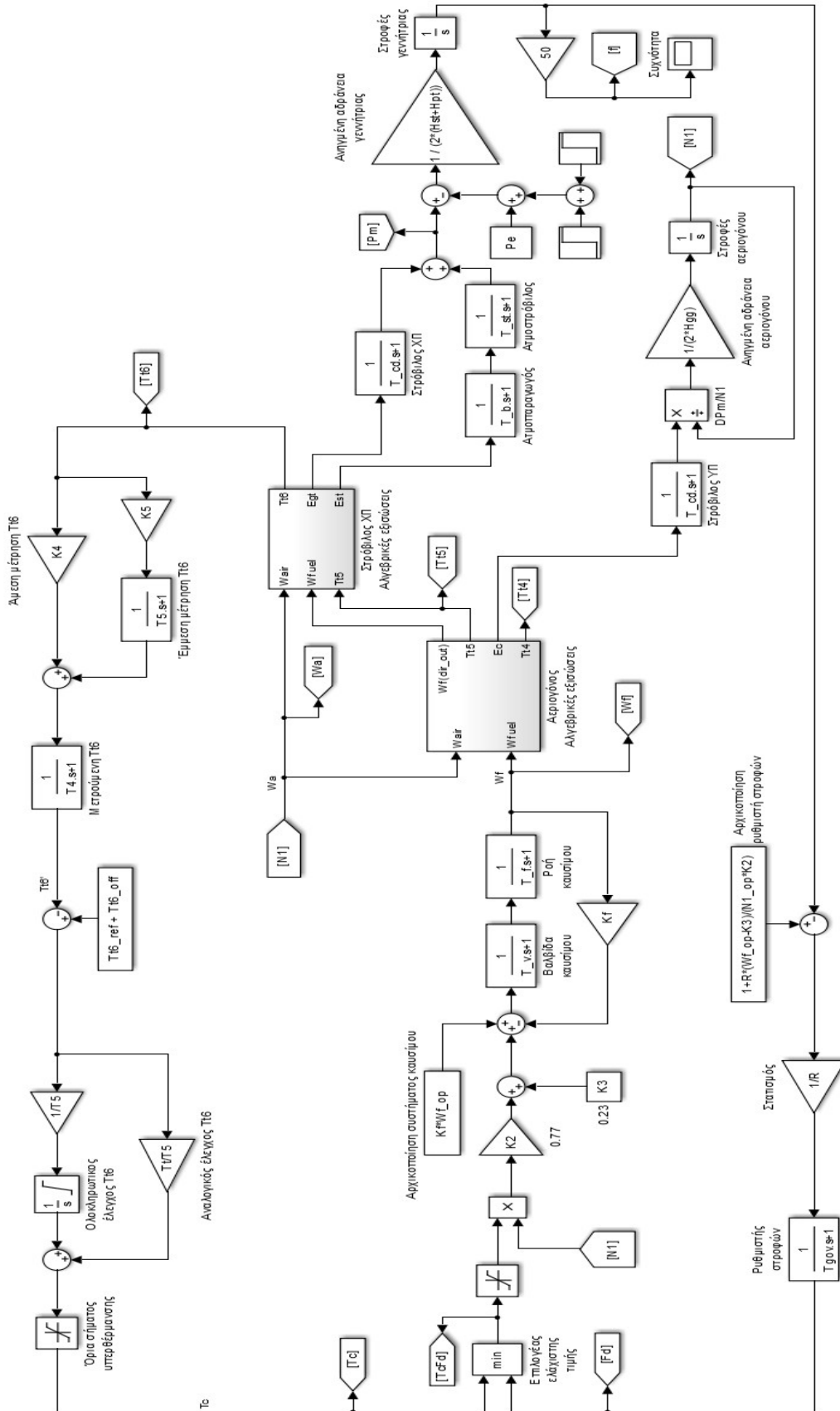
5.7 Προσομοίωση συστήματος

Το δομικό διάγραμμα που αναπτύχθηκε στο Simulink ακολουθεί το πρότυπο του Σχ. 2.14, το οποίο παρατίθεται στο Σχ. 5.14 για λόγους καλύτερης εποπτείας.



Σχήμα 5.9: Σύστημα ελέγχου χωρίς ρύθμιση ανοίγματος περυγίων

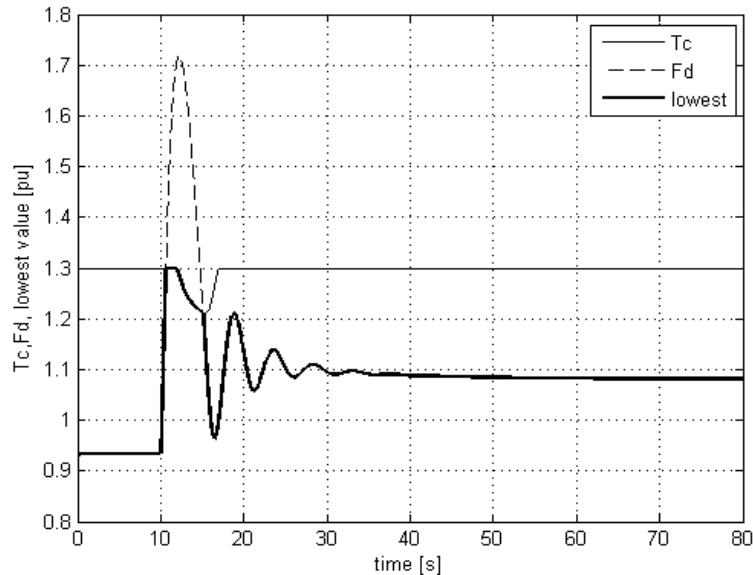
Επιλέχθηκε, όπως αναφέρθηκε, διάταξη χωρίς έλεγχο περυγίων ως η γενικότερη περίπτωση. Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στο Simulink, παρουσιάζεται στο Σχ. 5.10.



Σχήμα 5.10: Λειτουργικό διάγραμμα Simulink συστήματος συνδυασμένου κύκλου

5.8 Αποκρίσεις

Η προσομοίωση αναπαριστά βηματική μεταβολή από φορτίο 0,9 αμ σε ονομαστικό (1 αμ). Σε αυτή την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν στον Πίν. 5.8.

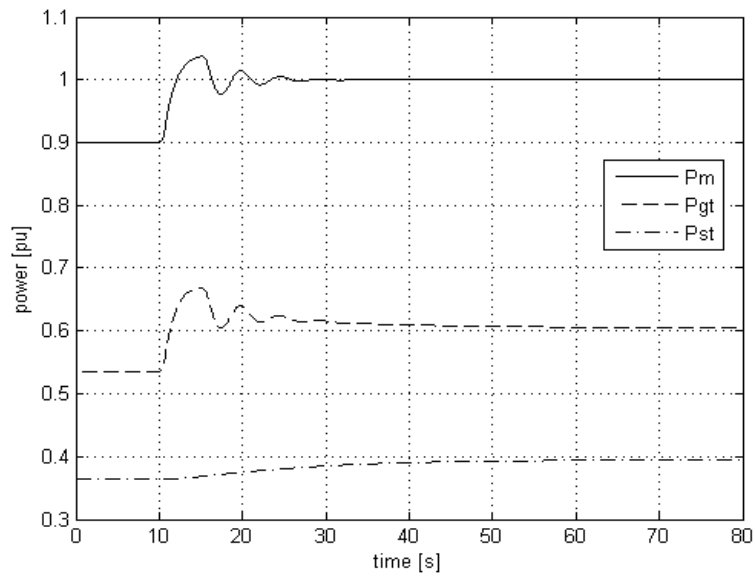


Σχήμα 5.11: Σήματα ροής καυσίμου

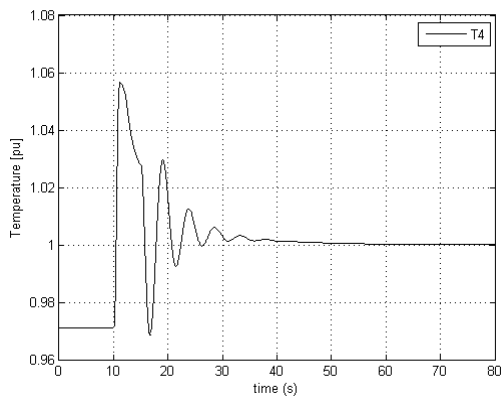
Στο Σχ. 5.11 απεικονίζονται τα σήματα από κάθε κλάδο ελέγχου καθώς και το ελάχιστο αυτών. Φαίνεται ότι ο ελεγκτής υπερθέρμανσης ενεργοποιείται κατά το χρονικό διάστημα $t = 10$ s ως $t = 18$ s, οπότε και περνάει πάλι σε λειτουργία ο κλάδος ρύθμισης στροφών. Φαίνεται ότι ο χρόνος εμπλοκής του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης είναι μικρός.

Στο Σχ. 5.12 απεικονίζονται οι παραγόμενες ισχύς όσο και η ζητούμενη ισχύς από το δίκτυο. Φαίνεται η αργή προσαρμογή του ατμοστροβίλου στο νέο επίπεδο ισχύος, σε αντίθεση με τη γρήγορη απόκριση του αεριοστροβίλου, ο οποίος καταλήγει στην τελική του τιμή όχι αυξάνοντας αλλά μειώνοντας την έξοδό του, καθώς με αυτό τον τρόπο παρείχε την ισχύ που δεν είχε αναλάβει ακόμη ο ατμοστρόβιλος. Η συμπεριφορά αυτή, ενώ προσιδιάζει σε ολοκληρωτικό έλεγχο, οφείλεται στις μεγάλες σταθερές χρόνου του ατμοπαραγωγικού μέρους σε συνδυασμό με τις αρκετά μικρότερες του αεριοστροβιλικού. Η συμπεριφορά αυτή καθορίζει όλα τα επόμενα διαγράμματα.

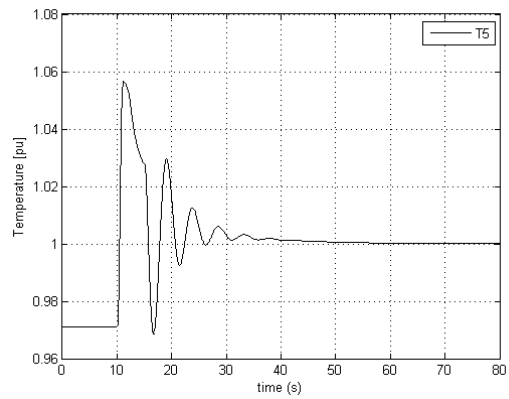
Στο Σχ. 5.13 απεικονίζονται η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του θαλάμου καύσης, T_4 , ενώ στο Σχ. 5.14 απεικονίζεται η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του στροβίλου ΧΠ, T_5 . Φαίνεται πως υπερβαίνουν την ονομαστική τους τιμή κατά λιγότερο από 5% για περίπου 8 s, τιμές που θεωρούνται αποδεκτές.



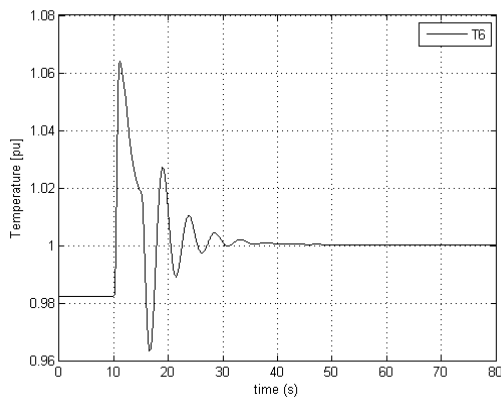
Σχήμα 5.12: Ισχύεις



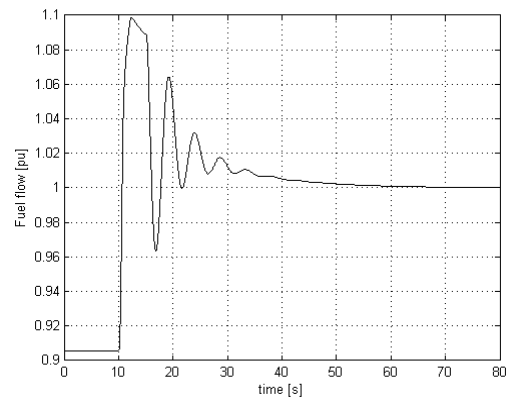
Σχήμα 5.13: Θερμοκρασία καυσαερίων θαλάμου καύσης



Σχήμα 5.14: Θερμοκρασία καυσαερίων στροβίλου ΥΠ



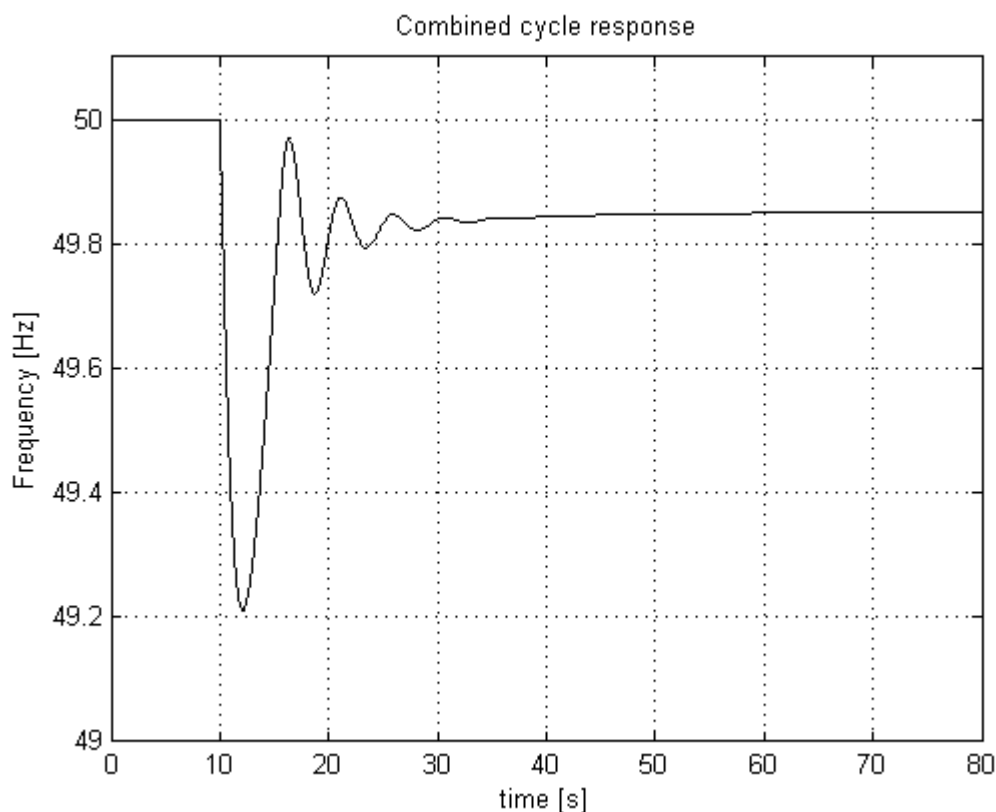
Σχήμα 5.15: Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου στροβίλου ΧΠ



Σχήμα 5.16: Παροχή καυσίμου

Στο Σχ. 5.15 παρουσιάζεται η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του στροβίλου XII. Φαίνεται πως δεν διατηρείται σταθερή. Η παροχή καυσίμου παρουσιάζεται στο Σχ. 5.16 όπου φαίνεται πως αυξάνεται κατά σχεδόν 10% για περίπου 8 s. Η υπέρβαση της ονομαστικής τιμής του καυσίμου οφείλεται στα όρια ανοχής υπερθέρμανσης (στην προσαύξηση της T_6 , το offset, το οποίο έχει τιμή 1%) τα οποία έχουν θεσπιστεί ώστε να μπορεί να αποσοβηθεί ομαλότερα μια διαταραχή.

Στο Σχ. 5.17 παρουσιάζεται η απόκριση της ηλεκτρικής συχνότητας της μονάδας. Παρατηρείται πως μετά την αποκατάσταση του μεταβατικού φαινομένου υπάρχει μια αργή προσαρμογή στην τελική τιμή (αυτός είναι ο λόγος που η συγκεκριμένη προσομοίωση διαρκεί 80 s και όχι 50 s, όπως όλες οι προηγούμενες). Η αργή προσαρμογή, η οποία θυμίζει ολοκληρωτικό έλεγχο, οφείλεται στην αργή προσαρμογή του αμοστροβίλου στην τελική του τιμή (βλ. και Σχ. 5.12).

