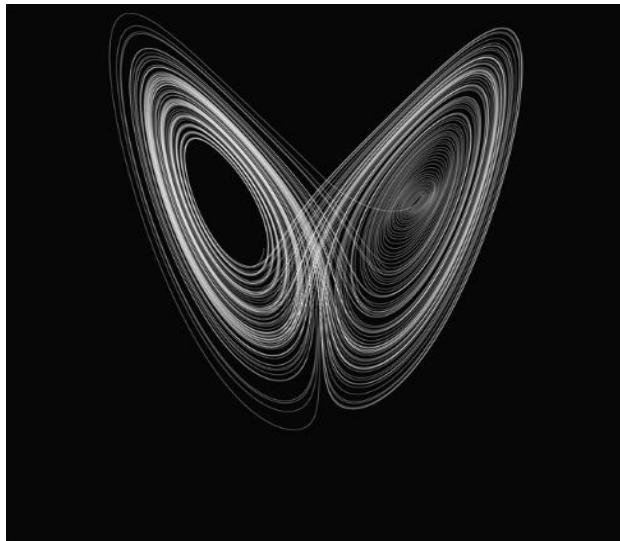




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Εξομοιωτής Memristor



Φοιτητής: ΤΡΑΝΟΥΔΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
A.M.: 50106566

Επιβλέπων Καθηγητής

Τσακιρίδης Οδυσσέας
Επίκουρος καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Οδυσσέας Τσακίριδης Επίκουρος Καθηγητής	Παναγιώτης Φωτόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής	Σωτηρία Γαλατά Επίκουρη Καθηγήτρια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τρανουδάκης Αλέξανδρος

Ιανουάριος, 2023

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 τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

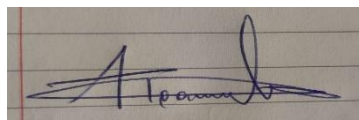
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Τρανουδάκης Αλέξανδρος** του **Ιωάννη**, με αριθμό μητρώου **50106566** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών
Τρανουδάκης Αλέξανδρος



Ευχαριστίες

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Τσακιρίδη Οδυσσέα για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την εξαιρετική επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, οφείλω να αφιερώσω την εργασία σε όλους τους ανθρώπους που με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η ταχεία πρόοδος της τεχνολογίας memristor έχει προκαλέσει σημαντικό ενδιαφέρον για τις πιθανές εφαρμογές της σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των συσκευών μνήμης, των νευρομορφικών υπολογιστών και του σχεδιασμού αναλογικών κυκλωμάτων. Ωστόσο, η έλλειψη εμπορικά διαθέσιμων συσκευών memristor και η πολυπλοκότητά τους για τη μελέτη και την ενσωμάτωσή τους σε υπάρχοντα κυκλώματα θέτουν σημαντικές προκλήσεις. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, αυτή η διατριβή προτείνει έναν εξομοιωτή memristor ως μια εναλλακτική λύση για τη μελέτη και την αξιοποίηση των μοναδικών χαρακτηριστικών των συστημάτων.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται η μελέτη και ανάλυση ηλεκτρικού κυκλώματος, το οποίο με τον προσδιορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων και αρχικών συνθηκών μπορεί να αναπαράγει χαοτικά φαινόμενα. Η μελέτη αποτελείται από προσομοιώσεις των κυκλωμάτων που αποσκοπούν στην επίτευξη χαοτικού αποτελέσματος. Στο πρώτο κεφάλαιο του βιβλίου γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία του χάους αλλά και στους ελκυστές. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το ηλεκτρικό χάος καθώς και μερικά από τα δημοφιλέστερα ηλεκτρικά συστήματα που παράγουν χάος. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του προγράμματος εξομοίωσης, το τι είναι ένα memristor και ποιες οι λειτουργίες τους καθώς επίσης και στους ενισχυτές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο τελικό κύκλωμα. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφεται το κύκλωμα που θα γίνει η εξομοίωση και θα μας παράξει το χαοτικό αποτέλεσμα.

Λέξεις – Κλειδιά

Χάος, Memristor, Simulation, Ελκυστές.

Abstract

The rapid progress of memristor technology has generated considerable interest in its potential applications in various fields, including memory devices, neuromorphic computing, and analog circuit design. However, the lack of commercially available memristor devices and the complexity involved in characterizing and integrating them into existing circuits pose significant challenges. To address these limitations, this thesis proposes a memristor simulator as a viable solution for studying and exploiting the unique characteristics of systems.

This thesis presents the study and analysis of electric circuits, which by determining specific parameters and initial conditions can reproduce chaotic phenomena. The study consists of simulations of the circuits that aim to achieve a chaotic effect. In the first chapter of the book there is an introduction to chaos theory and to attractors. The second chapter describes electrical chaos as well as some of the more popular electrical systems that produce chaos. In the third chapter there is an analysis of the simulation program, what a memristor is and what their functions are as well as the amplifiers to be used in the final circuit. Finally, in the last chapter, the circuit that will be simulated and will produce the chaotic result is described.

Keywords

Chaos,

Memristor,

Simulation,

Attractor.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ	11
1.1.1 Ευαισθησία στις Αρχικές Συνθήκες	13
1.1.2 Τοπολογική Μεταβατικότητα.....	14
1.1.3 Πυκνότητα των περιοδικών τροχιών	14
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	14
1.3 FRACTAL: Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ	16
1.4 ΕΛΚΥΣΤΕΣ	17
1.5 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΕΝΟΣ ΧΑΟΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	18
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΧΑΟΣ.....	18
2.1 ΣΥΣΤΗΜΑ LORENZ.....	19
2.2 Το ΚΥΚΛΩΜΑ CHUA	21
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ RÖSSLER	23
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑ CHEN	25
2.5 ΣΥΣΤΗΜΑ SPROTT	25
2.6 ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ VAN DER POL.....	26
2.7 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ HENON.....	28
3. ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ.....	29
3.1 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ TINA-TI.....	29
3.1.1 Εισαγωγή	29
3.1.2 Σχηματική Απεικόνιση	30
3.1.3 Δημιουργία κυκλώματος με τη χρήση του TINA-TI	30
3.1.4 Προσθήκη των υπόλοιπων στοιχείων.....	31
3.1.5 Δυνατότητες Ανάλυσης.....	33
3.2 Το MEMRISTOR	36
3.2.1 Εισαγωγή	36
3.2.2 Ιδιότητες του Memristor.....	38
3.2.3 Κατασκευαστικοί τύποι του Memristor	39
3.2.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα – Εφαρμογές.....	41
3.2.5 Το Memristor σε χαοτικό κύκλωμα	42
3.3 ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ	45
3.3.1 Ο Τελεστικός Ενισχυτής	45
3.3.2 Ο Ενισχυτής AD844.....	48
3.3.3 Ο Ενισχυτής Διαγωγιμότητας.....	54
3.3.4 Ο Ενισχυτής Διαγωγιμότητας LM13700.....	56
4 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ MEMRISTOR.....	59
4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	59
4.2 Ο ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.....	61
4.2.1 Ο Ενισχυτής Οργανολογίας.....	62
4.2.2 Ο Ενισχυτής Οργανολογίας INA101	64
4.3 ΕΞΟΜΟΙΩΤΗΣ MEMRISTOR.....	67
4.3.1 Ανάλυση του κυκλώματος στο TINA-TI.....	67
4.3.2 Γραφικές απεικονίσεις.....	70

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 – Τομή Poincaré.....	11
Εικόνα 1.2 – Το φαινόμενο της πεταλούδας.....	13
Εικόνα 1.3 – Edward Lorenz (1917 – 2008).....	15
Εικόνα 1.4 – Σύνολο Mandelbrot, το γνωστότερο fractal.....	16
Εικόνα 1.5 – Ο εκλυστής Lorenz.....	17
Εικόνα 2.1 – Γραμμική και μη γραμμική κλίση της θερμοκρασίας.....	19
Εικόνα 2.2 – Ο εκλυστής Lorenz για $\sigma=10$, $r=28$, $b=8/3$	19
Εικόνα 2.3 – Ο εκλυστής Lorenz στο πεδίο x-y (αριστερά), x-z (μέση) και y-z (δεξιά).....	20
Εικόνα 2.4 – Το κύκλωμα Chua.....	20
Εικόνα 2.5 – Χαρακτηριστική διόδου Chua.....	21
Εικόνα 2.6 – Προβολή του επιπέδου X – Y του διπλού σπειροειδούς εκλυστή.....	22
Εικόνα 2.7 – Προβολή του επιπέδου X – Z του διπλού σπειροειδούς εκλυστή.....	23
Εικόνα 2.8 – Προβολή του επιπέδου Y – Z του διπλού σπειροειδούς εκλυστή.....	23
Εικόνα 2.9 – Ο εκλυστής Rössler.....	24
Εικόνα 2.10 – Ο εκλυστής Chen για $a=35$, $b=3$ και $c=28$	25
Εικόνα 2.11 – Ο εκλυστής Sprott B.....	26
Εικόνα 2.12 – Ο εκλυστής Van der Pol για διάφορες τιμές του μ	27
Εικόνα 2.13 – Ο εκλυστής Van der Pol για $\mu = 0.2$, $\mu = 1$, $\mu = 5$	27
Εικόνα 2.14 – Ο εκλυστής Hénon για τις τιμές $a = 1,4$ και $b = 0,3$	28
Εικόνα 3.1 – Αρχική απεικόνιση προγράμματος TINA.....	29
Εικόνα 3.2 – Δημιουργία κυκλώματος με το TINA-PI.....	30
Εικόνα 3.3 – Εισαγωγή αντίστασης και jumper.....	31
Εικόνα 3.4 – Ολοκληρωτικό κύκλωμα γέφυρας Wien.....	32
Εικόνα 3.5 – Το μενού της ανάλυσης DC.....	33
Εικόνα 3.6 – Ο πίνακας της ανάλυσης DC.....	33
Εικόνα 3.7 – Συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος και πεδίου χρόνου.....	34
Εικόνα 3.8 – Προσομοίωση με εικονικό παλμογράφο.....	35
Εικόνα 3.9 – Το σύμβολο του memristor.....	35
Εικόνα 3.10 – Σύνδεση των μεταβλητών μεταξύ τους.....	36
Εικόνα 3.11 – Σειρά από 17 memristors διοξειδίου του τιτανίου.....	37

Εικόνα 3.12	–	Οι χαρακτηριστικές I – V των τεσσάρων θεμελιωδών στοιχείων.....	38
Εικόνα 3.13	–	Κατηγορίες τύπων των memristors.....	39
Εικόνα 3.14	–	Το κύκλωμα του Chua με memristor ελεγχόμενο από ροή.....	41
Εικόνα 3.15	–	Η πρώτη προσομοίωση του κυκλώματος μέσω Mathematica (τιμές τάσης της τάξης των χιλιάδων volts).....	43
Εικόνα 3.16	–	Ελκυστές του χαοτικού κυκλώματος με χρήση memristor από τη προσομοίωση μέσω του Muthuswamy.....	44
Εικόνα 3.17	–	Τελεστικός ενισχυτής.....	45
Εικόνα 3.18	–	Ο αναστρέφων ενισχυτής.....	46
Εικόνα 3.19	–	Ο μη αναστρέφων ενισχυτής.....	47
Εικόνα 3.20	–	Ισοδύναμο σχηματικό.....	49
Εικόνα 3.21	–	Ο αναστρέφων ενισχυτής με υπεραντίσταση.....	50
Εικόνα 3.22	–	Αναστρέφων ενισχυτής στο TINA-TI.....	50
Εικόνα 3.23	–	Συνάρτηση μεταφοράς για τον AD844 αναστρέφων ενισχυτή με κέρδος -10.....	51
Εικόνα 3.24	–	Τάση εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με το χρόνο.....	51
Εικόνα 3.25	–	Μη αναστρέφων ενισχυτής στο TINA-TI.....	52
Εικόνα 3.26	–	Συνάρτηση μεταφοράς για τον AD844 μη αναστρέφων ενισχυτή με κέρδος 10.....	52
Εικόνα 3.27	–	Τάση εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με το χρόνο.....	53
Εικόνα 3.28	–	Ο ενισχυτής διαγωγιμότητας.....	54
Εικόνα 3.29	–	Ο LM13700.....	56
Εικόνα 3.30	–	Κύκλωμα LM13700.....	57
Εικόνα 3.31	–	Το κύκλωμα LM13700 με AC Analysis.....	58
Εικόνα 4.1	–	Εξομοιωτής Memristor.....	59
Εικόνα 4.2	–	Οι κυματομορφές τάσεως και ρεύματος του εξομοιωτή memristor.....	60
Εικόνα 4.3	–	Η χαρακτηριστική τάσεως και ρεύματος του εξομοιωτή memristor.....	60
Εικόνα 4.4	–	Ο διαφορικός ενισχυτής.....	62
Εικόνα 4.5	–	Ο ενισχυτής οργανολογίας.....	63
Εικόνα 4.6	–	Η διαμόρφωση του ολοκληρωμένου INA101.....	64
Εικόνα 4.7	–	Το εσωτερικό του ολοκληρωμένου INA101.....	65
Εικόνα 4.8	–	Κύκλωμα INA101.....	65
Εικόνα 4.9	–	Κύκλωμα INA101 με AC Analysis.....	66

Εικόνα 4.10 – Συνάρτηση μεταφοράς για τον INA101 με ενίσχυση 2.....	67
Εικόνα 4.11 – Τελικό κύκλωμα εξομοίωσης.....	68
Εικόνα 4.12 – Πρώτη βαθμίδα του τελικού κυκλώματος εξομοίωσης.....	69
Εικόνα 4.13 – Δεύτερη βαθμίδα του τελικού κυκλώματος εξομοίωσης.....	70
Εικόνα 4.14 – Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του κυκλώματος στον παλμογράφο.....	71
Εικόνα 4.15 – Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του κυκλώματος σε άξονες.....	71
Εικόνα 4.16 – Σύγκριση των κυματομορφών.....	72
Εικόνα 4.17 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στον παλμογράφο.....	73
Εικόνα 4.18 – Ο ελκυστής του κυκλώματος σε άξονες.....	73
Εικόνα 4.19 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στην είσοδο και στην έξοδο στον παλμογράφο.....	74
Εικόνα 4.20 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στην είσοδο και στην έξοδο σε άξονες.....	74

1. Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της έννοιας του χάους, ακόμη και στις μέρες μας, φαντάζει αρκετά δύσκολος. Από τα τέλη του 1990, αρκετοί επιστήμονες άρχισαν να διερευνούν το χάος, το οποίο φαίνεται να είναι χρήσιμο σε αρκετές εφαρμογές για ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων όπως η μηχανική, η ιατρική, η οικονομία κ.α.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η θεωρία του χάους, την οποία ανέπτυξε η επιστημονική κοινότητα για να περιγράψει την συμπεριφορά των χαοτικών συστημάτων. Επιπλέον περιγράφονται οι ιδιότητες που πρέπει να διέπουν τα δυναμικά συστήματα ώστε να θεωρηθούν ως χαοτικά καθώς και η ιστορική εξέλιξη του χάους σε συνδυασμό με τις διάφορες ανακαλύψεις που πραγματοποίησαν ορισμένοι σημαντικοί επιστήμονες.

1.1 Θεωρία του Χάους

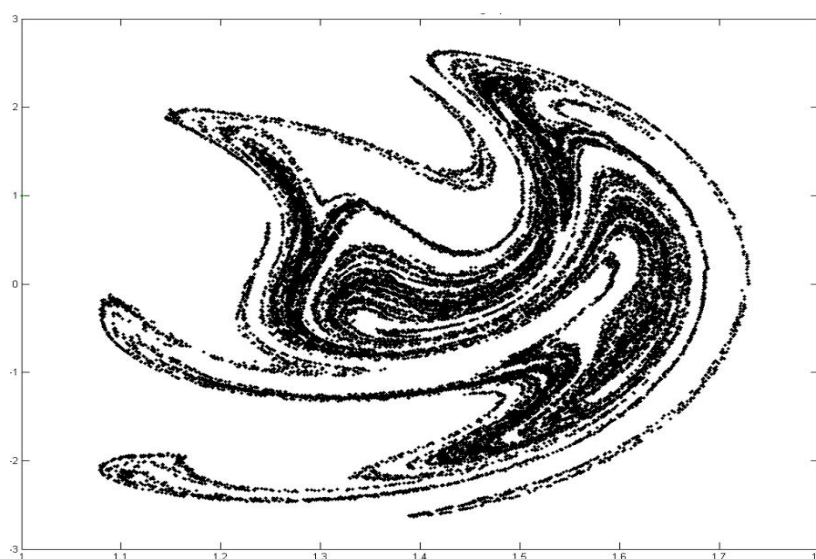
Η Θεωρία του Χάους είναι ένας τομέας στα μαθηματικά, με διάφορες εφαρμογές σε κλάδους επιστημών όπως η φυσική, η μηχανολογία, τα οικονομικά και η βιολογία. Η θεωρία του χάους μελετά τη συμπεριφορά ορισμένων μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις αρχικές συνθήκες, ένα αποτέλεσμα το οποίο ευρέως αναφέρεται ως το φαινόμενο της πεταλούδας. Μικρές διαφορές στις αρχικές συνθήκες (όπως αυτές που οφείλονται σε σφάλματα στρογγυλοποίησης σε αριθμητικούς υπολογισμούς) αποδίδουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα για τα δυναμικά συστήματα, καθιστώντας τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη αδύνατη. Αυτό συμβαίνει παρ' όλο που αυτά τα συστήματα είναι αιτιοκρατικά «ντετερμινιστικά» δηλαδή, ότι η μελλοντική συμπεριφορά τους καθορίζεται πλήρως από τις αρχικές συνθήκες τους, χωρίς να εμπλέκονται τυχαίες παράμετροι.

Όταν ένα σύστημα είναι οριοθετημένο σημαίνει ότι η κατάσταση του συστήματος διατηρείται εντός κάποιων ορίων για ένα μεγάλο αριθμό διαδοχικών επαναλήψεων και δεν συγκλίνει προς το άπειρο. Επιπλέον όταν ένα σύστημα δεν χαρακτηρίζεται από περιοδικότητα σημαίνει ότι η κατάσταση του συστήματος αυτού δεν θα επαναληφθεί δεύτερη φορά δηλαδή δεν θα

επιστρέφει στην ίδια τιμή. Παρόλα αυτά υπάρχει αμφιβολία όσον αφορά την μη περιοδικότητα του συστήματος εξαιτίας της εμφάνισης μεγάλων κυκλικών τροχιών σε αρκετές προσομοιώσεις, οι οποίες είναι μια απόδειξη υπάρξεως χάους.

Η εμφάνιση χαοτικής συμπεριφοράς σε πολλά φυσικά συστήματα έχει γίνει πλέον αντιληπτή. Παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος με χαοτική συμπεριφορά είναι οι παλμοί της καρδιάς στον ανθρώπινο οργανισμό. Φαίνεται πως ο χτύπος της καρδιάς ακολουθεί κάποια περιοδικότητα, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς δεν είναι δυνατό να επαναληφθεί το ίδιο μοτίβο παλμών για δεύτερη φορά (Crystal, 2004). Υπάρχουν ακόμη αρκετά τέτοια παράδειγμα φυσικών συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά όπως οι καιρικές συνθήκες, το ηλιακό σύστημα, η ατμόσφαιρα, τα οικονομικά συστήματα, η εξέλιξη της πληθυσμιακής αύξησης, η κίνηση αυτοκινητόδρομους ακόμα και οι τεκτονικές πλάκες.

Επεξήγηση μιας τέτοιας συμπεριφοράς μπορεί να επιδιωχθεί μέσω της ανάλυσης ενός χαοτικού μαθηματικού μοντέλου, ή μέσω τεχνικών όπως διαγράμματα επανάληψης (recurrence plots) και τομές Poincaré (Poincaré maps)



Εικόνα 1.1 – Τομή Poincaré

Τα συστήματα που παρουσιάζουν μαθηματικό χάος είναι ντετερμινιστικά και επομένως εύτακτα υπό μια έννοια. Αυτή η τεχνική χρήση του όρου «χάος» διαφωνεί με την καθομιλουμένη, στην οποία το χάος υποδηλώνει την παντελή έλλειψη τάξης. Όταν λέγεται ότι η θεωρία του χάους μελετά ντετερμινιστικά συστήματα, είναι απαραίτητο να αναφέρεται και το συγγενές πεδίο της φυσικής που λέγεται κβαντική θεωρία του χάους και μελετά μη αιτιοκρατικά συστήματα σύμφωνα με τους νόμους της κβαντομηχανικής. Στην γενική χρήση, χάος σημαίνει «μια κατάσταση διαταραχής». Ωστόσο, ο όρος αυτός ορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Αν και δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτός μαθηματικός ορισμός του χάους, ένας κοινά αποδεκτός ορισμός από τον μαθηματικό Robert L. Devaney λέει ότι, για να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά ενός συστήματος ως χαοτική, πρέπει να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- πρέπει να παρουσιάζει ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες.
- πρέπει να είναι τοπολογικά μεταβατικό.
- πρέπει να εμφανίζει ένα πυκνό σύνολο που αποτελείται από όλες τις περιοδικές τροχιές του συστήματος.

1.1.1 Ευαισθησία στις Αρχικές Συνθήκες

Ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες σημαίνει ότι το κάθε σημείο σε ένα τέτοιο σύστημα είναι αυθαίρετα στενά προσεγγίσιμο από άλλα σημεία με σημαντικά διαφορετικές μελλοντικές τροχιές. Έτσι, μια αυθαίρετα μικρή διαταραχή της τρέχουσας τροχιάς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά διαφορετική μελλοντική συμπεριφορά. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι οι δύο τελευταίες ιδιότητες στην παραπάνω λίστα συνεπάγονται πράγματι ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες και εάν η προσοχή περιοριστεί στα χρονικά διαστήματα τότε η δεύτερη ιδιότητα υποδηλώνει τις άλλες δύο. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι η πρακτικά πιο σημαντική προϋπόθεση, αυτή της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες, είναι στην ουσία περιττή στον ορισμό, αφού υπονοείται από δύο καθαρά τοπογραφικές συνθήκες.

Η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες είναι γνωστή ως το «φαινόμενο της πεταλούδας», που ονομάζεται έτσι εξαιτίας της εργασίας που παρέδωσε ο Edward Lorenz το 1972 στην Αμερικανική Ένωση για την Πρόοδο της Επιστήμης (American Association for the Advancement of Science) στην Ουάσιγκτον, με τίτλο «Προβλεψιμότητα: Μήπως το χτύπημα των φτερών μιας πεταλούδας στη Βραζιλία, μπορεί να προκαλέσει έναν τυφώνα στο Τέξας;». Το χτύπημα των φτερών αντιπροσωπεύει μια μικρή αλλαγή στην αρχική κατάσταση του συστήματος, η οποία προκαλεί μια αλυσίδα γεγονότων που οδηγούν σε μεγάλης κλίμακας φαινόμενα. Η κίνηση των φτερών της πεταλούδας ισοδυναμεί με μια μικρή αλλαγή στις αρχικές συνθήκες, η οποία οδηγεί το σύστημα να έχει μια διαφορετική μελλοντική συμπεριφορά. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορεί να υπάρξει πρόβλεψη για την συμπεριφορά του συστήματος μακροπρόθεσμα.

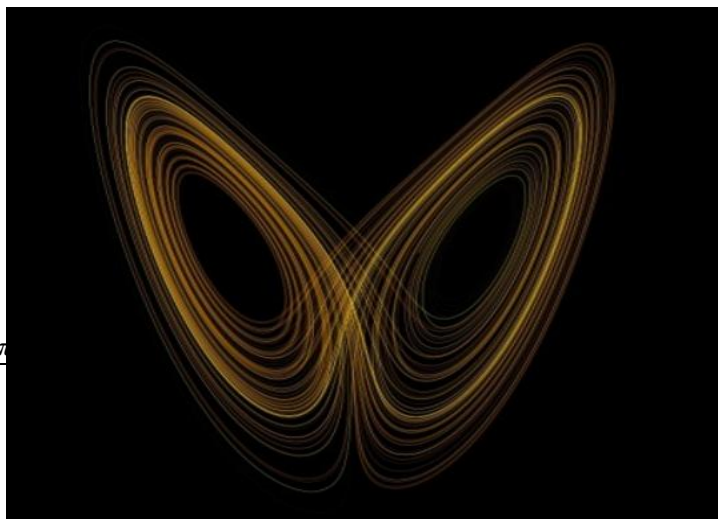
Τις περισσότερες φορές κατά την διαδικασία της μελέτης ενός συστήματος, η κατοχή περιορισμένου αριθμού δεδομένων για το σύστημα, μας καθιστά σε μια θέση ανικανότητας, όσον αφορά την πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας του συστήματος. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι είναι μια συνέπεια της ευαισθησίας στις αρχικές συνθήκες. Ένα παράδειγμα είναι ο καιρός τον οποίο μπορούμε να προβλέψουμε μόνο μια βδομάδα μπροστά και όχι για μεγαλύτερο διάστημα.

Όταν έχουμε μικρές διαφοροποιήσεις στις αρχικές συνθήκες αναμένουμε μεγάλες αποκλίσεις στις τροχιές του συστήματος και μάλιστα εκθετικά μεταβαλλόμενες. Ο εκθέτης Lyapunov μετράει τον ρυθμό αυτής της εκθετικής απόκλισης που παρουσιάζεται ανάμεσα στις τροχιές. Ποσοτικός, δύο τροχιές εντός του χώρου φάσης με αρχικό διαχωρισμό δZ_0 , τότε ο ρυθμός της απόκλισης που θα παρουσιαστεί ανάμεσα στις δύο τροχιές δίνεται από την σχέση 1.1:

$$|\delta Z(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta Z_0|,$$

(1.1)

όπου λ είναι ο εκθέτης Lyapunov. Ο ρυθμός διαχωρισμού μπορεί να είναι διαφορετικός για διαφορετικούς προσανατολισμούς του αρχικού φορέα διαχωρισμού. Έτσι, υπάρχει ένα ολόκληρο φάσμα από εκθέτες Lyapunov όπου, ο αριθμός των οποίων είναι ίσος με τον αριθμό των διαστάσεων του χώρου φάσης. Είναι σύνηθες να αναφέρεται μόνο ο μεγαλύτερος, δηλαδή ο μέγιστος εκθέτης Lyapunov (ΜΕΛ), διότι αυτός καθορίζει τη συνολική προβλεψιμότητα του συστήματος. Ένας θετικός μέγιστος εκθέτης Lyapunov συνήθως λαμβάνεται ως ένδειξη ότι το σύστημα είναι χαοτικό



1.1.2 Τοπολογική Μεταβατικότητα

Η δεύτερη ιδιότητα που πρέπει να πληροί ένα δυναμικό σύστημα για να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά όπως αναφέραμε προηγουμένως είναι, η τοπολογική μεταβατικότητα ή αλλιώς τοπολογική ανάμειξη. Τοπολογική μεταβατικότητα σημαίνει ότι κάθε ανοιχτό σύνολο το οποίο είναι ταυτόχρονα και υποσύνολο του φασικού χώρου, με την πάροδο του χρόνου θα καταλήξει να συμπίπτει με οποιαδήποτε άλλη περιοχή.

1.1.3 Πυκνότητα των περιοδικών τροχιών

Εκτός από τις δύο ιδιότητες που προαναφέρθηκαν ένα δυναμικό σύστημα για να θεωρηθεί χαοτικό θα πρέπει να εμφανίζει πυκνές περιοδικές τροχιές. Τροχιά θεωρείται το σύνολο των διαδοχικών σημείων ή θέσεων στον φασικό χώρο από τις οποίες διέρχεται το χαοτικό σύστημα κατά την κίνησή του. Περιοδική τροχιά είναι κάθε τροχιά που κυμαίνεται μεταξύ ενός πεπερασμένου συνόλου τιμών (Holt, 2017). Επομένως για να εμφανίσει ένα δυναμικό σύστημα πυκνές περιοδικές τροχιές θα πρέπει κάθε σημείο στο φασικό χώρο να προσεγγίζεται σε πολύ κοντινές αποστάσεις από περιοδικές τροχιές (Holt, 2017). Το σύνολο αυτών των περιοδικών τροχιών αποτελεί το πορτραίτο του δυναμικού συστήματος στο φασικό χώρο.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Το έτος 1880, ο Γάλλος μαθηματικός και αστρονόμος Henri Poincaré ασχολήθηκε με μια μελέτη που αφορούσε το πρόβλημα των τριών σωμάτων μέσω της οποίας έφτασε στην διαπίστωση με βάση την νευτώνεια θεωρία ότι υπάρχουν μη περιοδικές τροχιές οι οποίες δεν αυξάνονται συνεχώς αλλά και δεν πλησιάζουν ένα σταθερό σημείο.

Το έτος 1898 ο Γάλλος μαθηματικός Jacques Hadamard ασχολήθηκε με την μελέτη ενός συστήματος γνωστό ως «το μπιλιάρδο του Hadamard». Με βάση την μελέτη αυτή κατάφερε να αποδείξει ότι όλες οι τροχιές των ελεύθερων σωμάτων που ολισθαίνουν χωρίς τριβή σε μια επιφάνεια συνεχούς αρνητικής καμπυλότητας είναι ασταθείς το οποίο προκύπτει σαν αποτέλεσμα της απόκλισης που εμφάνιζε η μια τροχιά από την άλλη και μάλιστα αυτή η απόκλιση ήταν εκθετική μέσω ενός θετικού εκθέτη γνωστό και ως «εκθέτη Lyapunov» (Hadamard, 1898).

Οι σημαντικές ανακαλύψεις που έγιναν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα όσον αφορά την θεωρία του χάους, σε συνδυασμό με την θεωρία των συστημάτων που επικρατούσε εκείνη την εποχή δεν βοήθησαν να δοθεί ερμηνεία στα περίπλοκα φαινόμενα που είχαν παρατηρηθεί σε διάφορα πειράματα, με αποτέλεσμα οι επιστήμονες να θεωρούν ότι αυτή η συμπεριφορά προήλθε από ανακρίβεια μετρήσεων, ή ήταν απλός «θόρυβος».

Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα η θεωρία του χάους επισημοποιήθηκε. Σημαντικός παράγοντας στην ανάπτυξη της θεωρίας του χάους υπήρξε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Οι ηλεκτρονικοί

υπολογιστές ήταν σε θέση να κάνουν επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς μαθηματικών τύπων που περιλαμβάνει η θεωρία του χάους που προηγουμένως ήταν αδύνατο να υπολογισθούν δια χειρός.

