



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος

Διπλωματική Εργασία

Τεχνικές ψηφιακής μοντελοποίησης συστήματος ηχητικής  
παραμόρφωσης ηλεκτρικής κιθάρας

Δρακόπουλος Νικόλαος

Επιβλέπων καθηγητής: Ιωάννης Μουρτζόπουλος

Πάτρα, Ιούλιος 2020

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Τεχνικές ψηφιακής μοντελοποίησης συστήματος ηχητικής  
παραμόρφωσης ηλεκτρικής κιθάρας

Νικόλαος Δρακόπουλος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ιωάννης Μουρτζόπουλος

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χαράλαμπος Δημούλας

Πάτρα, Ιούλιος 2020

*Στον πατέρα μου*

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση και η αξιολόγηση υπαρχόντων μεθόδων ψηφιακής μοντελοποίησης χρονικά αμετάβλητων και μη γραμμικών ηχητικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, θα εξετασθεί ένας προενισχυτή ηλεκτρικής κιθάρας εταιρίας Ibanez, μοντέλου Tubescreamer (TS7). Ο συγκεκριμένος προενισχυτής παραμορφώνει τον ήχο της κιθάρας μέσω ζεύγους διοδίων ψαλιδισμού (clipping diodes), που έχει ως αποτέλεσμα τη μη γραμμικότητα του συστήματος, αφού μέσω της παραμόρφωσης εισάγεται σημαντικός αριθμός νέων αρμονικών.

Μελετήθηκαν οι παρακάτω μέθοδοι ψηφιακής μοντελοποίησης:

- Μέσω λογισμικού εξομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων τύπου Spice: Υλοποιείται και αναλύεται ψηφιακό ανάλογο του ηλεκτρονικού κυκλώματος του TS7
- Μέσω λογισμικού εξομοίωσης μη γραμμικών συστημάτων «Nebula3», εταιρίας «Acustica Audio»: Υλοποιείται ψηφιακό μοντέλο του TS7 με τις ενσωματωμένες λειτουργίες μοντελοποίησης του «Nebula3»
- Μέσω λογισμικού βασισμένο στο «WaveNet»: Χρησιμοποιείται υπάρχον μοντέλο του TS7 που έχει υλοποιηθεί από Φιλανδούς ερευνητές που βασίζεται στη χρήση νευρωνικών δικτύων

Οι αποκρίσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω εξομοιωμένα μοντέλα θα συγκριθούν σε σχέση με μετρήσεις που πάρθηκαν από το πραγματικό υλικό, δηλαδή τον προενισχυτή TS7.

## Λέξεις – Κλειδιά

Μη γραμμικά χρονικά αμετάβλητα (ΜΓΧΑ) συστήματα, Παραμόρφωση, Tubescreamer

# Digital modelling techniques on simulating electric guitar distortion

Nikolaos Drakopoulos

## Abstract

The purpose of this dissertation is to explore and evaluate existing methods of digital modeling of nonlinear, time invariable audio systems. Specifically, a Tubescreamer (TS7) model Ibanez electric guitar preamplifier will be measured and modeled via different methods. This particular preamplifier distorts the sound of the guitar through a pair of clipping diodes, which results in the non-linearity of the system, as a significant number of new harmonics are introduced.

The following digital modeling methods were studied:

- Via Spice Software Simulation Software: A digital analogue of TS7 electronic circuit was created and analyzed
- Through software simulation of non-linear systems “Nebula3”, created by company “Acustica Audio”: A digital model of TS7 was created with the integrated modeling functions of “Nebula3”
- “WaveNet”-based software: An existing model of TS7 created by Finnish researchers was used, based on neural networks

The response derived from the various simulated models will be compared to the measured response of the original hardware (TS7).

## Keywords

Non-linear time invariant systems, Distortion, Tubescreamer

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Περιεχόμενα .....	7
Κατάλογος Εικόνων .....	10
Κατάλογος Πινάκων .....	16
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια.....	17
1. Εισαγωγή.....	1
2. Εισαγωγή στην παραμόρφωση ηλεκτρικής κιθάρας.....	2
3. Το Tubescreamer.....	4
3.1. Εισαγωγή στο Tubescreamer .....	4
3.2. Προδιαγραφές υλικού (hardware) TS7 .....	5
3.3. Παρουσίαση κυκλώματος TS7.....	6
3.3.1 Αναγνώριση επί μέρους κυκλωμάτων στο σχηματικό διάγραμμα .....	7
3.3.2 Κύκλωμα τροφοδοσίας .....	8
3.3.3 Κύκλωμα επιλογής (Switch) και παράκαμψης (Bypass) .....	9
3.3.4 Buffer εισόδου.....	11
3.3.5 Στάδιο Παραμόρφωσης (Gain Stage) .....	11
3.3.6 Στάδιο διαμόρφωσης συχνότητας και στάθμης .....	17
3.3.7 Buffer εξόδου .....	19
3.4. Διαδικασία μετρήσεων υλικού TS7 .....	21
3.5. Αποτελέσματα μετρήσεων .....	24
3.5.1 Απόκριση συχνότητας.....	24
3.5.2 Ανάλυση πρώτων αρμονικών ανά συχνότητα (REW).....	25
3.6. Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων μετρήσεων .....	29
3.6.1 Δημιουργία σημάτων διέγερσης.....	30
3.6.2 Δημιουργία σημάτων εξόδου .....	32
3.6.3 Μέτρηση αποτελεσμάτων .....	33

3.6.4	Αποτελέσματα μετρήσεων .....	38
3.7.	Φασματική απεικόνιση για σήμα εισόδου ημίτονο 150Hz .....	39
3.8.	Κυματομορφές για σήμα εισόδου 150Hz .....	40
4.	Δημιουργία μοντέλου Spice .....	42
4.1	Μεταγραφή κυκλώματος.....	42
4.2	Στάθμη σήματος ηλεκτρικής κιθάρας στο LTSpice.....	45
4.3	Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση .....	46
5.	Μοντέλο TS7 με χρήση λογισμικού Nebula sampler .....	49
5.1	Θεωρητικό υπόβαθρο .....	49
5.1.1	Δημιουργία μοντέλου TS7 σε Nebula Sampler (NAT3).....	49
5.1.2	Προετοιμασία λογισμικού.....	50
5.1.3	Επιλογή κατάλληλου preset .....	52
5.1.4	Μελέτη σημάτων διαδικασίας Nebula Sampling.....	56
5.1.5	Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση.....	57
6.	Μοντέλο TS7 με χρήση Deep Learning τεχνικών .....	62
6.1	Θεωρητικό υπόβαθρο .....	62
6.2	Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση .....	65
7.	Σύγκριση μοντέλων λογισμικού.....	68
7.1	Επιλογή πειραματικών σημάτων .....	68
7.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	69
7.2.1	Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης .....	69
7.2.2	Στάθμη Total Harmonic Distortion (THD) .....	71
7.2.3	Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 82Hz .....	73
7.2.4	Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 330Hz .....	75
7.2.5	Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 1.319Hz .....	77
7.3	Εκτίμηση αποτελεσμάτων .....	79



8. Συμπεράσματα .....	80
8.1 Μοντέλο LTSpice .....	80
8.2 Μοντέλο Nebula3 .....	80
8.3 Μοντέλο WaveNet .....	81
Βιβλιογραφικές αναφορές .....	82
Παράρτημα Α – Προδιαγραφές κάρτας ήχου Focusrite Saffire Pro24 .....	85
Παράρτημα Β – Λίστες υλικών TS7 .....	86
Παράρτημα Γ – Ηλεκτρονικά διαγράμματα TS7 .....	90

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3-1 Διάφορα μοντέλα Tubescreamer ανά εποχή. Στα δεξιά φαίνεται το μοντέλο TS7, που θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία (Guitar Verdict, Πρόσβαση 26 Νοεμβρίου 2019)4	
Εικόνα 3-2 Μηχανισμός ToneLok, με τα ποτενσιόμετρα TONE και LEVEL στην θέση που δεν επιτρέπει αλλαγές, και το ποτενσιόμετρο DRIVE στη θέση που επιτρέπει .....5	5
Εικόνα 3-3 Διαδρομή σήματος κυκλώματος Tubescreamer..... 7	7
Εικόνα 3-4 Σχηματικό διάγραμμα TS808. Τα υποκυκλώματα εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα (Electrosmash, 2020) ..... 8	8
Εικόνα 3-5 Κύκλωμα τροφοδοσίας Tubescreamer (Electrosmash, 2020).....9	9
Εικόνα 3-6 Κύκλωμα bypass και switch Tubescreamer (Electrosmash, 2020)..... 10	10
Εικόνα 3-7 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο Input Buffer..... 11	11
Εικόνα 3-8 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο παραμόρφωσης..... 12	12
Εικόνα 3-9 Τυπική διάταξη μη αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή ..... 12	12
Εικόνα 3-10 Λεπτομέρεια σταδίου παραμόρφωσης TS7, με σημειωμένα τα Hi-Pass και Low-Pass φίλτρα ..... 13	13
Εικόνα 3-11 Ρυθμίσεις εξαγωγής λογαριθμικού ημιτόνου σάρωσης μέσω λογισμικού REW ..... 14	14
Εικόνα 3-12 Απόκριση συχνότητας κυκλώματος παραμόρφωσης TS7 για πολλαπλές τιμές VR1 ..... 15	15
Εικόνα 3-13 Συνολικό αρμονικό περιεχόμενο ανά συχνότητα κυκλώματος παραμόρφωσης TS7 για πολλαπλές τιμές VR1 ..... 15	15
Εικόνα 3-14 Φάσμα κυματομορφών διαφόρων τιμών VR1 (gain), για σήμα εισόδου 150Hz στάθμης -9dBFS, μέγεθος παραθύρου 4.096 ..... 16	16
Εικόνα 3-15 Προσομοίωση της στάθμης εξόδου σε volt (συνεχόμενες γραμμές) και φάσης σε μοίρες (διακεκομμένες γραμμές), σταδίου παραμόρφωσης TS7 ανά συχνότητα, για διάφορες τιμές VR1 (gain)..... 17	17

Εικόνα 3-16 Λεπτομέρεια σταδίου διαμόρφωσης συχνότητας και στάθμης TS7, με σημειωμένα το Low-Pass φίλτρο και τον παθητικό έλεγχο στάθμης. Το υπόλοιπα κύκλωμα είναι το ενεργό, μεταβαλλόμενο φίλτρο .....	18
Εικόνα 3-17 Προσομοίωση σταδίου διαμόρφωσης συχνότητας TS7, για διάφορες τιμές VR2 (tone).....	19
Εικόνα 3-18 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο buffer εξόδου.....	20
Εικόνα 3-19 Φωτογραφία εξωτερικής κάρτας ήχου Focusrite Saffire PRO 24 (Houghton, 2009) .....	21
Εικόνα 3-20 Μπλοκ διάγραμμα διαδικασίας μέτρησης TS7 μέσω λογισμικού REW.....	22
Εικόνα 3-21 Αποτύπωση ρυθμίσεων REW για τη διαδικασία της μέτρησης.....	23
Εικόνα 3-22 Αποκρίσεις συχνότητας συστήματος TS7 για διαφορετικές στάθμες εισόδου .....	24
Εικόνα 3-23 Εσωτερική διεργασία του REW, όπου $x(n)$ το σήμα διέγερσης, $y(n)$ το σήμα εξόδου, και $h(n)$ οι κρουστικές αποκρίσεις του συστήματος.....	25
Εικόνα 3-24 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -1dBFS.....	26
Εικόνα 3-25 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -3dBFS.....	26
Εικόνα 3-26 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -6dBFS.....	27
Εικόνα 3-27 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -9dBFS.....	27
Εικόνα 3-28 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -12dBFS.....	28
Εικόνα 3-29 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -15dBFS.....	28
Εικόνα 3-30 Στάθμες THD (Total Harmonic Distortion) για τις 6 διαφορετικές στάθμες εισόδου .....	29
Εικόνα 3-31 Ρυθμίσεις δημιουργίας log sine sweep μέσω λογισμικού Aurora plugins .....	31
Εικόνα 3-32 Ρυθμίσεις δημιουργίας log sine sweep μέσω λογισμικού REW .....	32
Εικόνα 3-33 Ενισχυμένο και ψαλιδισμένο ημίτονο στα αριστερά, και απλό ημίτονο στα δεξιά. Συχνότητα 1kHz .....	33

Εικόνα 3-34 Φασματική ανάλυση ψαλιδισμένου σήματος 1kHz μέσω λογισμικού Audacity .....	34
Εικόνα 3-35 Στάθμες θεμελιώδους συχνότητας και 7 πρώτων αρμονικών. Στο υπόμνημα φαίνονται οι σχετικές στάθμες dB relative των αρμονικών σε σχέση με τη στάθμη της θεμελιώδους συχνότητας.....	35
Εικόνα 3-36 Διαδικασία συνέλιξης σήματος εξόδου με το αντίστροφο φίλτρο του σήματος διέγερσης, με χρήση της εντολής Convolve with clipboard των Aurora plugins .....	36
Εικόνα 3-37 Κρουστικές αποκρίσεις όπως αυτές προέκυψαν από τη διαδικασία Convolve with clipboard των Aurora plugins. Στη μέση φαίνεται η απόκριση της θεμελιώδους συχνότητας, και στα αριστερά οι αποκρίσεις των αρμονικών .....	37
Εικόνα 3-38 Επιλογή μόνο πληροφορίας μίας κρουστικής απόκρισης, και Frequency Analysis για αυτήν. Μέτρηση στάθμης θεμελιώδους συχνότητας στο 1kHz, ίση με -46,9dB .....	38
Εικόνα 3-39 Φασματογραφήματα σήματος 150Hz μέσω TS7 για στάθμες εισόδου -1, -3, -6, -9, -12 και -15 dBFS .....	40
Εικόνα 3-40 Κυματομορφές σήματος TS7, 150Hz, για διάφορες στάθμες σήματος εισόδου .....	41
Εικόνα 4-1 Μοντέλο του TS7 σε λογισμικό LTSpice .....	44
Εικόνα 4-2 Κυματομορφή παλμογράφου για είσοδο ηλεκτρικής κιθάρας (Orman, 2002). Αν και δεν υπάρχει βαθμονόμηση στον κάθετο άξονα, ο ερευνητής καταγράφει μέγιστο Vpp ίσο με 1,2volt.....	45
Εικόνα 4-3 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου LTSpice, -6dBFS .....	46
Εικόνα 4-4 Καμπύλες απόκρισης μοντέλου LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλέ καμπύλη) .....	47
Εικόνα 4-5 Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη) .....	47
Εικόνα 4-6 Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας .....	48

Εικόνα 5-1 Οι ρυθμίσεις του NAT3 είναι διαθέσιμος από την επιλογή Settings -> Audio Settings.....	50
Εικόνα 5-2 Ρυθμίσεις λογισμικού NAT3 για τη διαδικασία μοντελοποίησης του TS7 .....	51
Εικόνα 5-3 Διάλογος επιλογής Nebula Instance, με επιλεγμένο το απλό Nebula3, και όχι το Nebula3 Reverb.....	52
Εικόνα 5-4 Ρυθμίσεις sampling που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του TS7..	53
Εικόνα 5-5 Παράθυρο διαλόγου NAT3 Sampler.....	54
Εικόνα 5-6 Διαδικασία μέτρησης NAT3, με αρχικό σήμα εξόδου 0dB .....	55
Εικόνα 5-7 Διαδικασία μέτρησης NAT3, με σήμα εξόδου -1dB.....	55
Εικόνα 5-8 Λεπτομέρεια σήματος διέγερσης όπως παράχθηκε από το NAT3.....	56
Εικόνα 5-9 Σύνολο κυματομορφής σήματος διέγερσης όπως παράχθηκε από το NAT3...	57
Εικόνα 5-10 Σήμα εξόδου διαδικασίας sampling μέσω NAT3, για τα δύο πρώτα ημίτονα σάρωσης.....	57
Εικόνα 5-11 Περιβάλλον Nebula3, με φορτωμένο το μοντέλο που δημιουργήθηκε από τον γραφών .....	58
Εικόνα 5-12 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου Nebula3, -6dBFS .....	59
Εικόνα 5-13 Καμπύλες απόκρισης μοντέλου Nebula3 (πράσινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη) .....	60
Εικόνα 5-14 Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου Nebula3 (πράσινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη) .....	60
Εικόνα 5-15 Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης Nebula3 (καφέ καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας .....	61
Εικόνα 6-1 Προτεινόμενο μοντέλο νευρωνικού δικτύου (Damskägg, Juvela, & Välimäki, 2019) .....	62
Εικόνα 6-2 Μπλοκ διάγραμμα μίας συνέλιξης .....	63

Εικόνα 6-3 Στιγμιότυπο οθόνης που δείχνει πως για ηχητικό σήμα διάρκειας ενός δευτερολέπτου, χρειάστηκαν 44 για την επεξεργασία του μέσω WaveNet.....	64
Εικόνα 6-4 Στιγμιότυπο οθόνης λογισμικού που δημιουργήθηκε μέσω JUCE-Visual Studio .....	64
Εικόνα 6-5 Καμπύλη απόκρισης μοντέλου WaveNet (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη).....	65
Εικόνα 6-6 Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου WaveNet (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη) .....	66
Εικόνα 6-7 Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης WaveNet (μπλε καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πορτοκαλί καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας .....	66
Εικόνα 6-8 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου WaveNet, -6dBFS.....	67
Εικόνα 7-1 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -3dBFS, 20Hz-20kHz.....	69
Εικόνα 7-2 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -6dBFS, 20Hz-20kHz.....	70
Εικόνα 7-3 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -9dBFS, 20Hz-20kHz.....	70
Εικόνα 7-4 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -3dBFS.....	71
Εικόνα 7-5 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -6dBFS.....	71
Εικόνα 7-6 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -9dBFS.....	72
Εικόνα 7-7 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	73
Εικόνα 7-8 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	73
Εικόνα 7-9 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	74
Εικόνα 7-10 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	75
Εικόνα 7-11 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	75

Εικόνα 7-12 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας .....	76
Εικόνα 7-13 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας.....	77
Εικόνα 7-14 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας.....	77
Εικόνα 7-15 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας.....	78
Εικόνα A-1 Χαρακτηριστικά εισόδων και εξόδων κάρτας ήχου Focusrite Saffire PRO 24, όπως φαίνονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή (Focusrite Audio Engineering).....	85
Εικόνα Γ-1 Ηλεκτρονικό διάγραμμα TS7 κατασκευαστή (Ibanez).....	90
Εικόνα Γ-2 Διάγραμμα πλακέτας TS7 κατασκευαστή , πάνω όψη (Ibanez).....	91
Εικόνα Γ-3 Διάγραμμα πλακέτας TS7 κατασκευαστή, κάτω όψη (Ibanez).....	91

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Προδιαγραφές κατασκευαστή για το TS7 (Ibanez).....	5
Πίνακας 2 Αντιστοίχιση τιμών θέσης wiper και αντιστάσεις στους δύο ακροδέκτες του ποτενσιόμετρου VR2 .....	19
Πίνακας 3 Αποτελέσματα μετρήσεων στάθμης θεμελιώδους συχνότητας και αρμονικών, με τρεις διαφορετικές μεθόδους.....	39
Πίνακας 4 Πίνακας αντιστοίχισης ψηφιακών σημάτων στάθμης dBFS, και μεταφραζόμενης στάθμης δυναμικού σε volt στο λογισμικό LTSpice .....	45
Πίνακας 5 Αντιστοίχιση χρωμάτων-καμπυλών .....	69
Πίνακας 6 Λίστα ηλεκτρονικών υλικών κύριας, κάτω πλακέτας (bottom PCB) (Ibanez) .	87
Πίνακας 7 Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας διακόπτη (function switch PCB) (Ibanez) .....	87
Πίνακας 8 Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας βύσματος εισόδου (input PCB) (Ibanez) .....	88
Πίνακας 9 Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας βύσματος εξόδου (output PCB) (Ibanez) .....	88
Πίνακας 10 Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας ποτενσιομέτρων (VR PCB) (Ibanez)	88
Πίνακας 11 Λίστα μηχανικών υλικών κατασκευαστή (Ibanez).....	89



## **Συντομογραφίες & Ακρωνύμια**

TS7 Ibanez Tubescreamer TS7

REW Room EQ Wizard

DAW Digital Audio Workstation (Ψηφιακός Σταθμός Επεξεργασίας Ήχου)

VST Virtual Studio Technology

## **1. Εισαγωγή**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται ένας προενισχυτής ηλεκτρικής κιθάρας σε μορφή πεταλιού, το Ibanez Tubescreamer TS7, ως προς τα γραμμικά και μη, ηχητικά χαρακτηριστικά του. Αναλύεται το ηλεκτρονικό του κύκλωμα ως προς τα επιμέρους μέρη του, και στη συνέχεια μελετάται η ηχητική απόκρισή του. Στη συνέχεια, μελετώνται μέθοδοι ψηφιακής μοντελοποίησης του TS7, με βάση τις οποίες δημιουργούνται ψηφιακά μοντέλα, των οποίων η απόκριση μετριέται, και συγκρίνεται με τον αρχικό εξοπλισμό.

Οι μετρήσεις του εξοπλισμού και των αντίστοιχων ψηφιακών μοντέλων, περιλαμβάνουν τις κρουστικές αποκρίσεις αυτών, καθώς και αρμονική ανάλυση για σήματα διέγερσης συγκεκριμένων συχνοτήτων.

## 2. Εισαγωγή στην παραμόρφωση ηλεκτρικής κιθάρας

Ο όρος «παραμόρφωση» τείνει να έχει αρνητική σημασία, αφού συνήθως αφορά μη επιθυμητά χαρακτηριστικά που εισάγονται στο σήμα από ένα ελαττωματικό σύστημα. Ακόμη και όταν αφορά ηχητικά συστήματα, ως επί το πλείστον είναι αρνητικό χαρακτηριστικό. Για παράδειγμα ένας τελικός ενισχυτής που οδηγείται στο όριο κέρδους (gain) που μπορεί να δώσει, αναπόφευκτα θα εισάγει παραμόρφωση στο σήμα, με το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα να υποφέρει.

Μπορεί όμως η παραμόρφωση ενός σήματος να είναι θεμιτή; Η ιστορία έχει δείξει πως ναι, ιδιαίτερα όταν αφορά στην αλυσίδα σήματος ενός μουσικού οργάνου. Η ελεγχόμενη παραμόρφωση μπορεί να αλλάξει σημαντικά τον ήχο ενός ηλεκτρικού οργάνου, προσφέροντας στο μουσικό νέα ηχοχρώματα να εξερευνήσει.

Πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ίσως, αυτό της ηλεκτρικής κιθάρας. Ένα όργανο που ξεκίνησε τη ζωή του τη δεκαετία του 1930, καλύπτοντας την ανάγκη ακουστικής ενίσχυσης της έντασής του, σε περιπτώσεις που το αντίστοιχο ακουστικό όργανο δεν αρκούσε.

Η τυπική αλυσίδα σήματος ηλεκτρικής κιθάρας είναι η εξής:

- Μουσικός: Διεγείρει τις μεταλλικές χορδές του οργάνου
- Ηλεκτρομαγνήτες: Μετατρέπουν την μηχανική κίνηση των μεταλλικών χορδών, σε ηλεκτρικό σήμα
- Ακουστικός ενισχυτής: Ενισχύει το σήμα που προκύπτει από τους μαγνήτες
- Ηχείο καμπίνας: Μετατρέπει το ενισχυμένο, ηλεκτρικό σήμα σε ακουστικό

Η ευφυΐα των πρωτοπόρων μουσικών ηλεκτρικών οργάνων, τους επέτρεψε να εισάγουν παραμόρφωση σε όλα τα σημεία της αλυσίδας. Το 1945, ο κιθαρίστας Barnard Junior σχεδίασε έναν υποτυπώδη μαγνήτη διπλού πηνίου (humbucker), ο οποίος έδινε σήμα εξόδου σημαντικά υψηλότερο σε σχέση με τους τυπικούς για την εποχή μονοπήνιους (single coil) (Anselmi, 2017). Ο νέος μαγνήτης, σε συνδυασμό με το εκρηκτικό παίξιμό του, με το οποίο συνήθιζε να σπάει τις χορδές τις κιθάρας, οδηγούσαν το κύκλωμα εισόδου του ενισχυτή σε παραμόρφωση.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1947, κυκλοφόρησε ο ενισχυτής κιθάρας Fender Super Amp, με ονομαστική ισχύ 18 Watt, ο οποίος με το κέρδος (gain) στο τέρμα, παραμόρφωνε το σήμα στο στάδιο της τελικής ενίσχυσης (Anselmi, 2017).

Το 1964, για την ηχογράφηση του “You Really Got Me” (Davies, 1964) των “The Kinks”, ο κιθαρίστας τους, Dave Davies, χρησιμοποίησε ηχείο καμπίνας κιθάρας του οποίου τον κώνο είχε κόψει σε διάφορα σημεία με κοπίδι (Buskin, 2009).