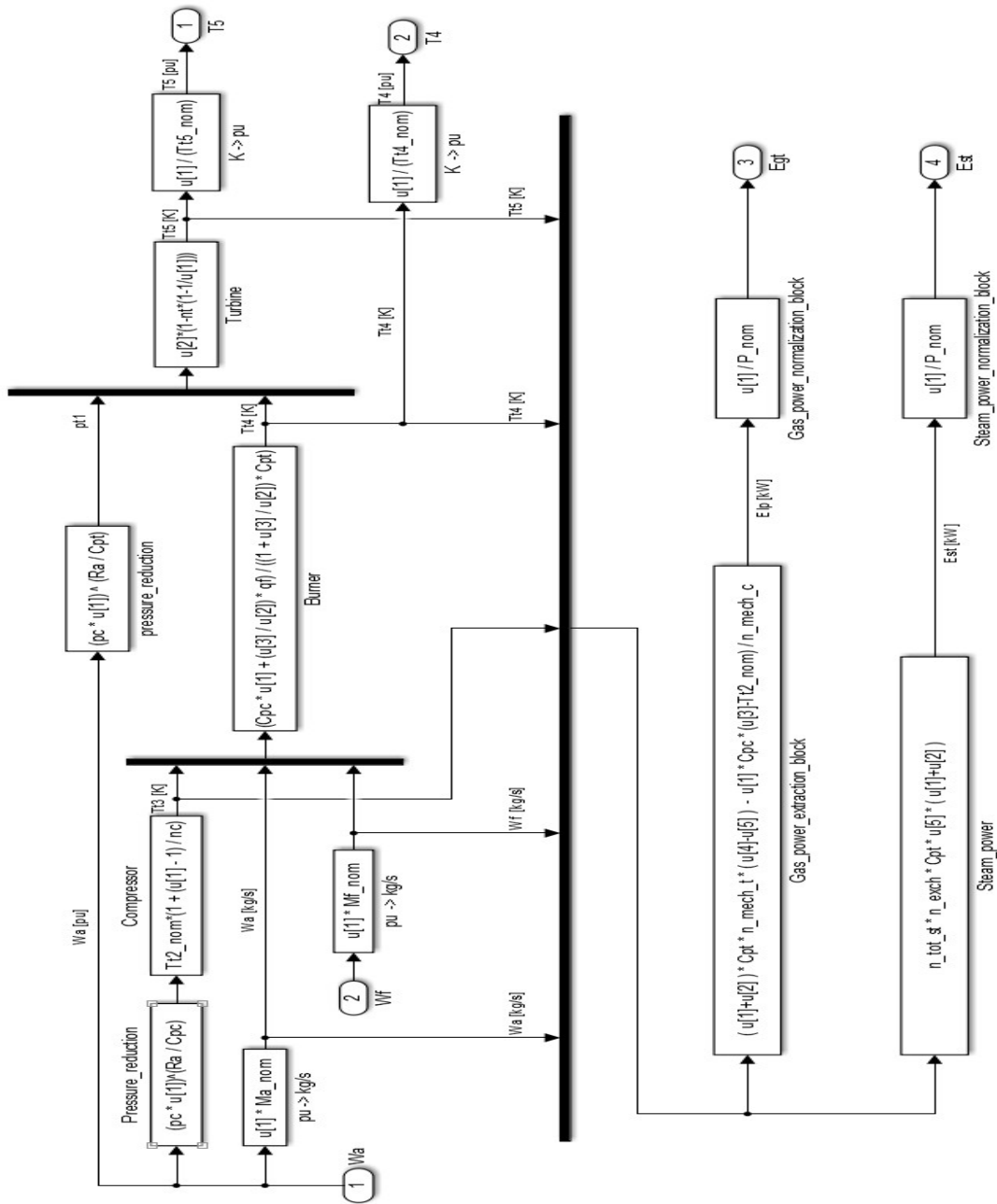


Σχήμα 5.17: Απόκριση ηλεκτρικής συχνότητα μονάδας συνδυασμένου κύκλου με αεριοστροβίλο διδύμων ατράκτων

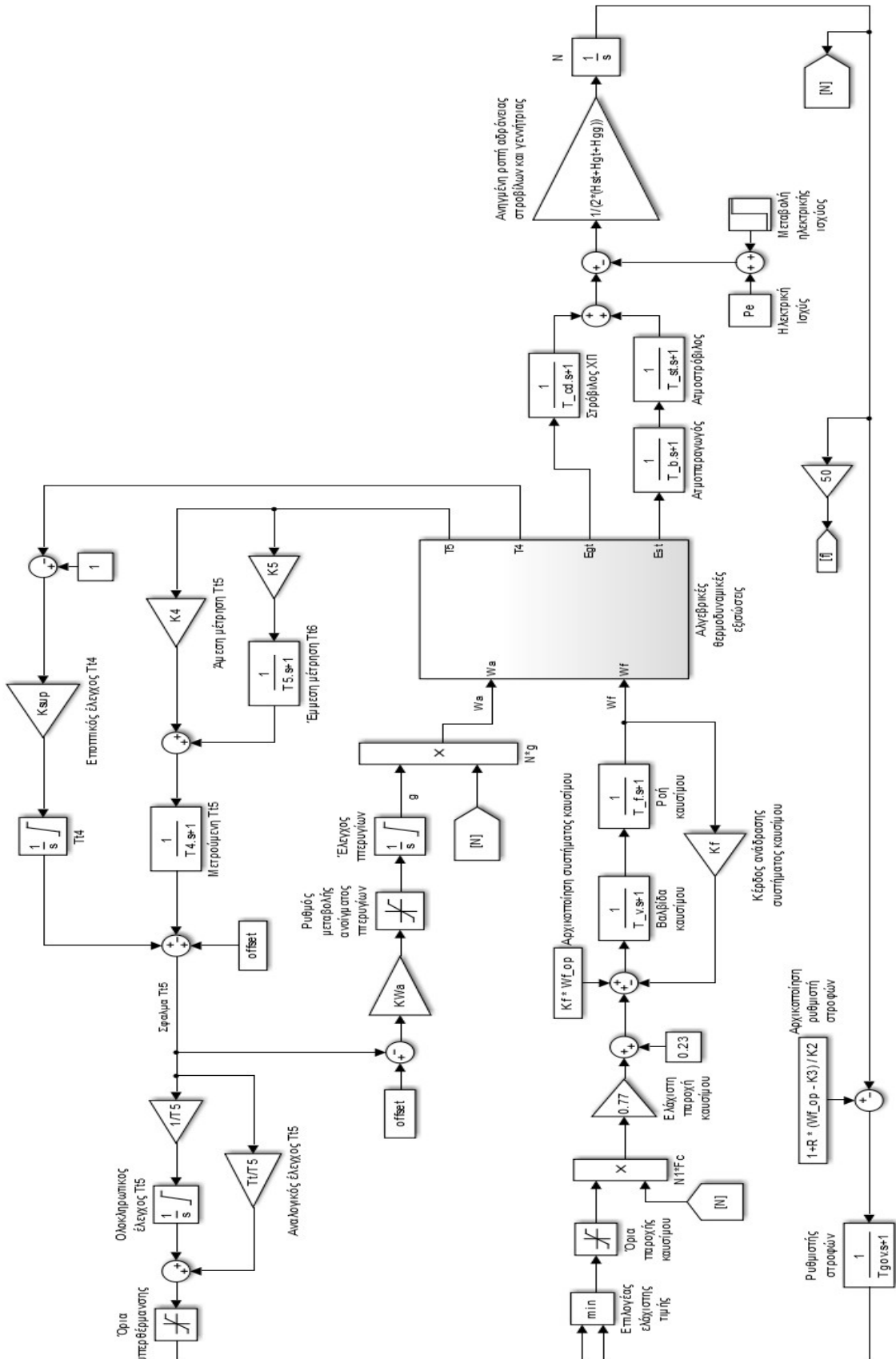
Η μέγιστη βύθιση φτάνει τα 49,21 Hz και τελική τιμή τα 49,85 Hz, τιμές οι οποίες θεωρούνται ικανοποιητικές. Η πρώτη βύθιση οφείλεται στην μείωση παροχής καυσίμου λόγω εμπλοκής του κλάδου ελέγχου υπερθέρμανσης, η ταλαντωτική συμπεριφορά στην εμπλοκή του κλάδου ελέγχου στροφών και η τελική αργή απόκριση οφείλεται στον αμοστροβίλο.

5.9 Σύγκριση αποκρίσεων διαφορετικών διατάξεων μονάδων συνδυασμένου κύκλου

Στην ενότητα αυτή συγκρίνεται η απόκριση του συστήματος συνδυασμένου κύκλου που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες με την απόκριση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στην αναφορά [2], όπου όμως στο τελευταίο έχει προστεθεί κλάδος ανάδρασης στο σύστημα καυσίμου και έχει διαφοροποιηθεί η εξίσωση που περιγράφει τον θάλαμο καύσης, σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία. Οι αποκρίσεις προκύπτουν για βηματική αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας από το 90% στο 100% του ονομαστικού της φορτίου.



Σχήμα 5.18: Βαθμίδα αλγεβρικών θερμοδυναμικών εξισώσεων αεριοστροβίλου απλής ατράκτου



Σχήμα 5.19: Λειτουργικό διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου

5.9.1 Σταθερές συστήματος

Στον Πίν. 5.17 παρουσιάζονται οι σταθερές του συστήματος συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου. Είναι ίδιες με τις αντίστοιχες της ενότητας 5.3 με μόνη διαφορά πως οι ανηγμένες ροπές αδράνειας έχουν αθροιστεί, δηλαδή ισχύει πως $H_{tot} = H_{gt} + H_{st} + H_{gg}$.

Πίνακας 5.17: Σταθερές συστήματος

Ονομασία	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Ροπή αδράνειας ατράκτου ισχύος	Htot	4,241	sec
Σταθερά χρόνου μηχανικού μέρους συστήματος καυσίμου	T_v	0,05	sec
Σταθερά χρόνου ροϊκού μέρους συστήματος καυσίμου	T_f	0,4	sec
Σταθερά χρόνου θερμικών μεταβολών στροβίλου	T_cd	0,2	sec
Σταθερά χρόνου ανακομιστή θερμότητας (HRSG)	T_b	20	sec
Σταθερά χρόνου ατμοστρόβιλου	T_m	5	sec
Σταθερά χρόνου ρυθμιστή στροφών	T_gov	0,1	sec
Σταθερά χρόνου θερμικής ασπίδας προστασίας θερμομέτρου	T_hs	15,0	sec
Σταθερά χρόνου απόκρισης θερμομέτρου	T_ts	2,5	sec
Ρυθμός ολοκλήρωσης PI ελεγκτή	T_t	0,4699	sec
Συντελεστής μείωσης παροχής καυσίμου	K2	0,23	pu
Ποσοστό μόνιμης παροχής καυσίμου	K3	0,77	pu
Ποσοστό έμμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K4	0,8	pu
Ποσοστό άμεσης διέλευσης σήματος θερμοκρασίας	K5	0,2	pu

5.9.2 Ονομαστικές τιμές

Στο Σχ. 5.18 παρουσιάζονται οι θερμοδυναμικές εξισώσεις ενεργειακής μετατροπής σε σύστημα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου και ζεύγος ατμοπαραγωγού – ατμοστρόβιλου, ενώ στο Σχ. 5.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος αυτού όπως αυτό σχεδιάστηκε στο Simulink. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε αυτή την προσομοίωση και οι ονομαστικές τους τιμές παρουσιάζονται στον Πίν. 5.18.

Πίνακας 5.18: Ονομασίες μεγεθών και ονομαστικές τους τιμές

Όνομα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα	Όνομα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{12}	288,64	K	Λόγος συμπίεσης / αποτόνωσης	π_c	18,5	-
Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπιεστή	T_{13}	703,15	K	Ροπή αδράνειας αεριογόνου	J_{gg}	60,8	kg·m ²
Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_{14}	1461,15	K	Ροπή αδράνειας στροβίλου ισχύος (XII)	J_{gt}	4261,7	kg·m ²
Θερμοκρασία εξόδου στροβίλου	T_{15}	807,81	K	Ροπή αδράνειας ατμοστροβίλου	J_{st}	8250	kg·m ²
Θερμοκρασία ατμών εισόδου ατμοστροβίλου	T_{17}	723,15	K	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα αέρα συμπιεστή	C_{PC}	1,0291	-
Στροφές γεννήτριας	N	1	αμ	Ειδική μέση θερμοχωρητικότητα καυσαερίων στροβίλου	C_{PT}	1,1412	-
Παροχή αέρα	\dot{m}_a	91,8	kg/s	Σταθερά ατμοσφαιρικού αέρα	Ra	0,287	kJ / (K·kg)
Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f	2,2	kg/s	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	η_c	88	%
Παροχή καυσαερίων	\dot{m}_{ex}	94	kg/s	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	η_T	86	%
Βαθμός απόδοσης ατμοπαραγωγού (HRSG)	η_{HRSG}	80	%	Μηχανικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή	$\eta_{\mu C}$	99	%
Μηχανικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{\mu G}$	99	%	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	$\eta_{\mu T1}$	99	%
Ονομαστική ισχύς αεριοστροβίλου	P_{GT}	30.738	kW	Ονομαστική ισχύς ατμοστροβίλου	P_{ST}	20.000	kW

5.9.3 Λειτουργικές τιμές

Οι εξισώσεις που διέπουν το σύστημα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου παρουσιάζονται στο Πίν. 5.19. Επιλύονται για τον προσδιορισμό είτε των ονομαστικών είτε των λειτουργικών τιμών, όπου λειτουργικές ονομάζονται οι τιμές θερμοκρασιών, παροχών και ανοίγματος πτερυγίων για επίπεδο φορτίου μικρότερο από το ονομαστικό της διάταξης.

Πίνακας 5.19: Θερμοδυναμικές εξισώσεις συστήματος συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου

A/A	Αναλυτική έκφραση εξίσωσης	Προέλευση
1	$T_{t3} = T_{t2} \left(1 + \frac{\left(\pi_C \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a^o} \right)^{\frac{Ra}{C_{PC}} - 1}}{\eta_C} \right)$	Συμπίεστής
2	$(\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT1} T_{t4} = \dot{m}_a C_{PC} T_{t3} + \dot{m}_f q_f$	Θάλαμος καύσης
3	$T_{t5} = T_{t4} \left(1 - \eta_T \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_C \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{\dot{m}_a^o + \dot{m}_f^o}} \right)^{\frac{Ra}{C_{PT}}} \right] \right)$	Στρόβιλος
4	$W_a = N g$	Οδηγία πτερύγια αέρα εισόδου
5	$P_{GT}^{[kW]} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) C_{PT} (T_{t1} - T_{t5}) \eta_{\mu T} - \frac{\dot{m}_a C_{PC} (T_{t3} - T_{t2})}{\eta_{\mu C}}$	Ισχύς αεριοστρόβιλου
6	$P_{ST}^{[kW]} = \eta_{\theta, ST} \eta_{HRSG} (\dot{m}_{ex}^o W_{ex}) C_{PT2} T_{t6}$	Ισχύς ατμοστρόβιλου
7	$P_e = P_{ST} + P_{GT}$	Ισοζύγιο ισχύων

Σε αυτό το μοντέλο οι αλγεβρικές εξισώσεις είναι 7 ενώ οι άγνωστοι (κατά τη λειτουργία εκτός ονομαστικού φορτίου) είναι 8:

Πίνακας 5.20: Άγνωστα μεγέθη

A/A	Ονομασία	Σύμβολο	A/A	Ονομασία	Σύμβολο
1	Θερμοκρασία αέρα εξόδου συμπίεστή	T_{t3}	5	Παροχή αέρα	\dot{m}_a
2	Θερμοκρασία καυσαερίων εξόδου θαλάμου καύσης	T_{t4}	6	Παροχή καυσίμου	\dot{m}_f
3	Θερμοκρασία εξόδου στρόβιλου	T_{t5}	7	Ισχύς αεριοστρόβιλου	P_{GT}
4	Άνοιγμα πτερυγίων	g	8	Ισχύς ατμοστρόβιλου	P_{ST}

Επομένως είναι υποχρεωτικό να καθοριστεί ad hoc ένας από τους αγνώστους. Σύμφωνα με

τις αναφορές [2, 23, 24, 25, 31], για το επίπεδο ισχύος το οποίο θα μελετηθεί στην παρούσα ενότητα, ήτοι 90% του ονομαστικού φορτίου, γίνεται η παραδοχή πως η θερμοκρασία των καυσαερίων διατηρεί την ονομαστική της τιμή, άρα ισχύει πως

$$T_{t5} = T_{t5}^o \Rightarrow T_5 = 1 \quad (5.25)$$

όπου, όπως έχει επιλεγθεί ως τώρα, ως T_{t5} συμβολίζεται η θερμοκρασία σε βαθμούς K ενώ ως T_5 συμβολίζεται η θερμοκρασία σε ανά μονάδα τιμές.

5.9.4 Ρύθμιση παραμέτρων

Η ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος έγινε κατά τον τρόπο που περιγράφηκε ήδη στις ενότητες 3.3.3, 4.3.2 και 5.5. Αυτό το μοντέλο έχει 5 μεταβλητές ελέγχου που μπορούν να ρυθμιστούν. Το εύρος διακύμανσης των υπό ρύθμιση παραμέτρων παρουσιάζεται στον Πίν. 5.21.

Πίνακας 5.21: Ρυθμιζόμενες παράμετροι και εύρος τιμών τους

Μεταβλητή ελέγχου	Σύμβολο	Από	Έως	Βήμα	Πλήθος τιμών
Στατισμός	R	0,02	0,05	0,0025	13
Κέρδος ανάδρασης καυσίμου	K_f	0	0,1	0,005	21
Κέρδος κλάδου εποπτικού ελέγχου θερμοκρασίας καυσαερίων	K_{sup}	0,0005	0,01	0,0005	20
Προσαύξηση μετρούμενης θερμοκρασίας καυσαερίων	offset	0,01	0,03	0,0025	9
Κέρδος σήματος ελέγχου ανοίγματος πτερυγίων	KW_a	5	5	-	1

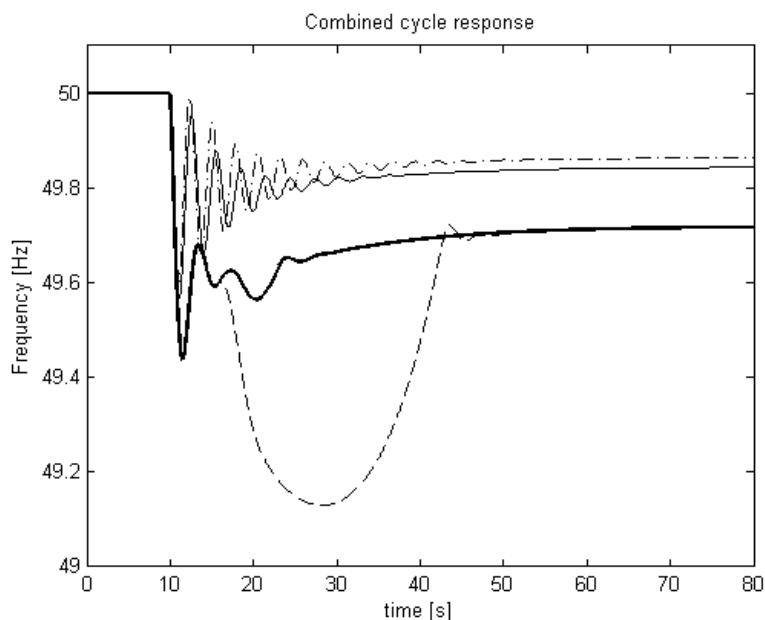
Όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.21 πραγματοποιήθηκαν συνολικά $13 \times 21 \times 20 \times 9 = 49.140$ δοκιμές. Αυτές που προέκυψαν από την ταξινόμηση παρουσιάζονται στον Πίν. 5.22. Με έντονα γράμματα απεικονίζεται το μέγεθος ως προς το οποίο έγινε η ταξινόμηση.