Από τους σημαντικότερους επιστήμονες ο Edward Lorenz (1917 – 2008) ήταν ένας Αμερικανός μετεωρολόγος που προσπάθησε να προβλέψει τον καιρό με τους υπολογιστές, αλλά τελείως συμπτωματικά προκάλεσε τη δημιουργία ενός νέου επιστημονικού πεδίου, της θεωρίας του αιτιοκρατικού χάους. Γεννήθηκε το 1917 στο Κορνέκτικατ και αφού έλαβε το πτυχίο του στα μαθηματικά από το κολέγιο Ντάρτμουθ το 1938, έκανε εν συνεχεία μεταπτυχιακές σπουδές στο Χάρβαρντ το 1940. Εργάστηκε ως ειδικός στις καιρικές προβλέψεις κατά τη διάρκεια του Β παγκόσμιου πολέμου. Ακολούθως σπούδασε μετεωρολογία και έκανε το διδακτορικό του στη μετεωρολογία στο MIT. Με την ανακάλυψη του χάους, ο Lorenz βρήκε ότι με αυτό επηρεάζεται βαθιά ένα μεγάλο φάσμα βασικών επιστημών, φέρνοντας έτσι δραματικές αλλαγές στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τη φύση, όπως έκανε και ο Isaac Newton. Άνοιξε το δρόμο σε αυτό που ορισμένοι αποκαλούν Τρίτη επιστημονική επανάσταση στον 20^ο αιώνα, μετά τις θεωρίες της σχετικότητας και της κβαντομηχανικής. Ο Lorenz είναι καλύτερα γνωστός για την έννοια του φαινομένου της “πεταλούδας”, η ιδέα ότι μια μικρή διαταραχή σαν το χτύπημα των φτερών μιας πεταλούδας, μπορεί να έχει τεράστιες συνέπειες. Η τυχαία ανακάλυψη του χάους από τον του Lorenz ήρθε το χειμώνα του 1961, όταν ο Lorenz έτρεχε τις προσομοιώσεις του καιρού χρησιμοποιώντας ένα απλό υπολογιστικό μοντέλο. Μια ημέρα, θέλησε να επαναλάβει μία προσομοίωση για μια μεγαλύτερη περίοδο, αλλά αντί να επαναλάβει ολόκληρη την προσομοίωση, άρχισε να την τρέχει δεύτερη φορά από τη μέση, ξανά εισάγοντας τους αριθμούς που είχε πάρει από το πρώτο τρέξιμο της προσομοίωσης με τις αρχικές συνθήκες. Το πρόγραμμα ήταν το ίδιο, έτσι τα καιρικά σχέδια της δεύτερης επανάληψης έπρεπε να ήταν ακριβώς εκείνων της πρώτης. Αντί όμως να δει ένα ίδιο σχέδιο, τα δύο σχέδια του καιρού άρχισαν να αποκλίνουν γρήγορα σε δύο απολύτως ξεχωριστές πορείες. Πρώτα, σκέφτηκε ότι ο υπολογιστής δυσλειτουργούσε. Μετά συνειδητοποίησε ότι δεν είχε εισαγάγει τις αρχικές συνθήκες ακριβώς. Ο υπολογιστής αποθήκευε τους αριθμούς με μια ακρίβεια έξι δεκαδικών, όπως 0.852695, ενώ ο Lorenz, για να γλιτώσει χώρο στο έντυπο των αποτελεσμάτων έβαζε τους αριθμούς με τρία δεκαδικά, 0.852. Αυτή λοιπόν η μικρή απόκλιση των αριθμών που εισήγαγε ο Lorenz, λιγότερο από 0,1 τοις εκατό, άλλαξε εντελώς το τελικό αποτέλεσμα. Ακόμα κι αν το μοντέλο του ήταν αρκετά απλό, ο Lorenz συνειδητοποίησε ότι αυτό σήμανε ότι η τέλεια καιρική πρόβλεψη ήταν μια φαντασία. Μια τέλεια πρόβλεψη θα απαιτούσε όχι μόνο ένα τέλειο μοντέλο, αλλά και την τέλεια γνώση του αέρα, της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων συνθηκών παντού σε όλο τον κόσμο, σε μια στιγμή του χρόνου. Ακόμη και μια μικρή απόκλιση θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα απολύτως διαφορετικό καιρό. Ο Lorenz δημοσίευσε τα συμπεράσματά του το 1963 και η επιστημονική του ανακοίνωση ήταν ένα αριστούργημα σαφήνειας του γιατί ο καιρός είναι απρόβλεπτος. Την επόμενη χρονιά ο Lorenz δημοσίευσε μια άλλη εργασία που περιέγραφε πώς μια μικρή αλλαγή των παραμέτρων σε ένα μοντέλο, θα μπορούσε να παραγάγει μια τεράστια διαφορετική συμπεριφορά, που μπορεί να μετασχηματίσει κανονικά, περιοδικά γεγονότα σε ένα φαινομενικά τυχαίο χαοτικό σχέδιο. Η θεωρία του απέδειξε ένα χαοτικό μοντέλο σε μια πραγματική κατάσταση.

Τέλος ο Benoît Mandelbrot ήταν Γαλλοαμερικανός μαθηματικός και θεωρείται ο «πατέρας» της μορφοκλασματικής γεωμετρίας. Το έτος 1975 χρησιμοποίησε τον όρο φράκταλ, ο οποίος προέρχεται από την λατινική λέξη «fractus» που σημαίνει σπασμένο ή κερματισμένο γυαλί, για να περιγράψει αντικείμενα των οποίων τα περιγράμματα επαναλαμβάνονται σε άπειρες κλίμακες παρατήρησης (αυτό-ομοιότητα) (Gomora, 2010). Ο Mandelbrot στην προσπάθειά του να δημιουργήσει και να εμφανίσει μορφοκλασματικές γεωμετρικές δομές, έφτασε το 1979 να ανακαλύψει το «Σύνολο Mandelbrot». Είναι άξιο να σημειωθεί ότι η προσφορά της έρευνας του Mandelbrot, η οποία είχε επικεντρωθεί στα μαθηματικά και την γεωμετρία, ήταν μεγάλη για ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών τομέων όπως η στατιστική φυσική, μετεωρολογία, υδρολογία, γεωμορφολογία, ανατομία, νευρολογία, τεχνολογία πληροφοριών, γεωλογία, ιατρική, κοσμολογία, μηχανική και θεωρία του χάους.



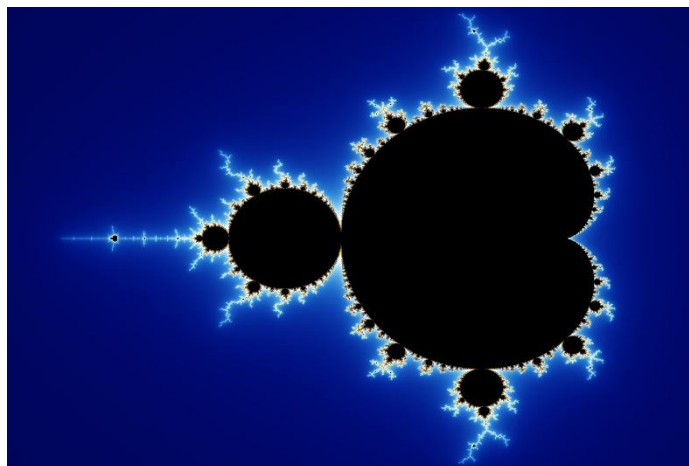
1.3 Fractal: η Γεωμετρία Θεωρίας του Χάους

Ο όρος fractal πλάσθηκε από μαθηματικό Benoit B. Mandelbrot από την λατινική λέξη fractus (θρυμματισμένος ή σπασμένος), για να εκφράσει την ιδέα σχήματος που οι διαστάσεις που χρειάζεται για να αναπαρασταθεί δεν είναι ακέραιος αριθμός και αναπαριστά συναρτήσεις από τα μαθηματικά του χάους. Στα Ελληνικά αποδόθηκε με τον όρο μορφοκλασματική καμπύλη από τους καθηγητές Πνευματικό και Νικόλη.

Οι υπολογιστές έδωσαν την δυνατότητα να αναπαρασταθούν γραφικά συναρτήσεις και παράξενοι ελκυστές που συναντά κανείς στα μαθηματικά. Η πολυπλοκότητα των γραφικών αυτών αναπαραστάσεων απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ, παρόλο που τα προγράμματα είναι σχετικά απλά αφού βασίζονται στην επαναληπτικότητα των αλγορίθμων. Συνήθως όταν ακούμε σχέδια ή σχήματα που προέρχονται από μαθηματικές συναρτήσεις μας έρχονται στο μυαλό κάποια ευκλείδεια γεωμετρικά σχήματα όμως, τα fractal διαφέρουν από αυτά τα σχήματα τον κύκλο, την έλλειψη το τετράγωνο κλπ. Ένα χαρακτηριστικό τους είναι ότι είναι όμοια εαυτών. Έτσι αν κοιτάξουμε ένα μικρό τμήμα fractal θα δούμε πως είναι όμοιο με ένα μεγαλύτερο τμήμα. Αν μεγεθύνουμε το μικρό, θα δούμε πως αυτό περιέχει και πάλι όμοια μέρη. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται αυτοομοιότητα. Αυτοόμοιο είναι ένα αντικείμενο του οποίου τα μέρη από τα οποία αποτελείται μοιάζουν με το σύνολο. Αυτή η επανάληψη των ακανόνιστων λεπτομερειών ή σχηματισμών συμβαίνει προοδευτικά σε μικρότερες κλίμακες και είναι δυνατόν να συνεχιστεί απεριόριστα έτσι ώστε κάθε τμήμα, όταν μεγεθυνθεί, να μοιάζει με το αρχικό σχήμα. Οι fractal εικόνες οπότε είναι ανεξάρτητες από κλίμακα μεγέθους. Αντίθετα με τα ευκλείδεια σχήματα, δεν έχουν ένα χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης. Χαρακτηριστικό επίσης των fractal είναι η μαθηματική παράμετρος που ονομάζεται διάσταση – fractal: D . Παραμένει σταθερό ανεξάρτητα με το πόσο πολύ θα μεγεθυνθεί το αντικείμενο ή υπό ποια γωνία θα παρατηρηθεί. Η διάσταση fractal εκφράζεται με έναν μη ακέραιο αριθμό, δηλαδή από ένα «κλάσμα», αντίθετα με την ευκλείδεια γεωμετρία.

Η γεωμετρία fractal με τις έννοιες της αυτοομοιότητας και της μη ακέραιης διάστασης έχει εφαρμοστεί σε φυσικά συστήματα που δείχνουν φαινομενικά τυχαία χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα έχουν γίνει προσομοιώσεις fractal για να σχεδιαστεί η κατανομή σμηνών γαλαξιών στο σύμπαν και για να μελετηθούν προβλήματα που σχετίζονται με την διαταραχή της ροής των ρευστών στα όρια επαφής με τα τοιχώματα όπου γίνεται τυρβώδης με συμπεριφορά ανεξέλεγκτη. Η

γεωμετρία fractal συνέβαλε πολύ στα γραφικά με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου αλγόριθμοι fractal σχεδιάζουν σχήματα πολύπλοκων, εξαιρετικά ακανόνιστων φυσικών αντικειμένων, που είναι μορφολογικά ανώμαλα όρη και περίπλοκα συστήματα κλαδιών δέντρων αλλά και σκηνές πολύπλοκες με τυχαία και ακανόνιστη κίνηση μεγάλων ομάδων αντικειμένων.

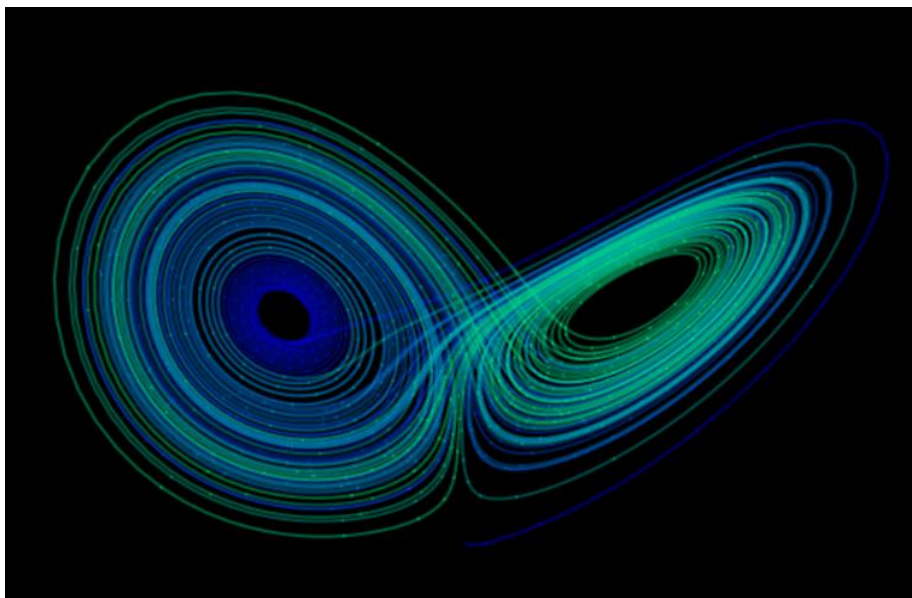


Εικόνα 1.4 – Σύνολο Mandelbrot, το γνωστότερο fractal

1.4 Ελκυστές

Η χαοτική κίνηση ή οποιαδήποτε άλλη κίνηση μπορεί να απεικονιστεί με την κατασκευή ενός διαγράμματος φάσης της κίνησης. Σε κάθε άξονα ενός τέτοιου διαγράμματος αναπαρίσταται μια μεταβλητή της κατάστασης ενώ ο χρόνος εισέρχεται αθόρυβα. Για παράδειγμα σε ένα διάγραμμα φάσης της κίνησης ενός εκκρεμούς, αν το εκκρεμές βρίσκεται σε ακινησία θα απεικονιστεί ως ένα σημείο ενώ αν το εκκρεμές εκτελεί περιοδική κίνηση θα απεικονιστεί ως μια κλειστή καμπύλη η οποία ονομάζεται τροχιά. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τροχιές που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα διάγραμμα φάσης της κίνησης ενός εκκρεμούς μπορεί να είναι άπειρες και τείνουν να πλησιάζουν ένα κοινό όριο. Είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του συστήματος έλκεται σε αυτήν την κίνηση με αποτέλεσμα το σύστημα να ακολουθεί μια συγκεκριμένη μορφή διαδρομής. Μια τέτοια ελκυστική κίνηση λέγεται ελκυστής του συστήματος.

Ορισμένα δυναμικά συστήματα είναι χαοτικά παντού, αλλά η χαοτική συμπεριφορά εμφανίζεται σε ένα μόνο υποσύνολο του χώρου φάσεων. Όταν η χαοτική αυτή συμπεριφορά έλκεται τότε διαφορετικές αρχικές συνθήκες θα οδηγήσουν σε κλειστές καμπύλες δηλαδή τροχιές οι οποίες θα συγκλίνουν σε αυτή την χαοτική περιοχή. Ένα από τα πρώτα και πιο γνωστά χαοτικά διαγράμματα συστήματος, εξαιτίας της πολυπλοκότητας που εμφανίζει, είναι αυτό του ελκυστή Lorenz το οποίο οδηγεί σε ένα μοτίβο που μοιάζει με τα φτερά μιας πεταλούδας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.5. Οι ελκυστές οι οποίοι προκύπτουν από διάφορα χαοτικά συστήματα λέγονται παράξενοι ελκυστές και εμφανίζονται τόσο σε συνεχή δυναμικά συστήματα όσο και σε ορισμένα διακριτά συστήματα.



Εικόνα 1.5 – Ο εκλυστής Lorenz

1.5 Ελάχιστη πολυπλοκότητα ενός χαοτικού συστήματος

Ένα δυναμικό σύστημα για να εμφανίσει χαοτική συμπεριφορά θα πρέπει να είναι μη γραμμικό ή απειροδιάστατο. Σύμφωνα με το θεώρημα των Henri Poincaré και Ivar Otto Bendixson, ένας παράξενος εκλυστής ενός συνεχούς δυναμικού συστήματος μπορεί να προκύψει μόνο σε τρεις ή περισσότερες διαστάσεις σε αντίθεση με τα διακριτά χαοτικά συστήματα τα οποία εμφανίζουν εκλυστές ανεξάρτητα από τον αριθμό των διαστάσεων τους.

Το θεώρημα των Henri Poincaré και Ivar Otto Bendixson, μας δείχνει ότι διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι δισδιάστατες έχουν αρκετά συνηθισμένη συμπεριφορά. Γνωστοί χαοτικοί εκλυστές όπως ο εκλυστής Lorenz και ο εκλυστής Rossler περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων οι οποίες περιέχουν μη γραμμικούς όρους. Από την άλλη πλευρά έχει αποδειχθεί ότι τρισδιάστατα μη γραμμικά συστήματα δεν εμφανίζουν χαοτική συμπεριφορά (Heidel & Fu, 1999). Επομένως για την εμφάνιση χαοτικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητο τα δυναμικά συστήματα να είναι μη γραμμικά ή απειροδιάστατα, παρόλα αυτά δεν παύουν να χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα.

2. Ηλεκτρικό Χάος

Στη σημερινή εποχή το χάος υπάρχει παντού στις καθημερινές ζωές μας όπως στη κοινωνία, στα χιλιάδες περίπλοκα δίκτυα και συστήματα που μας περιβάλλουν, καθώς επίσης πρέπει να έχουμε πάντα στο νου ότι έστω και οι παραμικρές αλλαγές καθημερινές συνθήκες μπορούν να αλλάξουν εντελώς το αποτέλεσμα της μέρας μας. Παρ' όλα αυτά θα δώσουμε βάση στη μελέτη του χάους στα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά κυκλώματα, καθώς είναι τομείς στους οποίους έχει παρατηρηθεί και δημοσιευθεί πολύ μεγάλος αριθμός χαοτικών φαινομένων. Επίσης, μελετώντας ακόμα και τα πιο απλοϊκά κυκλώματα που παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά, μπορούμε να κατανοήσουμε πιο εύκολα τη θεωρία του χάους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια από τα πιο γνωστά μοντέλα που παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά.

2.1 Σύστημα Lorenz

Το σύστημα Lorenz είναι ίσως το πιο γνωστό αιτιοκρατικό μη γραμμικό σύστημα το οποίο εμφανίζει χαοτική συμπεριφορά. Η ονομασία του συστήματος προήλθε από τον Αμερικανό μαθηματικό και μετεωρολόγο Edward Lorenz, ο οποίος ασχολούνταν με την μελέτη ενός απλοποιημένου μοντέλου «ατμόσφαιρας» με σκοπό να εξηγήσει ορισμένα απρόβλεπτα καιρικά φαινόμενα. Πρέπει να αναφερθεί ότι το σύστημα του Lorenz είναι επίσης γνωστό ως Το Φαινόμενο της Πεταλούδας.

Σύμφωνα με το Φαινόμενο της Πεταλούδας όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, η κίνηση των φτερών μιας πεταλούδας στον Αμαζόνιο μπορεί να δημιουργήσει μακροπρόθεσμα βροχή στην Κίνα. Αυτό που μόλις προαναφέρθηκε υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες, έτσι ώστε αν συμβεί έστω και απειροελάχιστη μεταβολή σε αυτές, η εξέλιξη του συστήματος θα είναι διαφορετική συγκριτικά με αυτήν που αναμέναμε να παρατηρήσουμε χωρίς την οποιαδήποτε μεταβολή. Επιπλέον το Φαινόμενο της Πεταλούδας μας βοηθάει να κατανοήσουμε γιατί η μελλοντική πρόγνωση του καιρού είναι αναξιόπιστη καθώς μια μικρή διαταραχή μπορεί να προκαλέσει μακροπρόθεσμα εντελώς διαφορετική συμπεριφορά.

Για να φτάσει στο επίκεντρο του ζητήματος ότι γιατί, η πρόβλεψη του καιρού είναι τόσο δύσκολο να προβλεφθεί, έκανε ό,τι έκαναν πολλοί επιστήμονες, δηλαδή απλοποίησε δραστικά τη συγκεκριμένη μελέτη. Γνωρίζοντας ότι η ατμόσφαιρα μπορεί με πολλούς τρόπους να συμπεριφερθεί σαν υγρό, κατασκεύασε το εξής απλό φυσικό μοντέλο. Αρχικά τοποθέτησε ένα αέριο μέσα σε ένα συμπαγές ορθογώνιο κουτί με μία βάση για θέρμανση νερού στο κάτω μέρος και καθώς το νερό θερμαινόταν με αργό ρυθμό, το φαινόμενο των κυλιόμενων ρευστών ξεκίνησε. Όταν ένα υγρό ή αέριο θερμαίνεται από κάτω, το υγρό τείνει να οργανωθεί σε σχήμα κυλίνδρων. Το ζεστό υγρό ανεβαίνει από τη μία πλευρά, χάνει θερμότητα και κατεβαίνει από την άλλη πλευρά. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κι άλλο, δημιουργείται μία αστάθεια, και οι κύλινδροι αναπτύσσουν μία ταλάντευση που κινείται μπρος – πίσω κατά μήκος των κυλίνδρων. Σε ακόμη υψηλότερες θερμοκρασίες, η ροή γίνεται άγρια και ταραχώδης.

Ο Edward Lorenz διατύπωσε ένα σύστημα τριών διαφορικών εξισώσεων, το οποίο απλοποιούσε το πρόβλημα. Για την απλοποίηση του προβλήματος, ο Lorenz χρησιμοποίησε διάφορες τεχνικές όπως η προσέγγιση Oberbeck – Boussinesq, η μεταγωγή Rayleigh – Benard (περιγράφοντας την κυκλοφορία υγρού μεταξύ δύο οριζόντιων στρωμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας), τη μέθοδο Galerkin κ.α. Το μοντέλο του Lorenz αποτελείται από τρεις μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες περιέχουν τρεις θετικές παραμέτρους και δύο τετραγωνικούς ή αλλιώς μη γραμμικούς όρους. Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα Lorenz είναι:

$$\begin{aligned}x' &= \sigma (y - x) \\y' &= x (\rho - z) - y \\z' &= xy - bz\end{aligned}$$

(2.1)

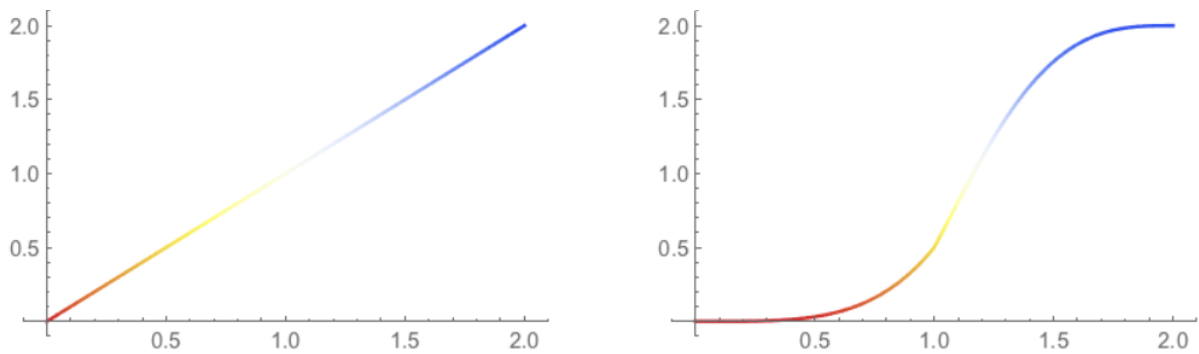
όπου σ , r και b είναι οι θετικές παράμετροι του συστήματος,

x : ο ρυθμός της κίνησης, δηλαδή πόσο γρήγορα περιστρέφονται οι κύλινδροι.

y : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ανερχόμενων και των φθινουσών ρευμάτων

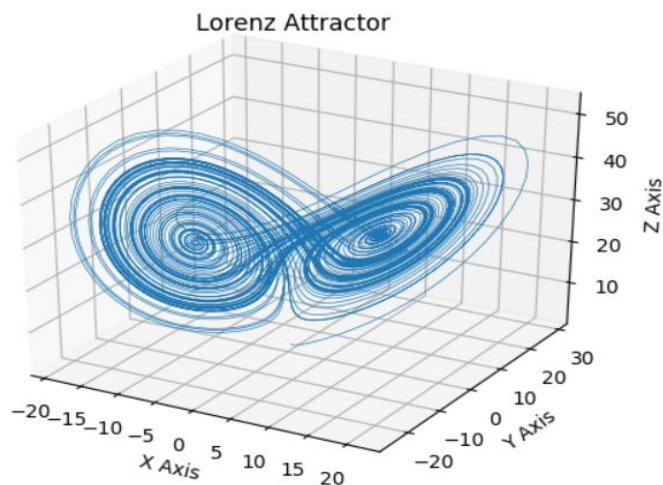
z : η παραμόρφωση (από τη γραμμικότητα) του κατακόρυφου προφίλ θερμοκρασίας.

Για να κατανοηθεί καλύτερα ο ρόλος της μεταβλητής z μπορούμε να παρατηρήσουμε το παρακάτω απλό γράφημα, που απεικονίζει τη γραμμική και τη μη γραμμική κλίση της θερμοκρασίας.

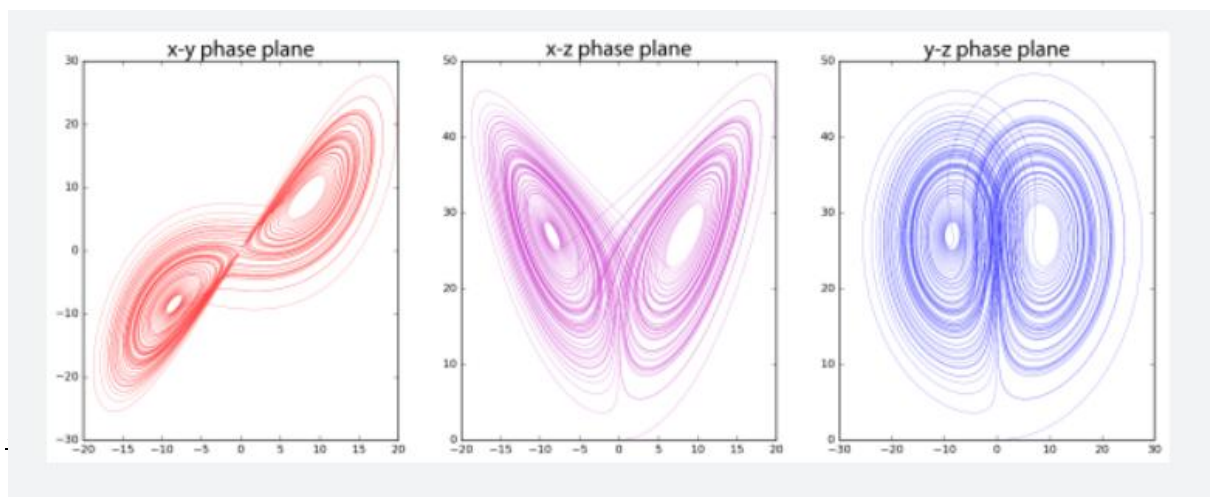


Εικόνα 2.1 – Γραμμική και μη γραμμική κλίση της θερμοκρασίας

Με την επιλογή των παραμέτρων $\sigma=10$, $r=28$ και $b=8/3$, λαμβάνουμε το πιο διάσημο φασικό πορτραίτο του συστήματος Lorenz, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα. Ο Lorenz παρατήρησε ότι καθώς το σύστημα εμφανίζει χαοτική συμπεριφορά κάτω από την επιλογή συγκεκριμένων παραμέτρων, δεν επαναλαμβάνεται ποτέ ακριβώς ενώ ταυτόχρονα παραμένει εντός μιας οριοθετημένης περιοχής του χώρου φάσης. Το παράξενο αυτό γεγονός που οδηγούσε στον περιορισμό της ανάπτυξης των τροχιών ονομάστηκε παράξενος ελκυστής. Οι διαφορικές εξισώσεις του Lorenz εφαρμόζονται σε αρκετά μοντέλα όπως μοντέλα για λέιζερ, κινητήρες DC, ηλεκτρικά κυκλώματα κ.α.

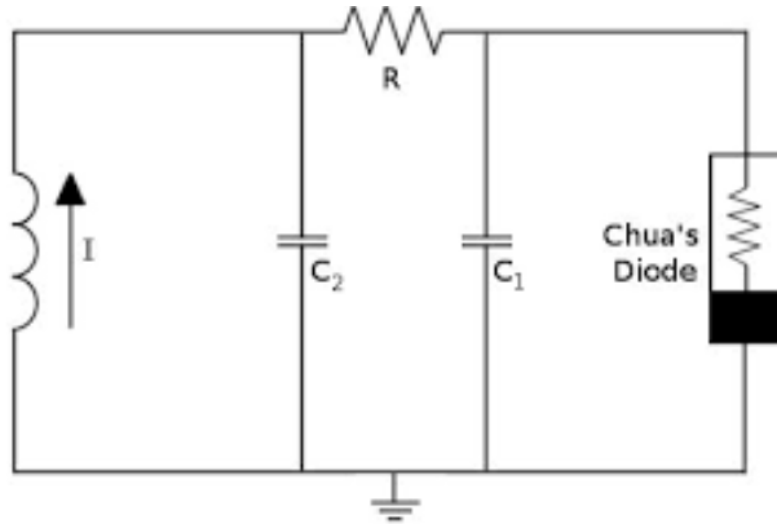


Εικόνα 2.2 – Ο ελκυστής Lorenz για $\sigma=10$, $r=28$, $b=8/3$



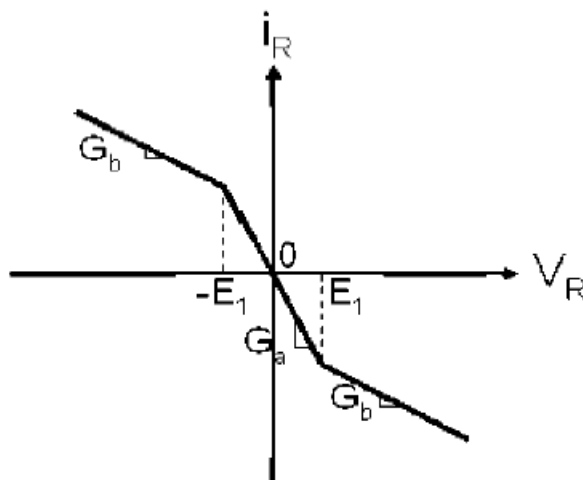
2.2 Το Κύκλωμα Chua

Το κύκλωμα Chua είναι το απλούστερο ηλεκτρονικό κύκλωμα που συμπεριφέρεται με χαοτικό τρόπο και ανακαλύφθηκε το 1983, από τον Αμερικανό ηλεκτρολόγο μηχανικό Leon Ong Chua (Matsumoto, 1984). Το κύκλωμα, που παρουσιάζεται στο σχήμα, αποτελείται από πέντε στοιχεία: δύο πυκνωτές, ένα πηνίο, έναν αντιστάτη και ένα μη γραμμικό στοιχείο, γνωστό ως δίοδος του Chua. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα Chua



Εικόνα 2.4 – Το κύκλωμα Chua

Ενώ οι δύο πυκνωτές, το πηνίο και η αντίσταση είναι τυποποιημένα ηλεκτρικά στοιχεία, το μη γραμμικό στοιχείο, η δίοδος Chua, πρέπει να συντεθεί. Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική $v-i$ της διόδου Chua όπου είναι κατά τμήματα γραμμική. Αυτή η μη γραμμικότητα είναι θεμελιώδης ώστε να πετύχουμε ταλάντωση χαοτικής συμπεριφοράς. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η χαρακτηριστική του ελεγχόμενου από τη τάση μη γραμμικού αντιστάτη είναι κατά τμήματα γραμμική.



Εικόνα 2.5 – Χαρακτηριστική διόδου Chua

Ένα αυτόνομο ηλεκτρονικό κύκλωμα πρέπει να ικανοποιεί μερικά κριτήρια που είναι απαραίτητα για την εμφάνιση χάους.

- το κύκλωμα πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια.
- πρέπει να περιλαμβάνει ένα μη γραμμικό στοιχείο.
- πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον μια αντίσταση.

Η δίοδος Chua, που είναι μια μη γραμμική αντίσταση επιτρέπει στο κύκλωμα να ικανοποιεί τις δύο τελευταίες προϋποθέσεις. Είναι άξιο να σημειωθεί ότι το κύκλωμα Chua δεν περιλαμβάνει πάρα πολλά στοιχεία πέρα από εκείνα που απαιτούνται για την εμφάνιση του χάους, δηλαδή μια αντίσταση.