Επιπλέον της τυπικής αλυσίδας σήματος, άρχισαν να δημιουργούνται από ηλεκτρονικούς μηχανικούς της εποχής, προενισχυτές σήματος σε μορφή πεταλιού. Τοποθετούνται ανάμεσα στην κιθάρα και τον ενισχυτή, και επιτρέπουν επιπλέον έλεγχο του ήχου της κιθάρας. Από το 1962, ο Orville J. Rhodes είχε σχεδιάσει έναν τέτοιο προενισχυτή παραμόρφωσης τύπου “Fuzz”, που η εταιρία Gibson αργότερα πέρασε σε μαζική παραγωγή ως “Fuzz-Tone” (Anselmi, 2017). Το συγκεκριμένο πετάλι χρησιμοποιήθηκε στην ηχογράφηση του διάσημου “(I Can't Get No) Satisfaction” των “Rolling Stones” (Jagger & Richards, 1965).

Στη συνέχεια ο ήχος της παραμορφωμένης ηλεκτρικής κιθάρας ακούγεται όλο και συχνότερα στους δίσκους, τις τηλεοράσεις και τα ραδιόφωνα, αφού όλο και περισσότεροι μουσικοί τον χρησιμοποιούσαν, χαρακτηρίζοντας ολόκληρα κύματα μουσικής, με κυρίαρχο το Ροκ (Rock). Σε αυτό βοήθησε το πλήθος των νέων προενισχυτών που κατέκλυσε την αγορά, με κυκλώματα που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα, ένα από αυτά το Ibanez Tubescreamer, που κυκλοφορεί ακόμη και σήμερα, με ελάχιστες αλλαγές στο κύκλωμά του.

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί το εν λόγω πετάλι, ως προς τη διαμόρφωση που κάνει στον ήχο, τόσο στο συχνοτικό του περιεχόμενο, αλλά και το αρμονικό. Επιπλέον, θα γίνει σύντομη ανάλυση του ηλεκτρονικού του κυκλώματος, και ποια κομμάτια του είναι υπεύθυνα για ποιο κομμάτι διαμόρφωσης του ήχου του. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν διάφορες μέθοδοι ψηφιακής εξομοίωσης του.

### 3. Το Tubescreamer

#### 3.1. Εισαγωγή στο Tubescreamer

Το Tubescreamer κυκλοφόρησε πρώτη φορά το 1979, από την ιαπωνική εταιρία Maxon, με τον κωδικό OD808, βασισμένο σε κύκλωμα που σχεδίασε ο Susumu Tamura (Thompson, 2019). Την ίδια χρονιά, κυκλοφόρησε και από την εταιρία Ibanez, που αγόρασε τα δικαιώματα για την εκμετάλλευσή του, με τον κωδικό TS808. Με τα χρόνια επανακυκλοφόρησε με πολλούς διαφορετικούς κωδικούς, και ελάχιστες αλλαγές στο



**Εικόνα 3-1** Διάφορα μοντέλα Tubescreamer ανά εποχή. Στα δεξιά φαίνεται το μοντέλο TS7, που θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία (Guitar Verdict, Πρόσβαση 26 Νοεμβρίου 2019)

κύκλωμα, που κατά κύριο λόγο παρέμεινε ίδιο. Οι όποιες αλλαγές, εντοπίζονται στη χρήση διαφορετικών, παρεμφερών τιμών παθητικών (αντιστάσεις, πυκνωτές) και ενεργών (ολοκληρωμένα κυκλώματα, δίοδοι) (Keen, 1998) στοιχείων. Στη συνέχεια θα αναλυθεί το κύκλωμα του Ibanez Tubescreamer TS7, το οποίο αναφέρεται και ως ToneLok έκδοση, λόγω του χαρακτηριστικού μηχανισμού των ποτενσιόμετρων, που μπορούν να πιεστούν προς τα μέσα, στο επίπεδο του σασί, ώστε να είναι δύσκολη εκ παραδρομής αλλαγή τιμών των ποτενσιόμετρων.



Εικόνα 3-2 Μηχανισμός ToneLok, με τα ποτενσιόμετρα TONE και LEVEL στην θέση που δεν επιτρέπει αλλαγές, και το ποτενσιόμετρο DRIVE στη θέση που επιτρέπει

### 3.2. Προδιαγραφές υλικού (hardware) TS7

Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος από το οποίο αποτελείται το TS7.

Αρχικά εντοπίστηκαν στο site του κατασκευαστή, Ibanez, πληροφορίες σχετικές με το TS7, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω.

<b>SPECIFICATIONS</b>	
(0dBv = 1Vrms)	
Equivalent Input Noise ( Input Shorted)	< -60dBv (Effector SW:ON) Drive:Max, Tone:Max, Level:Max, Mode:TS9
Maximum Output Level	-20dBv Input=1KHz, -20dBv (Effect SW:Off) Drive:Min, Tone:Min, Level:Min, Mode:TS9
Controls	Drive, Tone, Level
Size (D x W x H)	125 x 75 x 53 (mm)
Weight	428 (g)
Power Requirement	Max 8mA, DC9V

Πίνακας 1 Προδιαγραφές κατασκευαστή για το TS7 (Ibanez)

Επιπλέον, στο Παράρτημα Α είναι διαθέσιμα (πάλι από το site του κατασκευαστή) τα:

- Λίστα ηλεκτρονικών υλικών ανά πλακέτα
- Λίστα μηχανικών υλικών
- Το ηλεκτρονικό διάγραμμα (schematic)
- Διαγράμματα πλακέτας

### 3.3. Παρουσίαση κυκλώματος TS7

Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση των μερών του κυκλώματος του TS7, και ανάλυση του πώς το κάθε ένα από αυτά, επηρεάζει το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα. Η ανάλυση και οι μετρήσεις γίνονται με βάση το μοντέλο σε LTSpice όπως αυτό αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

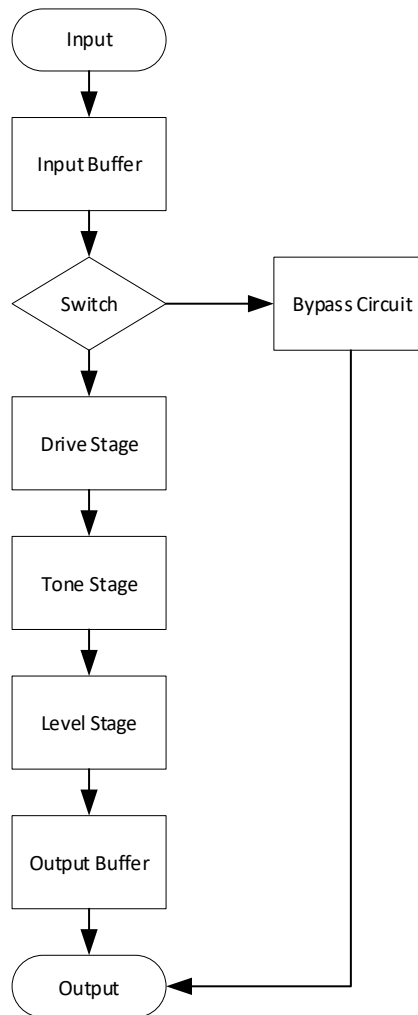
Τα επί μέρους κυκλώματα είναι τα εξής:

- Buffer σήματος εισόδου
- Στάδιο παραμόρφωσης (Drive)
- Στάδιο διαμόρφωσης συχνότητας (Tone) και στάθμης (Level)
- Buffer σήματος εξόδου

Το κύκλωμα επί πλέον αποτελείται από τα παρακάτω κυκλώματα, που όμως δεν επηρεάζουν το ηχητικό αποτέλεσμα, όταν το TS7 είναι σε κατάσταση λειτουργίας (ON), οπότε θα αναλυθούν επιφανειακά:

- Τροφοδοτικό
- Κύκλωμα επιλογής (Switch) και παράκαμψης (Bypass)

Η διαδρομή του σήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

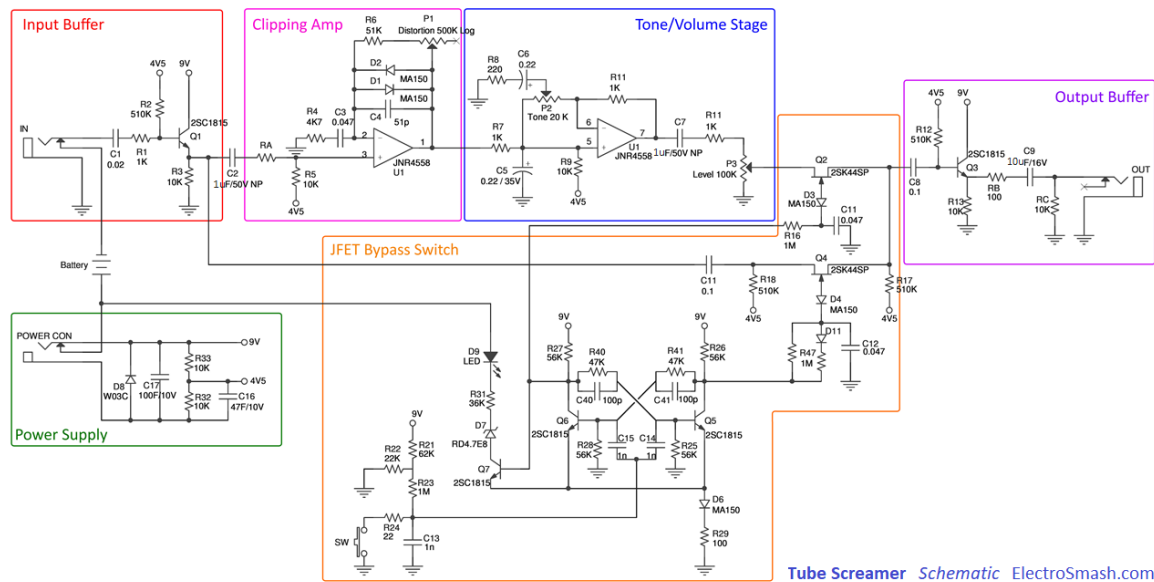


Εικόνα 3-3 Διαδρομή σήματος κυκλώματος Tubescreamer

### 3.3.1 Αναγνώριση επί μέρους κυκλωμάτων στο σχηματικό διάγραμμα

Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, τα διάφορα μοντέλα του Tubescreamer είναι πολύ παρεμφερή μεταξύ τους, και το γενικό σχηματικό διάγραμμα παραμένει κοινό μεταξύ τους, με ελάχιστες μεταβολές. Ακολουθεί το σχηματικό του TS808, με σημειωμένα τα διάφορα υποκυκλώματα. Το συγκεκριμένο διάγραμμα χωρίζεται πολύ πιο εύκολα σε λογικά διαμερίσματα, κάτι που δε ισχύει στο σχηματικό του κατασκευαστή. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαρρύθμιση του κατασκευαστή έχει χωρισμένα τα κυκλώματα όχι λογικά, αλλά όπως αυτά χωρίζονται στις διάφορες επί μέρους ηλεκτρονικές πλακέτες.



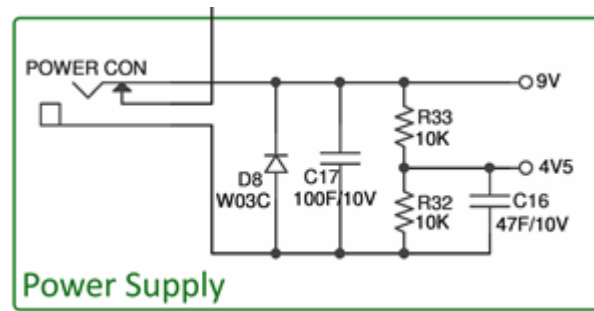


Εικόνα 3-4 Σχηματικό διάγραμμα TS808. Τα υποκυκλώματα εμφανίζονται με διαφορετικά χρώματα (Electrosmash, 2020)

Εκ πρώτης όψης παρατηρείται πως ακόμα και όταν το Tubescreamer είναι σε κατάσταση bypass, δεν υπάρχει απευθείας βραχυκύκλωμα των επαφών εισόδου και εξόδου, κάτι που περιγράφεται ως True Bypass. Συνήθως το True Bypass γίνεται με μηχανικό διακόπτη που δρομολογεί το σήμα είναι εντός, είτε εκτός κυκλώματος. Στην περίπτωση του TS7 το σήμα περνάει από τα στάδια εισόδου και εξόδου, καθώς και το κύκλωμα bypass, κάτι που εξηγεί το παράδοξο του ότι το κύκλωμα δεν μπορεί να κάνει bypass χωρίς τροφοδοσία ρεύματος.

### 3.3.2 Κύκλωμα τροφοδοσίας

Το TS7 χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία τάσης 9volt. Μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από μπαταρία τύπου PP3, κοινώς γνωστή ως «τούβλο», είτε από εξωτερικό τροφοδοτικό DC με βύσμα θηλυκό, κυλινδρικού τύπου. Οι δύο εισοδοί είναι μεταξύ τους παράλληλα συνδεδεμένες, και δεν υπάρχει διαφορά στη λειτουργία του κυκλώματος είτε γίνει χρήση της μίας, ή της άλλης εισόδου.



Εικόνα 3-5 Κύκλωμα τροφοδοσίας Tubescreamer (Electrosmash, 2020)

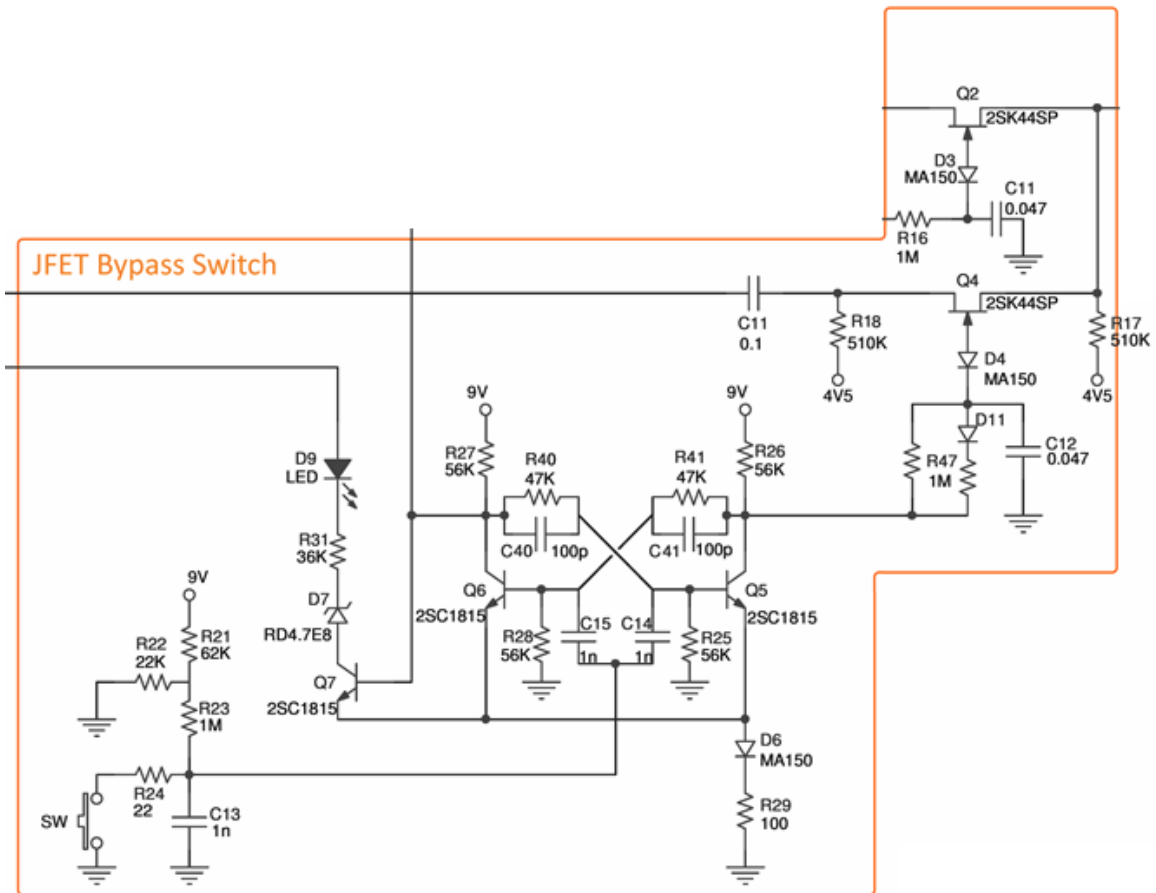
Το κύκλωμα περιέχει έναν διαιρέτη τάσης, και στις εξόδους του δίνει την τάση εισόδου 9volt, και τάση 4,5 volt για χρήση στα επιμέρους κυκλώματα.

Οι ανάγκες ρεύματος του κυκλώματος είναι χαμηλές, και μετρήθηκαν πειραματικά γύρω στα 4,5 με 5 mA, με θεωρητικό μέγιστο που δίνει ο κατασκευαστής στα 8mA.

### 3.3.3 Κύκλωμα επιλογής (Switch) και παράκαμψης (Bypass)

Η λειτουργία bypass του TS7 έχει υλοποιηθεί με τη χρήση 2 JFET τρανζίστορ, που επιλέγουν ηλεκτρονικά από ποια είσοδο θα δώσουν το σήμα στην είσοδο του buffer εξόδου. Η πρώτη είσοδος είναι η έξοδος του buffer εισόδου, και η δεύτερη είναι η έξοδος του σταδίου ενίσχυσης.

Όταν το ένα JFET άγει, το δεύτερο όχι, και ανάποδα. Ο χρήστης πατώντας τον ποδοδιακόπτη λειτουργίας (footswitch), ενεργοποιεί το κύκλωμα που εναλλάσσει μεταξύ των δύο εισόδων.



Εικόνα 3-6 Κύκλωμα bypass και switch Tubescreamer (Electrosmash, 2020)

Η χρήση τέτοιου τρόπου bypass έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Προβλέψιμη κατάσταση έναρξης: Όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται με ρεύμα, ξεκινάει πάντα σε κατάσταση bypass. Ο αντίστοιχος διακόπτης επιλογής είναι στιγμιαίας επαφής και όχι με κλείδωμα (latching), οπότε και το κύκλωμα δεν έχει μνήμη για την προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας
- Προσφέρει ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του κυκλώματος χωρίς θόρυβο: Τυπικά τα true bypass συστήματα, κατά τη μετάβασή τους από κατάσταση ON σε κατάσταση bypass και το ανάποδο, εισάγουν ένα δυνατό ήχο «ποπ» στην έξοδο του συστήματος, λόγω της απότομης αλλαγής δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των καταστάσεων ON και bypass.

Από την άλλη, το κύριο πλεονέκτημα ενός True Bypass συστήματος, είναι πως αφού το σήμα δεν περνάει από κάποιο κύκλωμα, δεν υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης αυτού. Σε περιβάλλοντα προενισχυτών κιθάρας, όπως είναι και το Tubescreamer, είναι σύνηθες να

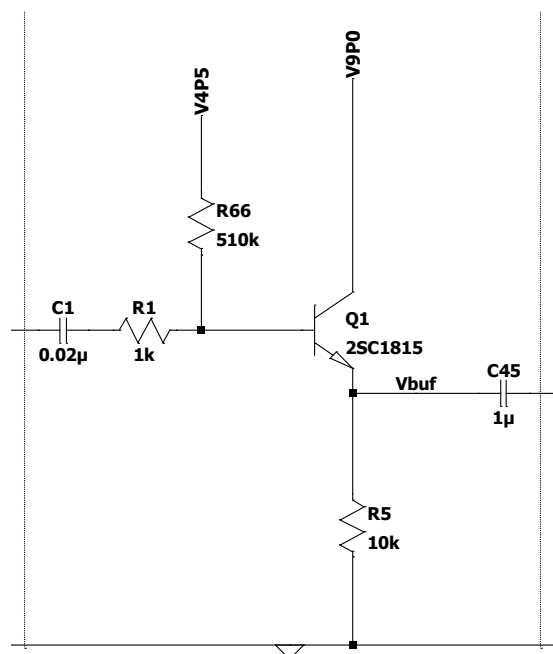
χρησιμοποιούνται σειριακά πολλά διαφορετικά συστήματα (overdrive, compressors, EQ κα), με το καθένα να προσθέτει τη δική του ελαφριά παραμόρφωση στην έξοδο του bypass του, με αποτέλεσμα το τελικό σήμα να αλλοιώνεται σημαντικά, αφού όποιες μικρές αλλοιώσεις, προστίθενται μεταξύ τους.

### 3.3.4 Buffer εισόδου

Τυπικά σε ενισχυτές τάσης, χρησιμοποιείται σύνθετη αντίσταση εισόδου πολύ μεγαλύτερη της σύνθετης αντίστασης εξόδου του συστήματος που συνδέουμε, και όχι πλήρους προσαρμογή των δύο (impedance matching) (Jaeger, 1997).

Σκοπός αυτού του σταδίου, είναι η δημιουργία υψηλής εμπέδησης (ή σύνθετη αντίσταση, impedance) για διατήρηση της ακεραιότητας του σήματος, αποφεύγοντας απώλειες στις υψηλές συχνότητες (Electrosmash, 2020).

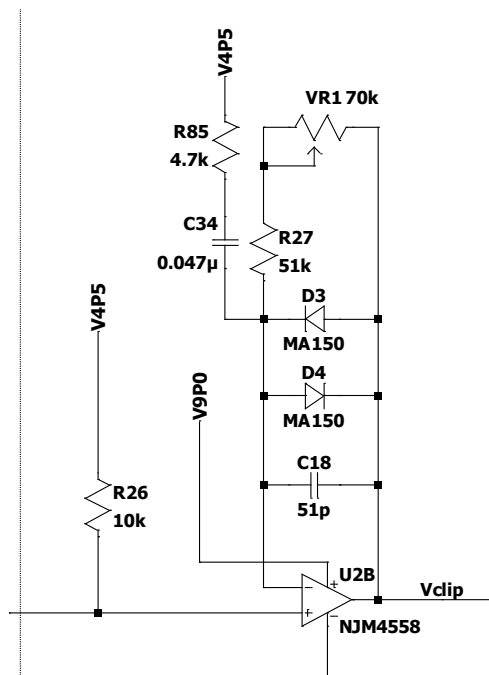
Δεν πραγματοποιείται κάποια ενίσχυση ή άλλη επεξεργασία στο σήμα.



Εικόνα 3-7 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο Input Buffer

### 3.3.5 Στάδιο Παραμόρφωσης (Gain Stage)

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η πιο δραματική διαμόρφωση του σήματος. Αποτελείται από πολλά στάδια όπως αναλύονται στη συνέχεια, με κύριο φαινόμενο την παραμόρφωση του σήματος μέσω των δύο παράλληλων διόδων ψαλιδισμού.

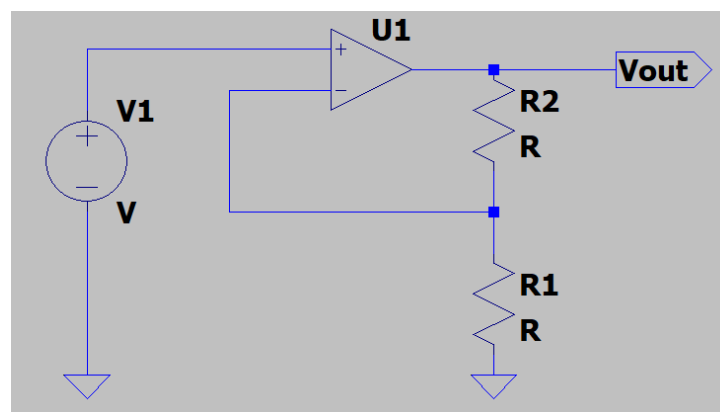


Εικόνα 3-8 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο παραμόρφωσης

Το στάδιο παραμόρφωσης μπορεί να αναλυθεί σε:

- Ενίσχυση/ψαλιδισμό
- Χαμηλοδιαβατό φίλτρο (low pass filter)
- Υψηλοδιαβατό φίλτρο (high pass filter)

Το κέρδος του μη αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή U2B ορίζεται από το λόγο των συνολικών αντιστάσεων που είναι συνδεδεμένο στην είσοδο του αρνητικού ακροδέκτη εισόδου, και την έξοδο του ενισχυτή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3-9 Τυπική διάταξη μη αναστρέφοντος τελεστικού ενισχυτή

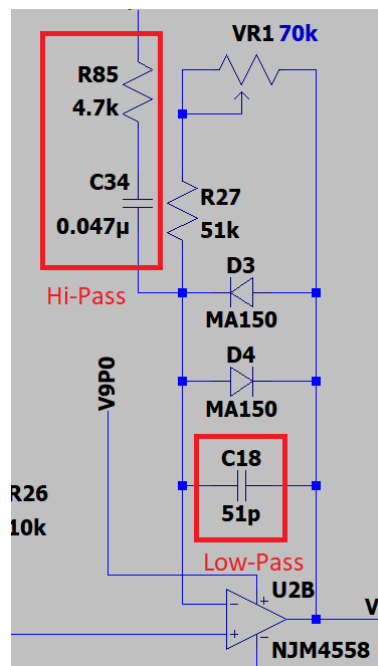
Συγκεκριμένα υπολογίζεται ως  $A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  (Jaeger, 1997)

Στην προκειμένη περίπτωση η συνολική αντίσταση R2 εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Την τιμή του ποτενσιόμετρου VR1 (gain)
- Τη συχνότητα (λόγω των φίλτρων)
- Την πολικότητα και τη στάθμη εισόδου του σήματος (λόγω των διόδων)

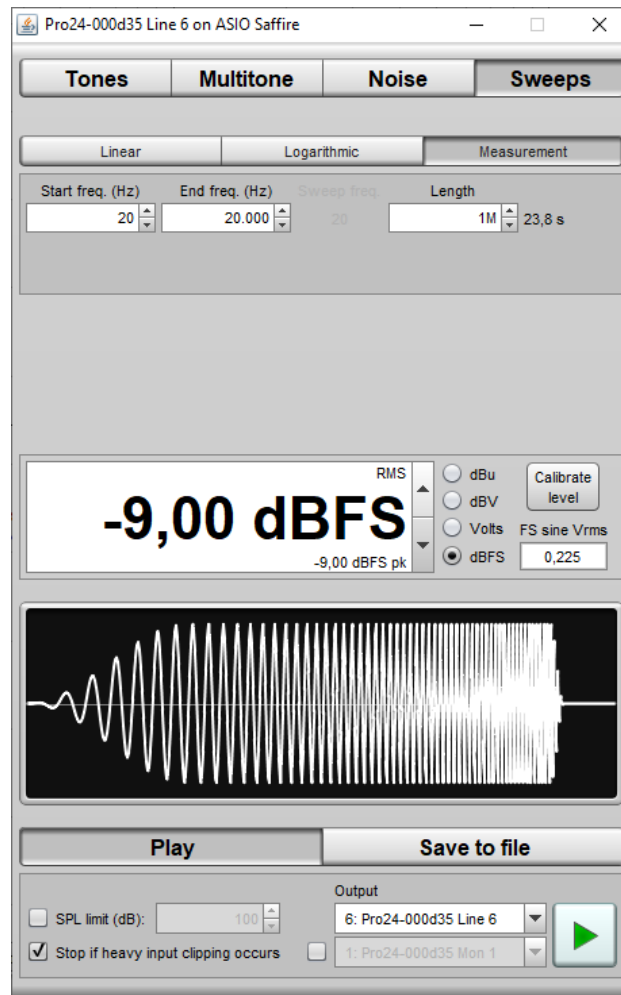
Στη συνέχεια θα αναλυθεί πειραματικά η επίδραση των τιμών του ποτενσιόμετρου VR1 στο τελικό σήμα.