Οι αποκρίσεις που παρουσιάζονται με αξονική και συνεχή γραμμή απορρίφθηκαν καθώς παρουσιάζουν πολύ έντονες ταλαντώσεις, παρ' ότι το μόνιμο σφάλμα που επιφέρουν είναι μικρό. Η απόκριση που παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζει μεγάλη μεταβατική βύθιση, γεγονός που οφείλεται στο ότι, με αυτές τις ρυθμίσεις, εμπλέκεται ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης. Επιλέχθηκε ο συνδυασμός (1) ο οποίος παρουσιάζει αποδεκτά μεταβατικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μικρή μεταβατική βύθιση ηλεκτρικής συχνότητας, υψηλή τελική τιμή και λίγες και με μικρό πλάτος ταλαντώσεις.

Πίνακας 5.22: Τελικοί συνδυασμοί

Σειρά επιλογής	R	K_f	K_{sup}	offset	ελάχιστη συχνότητα	τελική συχνότητα	τυπική απόκλιση 75% - 100%	τυπική απόκλιση 25% - 100%	ζ	χρόνος απεμπλοκής	Μορφή απεικόνισης
1	0,0425	0,040	0,0005	0,0275	49,4366	49,7009	0,0115	0,0275	0,2522	0	Έντονη
2	0,0425	0,045	0,0055	0,0250	49,1297	49,7007	0,2227	0,2217	0,2525	42,14	Συνεχής
3	0,0250	0,000	0,0070	0,0300	49,5632	49,8343	0,0062	0,0184	0,0828	0	Διακεκομμένη
4	0,0200	0,095	0,0005	0,0300	49,5973	49,8555	0,0076	0,0232	0,0517	16,92	Αξονική

Η απόκριση ηλεκτρικής συχνότητας που απέδωσε ο κάθε συνδυασμός παρουσιάζεται στο Σχ. 5.20.



Σχήμα 5.20: Απόκριση ηλεκτρικής συχνότητας κάθε συνδυασμού παραμέτρων

Επιλέχθηκε ο συνδυασμός παραμέτρων που δίνει την απόκριση η οποία αναπαρίσταται με έντονη γραμμή.

5.9.5 Γραμμικοποίηση συστήματος

Στον Πίν. 5.23 παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργό τον κλάδο ρύθμισης στροφών. Δεν κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν οι ιδιοτιμές του συστήματος με ενεργό τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης.

Πίνακας 5.23: Ιδιοτιμές συστήματος

	ιδιοτιμή		ζ (λόγος απόσβεσης)	T [sec] (περίοδος)	f [Hz] (συχνότητα)	ω_n [rad/sec] (κυκλική συχνότητα)	τ [sec] (σταθερά χρόνου)
	πραγματικό	φανταστικό					
1	-19,969	0	-	-	-	-	0,05
2	-8,248	1,211	0,989	0,754	1,327	8,336	-
3		-1,211					
4	-0,466	1,665	0,270	3,634	0,275	1,729	-
5		-1,665					
6	-0,244	0,937	0,252	6,486	0,154	0,969	-
7		-0,937					
8	-0,124	0,005	0,999	50,659	0,020	0,124	-
9		-0,005					
10	-0,083	0	-	-	-	-	12,04
11	0	0	-	-	-	-	-

Το σύστημα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου εμφανίζει τέσσερις ταλαντωτικούς ρυθμούς, εκ των οποίων οι δύο έχουν μικρά πραγματικά μέρη και επομένως μικρούς λόγους απόσβεσης, άρα αναμένεται να εμφανιστούν δύο ταλαντώσεις. Η μηδενική ιδιοτιμή αφορά τον εποπτικό έλεγχο θερμοκρασίας καθώς αυτός υλοποιείται με ολοκληρωτή χωρίς ανάδραση, αλλά δεν οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια επειδή ο ολοκληρωτής έχει περιοριστή.

Στον Πίν. 5.24 παρουσιάζονται οι συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης σε κάθε ρυθμό, σύμφωνα με την αρίθμηση που τους αποδόθηκε στον Πίν. 5.23.

Πίνακας 5.24: Συντελεστές συμμετοχής

Ιδιοτιμές	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	11
		-19,969	-8,248	$\pm j 1,121$	-0,466	$\pm j 1,665$	-0,244	$\pm j 0,937$	-0,124	$\pm j 0,005$	-0,083	0
Μεταβλητές κατάστασης	Συντελεστές συμμετοχής											
- Σήμα υπερθέρμανσης	0	0		0		0		0		0	1	0
1 Εποπτικός έλεγχος	0	0		0		0		0		0	0	1
2 Μορφοτροπέας	0	0,00		0,10		1		0,01		0,00	0	0
3 Ρυθμιστής στροφών	0	1		0,18		0,02		0,00		0,00	0	0
4 Έλεγχος πτερυγίων	0	0,00		0,09		0,98		0,01		0,00	0	0
5 Στροφές γεννήτριας	0	0,25		1		0,19		0,05		0,00	0	0
6 Ροή καυσίμου	0	0,37		0,64		0,07		0,00		0,00	0	0
7 Ισχύς αεριοστρόβιλου	0	0,61		0,36		0,04		0,02		0,00	0	0
8 Ισχύς αμμοπαραγωγού	0	0,00		0,00		0,00		0,97		0,01	0	0
9 Βαλβίδα καυσίμου	1	0,18		0,09		0,01		0,00		0,00	0	0
10 Ισχύς αμμοστρόβιλου	0	0,00		0,00		0,00		1		0,05	0	0
11 Ολοκληρωτική μέτρηση T5	0	0,00		0,00		0,02		0,01		1	0	0

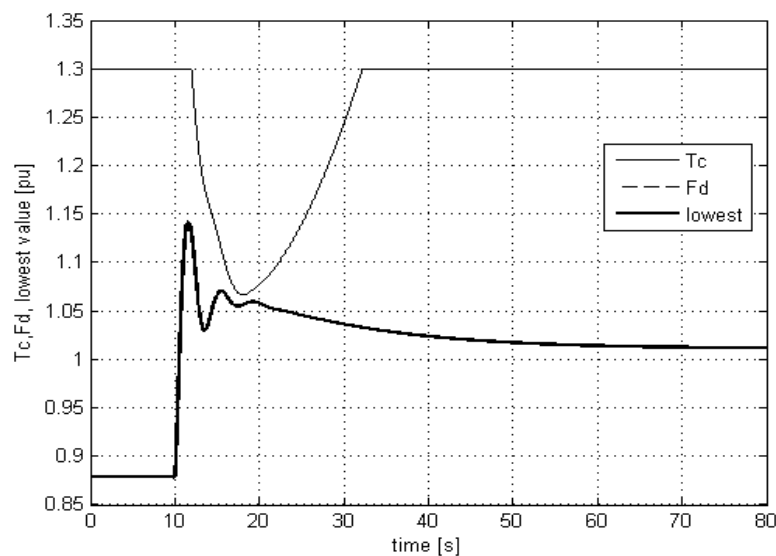
Από τους συντελεστές συμμετοχής ο ρυθμός 2-3 μπορεί να ονομαστεί ρυθμός ρυθμιστή στρο-

φών, ο 4-5 ρυθμός γεννήτριας, ο 6-7 ρυθμός πτερυγίων, καθώς η έξοδος του μορφοτροπέα αξιοποιείται από το σύστημα ρύθμισης ανοίγματος πτερυγίων, και ο 8-9 ρυθμός ατμών.

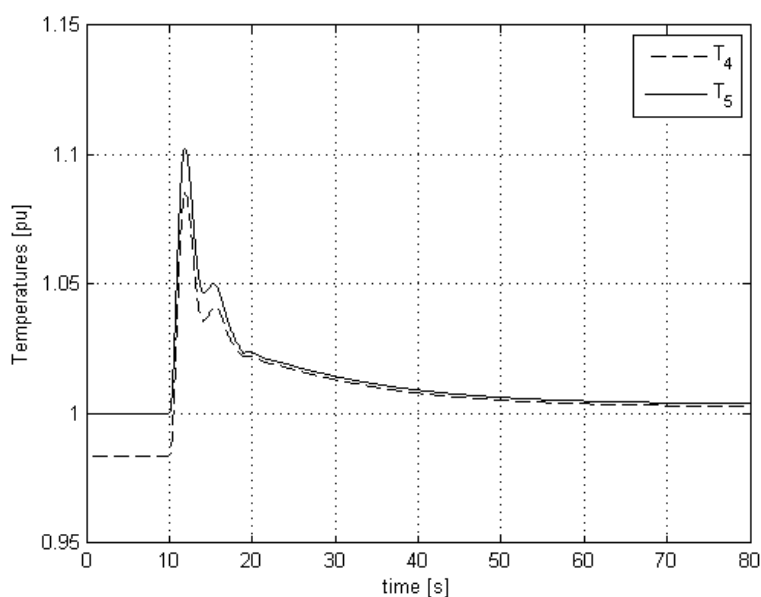
5.9.6 Αποκρίσεις

Καθώς το σύστημα έχει μελετηθεί στην βιβλιογραφία, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα διαγράμματα που απεικονίζουν τα σήματα καυσίμου και την ηλεκτρική συχνότητα. Τα σήματα καυσίμου παρουσιάζονται στο Σχ. 5.21. Φαίνεται πως ενώ ο κλάδος ελέγχου υπερθέρμανσης λειτουργεί, παρά την αυξημένη τιμή αναφοράς της θερμοκρασίας των καυσαερίων του θαλάμου καύσης, δεν υπάρχει τομή στην απόκριση των δύο σημάτων επομένως ο έλεγχος υπερθέρμανσης του στρόβιλου, με τις υπάρχουσες ρυθμίσεις, δεν ενεργοποιείται.

Στο Σχ. 5.22 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες καυσαερίων. Φαίνεται πως η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του θαλάμου καύσης, δηλαδή η θερμοκρασία καυσαερίων εισόδου στον στρόβιλο υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή κατά περίπου 8% για 5 s ενώ μέσα στα επόμενα 25 s φτάνει στην ονομαστική της τιμή. Η απόκριση αυτή θεωρείται οριακά αποδεκτή.



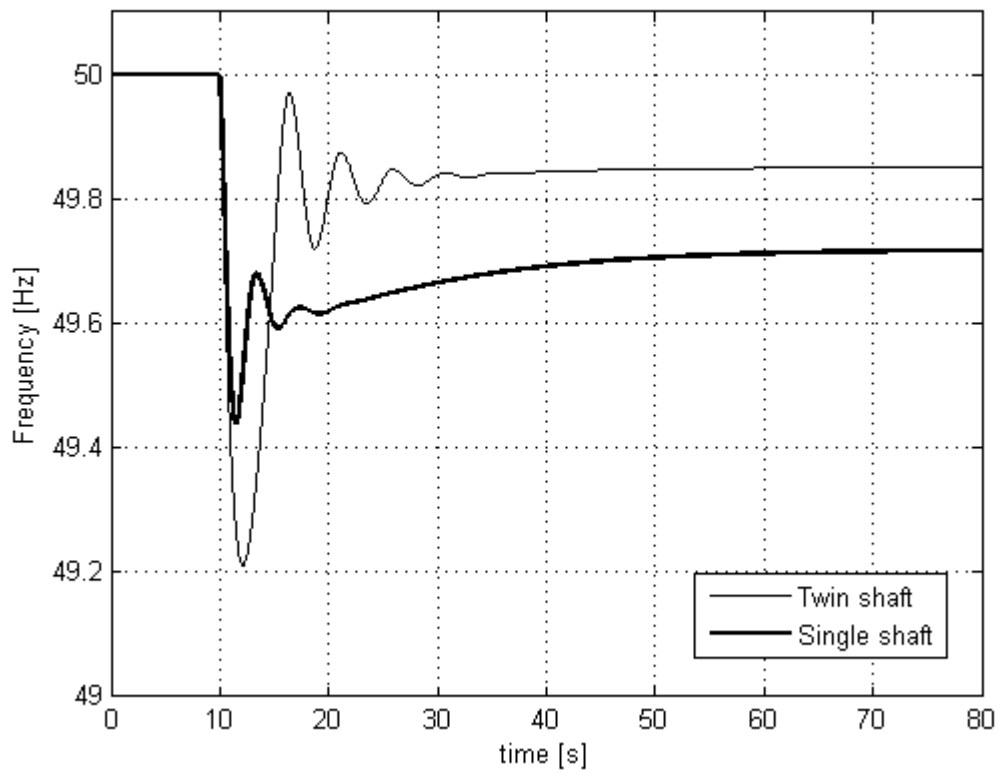
Σχήμα 5.21: Σήματα παροχής καυσίμου, συνδυασμένος κύκλος με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου



Σχήμα 5.22: Θερμοκρασίες καυσαερίων εισόδου (T_4) και εξόδου (T_5) στροβίλου διάταξης απλής ατράκτου, ανά μονάδα τιμές

Στο Σχ. 5.23 γίνεται, τέλος, η σύγκριση των αποκρίσεων μονάδας συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, με ρυθμίσεις παραμέτρων που επιλέχθηκαν στην ενότητα 5.9 και της μονάδας συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων που περιγράφηκε και ρυθμίστηκε στις ενότητες 5.2 ως 5.8. Και οι δύο διατάξεις φαίνεται πως επιτυγχάνουν την τελική τους ηλεκτρική συχνότητα αργά, κατά τρόπο που μοιάζει με απόκριση ολοκληρωτικού ελέγχου, αλλά, όπως αναφέρθηκε, αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην αργή απόκριση του ατμοπαραγωγικού ζεύγους. Φαίνεται όμως πως η διάταξη απλής ατράκτου, παρ' ότι με τις καλύτερες δυνατές ρυθμίσεις παρουσιάζει μεγαλύτερο σφάλμα τελικής τιμής, παρουσιάζει μικρότερη μεταβατική βύθιση και εμφανώς λιγότερες ταλαντώσεις. Η διάταξη διδύμων ατράκτων υπερτερεί κατά το γεγονός πως ολοκληρώνει το μεταβατικό φαινόμενο σε μικρότερο χρονικό διάστημα, καθώς επιτυγχάνει την τελική της τιμή περίπου όταν $t = 40$ s, ενώ η διάταξη απλής ατράκτου επιτυγχάνει την τελική της τιμή κατά την χρονική στιγμή $t = 60$ s.

Ο πραγματικός στατισμός των μονάδων είναι διαφορετικός καθώς αυτός προέκυψε ως αποτέλεσμα της ικανοποίησης των απαιτήσεων που τέθηκαν (μικρή μεταβατική βύθιση, υψηλή τελική τιμή ηλεκτρικής συχνότητας, λίγες μεταβατικές ταλαντώσεις / υψηλός λόγος απόσβεσης ζ).



Σχήμα 5.23: Σύγκριση αποκρίσεων μονάδων συνδυασμένου κύκλου. Με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου (λεπτή γραμμή) και με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων (έντονη γραμμή)

6ο Κεφάλαιο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με την παράσταση και την ευστάθεια της ηλεκτρικής συχνότητας ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον οποίο η κινητήρια μηχανή είναι ένας αεριοστρόβιλος διδύμων ατράκτων. Έγιναν διάφορες προσομοιώσεις με κάποιες παραλλαγές η κάθε μία.

6.1.1 Ρυθμίσεις παραμέτρων

Το πρώτο συμπέρασμα που διατρέχει όλο το σώμα της εργασίας αφορά τον τρόπο ρύθμισης των παραμέτρων λειτουργίας ενός μοντέλου προσομοίωσης. Μέσω του απλού αυτού τρόπου προσδιορισμού αυτών των παραμέτρων εξετάστηκαν πολλοί συνδυασμοί, ενίοτε εκατοντάδες χιλιάδες (όπως στο Κεφ. 4) και με ταξινόμηση των αποτελεσμάτων προέκυπτε ένας αποδεκτός συνδυασμός παραμέτρων. Να σημειώσουμε πως οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ ήταν μικρές (επαρκεί ένας οικιακός Η/Υ), μόνο κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα ήταν αναγκαίο ώστε να ολοκληρωθούν όλες οι δοκιμαστικές προσομοιώσεις. Φάνηκε πως αυτή η μέθοδος ρύθμισης, παρά την απλότητά της είναι αρκετά αποδοτική, συμπέρασμα που επιβεβαιώθηκε κατά τη ρύθμιση του μοντέλου συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, το οποίο αντλήθηκε αυτούσιο από την βιβλιογραφία [2] και προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις των μηχανών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Φάνηκε επίσης όμως η ανάγκη καθορισμού στενών ορίων διακύμανσης της τιμής μιας παραμέτρου, καθώς όσο ανεβαίνουν οι ρυθμιζόμενες παράμετροι, τόσο αυξάνεται εκθετικά ο χρόνος υπολογισμού τους.