Με την χρήση των νόμων του Kirchhoff, εξάγονται οι διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν το κύκλωμα Chua ως εξής:

$$C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} = G (V_{c2} - V_{c1}) - f(V_{c1})$$

$$C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} = G (V_{c1} - V_{c2}) - i_L$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{c2}$$

(2.2)

Όπου $G=1/R$ είναι η αγωγιμότητα για την αντίσταση R , C_1 και C_2 είναι οι πυκνωτές και L το πηνίο. Η απόκριση της μη γραμμικής αντίστασης περιγράφεται από τη σχέση:

$$f(V_{c1}) = m_0 V_{c1} + \frac{1}{2} (m_1 - m_0) [|V_{c1} + B_p| - |V_{c1} - B_p|]$$

(2.3)

Παρόλα αυτά για να γίνει ευκολότερη η μαθηματική ανάλυση του κυκλώματος Chua, χρησιμοποιείται το κανονικοποιημένο μοντέλο το οποίο είναι:

$$\begin{aligned} x' &= \alpha [y - x - f(x)] \\ y' &= x - y + z \\ z' &= -\beta y \end{aligned}$$

(2.4)

με $x = V_{c1}/B_p$, $y = V_{c2}/B_p$, $z = i/B_p G$, $\alpha = C_2/C_1$, $\beta = C_2/G^2 L$. Το κανονικοποιημένο μοντέλο της απόκρισης της μη γραμμικής αντίστασης είναι:

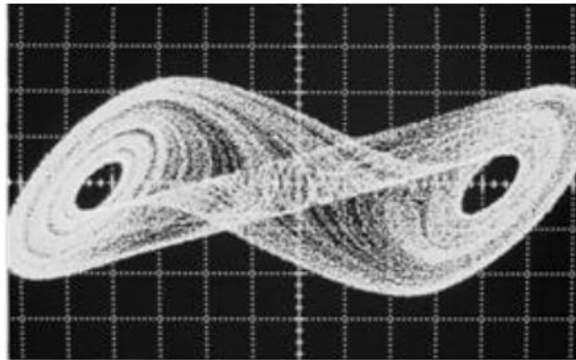
$$f(x) = bx + \frac{1}{2} (a - b) [|x + 1| - |x - 1|]$$

(2.5)

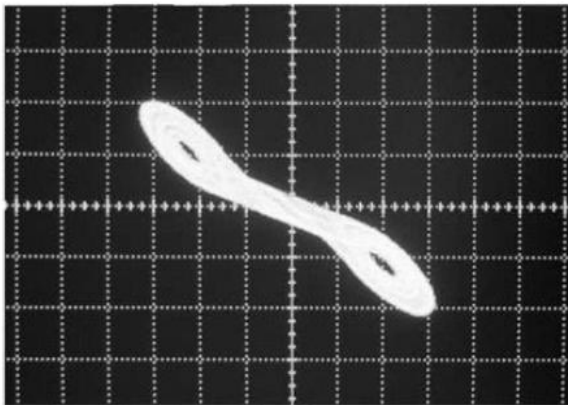
με $a = m_1/G$, $b = m_0/G$

Για ένα δεδομένο σύνολο παραμέτρων το κύκλωμα εμφανίζει έναν χαοτικό ελκυστή που ονομάζεται διπλός σπειροειδής ελκυστής. Τα σχήματα που φαίνονται παρακάτω παρουσιάζουν τη

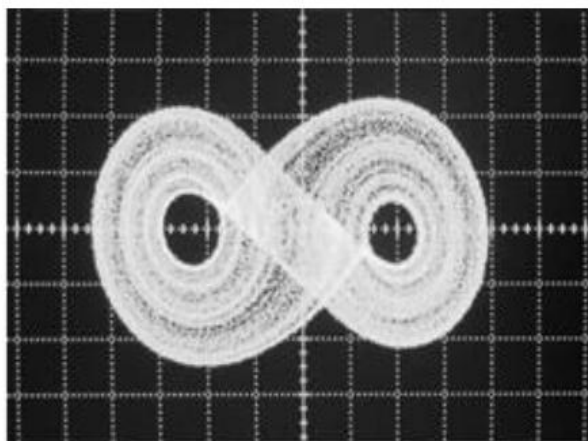
προβολή του ελκυστή διπλού κυλίνδρου σε τρία διαφορετικά επίπεδα, όπου μπορεί να θεωρηθεί ότι το X , το Y και το Z είναι σήμα τάσης ως προς το V_{c1} , V_{c2} και το i_L .



Εικόνα 2.6 – Προβολή του επιπέδου $X - Y$ του διπλού σπειροειδούς ελκυστή



Εικόνα 2.7 – Προβολή του επιπέδου $X - Z$ του διπλού σπειροειδούς ελκυστή



Εικόνα 2.8 – Προβολή του επιπέδου $Y - Z$ του διπλού σπειροειδούς ελκυστή

2.3 Σύστημα Rössler

Το σύστημα Rössler αποτελεί ένα ακόμη γνωστό χαοτικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από τρεις μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που μελετήθηκαν πρώτη φορά από τον Γερμανό Otto Rössler το 1976. Με την ανακάλυψη του ελκυστή Lorenz, αρκετοί προσπάθησαν να εξάγουν ένα παρόμοιο αποτέλεσμα σε διαφορετικά πεδία. Ο Rössler είχε θέσει σαν στόχο να βρει ένα μοντέλο το οποίο να συμπεριφέρεται όπως και το μοντέλο του Lorenz, αλλά η ανάλυσή του να είναι πολύ πιο εύκολη. Στο μοντέλο του Rössler, εμφανίζεται μόνο ένας μη γραμμικός όρος, ο οποίος όμως είναι ικανός να οδηγήσει το σύστημα σε χαοτική συμπεριφορά. Αργότερα το μοντέλο του Rössler χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση καταστάσεων ισορροπίας σε διάφορες χημικές αντιδράσεις. Ο Rössler συνεχίζοντας τις μελέτες του, έφτασε στο σημείο να ανακαλύψει τον πρώτο τεσσάρων διαστάσεων υπέρ χαοτικό ταλαντωτή. Οι τρεις μη γραμμικές εξισώσεις είναι:

$$\begin{aligned}x' &= -y-z \\y' &= x+ay \\z' &= b+z(x-c)\end{aligned}$$

(2.6)

Όπου οι μεταβλητές x , y , z είναι δυναμικές μεταβλητές που ορίζουν τον χώρο φάσεων, ενώ οι μεταβλητές a , b , c είναι παράμετροι του συστήματος και θεωρούνται ως σταθερές.

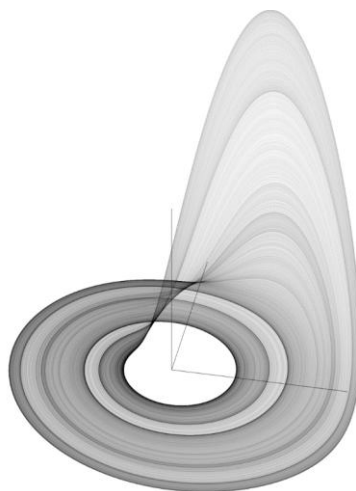
Το σύστημα Rössler, που περιγράφεται και αρκετές φορές ως εκλυστής Rössler, περιέχει δύο σταθερά σημεία (fixed points) τα οποία βρίσκονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{cases}x = \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2} \\y = -\left(\frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2a}\right) \\z = \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4ab}}{2a}\end{cases}$$

(2.7)

Με το ένα σταθερό σημείο να βρίσκεται στο κέντρο του ελκυστή και να είναι ασταθές σπιδράλ που βρίσκεται κυρίως στο πεδίο x - y ενώ το άλλο σταθερό σημείο εκτός της περιοχής του ελκυστή.

Με την επιλογή των παραμέτρων $a=0.2$, $b=0.2$ και $c=5.7$, λαμβάνουμε ένα φασικό πορτραίτο του συστήματος Rössler, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα



2.4 Σύστημα Chen

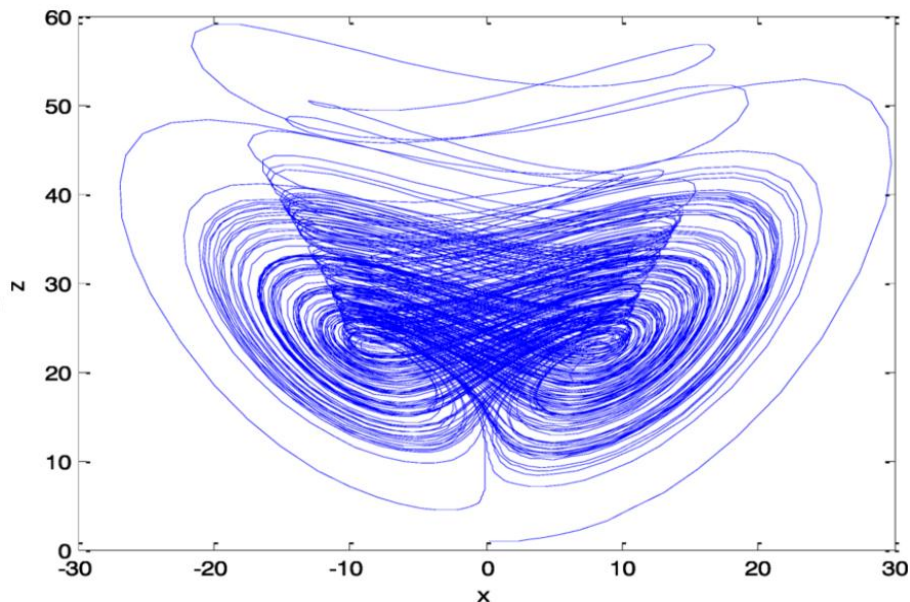
Το σύστημα Chen ανακαλύφθηκε το 1999 από τον Guanrong Chen και τον Tetsushi Ueta. Το σύστημα αυτό αποτελεί ακόμη ένα χαοτικό σύστημα, στο οποίο παρατηρείται ελκυστής διπλού κυλίνδρου, όπως και στο κύκλωμα Chua. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι παρόμοιο με το σύστημα Lorenz καθώς διαφέρουν μόνο σε μια από τις τρεις διαφορικές εξισώσεις που τα περιγράφουν. Είναι άξιο να σημειωθεί πως παρά την ομοιότητα που εμφανίζουν τα δύο συστήματα στις διαφορικές τους εξισώσεις, εμφανίζουν διαφορές τόσο στα φασικά πορτραίτα όσο και στις τιμές των παραμέτρων που οδηγούν τα δύο συστήματα στην εμφάνιση χαοτικής συμπεριφοράς.

Το σύστημα Chen περιγράφεται από τρεις μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες είναι:

$$\begin{aligned}x' &= a(y - x) \\y' &= (c - a)x - xz + cy \\z' &= xy - bz\end{aligned}\tag{2.8}$$

όπου a , b , c είναι θετικές πραγματικές παράμετροι του συστήματος.

Με την επιλογή των παραμέτρων $a=35$, $b=3$ και $c=28$, λαμβάνουμε ένα χαρακτηριστικό φασικό πορτραίτο του συστήματος Chen, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.10 – Ο ελκυστής Chen για $a=35$, $b=3$ και $c=28$

2.5 Σύστημα Sprott

Ένα άλλο σύστημα είναι εκείνο του καθηγητή φυσικής Julien Clinton Sprott. Εκείνος παρουσίασε τα δεκαεννιά διαφορετικά χαοτικά μοντέλα τα οποία τα συμβολίζονται ως Sprott A, Sprott B, ... , Sprott S. Ένα από τα μοντέλα του Sprott, το Sprott B, περιγράφεται από ένα σύστημα τριών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες είναι:

$$\begin{aligned}x' &= yz \\y' &= x - y \\z' &= 1 - xy\end{aligned}$$

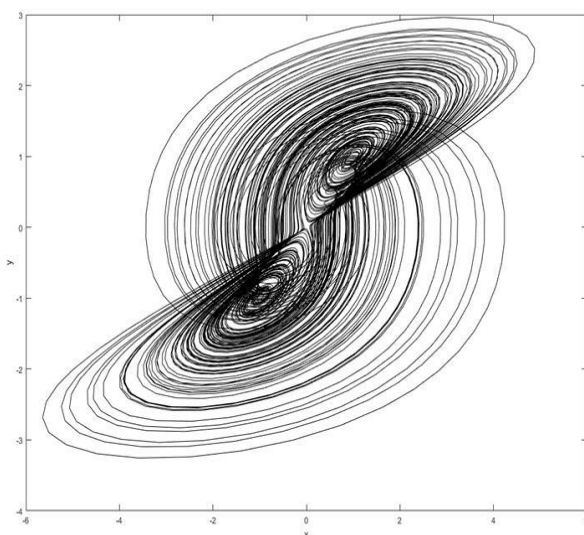
(2.9)

Ενώ το μοντέλο Sprott C περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}x' &= yz \\y' &= x - y \\z' &= 1 - x^2\end{aligned}$$

(2.10)

Με το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων λαμβάνουμε την μορφή του ελκυστών, που παρουσιάζονται.



Εικόνα 2.11 – Ο ελκυστής Sprott B

2.6 Ταλαντωτής Van der Pol

Ένα ακόμα σύστημα, αλλά λιγότερο γνωστό σε σχέση με τα συστήματα του Lorenz και του Rössler, είναι ο ταλαντωτής Van der Pol. Η ανακάλυψη του ταλαντωτή Van der Pol προήλθε από τον Ολλανδό φυσικό και ηλεκτρολόγο μηχανικό Balthasar van der Pol (Cartwright, 1960). Ο Van der Pol παρατήρησε ότι σε ηλεκτρικά κυκλώματα που χρησιμοποιούσαν λυχνίες κενού, εμφανιζόντουσαν σταθερές ταλαντώσεις, οι οποίες σήμερα ονομάζονται οριακοί κύκλοι. Το 1927, ο Van der Pol και ο συνεργάτης του Van der Mark, ανακαλύψαν ότι για ορισμένες συχνότητες κίνησης ακούστηκε ένας παράξενος θόρυβος. Ο παράξενος αυτός θόρυβος ήταν αποτέλεσμα της εμφάνισης χάους.

Η εξίσωση Van der Pol έχει μακρά ιστορία χρήσης τόσο στις φυσικές όσο και στις βιολογικές επιστήμες. Για παράδειγμα, στη βιολογία, οι Fitzhugh και Nagumo επέκτειναν την εξίσωση σε ένα επίπεδο πεδίο ως μοντέλο για τα δυναμικά δράσης των νευρώνων. Η εξίσωση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στη σεισμολογία για τη μοντελοποίηση των δύο πλακών σε ένα γεωλογικό ρήγμα και σε μελέτες φωνοποίησης για τη μοντελοποίηση του δεξιού και του αριστερού ταλαντωτή φωνητικής πτυχής

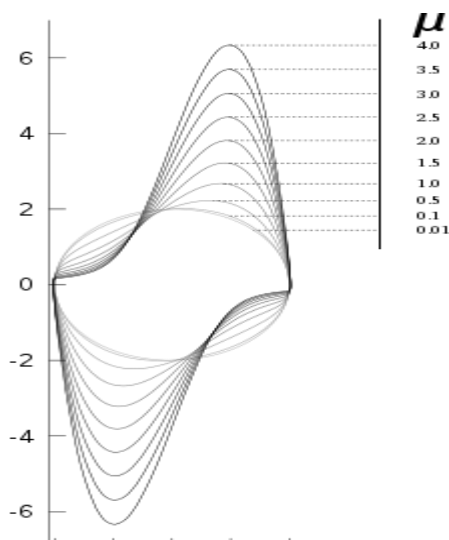
Ο ταλαντωτής Van der Pol περιγράφεται από την παρακάτω μη γραμμική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

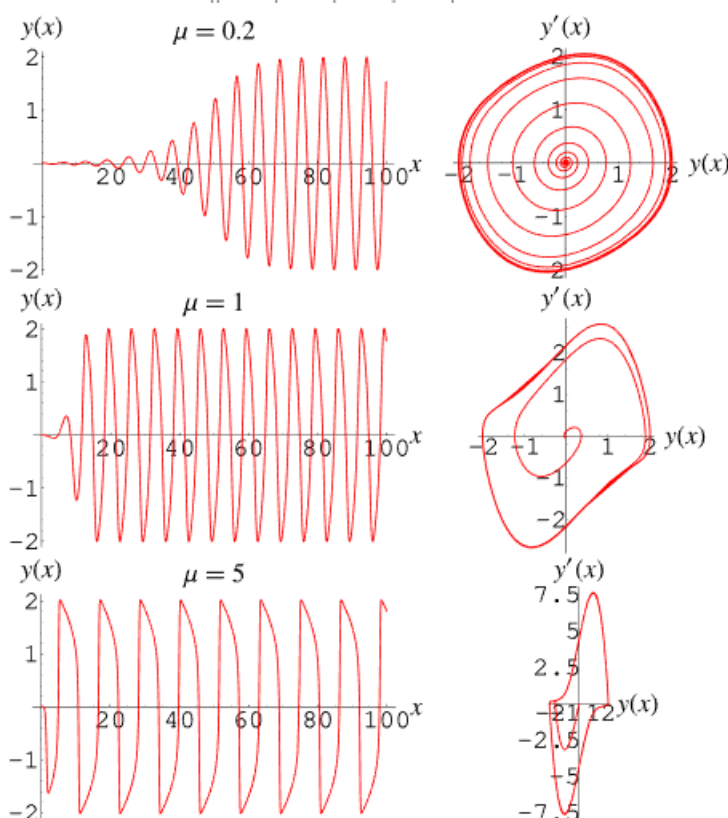
(2.11)

όπου x είναι η συντεταγμένη θέσης η οποία είναι συνάρτηση του χρόνου t , και μ είναι μια κλιμακωτή παράμετρος που δείχνει τη μη γραμμικότητα και την ισχύ της απόσβεσης.

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τον ελκυστή Van der Pol για τις διάφορες τιμές που μπορεί να πάρει η παράμετρος μ :



Εικόνα 2.12 – Ο διάφορες τιμές του



ελκυστής Van der Pol για μ .

Εικόνα 2.13 – Ο ελκυστής Van der Pol για $\mu = 0.2$, $\mu = 1$, $\mu = 5$.

2.7 Απεικόνιση Hénon

Η απεικόνιση του Hénon, που μερικές φορές ονομάζεται ελκυστήρας ή απεικόνιση ή χάρτης Hénon – Pomeau, είναι ένα δυναμικό σύστημα διακριτού χρόνου. Είναι ένα από τα πιο μελετημένα παραδείγματα δυναμικών συστημάτων που παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά. Ο χάρτης Hénon παίρνει ένα σημείο (x_n, y_n) στο επίπεδο και το αντιστοιχίζει σε ένα νέο σημείο. Η απεικόνιση Hénon δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + y_n$$

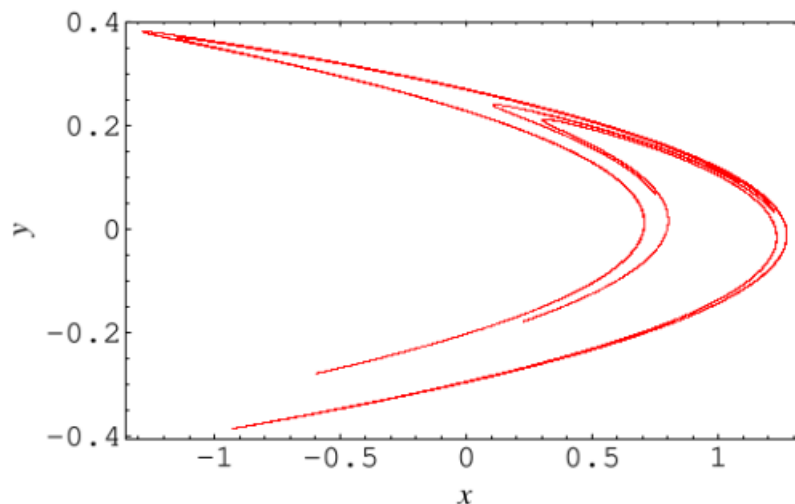
$$y_{n+1} = bx_n$$

(2.12)

Η απεικόνιση εξαρτάται από δύο παραμέτρους, τις a και b , οι οποίες για τον κλασικό χάρτη Hénon έχουν τιμές $a = 1,4$ και $b = 0,3$. Για τις κλασικές τιμές η απεικόνιση του Hénon είναι χαοτική. Για άλλες τιμές των a και b η απεικόνιση μπορεί να είναι χαοτική, διακοπτόμενη ή να συγκλίνει σε μια περιοδική τροχιά. Μια επισκόπηση του τύπου συμπεριφοράς του χάρτη σε διαφορετικές τιμές παραμέτρων μπορεί να ληφθεί από το διάγραμμα της τροχιάς του.

Ο χάρτης εισήχθη από τον Michel Hénon ως ένα απλοποιημένο μοντέλο του τμήματος Poincaré του μοντέλου Lorenz. Για τον κλασικό χάρτη, ένα αρχικό σημείο του επιπέδου είτε θα πλησιάσει ένα σύνολο σημείων που είναι γνωστά ως παράξενος ελκυστήρας του Hénon, είτε θα αποκλίνει

άπειρο.
παρακάτω
βλέπουμε
ελκυστή
Hénon
τιμές $a =$
 $= 0,3$:



στο
Στην
εικόνα
τον
του
για τις
1,4 και b

Εικόνα 2.14 – Ο ελκυστής Hénon για τις τιμές $a = 1,4$ και $b = 0,3$.

3. ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ

3.1 Πρόγραμμα εξομοίωσης TINA-TI

3.1.1 Εισαγωγή

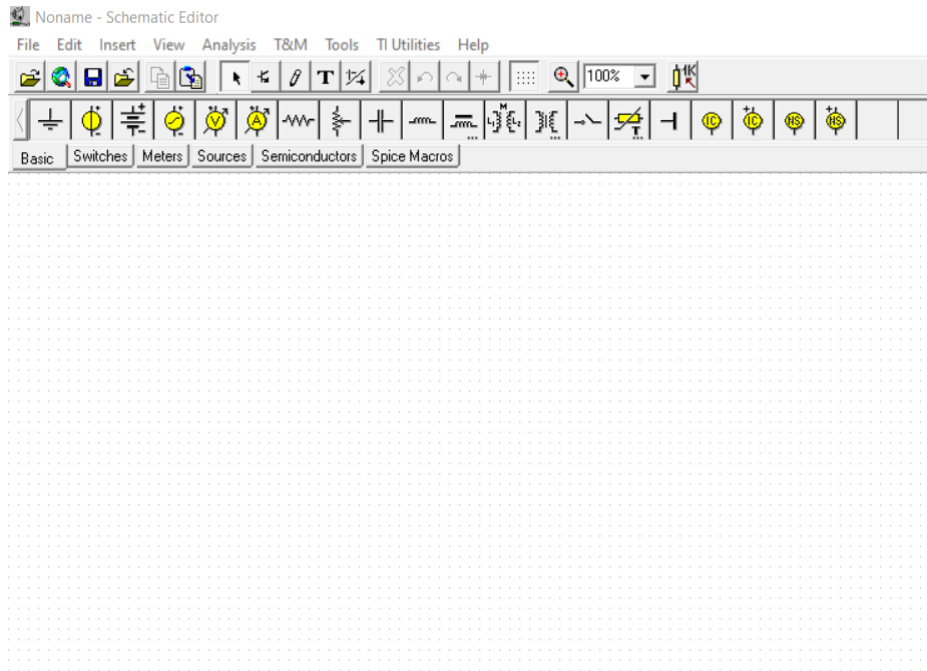
Για τις ανάγκες της υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα εξομοίωσης κυκλωμάτων TINA από την Texas Instruments.

Η Texas Instruments συνεργάστηκε με την Design Soft, Inc. Για να παρέχει στους πελάτες της το TINA-TI, ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης κυκλώματος που είναι κατάλληλο για την

προσομοίωση αναλογικής και μεταγωγής τροφοδοσίας (SMPS) κυκλώματα. Το εργαλείο είναι ιδανικό για να βοηθήσει σχεδιαστές και μηχανικούς να αναπτύξουν και να δοκιμάσουν ιδέες κυκλωμάτων. Η TI επέλεξε το λογισμικό προσομοίωσης TINA έναντι άλλων προσομοιωτών που βασίζονται σε spice για τον συνδυασμό του σε ισχυρές δυνατότητες ανάλυσης, απλή και διαισθητική διεπαφή βασισμένη σε γραφικά και ευκολία στη χρήση.

3.1.2 Σχηματική Απεικόνιση

Μετά την εγκατάσταση του προγράμματος μόλις ανοιχτεί το πρόγραμμα μας εμφανίζει την αρχική οθόνη όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:

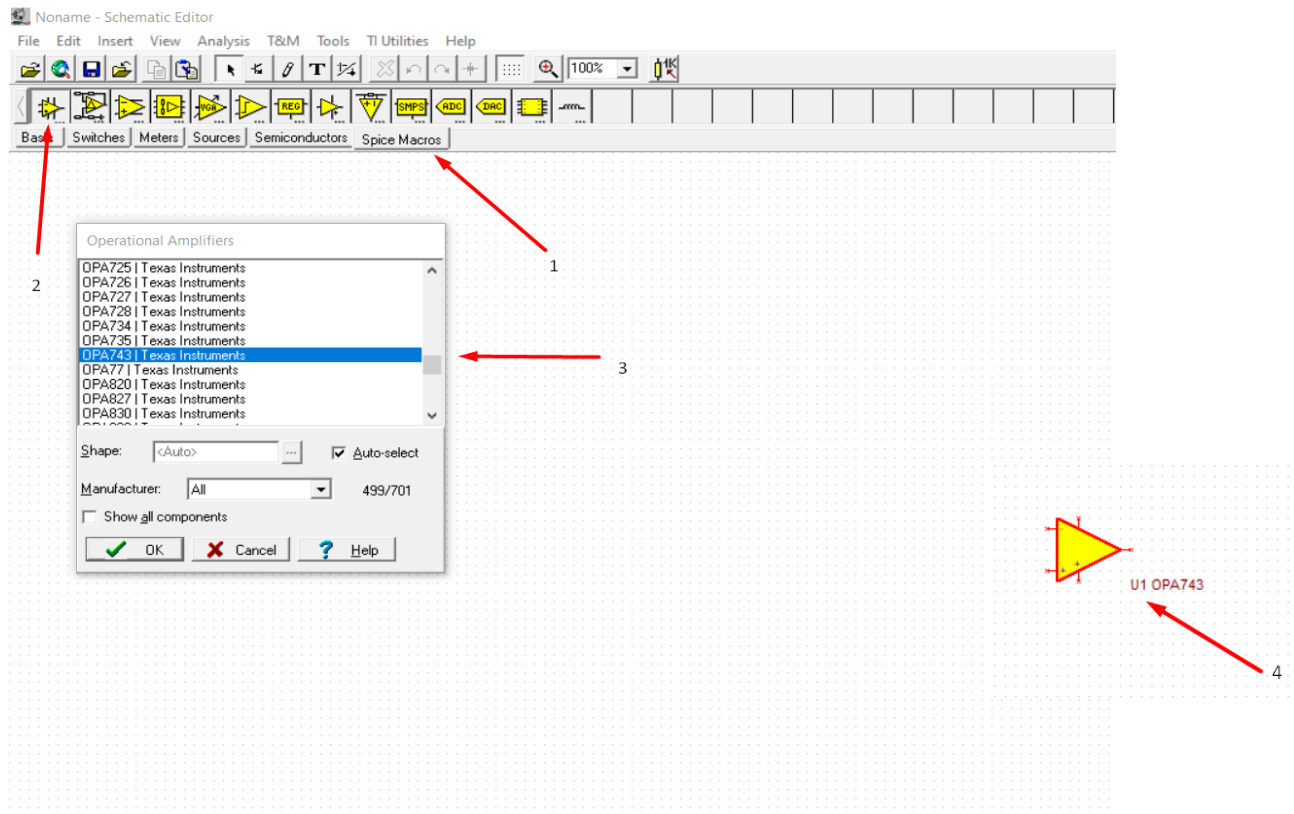


Εικόνα 3.1 – Αρχική απεικόνιση προγράμματος TINA

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη σχηματική διάταξη του προγράμματος. Ο κενός χώρος που υπάρχει είναι το παράθυρο σχεδίασης όπου κατασκευάζεται το εκάστοτε κύκλωμα που θέλουμε να επεξεργαστούμε. Κάτω από τη γραμμή τίτλου του που φαίνεται το όνομα του κάθε αρχείου. Υπάρχει μια λειτουργική σειρά μενού με επιλογές όπως λειτουργίες αρχείου, αναλυτικές λειτουργίες, επιλογή εξοπλισμού δοκιμής και μέτρησης. Ακριβώς κάτω από τη σειρά μενού βρίσκεται μια σειρά από εικονίδια που σχετίζονται με διαφορετικά αρχεία και εργασίες TINA. Η τελευταία σειρά εικονιδίων αφορά στην επιλογή μιας συγκεκριμένης ομάδας στοιχείων. Αυτές οι ομάδες εξαρτημάτων περιέχουν βασικά παθητικά στοιχεία, ημιαγωγούς, ακόμη και εξελιγμένα μακρομοντέλα συσκευών. Αυτές οι ομάδες έχουν πρόσβαση για τη δημιουργία του σχηματικού κυκλώματος.

3.1.3 Δημιουργία κυκλώματος με τη χρήση του TINA-TI

Θα κατασκευάσουμε ένα αναλογικό κύκλωμα και θα δείξουμε μερικές από τις δυνατότητες ανάλυσης κυκλώματος. Για αυτό το παράδειγμα, επιλέξαμε ένα κύκλωμα ταλαντωτή γέφυρας Wien με σταθεροποίηση πλάτους, ημιτονικού κύματος υψηλής απόδοσης 1kHz. Για την εφαρμογή του κυκλώματος επιλέξαμε ένας ενισχυτής λειτουργίας opa743 12v cmos της Texas Instruments. Αυτός ο ενισχυτής είναι κατάλληλος για αυτόν τον σχεδιασμό και παρέχει πολύ καλές επιδόσεις τόσο στο DC όσο και στο AC. Λειτουργεί με τροφοδοσία από 3,5v έως 12v ενώ για το παράδειγμά μας χρησιμοποιήσαμε $\pm 5V$ (10V). Επιλέξαμε από την καρτέλα Spice Macros και, στη συνέχεια, το σύμβολο op amp για πρόσβαση στο μακρομοντέλο opa743. Όταν μας τον εμφάνισε τον φέραμε στην επιφάνεια του προγράμματος μας. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε την αρχική δημιουργία του κυκλώματος.