Τα φίλτρα που αναφέρθηκαν νωρίτερα, φαίνονται σημειωμένα στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3-10 Λεπτομέρεια σταδίου παραμόρφωσης TS7, με σημειωμένα τα Hi-Pass και Low-Pass φίλτρα

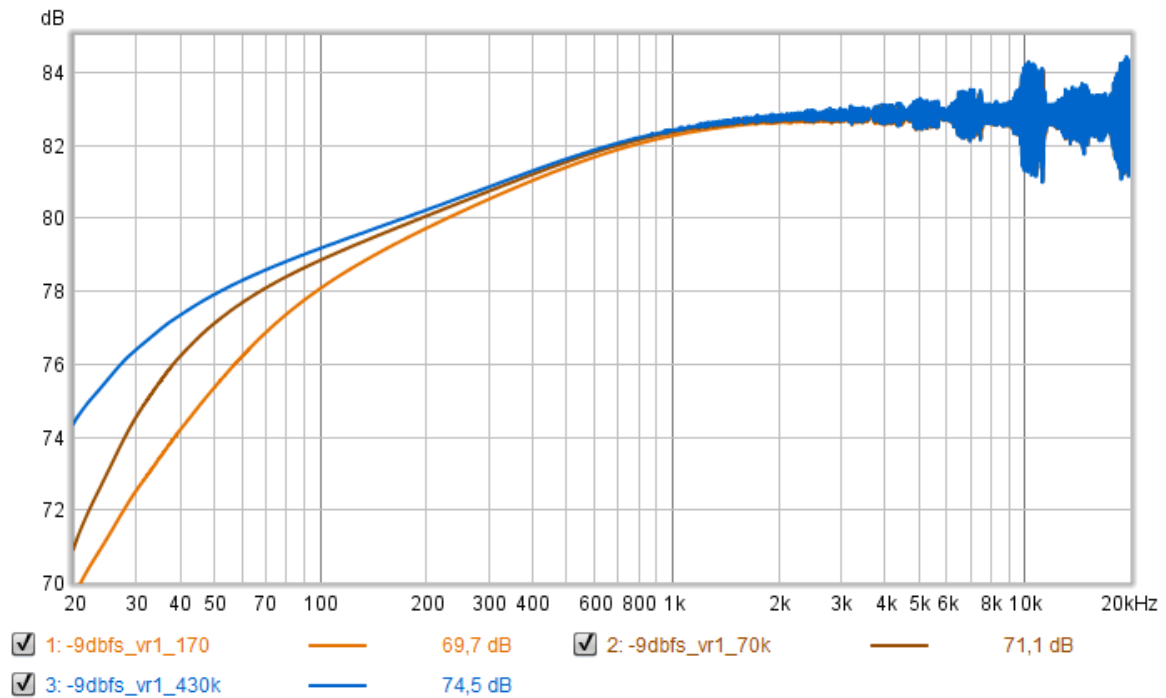
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αλλαγή στο μοντέλο του LTSpice, όπου η έξοδος του σταδίου παραμόρφωσης συνδέθηκε απευθείας με την είσοδο του buffer εξόδου. Πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα, όπου τροφοδοτήθηκε στο σύστημα το ίδιο αρχείο εισόδου: ένα ημίτονο λογαριθμικής σάρωσης, στάθμης -9dBFS, όπως αυτό παράχθηκε από το λογισμικό REW, αφού μεγαλύτερες τιμές στάθμης εισόδου οδηγούσαν την έξοδο σε ψαλιδισμό.



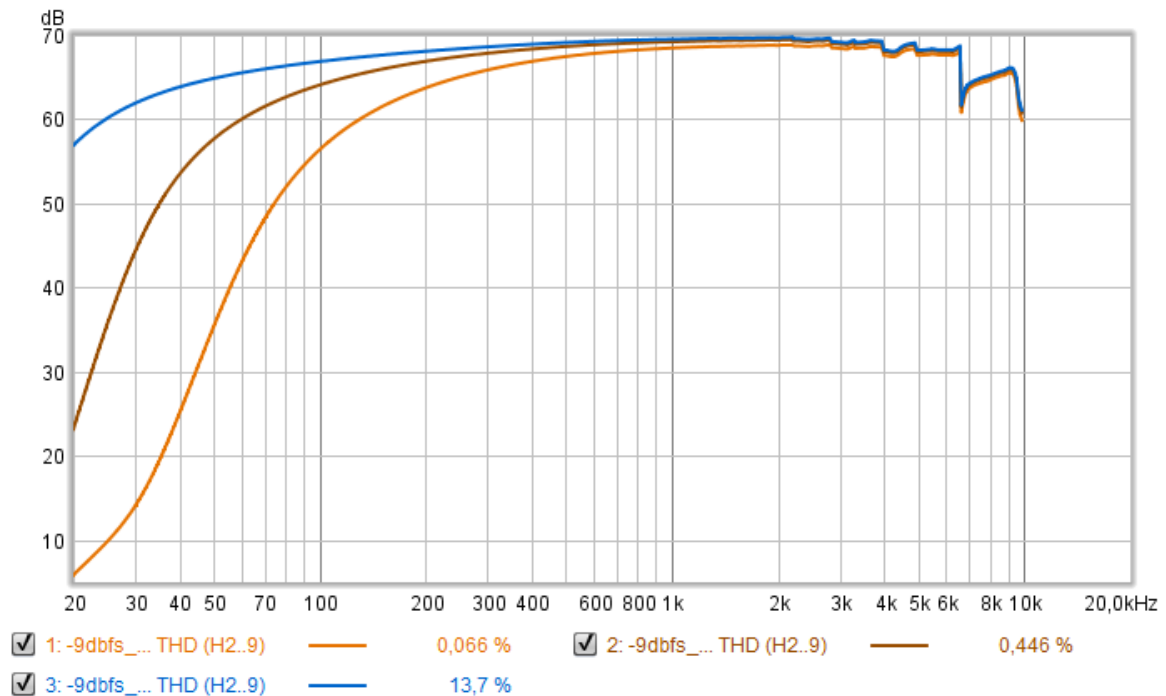
**Εικόνα 3-11 Ρυθμίσεις εξαγωγής λογαριθμικού ημιτόνου σάρωσης μέσω λογισμικού REW**

Στις τρεις περιπτώσεις, δόθηκε διαφορετική τιμή στο ποτενσιόμετρο VR1 (gain), συγκεκριμένα δόθηκαν τιμές που αντιστοιχούν στις θέσεις του ποτενσιόμετρου: ελάχιστη, μέγιστη, και στη μέση (δωδέκατη ώρα ρολογιού). Οι τιμές μετρήθηκαν πειραματικά, και είναι οι εξής:

- $R_{min} = 170\Omega$
- $R_{mid} = 70k\Omega$
- $R_{max} = 430k\Omega$



Εικόνα 3-12 Απόκριση συχνότητας κυκλώματος παραμόρφωσης TS7 για πολλαπλές τιμές VR1



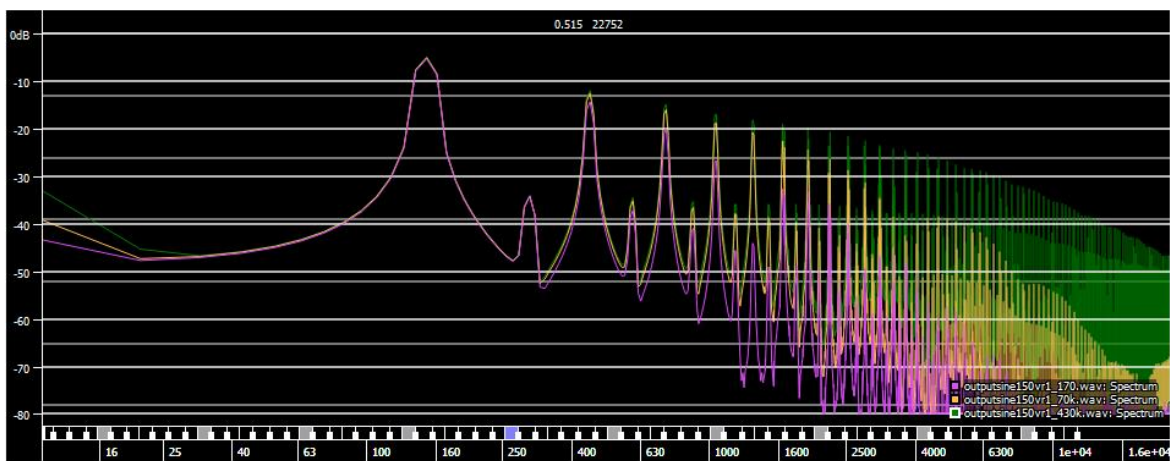
Εικόνα 3-13 Συνολικό αρμονικό περιεχόμενο ανά συχνότητα κυκλώματος παραμόρφωσης TS7 για πολλαπλές τιμές VR1

Παρατηρείται πως το αρμονικό περιεχόμενο, και η καμπύλη απόκρισης είναι σχεδόν πανομοιότυπες για υψηλές συχνότητες, πάνω από 1kHz. Η διαφορά που κάνει η παράμετρος



VR1 δείχνει να είναι στη στάθμη, αλλά και η συνολική παραμόρφωση που εφαρμόζει στις χαμηλές συχνότητες το στάδιο παραμόρφωσης. Όμως η παραπάνω ανάλυση σταματάει στα 10kHz. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν να πραγματοποιηθεί περαιτέρω ανάλυση μέσω μετασχηματισμού Fourier, που μπορεί να αποδώσει το αρμονικό περιεχόμενο και για τις ανώτερες αρμονικές.

Τροφοδοτήθηκε το κύκλωμα με απλό ημίτονο, στάθμης -9dBFS, Οι παραχθείσες κυματομορφές εισήχθησαν στο λογισμικό Sonic Visualiser, όπου έγινε αντιπαράθεση των φασμάτων τους, όπως φαίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 3-14 Φάσμα κυματομορφών διαφόρων τιμών VR1 (gain), για σήμα εισόδου 150Hz στάθμης -9dBFS, μέγεθος παραθύρου 4.096**

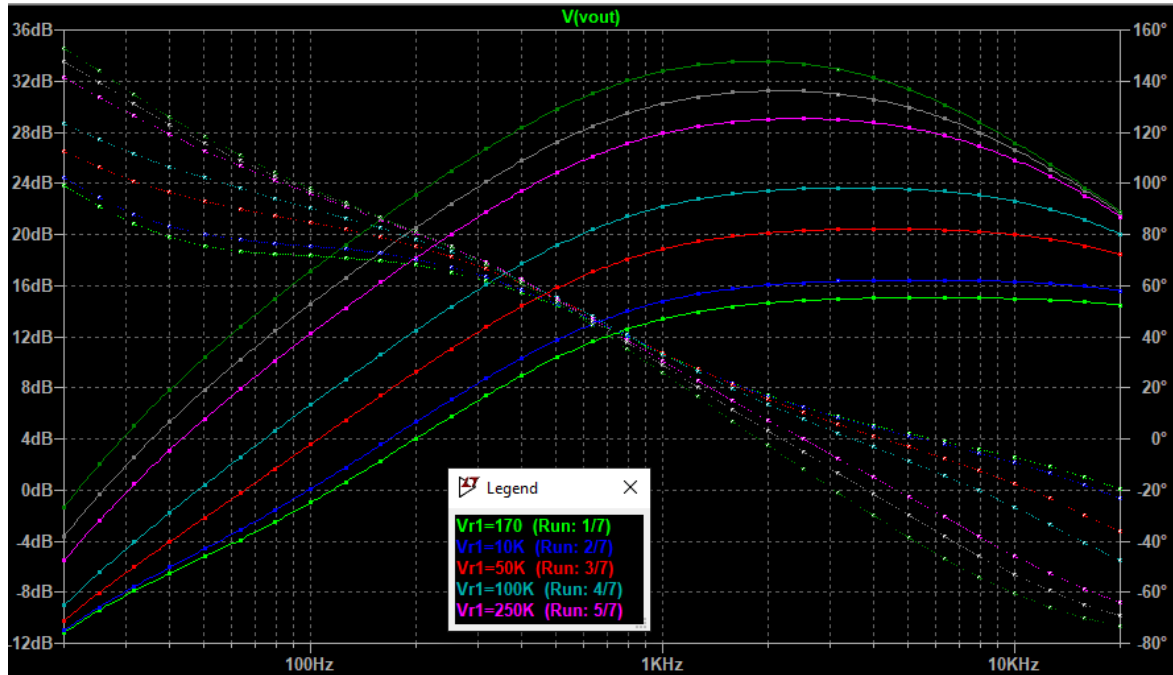
Παρατηρείται πως το αρμονικό περιεχόμενο σε κάθε περίπτωση τιμής VR1 (gain) είναι πολύ διαφορετικό, και ακολουθεί αυτό που θα περίμενε και ο χρήστης εμπειρικά: για μικρές τιμές VR1 (gain), χαμηλές στάθμες αρμονικών, και όσο ανεβαίνει η τιμή VR1 (gain) αύξηση των αρμονικών.

Αυτό στην πράξη μεταφράζεται στον κιθαρίστα ως εξής: μεγαλύτερο Gain, περισσότερη παραμόρφωση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως για τη στάθμη εισόδου -9dBFS, ακόμα και η χαμηλότερη δυνατή τιμή στο ποτενσιόμετρο VR1 (gain) δίνει πλούσιο αρμονικό περιεχόμενο.

Τέλος με τη βοήθεια του LTSpice, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ανάλυσης για εύρος συχνοτήτων 20Hz-20kHz και στάθμη εισόδου 0,5 volt, και διακριτές τιμές VR1 (σε Ohm) 170 10k 50k 100k 250k 350k 500k, το αποτέλεσμα της οποίας φαίνεται στο παρακάτω

σχήμα, όπου παρατηρείται και αύξηση της συνολικής στάθμης της καμπύλης απόκρισης, όσο μεγαλώνει η τιμή του VR1 (gain).



Εικόνα 3-15 Προσομοίωση της στάθμης εξόδου σε volt (συνεχόμενες γραμμές) και φάσης σε μοίρες (διακεκομμένες γραμμές), σταδίου παραμόρφωσης TS7 ανά συχνότητα, για διάφορες τιμές VR1 (gain).

### 3.3.6 Στάδιο διαμόρφωσης συχνότητας και στάθμης

Και αυτό το στάδιο χωρίζεται σε επί μέρους κυκλώματα/συμπεριφορές:

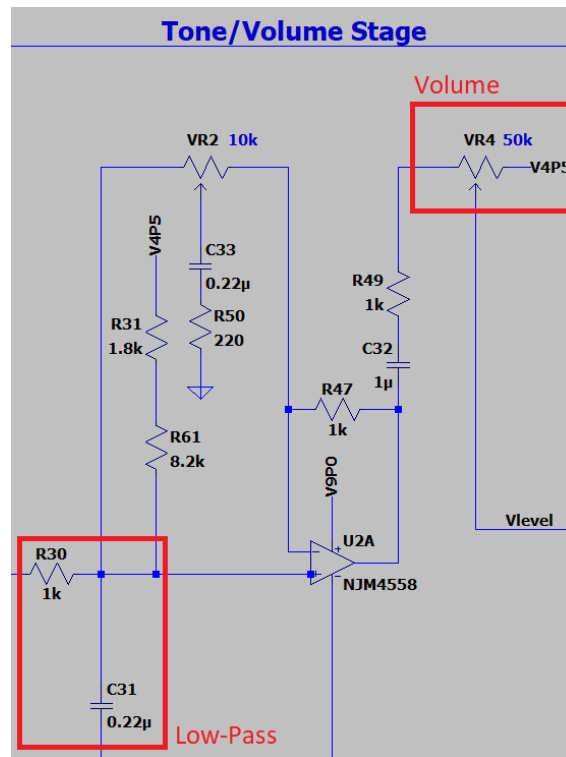
- Στατικό χαμηλοδιαβατό φίλτρο
- Ενεργό μεταβαλλόμενο φίλτρο VR2 (Tone)
- Παθητικά μεταβαλλόμενη στάθμη VR4 (volume)

Το χαμηλοδιαβατό φίλτρο στην είσοδο του κυκλώματος, είναι ένα απλό RC φίλτρο πρώτης τάξης, η συχνότητα αποκοπής του οποίου υπολογίζεται ως εξής (Πακτίτης, 2002):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi * 1k * 0m22\mu F} = 723,4Hz$$

Το οποίο έχει κλίση αποκοπής -6dB ανά οκτάβα (Πακτίτης, 2002). Το φίλτρο αυτό φροντίζει να κόβει τις πολύ υψηλές αρμονικές που παράγονται από το προηγούμενο στάδιο, που στο στάδιο σύστημα ενισχυτής/ηχείο της ηλεκτρικής κιθάρας, θα έδινε κακό ηχητικό αποτέλεσμα.

Το ποτενσιόμετρο VR4 απλώς μειώνει τη στάθμη του σήματος ανεξαρτήτως συχνότητας, αναλόγως την τιμή του. Δεν κάνει κάποια περαιτέρω επεξεργασία στο σήμα, οπότε και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Η χρήση του είναι στο να δίνει έλεγχο στο χρήστη για τη συνολική στάθμη του σήματος. Λειτουργεί μόνο αφαιρετικά, και δεν μπορεί να πραγματοποιήσει κάποιου είδους ενίσχυση.



Εικόνα 3-16 Λεπτομέρεια σταδίου διαμόρφωσης συχνότητας και στάθμης TS7, με σημειωμένα το Low-Pass φίλτρο και τον παθητικό έλεγχο στάθμης. Το υπόλοιπα κύκλωμα είναι το ενεργό, μεταβαλλόμενο φίλτρο

Η επίδραση του ενεργού, μεταβαλλόμενου φίλτρου θα αναλυθεί στη συνέχεια με τη βοήθεια του μοντέλου που έχει δημιουργηθεί στο LTSpice. Αφού δεν υπάρχει επιπλέον παραμόρφωση σήματος, δεν χρειάζεται αρμονική ανάλυση, παρά μόνο καμπύλη απόκρισης του συστήματος.

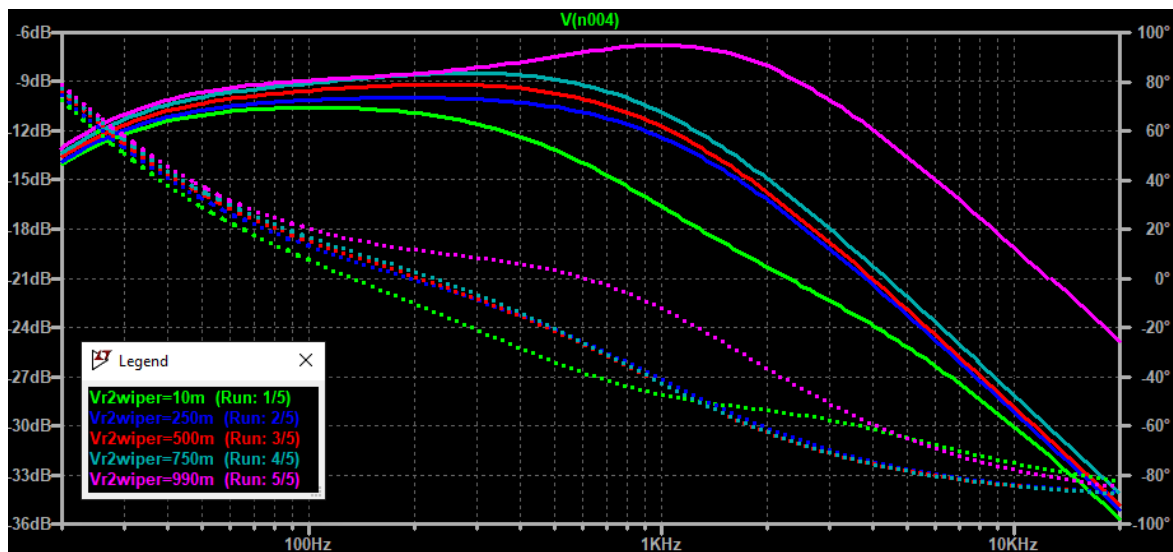
Αρχικά αφαιρείται από το μοντέλο το στάδιο της παραμόρφωσης, και πραγματοποιείται ac ανάλυση του κυκλώματος, για διάφορες τιμές VR2. Οι συνολική αντίσταση του ποτενσιόμετρου VR2 μετρήθηκε πειραματικά στα 17,4kOhm, με σημαντική διαφορά από τα 20kOhm που προδιαγράφει ο κατασκευαστής. Πραγματοποιήθηκε ac ανάλυση του κυκλώματος για συχνότητες 20Hz έως 20kHz, για στάθμη σήματος 0,5, για τις παρακάτω

τιμές wiper του ποτενσιόμετρου VR2, που αντιστοιχούν στις παρακάτω τιμές, για τους δύο ακροδέκτες του ποτενσιόμετρου:

Wiper position	R Left (kOhm)	R Right (kOhm)
0,01	0,17	17,25
0,25	4,36	13,07
0,5	8,71	8,71
0,75	13,07	4,36
0,99	17,25	0,17

Πίνακας 2 Αντιστοίχιση τιμών θέσης wiper και αντιστάσεις στους δύο ακροδέκτες του ποτενσιόμετρου VR2

Σημειώνεται πως μικρές τιμές wiper σημαίνουν πως το ποτενσιόμετρο είναι γυρισμένο στην τέρμα δεξιά θέση.



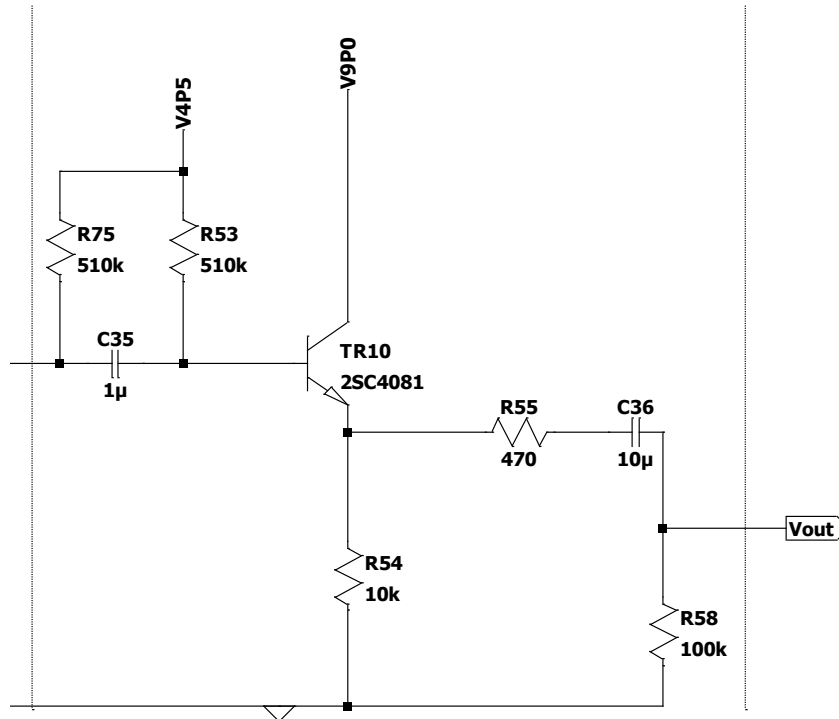
Εικόνα 3-17 Προσομοίωση σταδίου διαμόρφωσης συχνότητας TS7, για διάφορες τιμές VR2 (tone)

Παρατηρείται στο διάγραμμα πως το ποτενσιόμετρο λειτουργεί ένα μεταβλητό χαμηλοδιαβατό φίλτρο: όσο πιο αριστερά είναι στραμμένο το ποτενσιόμετρο, τόσο επιτρέπει τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων, ενώ όσο στρέφεται στα δεξιά, τόσο περιορίζει τη στάθμη των υψηλών συχνοτήτων.