6.1.2 Αποκρίσεις αεριοστροβίλου General Electric LM 2500+

Στην πρώτη προσομοίωση, η οποία αναφέρεται στο Κεφ. 3 και στηρίχθηκε σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [1], εξετάστηκε η προσθήκη ενός κλάδου ανατροφοδότησης του σήματος εξόδου του συστήματος καυσίμου. Φάνηκε πως με την επιλογή αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί ταχύτερη απόκριση του συστήματος, με κόστος το μειωμένο κέρδος της διάταξης ρύθμισης καυσίμου (αύξηση στατισμού). Το κέρδος του σήματος αυτού συμμετέχει ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας στον πραγματικό στατισμό της μονάδας, γεγονός που οδηγεί στην υποχρέωση αύξησης του κέρδους ενίσχυσης του ρυθμιστή στροφών, δηλαδή σε μείωση του στατισμού, μείωση η οποία παραμένει εντός αποδεκτών ορίων.

Από την ανάλυση που έγινε προκύπτει πως χωρίς αλλαγή του μηχανισμού καυσίμου, και προφανώς με τη δεδομένη σταθερά χρόνου της ροής του καυσίμου όπως επίσης και με δεδομένη τη ροπή αδράνειας του στροβίλου ισχύος και της γεννήτριας, αλλάζοντας μόνο την διάταξη του συστήματος ελέγχου του καυσίμου μπορούν να επιτευχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ας σημειωθεί, τέλος, το παράδοξο της επιλογής αυτής: επιβεβαιώνεται πως η αρνητική ανάδραση σήματος, παρ' ότι μειώνει το σήμα εισόδου κατά έναν παράγοντα ανάλογο της εξόδου, αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

Επίσης εξετάστηκε μια παραλλαγή του μοντέλου του αεριοστροβίλου GE LM 2500+ η οποία αποσκοπούσε στην μελέτη της ευστάθειας του συστήματος –και ειδικότερα της αεριογόνου– όταν αφαιρεθεί ο ελεγκτής στροφών της αεριογόνου. Οι αποκρίσεις που παρουσιάστηκαν στην υποε-νόνητα 3.4.5 έδειξαν ότι το σύστημα είναι ευσταθές και η ταχύτητα της αεριογόνου προσαρμόζεται ανάλογα με το φορτίο που έχει αναλάβει ο αεριοστροβίλος χωρίς την ανάγκη εξωτερικής ρύθμισης της ταχύτητάς της, μέσω ρύθμισης του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων αέρα εισόδου.

Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε πως η ρύθμιση του ανοίγματος των πτερυγίων δεν επιφέρει άλλο αποτέλεσμα παρά μόνο τη μεταβολή της ταχύτητας της αεριογόνου, σε ενδιάμεσα φορτία. Φάνηκε δηλαδή πως εάν τα οδηγία πτερύγια αέρα εισόδου ανοίξουν, η παροχή θα αυξηθεί άρα θα αυξηθεί το φορτίο του συμπιεστή, άρα, για δεδομένη παροχή καυσίμου θα επιβραδυνθεί όλη η αεριογόνος, ώστε οι μειωμένες της στροφές να μειώσουν την παροχή (η οποία είναι το γινόμενο του ανοίγματος των πτερυγίων επί τις στροφές της αεριογόνου) στα επίπεδα που ήταν πριν την αύξηση του ανοίγματος. Αυτό συμβαίνει ακριβώς επειδή η αεριογόνος είναι εγγενώς ευσταθές σύστημα, οπότε κατ' ουσίαν αυτορρυθμίζεται. Επομένως ο έλεγχος του ανοίγματος της εισόδου αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον έλεγχο της ταχύτητας της αεριογόνου ώστε αυτή να μην μειώνεται σε μερικό φορτίο. Η παροχή του αέρα είναι πάντα αυτή που επιβάλλει η ισορροπία της αεριογόνου, άρα καθορίζεται μόνο από την παροχή καυσίμου.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το μοντέλο του αεριοστροβίλου GE LM 2500+ χωρίς ρύθμιση στροφών αεριογόνου μέσω ελέγχου ανοίγματος πτερυγίων ήταν βηματική αύξηση του φορτίου κατά 20% και βηματική μείωσή του κατά 30%. Έδειξαν πως η διάταξη δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σε τόσο μεγάλες απότομες διακυμάνσεις ηλεκτρικού φορτίου. Στις προσομοιώσεις που επιτελέστηκαν φάνηκε πως η μονάδα μπορεί να ανταπεξέλθει επιτυχώς σε βηματικές μεταβολές του ηλεκτρικού φορτίου της που να φτάνουν ως το 10% του ονομαστικού της.

Και από τις δύο αυτές παραλλαγές του γενικότερου μοντέλου του αεριοστροβίλου GE LM 2500+ φάνηκε πως το σύστημα δεν οδηγείται σε αστάθεια, ούτε στην περίπτωση που η ταχύτητα

της αεριογόνου ελέγχεται, ούτε στην περίπτωση που αφήνεται ελεύθερη, παρ' ότι εμπλέκει έναν κλάδο ο οποίος παρουσιάζει αστάθεια (τον κλάδο ελέγχου υπερθέρμανσης). Αυτό συμβαίνει λόγω του περιορισμένου χρόνου λειτουργίας του ασταθούς κλάδου, και άρα λόγω της σύντομης εμπλοκής του ως λειτουργική συνιστώσα του συστήματος.

6.1.3 Αποκρίσεις αεριοστροβίλου Siemens SGT 700

Το δεύτερο μοντέλο, που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 4, στηρίχθηκε σε στοιχεία που αφορούν τον αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων SGT 700 της εταιρείας Siemens και την γεννήτρια AMS 1120LK 4PBS της εταιρείας ABB και εισήγαγε, πέρα από τον κλάδο ανάδρασης στο σύστημα καυσίμου, διαφορετική εξίσωση περιγραφής του θαλάμου καύσης. Η εξίσωση ισολογισμού ισχύος στον θάλαμο καύσης απαιτεί την εισαγωγή ενός ακόμη μεγέθους, της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, τιμή η οποία αντλήθηκε από την σχετική βιβλιογραφία. Το δεύτερο στοιχείο που εισήχθη σε αυτό το μοντέλο ήταν οι πραγματικές ροπές αδράνειας των περιστρεφόμενων ατράκτων, τόσο της κάθε συνιστώσας της στροβιλομηχανής όσο και της γεννήτριας, για την οποία επίσης βρέθηκε πραγματική τιμή ροπής αδράνειας δρομέα, καθώς και ο μηχανικός βαθμός απόδοσής της.

Η προσομοίωση με το μοντέλο που αναπτύχθηκε για τον αεριοστρόβιλο SGT 700 έδειξε τη σημασία της εισαγωγής μιας πιο ρεαλιστικής αλγεβρικής σχέσης στον θάλαμο καύσης, μέσω της οποίας εισάγονται πραγματικά στοιχεία παροχής και ισχύος στο μοντέλο, φάνηκε όμως επίσης πως οι πραγματικές τιμές αδράνειας δίνουν αναμενόμενα αποτελέσματα.

Εξετάστηκε και πάλι μια παραλλαγή του δεύτερου μοντέλου που αφορούσε τον έλεγχο της αεριογόνου και επιβεβαιώθηκαν τα συμπεράσματα της αντίστοιχης προηγούμενης προσομοίωσης. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την εκδοχή ήταν οι ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση (βηματική αύξηση του φορτίου κατά 20% και βηματική μείωσή του κατά 30%) αλλά εδώ, καθώς οι ροπές αδράνειας ήταν μικρότερες φάνηκε πως η μονάδα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να καταλήξει σε μόνιμη κατάσταση. Και σε αυτή την περίπτωση φάνηκε πως η μέγιστη βηματική μεταβολή ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να αναλάβει η μονάδα δεν μπορεί να φτάσει το 20% του ονομαστικού της φορτίου. Καθώς στην πρώτη προσομοίωση δεν υπήρχαν πραγματικά στοιχεία για την ροπή αδράνειας των στρεφόμενων ατράκτων φάνηκε ο εξαιρετικά σημαντικός ρόλος που επιτελούν σε μια προσομοίωση. Αλλάζοντας τις τιμές των ροπών αδράνειας η συμπεριφορά του συστήματος μεταβάλλεται κατά πολύ.

6.1.4 Αποκρίσεις σταθμού συνδυασμένου κύκλου

Το τρίτο μοντέλο, που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 5, αφορούσε σταθμό συνδυασμένου κύκλου,

όπου ο αεριοστρόβιλος είναι διάταξη διδύμων ατράκτων. Η κατ' αρχάς βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι ενώ τέτοιοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου υπάρχουν ήδη (π.χ. εργοστάσιο ηλεκτρικής ισχύος Sochinskaya, στο Σότσι της Ρωσίας, ισχύος 158 MW), αυτή δεν είναι μια διαδεδομένη τεχνική επιλογή.

Αφού στις προηγούμενες προσομοιώσεις διαπιστώθηκε πως ο έλεγχος του αέρα σε αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, δεν τοποθετήθηκε ελεγκτής θερμοκρασίας καυσαερίων εξόδου, τα οποία, επομένως, δεν διατηρούν σταθερή τιμή. Η θερμοκρασία των καυσαερίων μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο του αεριοστροβίλου άρα μεταβάλλεται περισσότερο η παραγωγή ισχύος από τον ατμοπαραγωγό.

Όπως φάνηκε από τη διαδικασία ρύθμισης του μοντέλου, υπάρχουν μόνο δύο παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν, ο στατισμός του ρυθμιστή στροφών και το κέρδος του κλάδου ανάδρασης του σήματος καυσίμου. Όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις του Κεφ. 5, το σύστημα αυτό ρυθμίζεται δύσκολα και οι ρυθμίσεις είτε έδιναν πολλές ταλαντώσεις και μικρό σφάλμα συχνότητας, ή το αντίθετο. Επίσης, φάνηκε πως δεν μπορεί να επιτευχθεί μείωση της μεταβατικής βύθισης της ηλεκτρικής συχνότητας.

Παρατηρήθηκε ακόμη πως, σε σύστημα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου, σε περίπτωση μείωσης του φορτίου του αεριοστροβίλου η θερμοκρασία των καυσαερίων του αεριοστροβίλου θα μειωθεί. Εάν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας των καυσαερίων, για να μην μειωθεί η T_{16} θα πρέπει να μειωθεί *περισσότερο* η παροχή αέρα απ' όσο θα μειωνόταν χωρίς την απαίτηση σταθερής T_{16} . Η παραγωγή ισχύος όμως στον ατμοστρόβιλο δίνεται από την (5.15), απ' όπου φαίνεται πως ακόμη και εάν παραμείνει σταθερή η T_{16} , η μείωση της παροχής καυσαερίων W_{ex} θα αντισταθμίσει, μερικώς, το όφελος από την διατήρηση της T_{16} . Χωρίς έλεγχο θερμοκρασίας όμως η παροχή δεν θα μειωθεί τόσο. Αυτό είναι ένα ζήτημα που αφορά διατάξεις συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου και θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Τέλος, ρυθμίστηκε κατάλληλα το μοντέλο που αξιοποιήθηκε από την βιβλιογραφία, το οποίο αναπαριστά μονάδα συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο απλής ατράκτου ακολουθώντας τη διαδικασία ρύθμισης παραμέτρων των μοντέλων που περιγράφηκαν στα Κεφάλαια 3, 4 και 5. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, των μοντέλων συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο είτε απλής ατράκτου είτε διδύμων ατράκτων, έδειξε κάτι που πιθανώς να ήταν αναμενόμενο, ότι η προσαρμογή της διάταξης διδύμων ατράκτων στο νέο φορτίο είναι πιο σύντομη, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερες ταλαντώσεις και μεγαλύτερη μεταβατική βύθιση συχνότητας. Μπορούμε εύλογα να συμπεράνουμε πως η χρησιμοποίηση αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων σε μονάδα συνδυασμένου κύ-

κλου δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική επιλογή. Οι αεριοστροβίλοι διδύμων ατράκτων είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιηθούν σε διάταξη ανοιχτού κύκλου, ως μονάδες αιχμής δηλαδή, αφού σε τέτοια διάταξη μπορούν να αναλάβουν καλύτερα απότομες μεταβολές φορτίου.

6.2 Προοπτικές

Αρχικά, η πρώτη κατεύθυνση που εμφανίζεται είναι η αξιοποίηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία, με τροποποιημένες παραμέτρους, ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά μονάδων σε λειτουργία –ή νέων μονάδων– σε διάφορα ενδεχόμενα διαταραχής φορτίου. Θα πρέπει δηλαδή να προσδιοριστούν τα όρια ανάληψης φορτίου από κάθε μονάδα αλλά και σε περισσότερο ρεαλιστικά σενάρια, κατά τα οποία δεν θα υφίστανται βηματικές μεταβολές φορτίου αλλά γραμμικές.

Μια άλλη κατεύθυνση συνέχισης είναι η εξεύρεση πραγματικών δεδομένων μεταβατικής συμπεριφοράς αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων. Αυτά τα δεδομένα θα επιτρέψουν κυρίως την σύγκριση των προσομοιώσεων, αλλά και την καλύτερη προσαρμογή των παραμέτρων τους, όπως π.χ. των σταθερών χρόνου των επιμέρους διατάξεων. Γενικότερα μάλιστα, θα πρέπει να ελεγχθούν οι σταθερές χρόνου κάθε συνιστώσας και να μελετηθούν ειδικά οι μετρητικές διατάξεις θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά τα μοντέλα και η επιρροή τους στην απόκριση του συστήματος.

Από την παρούσα εργασία απορρέει επίσης η ανάγκη για βαθύτερη μελέτη του συστήματος καυσίμου. Εκτός του ότι φάνηκε να κατέχει σημαντικότερο ρόλο στην μεταβατική απόκριση του συστήματος, το απλό κέρδος στην ανάδραση του σήματος καυσίμου που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία φαίνεται να είναι μια αρκετά απλοποιητική παραδοχή. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ανάδραση η οποία θα ενεργοποιείται μόνο κατά τα μεταβατικά φαινόμενα και στην μόνιμη κατάσταση θα απενεργοποιείται, άρα θα έχει μια πιο σύνθετη συνάρτηση μεταφοράς.

Τέλος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μοντέλα αεριοστροβίλων τα οποία θα στηρίζονται όχι σε αλγεβρικές εξισώσεις, αλλά θα πραγματοποιούν τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς αξιοποιώντας πραγματικά πεδία χαρακτηριστικών (χάρτες) των στροβιλομηχανών που εξετάζονται. Να αναφέρουμε εδώ ενδεικτικά το πρόγραμμα προσομοίωσης στροβιλομηχανών *Proosis* [27], το οποίο μπορεί μάλιστα να συνεργαστεί με την Matlab. Τα πεδία χαρακτηριστικών που κατασκευάστηκαν για τον αεριοστροβίλο SGT 700 μέσω του λογισμικού *Proosis* παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ, ενώ τα διαγράμματα βαθμίδων κάθε λογισμικού (του Simulink και του Proosis), τόσο σε συμβολικό όσο και σε προγραμματιστικό επίπεδο παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ. Σκοπός μιας τέτοιας προσομοίωσης θα πρέπει να είναι η προσαρμογή των μοντέλων που αναπτύσσονται σε περιβάλλον Matlab – Simulink (κυρίως των σταθερών χρόνου τους) ώστε να καταστούν περισσότερο ρεαλιστι-

κά, καθώς η περιγραφή των πολυτροπικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα σε έναν αεριοστρόβιλο μέσω χρήσης αναλυτικών εξισώσεων δεν είναι επαρκής.

Από την άλλη πλευρά όμως, δεν θα πρέπει να χαθεί η ευχρηστία των μοντέλων της Matlab, είτε κατά απλή επισκόπησή τους είτε κατά την ενσωμάτωσή τους σε μεγαλύτερα μοντέλα. Μια τέταρτη κατεύθυνση θα μπορούσε να είναι η ενσωμάτωση των μοντέλων που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε μεγαλύτερα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την μεταβατική απόκριση ολόκληρων ΣΗΕ και όχι μόνο μεμονωμένων μονάδων.

Από εκεί και μετά υπάρχουν πάρα πολλές παραλλαγές που μπορούν να μελετηθούν. Αυτές αφορούν είτε το ηλεκτρικό μέρος, όπως λειτουργία αεριοστροβιλικής μονάδας διδύμων ατράκτων μαζί με ΑΠΕ (μικρά ΣΗΕ), συνδυασμένος κύκλος με περισσότερες από μια γεννήτριες κ.λπ., είτε το μηχανικό μέρος, όπως χρήση ανακομιστών θερμότητας με αυτόνομους καυστήρες, συμπιεστές με πρόψυξη αέρα εισόδου, θάλαμοι καύσης με έγχυση νερού, συμπιεστές με έγχυση ατμού κ.λπ.