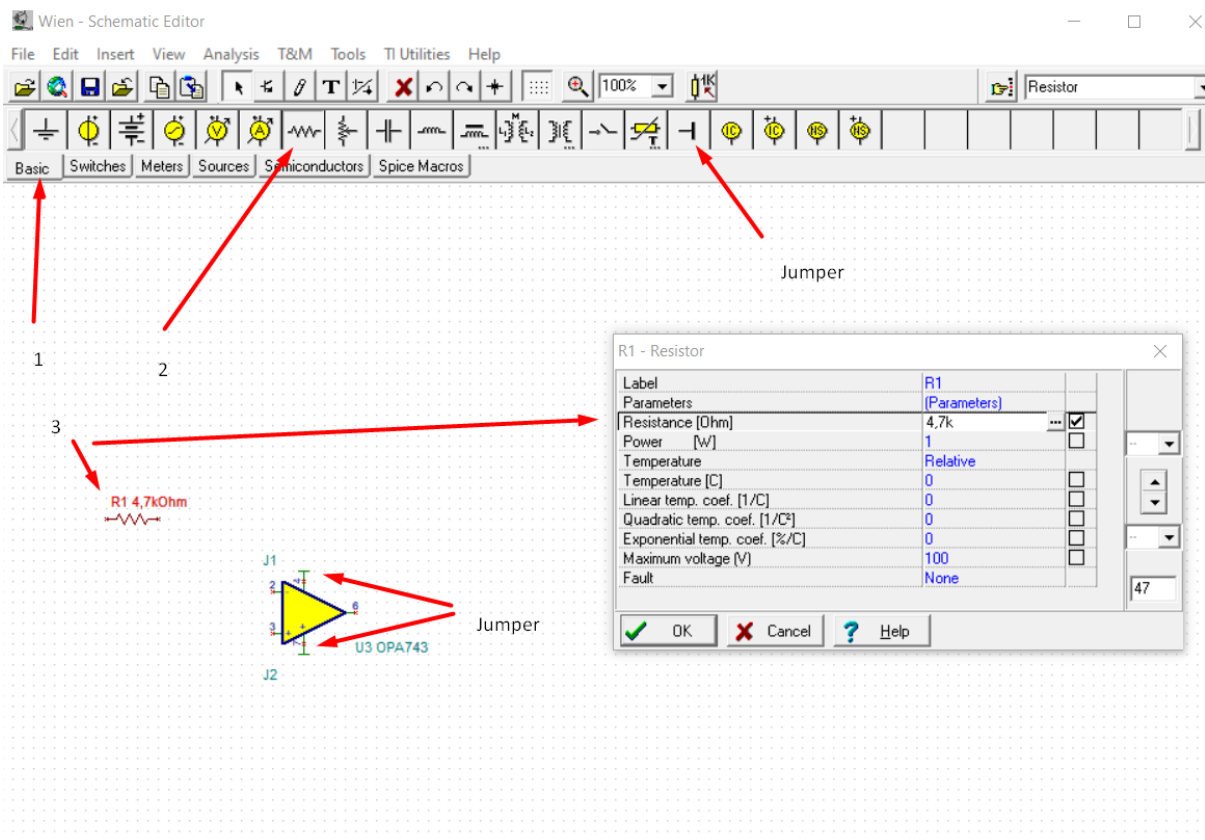


Εικόνα 3.2 – Δημιουργία κυκλώματος με το TINA-TI

3.1.4 Προσθήκη των υπόλοιπων στοιχείων

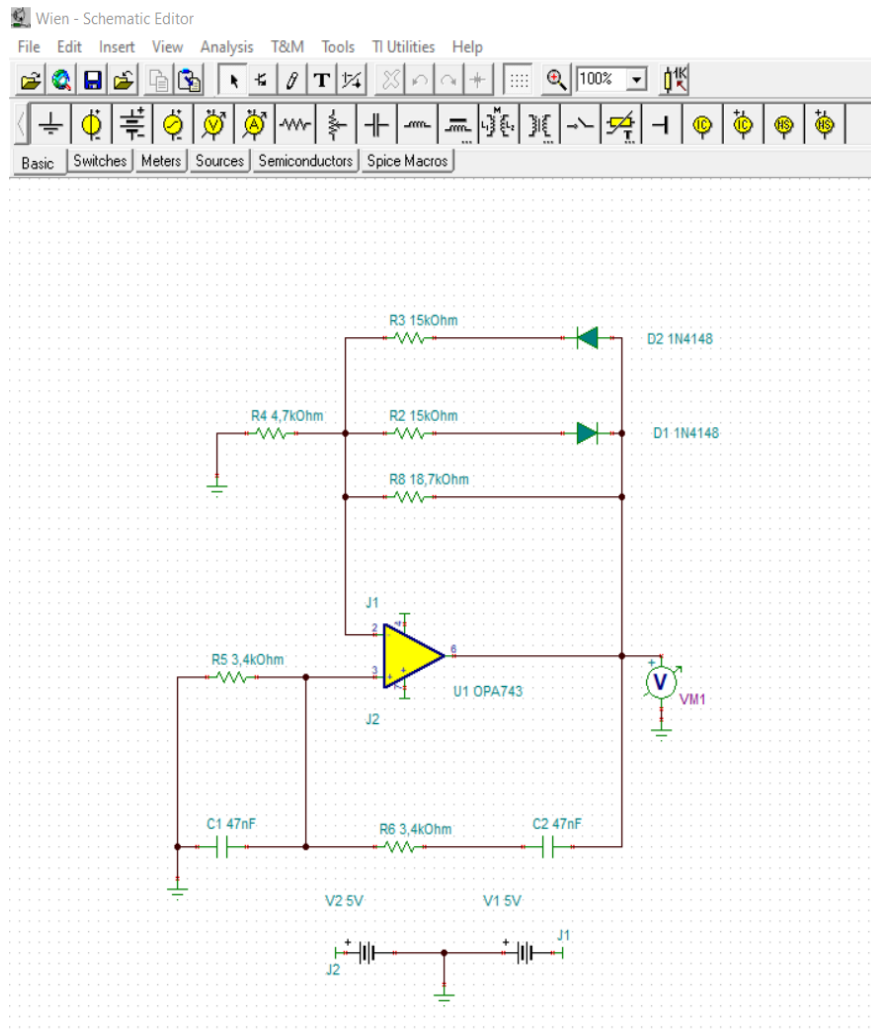
Η επιλογή στοιχείων γίνεται εύκολα επιλέγοντας μια ομάδα στοιχείων από την κάτω σειρά καρτελών όπως τα βασικά στοιχεία, τους διακόπτες, τους μετρητές και ούτω καθεξής. Αυτές οι καρτέλες παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία παθητικών στοιχείων, πηγών, μετρητών, ηλεκτρονόμων, ημιαγωγών και των μακροεντολών κυκλωμάτων όπως αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Επιλέγοντας το στοιχείο που μας ενδιαφέρει το φέρνουμε στην επιφάνεια του προγράμματός μας.

Για το παράδειγμά μας, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αρχικά επιλέγουμε μια αντίσταση από την ομάδα καρτελών των βασικών στοιχείων και στη συνέχεια την τοποθετούμε δίπλα στο σύμβολο op amp. Το TINA-TI ορίζει αυτήν την αντίσταση ως R1 με αρχική τιμή να είναι 1kΩ, παρόλα αυτά η τιμή μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε κυκλώματος. Στη συνέχεια προσθέσαμε και τα υπόλοιπα στοιχεία που απαιτεί το κύκλωμά μας και παραμετροποιήσαμε τις τιμές τους σύμφωνα με τις ανάγκες μας. Είναι άξιο να σημειωθεί ένα εύχρηστο στοιχείο που εμφανίζεται στην ομάδα των βασικών στοιχείων και είναι το jumper, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα που μοιάζει με ένα πλάγιο γράμμα T. Το jumper μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση παρόμοιων, σχετικών λειτουργιών κυκλώματος όπως V+, V- ή οποιαδήποτε άλλο σημείο κυκλώματος που έχει πολλαπλές συνδέσεις. Η χρήση του jumper μειώνει την ακαταστασία της καλωδίωσης που μπορεί να υπάρχει σε ένα κύκλωμα. Τέλος τα κοινά jumper πρέπει να φέρουν το ίδιο όνομα ετικέτας ώστε το TINA-TI να τα συνδέσει μεταξύ τους. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε τη προσθήκη και τη παραμετροποίηση της τιμής της αντίστασης καθώς και τα jumpers.



Εικόνα 3.3 – Εισαγωγή αντίστασης και jumper

Στη συνέχεια και αφού επιλεγούν και τοποθετηθούν σωστά όλα τα εξαρτήματα, μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους. Κάθε εξάρτημα έχει κόμβους όπου χρειάζονται να γίνουν οι απαραίτητες συνδέσεις για να ολοκληρωθεί το κύκλωμα. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε στο κύκλωμα με όλα τα στοιχεία.

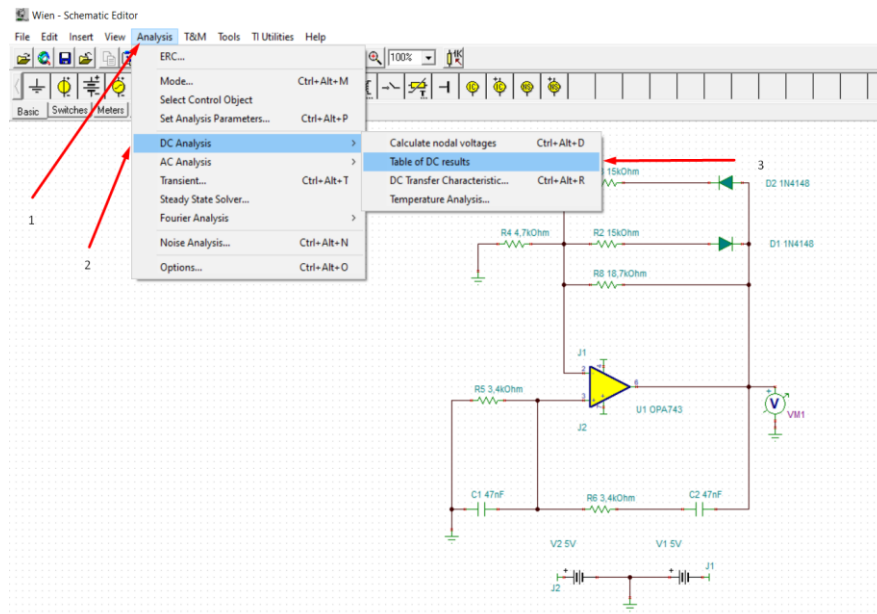


Εικόνα 3.4 – Ολοκληρωτικό κύκλωμα γέφυρας Wien

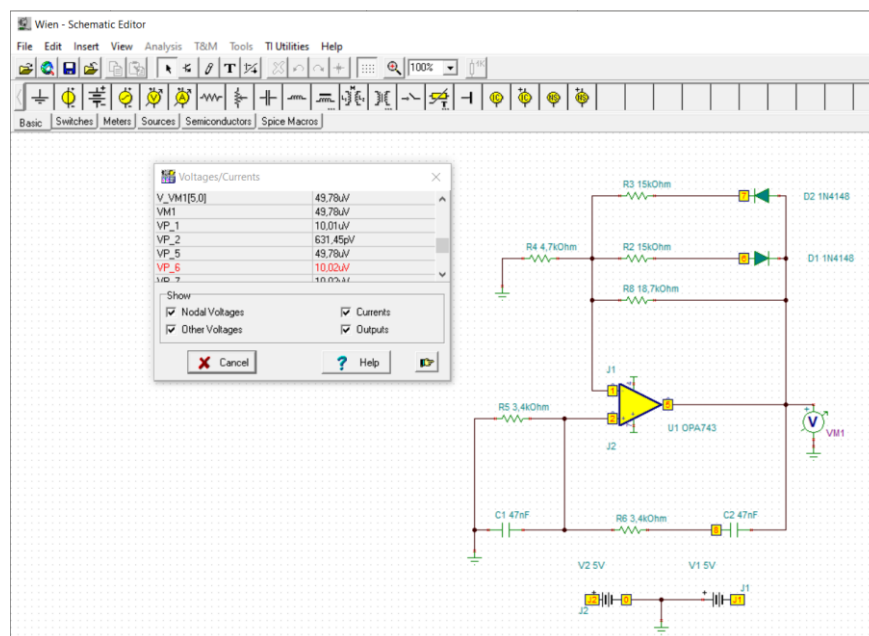
3.1.5 Δυνατότητες Ανάλυσης

Όταν ολοκληρωθεί η σχηματική καταχώρηση του κυκλώματος, το κύκλωμα είναι σχεδόν έτοιμο για προσομοίωση. Η διαδικασία της ανάλυσης ξεκινάει από το μενού ανάλυση όπου υπάρχει μια λίστα με διαφορετικούς τύπους αναλύσεων όπως AC, DC, παροδικό ή θόρυβος. Η πρώτη επιλογή κάτω από το μενού της ανάλυσης είναι ένας έλεγχος κανόνων σφάλματος (ERC) όπου, με την επιλογή αυτή μας δίνεται η δυνατότητα να ελέγξουμε για τυχόν σφάλματα στο κύκλωμά μας.

Με την επιλογή ενός τύπου ανάλυσης προς εκτέλεση, μας εμφανίζεται ένα παράθυρο με διαφορετικές ρυθμίσεις που αφορούν τον συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης που επιλέξαμε. Η πρώτη ανάλυση που πραγματοποιείται σε ένα κύκλωμα είναι γενικά μια ανάλυση συνεχούς ρεύματος διότι, αυτή η δοκιμή παρέχει έναν έλεγχο πραγματικότητας, έτσι ώστε να μπορούν να επαληθευτούν οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας συνεχούς ρεύματος. Η λειτουργία του προγράμματος DC Analysis μπορεί να ρυθμιστεί για να υπολογίζει τις κομβικές τάσεις, να παρέχει έναν πίνακα με τα αποτελέσματα της τάσης και του ρεύματος συνεχούς ρεύματος, να δημιουργεί μια σάρωση συνεχούς ρεύματος του κυκλώματος ή να εκτελεί μια ανάλυση θερμοκρασίας. Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε με ποιο τρόπο επιτυγχάνεται η DC ανάλυση.

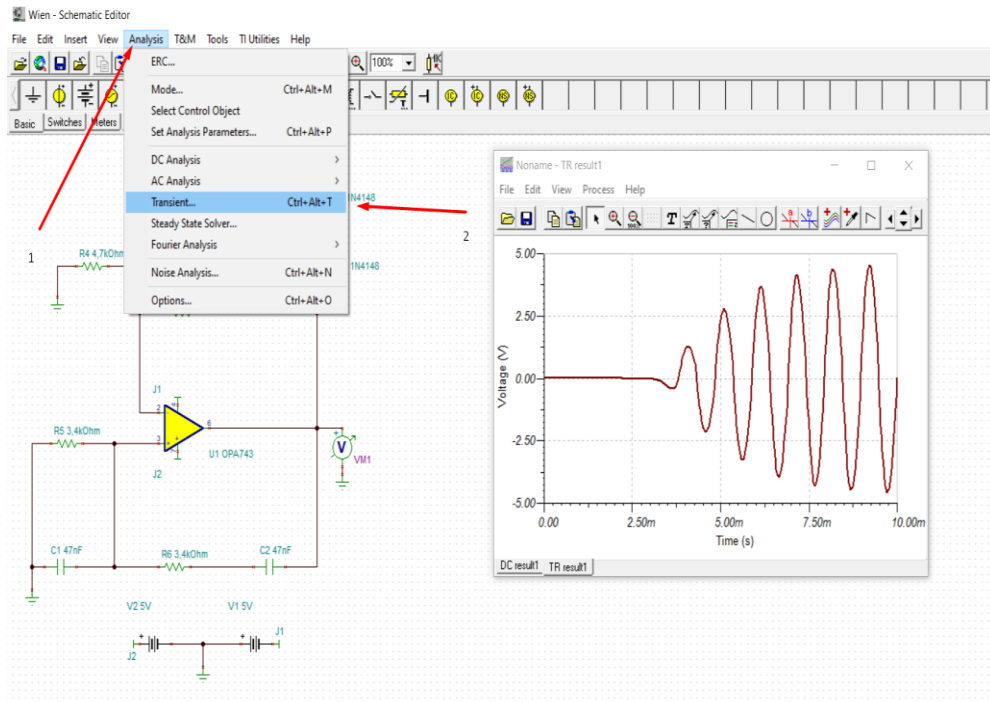


Εικόνα 3.5 – Το μενού της ανάλυσης DC



Εικόνα 3.6 – Ο πίνακας της ανάλυσης DC

Επιπρόσθετα μπορεί να πραγματοποιηθεί προσομοίωση συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος και πεδίου χρόνου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ανάλυση που εκτελείται για τον ταλαντωτή γέφυρας Wien που έχουμε δημιουργήσει. Απεικονίζεται η εκκίνηση του ταλαντωτή της γέφυρας Wien και η απόδοση σε σταθερή κατάσταση.



Εικόνα 3.7 – Συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος και πεδίου χρόνου

Τέλος το λογισμικό TINA-TI μπορεί να δημιουργήσει αποτελέσματα μετά την προσομοίωση σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις, ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που έχουμε εκτελέσει. Επιπρόσθετα υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί λειτουργία προσομοίωσης ψευδό – πραγματικού χρόνου, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν εικονικά όργανα για την παρατήρηση της εξόδου ή των εξόδων ενώ το κύκλωμα είναι σε λειτουργία. Με τον ίδιο τρόπο, ένας αναλυτής εικονικού σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με ένα κύκλωμα ενισχυτή, έτσι ώστε να μπορεί να παρατηρηθεί η αρμονική απόδοση μιας προσομοίωσης. Οι επιλογές του μενού T&M περιλαμβάνουν, εκτός από τον εικονικό παλμογράφο, εικονικό πολύμετρο AC/DC, γεννήτρια λειτουργιών και ένα X-Y μηχάνημα εγγραφής. Στη παρακάτω εικόνα βλέπουμε έναν εικονικό παλμογράφο που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της εξόδου σταθερής κατάστασης του κυκλώματος ταλαντωτή γέφυρας Wien.



Εικόνα 3.8 – Προσομοίωση με εικονικό παλμογράφο

3.2 Το Memristor

3.2.1 Εισαγωγή

Έως το 1971, τα τρία μέχρι τότε γνωστά θεμελιώδη ηλεκτρικά στοιχεία ήταν η αντίσταση, το πηνίο και ο πυκνωτής. Το 1971, ο Leon Chua παρουσίασε θεωρητικά ένα τέταρτο θεμελιώδες ηλεκτρικό στοιχείο που το ονόμασε “Memristor”. Το memristor είναι ένα γραμμικό ηλεκτρικό εξάρτημα δύο ακροδεκτών που σχετίζεται με το ηλεκτρικό φορτίο και τη σύνδεση μαγνητικής ροής, του οποίου η αντίσταση εξαρτάται από το μέγεθος, τη κατεύθυνση και τη διάρκεια της εφαρμοζόμενης τάσης. Το όνομά του προέρχεται από τη σύντμηση για το memory – resistor (δηλαδή αντίσταση με μνήμη).



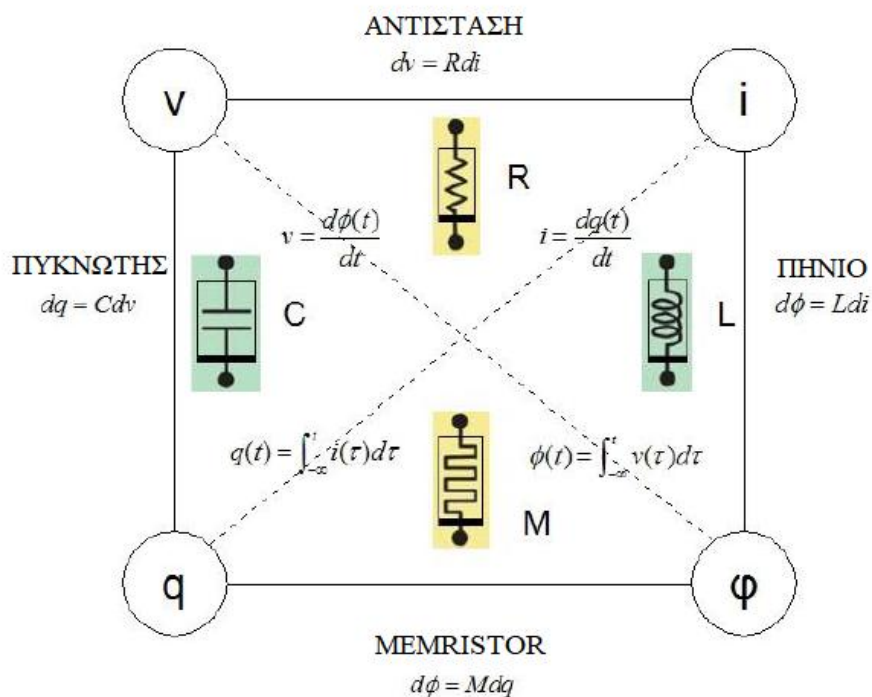
Εικόνα 3.9 – Το σύμβολο του memristor

Οι τέσσερις βασικές μεταβλητές που περιγράφουν τα κυκλώματα είναι:

- Η τάση $v(t)$
- Το ρεύμα $i(t)$
- Το φορτίο $q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$ ή $i = \frac{dq(t)}{dt}$
- Η μαγνητική ροή $\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau$ ή $v = \frac{d\varphi(t)}{dt}$

Οι αντιστάσεις συνδέουν την τάση με το ρεύμα ($dv = Rdi$), τα πηνία συνδέουν την μαγνητική ροή με το ρεύμα ($d\phi = Ldi$) και οι πυκνωτές το φορτίο με την τάση ($dq = Cdv$). Πώς συνδέεται όμως το φορτίο με τη μαγνητική ροή; Η σύνδεση αυτή επιτεύχθηκε από τον Chua με την εισήγησή του στο memristor μέσω του άρθρου του “Memristor – The missing circuit element” που δημοσίευσε τον Σεπτέμβριο του 1971 στο IEEE Transactions on Circuit Theory. Ο Chua απέδειξε με μαθηματικά ότι το memristor δίνει μία σχέση μεταξύ μαγνητικής ροής και φορτίου όμοια με αυτή που δίνει μία μη γραμμική αντίσταση μεταξύ τάσης και ρεύματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η αντίστασή του θα μεταβάλλεται σύμφωνα με την ποσότητα του φορτίου που πέρασε μέσα από αυτή και θα «θυμάται» τη τιμή της νέας αυτής αντίστασης ακόμα και όταν κοπεί το ρεύμα. Ο Chua στο άρθρο του ανέφερε χαρακτηριστικά: «Αν και δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα ένα φυσικό memristor στη μορφή ενός φυσικού στοιχείου χωρίς εσωτερική πηγή ενέργειας, η circuit – theoretic και quasi – static ηλεκτρομαγνητική ανάλυση που παρουσιάζονται στους τομείς III και IV κάνει φανερό ότι ένα memristor στοιχείο με μονότονα αύξουσα $\phi - q$ καμπύλη μπορεί να εφευρεθεί, εάν δεν ανακαλυφθεί τυχαία!».

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα σχήμα που να περιγράφει την σύνδεση των μεταβλητών μεταξύ τους:

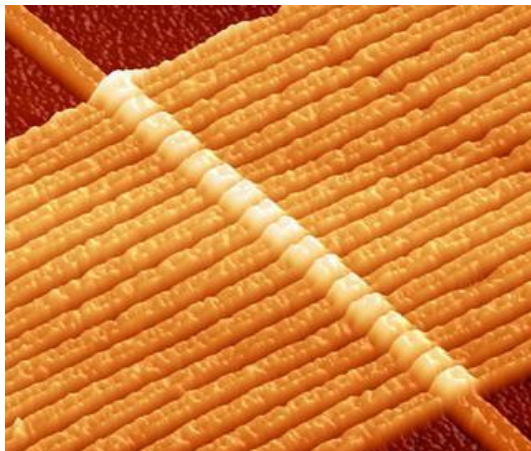


Εικόνα 3.10 – Σύνδεση των μεταβλητών μεταξύ τους

Γίνεται αντιληπτό πλέον ότι η αντίσταση μνήμης (memristance) είναι εγγενής ιδιότητα οποιουδήποτε ηλεκτρονικού κυκλώματος. Οι κλίμακες στις οποίες κατασκευάζονταν οι ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι πρότινος δεν επέτρεπαν την παρατήρηση του φαινομένου. Συμπεραίνεται ότι η επίδραση της μνημαντίστασης υπακούει στο νόμο του αντίστροφου τετραγώνου που λέει ότι η αντίσταση μνήμης είναι ένα εκατομμύριο πιο σημαντική σε νανομετρική κλίμακα από ότι σε μικρομετρική κλίμακα και δεν είναι ορατή σε χιλιοστομετρική κλίμακα ή μεγαλύτερη.

Το 2008, μέλη των HP Labs δημοσίευσαν ότι κατασκεύασαν με επιτυχία ένα ηλεκτρονικό στοιχείο νανοκλίμακας, του οποίου οι μετρημένες φυσικές ιδιότητες μπορούν να εξηγηθούν από τη ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Τρανουδάκης Αλέξανδρος

θεωρία του memristor. Το memristor της HP είναι μία διάταξη στερεάς κατάστασης που σχηματίζεται από λεπτό υμένιο TiO_2 κλίμακας νανομέτρου, με μία ντοπαρισμένη και μία μη ντοπαρισμένη περιοχή που περικλείεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων πλατίνας όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα .



Εικόνα 3.11 – Σειρά από 17 memristors διοξειδίου του τιτανίου

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται μία σειρά από 17 ειδικά κατασκευασμένων memristors από διοξείδιο του τιτανίου με εξαντλημένο οξυγόνο, κατασκευασμένα από την HP Labs, που απεικονίζονται από ένα μικροσκόπιο ατομικής ακρίβειας. Τα καλώδια έχουν πλάτος περίπου 50 nm ή 150 άτομα. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνάει τα memristors μετατοπίζει τις κενές θέσεις οξυγόνου, προκαλώντας σταδιακή και επίμονη αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση.

Από το 2008, έχουν προταθεί πολλές εφαρμογές για το memristor. Στο πεδίο των τσιπ μνήμης, τα memristors μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομές κελιών Resistive Random Access Memory (ReRAM) και στα βασισμένα σε memristor Content Addressable Memories (MCAMs) χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό από memristor και συσκευών MOS. Στα νευρωνικά δίκτυα, το memristor μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να μειώσει την περιοχή και την συνενοχή των νευρομορφικών κυκλωμάτων που επωφελούνται από την ικανότητα του memristor να «απομνημονεύει» το ρεύμα που το διαπερνάει και την κατεύθυνσή του. Στο πεδίο των λογικών κυκλωμάτων, εφαρμόστηκε ένας νέος τύπος λογικών κυκλωμάτων IMPLY βασισμένα στο memristor. Η λογική που βασίζεται στο memristor έχει μία μοναδική ικανότητα που μπορεί να κατασκευαστεί με κελιά μνήμης στο ίδιο τσιπ.

3.2.2 Ιδιότητες του Memristor

Όπως προαναφέρθηκε, το memristor συνδέει το φορτίο (q) με τη μαγνητική ροή (φ). Η σχέση $q - \varphi$ είναι μη γραμμική, και για αυτό το λόγο η παράμετρος του memristor που συνδέει τα q και φ δεν είναι μία σταθερά.

Είναι γνωστό ότι το memristor ελέγχεται από το φορτίο με την αντίσταση μνήμης (memristance) $M(q)$ να ισούται με:

$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq}$$

(3.1)

Παρομοίως, είναι γνωστό ότι το memristor ελέγχεται από τη ροή με την αγωγιμότητα μνήμης (memductance) $W(\varphi)$ να ισούται με:

$$W(\varphi) = \frac{dq}{d\varphi}$$

(3.2)

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να εξαχθεί ότι:

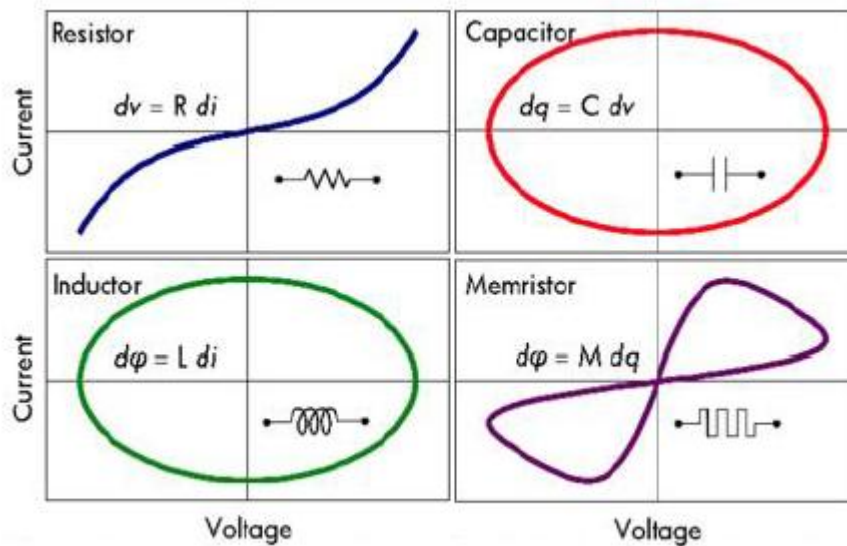
$$v = M(q) \cdot i$$

και

$$i = W(\varphi) \cdot v$$

(3.3)

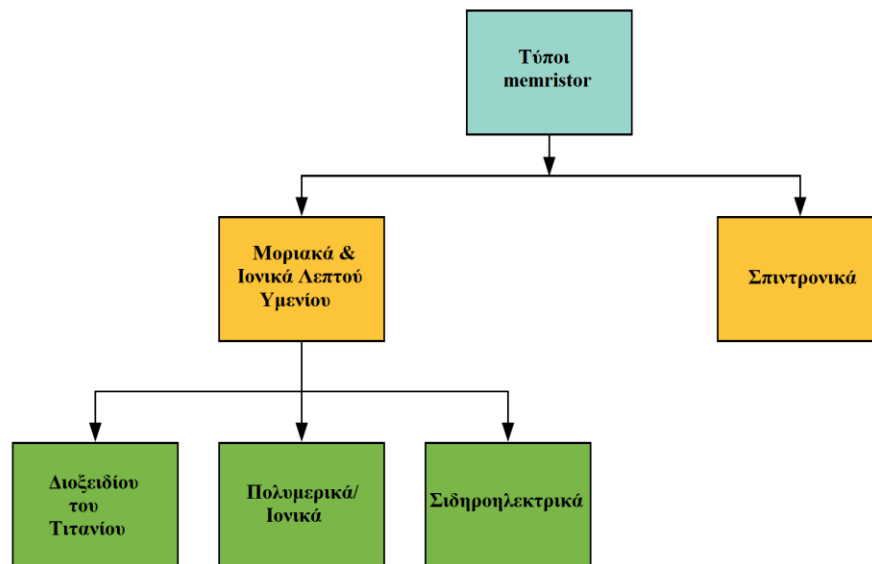
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών $I - V$ των τεσσάρων βασικών στοιχείων. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το memristor έχει μία χαρακτηριστική $I - V$ υστέρησης βρόχου. Αυτό οφείλεται στη μη γραμμική σχέση του ρεύματος και της τάσης της μνημαντίστασης. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η χαρακτηριστική $I - V$ του memristor δεν μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε συνδυασμό των υπόλοιπων τριών βασικών στοιχείων. Αυτός είναι και ο λόγος που το memristor μπορεί να θεωρηθεί βασικό στοιχείο.



Εικόνα 3.12 – Οι χαρακτηριστικές $I - V$ των τεσσάρων θεμελιωδών στοιχείων

3.2.3 Κατασκευαστικοί τύποι του Memristor

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι κατηγορίες των διάφορων τύπων κατασκευής των memristors, που περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Εικόνα 3.13 – Κατηγορίες τύπων των memristors

3.2.3.1 Μοριακά και ιονικά λεπτού υμενίου Memristors

Αυτός ο τύπος των memristors εξαρτάται κυρίως από ατομικά πλέγματα λεπτού υμενίου διαφορετικών υλικών που εμφανίζουν υστέρηση υπό την εφαρμογή του φορτίου.

3.2.3.1.1 Memristors διοξειδίου του τιτανίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το memristor διοξειδίου του τιτανίου εισηγήθηκε από μέλη των HP Labs. Αποτελείται από ένα λεπτό υμένιο (50 nm) διοξειδίου του τιτανίου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων πάχους 5 nm, από τα οποία το ένα είναι από τιτάνιο και το άλλο από λευκόχρυσο. Το υμένιο διοξειδίου του τιτανίου αποτελείται από δύο στρώματα, όπου το ένα από αυτά έχει μία ελαφριά εξάντληση ατόμων οξυγόνου (μη ντοπαρισμένο). Το άλλο είναι το ντοπαρισμένο στρώμα με κενά οξυγόνου που ενεργούν ως φορείς φορτίου. Το ντοπαρισμένο στρώμα έχει πολύ μικρότερη αντίσταση από το μη ντοπαρισμένο στρώμα.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες του TiO_2 memristor μελετήθηκε από τους C. E. Merkel, D. Kudithipudi και από τους V. Mladenov, S. Kirilov. Οι πρώτοι διαπίστωσαν ότι η αυξανόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος και λειτουργίας του TiO_2 memristor έχει κακή επίδραση στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του. Για το λόγο αυτό, συνέστησαν τη χρήση μιας συσκευής ψύξης για να διατηρήσουν την απόδοσή του. Ο Mladenov και ο Kirilov δημιούργησαν το προφίλ Dynamic Thermal Management (DTM) σε αρχιτεκτονικές μνήμης CMOS/Memristor και συνέστησαν ότι χρειάζονται μηχανισμοί DTM για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής της αρχιτεκτονικής CMOS/Memristor. Επιπλέον, ο E. Delonno κ.α. συζήτησε τις επιδράσεις ακτινοβολίας στα TiO_2 memristors συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στα TiO_2 memristors νανομετρικής κλίμακας και πώς αυτές επηρεάζουν την εναπόθεση ενέργειας από τις διάφορες πηγές ακτινοβολίας.

3.2.3.1.2 Πολυμετρικά Memristors

Τα πολυμερικά memristors διερευνούν τη δυναμική πρόσμιξη των πολυμερών και ανόργανων υλικών διηλεκτρικού τύπου για την επίτευξη χαρακτηριστικών $I - V$ υστέρησης βρόχου. Συνήθως, ένα μόνο παθητικό στρώμα μεταξύ ενός ηλεκτροδίου και ενός ενεργού λεπτού υμενίου προσπαθεί να διευρύνει την εξαγωγή ιόντων από το ηλεκτρόδιο. Το 2008, το πολυμερικό memristor αναπτύχθηκε από τους Erokhin και Fontana. Το 2012, χρησιμοποιήθηκαν οργανικά memristors βασισμένα σε ιόντα για τον σχεδιασμό νευρωνικών κυκλωμάτων συναπτικής μνήμης.