### 3.3.7 Buffer εξόδου

Τέλος διακρίνουμε το κύκλωμα buffer εξόδου του TS7. Σκοπός του είναι η αντίστροφη διαδικασία του buffer εισόδου, να προετοιμάσει δηλαδή το σήμα για σωστή διασύνδεση με λοιπές συσκευές. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται το τρανζίστορ 2SC4081 ρυθμισμένο

με κέρδος ίσο με τη μονάδα, και χαμηλή εμπέδηση εξόδου. Δεν εφαρμόζεται κάποια άλλη επεξεργασία στο σήμα.



Εικόνα 3-18 Λεπτομέρεια κυκλώματος TS7, στάδιο buffer εξόδου

### 3.4. Διαδικασία μετρήσεων υλικού TS7

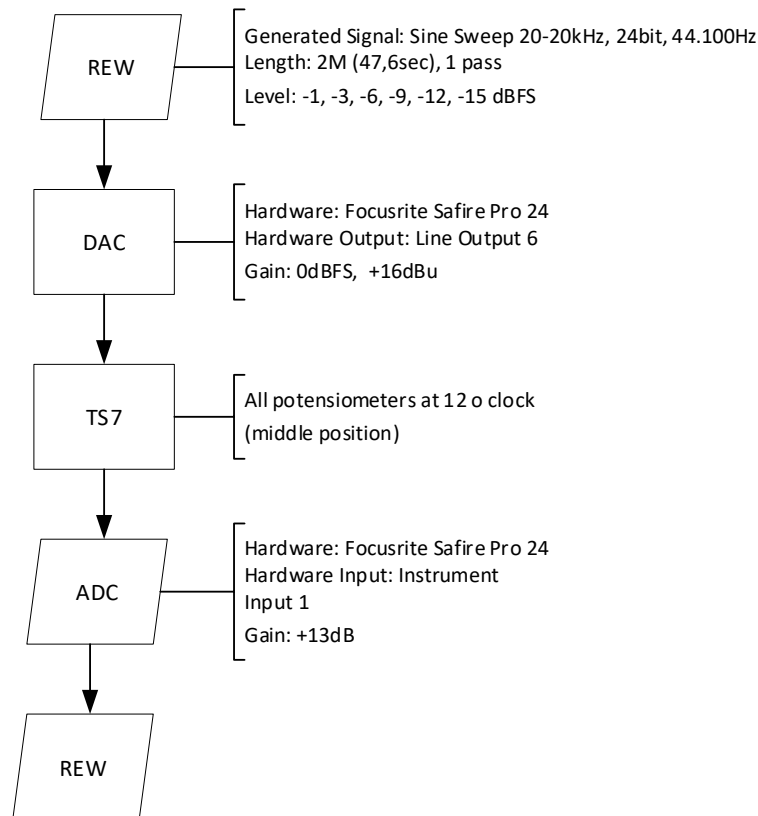
Για την μέτρηση των ηχητικών χαρακτηριστικών του TS7, χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο το λογισμικό REW, Room Eq Wizard (Mulcahy, n.d.), που επιτρέπει την αποτύπωση της απόκρισης συχνότητας του συστήματος, αλλά και τη στάθμη των πρώτων εννέα αρμονικών.

Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση κάρτας ήχου “Focusrite Saffire PRO 24”, σε περιβάλλον λειτουργικού συστήματος “Microsoft Windows 10”.



Εικόνα 3-19 Φωτογραφία εξωτερικής κάρτας ήχου Focusrite Saffire PRO 24 (Houghton, 2009)

Για της μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε σήμα Sine Sweep, που δημιουργήθηκε από το ίδιο λογισμικό (REW <https://www.roomeqwizard.com>). Η αναπαραγωγή του σήματος δρομολογήθηκε από την αναλογική έξοδο 6 της κάρτας ήχου, στο TS7, και από την έξοδο του TS7, στην αναλογική είσοδο 1 της κάρτας ήχου. Η είσοδος ρυθμίστηκε να λειτουργεί σε Instrument mode, δηλαδή είσοδο υψηλής εμπέδησης, που πειραματικά έδωσε υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio).



Εικόνα 3-20 Μπλοκ διάγραμμα διαδικασίας μέτρησης TS7 μέσω λογισμικού REW

Η έξοδος και η είσοδος ρυθμίστηκαν με κέρδος 0dB, αν και η είσοδος Instrument, στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή, φαίνεται να εισάγει ελάχιστο κέρδος +13dB.

Δημιουργήθηκε στο λογισμικό της κάρτας ήχου εσωτερική δρομολόγηση της εξόδου 6 στο εικονικό (virtual) κανάλι Loop Back 1, ώστε αυτό να αναπαράγει το ίδιο περιεχόμενο. Το κανάλι αυτό χρησιμοποιήθηκε στο REW ως Reference Input, και Timing reference για τις ανάγκες της διαδικασίας μέτρησης.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ημίτονο σάρωσης 20Hz-20kHz, με δειγματοληψία 44.100Hz.

Η στάθμη του σήματος εξόδου ρυθμίστηκε στις στάθμες -1, -3, -6, -9, -12, -15 dBFS.

Σε ότι αφορά το πετάλι, τα ποτενσιόμετρα του ρυθμίστηκαν στη μέση της διαδρομής τους, δηλαδή να «κοιτάζουν» στη δωδέκατη ώρα του ρολογιού. Ο διακόπτης MODE είναι στη θέση TS9, και όχι HOT.

The screenshot shows the 'Make a measurement' dialog box in REW. The 'Type' is set to 'SPL' and the 'Method' is 'Sweep'. The measurement name is '-3dbFS TS7'. The 'Settings' section shows a length of 2M and 1 repetition, resulting in a total time of 47.6 seconds. The 'Timing' is set to 'Use loopback as timing reference' with a 0.000 ms offset. The 'Protection' section has 'Abort if heavy input clipping occurs' checked and 'Abort above SPL limit' set to 100 dB. The 'Playback' section is set to 'From REW'. The 'Sample rate' is 44.1 kHz and the 'Delay' is 0 seconds. The 'Output' is '6: Pro24-000d35 Line 6', 'Sec. output' is '1: Pro24-000d35 Mon 1', 'Ref output' is '5: Pro24-000d35 Line 5', 'Ref input' is '15: Pro24-000d35 Loop 1', and 'Input' is '1: Pro24-000d35 IP 1'. The 'Level' is set to -3,00 dBFS (RMS) and the 'Range' is 20 to 20,000 Hz. A 'Ready to measure...' progress bar is at 0% and a small spectrum plot is visible at the bottom left.

Εικόνα 3-21 Αποτύπωση ρυθμίσεων REW για τη διαδικασία της μέτρησης



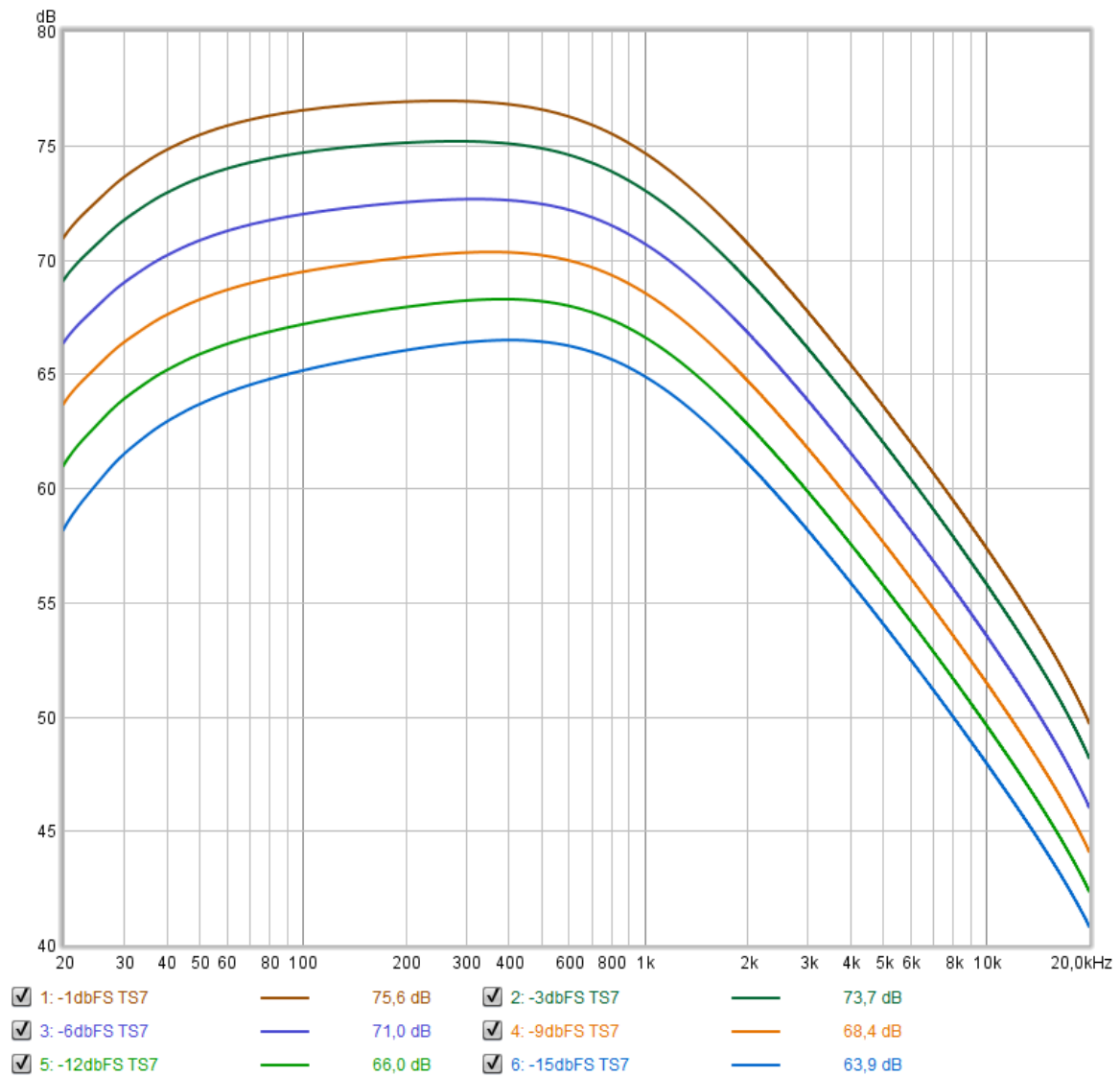
### 3.5. Αποτελέσματα μετρήσεων

Ακολουθούν αποτελέσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με το TS7.

#### 3.5.1 Απόκριση συχνότητας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απόκριση συχνότητας του συστήματος, για διάφορες στάθμες εισόδου. Παρατηρείται πως η μορφή της καμπύλης παραμένει κοινή, ανεξαρτήτως στάθμης εισόδου.

Το σύστημα εφαρμόζει ένα ελαφρύ mid boost φίλτρο στο σήμα, με κεντρική συχνότητα γύρω στα 300Hz.

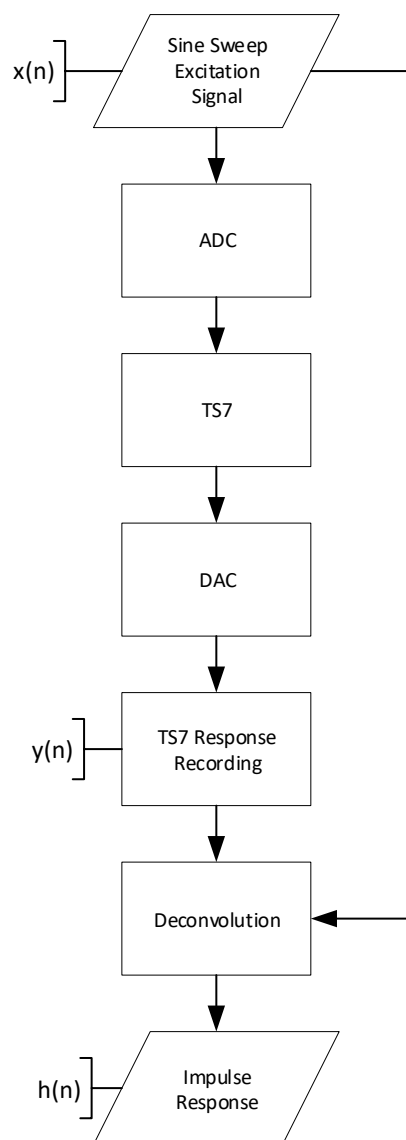


Εικόνα 3-22 Αποκρίσεις συχνότητας συστήματος TS7 για διαφορετικές στάθμες εισόδου

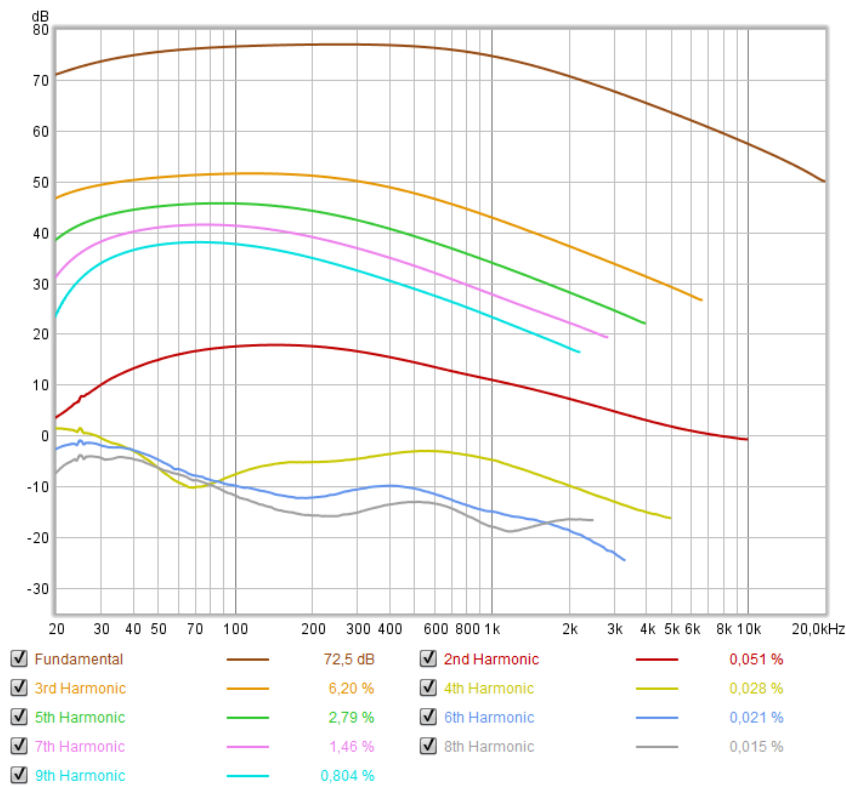
### 3.5.2 Ανάλυση πρώτων αρμονικών ανά συχνότητα (REW)

Στη συνέχεια ακολουθούν οι αναλύσεις παραμόρφωσης (distortion) όπως αυτές παρουσιάζονται από το λογισμικό REW, στο επίπεδο της συχνότητας.

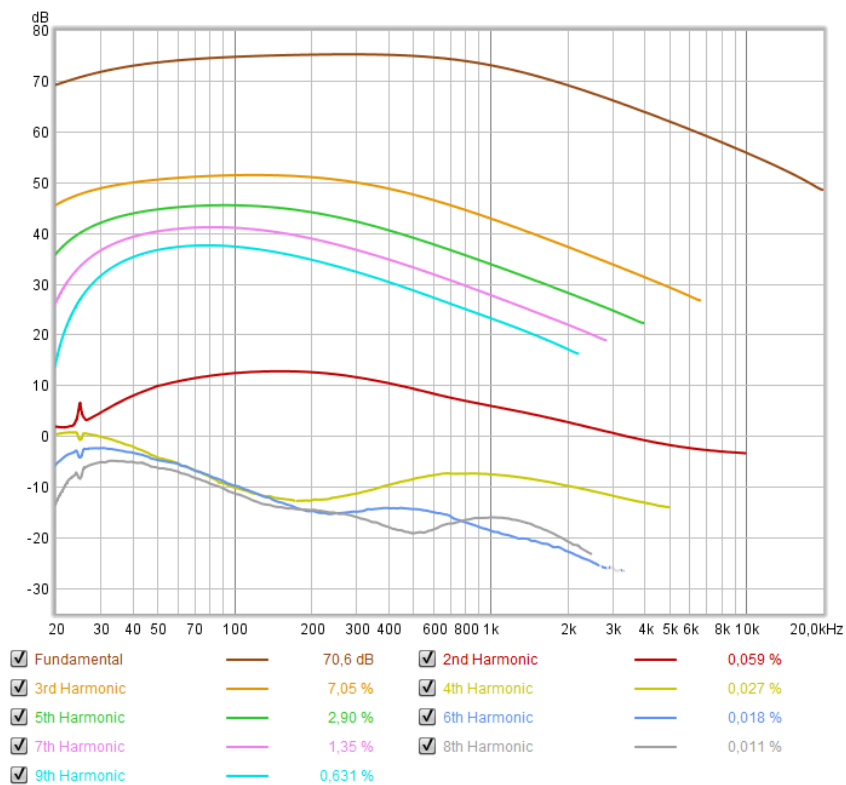
Το λογισμικό περιορίζεται στην ανάλυση των πρώτων εννέα αρμονικών, συνεπώς η ανάλυση αυτή δεν είναι ικανή να χαρακτηρίσει πλήρως το σύστημα, μιας και ο συνολικός αριθμός των αρμονικών μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Μας δείχνει όμως τις στάθμες των αρμονικών και πως αυτές επηρεάζονται ανά συχνότητα.



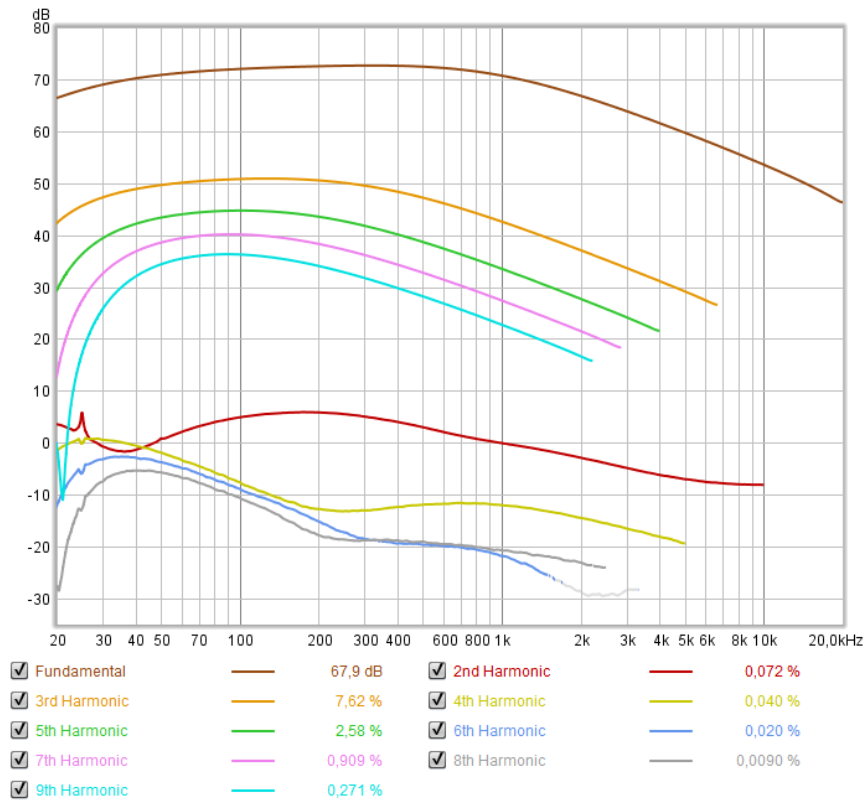
Εικόνα 3-23 Εσωτερική διεργασία του REW, όπου  $x(n)$  το σήμα διέγερσης,  $y(n)$  το σήμα εξόδου, και  $h(n)$  οι κρουστικές αποκρίσεις του συστήματος



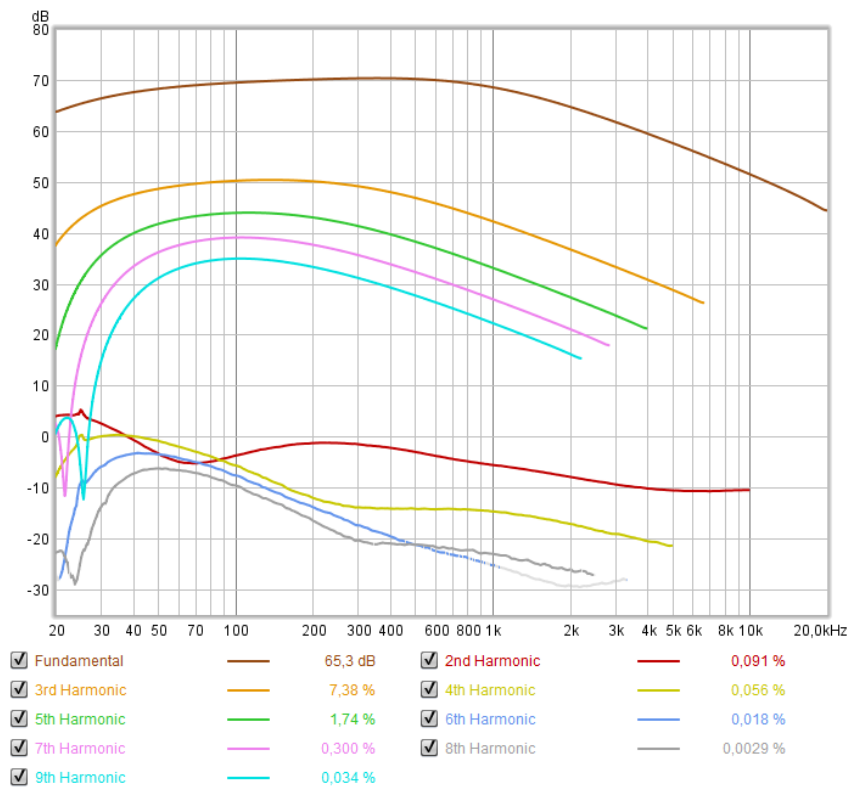
Εικόνα 3-24 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -1dBFS



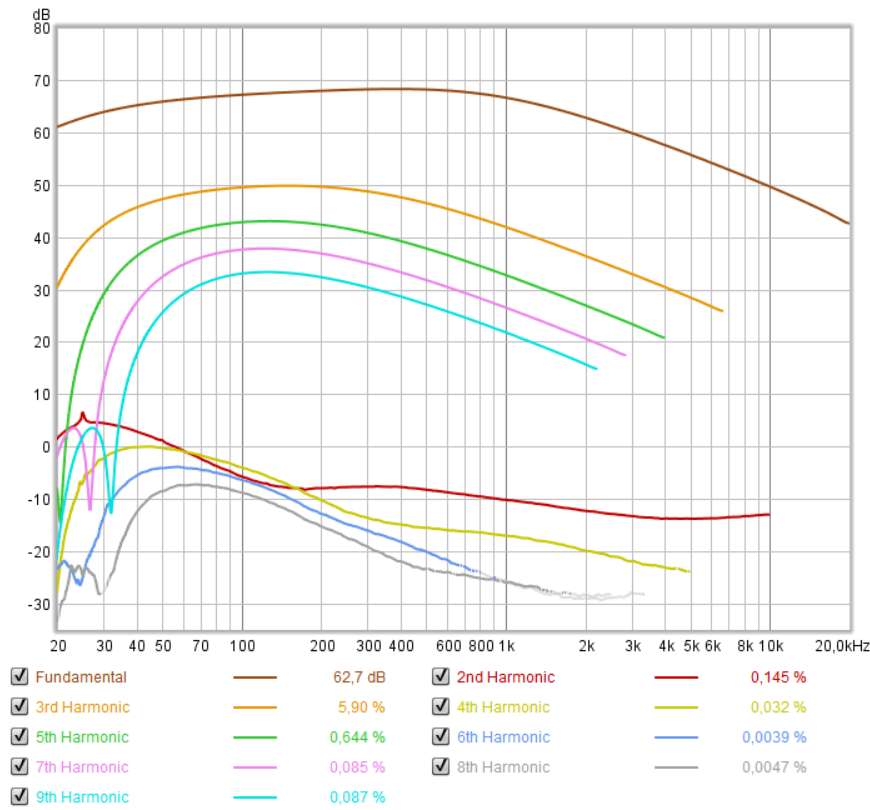
Εικόνα 3-25 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -3dBFS