Βιβλιογραφία

- [1] Ζήρας Χ., “Ανάπτυξη μοντέλων αεριοστροβίλων για μελέτες ευστάθειας ΣΗΕ”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2009
- [2] Μάντζαρης Ι., “Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2005
- [3] Μάντζαρης Ι., “Απλοποίηση Μοντέλων ΣΗΕ για την Ανάλυση Ταλαντώσεων Ισχύος σε Μεγάλες Διασυνδέσεις και Σχεδίαση Σταθεροποιητών”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2013
- [4] Μαθιουδάκης Κ., “Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων”, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα 2009
- [5] Παπαηλιού Κ., Μαθιουδάκης Κ., Γιαννάκογλου Κ., “Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές”, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- [6] Cohen H., Rogers G., Saravanamuttoo H., “Gas Turbine Theory”, εκδ. Longman group, London 1996
- [7] Walsh P., Flecher P., “Gas Turbine Performance”, εκδ. Blackwell, Bristol 2004
- [8] Βουρνάς Κ., Παπαδιάς Β., Ντελκής Κ., “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας – Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, εκδ. Συμμετρία, 2010
- [9] Βουρνάς Κ., “Βελτιστοποίηση της Δυναμικής Ευστάθειας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με Ρύθμιση των Διατάξεων Ελέγχου των Μονάδων”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 1984
- [10] Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ., “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, εκδ. Συμμετρία, Αθήνα 2010
- [11] Νομικός Β., “Συστηματική Σχεδίαση Σταθεροποιητών σε Συστήματα με Σύγχρονες και Ασύγχρονες Μηχανές”, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2005
- [12] Κανδηλώρος Ι., “Χρήση Αεροφυλακίου σε Αεριοστροβιλικές Μονάδες για Ρύθμιση Συχνότητας και Αποθήκευση Ενέργειας σε Ηλεκτρικά Συστήματα με Μεγάλη Αιολική Διείσδυση – Εφαρμογή στο Αυτόνομο Σύστημα της Ρόδου”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2012
- [13] Dorf R., Bishop R., “Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου”, εκδ. Τζιόλα, 2012
- [14] Παρασκευόπουλος Π., “Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, τόμος Α: Θεωρία”, εκδ. Π. Ν. Παρασκευόπουλος, Αθήνα 2007
- [15] DiStefano J., Stubberud A., Williams I., “Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Αναλογικών και Ψηφιακών Συστημάτων”, εκδ. Τζιόλα, 2004
- [16] Μαλατέστας Π., “Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου”, εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2011

-
- [17] Çengel Y., Boles M., “Θερμοδυναμική για Μηχανικούς”, εκδ. Τζιόλα, 2003
- [18] Κακαράς Ε. “Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί”, εκδ. Φούντας, 2005
- [19] Μαθιουλάκης Δ., Αναγνωστόπουλος Ι., Τουζόπουλος Δ., “Βιομηχανική Ρευστομηχανική”, εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα 2006
- [20] Κωστόπουλος Θ., “Οδοντώσεις και μειωτήρες στροφών”, εκδ. Συμεών, χ.χ.έ.
- [21] Κοκολάκης Γ., Φουσκάκης Δ., “Στατιστική Θεωρία και Εφαρμογές”, εκδ. Συμεών, 2009
- [22] Καδιανάκης Ν., Καρανάσιος Σ., “Γραμμική Άλγεβρα Αναλυτική Γεωμετρία και Εφαρμογές”, Αθήνα 2008
- [23] Kakimoto N., Baba K., “Performance of Gas – Turbine Based Plants During Frequency Drops”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No 3, August 2003
- [24] Rowen W., “Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines”, ASME paper 83-GT-63, October 1983
- [25] Undrill J., Garmendia A., “Modeling of Combined Cycle Power Plants in Grid Simulation Studies”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, 2001, p. 657-663, vol. 2
- [26] Qusai Z Al-Hamdan, Munzer S Ebaid, “Modeling and Simulation of a Gas Turbine Engine for Power Generation”, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 128 p. 302-311, April 2006
- [27] Alexiou A., “Introduction to Gas Turbine Modelling with PROOSIS”, Empresarios Agrupados Internacional, April 2014
- [28] Προσωπική αλληλογραφία, Siemens
- [29] Προσωπική αλληλογραφία, ABB
- [30] General Electric, “Industrial Aero-derivative Gas Turbines”, Cincinnati, Ohio, August 2003
- [31] CIGRE Technical Brochure, “Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined – Cycle Power Plants”, April 2003
- [32] Μηλιός Ι., “Εκπαίδευση και Εξουσία”, εκδ. Κριτική, 1981
- [33] Κάτσικας Χ., Σωτήρης Π., “Η Αναδιάρθρωση του Ελληνικού Πανεπιστημίου”, εκδ. Σαββάλας, Μάρτιος 2003

Παράρτημα Α: Κώδικες Matlab

Επιλέχθηκε η ενδεικτική παρουσίαση των αρχείων προσομοίωσης της διάταξης συνδυασμένου κύκλου με αεριοστρόβιλο διδύμων ατράκτων, καθώς θεωρήθηκαν τα περισσότερο αντιπροσωπευτικά όσων αναπτύχθηκαν.

Αρχεία υπολογισμού ειδικών θερμοχωρητικοτήτων

Cp800.m:

```
function y = cp800(x)
y=1018.9-0.13784*x+1.9843*10^(-4)*x.^2+4.2399*10^(-7)*x.^3-
3.7632*10^(-10)*x.^4;
y=y/1000;
% y = Cp
% x = T
% for temperatures from 200 to 800K.
```

Cp2200.m

```
function y = cp2200(x)

y=798.65+0.5339*x-2.2882*10^(-4)*x.^2+3.7421*10^(-8)*x.^3;
y=y/1000;

% y = Cp
% x = T
% for temperatures from 800 to 2200K.
```

Αρχικοποίηση αρχείου προσομοίωσης

initial_data.m

```
%% Power / time settings
clear;
Pe=0.9;
P_dist=0.1;
step_time=10;
P_inv_dist=0;

%% Thermodynamic data - Siemens
nc=0.88;          params.nc=nc;
nt1=0.86;        params.nt1=nt1;
%% nt2=0.92; ypologizetai analytika!!!
pc_nom=18.5;     params.pc_nom=pc_nom;
Tt3_nom=703.15;  params.Tt3_nom=Tt3_nom;
Tt4_nom=1461.15; params.Tt4_nom=Tt4_nom;
Tt6_nom=806.15;  params.Tt6_nom=Tt6_nom;
Mex_nom=94;      params.Mex_nom=Mex_nom;

%% Momenta of inertiae data - Siemens
```

```

Jgg=60.8; % J gas generator
Ngg=9800;
Jpt=106.3; % J power turbine
Npt=6516;
Jgen=2652.7; % J electrical generator
Jgear_wheel=1601;
Jquill_shaft=8;
Ngen=1500;
Jgt_eg=(Npt/Ngen)^2*Jpt+(Jgen+Jgear_wheel+Jquill_shaft);
% ayta einai mazi me thn adraneia ths gennhtrias
Jst=8250;
Nst=6516;
Jst_cor=(Nst/Ngen)^2*Jst;

%% Thermodynamic calculations for nominal temperature values
qf=48120;                                params.qf=qf;

Ra=0.287;                                params.Ra=Ra;
Cpc=cp800(500);                           params.Cpc=Cpc;
g1=(Cpc/(Cpc-Ra));
Cpt1=cp2200(1200);                         params.Cpt1=Cpt1;
g2=(Cpt1/(Cpt1-Ra));
Cpt2=cp2200(900);                           params.Cpt2=Cpt2;
g3=(Cpt2/(Cpt2-Ra));
n_mech_c=0.99;
params.n_mech_c=n_mech_c;
n_mech_t=0.99;
params.n_mech_t=n_mech_t;
n_mech_g=0.9833;

Ma_nom=Mex_nom/(1+(Cpc*Tt3_nom-Cpt1*Tt4_nom)/(Cpt1*Tt4_nom-qf));
                                                                    params.Ma_nom=Ma_nom;
Mf_nom=Mex_nom-Ma_nom;
                                                                    params.Mf_nom=Mf_nom;

Tt2_nom=Tt3_nom*nc/(nc-1+pc_nom^(Ra/Cpc));
params.Tt2_nom=Tt2_nom;
Tt5_nom=Tt4_nom-((Cpc*Ma_nom)*(Tt3_nom-Tt2_nom))/(
(Cpt1*Mex_nom*n_mech_t*n_mech_c));

params.Tt5_nom=Tt5_nom;
Tt5_is_nom=Tt4_nom-(Tt4_nom-Tt5_nom)/nt1;
pt1=(Tt4_nom/Tt5_is_nom)^(Cpt1/Ra);
                                                                    params.pt1=pt1;
pt2=pc_nom/pt1;
                                                                    params.pt2=pt2;
Tt6_is_nom=Tt5_nom*((1/pt2)^(Ra/Cpt2));
% Tt6_nom=Tt5_nom-nt2*(Tt5_nom-Tt6_is_nom);
params.Tt6_nom=Tt6_nom;
nt2=(Tt5_nom-Tt6_nom)/(Tt5_nom-Tt6_is_nom);
                                                                    params.nt2=nt2;

%% Normalization powers
P_gt=n_mech_t*Mex_nom*Cpt2*(Tt5_nom-Tt6_nom);
P_st=20000;

```

```

P_nom=P_gt+P_st;
Pe_op=P_nom*Pe;

%% Momenta of inertiae calculations
Hgg=(0.5*Jgg*(2*pi*Ngg/60)^2)/(P_nom*1000);
Hgt=(0.5*Jgt_eg*(2*pi*Ngen/60)^2)/(P_nom*1000);
Hst=(0.5*Jst*(2*pi*Ngen/60)^2)/(P_nom*1000);
H_tot=Hgg+Hgt+Hst;

params.P_nom=P_nom;
params.P_gt=P_gt;
params.P_st=P_st;

%% HRSG data
n_exch=0.8;
params.n_exch=n_exch;
Q_in=Mex_nom*Cpt2*Tt6_nom;
Q_out=Q_in*n_exch;
n_tot_st=P_st/Q_out;
params.n_tot_st=n_tot_st;

%% CONTROL DATA
R=0.02;
Kf=0.66;
offset=0.01; % minimum functional.
T_atc=2.3; % Analog temp controller (it can also be 3.3), former
T5, 2.3
Fd_max=1.3;
Fd_min=0;
Tc_max=1.3;
Tc_min=0;

%% Time constants
% 11 + 2 moments of inertia
T_v=0.05; % fuel valve position controller
T_f=0.4; % fuel system. It was 0.1.
T_cd_hp=0.2; % GG
T_cd_lp=0.2; % PT
T_b=20; % boiler storage time constant of waste heat
recovery boiler
T_m=5; % tube metal heat capacitance time constant of waste
heat recovery boiler
T_gov=0.1; % Governor, former T_g
T_hs=15; % heat shield, former T3
T_ts=2.5; % temperature sensor, former T4
T_t=0.4699; % Ratio of integration, PI controller

%% Minimum fuel constants
K2=0.77;
K3=0.23;

```

```

%% Thermometer dividing ratios
K4=0.8;
K5=0.2;

%% Functional values
in_units=initial_solve(Pe, params);

%% Simulink values assignment
Tt3_op_K=in_units(1);
Tt4_op_K=in_units(2);
Tt5_op_K=in_units(3);
Tt6_op_K=in_units(4);
Mf_op=in_units(5);
Ma_op=in_units(6);
Egt_op_kW=in_units(7);
Est_op_kW=in_units(8);
pt1_op=in_units(9);
pt2_op=in_units(10);
nc_op=in_units(11);
nt1_op=in_units(12);
nt2_op=in_units(13);
g_op=in_units(14);
N1_op=in_units(15);

Tt3_op=in_units(1)/Tt3_nom;
Tt4_op=in_units(2)/Tt4_nom;
Tt5_op=in_units(3)/Tt5_nom;
Tt6_op=in_units(4)/Tt6_nom;
Wf_op=in_units(5)/Mf_nom;
Wa_op=in_units(6)/Ma_nom;
Egt_op=in_units(7)/P_nom; % initializing value
Egt_op2=in_units(7)/P_gt; % monitoring value
Est_op=in_units(8)/P_nom; % initializing value
Est_op2=in_units(8)/P_st; % monitoring value

%% Status monitoring
fprintf('Tt3 = %4.2f',Tt3_op_K); fprintf(' K,');
fprintf('      = %4.4f', Tt3_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('Egt = %4.2f',Egt_op_kW); fprintf(' kW,');
fprintf(' = %4.4f', Egt_op); fprintf(' pu on plant power\n');
fprintf('Tt4 = %4.2f',Tt4_op_K); fprintf(' K,');
fprintf('      = %4.4f', Tt4_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('      = %4.4f',Egt_op2);
fprintf(' pu on self power\n');
fprintf('Tt5 = %4.2f',Tt5_op_K); fprintf(' K,');
fprintf('      = %4.4f', Tt5_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('Est = %4.2f',Est_op_kW); fprintf(' kW,');
fprintf(' = %4.4f', Est_op); fprintf(' pu on plant power\n');
fprintf('Tt6 = %4.2f',Tt6_op_K); fprintf(' K,');
fprintf('      = %4.4f', Tt6_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('      = %4.4f',Est_op2);

```

```

fprintf(' pu on self power\n');
fprintf(' Mf = %4.2f',Mf_op); fprintf(' kg/s,');
fprintf('   = %4.4f', Wf_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('plant operating at %5.1f', Egt_op_kW+Est_op_kW);
fprintf(' kW\n');
fprintf(' Ma = %4.2f',Ma_op);
fprintf(' kg/s,'); fprintf('   = %4.4f', Wa_op); fprintf(' pu | ');
fprintf('plant operating at %1.2f', Pe); fprintf(' pu\n');
fprintf(' N1 = %4.4f', N1_op); fprintf(' pu\n')
fprintf(' g = %4.4f', g_op); fprintf(' pu\n')
fprintf(' nc = %4.4f', nc_op); fprintf(' pu          | ');
fprintf(' pt1 = %4.4f',pt1_op); fprintf(' pu\n');
fprintf('nt1 = %4.4f', nt1_op); fprintf(' pu          | ');
fprintf(' pt2 = %4.4f',pt2_op); fprintf(' pu\n');
fprintf('nt2 = %4.4f', nt2_op); fprintf(' pu\n');

% 6.4f in the formatSpec input specifies that the second value in
each
% line of output is a floating-point number with a field width
% of six digits, including four digits after the decimal point.
% \n is a control character that starts a new line.

```

initial_solve.m

```

function [units]=initial_solve(Pe, params)

P_nom=params.P_nom;
nc_nom=params.nc;
nt1_nom=params.nt1;
nt2_nom=params.nt2;
pt1_nom=params.pt1;
pc_nom=params.pc_nom;
Tt2_nom=params.Tt2_nom;
Ra=params.Ra;
Cpc=params.Cpc;
Cpt1=params.Cpt1;
Cpt2=params.Cpt2;
n_mech_t=params.n_mech_t;
n_mech_c=params.n_mech_c;
n_tot_st=params.n_tot_st;
n_exch=params.n_exch;
Ma_nom=params.Ma_nom;
Mf_nom=params.Mf_nom;
qf=params.qf;
%%
if (Pe>1.0 || Pe<0.5)
    Y = zeros(13,1);
    g_op=0;
    N1_op=0;
    disp('Power out of functional limits');
else

```

```

    x0=[700; 1460; 1100; 750; 2; 90; 30000; 20000; 4; 4; 0.8; 0.8;
0.8];
    [Y]=fsolve('solve_all',x0,
    [],Tt2_nom,nc_nom,nt1_nom,nt2_nom,...
                pc_nom,pt1_nom,Ra,Cpc,Cpt1,Cpt2,...

n_mech_t,n_mech_c,n_tot_st,n_exch,Pe,P_nom,Ma_nom,Mf_nom,qf);
    g_op=1;
    N1_op=Y(6)/Ma_nom;
end

    [units]=[ Y(1); % Tt3
              Y(2); % Tt4
              Y(3); % Tt5
              Y(4); % Tt6
              Y(5); % Mf
              Y(6); % Ma
              Y(7); % Egt
              Y(8); % Est
              Y(9); % pt1
              Y(10); % pt2
              Y(11); % nc
              Y(12); % nt1
              Y(13); % nt2
              g_op; % g
              N1_op];% N1

end
% Flows in [kg/s], temperatures in [K], powers in [kW].