3.2.3.1.3 Σιδηροηλεκτρικά Memristors

Τα σιδηροηλεκτρικά memristors χρησιμοποιούν ένα λεπτό σιδηροηλεκτρικό φράγμα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η εναλλαγή της πόλωσης του σιδηροηλεκτρικού υλικού εφαρμόζοντας θετική ή αρνητική τάση στην ένωση, οδηγεί σε δύο τάξεων μεγθών αντιστάσεις (R_{OFF} και R_{ON}), όπου $R_{OFF} \gg R_{ON}$. Η πόλωση δεν αλλάζει απότομα, επομένως όταν κυκλώνεται η τάση η διαμόρφωση του σιδηροηλεκτρικού πεδίου εξελίσσεται, επιτρέποντας έτσι μία καλή ρύθμιση της τιμής της αντίστασης.

3.2.3.2 Σπιντρονικά Memristors

Ο Chen κ.α. [31] περιέγραψε τρεις διαφορετικούς πιθανούς σχεδιασμούς μαγνητικών memristors βασισμένων στη ροπή μεταφοράς σπιν (spin-transfer torque). Μία πολλά υποσχόμενη δομή είναι το σπιντρονικό memristor domain – wall, στην οποία η αντίσταση της συσκευής προκύπτει όταν το σπιν των ηλεκτρονίων στο ένα τμήμα της συσκευής δείχνει σε διαφορετική κατεύθυνση από εκείνο ενός άλλου τμήματος, δημιουργώντας έτσι ένα όριο μεταξύ των δύο τμημάτων που ονομάζεται “domain – wall”. Τα ηλεκτρόνια που διαρρέουν μέσα στη συσκευή έχουν ένα συγκεκριμένο σπιν, το οποίο αλλάζει την κατάσταση μαγνητισμού της συσκευής. Η αλλαγή του μαγνητισμού του memristor μετακινεί το domain – wall και μεταβάλλει την αντίστασή του.

3.2.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα – Εφαρμογές

3.2.4.1 Πλεονεκτήματα των Memristors

- Τα memristors λειτουργούν άψογα όταν ενσωματώνονται σε κυκλώματα αρχιτεκτονικής CMOS και δεν καταναλώνουν ενέργεια όταν είναι ανενεργά.
- Καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή λιγότερης θερμότητας.
- Έχουν πολύ μεγάλο χώρο αποθήκευσης καθώς και υψηλή ταχύτητα.
- Έχουν την δυνατότητα να απομνημονεύουν τη ροή φορτίου σε ένα σύνολο χρονικών περιόδων.
- Όταν η τροφοδοσία διακόπτεται στα κέντρα δεδομένων, τα memristors παρέχουν καλύτερη ανθεκτικότητα και αξιοπιστία.
- Ταχύτερες εκκινήσεις (boot-ups).
- Δυνατότητα αποκατάστασης τόσο των σκληρών δίσκων όσο και της μνήμης DRAM.

3.2.4.2 Μειονεκτήματα των Memristors

- Δεν είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.
- Η ταχύτητα των υπαρχουσών εκδόσεων φτάνει μέχρι και το 1/10 της μνήμης DRAM.

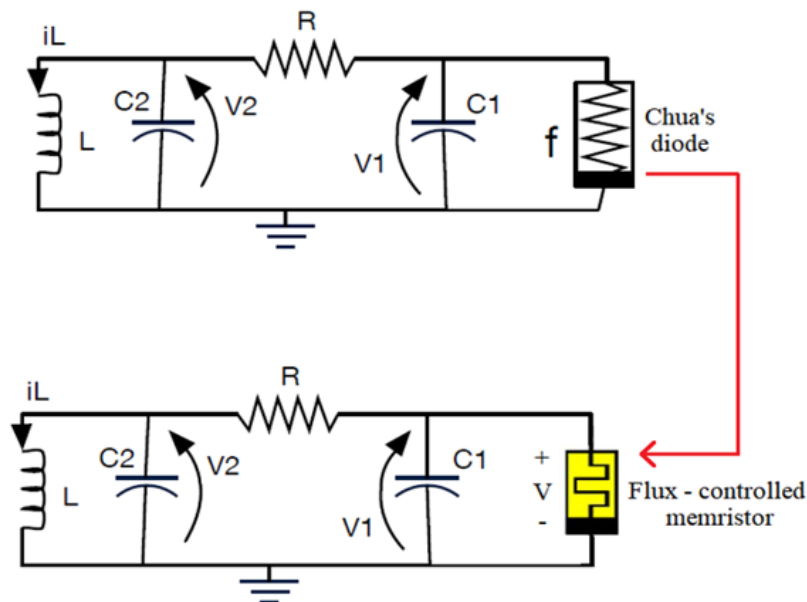
- Έχουν την δυνατότητα να μάθουν και να εξελιχθούν, αλλά υπάρχει πιθανότητα να «μελετήσουν» λανθασμένα μοτίβα.
- Η απόδοση και η ταχύτητα των memristors, παρόλο που είναι αρκετά υψηλή, δεν συγκρίνεται με αυτή του τρανζίστορ και της DRAM.
- Δεδομένου ότι όλες οι πληροφορίες στον υπολογιστή μετατρέπονται σε μη πτητικές, η επανεκκίνηση δεν θα επιλύσει κάποιο πρόβλημα, διότι σε πολλές περιπτώσεις μπορεί μέσω της DRAM.

3.2.4.3 Εφαρμογές των Memristors

- Τα memristors χρησιμοποιούνται στην ψηφιακή μνήμη, τα λογικά κυκλώματα καθώς και σε βιολογικά συστήματα.
- Μπορούν γενικότερα να χρησιμοποιηθούν στην τεχνολογία των υπολογιστών.
- Παρουσιάζουν εφαρμογή στα νευρωνικά δίκτυα και στα αναλογικά ηλεκτρονικά.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αναλογικών φίλτρων.
- Εφαρμογές τηλεπισκόπησης (remote sensing) καθώς και σε ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος.
- Χρησιμοποιούνται στην προγραμματιζόμενη λογική και στην επεξεργασία σήματος.

3.2.5 Το Memristor σε χαστικό κύκλωμα

Ο Bharathwaj Muthuswamy το 2010 θεώρησε το προαναφερόμενο κύκλωμα του Chua που έχουμε αναλύσει σε προηγούμενο κεφάλαιο και αντικατέστησε τη δίοδο Chua με ένα memristor ελεγχόμενο από ροή, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.14 – Το κύκλωμα του Chua με memristor ελεγχόμενο από ροή

Υπενθυμίζεται ότι η memductance συνάρτηση $W(\phi)$ που περιγράφει τον ρυθμό αλλαγής της φόρτισης που εξαρτιέται από τη ροή είναι:

$$W(\phi) \triangleq \frac{dq(\phi)}{d\phi}$$

(3.4)

και η σχέση μεταξύ της τάσης στο memristor και του ρεύματος που το διασχίζει δίνεται ως:

$$i(t) \triangleq \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} = W(\phi(t))v(t)$$

(3.5)

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει το κύκλωμα της παραπάνω εικόνας δίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= v_1(t) \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{1}{C_1} \left(\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R} - i(t) \right) \\ \frac{dv_2(t)}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left(\frac{v_1(t) - v_2(t)}{R} - i_L(t) \right) \\ \frac{di_L(t)}{dt} &= \frac{v_2(t)}{L} \end{aligned}$$

(3.6)

Έτσι, το ρεύμα $i(t)$ μπορεί τελικά να περιγραφεί ως:

$$i(t) = W(\phi(t))v_1(t) = \frac{dq}{d\phi}v_1(t)$$

(3.7)

όπου για την συνάρτηση $q(\phi)$ ο Muthuswamy επέλεξε μία κυβική μη γραμμικότητα:

$$q(\phi) = \alpha\phi + \beta\phi^3$$

(3.8)

και επομένως η συνάρτηση $W(\phi)$ μπορεί να γραφτεί ως:

$$W(\phi) = \frac{dq}{d\phi} = \alpha + 3\beta\phi^2$$

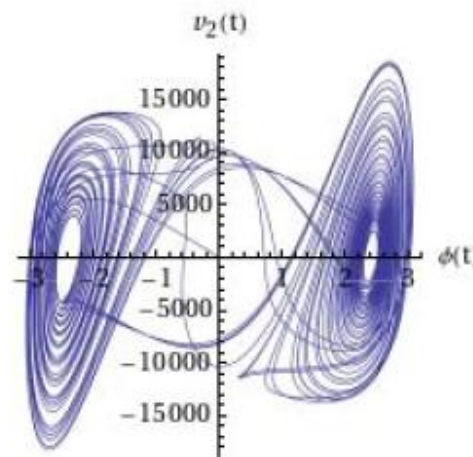
(3.9)

Για να αναπαράγει χάος, χρησιμοποίησε τις παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους του κυκλώματος:

- $L = 18 \text{ mH}$
- $C1 = 6.8 \text{ nF}$
- $C2 = 68 \text{ nF}$
- $R = 2.5 \text{ k}\Omega$ ποτενσιόμετρο
 - $\alpha = -0.667 \cdot 10^{-3}$
 - $\beta = 0.029 \cdot 10^{-3}$

με ρύθμιση της αντίστασης R στα $2 \text{ k}\Omega$.

Στη πρώτη προσομοίωση μέσω του Mathematica κατέληξε σε ένα χαοτικό ελκυστή, ο οποίος ωστόσο είχε υπερβολικά μεγάλες και μη ρεαλιστικές τιμές τάσης (της τάξης των χιλιάδων volts).



Εικόνα 3.15 – Η πρώτη προσομοίωση του κυκλώματος μέσω Mathematica (τιμές τάσης της τάξης των χιλιάδων volts)

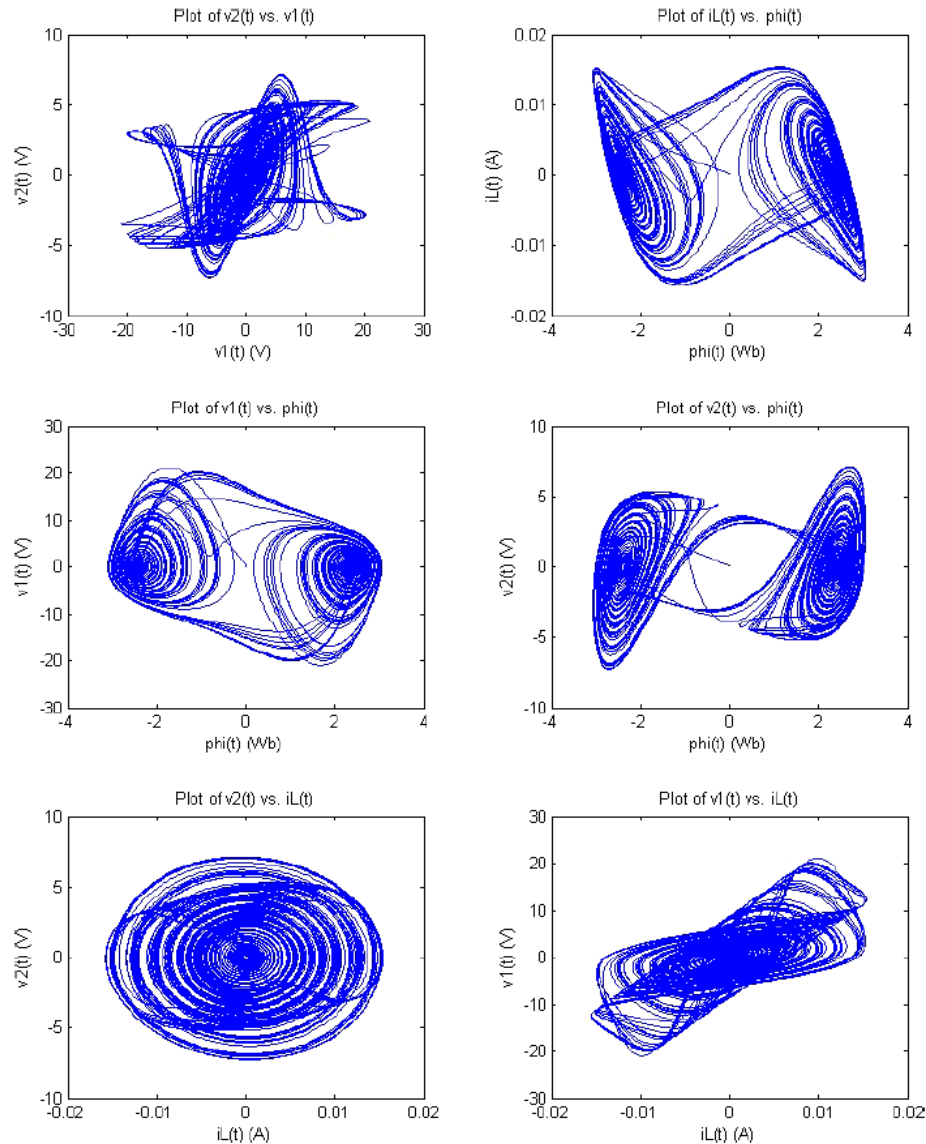
Για το λόγο αυτό, επαναπροσδιόρισε τις παραμέτρους και εισήγαγε μία μεταβλητή $\zeta = 8200 \Omega \cdot 47 \cdot 10^{-9} \text{ nF}$, έτσι ώστε το τελικό σύστημα εξισώσεων να γίνει:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} &= \frac{-v_1(t)}{\zeta} \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{1}{C_1} \left(\frac{v_2(t) - v_1(t)}{R} - W(\phi(t)) \cdot v_1(t) \right) \\ \frac{dv_2(t)}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left(\frac{v_1(t) - v_2(t)}{R} - i_L(t) \right) \\ \frac{di_L(t)}{dt} &= \frac{v_2(t)}{L} \end{aligned}$$

(3.10)

Ο λόγος για το αρνητικό πρόσημο στη πρώτη διαφορική εξίσωση οφείλεται στην ανάστροφη συνδεσμολογία του ολοκληρωτή που χρησιμοποιήσε για την πρακτική υλοποίηση του κυκλώματος, όπου και θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο τελευταίο κεφάλαιο, καθώς αποτελεί μέρος της διπλωματικής εργασίας.

Έχοντας έτσι την παραπάνω τελική μορφή των εξισώσεων προσομοίωσε μέσω MATLAB αυτή τη φορά (για την εξάλειψη άλλων πιθανών αριθμητικών σφαλμάτων) το κύκλωμα, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση του κυκλώματος (ϕ , v_1 , v_2 , i_L) μεταξύ τους για να απεικονίσει τους διαφορετικούς ελκυστές που προκύπτουν:



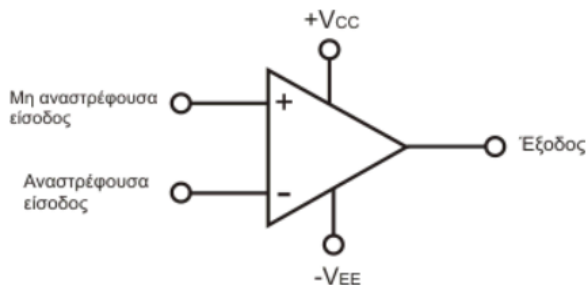
Εικόνα 3.16 – Ελκυστές του χαοτικού κυκλώματος με χρήση memristor από τη προσομοίωση μέσω MATLAB του Muthuswamy

3.3 Ενισχυτές

3.3.1 Ο Τελεστικός Ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής τάσης με πολύ μεγάλο κέρδος. Το κέρδος μπορεί να παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, συνήθως μεταξύ 10^4 και 10^6 . Ο τελεστικός ενισχυτής αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο σε μια πληθώρα αναλογικών εφαρμογών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα σε ένα αναλογικό κύκλωμα, ενώ στην περίπτωση των ολοκληρωμένων ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Τρανουδάκης Αλέξανδρος

αναλογικών κυκλωμάτων χρησιμεύει σαν ένα μοντέλο αφαιρετικής λειτουργίας (abstraction) για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, και στη συνέχεια η υλοποίηση του με τρανζίστορ προσαρμόζεται, ώστε να ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες της εφαρμογής. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον τελεστικό ενισχυτή.



Εικόνα 3.17 – Τελεστικός ενισχυτής

Ο τελεστικός ενισχυτής όπως φαίνεται από το σχηματικό διάγραμμα του παραπάνω σχήματος, αποτελείται από δύο εισόδους, την αναστρέφουσα είσοδο που θα την ονομάσουμε v_- (συνδέεται στον ακροδέκτη $-$ του τελεστικού ενισχυτή) και τη μη αναστρέφουσα είσοδο v_+ (συνδέεται στον ακροδέκτη $+$ του τελεστικού ενισχυτή), και μία έξοδο που θα την ονομάσουμε v_{out} . Επίσης στον τελεστικό ενισχυτή συνδέονται δύο τάσεις τροφοδοσίας $+V_{CC}$ και $-V_{EE}$ αντίστροφης πολικότητας. Είναι άξιο να σημειωθεί πως υπάρχουν μμοντέλα τελεστικών ενισχυτών που δέχονται μία τάση τροφοδοσίας. Συνήθως στα σχηματικά μεγαλύτερων κυκλωμάτων που περιέχουν τελεστικούς ενισχυτές, οι τάσεις τροφοδοσίας παραλείπονται.

Η κύρια λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή είναι να ενισχύει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ v_+ και v_- η οποία ορίζεται ως:

$$V_{id} = v_+ - v_-$$

(3.11)

και ονομάζεται διαφορική τάση εισόδου. Έτσι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι ίση με:

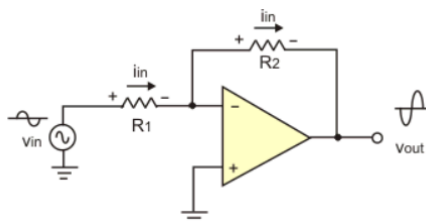
$$v_{out} = A \cdot v_{id} = A \cdot (v_+ - v_-)$$

(3.12)

όπου με A συμβολίζεται το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή το οποίο μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές.

3.3.1.1 Ο Αναστρέφων Ενισχυτής

Το κύκλωμα αναστρέφοντος ενισχυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αποτελείται από δυο αντιστάσεις και έναν τελεστικό ενισχυτή. Συγκεκριμένα, η τάση εισόδου v_{in} εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή μέσω της αντίστασης R_1 , ενώ η μη αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη. Μέρος της τάσης εξόδου επιστρέφει στην αναστρέφουσα είσοδο δια μέσου της αντίστασης R_2 και αφαιρείται, δημιουργώντας αρνητική ανάδραση. Έτσι σταθεροποιείται και το ολικό κέρδος τάσης, αφού οποιαδήποτε μεταβολή της τάσης εισόδου έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο σήμα εξόδου και αναλόγως μεγαλύτερο σήμα αφαιρείται από την τάση εισόδου.



Εικόνα 3.18 – Ο αναστρέφων ενισχυτής

Επειδή οι ακροδέκτες εισόδου του τελεστικού ενισχυτή εμφανίζουν άπειρη αντίσταση, δεν διαρρέονται από ρεύμα, επομένως το ρεύμα που θα διαρρέει την αντίσταση R_2 θα είναι ίσο με αυτό που διαρρέει την R_1 , ίσο με i_{in} όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι πολικότητες που δίνονται στο σχήμα, αναφέρονται στην περίπτωση θετικής τάσης εισόδου. Αντίστροφες είναι κατά την αρνητική τάση εισόδου.

Λόγω του φαινομενικού βραχυκυκλώματος με τη γη, η τάση εισόδου ισούται με:

$$v_{in} = R_1 \cdot i_{in} \quad (3.13)$$

Και η τάση εξόδου θα είναι:

$$v_{out} = -R_2 \cdot i_{in} \quad (3.14)$$

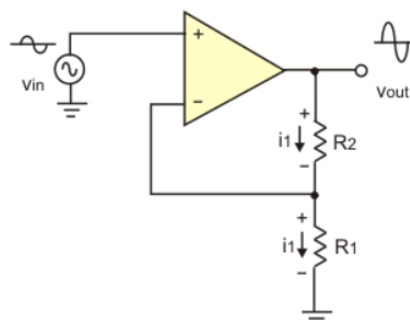
Διαιρώντας κατά μέλη τις παραπάνω σχέσεις βρίσκουμε το κέρδος τάσης κλειστού βρόγχου A , του αναστρέφοντος ενισχυτή:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} \Rightarrow A = \frac{-R_2 \cdot i_{in}}{R_1 \cdot i_{in}} \Rightarrow A = \frac{-R_2}{R_1} \quad (3.15)$$

Βλέπουμε, πως το κέρδος κλειστού βρόγχου εξαρτάται μόνο από το λόγο των δυο αντιστάσεων R_2 και R_1 που σημαίνει ότι μπορούμε να επιλέξουμε το κέρδος κλειστού βρόγχου όσο θέλουμε, επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των αντιστάσεων του δικτύου ανάδρασης. Το πρόσημο (-) δείχνει ότι ο τελεστικός ενισχυτής σε αναστρέφουσα συνδεσμολογία προκαλεί και αναστροφή του σήματος εξόδου.

3.3.1.2 Ο Μη Αναστρέφων Ενισχυτής

Το κύκλωμα του μη αναστρέφοντος ενισχυτή είναι όμοιο με αυτό του αναστρέφοντος ενισχυτή, με μόνη διαφορά ότι η τάση εισόδου εφαρμόζεται στην μη αναστρέφοντα είσοδο, ενώ η αντίσταση R_1 που είναι συνδεδεμένη στην αναστρέφουσα είσοδο, είναι γειωμένη στο αριστερό άκρο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Όπως γίνεται κατανοητό και από την ονομασία της συνδεσμολογίας, η τάση εισόδου που οδηγεί τη μη αναστρέφουσα είσοδο δημιουργεί μια ενισχυμένη έξοδο πολικότητας. Ένα μέρος της τάσης εξόδου, το οποίο καθορίζεται από το διαιρέτη τάσης που σχηματίζεται από τις αντιστάσεις R_1 και R_2 , επιστρέφει πάλι στον αναστρέφοντα ακροδέκτη εισόδου, όπου αφαιρείται προκαλώντας αρνητική ανάδραση.

Επειδή μεταξύ των εισόδων του τελεστικού ενισχυτή έχουμε φαινομενικό βραχυκύκλωμα, η τάση εισόδου στον μη αναστρέφοντα ενισχυτή εμφανίζεται στα άκρα της R_1 . Άρα, μπορούμε να γράψουμε:

$$v_{in} = R_1 \cdot i_1 \quad (3.16)$$

Επιπλέον, αφού δεν εισέρχεται ρεύμα στον τελεστικό ενισχυτή, το ίδιο ρεύμα i_1 θα πρέπει να ρέει μέσω της R_2 , όπως φαίνεται στο σχήμα. Βλέπουμε επίσης, ότι η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$v_{out} = (R_1 + R_2) \cdot i_1 \quad (3.17)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις προηγούμενες σχέσεις, βρίσκουμε το κέρδος τάσης της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας:

$$A = \frac{v_{out}}{v_{in}} \Rightarrow A = \frac{(R_1 + R_2) \cdot i_{in}}{R_1 \cdot i_{in}} \Rightarrow A = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.18)$$

Βλέπουμε ότι, το κέρδος τάσης της μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας είναι θετικό, που σημαίνει ότι το σήμα εξόδου έχει την ίδια πολικότητα με το σήμα εισόδου. Ακόμα, και σ' αυτή τη συνδεσμολογία του τελεστικού ενισχυτή το κέρδος τάσης καθορίζεται από το λόγο των δύο αντιστάσεων. Έτσι, για να έχουμε ένα ορισμένο κέρδος τάσης, αρκεί να επιλέξουμε κατάλληλα τις τιμές των δυο αντιστάσεων.

3.3.2 Ο Ενισχυτής AD844

Ο AD844 είναι ένας υψηλής ταχύτητας μονολιθικός λειτουργικός ενισχυτής που κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας τη διαδικασία συμπληρωματικής διπολικής (CB) απομονωμένης σύνδεσης. Συνδυάζει υψηλό εύρος ζώνης και πολύ γρήγορη απόκριση μεγάλου σήματος με εξαιρετική απόδοση dc. Αν και έχει βελτιστοποιηθεί για χρήση σε εφαρμογές ρεύματος προς τάση και ως ενισχυτής αναστροφής λειτουργίας, είναι κατάλληλος για χρήση σε μη αντιστρεφόμενες εφαρμογές. Ο AD844 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση των παραδοσιακών τελεστικών ενισχυτών, αλλά η τρέχουσα αρχιτεκτονική ανάδρασης έχει ως αποτέλεσμα πολύ καλύτερη ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Τρανουδάκης Αλέξανδρος

απόδοση εναλλασσόμενου ρεύματος, υψηλή γραμμικότητα και εξαιρετικά καθαρή απόκριση παλμών. Αυτός ο τύπος ενισχυτή παρέχει ένα εύρος ζώνης κλειστού βρόχου που καθορίζεται κυρίως από την αντίσταση ανάδρασης και είναι σχεδόν ανεξάρτητος από το κέρδος κλειστού βρόχου. Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής εξόδου μπορεί να είναι πάνω από 2000 V/μs για ένα πλήρες βήμα εξόδου 20 V.

Ο χρόνος καθίζησης είναι συνήθως 100 ns έως 0,1%, και ουσιαστικά ανεξάρτητος από το κέρδος. Ο AD844 διατίθεται σε τέσσερις βαθμούς απόδοσης και τρεις επιλογές πακέτου. Ο AD844J καθορίζεται για την εμπορική περιοχή θερμοκρασιών από 0°C έως 70°C. Τα AD844A και AD844B καθορίζονται για το εύρος βιομηχανικής θερμοκρασίας από -40°C έως +85°C. Τέλος ο AD844S καθορίζεται για το στρατιωτικό εύρος θερμοκρασίας από -55°C έως +125°C.

3.3.2.1 Πλεονεκτήματα του AD844

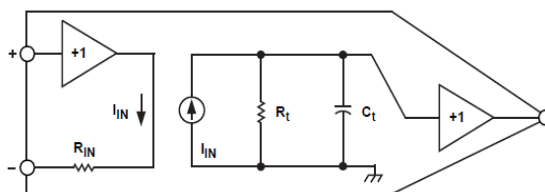
- Ο AD844 είναι ένα ευέλικτο, χαμηλού κόστους εξάρτημα που παρέχει εξαιρετικό συνδυασμό απόδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος.
- Ουσιαστικά είναι απαλλαγμένος από περιορισμούς ρυθμού εξόντωσης. Οι χρόνοι ανόδου και πτώσης είναι ουσιαστικά ανεξάρτητοι από το επίπεδο παραγωγής.
- Ο AD844 μπορεί να λειτουργήσει από ισχύ τροφοδοσίας $\pm 4,5$ V έως ± 18 V και είναι ικανός να οδηγεί φορτία έως και 50 Ω.
- Ο AD844 παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά διαφορικού κέρδους και διαφορικής φάσης, καθιστώντας το κατάλληλο για μια ποικιλία εφαρμογών βίντεο με εύρη ζώνης έως 60 MHz.
- Ο AD844 συνδυάζει χαμηλή παραμόρφωση, χαμηλό θόρυβο και χαμηλή μετατόπιση με μεγάλο εύρος ζώνης, καθιστώντας τον εξαιρετικό ως ενισχυτή εισόδου για μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακού (ADC).

3.3.2.2 Συμπεριφορά ανοιχτού βρόχου για τον AD844

Ο AD844 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρόπους παρόμοιους με έναν συμβατικό ενισχυτή λειτουργίας, ενώ παρέχει πλεονεκτήματα απόδοσης σε εφαρμογές ευρείας ζώνης. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην εσωτερική δομή που πρέπει να γίνουν κατανοητές για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του ενισχυτή AD844. Πηγές σταθερών σφαλμάτων συνεχούς ρεύματος, όπως το ρεύμα πόλωσης κόμβου αναστροφής και η τάση μετατόπισης, εξαιρούνται από αυτό το μοντέλο. Η πιο σημαντική παράμετρος που περιορίζει το κέρδος συνεχούς ρεύματος είναι η υπεραντίσταση, R_t , η οποία είναι ιδανικά άπειρη. Μια πεπερασμένη τιμή του R_t είναι ανάλογη με το πεπερασμένο κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου σε έναν συμβατικό τελεστικό ενισχυτή. Το ρεύμα που εφαρμόζεται στον κόμβο εισόδου αναστροφής αντιγράφεται από τον μεταφορέα ρεύματος για να ρέει σε αντίσταση R_t . Η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος του R_t ρυθμίζεται από τον ακολουθητή τάσης κέρδους μονάδας. Το κέρδος τάσης είναι ο λόγος R_t/R_{IN} . Με τυπικές τιμές $R_t = 3$ MΩ και $R_{IN} = 50$ Ω, το κέρδος τάσης είναι περίπου 60.000.

Οι σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η διαπερατότητα, η C_t και η εξωτερική αντίσταση ανάδρασης (δεν φαίνεται). Η σταθερά χρόνου που σχηματίζεται από αυτές τις συνιστώσες είναι ανάλογη με τον κυρίαρχο πόλο του συμβατικού τελεστικού ενισχυτή και επομένως δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από μια κρίσιμη τιμή εάν το σύστημα κλειστού βρόχου πρόκειται να είναι σταθερό. Στην πράξη, η C_t διατηρείται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή (συνήθως 4,5 pF) έτσι ώστε η αντίσταση ανάδρασης να μπορεί να μεγιστοποιηθεί διατηρώντας ταυτόχρονα μια γρήγορη απόκριση. Το πεπερασμένο R_{IN} επηρεάζει την απόκριση κλειστού βρόχου σε ορισμένες εφαρμογές. Το κέρδος εναλλασσόμενου ρεύματος ανοιχτού βρόχου γίνεται καλύτερα κατανοητό από την άποψη της σύνθετης αντίστασης παρά ως κέρδος τάσης ανοιχτού βρόχου. Ο πόλος ανοιχτού βρόχου σχηματίζεται από το R_t παράλληλα με το

C_t . Επειδή το C_t είναι συνήθως 4,5 pF, η γωνιακή συχνότητα ανοιχτού βρόχου εμφανίζεται στα 12 kHz περίπου. Ωστόσο, αυτή η παράμετρος έχει μικρή αξία για τον προσδιορισμό την απόκριση κλειστού βρόχου.



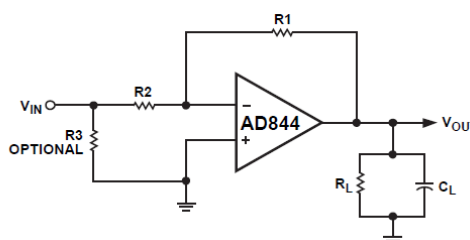
Εικόνα 3.20 – Ισοδύναμο σχηματικό

3.3.2.3 Λειτουργία ως Αναστρέφων Ενισχυτής

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις συνδέσεις για έναν ενισχυτή αναστροφής. Σε αντίθεση με έναν συμβατικό ενισχυτή, η μεταβατική απόκριση και το μικρό εύρος ζώνης σήματος καθορίζονται κυρίως από την τιμή της εξωτερικής αντίστασης ανάδρασης, την R_1 , και όχι από την αναλογία R_1/R_2 , όπως συνήθως συμβαίνει σε έναν τελεστικό ενισχυτή, όπου με τους συμβατικούς τελεστικούς ενισχυτές, το κέρδος κλειστού βρόχου είναι $-R_1/R_2$. Η υπεραντίσταση κλειστού βρόχου είναι το παράλληλο άθροισμα των R_1 και R_t .

Επειδή η R_1 είναι γενικά στην περιοχή από 500 Ω έως 2 k Ω και το R_t είναι περίπου 3 M Ω , η αντίσταση κλειστού βρόχου είναι μόνο 0,02% έως 0,07% χαμηλότερη από την R_1 . Αυτό το μικρό σφάλμα είναι συχνά μικρότερο από την ανοχή της αντίστασης. Όταν το R_1 είναι αρκετά μεγάλο (πάνω από 5 k Ω) αλλά εξακολουθεί να είναι πολύ μικρότερο από το R_t , η απόκριση HF κλειστού βρόχου κυριαρχείται από τη σταθερά χρόνου $R_1 C_t$. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο AD844 είναι υπερβολικά αποσβεσμένος και παρέχει μόνο ένα κλάσμα του δυναμικού εύρους ζώνης του. Λόγω της απουσίας περιορισμών του ρυθμού περιστροφής κάτω από αυτές τις συνθήκες, το κύκλωμα εμφανίζει απλή μονοπολική απόκριση ακόμη και υπό συνθήκες μεγάλου σήματος.