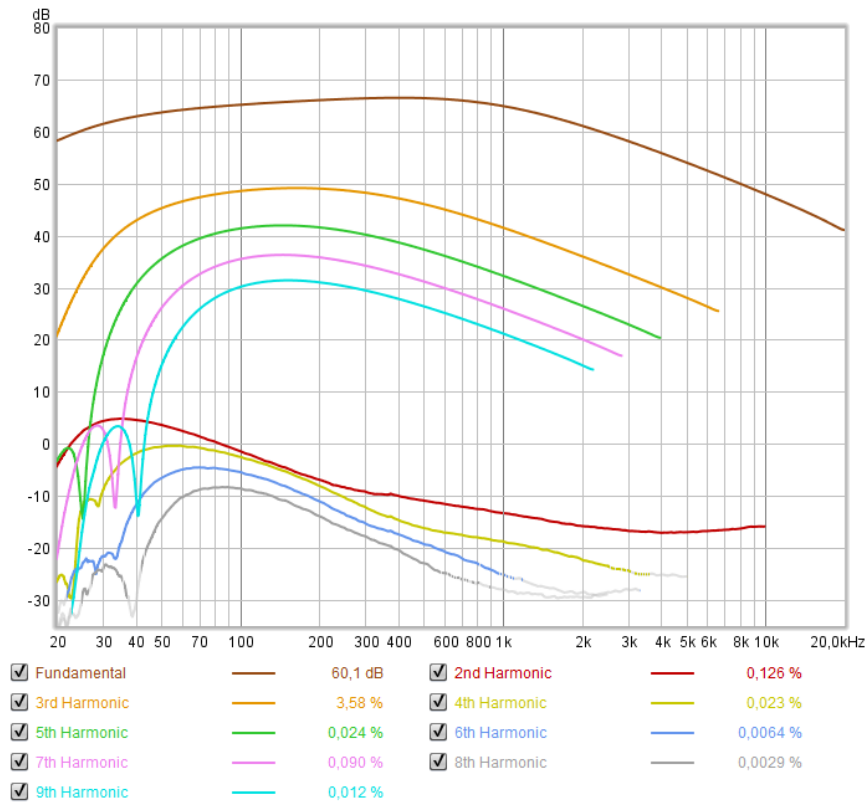
Εικόνα 3-26 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -6dBFS



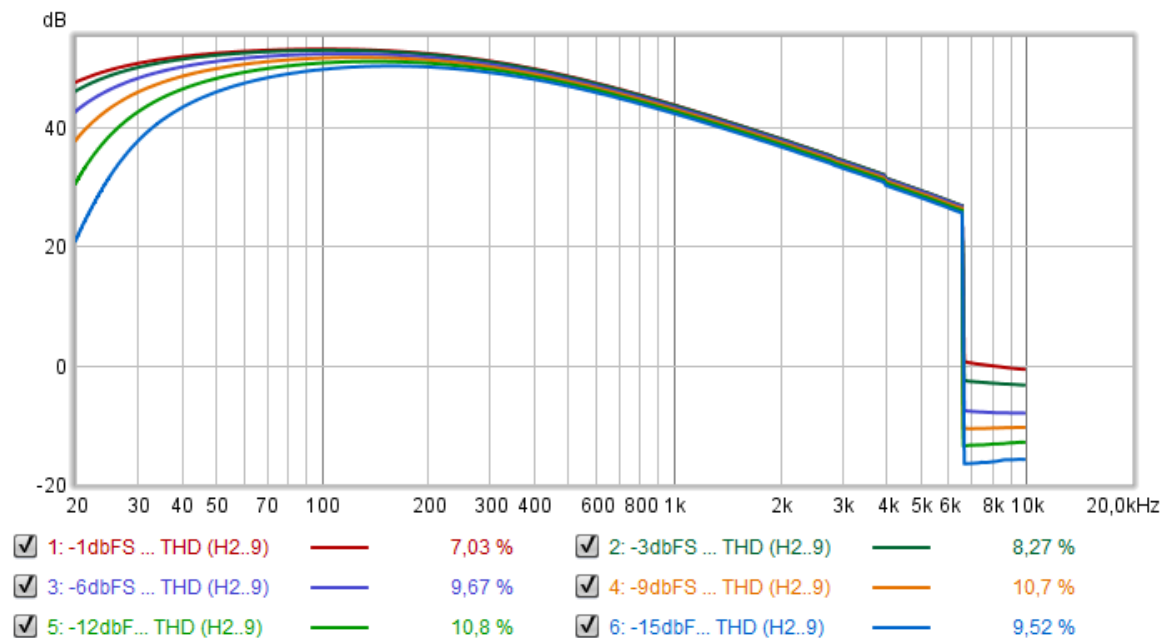
Εικόνα 3-27 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -9dBFS



Εικόνα 3-28 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -12dBFS



Εικόνα 3-29 Στάθμες εννέα πρώτων αρμονικών, για σήμα εισόδου -15dBFS



Εικόνα 3-30 Στάθμες THD (Total Harmonic Distortion) για τις 6 διαφορετικές στάθμες εισόδου

Σε όλες τις περιπτώσεις στάθμης σήματος εισόδου, παρατηρείται μεγάλη στάθμη στις μονές αρμονικές (τρίτη, πέμπτη, έβδομη και ένατη) και σημαντικά μικρότερη στις ζυγές.

Η συχνότητα στην οποία παρατηρείται μέγιστη στάθμη των μονών αρμονικών είναι γύρω στα 150HZ, συχνότητα για την οποία θα γίνει επιπλέον αρμονική ανάλυση.

### 3.6. Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων μετρήσεων

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η απόδειξη πως οι μετρήσεις των στάθμεων των πρώτων αρμονικών που προκύπτουν από το λογισμικό REW που χρησιμοποιήθηκε, είναι ίδιες με αυτές που μετρούνται και με άλλες μεθόδους.

Οι μετρήσεις που αποτυπώθηκαν μέσω του λογισμικού REW, βασίζονται σε δουλειά του ερευνητή Angelo Farina, ο οποίος το 2000 περιέγραψε πρώτη φορά πειραματική διαδικασία, με χρήση της οποίας ένα σήμα λογαριθμικού ημιτόνου, μπορεί να δώσει εκτός από την καμπύλη απόκρισης του προς μέτρηση συστήματος (γραμμικά χαρακτηριστικά), και πληροφορίες σχετικά με το πλήθος και τις στάθμες τυχόν αρμονικών που εισάγονται από αυτό (μη γραμμικότητα) (Farina, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, 2000). Ο ίδιος ανέπτυξε λογισμικό, με όνομα Aurora plugins, που τρέχει πάνω στο λογισμικό Adobe Audition, που επιβεβαιώνει πειραματικά τη δυνατότητα, και ακρίβεια, τέτοιων μετρήσεων.

Στη συνέχεια θα προσομοιωθεί ένα μη γραμμικό σύστημα, εφαρμόζοντας ψαλιδισμό σήματος σε συγκεκριμένη στάθμη. Θα μετρηθούν οι στάθμες των πρώτων αρμονικών που παράγει το σύστημα σε συγκεκριμένη συχνότητα, με τρεις τρόπους:

- Με την ημι-αυτόματη διαδικασία που περιγράφει ο Farina με τα δικά του εργαλεία – Aurora plugins (sine sweep)
- Με την αυτόματη διαδικασία του REW (sine sweep)
- Χειροκίνητη μέτρηση των στάθμων των αρμονικών, χρησιμοποιώντας το φασματογράφημα του σήματος (sine)

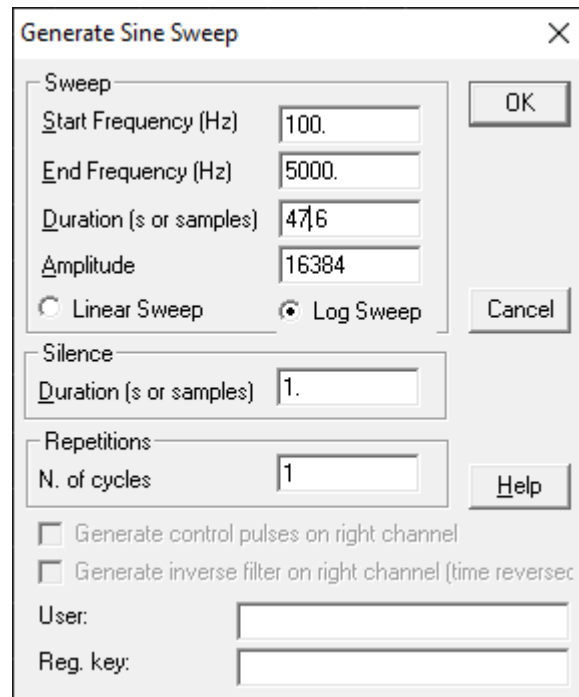
Ως σημείο αναφοράς, θα χρησιμοποιηθούν οι στάθμες που καταγράφηκαν από τη χειροκίνητη μέτρηση του απλού ημιτόνου.

Επαναλαμβάνοντας το πείραμα που έκανε ο ίδιος ο Farina, θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες παράμετροι, δηλαδή:

- Όλες οι FFT αναλύσεις έγιναν με παράθυρο τύπου Hanning, με μέγεθος παραθύρου 4096 δείγματα
- Σήμα εισόδου: λογαριθμική σάρωση ημιτόνου (log sine sweep) μεταξύ 100Hz και 5kHz.

### **3.6.1 Δημιουργία σημάτων διέγερσης**

Χρησιμοποιώντας την εντολή Generate Sine Sweep του Aurora plugins, δημιουργήθηκε το σήμα εισόδου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3-31 Ρυθμίσεις δημιουργίας log sine sweep μέσω λογισμικού Aurora plugins

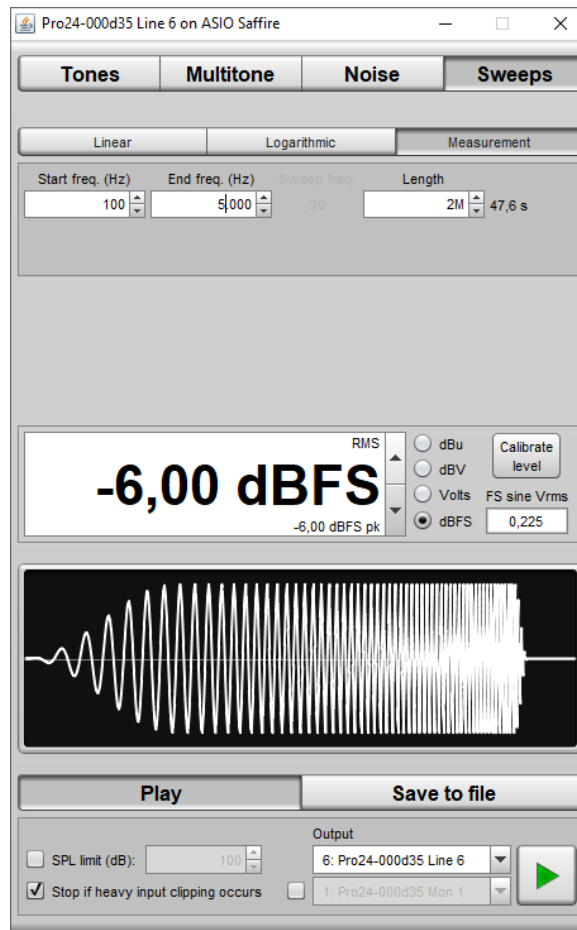
Η στάθμη παρέμεινε στην default ρύθμιση, που αντιστοιχεί σε -6dBFS, ενώ η διάρκεια ρυθμίστηκε στα 47,6sec, τιμή που αντιστοιχεί ακριβώς σε αντίστοιχη παράμετρο στο REW.

Κατά τη δημιουργία του sine sweep, αυτόματα δημιουργείται και το αντίστροφο φίλτρο αυτού, που προκύπτει από την αντιστροφή του χρόνου στο αρχικό σήμα διέγερσης, με ένα φίλτρο μείωσης στάθμης 6dB/οκτάβα, που ξεκινάει στα 0dB και τελειώνει στο

$-6 * \log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$  (Farina, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, 2000).

Στην πλευρά του REW, δημιουργήθηκε το αντίστοιχο σήμα, χρησιμοποιώντας τις ρυθμίσεις όπως φαίνονται παρακάτω:





Εικόνα 3-32 Ρυθμίσεις δημιουργίας log sine sweep μέσω λογισμικού REW

Τα παραγόμενα WAV αρχεία είναι ελαφρώς διαφορετικά, καθώς το REW εισάγει επιπλέον πληροφορία στην αρχή και το τέλος του log sine sweep, που βοηθούν στο συγχρονισμό μεταξύ του σήματος διέγερσης και του σήμα μέτρησης, κάτι που το Aurora plugins αγνοεί. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, δεν θα υπάρξει καμία καθυστέρηση στο σήμα μέτρησης, οπότε και η επιπλέον αυτή πληροφορία δεν θα έχει κάποια σημασία στις μετρήσεις.

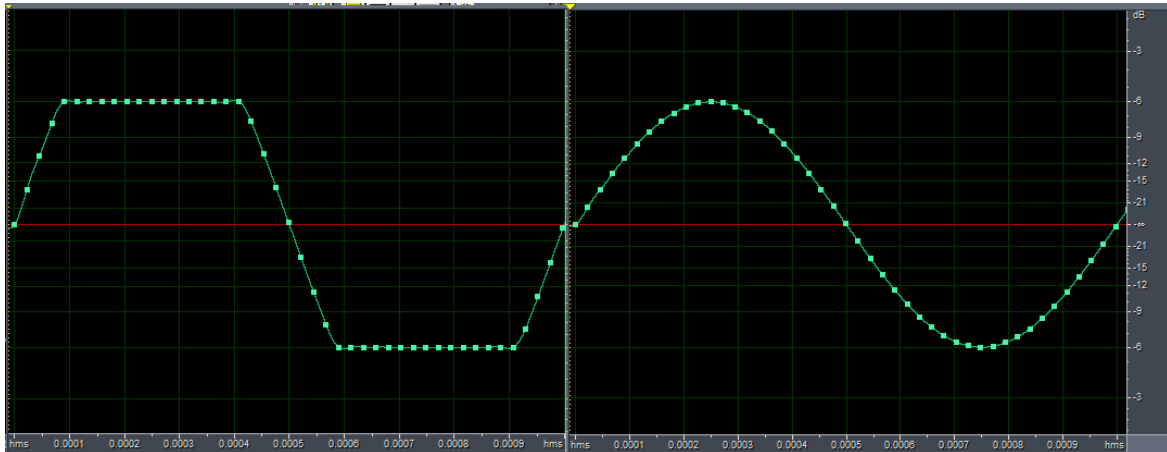
Επιπλέον δημιουργήθηκε απλό ημίτονο, σταθερής συχνότητας 1kHz, στην ίδια στάθμη, δηλαδή -6dBFS.

### 3.6.2 Δημιουργία σημάτων εξόδου

Όπως αναφέρθηκε, και τα τρία σήματα διέγερσης έχουν σταθερή στάθμη -6dBFS. Η προσομοίωση ενός μη γραμμικού συστήματος, θα γίνει χειροκίνητα, εφαρμόζοντας μια γνωστή παραμόρφωση, που προκύπτει από ψαλιδισμό του σήματος διέγερσης.

Με τη βοήθεια του λογισμικού Adobe Audition, εφαρμόζεται σε όλα τα σήματα διέγερσης αύξηση στάθμης κατά 12dB, ώστε να υπάρξει σημαντικός ψαλιδισμός στις άνω και κάτω

άκρες του ημιτόνου, και στη συνέχεια μείωση κατά  $-6\text{dB}$ , ώστε να επανέλθει το σήμα στην αρχική μέγιστη στάθμη του.



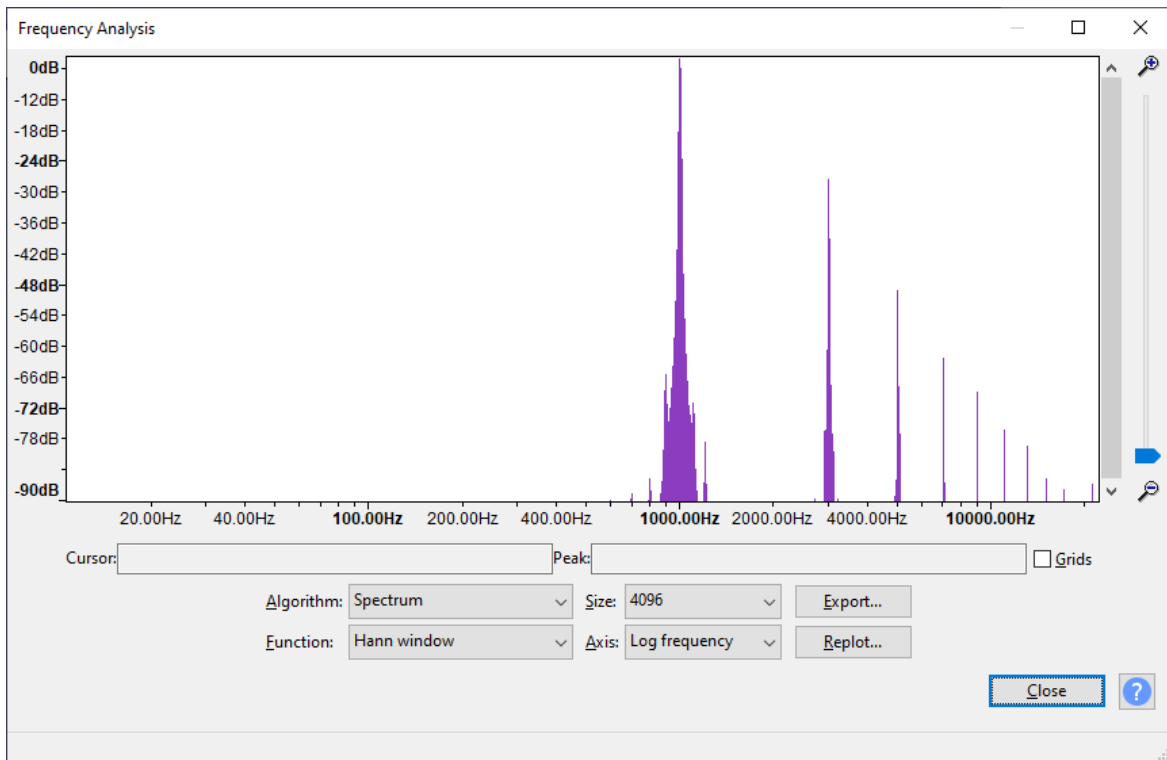
**Εικόνα 3-33** Ενισχυμένο και ψαλιδισμένο ημίτονο στα αριστερά, και απλό ημίτονο στα δεξιά. Συχνότητα  $1\text{kHz}$

### 3.6.3 Μέτρηση αποτελεσμάτων

Ακολουθώντας τις διαδικασίες των προγραμμάτων, εισάγεται το συνθετικό σήμα εξόδου στα αντίστοιχα λογισμικά, από όπου προέκυψε η ανάλυση των στάθμεων των πρώτων αρμονικών, οι οποίες μετρήθηκαν στη συχνότητα του  $1\text{kHz}$ .

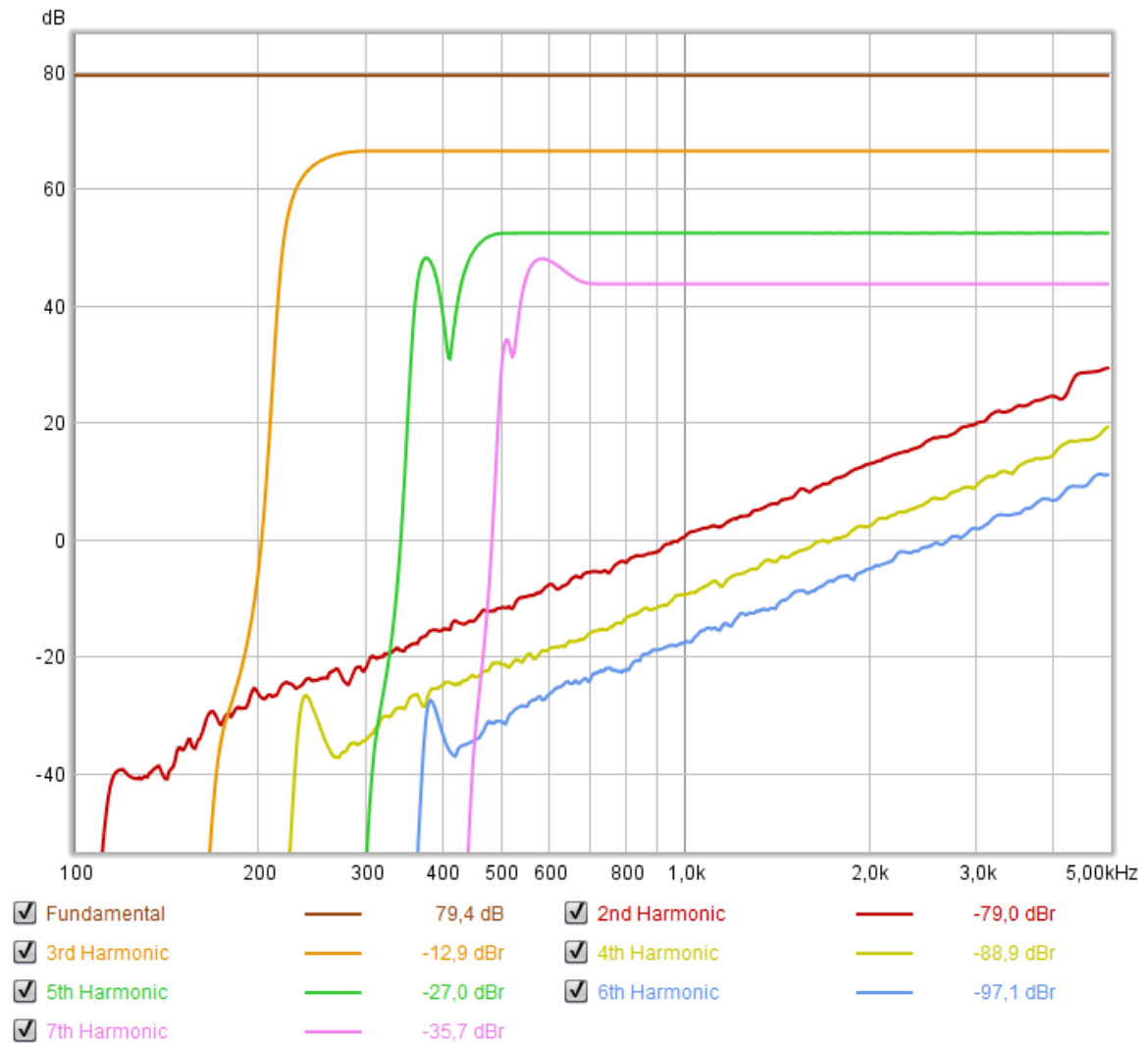
Λόγω των διαφορετικών λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν, που μεταφράζουν διαφορετικά τις στάθμες σε decibel των σημάτων, θα μετρηθεί η διαφορά σε dB μεταξύ της θεμελιώδους συχνότητας, και των επιμέρους αρμονικών.