```

solve_all.m

Το αρχείο αυτό αποτελεί την συνάρτηση την οποία επιλύει αριθμητικά, στο γονικό αρχείο, η συνάρτηση fsolve της Matlab. Συμπεριλαμβάνονται ως άγνωστοι οι λόγοι πίεσης και οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης καθώς αρχικά χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές συναρτήσεις οι οποίες τους προσδιόριζαν για κάθε επίπεδο λειτουργίας. Το αποτέλεσμα όμως δεν ήταν ικανοποιητικό οπότε τελικώς θεωρήθηκαν αμφότεροι σταθεροί.

```

function
F=solve_all(x,Tt2_nom,nc_nom,nt1_nom,nt2_nom,pc_nom,pt1_nom,Ra,Cpc
,Cpt1,Cpt2,n_mech_t,n_mech_c,n_tot_st,n_exch,Pe,P_nom,Ma_nom,qf)

Tt3_op=x(1);
Tt4_op=x(2);
Tt5_op=x(3);
Tt6_op=x(4);
Mf=x(5);
Ma=x(6);
Egt=x(7);
Est=x(8);

```

```

pt1_op=x(9);
pt2_op=x(10);
nc_op=x(11);
nt1_op=x(12);
nt2_op=x(13);

F =[Pe*P_nom-Est-Egt;
Est-n_tot_st*n_exch*Cpt2*(Ma+Mf)*Tt6_op;
Egt-(Ma+Mf)*(Tt5_op-Tt6_op)*Cpt2*n_mech_t;
Tt3_op-Tt2_nom*(1+((pc_nom*(Ma/Ma_nom))^(Ra/Cpc)-1)/(nc_op));
(1+(Mf/Ma))*Cpt1*Tt4_op - Cpc*Tt3_op - (Mf/Ma)*qf;
n_mech_t*Cpt1*(Ma+Mf)*(Tt4_op-Tt5_op)-Cpc*Ma*(Tt3_op-
Tt2_nom)/n_mech_c;
Tt5_op-Tt4_op*(1-nt1_op*(1-(1/pt1_op)^(Ra/Cpt1)));
Tt6_op-Tt5_op*(1-nt2_op*(1-(1/pt2_op)^(Ra/Cpt2)));
nt1_op - nt1_nom;
pt1_op - pt1_nom;
pt2_op - (pc_nom*((Ma+Mf)/(Ma_nom+Mf_nom))/pt1_op;
nc_op/nt1_op - nc_nom/nt1_nom;
nt1_op/nt2_op - nt1_nom/nt2_nom ];

```

Εκτέλεση και γραμμικοποίηση της προσομοίωσης, απεικόνιση αποτελεσμάτων

Execute.m

```

% Initialization and simulation
% clear;
% clc;
initial_data;
t_sim=80;
sim('CC',t_sim);

%% Linearization and modal extraction
G = linmod('CC');
[wn,zeta,val] = damp(G.a);
tau = 1./(zeta.*wn);
T=(2*pi)./wn;
f=1./T;
re_val=real(val);
im_val=imag(val);
mat_size=size(G.a,1);
teliko=zeros(mat_size,7);
for k=1:mat_size
teliko(k,1)=re_val(k);
teliko(k,2)=im_val(k);
teliko(k,3)=zeta(k);
teliko(k,4)=T(k);
teliko(k,5)=f(k);
teliko(k,6)=wn(k);
teliko(k,7)=tau(k);
end

```

```

%% Participation factors
[U,D]=eig(G.a); % right eigenvectors, eigenvalues
U_max=zeros(12,1);
U_norm=zeros(12,12);
for q=1:12
    U_max(q)=U(1,q);
    for p=1:12
        if ( abs(U_max(q)) < abs(U(p,q)) )
            U_max(q)=U(p,q);
        end
    end
    for r=1:12
        U_norm(r,q)=(U(r,q))./(U_max(q));
    end
end

V=inv(U)'; % left eigenvectors, not needed in this form
V_norm=inv(U_norm)';
PF=V_norm.*U_norm; % participation factors matrix (element-to-
                    element multiplication)

PF_max=zeros(12,1);
PF_norm=zeros(12,12);
for q=1:12
    PF_max(q)=U(1,q);
    for p=1:12
        if ( abs(PF_max(q)) < abs(PF(p,q)) )
            PF_max(q)=PF(p,q);
        end
    end
    for r=1:12
        PF_norm(r,q)=(PF(r,q))./(PF_max(q));
    end
end

PF_abs = abs(PF_norm); % norm of normalized pf matrix
PF_angle = angle(PF_norm)*180/pi;
U_abs=abs(U_norm);
U_angle=angle(U_norm)*180/pi;
V_abs=abs(V_norm);
V_angle=angle(V_norm)*180/pi;
%% Graphs

t=matrix(:,1);
Tc=matrix(:,2);
Fd=matrix(:,3);
Fc=matrix(:,4);
Wa=matrix(:,5);
Wf=matrix(:,6);
Tt4=matrix(:,7);
Tt5=matrix(:,8);
Tt6=matrix(:,9);
N1=matrix(:,10);

```



```

    N2=matrix(:,11);
    Pe=matrix(:,12);
    Pm=matrix(:,13);
    Pgt=matrix(:,14);
    Pst=matrix(:,15);
    f=matrix(:,16);
%
figure(1);
plot(t,Tc,'-', t,Fd,'--', 'Color',[0 0 0] );
hold on
plot(t,Fc,'LineWidth',1.5, 'Color',[0 0 0]);
% axis([210 230 1.25 1.35])
% axis([125 145 -0.2 0.2])
% axis([0 t_sim 0.5 5])
% axis([0 150 -3.5 1.5])
axis([0 t_sim 0.8 1.8])
xlabel('time [s]')
ylabel('Tc,Fd, lowest value [pu]')
legend('Tc','Fd','lowest');
grid on
%
figure(2);
plot(t,Wf,'-', 'LineWidth',1, 'Color', [0 0 0]);
% axis([0 150 0.65 1])
axis([0 t_sim 0.9 1.1])
xlabel('time [s]');
ylabel('Fuel flow [pu]');
grid on
%
figure(3);
plot(t,Tt4,'LineWidth',1, 'Color', [0 0 0]);
axis([0 t_sim 0.96 1.08])
xlabel('time (s)');
ylabel('Temperature [pu]');
legend('T4');
grid on

figure(4);
plot(t,Tt5,'-', 'LineWidth',1, 'Color', [0 0 0]);
axis([0 t_sim 0.96 1.08])
xlabel('time (s)');
ylabel('Temperature [pu]');
legend('T5');
grid on

figure(5);
plot(t,Tt6,'-', 'LineWidth',1, 'Color', [0 0 0]);
axis([0 t_sim 0.96 1.08])
xlabel('time (s)');
ylabel('Temperature [pu]');
legend('T6');

```

```

grid on

figure(6);
plot(t,Pm,'-', t,Pe,'-.', 'Color', [0 0 0]);
% axis([0 t_sim 0.75 1.05])
axis([0 t_sim 0.85 1.1])
xlabel('time [s]');
ylabel('power [pu]');
legend('Pm', 'Pe');
%
figure(7);
plot(t,Pm,'-', t,Pgt,'--', t,Pst,'-.', 'Color', [0 0 0]);
% axis([0 t_sim 0.75 1.05])
axis([0 t_sim 0.3 1.1])
xlabel('time [s]');
ylabel('power [pu]');
legend('Pm', 'Pgt', 'Pst');
grid on
%
figure(8);
plot(t,N1,'-', 'Color', [0 0 0]);
% axis([0 t_sim 0.75 0.95])
% axis([0 150 0.75 1.0])
axis([0 t_sim 0.9 1.05])
xlabel('time (s)');
ylabel('rpm [pu]');
title('Gas generator rpm');
grid on
hold on
%}
figure(5);
plot(t,f, '-', 'Color', [0 0 0], 'LineWidth', 1.0);
% axis([0 t_sim 46 50.1])
% axis([0 t_sim 48.5 50.1])
axis([0 t_sim 49 50.1])
xlabel('time [s]');
ylabel('Frequency [Hz]');
title('Combined cycle response');
grid on
hold on

%% status monitoring
fsm=size(matrix(:,14),1);
ism=ceil(3*fsm/4);
final_value=mean(matrix(ism:fsm,16));
final_deviation=std(matrix(ism:fsm,16));
min_value=min(matrix(1010:fsm,16));
max_value=max(matrix(1010:fsm,16));
fin_gg_speed=mean(matrix(ism:fsm,10));
fprintf(' final frequency = %4.2f Hz\n',final_value);
fprintf(' final deviation = %4.2f\n',final_deviation);

```

```

fprintf('minimum frequency = %4.2f Hz\n',min_value);
fprintf('maximum frequency = %4.2f Hz\n',max_value);
fprintf('    final GG speed = %4.4f pu\n',fin_gg_speed);

```

Απεικόνιση διαγραμμάτων μόνιμης κατάστασης

steady_states_map.m

Προτού εκτελεστεί αυτό το αρχείο πρέπει να θεωρηθεί σχόλιο (%) η ισχύς στο αρχείο initial_data.m. Η ισχύς λειτουργίας στην προσομοίωση ορίζεται κάθε φορά από αυτό το αρχείο.

```

clear m;
m=1
per_unit=zeros(51,14);
for Pe=0.5:0.01:1
    params.Pe=Pe;
    initial_data;
    per_unit(m,1)=Pe;
    per_unit(m,2)=in_units(1)/Tt3_nom; %Tt3
    per_unit(m,3)=in_units(2)/Tt4_nom; %Tt4
    per_unit(m,4)=in_units(3)/Tt5_nom; %Tt5
    per_unit(m,5)=in_units(4)/Tt6_nom; %Tt6
    per_unit(m,6)=in_units(5)/Mf_nom; %Mf
    per_unit(m,7)=in_units(6)/Ma_nom; %Ma
    per_unit(m,8)=in_units(7)/P_gt; %Egt
    per_unit(m,9)=in_units(8)/P_st; %Est
    per_unit(m,10)=in_units(9); %pt1
    per_unit(m,11)=in_units(10); %pt2
    per_unit(m,12)=in_units(11); %nc
    per_unit(m,13)=in_units(12); %nt1
    per_unit(m,14)=in_units(13); %nt2
    per_unit(m,15)=g_op; %g
    per_unit(m,16)=N1_op; %N1
    m=m+1
end

Pe=per_unit(:,1);
Tt3=per_unit(:,2);
Tt4=per_unit(:,3);
Tt5=per_unit(:,4);
Tt6=per_unit(:,5);
Wf=per_unit(:,6);
Wa=per_unit(:,7);
Egt=per_unit(:,8);
Est=per_unit(:,9);
pt1=per_unit(:,10);
pt2=per_unit(:,11);
nc=per_unit(:,12);
nt1=per_unit(:,13);
nt2=per_unit(:,14);
g=per_unit(:,15);
Ngg=per_unit(:,16);

```

```

figure(1);
plot(Pe,Tt3,'-',Pe,Tt4,'--', 'Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 0.8 1.05])
xlabel('Power [pu]')
ylabel('Temperatures [pu]')
legend('T_3, T_6','T_4, T_5')
grid on
%
figure(2);
plot(Pe,Tt5,'--',Pe,Tt6, 'Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 0.6 1.1])
xlabel('Power [pu]')
ylabel('Temperatures [pu]')
legend('Tt5', 'Tt6')
grid on

figure(3);
plot(Pe,Ngg,'-', Pe,Wf,'--', 'Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 0.5 1.1])
xlabel('Power [pu]')
ylabel('Air and fuel flow [pu]')
legend('N_{gg} = W_a','W_f')
grid on

figure(4);
plot(Pe,nc,'-',Pe,nt1,'-.',Pe,nt2,'--','Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 0.75 0.9])
xlabel('Power [pu]')
ylabel('ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης')
legend('η_C','η_{T1}','η_{T2}')
grid on

figure(5);
plot(Pe,pt1,'--',Pe,pt2,'Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 2 5.5])
xlabel('Power [pu]')
ylabel('pressures')
legend('π_1','π_2')
grid on

figure(6);
plot(Pe,Est,'--',Pe,Egt,'Color', [0 0 0]);
axis([0.5 1 0.4 1.1])
xlabel('Plant Power [pu]')
ylabel('part power, corrected on self nominal')
legend('E_{steam}','E_{gas}')
grid on
%
```

Ρύθμιση παραμέτρων

optimization_SGT_SST.m

Για να λειτουργήσει αυτό το αρχείο πρέπει να οριστούν ως σχόλια (%) οι τιμές των παραμέτρων που ρυθμίζονται στο αρχείο initial_data.m, δηλαδή, εν προκειμένω, ο στατισμός, R, και το κέρδος βρόχου ανάδρασης συστήματος καυσίμου, K_f.

```
% Standard deviation of output values, mean and zeta.
clear r k;
r=1;
opt_GT_ST_dg=zeros(606,7);
for R=0.02:0.001:0.025 % 6
    for Kf=0.5:0.01:1.5 % 101
        initial_data;
        sim('CC',50)
        G = linmod('CC');
        [wn,zeta, val] = damp(G.a);
        aux_mat=zeros(12,1);
        for k=1:(size(G.a,1))
            aux_mat(k,1)=abs(zeta(k));
        end

        opt_GT_ST_dg(r,1)=R;
        opt_GT_ST_dg(r,2)=Kf;
        opt_GT_ST_dg(r,3)=min(matrix(:,16));
        opt_GT_ST_dg(r,4)=mean(matrix(4500:5000,16));
        opt_GT_ST_dg(r,5)=std(matrix(3500:5000,16));
        opt_GT_ST_dg(r,6)=std(matrix(1750:5000,16));
        opt_GT_ST_dg(r,7)=min(aux_mat(:,1));

        r=r+1
        clear matrix;
        clear aux_mat;
    end
end
```

Παράρτημα Β: Αποτελέσματα δοκιμών ρύθμισης

Παρουσιάζεται η αρχή του πίνακα καταγραφής αποτελεσμάτων κατά την ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος συνδυασμένου κύκλου, αφού αυτά ταξινομήθηκαν πρώτα ως προς την ελάχιστη συχνότητα και μετά ως προς την τελική τιμή. Αφού απορρίφθηκαν όσοι συνδυασμοί δεν ικανοποιούν την απαίτηση για ελάχιστη τιμή ηλεκτρικής συχνότητα τα 49 Hz και τελική τιμή τα 49,7 Hz, όσοι απέμειναν ταξινομήθηκαν αρχικά ως προς την τυπική απόκλιση στο διάστημα 25% - 100%. Τα πρώτα αποτελέσματα αυτής της ταξινόμησης παρουσιάζονται στον Πίν. Β1, ενώ στον Πίν. Β2 παρουσιάζονται τα δεδομένα μετά την ταξινόμηση ως προς τον μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης. Ο ανώτερος κατά την ταξινόμηση συνδυασμός ήταν αυτός που συγκρατούταν, οπότε τελικά συγκρίνονταν μεταξύ τους 4 συνδυασμοί ώστε, εποπτικά, να καθοριστεί ο καλύτερος συνδυασμός παραμέτρων. Ο αύξων αριθμός δείχνει τον αριθμό της προσομοίωσης. Όλη η δοκιμή κατέγραψε 1.111 τιμές.

Πίνακας Β1: Ταξινόμηση ως προς την ελάχιστη τυπική απόκλιση

A/A	R	K_f	Ελάχιστη συχνότητα	Τελική συχνότητα	Τυπική απόκλιση 25% - 100%	Τυπική απόκλιση 75% - 100%	ζ	Χρόνος απεμπλοκής
69	0,020	0,68	49,2049	49,8477	0,0108	0,0003	0,1773	15,22
62	0,020	0,67	49,2083	49,8490	0,0108	0,0003	0,1751	15,17
76	0,020	0,69	49,2014	49,8465	0,0108	0,0003	0,1795	15,28
55	0,020	0,66	49,2117	49,8502	0,0108	0,0003	0,1729	15,11
84	0,020	0,70	49,1978	49,8453	0,0109	0,0003	0,1816	15,34
49	0,020	0,65	49,2151	49,8514	0,0109	0,0003	0,1707	15,06
92	0,020	0,71	49,1943	49,8441	0,0111	0,0003	0,1837	15,40
43	0,020	0,64	49,2184	49,8527	0,0111	0,0003	0,1685	15,00
74	0,021	0,66	49,2021	49,8427	0,0111	0,0003	0,1797	15,11
67	0,021	0,65	49,2055	49,8440	0,0111	0,0003	0,1775	15,05
82	0,021	0,67	49,1987	49,8414	0,0111	0,0003	0,1819	15,16
60	0,021	0,64	49,2088	49,8453	0,0111	0,0003	0,1753	15,00
90	0,021	0,68	49,1953	49,8401	0,0112	0,0003	0,1840	15,22
53	0,021	0,63	49,2121	49,8466	0,0112	0,0003	0,1730	14,95
37	0,020	0,63	49,2217	49,8539	0,0112	0,0003	0,1663	14,95
100	0,020	0,72	49,1907	49,8428	0,0112	0,0003	0,1858	15,46
99	0,021	0,69	49,1918	49,8388	0,0113	0,0003	0,1862	15,28
47	0,021	0,62	49,2154	49,8479	0,0114	0,0003	0,1708	14,90
80	0,022	0,64	49,1993	49,8379	0,0114	0,0003	0,1817	15,00
72	0,022	0,63	49,2026	49,8393	0,0114	0,0003	0,1794	14,95
88	0,022	0,65	49,1960	49,8366	0,0114	0,0003	0,1839	15,05
31	0,020	0,62	49,2250	49,8551	0,0114	0,0003	0,1640	14,90
65	0,022	0,62	49,2059	49,8406	0,0114	0,0003	0,1772	14,89
108	0,020	0,73	49,1870	49,8416	0,0115	0,0003	0,1879	15,52
97	0,022	0,66	49,1926	49,8352	0,0115	0,0003	0,1861	15,10
41	0,021	0,61	49,2186	49,8492	0,0115	0,0003	0,1685	14,84