Στο παρακάτω σχήμα, η αντίσταση R_3 χρησιμοποιείται για να τερματίσει σωστά την είσοδο εάν είναι επιθυμητό. Η R_3 παράλληλα με την R_2 δίνει την τερματική αντίσταση. Καθώς το R_1 μειώνεται, το εύρος ζώνης του σήματος αυξάνεται, αλλά η χρονική σταθερά $R_1 C_t$ γίνεται συγκρίσιμη με τους πόλους υψηλότερης τάξης στην απόκριση κλειστού βρόχου. Επομένως, η απόκριση κλειστού βρόχου γίνεται πολύπλοκη και η απόκριση παλμού εμφανίζει υπέρβαση. Όταν η R_2 είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση εισόδου R_{IN} , στον ακροδέκτη 2, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος ανάδρασης στο R_1 παρέχεται σε αυτήν την είσοδο. Όταν η R_2 γίνεται συγκρίσιμη με την R_{IN} , απορροφάται λιγότερο από την ανάδραση στον ακροδέκτη 2, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιο βαριά απόσβεση απόκρισης. Κατά συνέπεια, για χαμηλές τιμές του R_2 , είναι δυνατό να χαμηλώσει το R_1 χωρίς να προκληθεί αστάθεια στην απόκριση κλειστού βρόχου. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την πολύ καθαρή και γρήγορη απόκριση παλμού ± 10 V του AD844.



Εικόνα 3.21 – Ο αναστρέφων ενισχυτής με υπεραντίσταση

3.3.2.4 Λειτουργία ως Μη Αναστρέφων Ενισχυτής

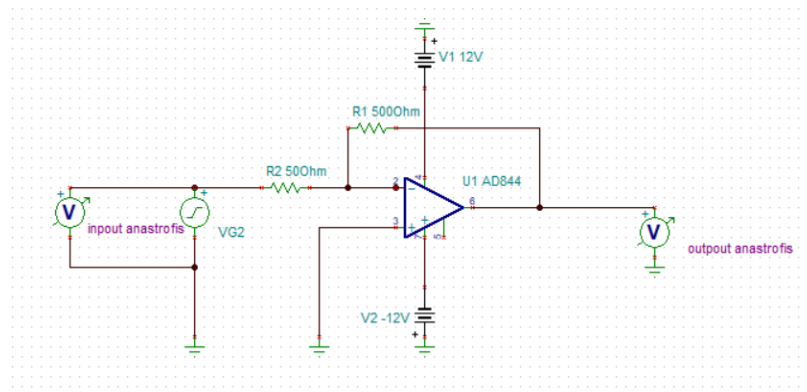
Επειδή οι ενισχυτές ανάδρασης ρεύματος είναι ασύμμετροι σε σχέση με τις δύο εισόδους τους, η απόδοση διαφέρει σημαντικά σε μη αναστρέφουσες και αναστρέφουσες λειτουργίες. Σε μη αναστρέφουσες λειτουργίες, η συμπεριφορά υψηλής ταχύτητας του μεγάλου σήματος του AD844 επιδεινώνεται με χαμηλά κέρδη επειδή το κύκλωμα πόλωσης για το σύστημα εισόδου δεν έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υψηλούς ρυθμούς περιστροφής τάσης εισόδου. Η μη αντιστρεφόμενη είσοδος δεν ανέχεται μεγάλη μεταβατική είσοδο και πρέπει να διατηρείται κάτω από ± 1 V για καλύτερα αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, αυτή η λειτουργία είναι καταλληλότερη για εφαρμογές υψηλού κέρδους δηλαδή μεγαλύτερο από $\times 10$. Για να αυξηθεί το εύρος ζώνης σε υψηλότερο κέρδη, μπορεί να προστεθεί και ο πυκνωτής στο R2 του οποίου η τιμή είναι περίπου $(R1/R2) \times Ct$.

3.3.2.5 Εξομοίωση του AD844 στο TINA

Σε αυτήν την ενότητα θα εξομοιώσουμε τον ενισχυτή AD844, με το βοηθητικό πρόγραμμα TINA-TI που έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα, αρχικά ως αναστρέφων και στη συνέχεια ως μη αναστρέφων ενισχυτής.

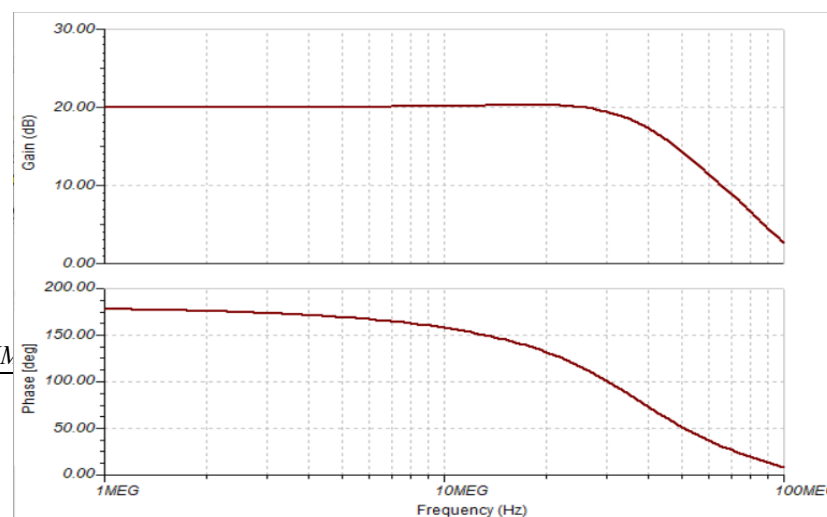
- Αναστρέφων Ενισχυτής

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο αναστρέφων ενισχυτής σχεδιασμένος στο TINA-TI.

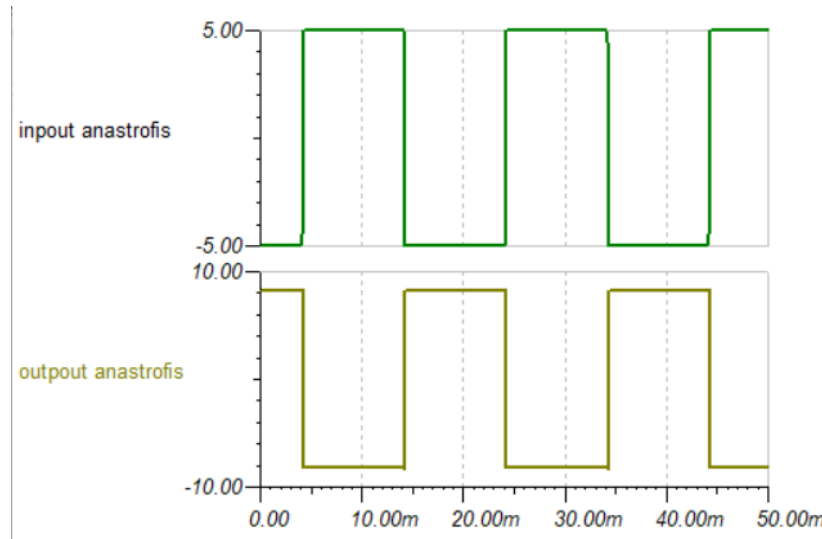


Εικόνα 3.22 — Αναστρέφων ενισχυτής στο TINA-TI

Στην αντίσταση εισόδου R_2 έχουμε προσθέσει την τιμή των 500 Ohm ενώ στην R_1 την τιμή των 500 Ohm. Η μη αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη. Επίσης έχουμε προσθέσει την $V_1 = 12V$ και την $V_2 = -12V$ για την τροφοδοσία του ενισχυτή. Για τις ανάγκες της εξομοίωσης έχει τοποθετηθεί γεννήτρια τετραγωνικού παλμού πλάτους 5V και συχνότητας 50Hz. Τέλος έχουν προστεθεί δύο βολτόμετρα τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του κυκλώματος. Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τα αποτελέσματα της εξομοίωσης.



Εικόνα 3.23 — Συνάρτηση μεταφοράς για τον AD844 αναστρέφων ενισχυτή με κέρδος -10



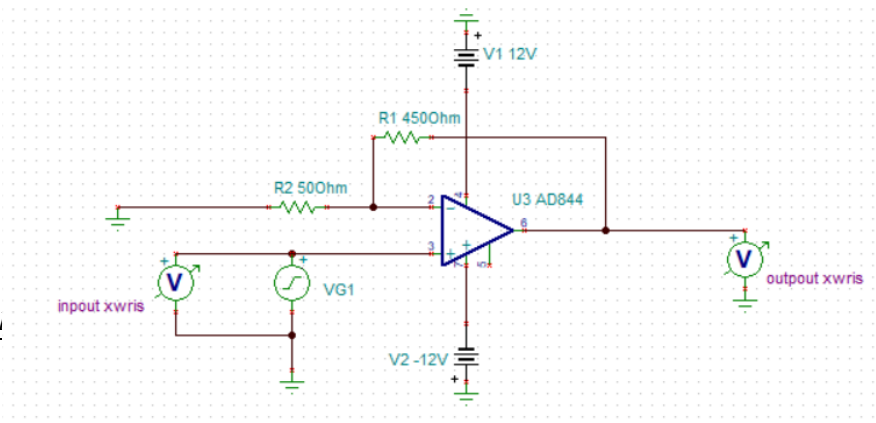
Εικόνα 3.24 — Τάση εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με το χρόνο

Όπως βλέπουμε και από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις το κέρδος είναι -10. Αυτό προκύπτει και από την εξίσωση που αναφέραμε προηγούμενος:

$$A = \frac{-R_1}{R_2} = \frac{-500}{50} = -10 \quad (3.19)$$

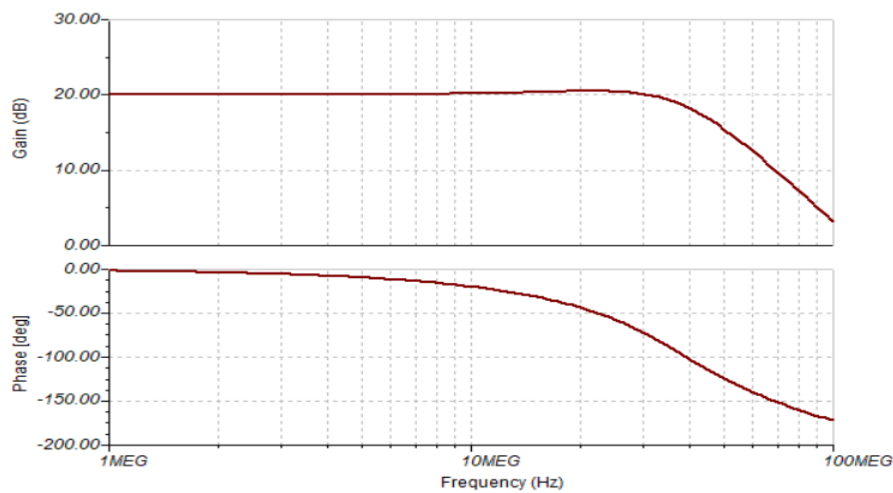
Τέλος από τη δεύτερη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά φάσης 180° .

- Μη αναστρέφων ενισχυτής
- Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο μη αναστρέφων ενισχυτής σχεδιασμένος στο TINA-TI.

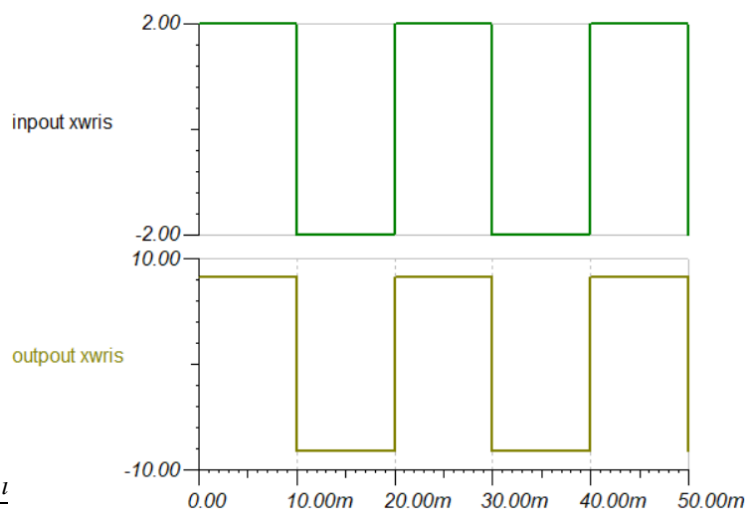


Εικόνα 3.25 – Μη αναστρέφον ενισχυτής στο TINA-TI

Στην R_2 έχουμε προσθέσει την τιμή των 500Ωm ενώ στην R_1 την τιμή των 4500Ωm. Η μη αναστρέφουσα είσοδος αυτή τη φορά εμπεριέχει την τάση εισόδου του κυκλώματος. Επίσης έχουμε προσθέσει την $V_1 = 12V$ και την $V_2 = -12V$ για την τροφοδοσία του ενισχυτή. Για τις ανάγκες της εξομοίωσης έχει τοποθετηθεί γεννήτρια τετραγωνικού παλμού πλάτους 2V και συχνότητας 50Hz. Τέλος έχουν προστεθεί δύο βολτόμετρα τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του κυκλώματος. Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τα αποτελέσματα της εξομοίωσης.



Εικόνα 3.26 – Συνάρτηση μεταφοράς για τον AD844 μη αναστρέφον ενισχυτή με κέρδος 10



Εικόνα 3.27 – Τάση εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με το χρόνο

Όπως βλέπουμε και από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις το κέρδος είναι 10. Αυτό προκύπτει και από την εξίσωση που αναφέραμε προηγούμενος:

$$A = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{450}{50} = 10$$

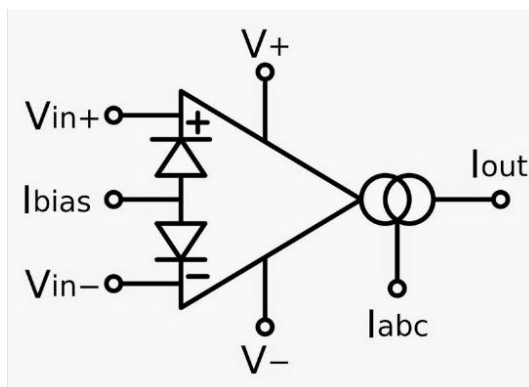
(3.20)

Τέλος από τη δεύτερη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι η διαφορά φάσης είναι 0°.

3.3.3 Ο Ενισχυτής Διαγωγιμότητας

Ο ενισχυτής διαγωγιμότητας (OTA) είναι ένας ενισχυτής του οποίου η διαφορική τάση εισόδου παράγει ρεύμα εξόδου. Έτσι, είναι μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενης τάσης με την ονομασία Voltage Control Current Source (VCCS). Επίσης υπάρχει συνήθως μια πρόσθετη είσοδος για ένα ρεύμα για τον έλεγχο της διαγωγιμότητας του ενισχυτή. Ο OTA είναι παρόμοιος με έναν τυπικό τελεστικό ενισχυτή, καθώς έχει διαφορική βαθμίδα εισόδου υψηλής σύνθετης αντίστασης και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αρνητική ανάδραση.

Οι πρώτες εμπορικά διαθέσιμες μονάδες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατασκευάστηκαν από την RCA το 1969 (πριν αποκτηθούν από την General Electric) με τη μορφή του CA3080. Αν και οι περισσότερες μονάδες κατασκευάζονται με διπολικά τρανζίστορ, παράγονται επίσης μονάδες τρανζίστορ φαινομένου πεδίου. Ο OTA δεν είναι τόσο χρήσιμος από μόνος του στη συντριπτική πλειονότητα των τυπικών λειτουργιών, όπως ο συνηθισμένος ενισχυτής ενίσχυσης, επειδή η έξοδός του είναι ρεύμα. Μία από τις κύριες χρήσεις του είναι η εφαρμογή ηλεκτρονικά ελεγχόμενων εφαρμογών όπως ταλαντωτές και φίλτρα μεταβλητής συχνότητας και στάδια ενισχυτή μεταβλητού κέρδους που είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστούν με τυπικούς ενισχυτές λειτουργίας. Παρακάτω φαίνεται ο ενισχυτής διαγωγιμότητας.



Εικόνα 3.28 – Ο ενισχυτής διαγωγιμότητας

Στον ιδανικό ΟΤΑ, το ρεύμα εξόδου είναι μια γραμμική συνάρτηση της διαφορικής τάσης εισόδου, που υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{out} = (V_{in+} - V_{in-}) \cdot g_m \quad (3.21)$$

όπου V_{in+} είναι η τάση στη μη αντιστρεφόμενη είσοδο, V_{in-} είναι η τάση στην αναστρέφουσα είσοδο και g_m είναι η διαγωγιμότητα του ενισχυτή.

Η τάση εξόδου του ενισχυτή είναι το γινόμενο του ρεύματος εξόδου και της αντίστασης φορτίου του:

$$V_{out} = I_{out} \cdot R_{out} \quad (3.22)$$

Όπου η R_{out} είναι η αντίσταση του φορτίου.

Η διαγωγιμότητα του ενισχυτή συνήθως ελέγχεται από ένα ρεύμα εισόδου, που δηλώνεται I_{abc} ή I_{bias} («ρεύμα πόλωσης ενισχυτή»). Η διαγωγιμότητα του ενισχυτή είναι ευθέως ανάλογη με αυτό το ρεύμα. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό που το καθιστά χρήσιμο για ηλεκτρονικό έλεγχο του κέρδους του ενισχυτή. Μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$g_m = 19.2 \cdot I_{abc} \quad (3.23)$$

Με το 19.2 να είναι χαρακτηριστική σταθερά του ενισχυτή διαγωγιμότητας.

Παρόλα αυτά στη περίπτωση που είναι συνδεδεμένη η διόδος του ενισχυτή η έξοδος I_{out} του κυκλώματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{out} \approx \frac{I_g \cdot I_{abc}}{I_d} \quad (3.24)$$

Όπου το I_g είναι το ρεύμα εισόδου του ενισχυτή και το I_d είναι το ρεύμα της διόδου.

Τέλος η διαγωγιμότητα μπορεί να εκφραστεί σαν το πηλίκο του ρεύματος εξόδου με την τάση εισόδου ως εξής:

$$g_m = \frac{I_{out}}{(V_{in+} - V_{in-})} \quad (3.25)$$

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε και ένα I_{bias} , όπου για δική μας διευκόλυνση θα το ονομάσουμε I_d και είναι το ρεύμα εισόδου που εισάγουμε στις διόδους του ενισχυτή διαγωγιμότητας. Θα μιλήσουμε για το ρεύμα αυτό σε παρακάτω κεφάλαιο που θα γίνει ανάλυση του LM13700.

3.3.3.1 Βασικές διαφορές από τους τυπικούς ενισχυτές

- Η έξοδος του ρεύματος έρχεται σε αντίθεση με αυτή του τυπικού λειτουργικού ενισχυτή του οποίου η έξοδος είναι τάση.
- Συνήθως χρησιμοποιείται σαν ενισχυτής ανοιχτού βρόχου χωρίς αρνητική ανάδραση σε γραμμικές εφαρμογές. Αυτό είναι δυνατό επειδή το μέγεθος της αντίστασης που συνδέεται με την έξοδό του ελέγχει την τάση εξόδου του. Επομένως, μπορεί να επιλεγεί μια αντίσταση που εμποδίζει την έξοδο από τον κορεσμό, ακόμη και με υψηλές διαφορικές τάσεις εισόδου.

3.3.3.2 Μεταγενέστερες βελτιώσεις

Οι προηγούμενες εκδόσεις του OTA δεν είχαν ούτε το τερματικό I_{bias} ή αλλιώς I_D (που φαίνεται στο διάγραμμα) ούτε τις διόδους (που φαίνονται δίπλα του). Όλα προστέθηκαν σε μεταγενέστερες εκδόσεις. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι άνοδοι των διόδων συνδέονται μεταξύ τους και η κάθοδος της μιας συνδέεται στη μη αντιστρεπτική είσοδο (V_{in+}) και η κάθοδος της άλλης στην αναστρέφουσα είσοδο (V_{in-}). Οι διόδοι πολώνονται στις ανόδους από ένα ρεύμα (I_D) που εγγέεται στην είσοδο του ακροδέκτη των διόδων. Αυτές οι προσθήκες επιφέρουν δύο ουσιαστικές βελτιώσεις στον OTA. Πρώτον, όταν χρησιμοποιούνται με αντιστάσεις εισόδου, οι διόδοι παραμορφώνουν τη διαφορική τάση εισόδου για να αντισταθμίσουν μια σημαντική ποσότητα μη γραμμικότητας σταδίου εισόδου σε υψηλότερες διαφορικές τάσεις εισόδου. Σύμφωνα με την National Semiconductor, η προσθήκη αυτών των διόδων αυξάνει τη γραμμικότητα του σταδίου εισόδου κατά 4. Δηλαδή, χρησιμοποιώντας τις διόδους, το επίπεδο παραμόρφωσης σήματος στα 80 mV διαφορικής εισόδου είναι το ίδιο με αυτό του απλού διαφορικού ενισχυτή σε διαφορική είσοδο 20 mV. Δεύτερον, η δράση των πολωμένων διόδων αντισταθμίζει μεγάλο μέρος της ευαισθησίας στη θερμοκρασία της διαγωγιμότητας του OTA.

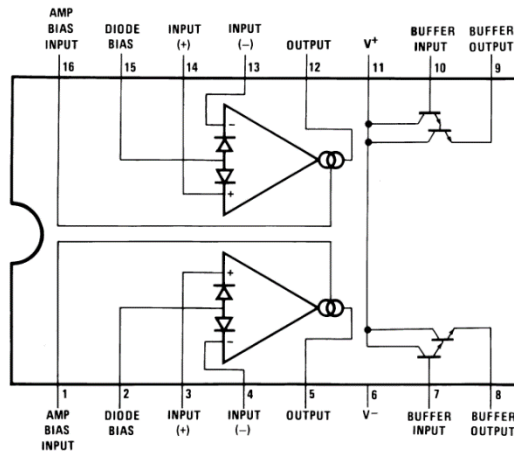
Μια δεύτερη βελτίωση είναι η ενσωμάτωση ενός ενισχυτή buffer εξόδου προαιρετικής χρήσης στο τσιπ στο οποίο βρίσκεται στον OTA. Αυτό είναι στην πραγματικότητα μια ευκολία για έναν σχεδιαστή κυκλώματος παρά μια βελτίωση του ίδιου του OTA, παραλείποντας την ανάγκη χρήσης ξεχωριστού buffer. Επιτρέπει επίσης τη χρήση του OTA ως παραδοσιακό ενισχυτή τάσης, εάν είναι επιθυμητό, μετατρέποντας το ρεύμα εξόδου του σε τάση.

Ένα παράδειγμα τσιπ που συνδυάζει και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά είναι το National Semiconductor LM13600 και ο διάδοχός του, το LM13700.

3.3.4 Ο Ενισχυτής Διαγωγιμότητας LM13700

Ο LM13700 είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που αποτελείται από δύο ενισχυτές λειτουργικής διαγωγιμότητας ελεγχόμενου ρεύματος (OTA), ο καθένας από τους οποίους έχει διαφορικές εισόδους και μια έξοδο push-pull. Ο LM13700 είναι σαν ένας τυπικός τελεστικός ενισχυτής, όπου αυτό σημαίνει ότι ο κάθε ένας ενισχυτής έχει ένα ζεύγος διαφορικών εισόδων και μία μόνο έξοδο, αλλά επειδή είναι OTA στην είσοδο έχει τάση και στην έξοδο ρεύμα αντί να έχει στην είσοδο τάση και στην έξοδο επίσης τάση όπως ένας κλασικός ενισχυτής. Επίσης οι OTA μπορούν να προγραμματιστούν μέσω του ακροδέκτη I_{abc} . Οι γραμμικές διόδοι στην είσοδο μειώνουν την παραμόρφωση και επιτρέπουν να υπάρχει μεγαλύτερο σήμα στην είσοδο. Είναι άξιο να σημειωθεί πως οι έξοδοι buffer τύπου Darlington έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να συμπληρώνουν το ευρύ δυναμικό εύρος του OTA. Κατά συνέπεια αυτό το ολοκληρωμένο είναι πολύ χρήσιμο στα ηλεκτρονικά ήχου, ειδικά σε κυκλώματα αναλογικών συνθεσάιζερ όπως ταλαντωτές ελεγχόμενης τάσης, φίλτρα ελεγχόμενης τάσης και ενισχυτές ελεγχόμενης τάσης. Τέλος τα buffer εξόδου τύπου Darlington στο LM13700 διαφέρουν από αυτά του LM13600 στο ότι τα ρεύματα πόλωσης τους (και επομένως τα επίπεδα DC εξόδου τους) είναι ανεξάρτητα από τον ακροδέκτη I_{abc} . Αυτό μπορεί

να οδηγήσει σε απόδοση ανώτερη από αυτή του LM13600 σε εφαρμογές ήχου. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον LM13700 σύμφωνα με το datasheet.



Εικόνα 3.29 – Ο LM13700

Παρατηρώντας την εικόνα του LM13700 σύμφωνα με το datasheet, μπορούμε να διακρίνουμε τους δύο ενισχυτές διαγωγιμότητας που βρίσκονται μέσα στο ολοκληρωμένο, τον ακροδέκτη για το ρεύμα εισόδου των διόδων καθώς και τα buffers Darlington. Είναι άξιο να σημειωθεί πως η τάση της διόδου υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

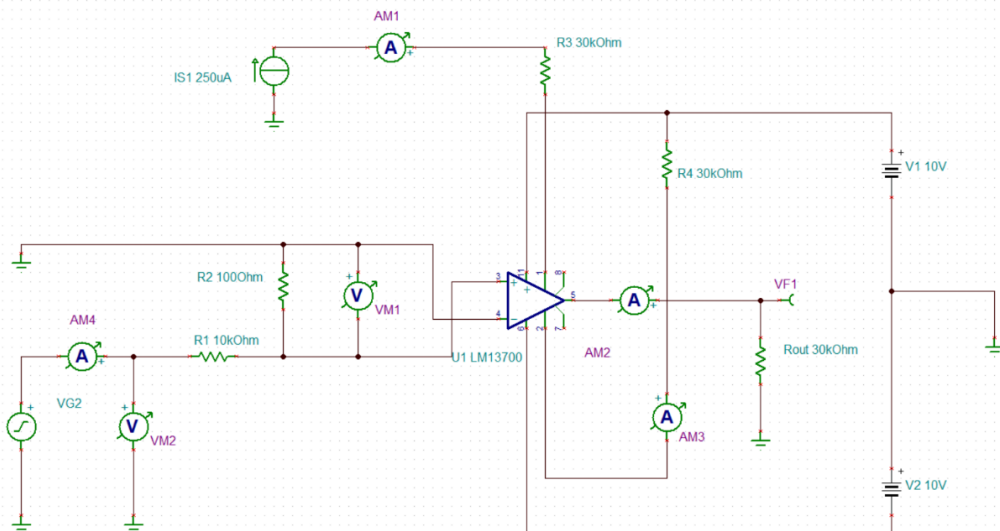
$$V_d = V_{cc} - 0,7$$

(3.26)

Όπου με V_{cc} ορίζεται η τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου.

3.3.4.1 Εξομοίωση του LM13700 στο TINA-TI

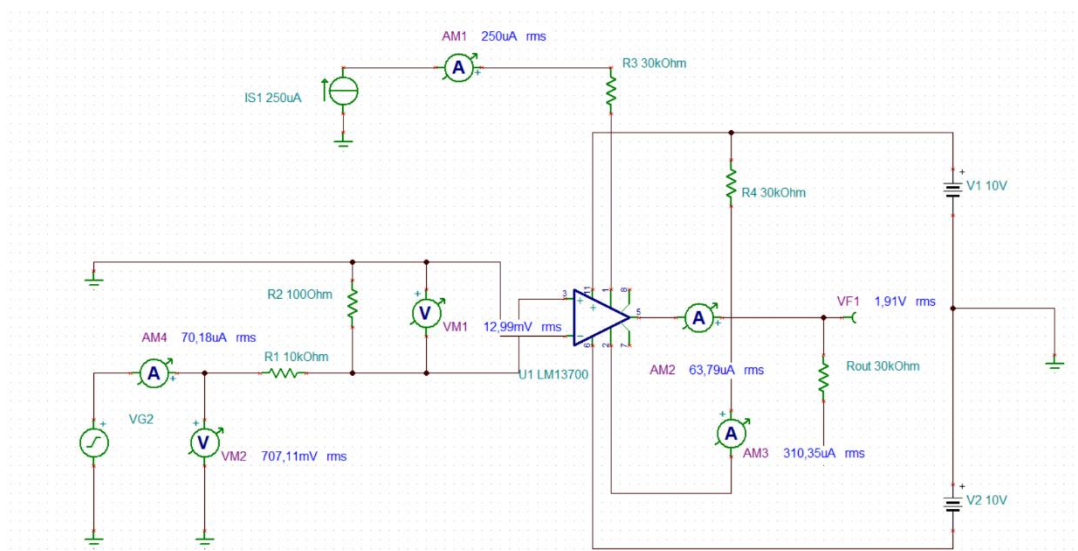
Σε αυτήν την ενότητα θα εξομοιώσουμε τον ενισχυτή LM13700 για καλύτερη κατανόηση, με το βοηθητικό πρόγραμμα TINA-TI που έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα. Στο



παρακάτω σχήμα φαίνεται ο LM13700 σχεδιασμένος στο TINA-TI.