Με τη βοήθεια του λογισμικού Audacity, μετρήθηκαν οι στάθμες της θεμελιώδους συχνότητας και των αρμονικών, με χρήση της λειτουργίας Plot Spectrum, όπως φαίνεται παρακάτω:



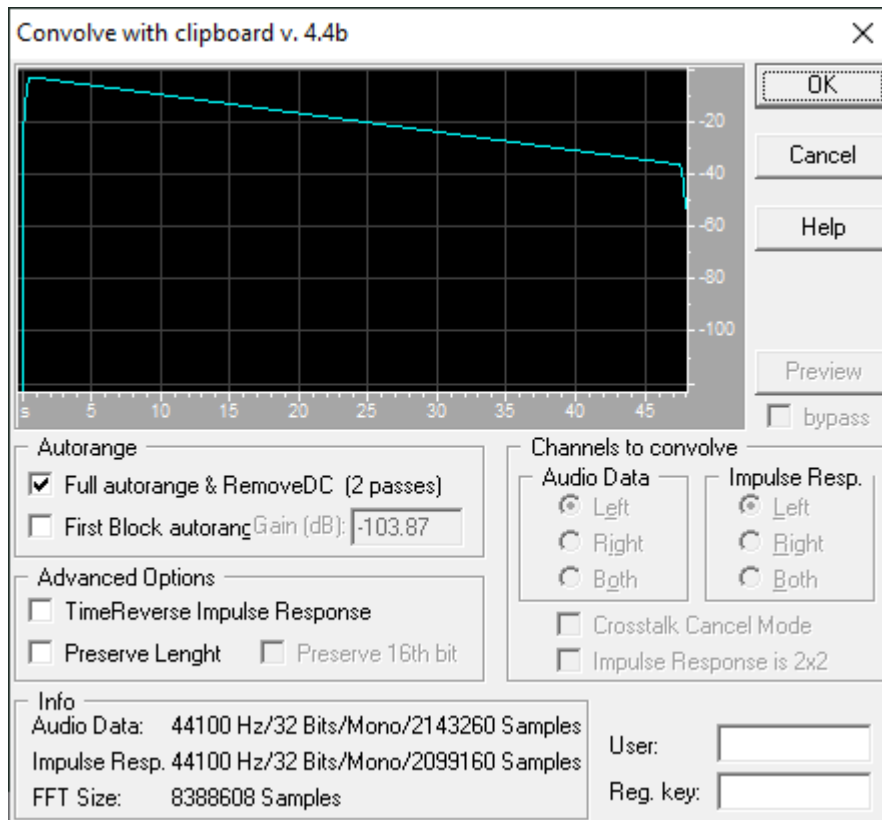
**Εικόνα 3-34 Φασματική ανάλυση ψαλιδισμένου σήματος 1kHz μέσω λογισμικού Audacity**

Στο λογισμικό REW, μετρήθηκε η στάθμη της θεμελιώδης συχνότητας στα 79,4 dB, και καταγράφηκαν οι στάθμες των 7 πρώτων αρμονικών με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος:



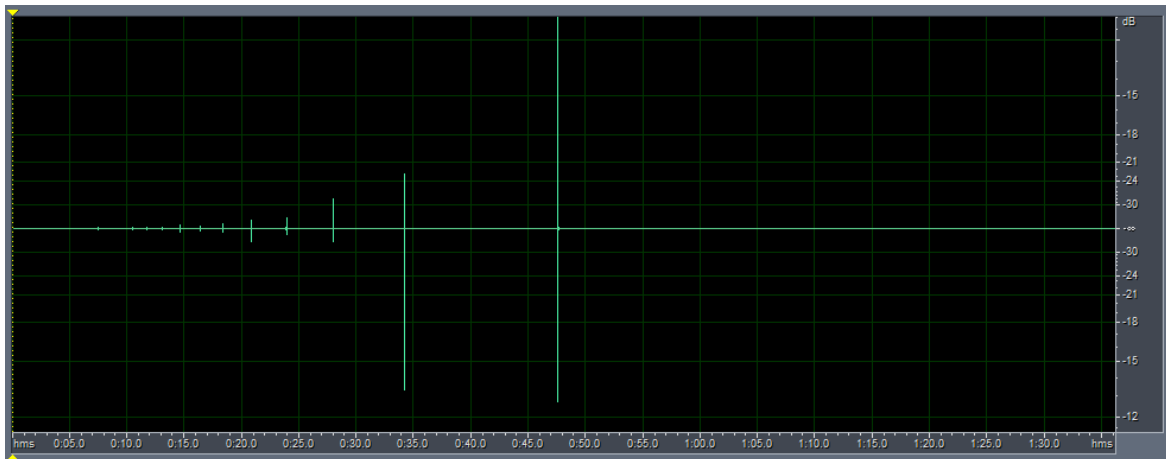
Εικόνα 3-35 Στάθμες θεμελιώδους συχνότητας και 7 πρώτων αρμονικών. Στο υπόμνημα φαίνονται οι σχετικές στάθμες dB relative των αρμονικών σε σχέση με τη στάθμη της θεμελιώδους συχνότητας

Τέλος με τη χρήση της εντολής Convolve with Clipboard, πραγματοποιήθηκε συνέλιξη του σήματος εξόδου, με το αντίστροφο φίλτρο όπως περιγράφηκε παραπάνω



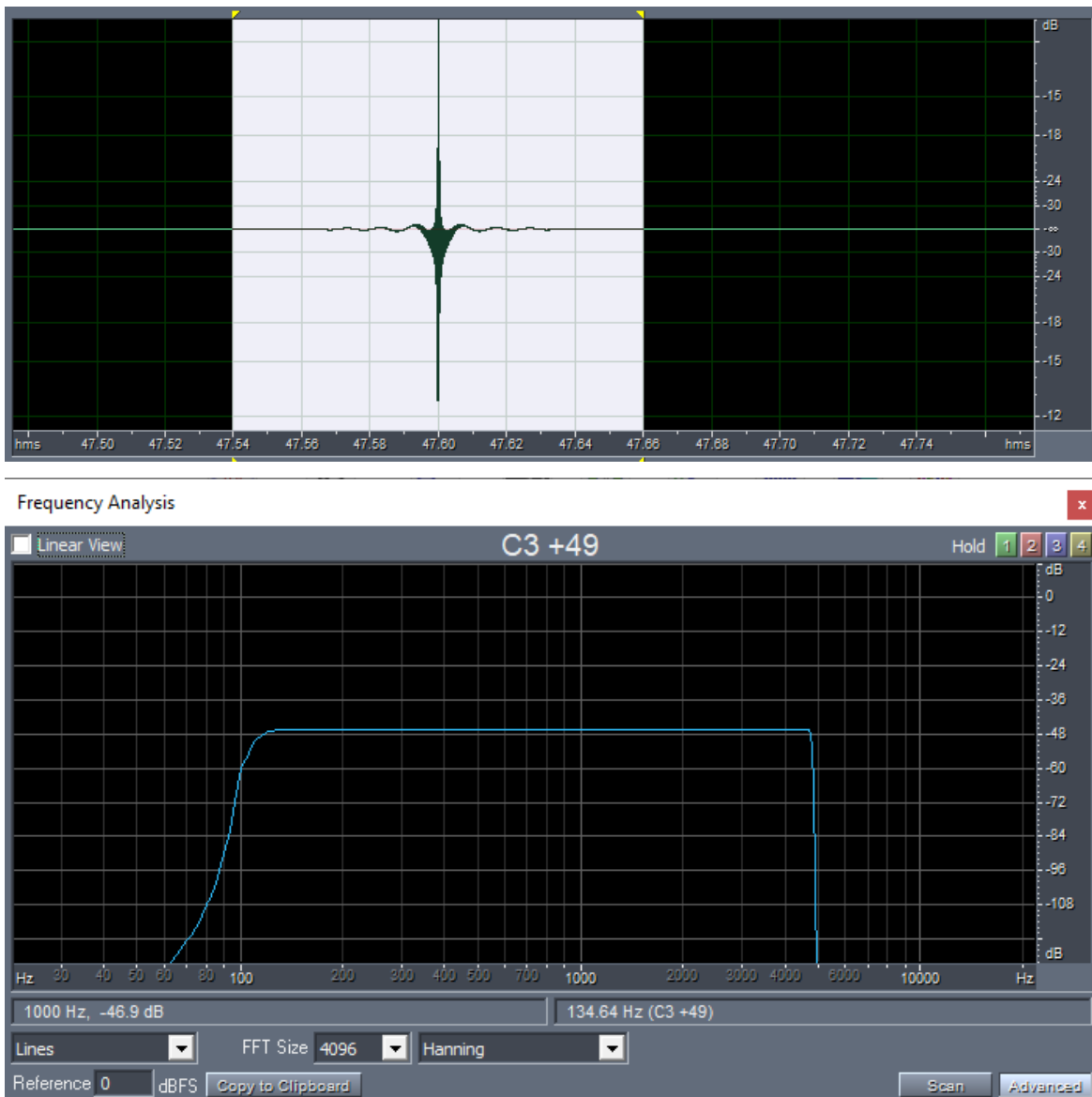
**Εικόνα 3-36 Διαδικασία συνέλιξης σήματος εξόδου με το αντίστροφο φίλτρο του σήματος διέγερσης, με χρήση της εντολής Convolve with clipboard των Aurora plugins**

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας, προκύπτει μια σειρά από κρουστικές αποκρίσεις. Σύμφωνα με τον Farina, η μεγαλύτερη από τις αποκρίσεις περιγράφει τη θεμελιώδη συχνότητα, και αριστερά από αυτή, οι επι μέρους, μικρότερες αποκρίσεις περιγράφουν τις αντίστοιχες αρμονικές του συστήματος.



**Εικόνα 3-37** Κρουστικές αποκρίσεις όπως αυτές προέκυψαν από τη διαδικασία **Convolve with clipboard** των **Aurora plugins**. Στη μέση φαίνεται η απόκριση της θεμελιώδους συχνότητας, και στα αριστερά οι αποκρίσεις των αρμονικών

Η μέτρηση της στάθμης των αποκρίσεων, έγινε επιλέγοντας στο λογισμικό **Adobe Audition 1.5** μόνο την πληροφορία της κάθε απόκρισης, και εφαρμόζοντας για κάθε μία από αυτές το εργαλείο **Frequency Analysis**, με το οποίο μετρήθηκαν οι στάθμες στη συχνότητα **1kHz**.



**Εικόνα 3-38** Επιλογή μόνο πληροφορίας μίας κρουστικής απόκρισης, και Frequency Analysis για αυτήν. Μέτρηση στάθμης θεμελιώδους συχνότητας στο 1kHz, ίση με -46,9dB

Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε για τις επόμενες τρεις κρουστικές αποκρίσεις.

### 3.6.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

Σε όλες τις περιπτώσεις, καταγράφηκαν οι στάθμες της θεμελιώδους συχνότητας, και της διαφοράς των επι μέρους αρμονικών.

Οι στάθμες των ζυγών αρμονικών ήταν πολύ μικρές, και δεν εντοπίστηκαν στην ακολουθία κρουστικών που προέκυψε από τα Aurora plugins. Οι μετρήσεις αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Συχνότητα	REW (dB)	Audition (dB)	Audacity (dB)
Θεμελιώδης 1kHz	0	0	0
3η αρμονική 3kHz	-12,9	-12,94	-12,4
5η αρμονική 5kHz	-27	-27,08	-26,6
7η αρμονική 7kHz	-35,7	-35,53	-35,2

**Πίνακας 3** Αποτελέσματα μετρήσεων στάθμης θεμελιώδους συχνότητας και αρμονικών, με τρεις διαφορετικές μεθόδους

Παρατηρείται πως οι μετρηθείσες στάθμες των αρμονικών είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, με μια μέγιστη διαφορά 0,5dB.

Συνεπώς συμπεραίνουμε πως οι μετρήσεις που προκύπτουν με το λογισμικό REW, είναι ακριβείς, και ικανές να περιγράψουν σωστά την παραμόρφωση (μη γραμμική συμπεριφορά) ενός συστήματος όπως το TS7.

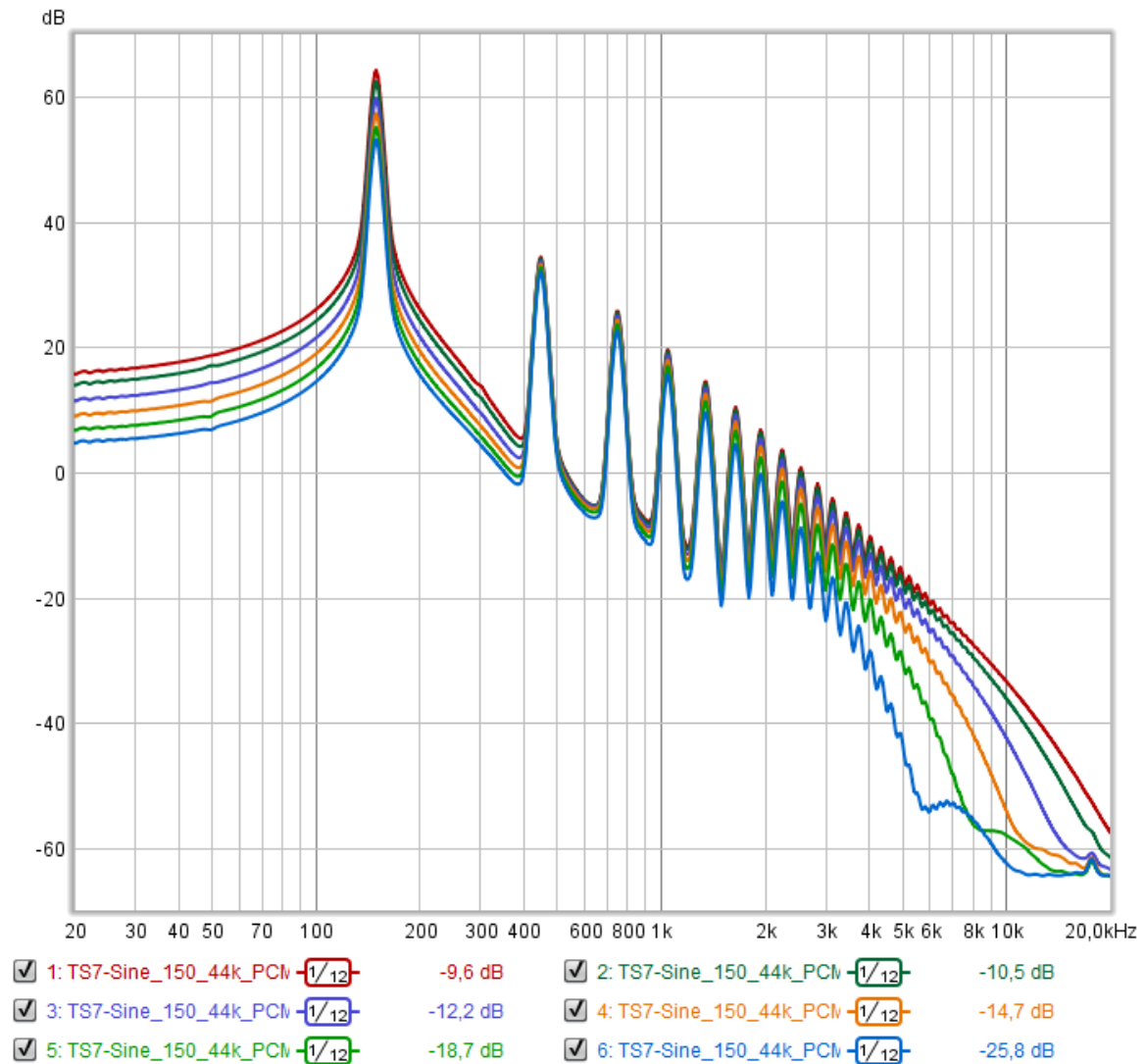
### 3.7. Φασματική απεικόνιση για σήμα εισόδου ημίτονο 150Hz

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν ημιτονικά σήματα, διάρκειας 1second, για πολλαπλές στάθμες.

Παρατηρείται μεγάλος αριθμός αρμονικών, οι οποίες φθίνουν σε στάθμη όσο μεγαλώνει η συχνότητα. Στο παρακάτω σχήμα, όπου έχει εφαρμοστεί εξομάλυνση 1/12 της οκτάβας, παρατηρείται πως οι ζυγές αρμονικές δεν αποτυπώνονται καθόλου, λόγω της πολύ χαμηλής στάθμης τους.

Επιπλέον παρατηρείται πως η στάθμη των αρμονικών είναι ανάλογη της στάθμης σήματος εισόδου, κυρίως στις υψηλές συχνότητες (μεγαλύτερες από 2kHz), ενώ στις πρώτες αρμονικές η διαφορά σε στάθμη είναι μικρή.

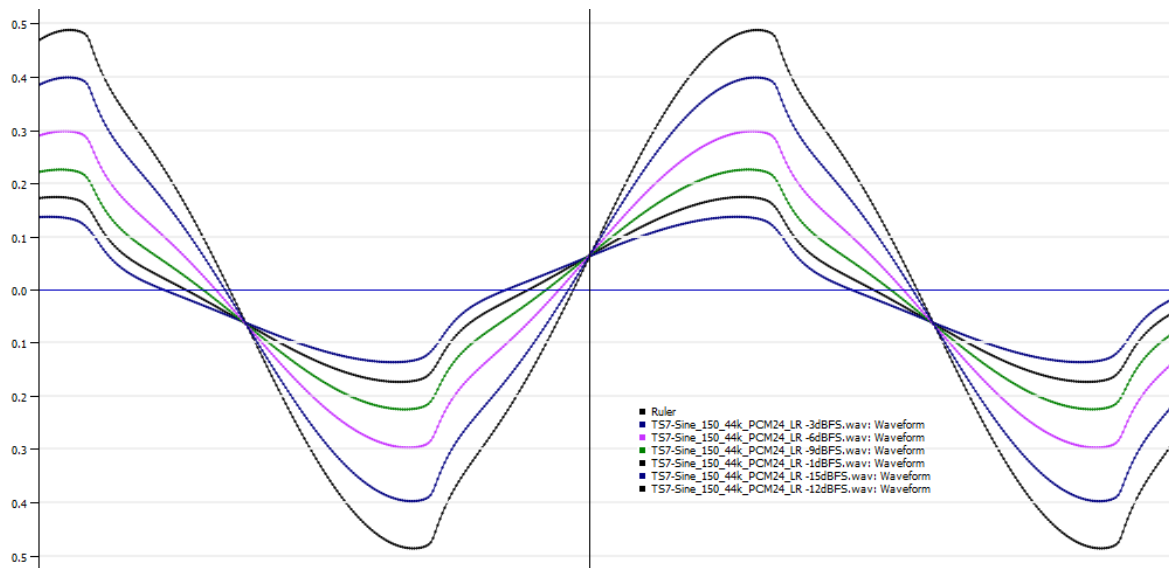




Εικόνα 3-39 Φασματογραφήματα σήματος 150Hz μέσω TS7 για στάθμες εισόδου -1, -3, -6, -9, -12 και -15 dBFS

### 3.8. Κυματομορφές για σήμα εισόδου 150Hz

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η κυματομορφή. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι κυματομορφές για διαφορετικές στάθμες εισόδου. Παρατηρείται μια αναμενόμενη παραμόρφωση της κυματομορφής σε σχέση με την ημιτονική. Επιπλέον, παρατηρείται πως τα σημεία «κόμβου» στα οποία συγκλίνουν οι κυματομορφές, δεν είναι στο επίπεδο μηδέν του άξονα Y, αλλά είναι μετατοπισμένα προς τα πάνω ή τα κάτω, αναλόγως τη φορά της κυματομορφής.



Εικόνα 3-40 Κορματομορφές σήματος TS7, 150Hz, για διάφορες στάθμες σήματος εισόδου

## 4. Δημιουργία μοντέλου Spice

Για τις ανάγκες της περαιτέρω ανάλυσης των κυκλωμάτων που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του ήχου, δημιουργήθηκε ψηφιακό μοντέλο του κυκλώματος σε λογισμικό εξομοίωσης κυκλωμάτων τύπου Spice, στο λογισμικό LTSpice της εταιρίας Analog Devices (Analog Devices, n.d.). Το λογισμικό διατίθεται δωρεάν, ενώ προσφέρει δυνατότητα εισαγωγής wav αρχείων ήχου ως AC πηγών για προσομοίωση ηχητικών κυκλωμάτων, χαρακτηριστικό που κρίνεται πολύ χρήσιμο για τη συγκεκριμένη εργασία.

### 4.1 Μεταγραφή κυκλώματος

Η πρώτη ενέργεια που πραγματοποιήθηκε, ήταν η μεταγραφή του κυκλώματος, από το σχηματικό του κατασκευαστή, στο περιβάλλον του LTSpice.

Χρησιμοποιήθηκε ως βάση ένα παρεμφερές μοντέλο Tubescreamer, που βρέθηκε στην ιστοσελίδα άλλου ερευνητή (Reilly, 2015). Πάνω σε αυτό, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές με βάση το σχηματικό του κατασκευαστή. Έγιναν οι απαραίτητες αλλαγές στη δομή του κυκλώματος, μετονομάστηκαν τα στοιχεία στα ονόματα με τα οποία εμφανίζονται στην πλακέτα, διορθώθηκαν οι τιμές των παθητικών στοιχείων, και τέλος αντικαταστάθηκαν τα ιδανικά μοντέλα των στοιχείων με αντίστοιχα που είτε δημιουργήθηκαν με βάση το φυλλάδιο προδιαγραφών του κατασκευαστή, είτε βρέθηκαν έτοιμα στο internet.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα για τα παρακάτω στοιχεία:

**Toshiba NPN Transistor 2SC1815:** Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο με τις διορθώσεις που προτείνει ο χρήστης exabugs σε άρθρο του στο site Qiita (exabugs, 2016)

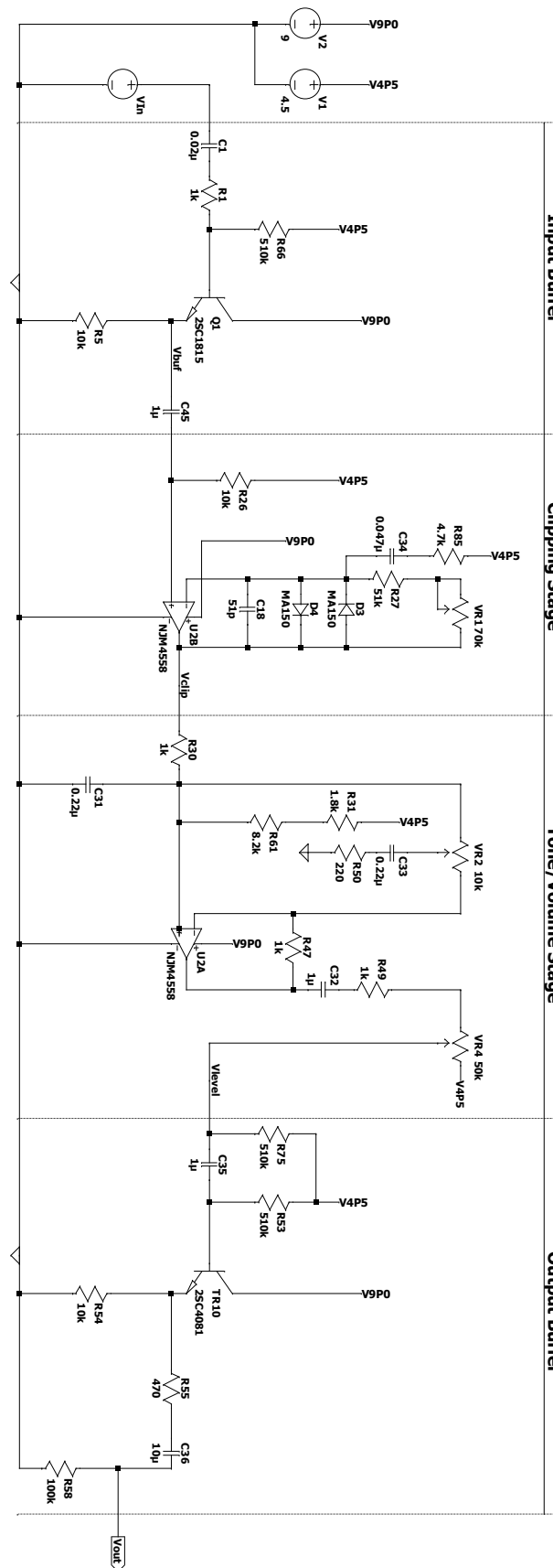
**Δίοδος Panasonic MA2B150 (MA150):** Χρησιμοποιήθηκε ως βάση το μοντέλο της παρεμφερής διόδου On Semiconductors 1N4148, και ενημερώθηκε με τιμές που βρέθηκαν στις προδιαγραφές του κατασκευαστή (Panasonic)

**Τελεστικός ενισχυτής New Japan Radio NJM4558D:** Χρησιμοποιήθηκε το PSpice μοντέλο που δίνει ο κατασκευαστής (New Japan Radio co., Ltd, 2016), το οποίο προσαρμόστηκε στο περιβάλλον του LTSpice από το συγγραφέα

**Ποτενσιόμετρα:** Το LTSpice δεν έρχεται με κάποια έτοιμη βιβλιοθήκη που να περιέχει ποτενσιόμετρα. Αν και σχετικά δευτερεύων, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη βιβλιοθήκη που δημιούργησε ο χρήστης Helmut Sennewald (Sennewald, 2003), για ευκρινέστερη

αποτύπωση των ποτενσιόμετρων σε σχηματικό διάγραμμα. Στο μοντέλο του ποτενσιόμετρου, ο χρήστης δίνει ως παράμετρο τη συνολική ονομαστική τιμή αντίστασης αυτού “Rtot”, και την επιλεγμένη θέση του ποτενσιόμετρου “wiper”, σε τιμή από 0,01 (min) έως 0,99 (max), που πολλαπλασιάζεται με την “Rtot” για να υπολογιστεί η αντίσταση στον πρώτο ακροδέκτη. Η συνολική αντίσταση στο δεύτερο ακροδέκτη υπολογίζεται με τον τύπο  $R_{tot} \cdot (1 - wiper)$ . Σημειώνεται πως τα ποτενσιόμετρα VR2 και VR4 είναι γραμμικά αλλά το ποτενσιόμετρο VR1 λογαριθμικό. Για λόγους ευκολίας, στο μοντέλο δηλώθηκε και το VR1 ως γραμμικό, και μετρήθηκε πειραματικά η αντίσταση με το ποτενσιόμετρο στη μέση θέση (12 ώρα ρολογιού) στα 70kOhm, κάτι που αντιστοιχεί σε τιμή wiper = 0,86.

Στο μοντέλο δεν αποτυπώθηκαν τα κυκλώματα switch & bypass και τροφοδοσίας, ενώ μελετήθηκε μόνο η περίπτωση του διακόπτη MODE στη θέση TS9, και όχι HOT.