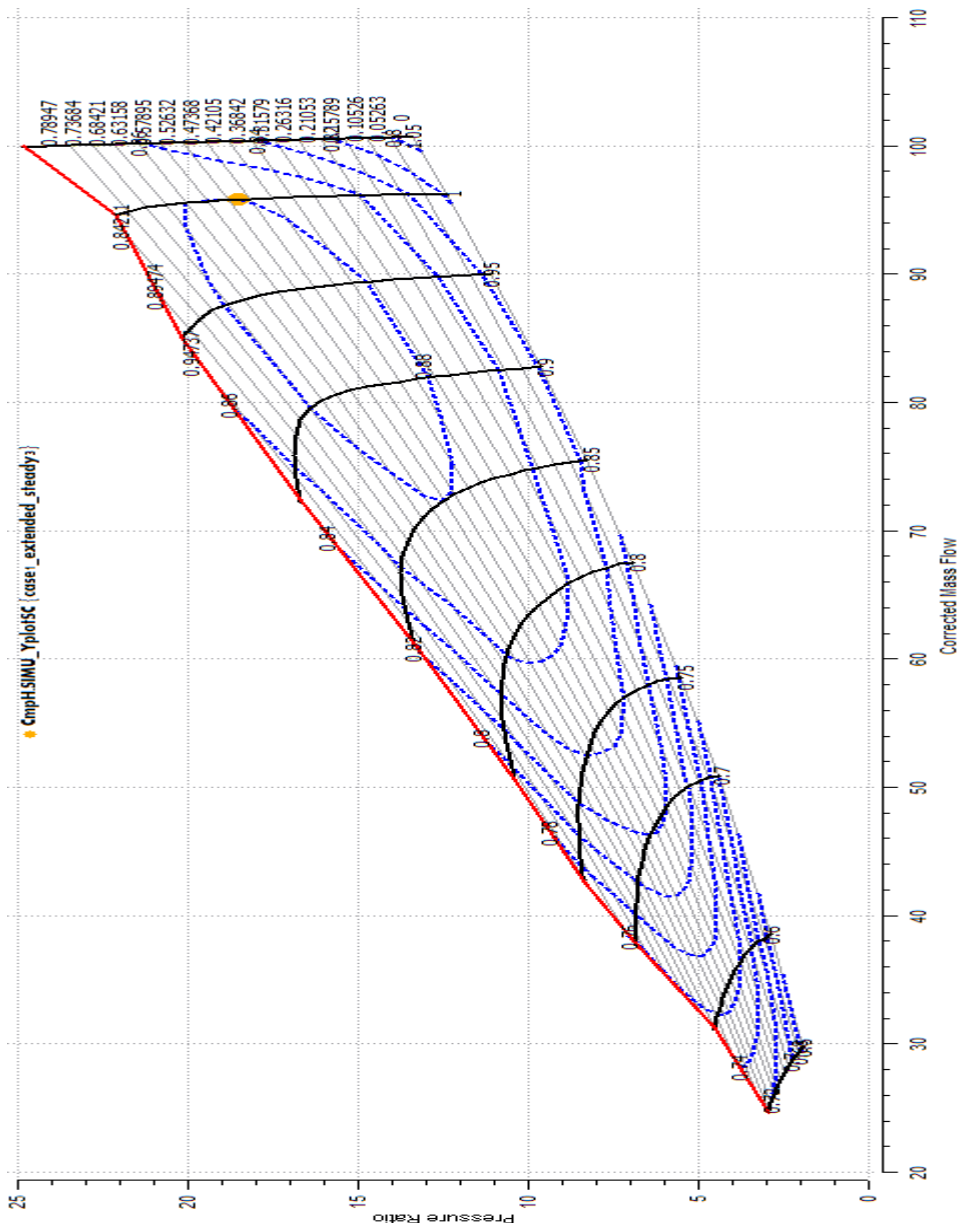
Από την ταξινόμηση του Πίν. Β2 προέκυψε η 5^η τιμή του Πίν. 5.7. Κατά τον ίδιο τρόπο, ταξινομώντας δηλαδή τα αποτελέσματα ανά καταγραφόμενο μέγεθος, προέκυψαν οι 5 τιμές που αξιολογήθηκαν εποπτικά.

Πίνακας Β2: Ταξινόμηση ως προς τον μέγιστο λόγο απόσβεσης

A/A	R	K _f	Ελάχιστη συχνότητα	Τελική συχνότητα	Τυπική απόκλιση 25% – 100%	Τυπική απόκλιση 75% – 100%	ζ	Χρόνος απεμπλοκής
595	0,030	0,94	49,0027	49,7236	0,0216	0,0006	0,2839	16,86
593	0,029	0,96	49,0029	49,7293	0,0209	0,0006	0,2826	17,04
585	0,030	0,93	49,0074	49,7255	0,0216	0,0006	0,2821	16,79
594	0,028	0,98	49,0029	49,7352	0,0204	0,0006	0,2810	17,22
583	0,029	0,95	49,0077	49,7311	0,0210	0,0006	0,2808	16,96
576	0,030	0,92	49,0120	49,7273	0,0217	0,0006	0,2803	16,71
582	0,028	0,97	49,0078	49,7369	0,0204	0,0006	0,2793	17,14
596	0,027	1,00	49,0026	49,7413	0,0198	0,0005	0,2793	17,41
574	0,029	0,94	49,0125	49,7328	0,0211	0,0006	0,2790	16,88
567	0,030	0,91	49,0166	49,7292	0,0218	0,0006	0,2785	16,64
584	0,027	0,99	49,0077	49,7430	0,0198	0,0005	0,2776	17,32
572	0,028	0,96	49,0127	49,7386	0,0205	0,0006	0,2776	17,06
597	0,026	1,02	49,0021	49,7477	0,0193	0,0005	0,2773	17,60
564	0,029	0,93	49,0171	49,7346	0,0212	0,0006	0,2773	16,80
557	0,030	0,90	49,0212	49,7310	0,0219	0,0006	0,2767	16,56
573	0,027	0,98	49,0126	49,7446	0,0199	0,0005	0,2759	17,24
562	0,028	0,95	49,0175	49,7403	0,0206	0,0005	0,2758	16,98
587	0,026	1,01	49,0073	49,7493	0,0193	0,0005	0,2757	17,51
555	0,029	0,92	49,0218	49,7364	0,0213	0,0006	0,2755	16,73
599	0,025	1,04	49,0014	49,7543	0,0189	0,0005	0,2752	17,80
547	0,030	0,89	49,0256	49,7329	0,0219	0,0006	0,2749	16,49
561	0,027	0,97	49,0175	49,7463	0,0199	0,0005	0,2742	17,16
553	0,028	0,94	49,0222	49,7421	0,0206	0,0005	0,2740	16,90
575	0,026	1,00	49,0124	49,7509	0,0193	0,0005	0,2740	17,43
545	0,029	0,91	49,0264	49,7382	0,0213	0,0006	0,2737	16,65
588	0,025	1,03	49,0067	49,7559	0,0188	0,0005	0,2735	17,71
537	0,030	0,88	49,0301	49,7347	0,0220	0,0006	0,2730	16,42

Παράρτημα Γ: Πεδία χαρακτηριστικών αεροστροβίλου

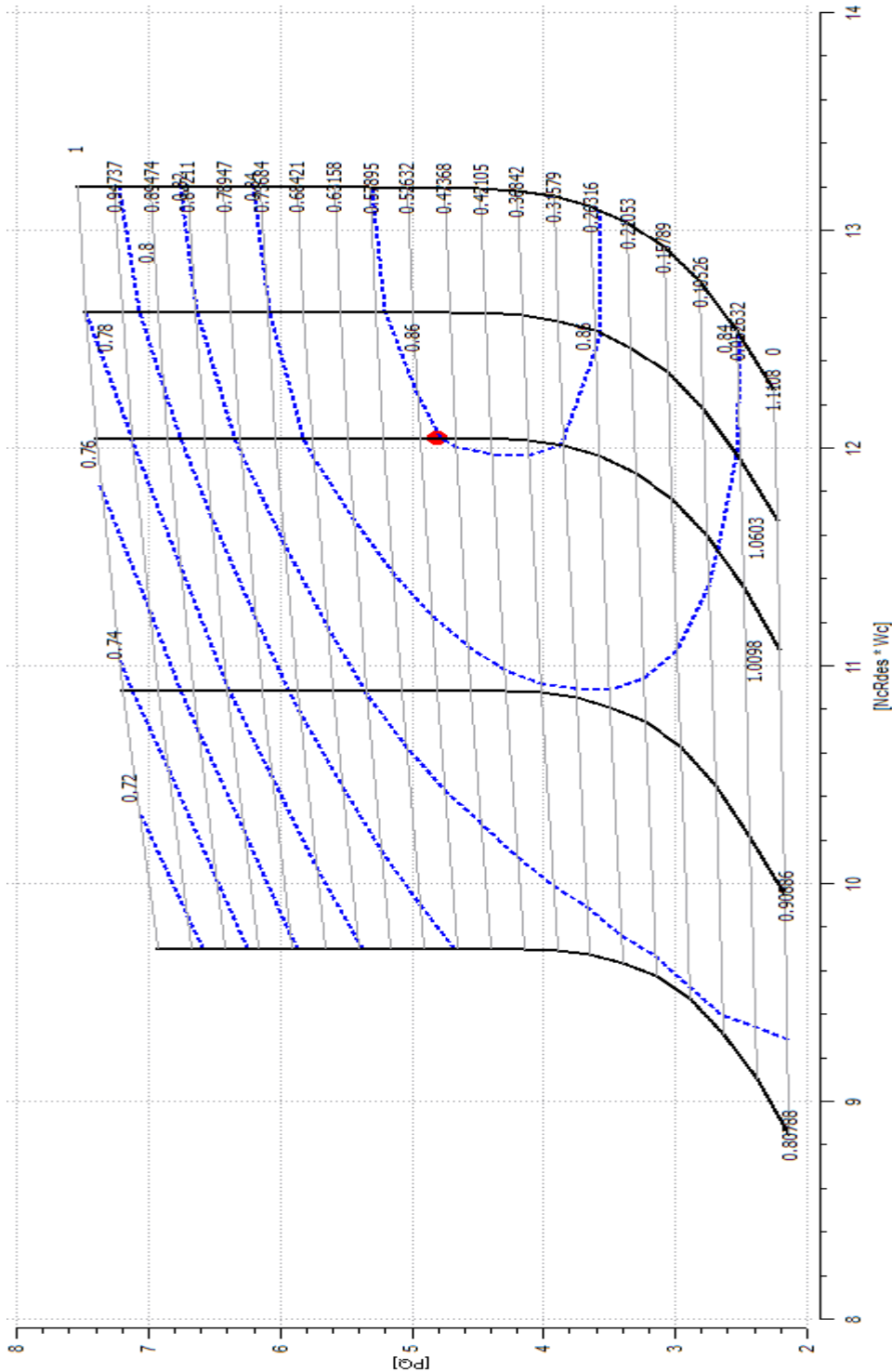
Τα πεδία χαρακτηριστικών (χάρτες) του αεροστροβίλου SGT 700, διαμορφώθηκαν από το πρόγραμμα Proosis¹. Χρησιμοποιήθηκε ως βάση το πεδίο χαρακτηριστικών ενός παρόμοιου αεροστροβίλου, το οποίο προσαρμόστηκε στον SGT 700 έχοντας ως αναφορά το σημείο ονομαστικής λειτουργίας του SGT 700. Η προσαρμογή έγινε μέσω πολλαπλασιασμού της κάθε μεταβλητής που απεικονίζει ο χάρτης με έναν κατάλληλο αριθμό ώστε το σημείο ονομαστικής λειτουργίας που απεικονίζει ο χάρτης να ταιριάζει με το σημείο ονομαστικής λειτουργίας του SGT 700.



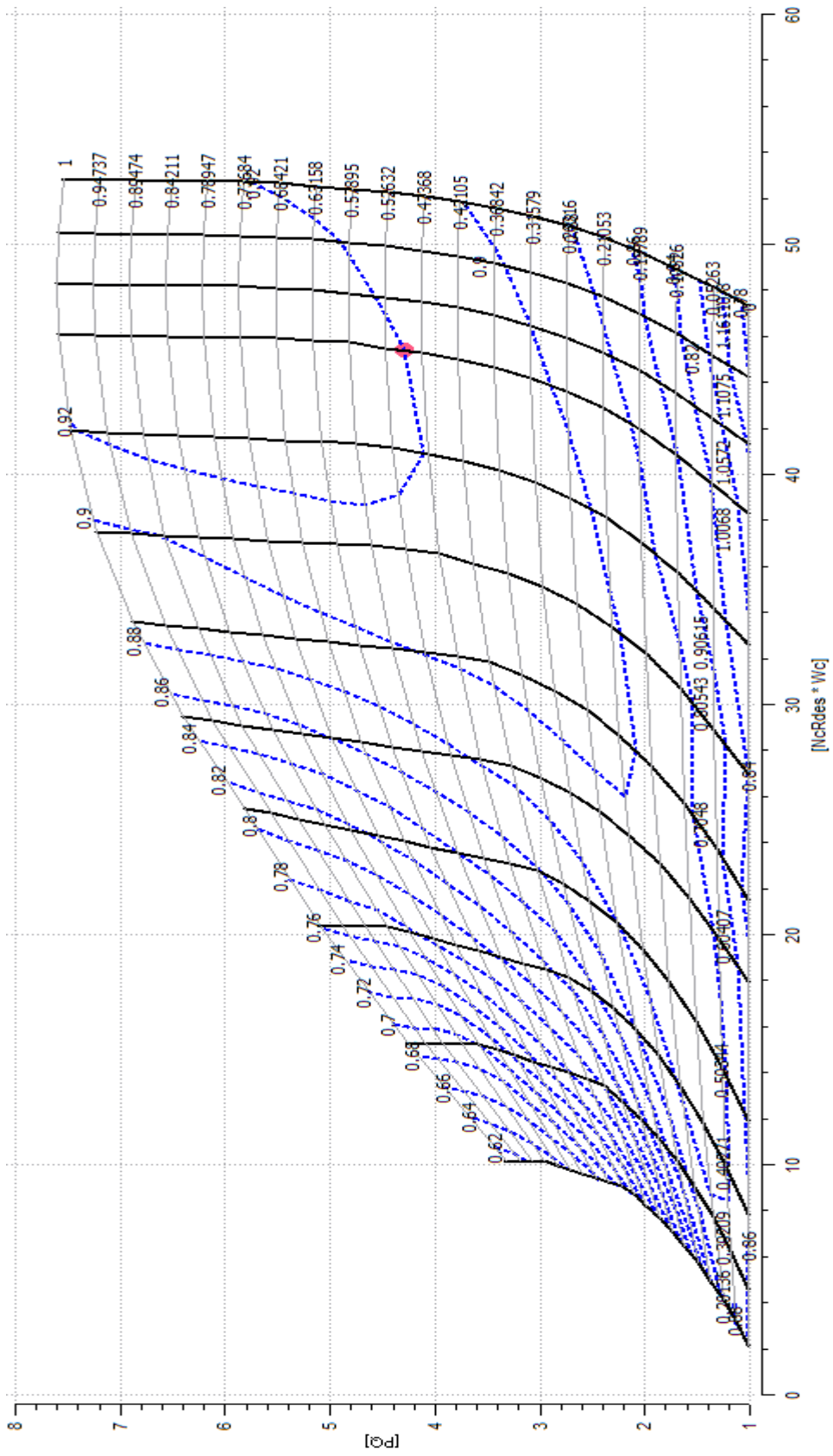
Σχήμα Γ1: Πεδίο χαρακτηριστικών συμπιεστή SGT 700

¹ Οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξιο Αλεξίου για την προσαρμογή των χαρτών και την αρχική ρύθμιση του λογισμικού Proosis.

Αντίστοιχα προσαρμόστηκαν και τα πεδία χαρακτηριστικών κάθε στροβίλου, ΥΠ και ΧΠ. Το Proosis αντί να υπολογίζει αναλυτικά τις αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις προσδιορίζει τις θερμοκρασίες και τις παροχές σε κάθε σημείο λειτουργίας του αεροστροβίλου μέσω των στοιχείων που διαβάζει από τα πεδία (γι' αυτό ονομάζονται και *χάρτες*).



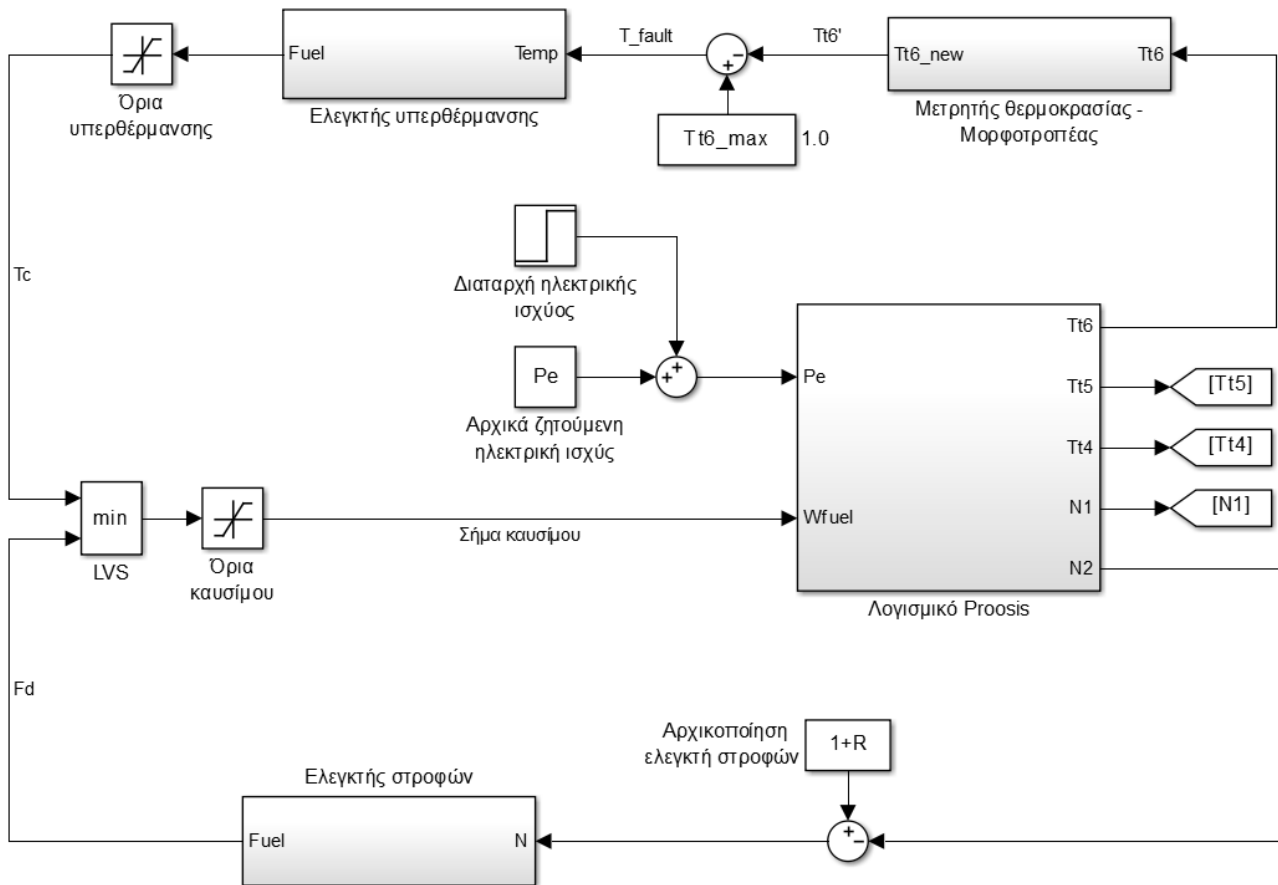
Σχήμα Γ2: Πεδίο χαρακτηριστικών στροβίλου ΥΠ