Εικόνα 3.30 – Κύκλωμα LM13700

Αρχικά έχουμε προσθέσει ημιτονικό σήμα στην μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή πλάτους $V_{in} = 2V_{pp}$. Στη συνέχεια έχουμε προσθέσει το αμπερόμετρο AM4 σε σειρά για να μπορούμε να βλέπουμε το ρεύμα εισόδου I_{in} όπως επίσης και το βολτόμετρο VM2 παράλληλα για να μπορούμε να βλέπουμε την V_{rms} τάση της πηγής μας. Ακόμα έχουμε προσθέσει στο κύκλωμα τις αντιστάσεις $R1=10k\Omega$ (επιλέξαμε μια μεγάλη τιμή), την $R2 = 100\Omega$ (επιλέξαμε μια μικρή τιμή) καθώς και το βολτόμετρο VM1 στις εισόδους του ενισχυτή για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την V_s που προκύπτει από τον διαιρέτη τάσης που παρουσιάζεται. Επιπρόσθετα έχουμε προσθέσει την πηγή ρεύματος με τιμή $I_{abc} = 250\mu A$ όπως επίσης το αμπερόμετρο AM1 σε σειρά και την αντίσταση $R3 = 30k\Omega$. Ακόμα έχουμε προσθέσει την τροφοδοσία του ολοκληρωμένου με $V_{cc}^+ = 10V$ και $V_{cc}^- = -10V$. Επιπρόσθετα προσθέσαμε στο κύκλωμα την τάση για την διόδο όπου είναι συνδεδεμένη με την τροφοδοσία του ολοκληρωμένου την αντίσταση $R4 = 30k\Omega$ και το αμπερόμετρο AM3 για να μπορέσουμε να μετρήσουμε το ρεύμα της διόδου I_d . Τέλος έχουμε προσθέσει το αμπερόμετρο AM2 για να μετρήσουμε την έξοδο του κυκλώματος I_{out} και την αντίσταση $R_{out} = 30k\Omega$. Σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι να βεβαιωθούμε ότι το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο λειτουργεί σωστά επαληθεύοντας τις μετρήσεις που μας δίνει το TINA-TI με αυτές που βρίσκουμε με τις εξισώσεις. Κάνοντας AC Analysis στην εξομοίωσή μας λαμβάνουμε τα κάτωθι αποτελέσματα όπως φαίνεται στην εικόνα:



Εικόνα 3.31 – Το κύκλωμα LM13700 με AC Analysis

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που μας εμφανίζει το TINA-TI βλέπουμε τις εξής απαντήσεις:

- $I_{in} = 70,18 \mu A \text{ rms}$
- $V_{in} = 707,11 \text{ mV rms}$
- $V_s = 12,99 \text{ mV rms}$
- $I_d = 310,35 \mu A \text{ rms}$
- $I_{out} = 63,79 \mu A \text{ rms}$
- $V_{out} = 1,91 \text{ V rms}$

Αρχικά μπορούμε πολύ εύκολα να υπολογίσουμε το ρεύμα εισόδου από τον νόμο του Ohm ως εξής:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_1} = \frac{0,707 \text{ Vrms}}{10.000 \text{ Ohm}} \Rightarrow I_{in} = 70,18 \mu\text{A}$$

Επιπρόσθετα θα υπολογίσουμε την τάση στην είσοδο στον ενισχυτή, δηλαδή τη διαφορά δυναμικού με τον τύπο του διαιρέτη τάσης:

$$V_s = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,707 \text{ Vrms} \cdot \frac{100 \text{ Ohm}}{10.000 \text{ Ohm} + 100 \text{ Ohm}} \Rightarrow V_s = 7 \text{ mV rms}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την αγωγιμότητα ως εξής:

$$g_m = 19.2 \cdot I_{abc} = 19.2 \cdot 250 \mu\text{A} \Rightarrow g_m = 4,8 \text{ mS}$$

Επίσης υπολογίζουμε τόσο την τάση όσο και το ρεύμα που περνάει από τη δίοδο ως εξής:

$$V_d = V_{cc} - 0,7 = 10 \text{ V} - 0,7 \Rightarrow V_d = 9,3 \text{ V}$$

$$I_d = \frac{V_d}{R_4} = \frac{9,3 \text{ V}}{30.000 \text{ Ohm}} \Rightarrow I_d = 310 \mu\text{A}$$

Συνεπώς αφού έχουμε βρει τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα εξόδου και την τάση του ενισχυτή ως εξής:

$$I_{out} \approx \frac{I_g \cdot I_{abc}}{I_d} \approx \frac{70,8 \mu\text{A} \cdot 250 \mu\text{A}}{310 \mu\text{A}} \approx I_{out} = 57 \mu\text{A}$$

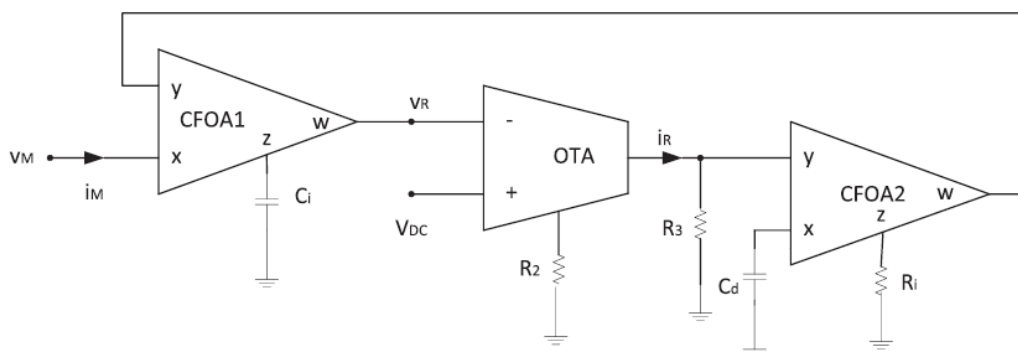
$$V_{out} = I_{out} \cdot R_{out} = 0,000057 \text{ A} \cdot 30.000 \text{ Ohm} \Rightarrow V_{out} = 1,71 \text{ V}$$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των θεωρητικών μετρήσεων με εκείνων της εξομοίωσης του TINA-TI μπορούμε αντιληφθούμε ότι το ολοκληρωμένο μας, αλλά και το κύκλωμα λειτουργούν κανονικά. Αυτό φαίνεται στο γεγονός ότι το ρεύμα εξόδου του της εξομοίωσης ήταν 63,79 μA ενώ στη θεωρητική μέτρηση 57 μA . Επίσης η τάση εξόδου της εξομοίωσης ήταν 1,91 V ενώ της θεωρητικής μέτρησης 1,71 V.

4 Εξομοίωση Memristor

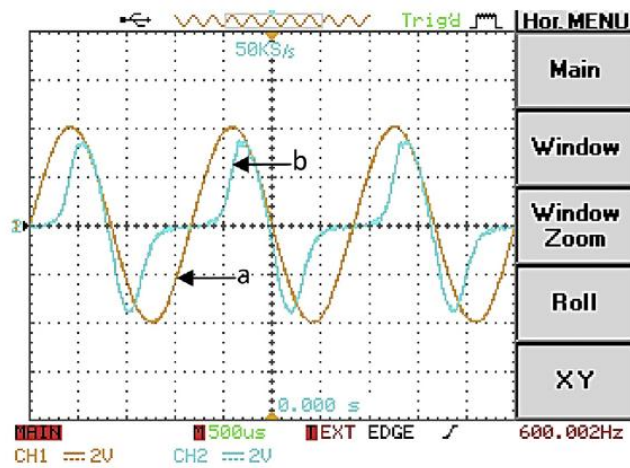
4.1 Σκοπός της Εξομοίωσης

Σκοπός της εξομοίωσης είναι να παρουσιαστεί ένα νέο κύκλωμα εξομοιωτή memristor. Το κύκλωμα είναι χτισμένο γύρω από τον τελεστικό ενισχυτή με ανάδραση ρεύματος και να εκμεταλλεύεται το χαρακτηριστικό της μη γραμμικής μεταφοράς του ενισχυτή διαγωγιμότητας για να παρέχει συνεχή αλλαγή στην αντίσταση. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με πολλούς από τους

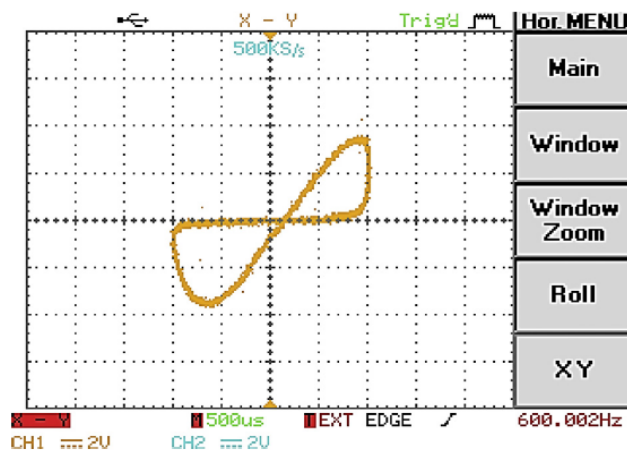


διαθέσιμους εξομοιωτές memristor που μπορούν να παρέχουν μόνο δυαδικά επίπεδα αντίστασης μνημών. Επιπλέον, ο εξομοιωτής λαμβάνει είσοδο χαμηλής σύνθετης αντίστασης και είναι κατάλληλος για την οδήγηση του ρεύματος αντί για οδήγηση τάσης. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται το κύκλωμα που θα προσπαθήσουμε να εξομοιώσουμε καθώς και οι γραφικές παραστάσεις:

Εικόνα 4.1 – Εξομοιωτής Memristor



Εικόνα 4.2 – Οι κυματομορφές τάσεως και ρεύματος του εξομοιωτή memristor



Εικόνα 4.3 – Η χαρακτηριστική τάσεως και ρεύματος του εξομοιωτή memristor

Συνεπώς η κύρια πρόθεση αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει έναν νέο εξομοιωτή memristor με συνεχή επίπεδα κατάστασης, δηλαδή η memristance να μπορεί να αποκτήσει πολλά επίπεδα. Για το λόγο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί το εγγενές χαρακτηριστικό μη γραμμικού ρεύματος-τάσης του ενισχυτή διαγωγιμότητας (ΟΤΑ). Στο κύκλωμα που βασίζεται στον ΟΤΑ, ο ΟΤΑ δεν λειτουργεί στη γραμμική του περιοχή, όπως συμβαίνει συνήθως στις γραμμικές εφαρμογές του ΟΤΑ. Αντίθετα, αναγκάζεται να εργαστεί στη μη γραμμική του περιοχή από την τάση V_{DC} που εφαρμόζεται στον θετικό ακροδέκτη εισόδου του. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος που βασίζεται σε ΟΤΑ θα είναι μια μη γραμμική συνάρτηση. Αξίζει να αναφέρουμε εδώ ότι το μη γραμμικό χαρακτηριστικό μεταφοράς του ΟΤΑ μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας το βοηθητικό ρεύμα πόλωσης (I_{abc}). Επιπλέον, συνδέοντας παράλληλα δύο ή περισσότερα ΟΤΑ, με διαφορετικές τιμές I_{abc} , είναι δυνατό να συντεθεί μια ποικιλία μη γραμμικών χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης. Αυτό θα διευκόλυνε τη ρύθμιση της μη γραμμικής συστατικής σχέσης ροής-φόρτισης του εξομοιωμένου memristor.

Στην εικόνα 4.2 παρατηρούμε να αναπαρίσταται η τάση V_m και το ρεύμα I_m του κυκλώματος σε σχέση με το χρόνο. Για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε στον παλμογράφο το ρεύμα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια αντίσταση στην είσοδο και ένας επιπλέον ενισχυτής οργανολογίας. Ο λόγος ύπαρξης του τελεστικού ενισχυτή οργανολογίας είναι να ανιχνεύσει την διαφορά δυναμικού πάνω στον αντιστάτη, θα την ενισχύσει αυτή την διαφορά και κατά αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουμε να την αποτυπώσουμε στον παλμογράφο. Εάν γνωρίζουμε την τιμή της αντίστασης μπορούμε να αναγάγουμε την τάση σε ρεύμα.

4.2 Ο Διαφορικός Ενισχυτής

Ένας διαφορικός ενισχυτής είναι ένας τύπος ηλεκτρονικού ενισχυτή που ενισχύει τη διαφορά μεταξύ δύο τάσεων εισόδου, αλλά καταστέλλει οποιαδήποτε τάση κοινή για τις δύο εισόδους. Είναι αναλογικό κύκλωμα με δύο εισόδους V_{in}^+ και V_{in}^- και μία έξοδο V_{out} όπου η έξοδος είναι ιδανικά ανάλογη με τη διαφορά μεταξύ των δύο τάσεων:

$$V_{out} = A \cdot (V_{in}^+ - V_{in}^-) \quad (4.1)$$

Όπου το A είναι το κέρδος του ενισχυτή.

Οι απλοί ενισχυτές συνήθως υλοποιούνται είτε με την προσθήκη των κατάλληλων αντιστάσεων ανάδρασης σε έναν τυπικό ενισχυτή ενεργοποίησης είτε με ένα αποκλειστικό ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει εσωτερικές αντιστάσεις ανάδρασης. Είναι επίσης ένα κοινό υπό συστατικό μεγαλύτερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που χειρίζονται αναλογικά σήματα.

Η έξοδος ενός ιδανικού διαφορικού ενισχυτή δίνεται από:

$$V_{out} = A_d \cdot (V_{in}^+ - V_{in}^-) \quad (4.2)$$

Όπου το A_d είναι το διαφορικό κέρδος τάσης και τα V_{in}^+ V_{in}^- οι τάσεις εισόδου του ενισχυτή. Στην πράξη, ωστόσο, το κέρδος δεν είναι αρκετά ίσο για τις δύο εισόδους. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι εάν οι τάσεις εισόδου V_{in}^+ V_{in}^- είναι ίσες, η έξοδος δεν θα είναι μηδέν, όπως θα ήταν στην ιδανική περίπτωση. Μια πιο ρεαλιστική έκφραση για την έξοδο ενός διαφορικού ενισχυτή περιλαμβάνει επομένως έναν δεύτερο όρο:

$$V_{out} = A_d \cdot (V_{in}^+ - V_{in}^-) + A_c \cdot \frac{V_{in}^+ - V_{in}^-}{2}$$

(4.3)

Όπου το A_c ονομάζεται κέρδος τάσης κοινού σήματος (common - mode gain) του ενισχυτή. Καθώς οι διαφορικοί ενισχυτές χρησιμοποιούνται συχνά για την εξάλειψη του θορύβου ή των τάσεων πόλωσης που εμφανίζονται και στις δύο εισόδους, συνήθως είναι επιθυμητό ένα χαμηλό κέρδος τάσης κοινού σήματος.

Ο λόγος απόρριψης κοινού ρυθμού (CMRR: Common mode rejection ratio), που συνήθως ορίζεται σαν ο λόγος του διαφορικού κέρδους τάσης προς το κέρδος τάσης κοινού ρυθμού, υποδηλώνει την ικανότητα του ενισχυτή να ακυρώνει με ακρίβεια τις τάσεις που είναι κοινές και στις δύο εισόδους. Επίσης είναι μια μέτρηση που χρησιμοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την ικανότητα της συσκευής να απορρίπτει σήματα κοινής λειτουργίας, δηλαδή αυτά που εμφανίζονται ταυτόχρονα και σε φάση και στις δύο εισόδους. Ένα παράδειγμα είναι η μετάδοση ήχου μέσω ισορροπημένης γραμμής στην ενίσχυση ή την εγγραφή ήχου. Ο λόγος απόρριψης κοινού ρυθμού ορίζεται ως:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

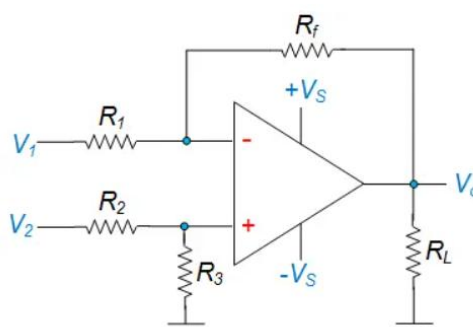
(4.4)

Όσο υψηλότερος είναι ο CMRR, τόσο το καλύτερο. Υψηλός CMRR σημαίνει ότι ο διαφορικός ενισχυτής ενισχύει το επιθυμητό σήμα και ξεχωρίζει το κοινό σήμα. Τα φυλλάδια προδιαγραφών συχνά δίνουν τον CMRR σε dB, χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο για τη μετατροπή σε dB:

$$CMRR_{dB} = 20 \log CMRR$$

(4.5)

Σε έναν απόλυτα συμμετρικό διαφορικό ενισχυτή, το A_c είναι μηδέν και το CMRR είναι άπειρο. Ένας τελεστικός ενισχυτής μπορεί να λειτουργήσει και ως διαφορικός ενισχυτής. Ένας τελεστικός ενισχυτής, ή op-amp, είναι ένας διαφορικός ενισχυτής με πολύ υψηλό κέρδος διαφορικής τάσης, πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου και χαμηλή σύνθετη αντίσταση εξόδου. Ένας διαφορικός ενισχυτής op-amp μπορεί να κατασκευαστεί με προβλέσιμο και σταθερό κέρδος εφαρμόζοντας αρνητική ανάδραση. Ορισμένα είδη διαφορικών ενισχυτών περιλαμβάνουν συνήθως αρκετούς απλούστερους διαφορικούς ενισχυτές. Για παράδειγμα, ένας πλήρως διαφορικός ενισχυτής, ένας ενισχυτής οργάνων ή ένας ενισχυτής απομόνωσης κατασκευάζονται συχνά από έναν συνδυασμό πολλών op-amp.

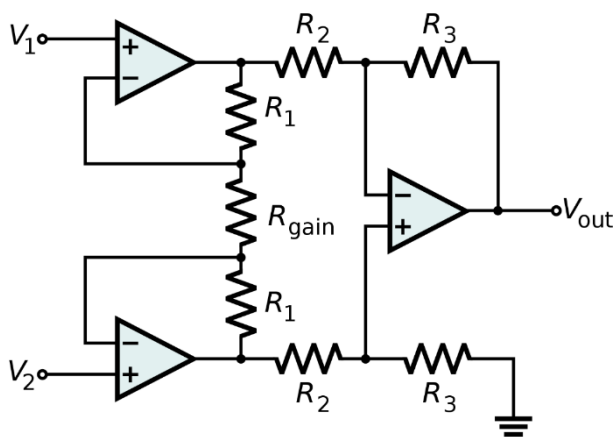


Εικόνα 4.4 – Ο διαφορικός ενισχυτής

4.2.1 Ο Ενισχυτής Οργανολογίας

Ένας ενισχυτής οργανολογίας (μερικές φορές αναφέρεται και ως in-amp ή InAmp) είναι ένας τύπος διαφορικού ενισχυτή που έχει εξοπλιστεί με ενισχυτές buffer εισόδου, οι οποίοι εξαλείφουν την ανάγκη για αντιστοίχιση σύνθετης αντίστασης εισόδου και έτσι κάνουν τον ενισχυτή ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση σε εξοπλισμούς μετρήσεων και δοκιμών. Τα πρόσθετα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν πολύ χαμηλή μετατόπιση DC, χαμηλό θόρυβο, πολύ υψηλό κέρδος ανοιχτού βρόχου, πολύ υψηλή αναλογία απόρριψης κοινής λειτουργίας και πολύ υψηλές σύνθετες αντιστάσεις εισόδου. Οι ενισχυτές οργανολογίας χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα του κυκλώματος τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

Αν και ο ενισχυτής οργανολογίας συνήθως εμφανίζεται σχηματικά πανομοιότυπος με έναν τυπικό τελεστικό ενισχυτή (op-amp), ο ηλεκτρονικός ενισχυτής οργανολογίας αποτελείται σχεδόν πάντα εσωτερικά από 3 τελεστικούς ενισχυτές. Αυτοί είναι διατεταγμένοι έτσι ώστε να υπάρχει ένας τελεστικός για την προσωρινή αποθήκευση σε κάθε είσοδο (+, -) και ένας για να παράγει την επιθυμητή έξοδο με επαρκή αντιστοίχιση σύνθετης αντίστασης για τη συνάρτηση. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κύκλωμα ενισχυτή οργανολογίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.5 – Ο ενισχυτής οργανολογίας

Το κέρδος του κυκλώματος είναι:

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{2R_1}{R_{Gain}} \right) \cdot (V_{in2} - V_{in1}) \quad (4.6)$$

Ο δεξιός ενισχυτής, μαζί με τις αντιστάσεις R_2 και R_3 είναι απλώς το τυπικό κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή, με ενίσχυση R_3/R_2 και διαφορική αντίσταση εισόδου $2 \cdot R_2$. Οι δύο ενισχυτές στα αριστερά είναι οι buffers. Με την αφαίρεση του R_{gain} λόγω ανοιχτού κυκλώματος, οι ενισχυτές είναι απλοί buffers και το κύκλωμα θα λειτουργεί σε αυτήν την κατάσταση, με κέρδος ίσο με R_3/R_2 και υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου λόγω των buffers. Το κέρδος του buffer θα μπορούσε να αυξηθεί με την τοποθέτηση αντιστάσεων μεταξύ των εισόδων αναστροφής του buffer και της γείωσης για να απομακρυνθεί μέρος της αρνητικής ανάδρασης. Ωστόσο, η απλή αντίσταση R_{gain} μεταξύ των δύο εισόδων αναστροφής είναι μια πολύ πιο κομψή μέθοδος, αυξάνει το διαφορικό κέρδος τάσης των buffers και αφήνει το κέρδος τάσης κοινού σήματος (CMRR) ίσο με 1. Αυτό αυξάνει το κέρδος τάσης κοινού σήματος (CMRR) του κυκλώματος και επίσης δίνει τη δυνατότητα στους buffers να χειρίζονται πολύ μεγαλύτερα κοινά σήματα χωρίς ψαλιδισμό από ό,τι θα συνέβαινε αν ήταν ξεχωριστά και είχαν το ίδιο κέρδος.

4.2.1.1 Πλεονεκτήματα του Ενισχυτή Οργανολογίας

Τα πλεονεκτήματα του ενισχυτή οργάνων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.

- Το κέρδος ενός κυκλώματος ενισχυτή οργάνων τριών τελεστικών μπορεί εύκολα να μεταβληθεί ρυθμίζοντας την τιμή μόνο μιας αντίστασης R_{gain} .
- Το κέρδος του ενισχυτή εξαρτάται μόνο από τις εξωτερικές αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται.
- Η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι πολύ υψηλή λόγω των διαμορφώσεων ακολούθου εκπομπού των ενισχυτών που βρίσκονται αριστερά
- Η σύνθετη αντίσταση εξόδου του ενισχυτή οργάνων είναι πολύ χαμηλή λόγω του ενισχυτή διαφοράς στα δεξιά.

4.2.1.2 Εφαρμογές Ενισχυτή Οργάνων

Οι εφαρμογές του ενισχυτή οργανολογίας είναι οι ακόλουθες.

- Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για τη λήψη δεδομένων από μικρούς μετατροπείς ο/p όπως θερμοστοιχεία, μετρητές καταπόνησης, μετρήσεις της γέφυρας Wheatstone κ.λπ.
- Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται στην πλοήγηση, την ιατρική, το ραντάρ κ.λπ.
- Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της αναλογίας S/N (σήμα προς θόρυβο) σε εφαρμογές ήχου όπως σήματα ήχου με χαμηλό πλάτος.
- Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση καθώς και για την απόκτηση δεδομένων βίντεο στη ρύθμιση σήματος υψηλής ταχύτητας.
- Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται σε συστήματα καλωδίων ραδιοσυχνοτήτων για την ενίσχυση του σήματος υψηλής συχνότητας.

4.2.1.3 Διαφορά μεταξύ Τελεστικού Ενισχυτή και Ενισχυτή Οργανολογίας

Οι βασικές διαφορές μεταξύ του τελεστικού ενισχυτή και του ενισχυτή οργανολογίας είναι οι ακόλουθες

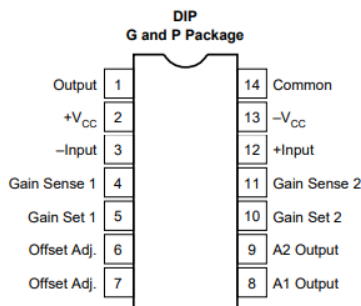
- Ένας τελεστικός ενισχυτής (op-amp) είναι ένα είδος ολοκληρωμένου κυκλώματος.
- Ο ενισχυτής οργανολογίας είναι ένας τύπος διαφορικού ενισχυτή.
- Ο ενισχυτής οργανολογίας μπορεί να κατασκευαστεί με τρεις λειτουργικούς ενισχυτές.
- Ο διαφορικός ενισχυτής μπορεί να κατασκευαστεί με έναν μόνο τελεστικό ενισχυτή.
- Η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή επηρεάζεται λόγω της ασυμφωνίας των αντιστάσεων.
- Ο ενισχυτής οργανολογίας προσφέρει κέρδος με μία μόνο αντίσταση της κύριας φάσης του που δεν χρειάζεται ταίριασμα αντίστασης.

4.2.2 Ο Ενισχυτής Οργανολογίας INA101

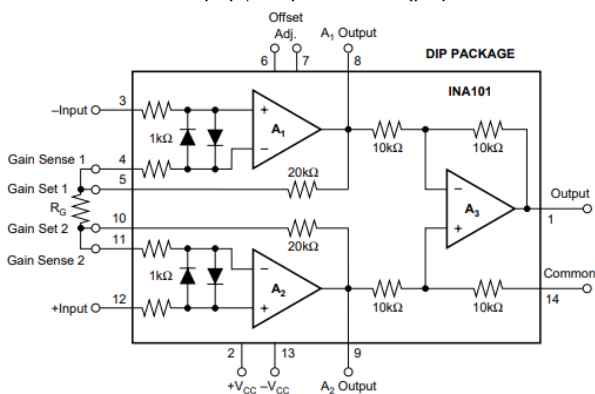
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε κάποια στοιχεία του ενισχυτή οργανολογίας INA101 καθώς θα μας βοηθήσει αργότερα να βρούμε το ρεύμα εισόδου στην εξομοίωση του memristor.

Επίσης θα ακολουθήσει και ένα παράδειγμα στο TINA-TI ώστε να βεβαιωθούμε ότι θα λειτουργήσει σωστά στην εξομοίωση.

Ο INA101 είναι ένας ενισχυτής οργανολογίας υψηλής ακρίβειας σχεδιασμένος για ενίσχυση σήματος χαμηλού επιπέδου και λήψη δεδομένων γενικού σκοπού. Τρεις τελεστικοί ενισχυτές και μεταλλικές αντιστάσεις είναι ενσωματωμένοι σε ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τον INA101 σχηματικά αλλά και σαν ολοκληρωμένο.



Εικόνα 4.6 – Η διαμόρφωση του ολοκληρωμένου INA101



Εικόνα 4.7 – Το εσωτερικό του ολοκληρωμένου INA101

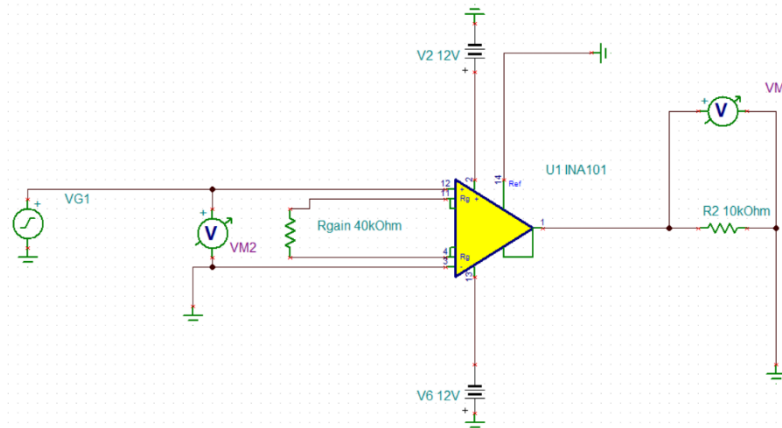
Η εικόνα δείχνει τις βασικές συνδέσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία του INA101. Η έξοδος αναφέρεται στον κοινό ακροδέκτη εξόδου που είναι συνήθως γειωμένος. Αυτή πρέπει να είναι μια σύνδεση χαμηλής σύνθετης αντίστασης για να εξασφαλίζεται καλή απόρριψη κοινού σήματος (CMRR). Η ενίσχυση του INA101 επιτυγχάνεται συνδέοντας μια μοναδική αντίσταση R_G και δίνεται από τον τύπο:

$$G = 1 + \frac{40K\Omega}{R_{Gain}}$$

(4.7)

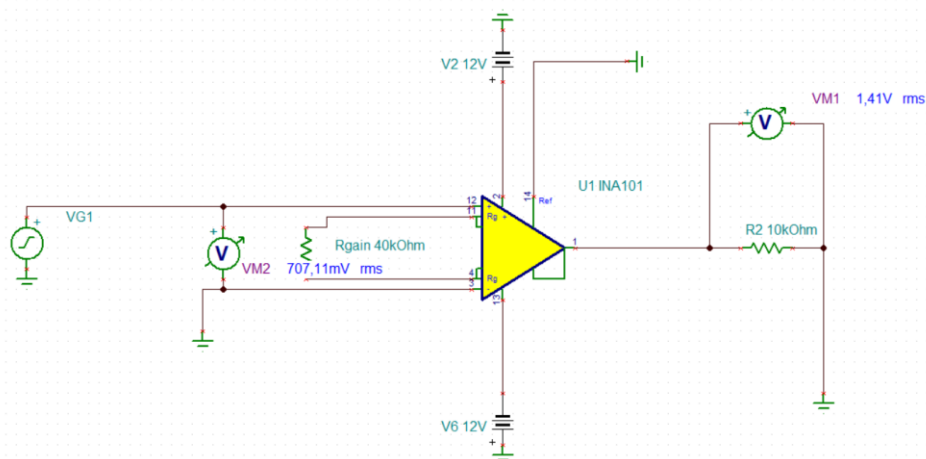
Όπου ο όρος $40K\Omega$ στην εξίσωση προέρχεται από το άθροισμα των δύο εσωτερικών αντιστάσεων ανάδρασης.

Στη συνέχεια σχεδιάσαμε τον INA101 στο TINA-TI και ελέγξαμε την ορθή λειτουργία του λόγω του ότι θα χρησιμοποιηθεί στη τελική εξομοίωση. Παρακάτω βλέπουμε το σχηματικό με τον ενισχυτή οργανολογίας.



Εικόνα 4.8 – Κύκλωμα INA101

Στο κύκλωμα μας έχουμε συνδέσει την τάση στη μη αναστρέφουσα ώστε να δίνει ημιτονικό σήμα $V = 2V_{pp}$ καθώς και έχουμε γειώσει τόσο την αναστρέφουσα όσο και το ποδαράκι 14 του ενισχυτή. Την αντίσταση R_2 την χρησιμοποιήσαμε ώστε να μπορέσουμε να μετρήσουμε την τάση εξόδου με το βολτόμετρο VM1. Το βολτόμετρο VM2 μας βοηθάει ώστε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της αναστρέφουσας και μη αναστρέφουσας εισόδου. Τέλος έχουμε ρυθμίσει την αντίσταση $R_{gain} = 40k\Omega$. Κάνοντας AC analysis στο κύκλωμα παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα σύμφωνα με την εικόνα

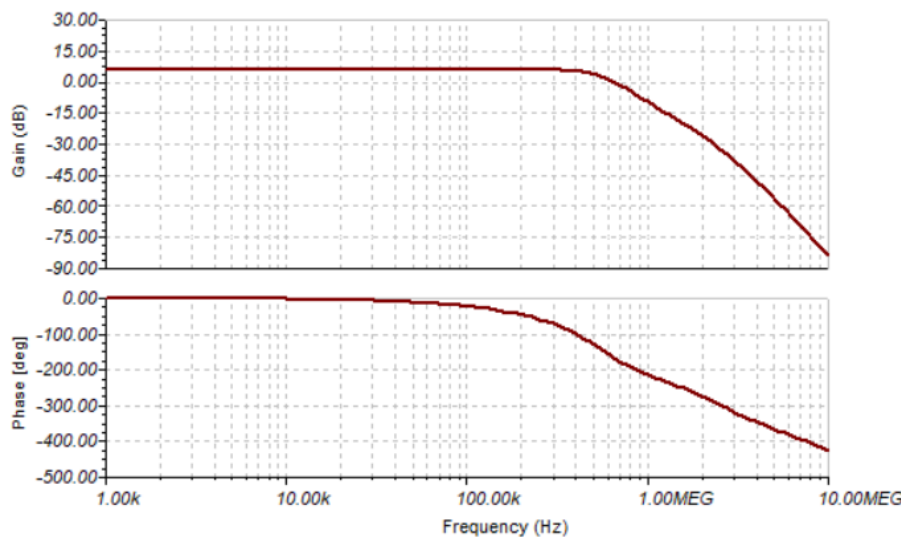


Εικόνα 4.9 – Κύκλωμα INA101 με AC Analysis

Παρατηρούμε ότι η διαφορά δυναμικού είναι $V_s = 707,11 \text{ mV rms}$ όπως επίσης η $V_{out} = 1,41V$. Για να υπολογίσουμε την ενίσχυση του ενισχυτή οργανολογίας θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο που αναφέραμε και προηγουμένως:

$$G = 1 + \frac{40K\Omega}{R_{Gain}} = 1 + \frac{40K\Omega}{40 K\Omega} \Rightarrow G = 2$$

Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ενίσχυση που παρουσιάζει ο ενισχυτής μας είναι $G = 2$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η έξοδος V_{out} θα είναι ενισχυμένη κατά 2 φορές σε σχέση με την είσοδο V_s . Όπως είναι αντιληπτό και από το κύκλωμα μας η V_{out} είναι 1,41V δηλαδή 2 φορές μεγαλύτερη της V_s . Άρα ο ενισχυτής οργανολογίας INA101 λειτουργεί σωστά. Τέλος στη παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την συνάρτηση μεταφοράς για τον INA101 με ενίσχυση 2.