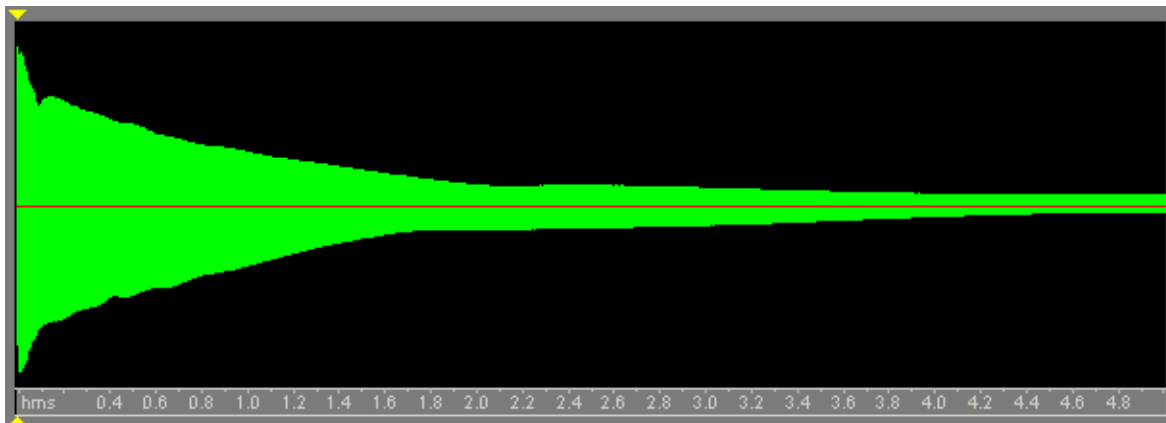
Εικόνα 4-1 Μοντέλο του TS7 σε λογισμικό LTSpice

## 4.2 Στάθμη σήματος ηλεκτρικής κιθάρας στο LTSpice

Σε αυτή την ενότητα ερευνάται μια τυπική στάθμη σήματος ηλεκτρικής κιθάρας, που είναι και η προδιαγραμμένη πηγή εισόδου για το Tubescreamer.

Ο ερευνητής Jack Orman, πραγματοποίησε πείραμα με ηλεκτρική κιθάρα τύπου Les Paul, με μαγνήτες τύπου humbucker, πείραμα όπου μέτρησε με χρήση παλμογράφου την έξοδο του οργάνου, παίζοντας δυνατά τη δεύτερη χορδή (D) της κιθάρας (Orman, 2002).

Το αποτέλεσμα είναι πως αρχικά εμφανίστηκε μέγιστη τάση 1,2 volt peak-peak, με τη στάθμη να πέφτει γρήγορα σε τιμή κοντά στα 0,4 volt peak-peak.



**Εικόνα 4-2** Κυματομορφή παλμογράφου για είσοδο ηλεκτρικής κιθάρας (Orman, 2002). Αν και δεν υπάρχει βαθμονόμηση στον κάθετο άξονα, ο ερευνητής καταγράφει μέγιστο  $V_{pp}$  ίσο με 1,2volt

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο οδηγιών του λογισμικού LTSpice, η εντολή wavfile, σύμφωνα με την οποία εισάγεται στο κύκλωμα αρχείο ήχου ως μεταβαλλόμενη πηγή τάσης, μεταφράζει αρχεία ήχου μέγιστης στάθμης ως σήματα τάσης -1 volt με 1 volt . Πειραματικά επιβεβαιώθηκε ο παρακάτω πίνακας:

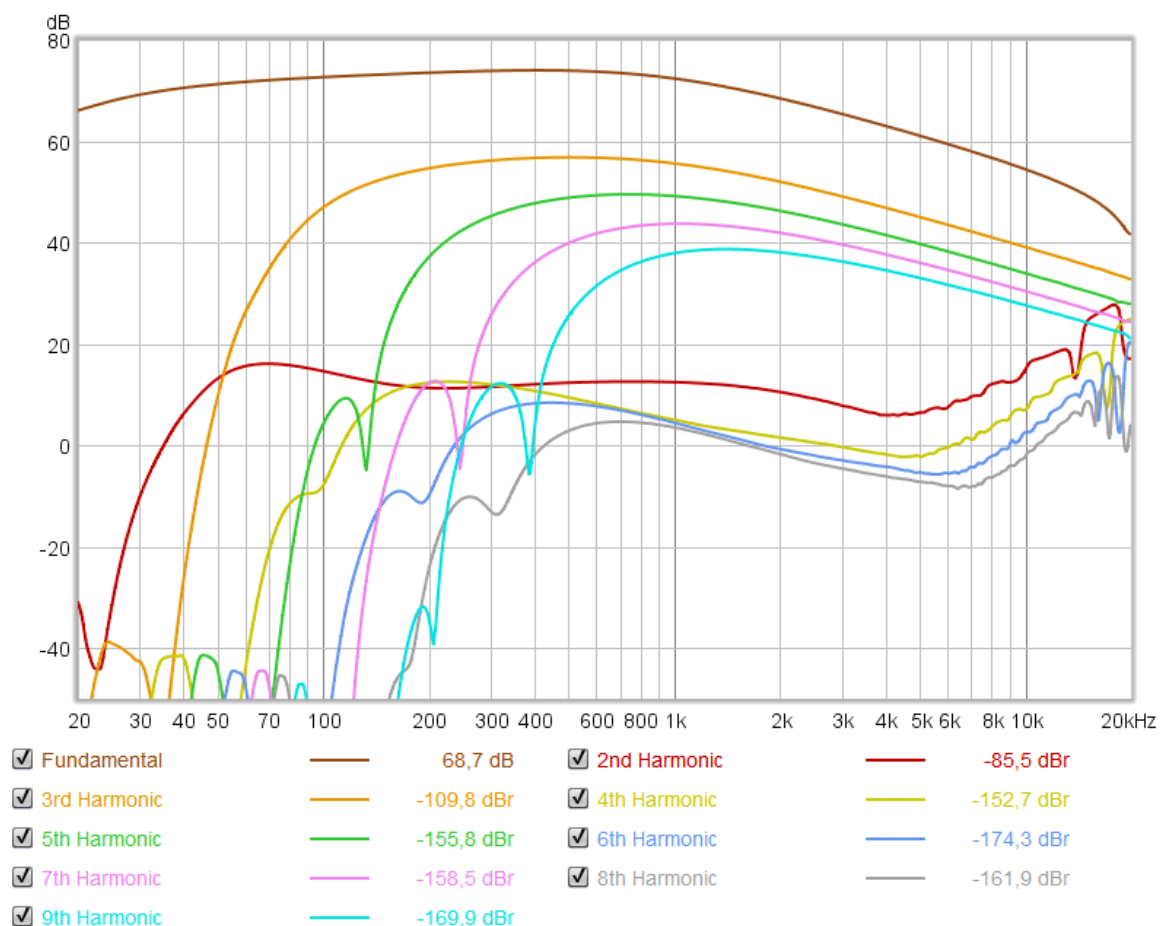
dBFS	Vmax
0	1
-1	0,9
-3	0,7
-6	0,5
-9	0,35
-12	0,25
-15	0,18

**Πίνακας 4** Πίνακας αντιστοίχισης ψηφιακών σημάτων στάθμης dBFS, και μεταφραζόμενης στάθμης δυναμικού σε volt στο λογισμικό LTSpice

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή πως το δυνατό παίξιμο κιθάρας αντιστοιχεί σε είσοδο στο LTSpice με ψηφιακό σήμα περίπου -5dBFS. Φυσικά η ηλεκτρική κιθάρα είναι ένα όργανο με δυναμικές, όπου ο παίκτης μπορεί να χτυπήσει όσο δυνατά ή μαλακά θέλει τις χορδές, κάτι που θα μεταφράζεται σε ανάλογη στάθμη εξόδου. Είναι σαφές πως η παραπάνω παραδοχή έχει αξία για την οριοθέτηση πιθανού ανώτερου ορίου στη μελέτη, και δεν είναι αντιπροσωπευτικό τυπικού παιχνίματος στο όργανο.

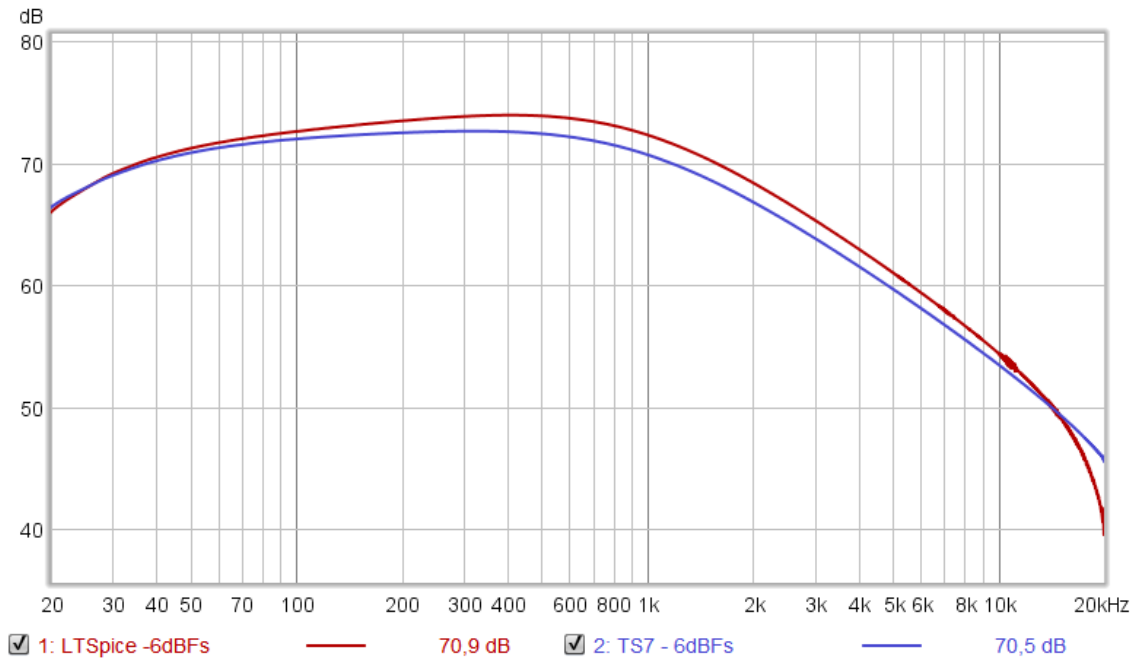
### 4.3 Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση

Το μοντέλο μετρήθηκε με χρήση του λογισμικού REW. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η offline διαδικασία μέτρησης του REW. Το παραγόμενο sine sweep του REW, χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο LTSpice, και το αποτέλεσμα φορτώθηκε πίσω στο REW, που παρήγαγε τα παρακάτω αποτελέσματα.

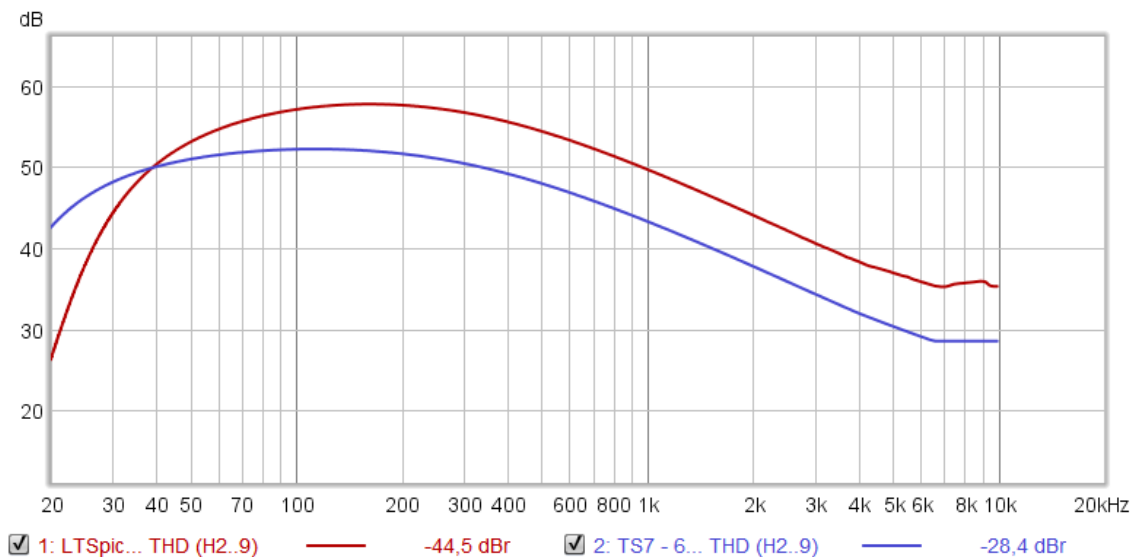


Εικόνα 4-3 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου LTSpice, -6dBFS

Παρατηρείται πως έχει παραχθεί αρμονικό περιεχόμενο. Στη συνέχεια συγκρίνεται το μοντέλο του LTSpice με το πραγματικό υλικό.

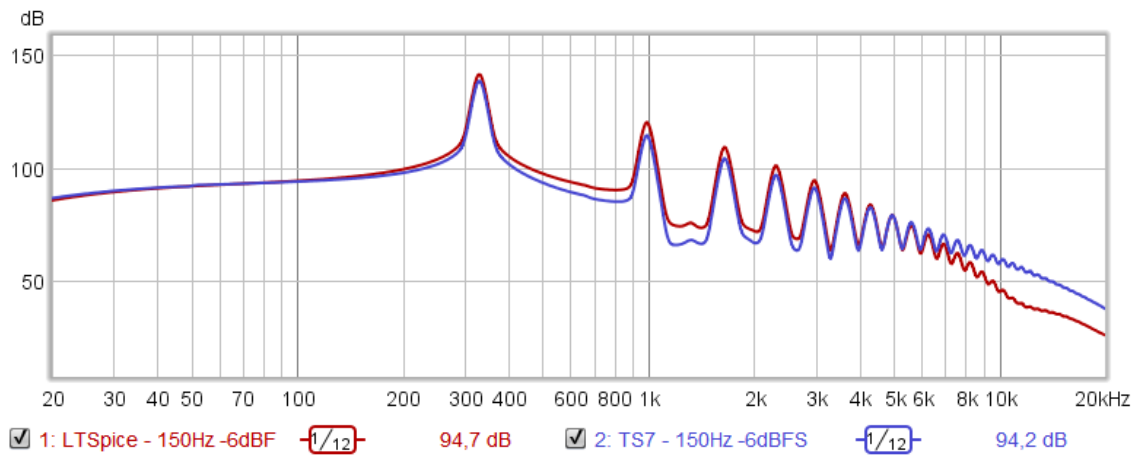


Εικόνα 4-4 Καμπύλες απόκρισης μοντέλου LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλέ καμπύλη)



Εικόνα 4-5 Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη)





**Εικόνα 4-6** Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης LTSpice (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας

Παρατηρείται πως τόσο η καμπύλη απόκρισης, όσο και το αρμονικό περιεχόμενο του μοντέλου LTSpice είναι πολύ κοντά στο πραγματικό υλικό. Το ηχητικό αποτέλεσμα, χρησιμοποιώντας σήμα κιθάρας, ήταν πολύ καλό, και χωρίς να αναγνωρίζονται ηχητικά τεχνουργήματα (artifacts).

## 5. Μοντέλο TS7 με χρήση λογισμικού Nebula sampler

### 5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ο ερευνητής Angelo Farina, δημοσίευσε το 2007 στα πλαίσια του συνεδρίου Audio Engineering Society, το σύγγραμμα με όνομα “Realtime auralization employing a not-linear, not-timeinvariant convolver” (Farina, Realtime auralization employing a not-linear, not-time-invariant convolver, 2007). Περιγράφει έναν νέο τρόπο εξομοίωσης συσκευών ήχου, που σε αντίθεση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις με βάση τη συνέλιξη, καταφέρνει και εξομοιώνει και μη γραμμικά χαρακτηριστικά με τη χρήση Diagonal Volterra Kernels.

Η σουίτα προγραμμάτων Nebula αποτελείται από 2 κομμάτια:

- Nebula Sampler (NAT3): Επιτρέπει τη δημιουργία “Preset”, κάνοντας sample φυσικό εξοπλισμό
- Nebula VST Plugin: Μπορεί να φορτώσει “Preset”, και να το εξομοιώσει σε πραγματικό χρόνο

Στη συνέχεια θα δημιουργηθεί ένα “Preset”, ένα μοντέλο δηλαδή του TS7, η αποδοτικότητα του οποίου θα μετρηθεί πειραματικά.

#### 5.1.1 Δημιουργία μοντέλου TS7 σε Nebula Sampler (NAT3)

Η διαδικασία της δημιουργίας του μοντέλου γίνεται με το λογισμικό Nebula Sampler, ή αλλιώς αναφερόμενο ως NAT3.

Το λογισμικό μπορεί να λειτουργήσει είτε σε Offline, είτε σε Online mode, με παρόμοια λογική με τα αντίστοιχα mode του λογισμικού REW. Στο Online mode, συνδέουμε το hardware εξοπλισμό που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε στον υπολογιστή, και το λογισμικό NAT3 αναλαμβάνει αυτόματα τη διαδικασία της αναπαραγωγής των σημάτων διέγερσης, της ηχογράφησης του αποτελέσματος, και της επεξεργασίας που πρέπει να ακολουθήσει σε αυτά (deconvolution). Στο Offline mode, παράγονται από το λογισμικό τα σήματα διέγερσης, τα οποία ο χρήστης θα πρέπει χειροκίνητα να τροφοδοτήσει στον εξοπλισμό, να ηχογραφήσει ο ίδιος τα παραγόμενα σήματα, και να τα τροφοδοτήσει στο λογισμικό, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία επεξεργασίας (deconvolution).

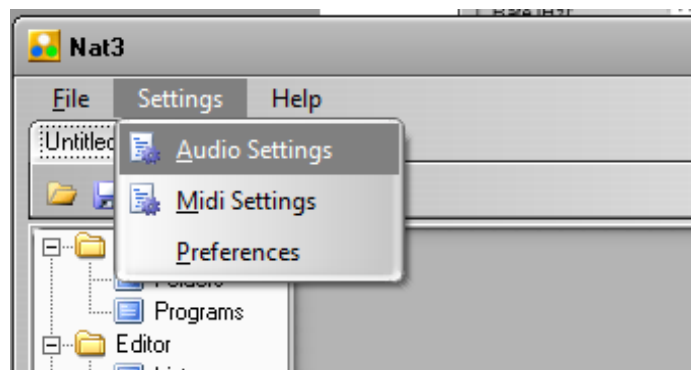
Στην προκειμένη χρησιμοποιήθηκε το Online mode, λόγω ευκολίας χρήσης.

### 5.1.2 Προετοιμασία λογισμικού

Για τη διαδικασία της μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εξοπλισμός, και ρυθμίσεις όπως περιγράφεται σε παραπάνω κεφάλαιο, με τις όποιες διαφορές να αφορούν τις ρυθμίσεις του λογισμικού.

Για την προετοιμασία των ρυθμίσεων του λογισμικού, χρησιμοποιήθηκε το παρεχόμενο από τον κατασκευαστή εγχειρίδιο με τίτλο NAT3 Quick Start (Acustica Audio).

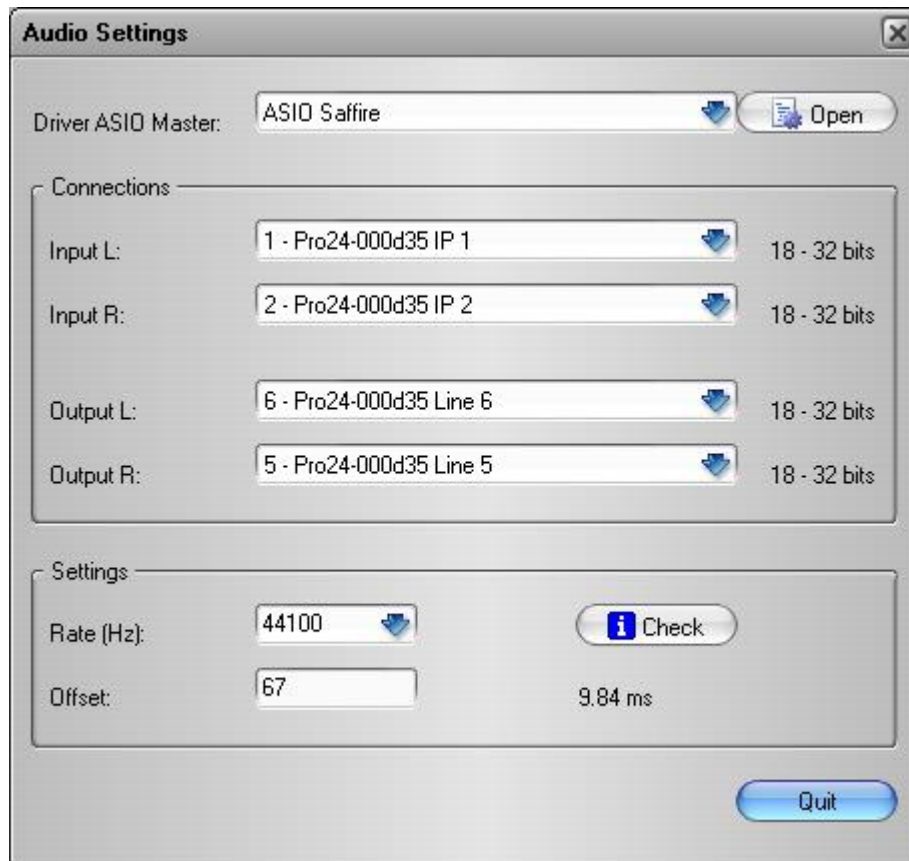
Καταρχάς πρέπει να ενημερώσουμε το λογισμικό σχετικά με το ποια κάρτα ήχου πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ποια κανάλια αυτής, καθώς και το sample rate και το offset σε ms, που περιγράφει την καθυστέρηση του ήχου που προκύπτει από την έξοδο ενός καναλιού ήχου, στην είσοδο ενός άλλου.



Εικόνα 5-1 Οι ρυθμίσεις του NAT3 είναι διαθέσιμος από την επιλογή Settings -> Audio Settings

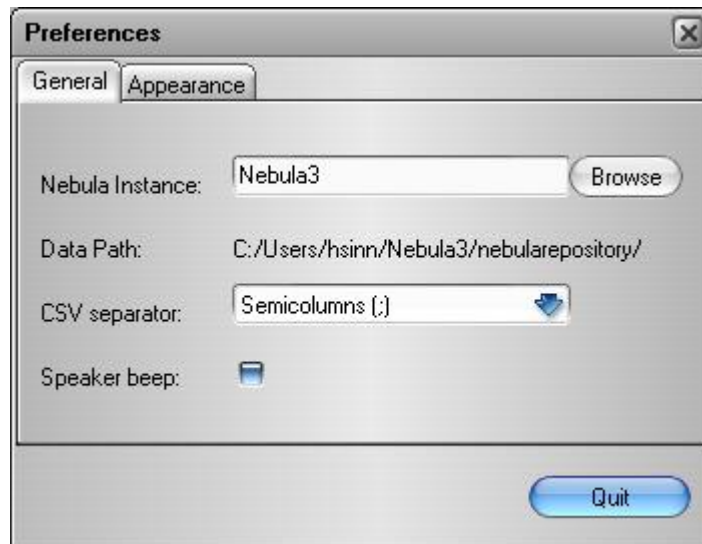
Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κανάλια (Input 1 και Output 6) της κάρτας ήχου Focusrite Saffire Pro 24. Στην προκειμένη το σύστημα που θέλουμε να μετρήσουμε είναι μονοφωνικό, οπότε γίνεται παραδοχή πως το χρήσιμο κανάλι είναι το Left.

Για την μέτρηση του Offset, κατά τις οδηγίες του κατασκευαστή, συνδέθηκαν η έξοδος 6 απευθείας με την είσοδο 1 της κάρτας ήχου, και χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία “Check” που μετράει αυτόματα την όποια καθυστέρηση. Στην προκειμένη μετρήθηκε στα 9,84ms, όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 5-2 Ρυθμίσεις λογισμικού NAT3 για τη διαδικασία μοντελοποίησης του TS7

Επιπλέον των ρυθμίσεων της κάρτας ήχου, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει και τον τύπο του “Nebula Instance” που θέλει να χρησιμοποιήσει. Οι πιθανές επιλογές είναι το απλό Nebula3, και το Nebula3 Reverb. Σύμφωνα με το άρθρο του περιοδικού Sound on Sound (Walker, 2008) που καλύπτει τη λειτουργικότητα του Nebula 3, το Reverb instance προτείνεται για χρήση μοντελοποίησης reverb μονάδων, και είναι ρυθμισμένο με καθυστέρηση 16.450 samples, σε αντίθεση με το απλό instance, που είναι ρυθμισμένο μόλις στα 194 samples (Walker, 2008). Στην προκειμένη μελετάμε ένα σύστημα χωρίς κάποιο εφέ βάθους, οπότε δε χρειάζεται η χρήση του Reverb instance, που χρειάζεται σημαντικά περισσότερους υπολογιστικούς πόρους.