Σχήμα Γ3: Πεδίο χαρακτηριστικών στροβίλου XII

Παράρτημα Δ: Διαγράμματα βαθμίδων

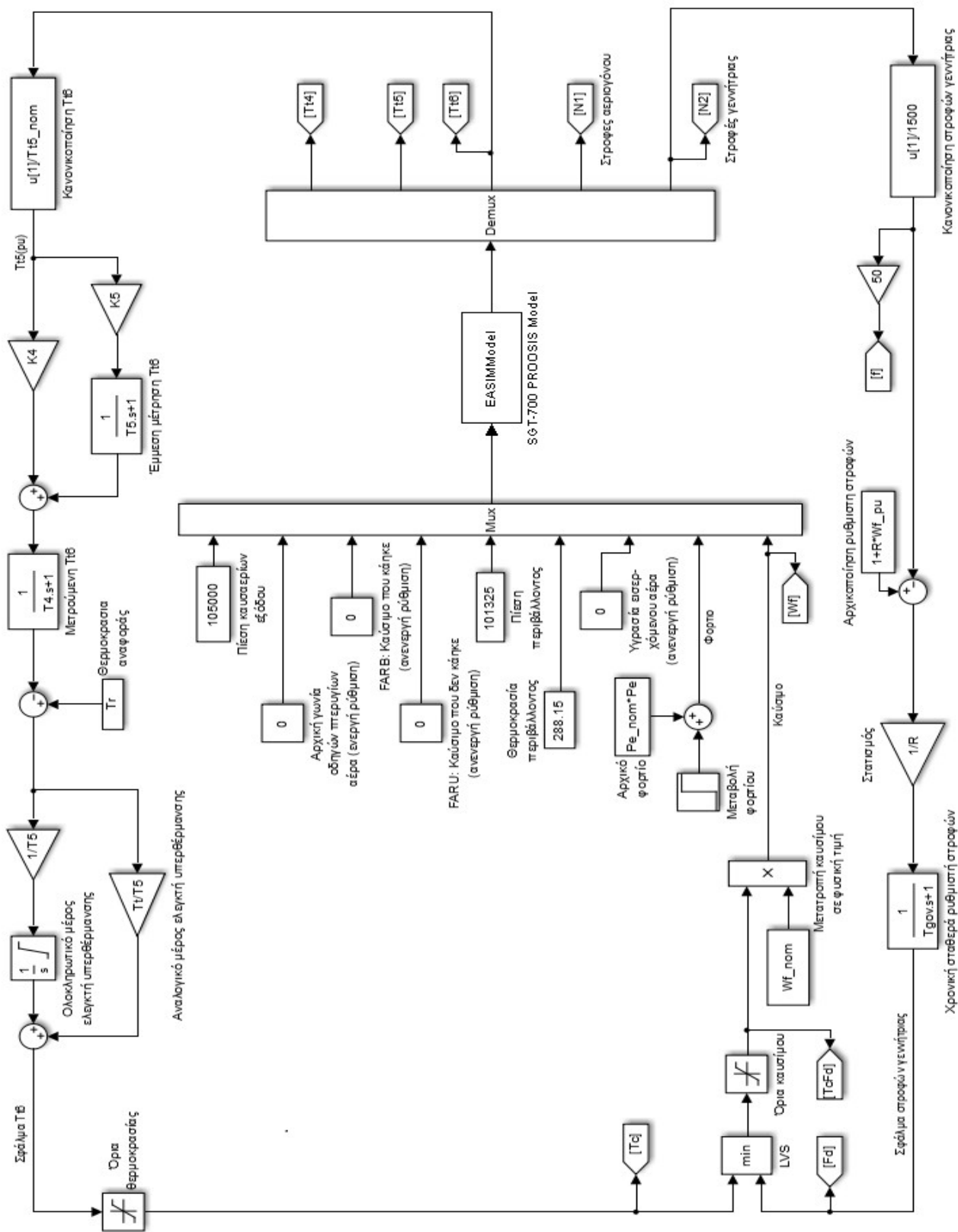
Παρουσιάζονται τα διαγράμματα βαθμίδων των λογισμικών Simulink και Proosis [27] κατά την δοκιμαστική προσομοίωση του αεριοστροβίλου διδύμων ατράκτων SGT 700, ενταγμένο σε ανοιχτό κύκλο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.



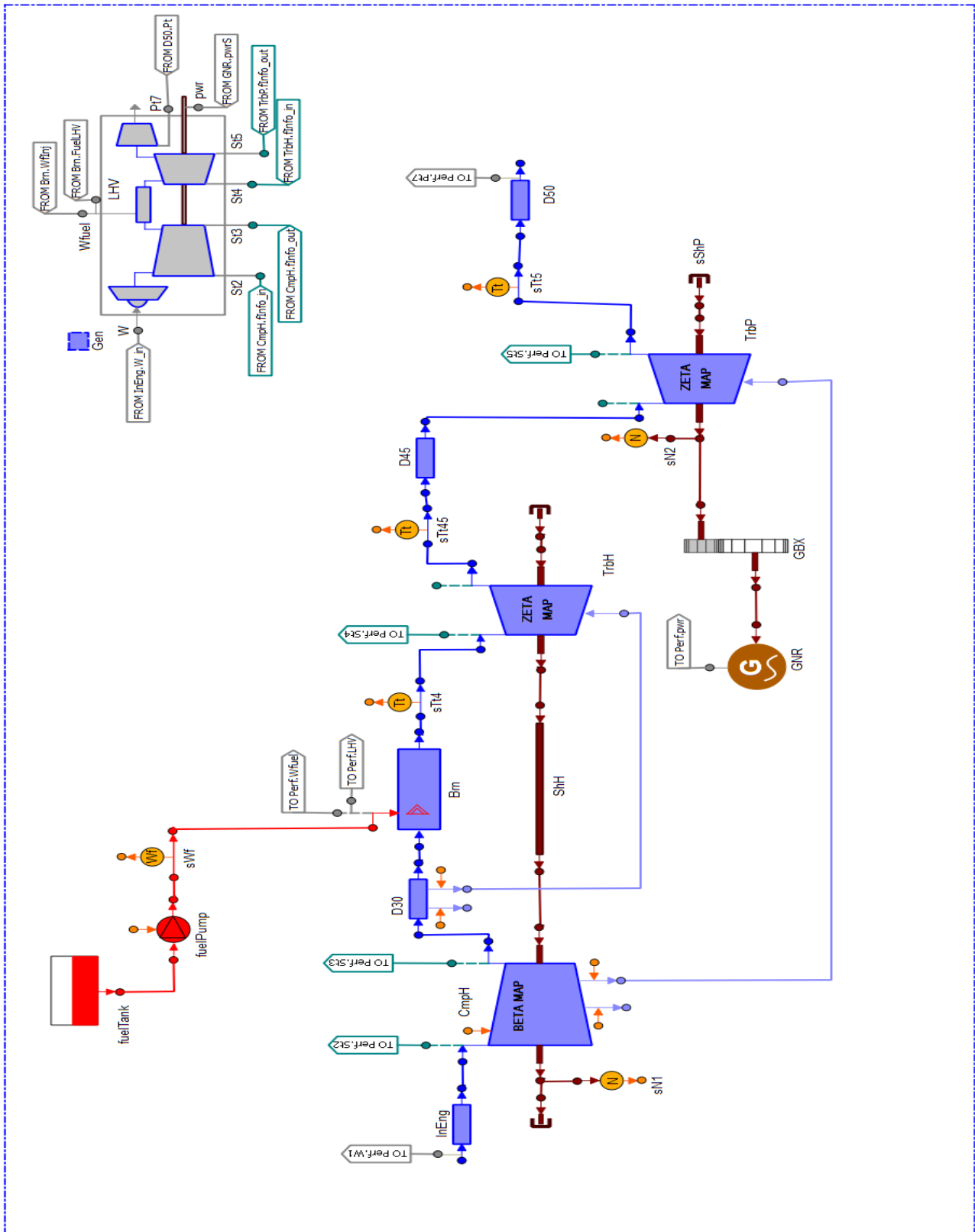
Σχήμα Δ1: Σχηματικό διάγραμμα συνλειτουργίας λογισμικών Matlab - Proosis

Όπως φαίνεται από το Σχ. Δ1, το Proosis επιτελεί τον ρόλο που έχουν στην προσομοίωση στο Simulink οι αλγεβρικές θερμοδυναμικές εξισώσεις. Στο μοντέλο που δοκιμάστηκε ως είσοδο θεωρήθηκαν η ισχύς, η οποία υπόκειται σε ανεξάρτητη διαταραχή, και το καύσιμο, η παροχή του οποίου καθορίζεται από το Simulink, σύμφωνα με τα σήματα που δίνουν ο ρυθμιστής στροφών και ο ελεγκτής υπερθέρμανσης.

Στο Σχ. Δ2 φαίνεται η φυσική υλοποίηση του περιβάλλοντος συνλειτουργίας των δύο λογισμικών προσομοίωσης, ενώ στο Σχ. Δ3 απεικονίζεται το περιβάλλον λειτουργίας του Proosis.



Σχήμα Δ2: Λειτουργικό διάγραμμα βαθμίδων Simulink - Proosis



Σχήμα Δ3: Διάγραμμα βαθμίδων Prooisis

Παράρτημα Ε: Στοιχεία γεννήτριας ABB AMS 1120LK 4PBS

Πίνακας Ε1: Γενικά στοιχεία

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
Φαινόμενη ισχύς	35.000	kVA
Τάση	6.000,0	kV
Συχνότητα	50,0	Hz
Ρεύμα	3367,9	A
Ροπή	181,3	kNm
Συντελεστής Ισχύος	0,80	-
Συντελεστής Ισχύος υπό διέγερση	1,00	-
Ταχύτητα περιστροφής	1.500,0	ΣΑΛ
Πόλοι	4	-
Βάρος δρομέα	18.633	kg
Βάρος στάτη	48.293	kg
Ροπή αδράνειας δρομέα	2.652,7	kg m²
Αύξηση θερμοκρασίας στάτη (εξωτερική 40 °C)	76,0	K
Αύξηση θερμοκρασίας δρομέα (εξωτερική 40 °C)	70,8	K
Όριο υπερτάχυνσης	1800	ΣΑΛ
Κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής	>1725	ΣΑΛ
Ροπή αποσυγχρονισμού	2,01	αμ
Ρεύμα εκκίνησης με βραχυκυκλωμένο δρομέα (θεωρητικό)	5,86	αμ
Ρεύμα εκκίνησης με βραχυκυκλωμένο δρομέα (συν ανοχές, κατά IEC)	6,73	αμ
Θόρυβος	80 ±3	db(A)

Πίνακας Ε2: Βαθμοί απόδοσης και ρεύματα ανά επίπεδο φορτίου

Φορτίο (%)	Βαθμός απόδοσης (%)	Ρεύμα στάτη (A)	Ρεύμα δρομέα (A)
100	98,33	3367,9	669,5
75	98,25	2525,9	552,2
50	97,89	1683,9	442,0
25	96,48	842,0	340,3
125	98,31	4209,8	793,1
0		0,0	256,5

Πίνακας Ε3: Αντιδράσεις (ανά μονάδα)

	Unsaturated	Saturated
X_d	1,92	1,76
X_d'	0,25	0,21
X_d''	0,15	0,13
X_q	0,86	0,79
X_q''	0,23	0,2
X_p		0,18
X_1		0,11
X_0		0,06
X_2		0,16

Πίνακας Ε4: Απώλειες ισχύος (kW)

Τριβών	115,25
Σιδήρου	111,15
Στάτη	116,42
Δρομέα	70,69
Πρόσθετες	60,68
Σύνολο	474,19

Πίνακας Ε5: Σταθερές χρόνου στους 95 °C

T_a	0,15
T_d'	1,00
T_d''	0,03
T_q''	0,04
T_{q0}''	0,14
T_{d0}'	9,02
T_{d0}''	0,04

Παράρτημα ΣΤ: Διερεύνηση του μηχανισμού καυσίμου

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται διερεύνηση του μηχανισμού παροχής ελάχιστου καυσίμου. Αφορμή για την διερεύνηση αυτή στάθηκε η απαίτηση αρχικοποίησης του συστήματος μετά την προσθήκη κλάδου ανάδρασης σήματος καυσίμου. Η αρχικοποίηση του συστήματος καυσίμου εισάγει μια *de facto* ελάχιστη τιμή καυσίμου, που όπως φαίνεται εξαρτάται από την αρχική τιμή του καυσίμου για κάθε προσομοίωση, καθώς έχει την τιμή $K_f W_{f_op}$ όπου το W_{f_op} είναι η αρχική τιμή του καυσίμου, σε ανά μονάδα τιμές, για το επίπεδο παραγόμενης ισχύος στο οποίο ξεκινάει η προσομοίωση. Επομένως η σταθερά K_3 (και επομένως και η K_2) πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα για κάθε επίπεδο λειτουργίας, αφού η ελάχιστη παροχή κατά ένα μέρος εξασφαλίζεται από την αρχικοποίηση του συστήματος καυσίμου.

Οι αναφορές [23, 24] ορίζουν ως ελάχιστο καύσιμο το 23% της ονομαστικής του τιμής, δηλαδή

$$K_3 = 0,23$$

Από την (2.25) προκύπτει πως

$$W_f^{min} = \frac{K_3 + K_f W_{f_op}}{1 + K_f} \quad (E1)$$

Άρα εάν το W_f^{min} είναι μεγαλύτερο από 0,23 θα πρέπει η σταθερά K_3 να είναι ίση με 0 και η K_2 ίση με 1, ενώ εάν το W_f^{min} είναι μικρότερο από 0,23 θα πρέπει η K_3 να καθορίζεται κατά τρόπο ώστε να ισχύει ότι το ελάχιστο καύσιμο έχει την τιμή 0,23. Άρα θα πρέπει να ισχύει ότι

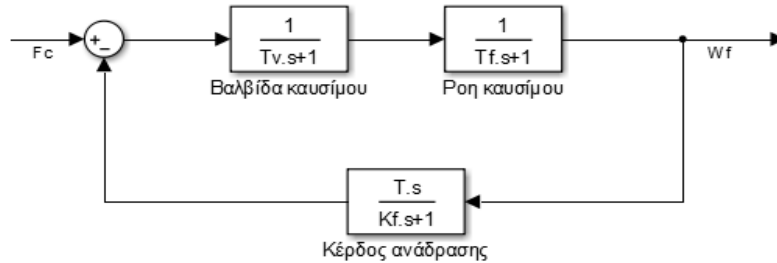
$$\frac{K_3 + K_f W_{f_op}}{1 + K_f} = 0,23 \Rightarrow$$
$$K_3 = 0,23(1 + K_f) - K_f W_{f_op}, \quad K_2 = 1 - K_3 \quad (E2)$$

Αυτή η απαίτηση υλοποιείται στην προσομοίωση με έναν βρόχο ελέγχου ως ακολούθως:

```
if (Kf*Wf_op / (1+Kf) >= 0.23)
    K3=0;
    K2=1;
else
    K3=0.23*(1+Kf) - (Kf*Wf_op);
    K2=1-K3;
end
```

Από τις δοκιμαστικές προσομοιώσεις που έγιναν στο σύστημα που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 5, παρατηρήθηκε πως είναι έντονες οι διαφορές μεταξύ των αποκρίσεων του συστήματος εάν ενσωματωθούν αυτές οι αλλαγές. Προκύπτει πως ο κλάδος αναπαράστασης της ροής καυσίμου είναι

πολύ σημαντικό να μελετηθεί διεξοδικά σε μελλοντικές εργασίες. Μια κατεύθυνση συνέχισης της έρευνας θα μπορούσε να είναι η διαμόρφωση του κλάδου ανάδρασης κατά τον τρόπο που παρατίθεται στο Σχ. Ε1.



Σχήμα Ε1: Προτεινόμενη μορφή συστήματος καυσίμου

Όταν $t \rightarrow \infty \Rightarrow s \rightarrow 0$ ισχύει πως

$$G(s) = 1 \tag{E3}$$

ενώ όταν εμφανίζεται μεταβατικό φαινόμενο ισχύει ότι $t \rightarrow 0 \Rightarrow s \rightarrow \infty$ άρα θα ισχύει πως

$$G(s) = \frac{T}{K_f} \tag{E4}$$

Με τέτοια διάταξη ανάδρασης φαίνεται πως δεν χρειάζεται όρος αρχικοποίησης άρα οι σταθερές K_2 και K_3 θα διατηρήσουν σταθερή τιμή. Παρ' όλ' αυτά, δυνάμει απαλοιφή τους η οποία θα στηρίζεται σε κάποιον διαφορετικό μηχανισμό ελέγχου και ρύθμισης καυσίμου, πιθανώς να επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην απόκριση του συστήματος.