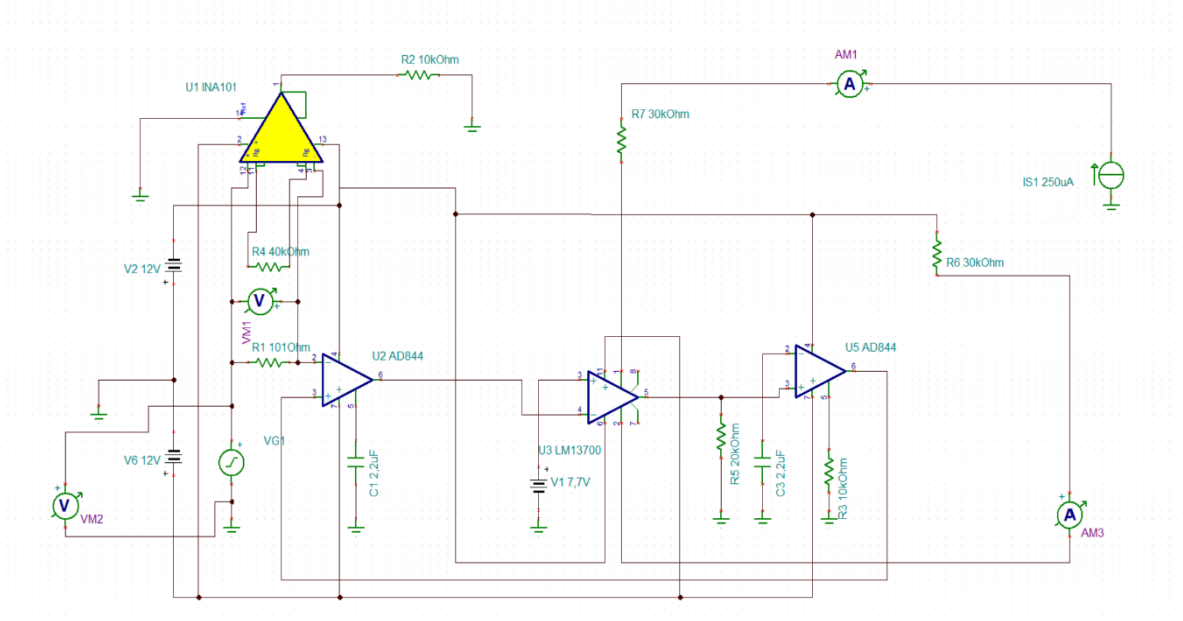


Εικόνα 4.10 – Συνάρτηση μεταφοράς για τον INA101 με ενίσχυση 2

4.3 Εξομοιωτής Memristor

4.3.1 Ανάλυση του κυκλώματος στο TINA-TI

Σε αυτή την ενότητα θα προσομοιώσουμε το κύκλωμα που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου στο πρόγραμμα εξομοίωσης TINA. Παρόλα αυτά έχουν γίνει κάποιες παραμετροποιήσεις για να μπορέσει να επιτευχθεί η εξομοίωση. Αρχικά στο θεωρητικό κομμάτι έχει χρησιμοποιηθεί ο ενισχυτής διαγωγιμότητας (OTA) CA3080, όπου δεν ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα. Για το λόγο αυτό αντικαταστάθηκε με τον ενισχυτή διαγωγιμότητας (OTA) LM13700, που έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα τόσο στη λειτουργία του όσο και με υλοποίηση κυκλώματος στο πρόγραμμα εξομοίωσης με σκοπό τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του ολοκληρωμένου. Επιπρόσθετα για να μπορέσουμε να μετρήσουμε το ρεύμα στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή έχουμε προσθέσει μια δική μας αντίσταση της τάξεως των 100Ω καθώς επίσης και τον ενισχυτή οργανολογίας INA101. Τον ενισχυτή αυτόν τον προσθέσαμε με σκοπό να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε το ρεύμα εισόδου σε τάση στον παλμογράφο. Ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και τα χαρακτηριστικά του έχουν αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα. Στην παρακάτω φωτογραφία βλέπουμε το κύκλωμα που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4.1 αλλά αυτή τη φορά με τις ανάλογες παραμετροποιήσεις ώστε να επιτευχθεί η εξομοίωση στο TINA-TI.



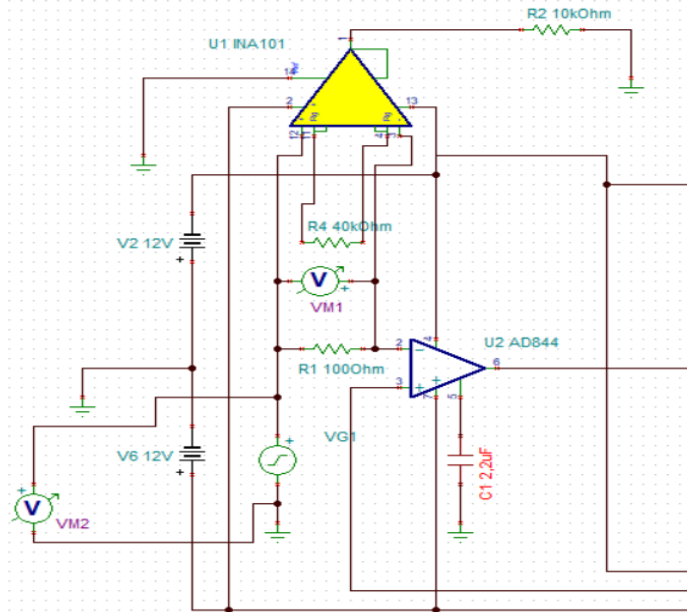
Εικόνα 4.11 – Τελικό κύκλωμα εξομοίωσης

Για τις ανάγκες της εξομοίωσης έχουν δοθεί οι παρακάτω τιμές:

- $V_{in} = 2V_{pp}$, $f = 2,5 \text{ kHz}$, $T = 400 \mu\text{s}$
- $R_1 = 101 \text{ Ohm}$
- $R_2 = 10 \text{ kOhm}$
- $R_3 = 10 \text{ kOhm}$
- $R_4 = 40 \text{ kOhm}$
- $R_5 = 20 \text{ kOhm}$
- $R_6 = 30 \text{ kOhm}$
- $R_7 = 30 \text{ kOhm}$
- $C_1 = 2,2 \mu\text{F}$
- $C_2 = 2,2 \mu\text{F}$
- $V_1 = 7,7 \text{ V}$
- $I_{abc} = 250 \mu\text{A}$
- $V_{cc}^+ = 12\text{V}$
- $V_{cc}^- = 12\text{V}$

Για να γίνει πιο κατανοητό το κύκλωμα της εξομοίωσης θα το χωρίσουμε σε δύο βαθμίδες:

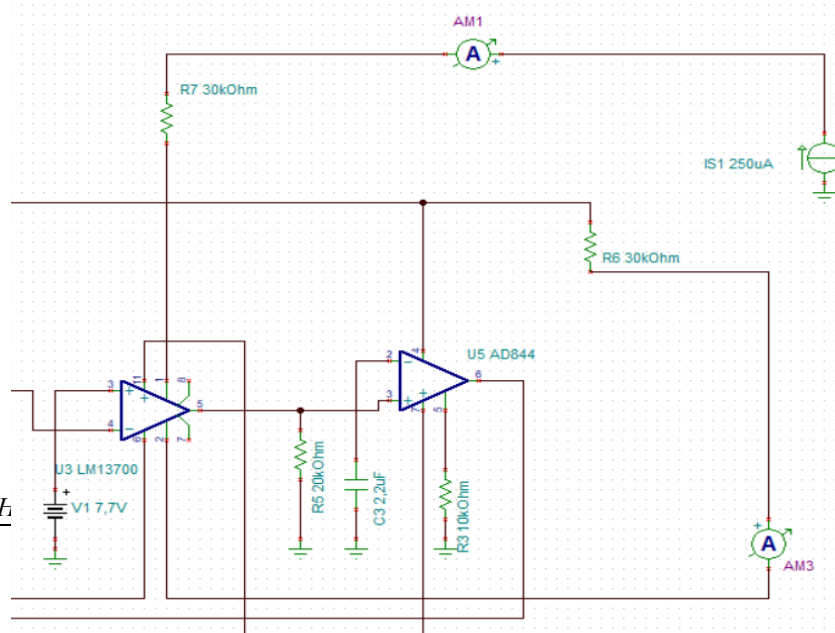
1. Βαθμίδα 1: AD844 και INA101



Εικόνα 4.12 – Πρώτη βαθμίδα του τελικού κυκλώματος εξομοίωσης

Σε αυτή την πρώτη βαθμίδα μπορούμε να διακρίνουμε τον τελεστικό ενισχυτή AD844, την αντίσταση είσοδο του και την τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος. Επιπρόσθετα έχουμε προσθέσει ένα βολτόμετρο παράλληλα στην είσοδό μας για να μπορέσουμε να αποτυπώσουμε το σήμα μας στον παλμογράφο. Επίσης διακρίνουμε τον ενισχυτή οργανολογίας INA101 όπου στην είσοδό του έχει την αντίσταση του τελεστικού ενισχυτή. Μεταξύ των δύο εισόδων του INA101 έχουμε προσθέσει ένα δεύτερο βολτόμετρο ώστε να μετατρέψουμε το ρεύμα σε τάση, να το ενισχύσουμε και συνάμα να το αποτυπώσουμε και εκείνο στον παλμογράφο. Η αντίσταση R1 έχει προστεθεί για έχουμε ρεύμα στην είσοδο του κυκλώματος όπου θα μπορούμε να το μετρήσουμε. Η έξοδος του ενισχυτή AD844 είναι και η είσοδος για τον επόμενο ενισχυτή και την επόμενη βαθμίδα.

2. Βαθμίδα 2: LM13700 και AD844

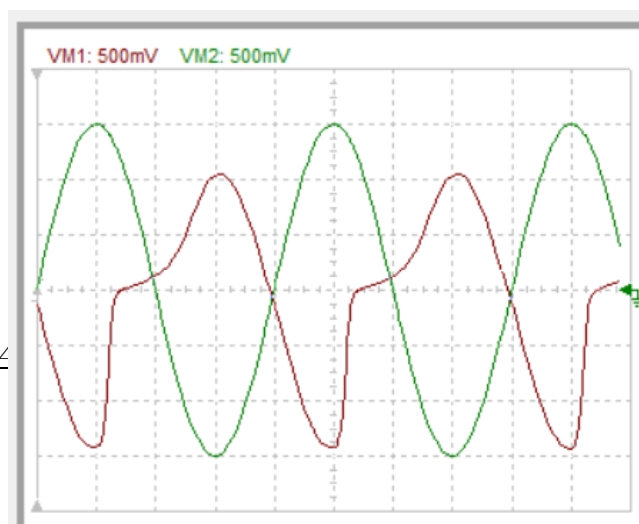


Εικόνα 4.13 – Δεύτερη βαθμίδα του τελικού κυκλώματος εξομοίωσης

Στη δεύτερη βαθμίδα του κυκλώματος παρατηρούμε τόσο τον ενισχυτή διαγωγιμότητας LM13700 όσο και τον δεύτερο ενισχυτή AD844. Η είσοδος του ενισχυτή διαγωγιμότητας είναι η έξοδος του ενισχυτή AD844 από την προηγούμενη βαθμίδα. Στην μη αναστρέφουσα είσοδο έχουμε προσθέσει μια DC τάση της τάξης των 7,7V. Επιπρόσθετα για να μπορέσει να λειτουργήσει ορθά ο ενισχυτής διαγωγιμότητας ήταν αναγκαίο να τοποθετήσουμε τόσο μια πηγή ρεύματος όσο και να τροφοδοτήσουμε την εσωτερική δίοδο του ολοκληρωμένου. Επίσης έχουμε προσθέσει δύο αμπερόμετρα σε σειρά ώστε να μπορούμε να έχουμε πλήρη εικόνα των τιμών του ρεύματος τόσο του I_{abc} όσο και του I_d . Η έξοδος του LM13700 είναι η είσοδος για τον AD844. Στην αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή έχουμε συνδέσει έναν πυκνωτή της τάξης των 2,2 nF. Τέλος η έξοδος του AD844 επιστρέφει στην μη αναστρέφουσα είσοδο της πρώτης βαθμίδας.

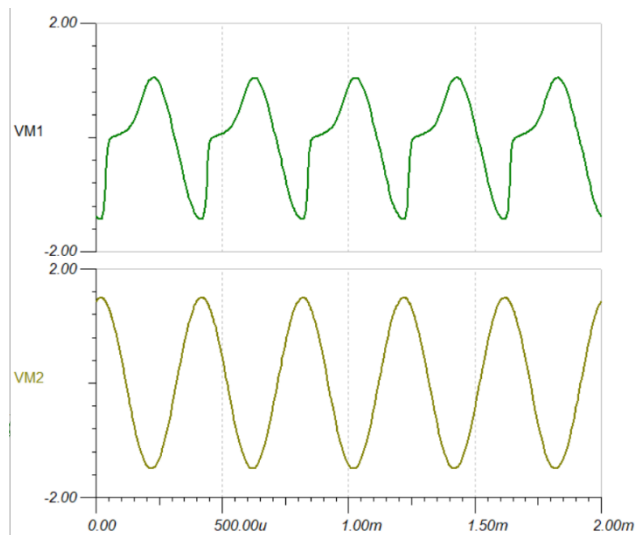
4.3.2 Γραφικές απεικονίσεις

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει σύγκριση των γραφικών παραστάσεων από τη θεωρία του επιστημονικού άρθρου με αυτή της πειραματικής εξομοίωσης. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον παλμογράφο του TINA-TI να αναπαριστά την είσοδο του κυκλώματος (VM2) καθώς και το ρεύμα εκφρασμένο σε τάση (VM1):



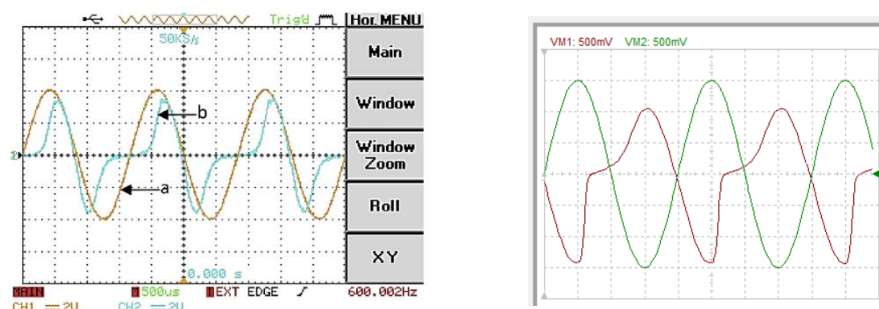
Εικόνα 4.14 – Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του κυκλώματος στον παλμογράφο

Επίσης μπορούμε να τις διαχωρίσουμε και να τις τοποθετήσουμε σε άξονες ώστε να διακρίνουμε και την περίοδο. Η εικόνα φαίνεται παρακάτω με τις διαχωρισμένες γραφικές:



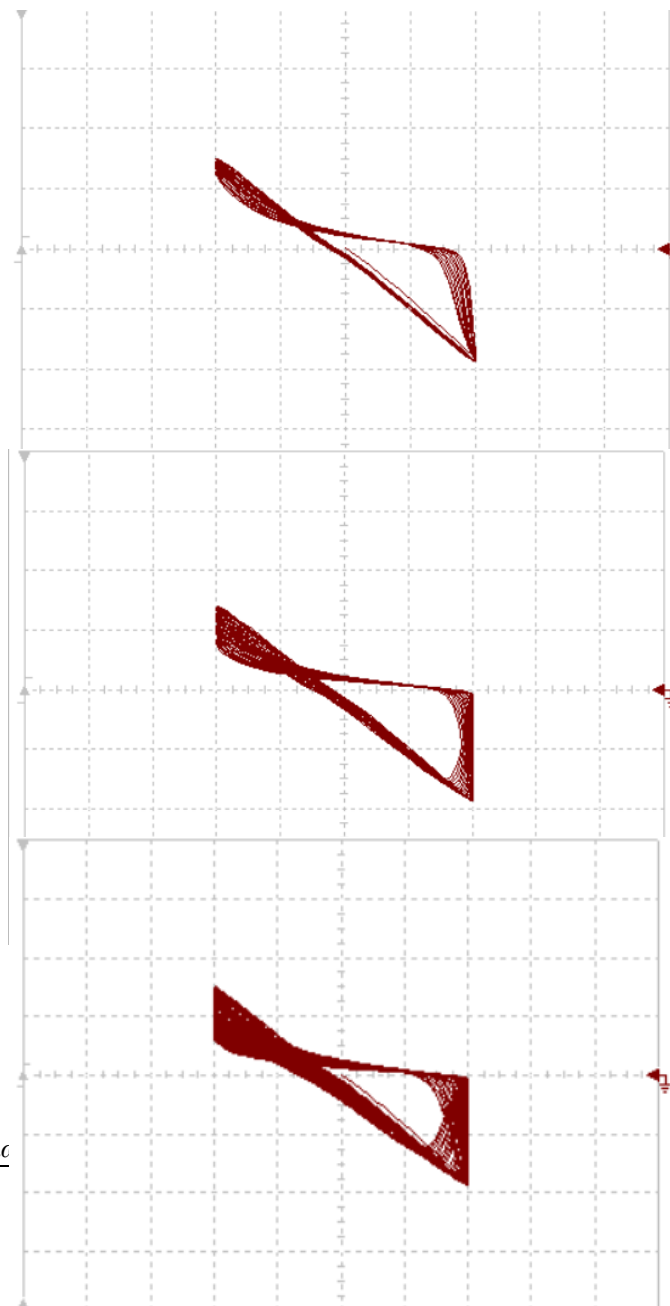
Εικόνα 4.15 – Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του κυκλώματος σε άξονες

Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εικόνα ότι η εξομοίωση μας μπορεί να λειτουργεί σωστά. Οι χαρακτηριστικές τόσο από το θεωρητικό κομμάτι όσο και από το πειραματικό φαίνονται παρακάτω:



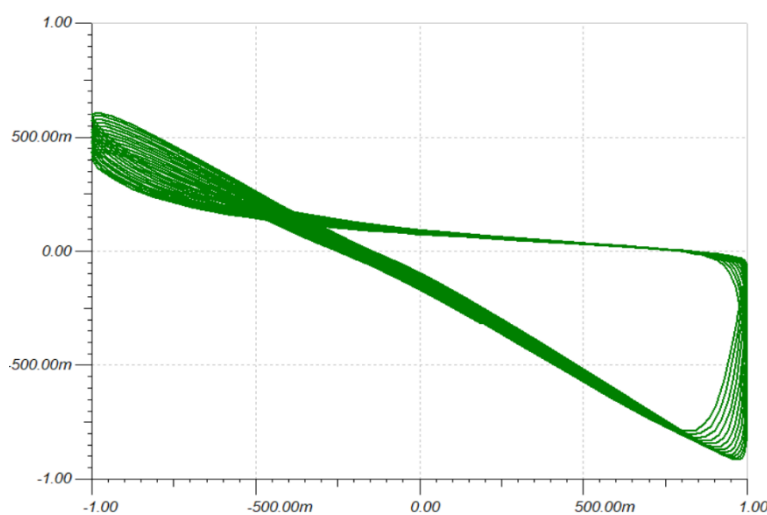
Είναι άξιο να σημειωθεί ότι παρουσιάζονται και κάποιες διαφορές. Η πρώτη διαφορά που παρατηρείτε είναι στη διαφορά φάσης. Στο θεωρητικό μέρος βλέπουμε τα δύο σήματα να είναι συμφασικά σε αντίθεση με την εξομοίωση όπου παρουσιάζουν διαφορά φάσης 180° . Αυτό οφείλετε στην πόλωση του βολτομέτρου VM1. Ακόμα μια διαφορά είναι στο γεγονός ότι για να λειτουργήσει το κύκλωμα και να μας παράξει τα πειραματικά αποτελέσματα χρειάστηκε να αυξηθεί η συχνότητα στην τροφοδοσία. Στο θεωρητικό μέρος μπορούμε να διακρίνουμε ότι η συχνότητα είναι της τάξης των $f = 600 \text{ Hz}$ και κατά συνέπεια η περίοδος είναι ίση με $T = 1,6 \text{ ms}$. Σε αντίθεση με την εξομοίωση αυξήσαμε την συχνότητα του σήματος κάτι παραπάνω από τέσσερις φορές, δηλαδή η συχνότητα έγινε ίση με $f = 2,5 \text{ kHz}$ και κατά συνέπεια η περίοδος έγινε ίση με $T = 400 \text{ } \mu\text{s}$. Συνεπώς για να μπορέσει το κύκλωμα να αποδώσει η αλλαγή της συχνότητας ήταν αναγκαία.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό που πρέπει να μελετηθεί, που είναι και ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι για το εάν το κύκλωμα που εξομοιώσαμε παρουσιάζει χαοτική κατάσταση. Αυτό θα ελεγχθεί βάζοντας τον παλμογράφο σε λειτουργία X-Y για να εκφράσει τα δύο σήματα που έχουμε μελετήσει. Στις παρακάτω φωτογραφίες βλέπουμε τις απεικονίσεις του παλμογράφου:



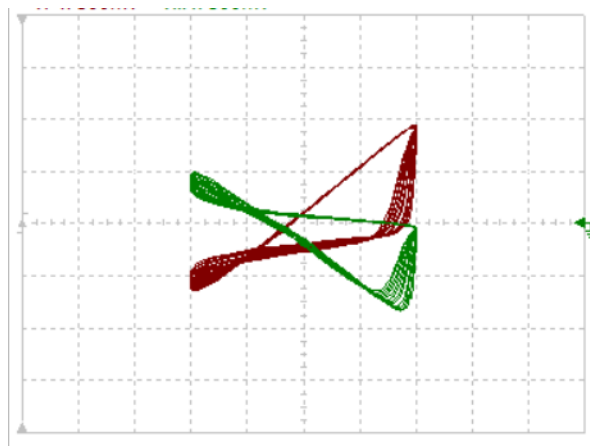
Εικόνα 4.17 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στον παλμογράφο

Επίσης στην παρακάτω εικόνα έχουμε απεικονίσει τη χαρακτηριστική μας σε άξονες για να μπορούμε να τη διακρίνουμε καλύτερα.

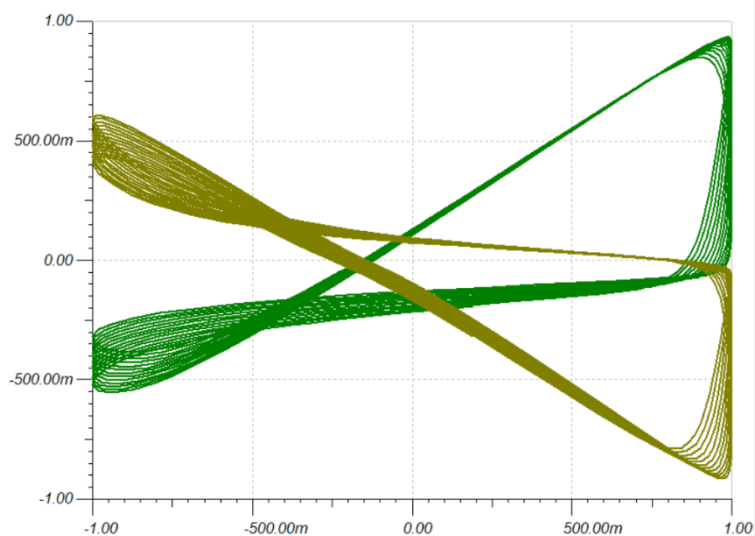


Εικόνα 4.18 – Ο ελκυστής του κυκλώματος σε άξονες

Πέρα από τις χαρακτηριστικές που αποτυπώσαμε προηγουμένως, προσθέσαμε ένα voltage pin στην έξοδο του κυκλώματος για να ελέγξουμε και σε εκείνη τη κατάσταση τι συμβαίνει. Η έξοδος του παλμογράφου αλλά και η αποτύπωση των γραφικών παραστάσεων σε άξονες φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 4.19 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στην είσοδο και στην έξοδο στον παλμογράφο



Εικόνα 4.20 – Οι ελκυστές του κυκλώματος στην είσοδο και στην έξοδο σε άξονες

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι το κύκλωμα της εξομοίωσης παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά. Αυτό διαπιστώνεται εύκολα με τις εικόνες που δείξαμε προηγουμένως και τους ελκυστές που δημιουργήθηκαν. Άλλωστε η εμφάνιση του χάους σε ένα κύκλωμα είναι άμεσα συνυφασμένη με την παρουσία ελκυστή. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι στα σημεία έλξης των ελκυστών δημιουργούν τροχιά και κάθε φορά είναι διαφορετική. Επίσης βλέπουμε ότι οι ελκυστές σαρώνουν ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών εντός ορίων λειτουργίας. Εάν αφήναμε το κύκλωμα να τρέχει για περισσότερη ώρα θεωρητικά θα κάλυπτε όλο το πεδίο τιμών στο οποίο λειτουργεί το κύκλωμα.

5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

Ανακεφαλαιώνοντας, οι στόχοι και οι απαιτήσεις που τέθηκαν για την παρούσα εργασία επιτεύχθηκαν σε γενικές γραμμές. Παρατηρήθηκε χαοτική συμπεριφορά και λήφθηκαν οι ζητούμενοι χαοτικοί ελκυστές και για το κύκλωμα που μελετήθηκε σε επίπεδο προσομοίωσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για την εξομοίωση του τελικού κυκλώματος δεν υπήρξαν ιδιαίτερες δυσκολίες και εμπόδια λόγω του ότι είχαν αναλυθεί εκτενέστερα όλα τα στοιχεία μεμονωμένα. Εκεί που υπήρξε μεγάλη δυσκολία ήταν για τον ενισχυτή διαγωγιμότητας (ΟΤΑ) τόσο στην κατανόηση όσο και στην πειραματική υλοποίησή του λόγω της ελλιπούς βιβλιογραφίας. Αρχικά έγινε προσπάθεια να υλοποιηθεί πειραματικά με τον LM3080 αλλά δεν ήταν εφικτό να τον δημιουργήσουμε στο TINA-TI. Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε τον CA3080 όπου έπειτα από πολλές προσομοιώσεις και πειράματα καταλήξαμε στο ότι δεν λειτουργεί ορθά το ολοκληρωμένο. Κύριος λόγος ήταν το γεγονός ότι υπήρχαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις οι θεωρητικές με τις πειραματικές τιμές. Συνεπώς καταλήξαμε στον LM13700 όπου μετά από προσομοιώσεις και πειράματα ο ενισχυτής λειτουργούσε χωρίς κανένα πρόβλημα. Ως πρόταση για μελλοντική εργασία θα μπορούσε να είναι η εξομοίωση του κυκλώματος σε επίπεδο υλοποίησης για πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα άλλη μια πρόταση για μελλοντική εργασία θα μπορούσε να είναι η μελέτη και ανάλυση περισσότερων κυκλωμάτων τα οποία παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά όπως επίσης να γίνει και η ενσωμάτωση του memristor σε ένα κύκλωμα Chua. Επιπρόσθετα να μπορέσουμε να επιτύχουμε έλεγχο μέσω του ρεύματος πόλωσης του ενισχυτή διαγωγιμότητας I_{abc} .

για να ελεγχθεί η ενίσχυση του και να λειτουργήσει το κύκλωμα του memristor σαν ένα μεταβλητό memristor. Τέλος θα μπορούσαμε να αυξομειώσουμε τις ενισχύσεις των τελεστικών ενισχυτών AD844 για την διαμόρφωση της μορφολογίας της χαρακτηριστικής του memristor.

Βιβλιογραφία

- Akhavan, A., Samsudin, A., & Akhshani, A. (2011, 10 01). A symmetric image encryption scheme based on combination of nonlinear chaotic maps. *Journal of the Franklin Institute*, σσ. 1797–1813.
- Baziliauskas, A., Tamasevicius, A., Bumeliene, S., & Lindberg, E. (2001, January). Synchronization of Chaotic Colpitts Oscillators. *Scientific Proceedings of Riga Technical University*, σσ. 55-57.
- Bishop, R. (2017). *Chaos*. The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Metaphysics Research Lab, Stanford University. Ανάκτηση 05 16, 2020
- BOUALI, S. (1999). FEEDBACK LOOP IN EXTENDED VAN DER POL'S EQUATION APPLIED TO AN ECONOMIC MODEL OF CYCLES. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, σσ. 745-756.
- Bozóki, Z. (1997, February). Chaos theory and power spectrum analysis in computerized cardiocography. *European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology*, σσ. 163–168.
- Brock, W. (1986, October). Distinguishing random and deterministic systems: Abridged version. *Journal of Economic Theory*, σσ. 168–195.
- Cartwright, J., Eguiluz, V., Hernandez-Garcia, E., & Piro, O. (1999). Dynamics of elastic excitable media. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, σσ. 2197–2202.
- Cartwright, M. (1960). Balthazar van der Pol. *Journal of the London Mathematical Society*, σσ. 367–376.
- Casdagli, M. (1991). Chaos and Deterministic versus Stochastic Non-linear Modelling. *Journal of the Royal Statistical Society*, σσ. 303–328.
- Chen, G., & Ueta, T. (1999). Yet another chaotic attractor. *Journal of Bifurcation and Chaos*, σσ. 1465-1466.
- Colpitts, E. H. (1918, February 1). *Oscillation generator*. Western Electric Co Inc.
- Crystal, I. (2004). Human Beings as Chaotic Systems. σ. 2.
- Dedieu, H., Kennedy, M. P., & Hasler, M. (1993, October). Chaos shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, σσ. 634-642.
- Diacu, F., & Holmes, P. (1996). *Celestial Encounters: The Origins of Chaos and Stability*. New Jersey: Princeton University Press.
- Eduardo, L., & Ruiz-Herrera, A. (2012). Chaos in discrete structured population models. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, σσ. 1200–1214.
- Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a New Science*. London.
- Gomory, R. (2010). Benoît Mandelbrot (1924–2010). *Nature*, σ. 378.
- Gottlieb, I. G. (1997). *Practical Oscillator Handbook*. US: Elsevier.
- Hadamard, J. (1898). Les surfaces à courbures opposées et leurs lignes géodesiques. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, σσ. 27–73.
- Hasselblatt, B., & Katok, A. (2003). *A First Course in Dynamics: With a Panorama of Recent Developments*. Cambridge University Press.
- Heidel, J., & Fu, Z. (1999). Non-chaotic behaviour in three-dimensional quadratic systems II. The conservative case. σ. 617.
- Holt, N. (2017). *Chaotic Cryptography: Applications of Chaos Theory to cryptography*. Rochester Institute of Technology.

- KAPITANIAK, T. (2000). *Chaos for engineers: theory, applications, and control*. New York: Springer.
- Kaplan, D., & Glass, L. (1995). *Understanding Nonlinear Dynamics*. New York: Springer-Verlag.
- Kellert, S. H. (1993). *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kennedy, M. P. (1994, November). Chaos in the Colpitts Oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, σσ. 771-774.
- Li, M., Huang, X., Liua, H., Liub, B., Wub, Y., Xiong, A., & Dong, T. (2013, October 25). Prediction of gas solubility in polymers by back propagation artificial neural network based on self-adaptive particle swarm optimization algorithm and chaos theory. *Fluid Phase Equilibria*, σσ. 11-17.
- Lorenz, E. N. (1962). Deterministic non-periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, σσ. 130–141.
- Matsumoto, T. (1984, December). A Chaotic Attractor from Chua's Circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, σσ. 1055–1058.
- Morbidelli, A. (2001). Chaotic diffusion in celestial mechanics . *Regular & Chaotic Dynamics*, σσ. 339–353.
- Nagumo, J., Arimoto, S., & Yoshizawa, S. (1962). An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IEEE*, σσ. 2061–2070.
- Nehmzow, U., & Walker, K. (2005, December). Quantitative description of robot–environment interaction using chaos theory. *Robotics and Autonomous Systems*, σσ. 177-193.
- Nguyen, N. M. (1991, April 22). *Monolithic microwave oscillators and amplifiers*. CA: Electronics Research Laboratory, University of California at Berkeley.
- Rössler, O. E. (1976). An Equation for Continuous Chaos. *Physics Letters*, σσ. 397–398.
- SPOTT, J. C. (2010). *Elegant chaos: algebraically simple chaotic flows*. New Jersey: World Scientific.
- Watts, R. G. (2007). *Global Warming and the Future of the Earth*. Morgan & Claypool.
- Yem, V. V., Thang, H. M., T.Quyet, B., & Journet, B. (2010, September). Design, Simulation And Synchronization of Two Identical Improved Chaotic Colpitts Oscillators for Wide Band Wireless Communication Systems. *The First International Workshop on Nonlinear Systems and Advanced Signal Processing*.