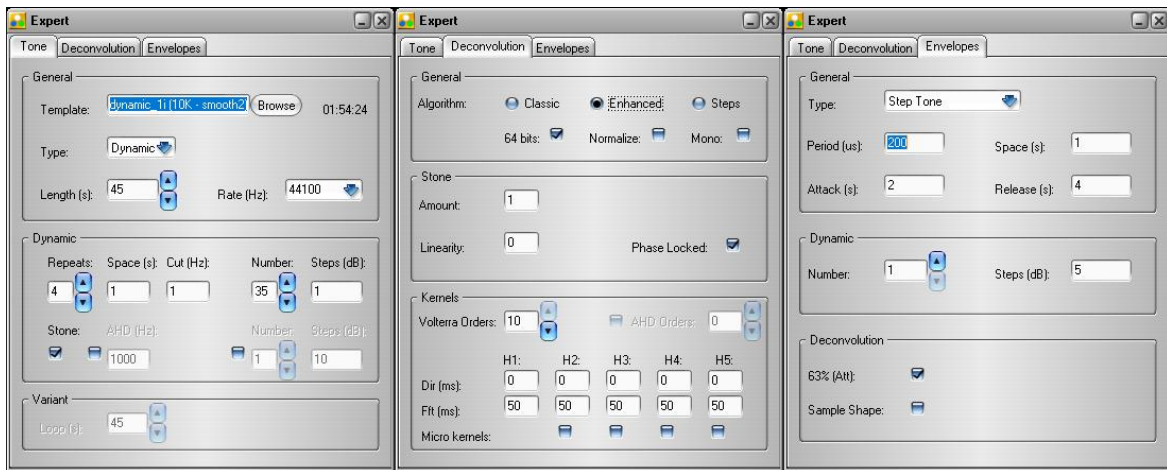


Εικόνα 5-3 Διάλογος επιλογής Nebula Instance, με επιλεγμένο το απλό Nebula3, και όχι το Nebula3 Reverb

### 5.1.3 Επιλογή κατάλληλου preset

Αφού έχουν ολοκληρωθεί οι ρυθμίσεις του λογισμικού, πρέπει να επιλεγθεί το κατάλληλο preset, με βάση το οποίο θα γίνει η μοντελοποίηση. Το κάθε preset αποτελείται από δύο αρχεία, το Session file, με κατάληξη XML, και το Template file, με κατάληξη N2X (Acustica Audio). Εντοπίστηκε το πιο κοντινό στο τρέχον σενάριο, που βρέθηκε στη διαδρομή “Sampler Presets\Preamps\Distorted Pre (10 kernels) - stone3.xml”, και το συνοδευτικό του “DISTORTED PRE (10 KERNELS) - STONE3.N2X”. Το συγκεκριμένο επιλέχθηκε επειδή επιτρέπει το μέγιστο αριθμό Kernels. Σύμφωνα με το manual του κατασκευαστή, ο κάθε πυρήνας (kernel) τυπικά παράγει μία αρμονική, αυξάνονται όμως σημαντικά την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ (Del Sordo & Spratley, 2007).

Το preset στην ουσία επηρεάζει τις τιμές που φαίνονται στο διάλογο Sampler->Expert του NAT3. Οι τιμές δεν παραμετροποιήθηκαν περαιτέρω, καταγράφηκαν όμως και παρουσιάζονται παρακάτω:



**Εικόνα 5-4** Ρυθμίσεις sampling που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του TS7.

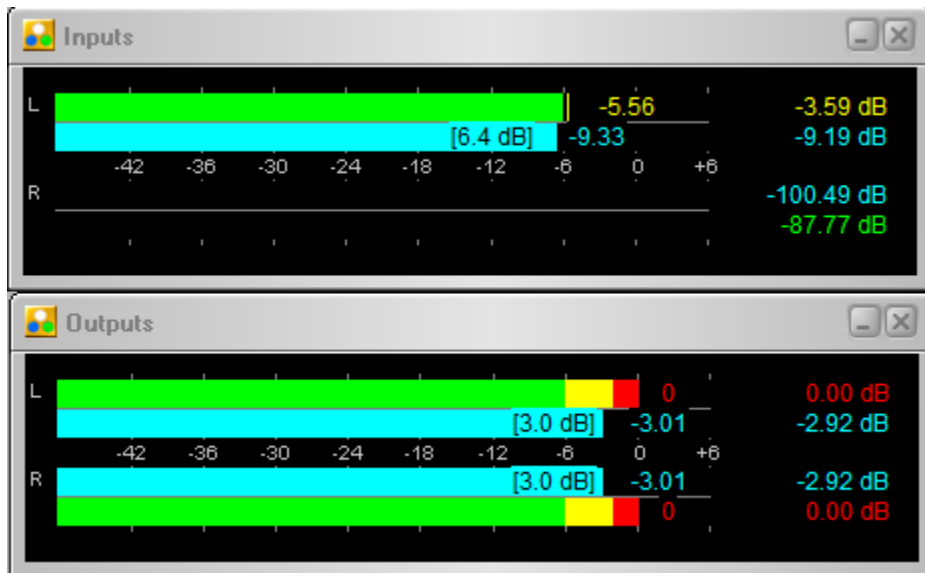
Παρατηρώντας τις ρυθμίσεις παίρνουμε πληροφορίες σχετικά με το πώς θα λειτουργήσει το sampling. Στην καρτέλα (tab) “Deconvolution”, παρατηρούμε πως στην ενότητα Kernels, η ρύθμιση Volterra Orders έχει την τιμή 10, το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό, όπως περιγράφει και το preset που επιλέχθηκε. Λοιπές ρυθμίσεις περιγράφουν τη διάρκεια του τόνου που χρησιμοποιείται (45 second), τη συχνότητα δειγματοληψίας (44.100Hz), τον αριθμό των διαφορετικών δυναμικών των τόνων που θα χρησιμοποιηθούν (35) και τη διαφορά μεταξύ τους σε dB (step 1dB). Στην ίδια ενότητα (Dynamic), πραγματοποιήθηκε η αλλαγή της τιμής Repeats από τιμή 4, σε τιμή 1,

Πίσω στο κεντρικό παράθυρο του Sampler, μπορούμε να δώσουμε το επιθυμητό όνομα στο μοντέλο μας, να ρυθμίσουμε το αρχικό κέρδος (στην προκειμένη μηδέν) καθώς και να ξεκινήσουμε τη διαδικασία. Κάτω αριστερά φαίνεται ο εκτιμώμενος χρόνος που θα διαρκέσει η διαδικασία των μετρήσεων.



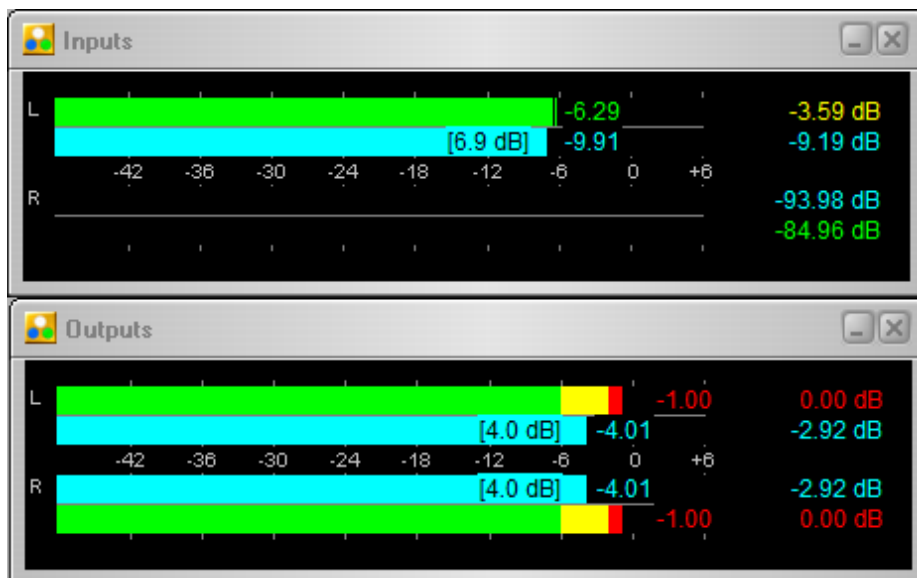
**Εικόνα 5-5** Παράθυρο διαλόγου NAT3 Sampler

Παρακολουθώντας τη διαδικασία μέτρησης με τα παράθυρα Inputs και Outputs του NAT3, παρατηρούμε πως το λογισμικό ξεκινάει τις μετρήσεις με σήμα στάθμης εξόδου 0dB, που έδωσε μέγιστη στάθμη εισόδου στα -5,5dB περίπου. Το σήμα εισόδου δεν ψαλιδίζει, και είναι υψηλής στάθμης, κάτι που θα βοηθήσει στην ακρίβεια των μετρήσεων.



Εικόνα 5-6 Διαδικασία μέτρησης NAT3, με αρχικό σήμα εξόδου 0dB

Αφού τελείωσε η διαδικασία μέτρησης για τα 0dB, το πρόγραμμα συνέχισε με σήμα στάθμης εξόδου -1dB, διαδικασία που θα επαναληφθεί άλλες 35 φορές, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που έχουν δοθεί στο preset.



Εικόνα 5-7 Διαδικασία μέτρησης NAT3, με σήμα εξόδου -1dB

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μέτρησης, ακολουθεί η διαδικασία Deconvolution, που προετοιμάζει τα αρχεία που θα μπορούν σε δεύτερο χρόνο να χρησιμοποιηθούν ως Nebula 3 VST, για την ψηφιακή, realtime μοντελοποίηση του εξοπλισμού. Τα αρχεία που δημιουργούνται έχουν κατάληξη N2P (για τοποθέτηση στο directory

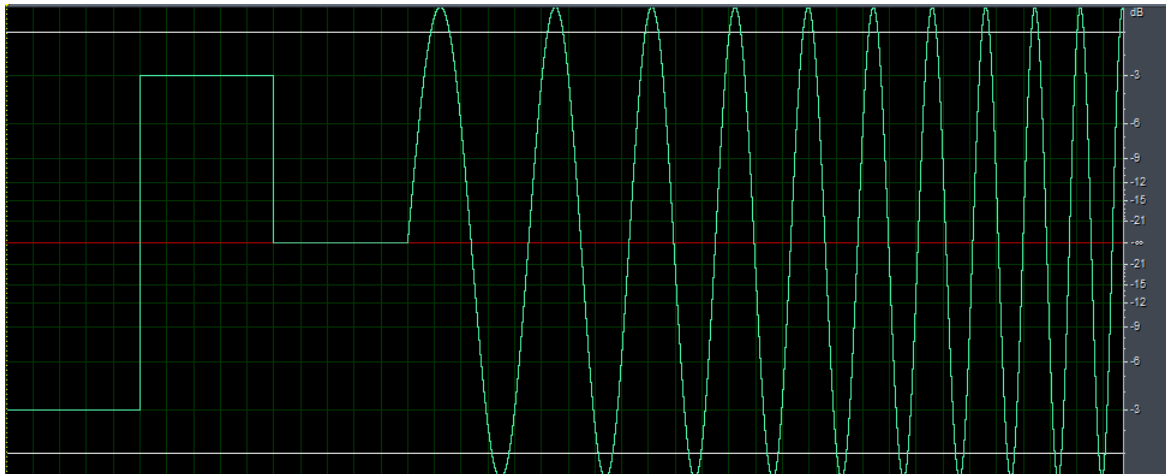


Nebula3\nebularepository\Programs), και N2V (για τοποθέτηση στο directory Nebula3\nebularepository\Vectors).

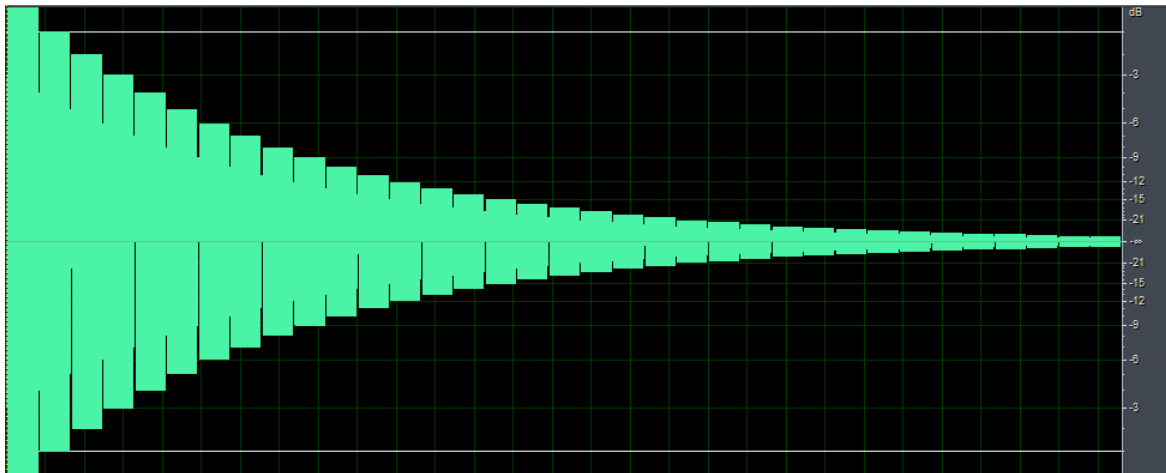
#### 5.1.4 Μελέτη σημάτων διαδικασίας Nebula Sampling

Αν χρησιμοποιηθεί η offline διαδικασία sampling, το λογισμικό παράγει το σήμα που θα πρέπει να τροφοδοτηθεί στον εξοπλισμό, και το σώζει σε μια διαδρομή στο δίσκο του χρήστη.

Ανοίγοντας το αρχείο, παρατηρούμε ένα μοναδικό τετραγωνικό παλμό στην αρχή τη αρχείου, με πλάτος -3dB, ακολουθούμενο από ένα σήμα σάρωσης ημιτόνου με στάθμη 0dB. Το μοτίβο αυτό επαναλαμβάνεται άλλες 34 φορές, κάθε φορά μειώνοντας τη στάθμη τόσο του τετραγωνικού παλμού, όσο και του ημιτόνου σάρωσης, κατά 1 dB. Φυσικά το παραγόμενο αρχείο διέγερσης αλλάζει σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που διαβάζει από το εκάστοτε preset.



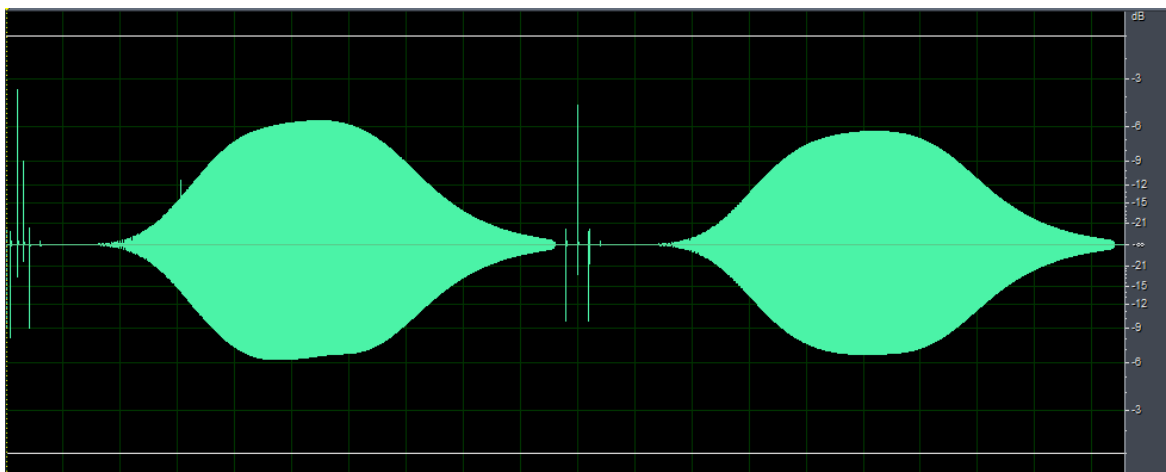
Εικόνα 5-8 Λεπτομέρεια σήματος διέγερσης όπως παράχθηκε από το NAT3



Εικόνα 5-9 Σύνολο κυματομορφής σήματος διέγερσης όπως παράχθηκε από το NAT3

Ο τετραγωνικός παλμός στην αρχή μπορεί να χρησιμοποιείται ως σήμα συγχρονισμού.

Αντίστοιχα παρουσιάζεται παρακάτω το σήμα εξόδου:



Εικόνα 5-10 Σήμα εξόδου διαδικασίας sampling μέσω NAT3, για τα δύο πρώτα ημίτονα σάρωσης

### 5.1.5 Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση

Έχοντας ολοκληρωθεί η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου, πλέον μπορεί αυτό να φορτωθεί στο δεύτερο κομμάτι του λογισμικού Nebula, που επιτρέπει την πραγματικού χρόνου εξομοίωση του υλικού.

Το λογισμικό Nebula3 διατίθεται σε μορφή VST plugin, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα DAW προγράμματα, που διαθέτουν τη σχετική λειτουργία. Ο ερευνητής χρησιμοποίησε το λογισμικό REAPER.

Δημιουργήθηκε ένα κενό κανάλι στο λογισμικό, όπου φορτώθηκε το Nebula3 (όχι το reverb instance), με το μοντέλο που δημιουργήθηκε νωρίτερα.



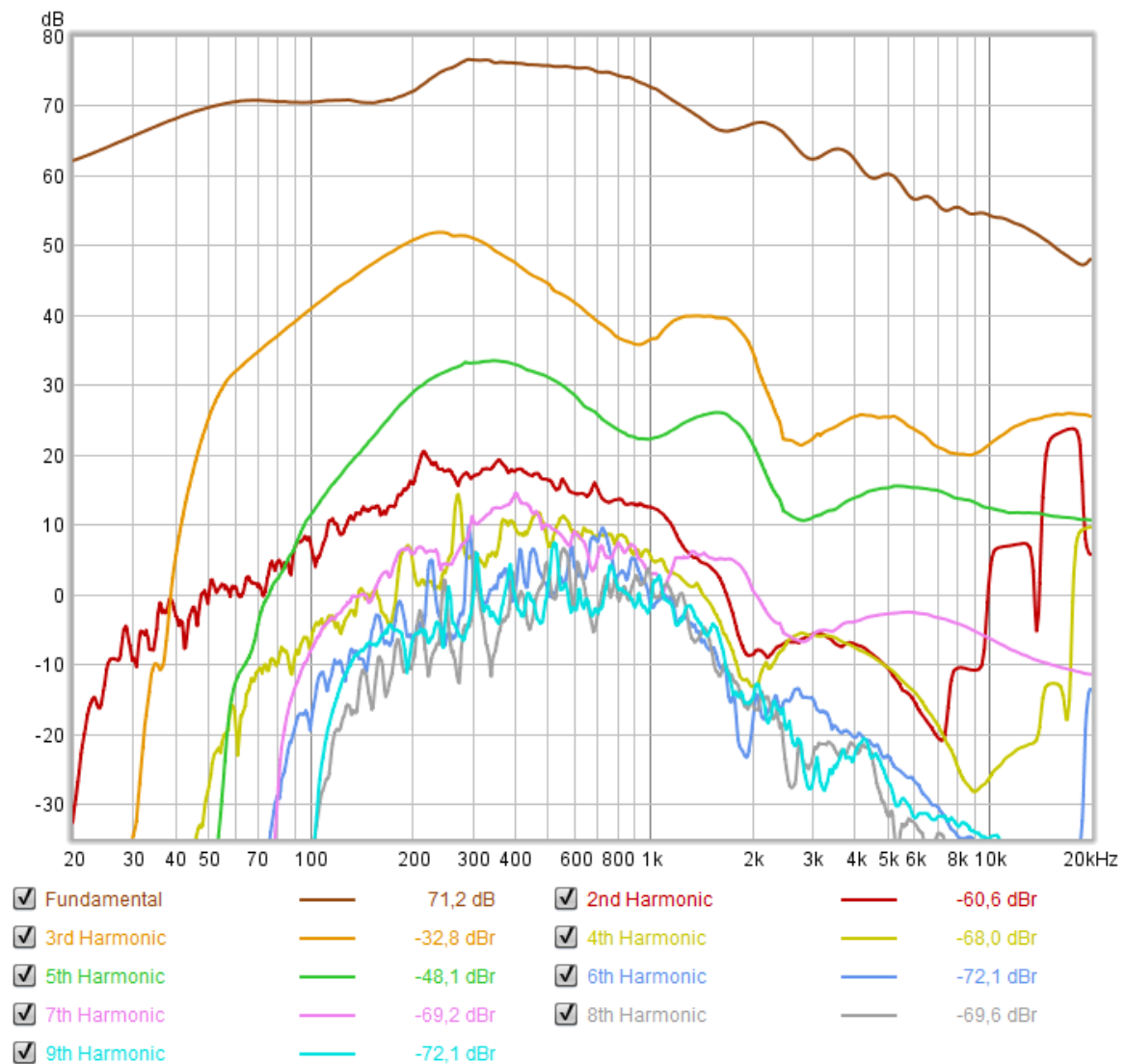
Εικόνα 5-11 Περιβάλλον Nebula3, με φορτωμένο το μοντέλο που δημιουργήθηκε από τον γραφών

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με διάφορες τιμές παραμέτρων (ποτενσιόμετρα στη δεξιά πλευρά), που όμως δεν επηρέασαν σημαντικά το αποτέλεσμα των μετρήσεων (καμπύλη απόκρισης, στάθμες αρμονικών).

Εφαρμόστηκε ένα σήμα ηλεκτρικής κιθάρας, και έγιναν δοκιμές με τις παραμέτρους του προγράμματος. Οι παράμετροι Attack και Release ρυθμίστηκαν στις ελάχιστες δυνατές τιμές (1ms) και η παράμετρος Drive στα 0dB. Η τελευταία παράμετρος, LIQDT δεν περιγράφεται στο manual, όμως για μικρές τιμές της παραμέτρου, δημιουργούνται τεχνουργήματα (artifacts) στον ήχο, ενώ για μεγάλες, κοντά στο 100%, ο ήχος επανέρχεται. Έτσι, ρυθμίστηκε στη μέγιστη τιμή.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στο κανάλι σήματα διέγερσης απλού ημιτόνου, στάθμης -6dBFS και συχνότητας 150Hz, και σήμα μέτρησης όπως προέκυψε από το REW, με τις εξής παραμέτρους: στάθμη -6dBFS, 20Hz-20kHz, 1 pass, length 2M, συχνότητας δειγματοληψίας 44.100Hz και ανάλυσης 24bit.

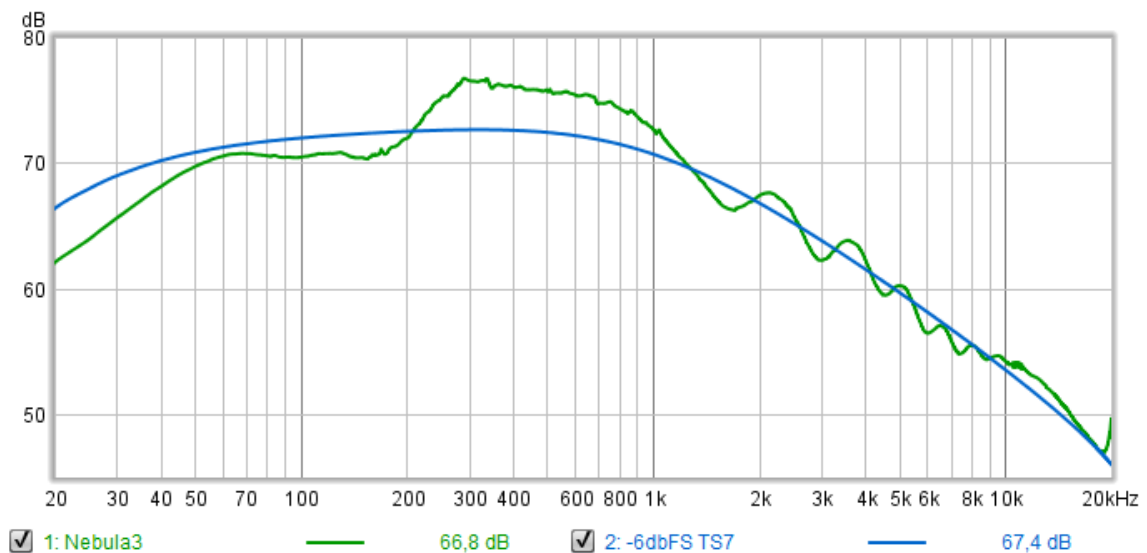
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.



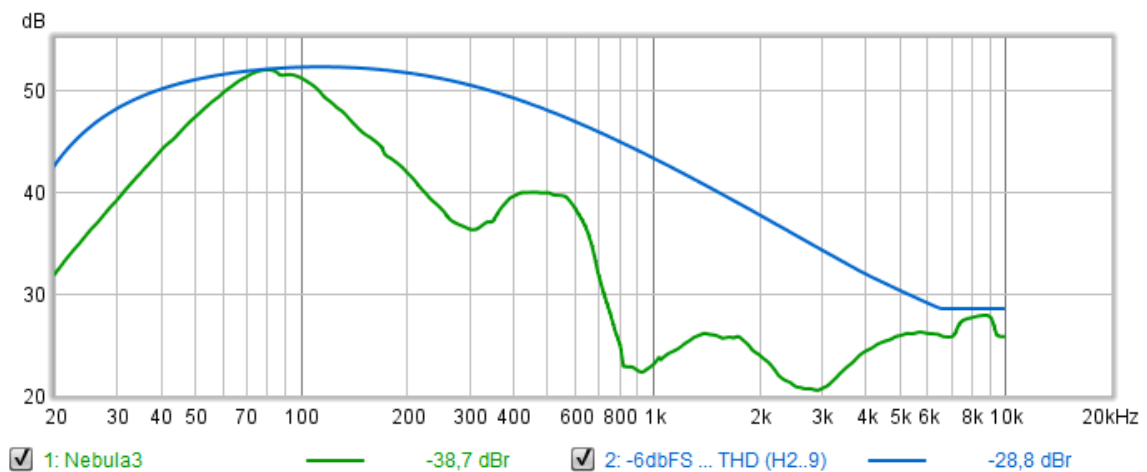
Εικόνα 5-12 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου Nebula3, -6dBFS

Παρατηρείται πως πράγματι έχει δημιουργηθεί αρμονικό περιεχόμενο, αφού υπάρχουν μετρήσιμες στάθμες αρμονικών. Έτσι, επιβεβαιώνεται πως το Nebula3 πράγματι μπορεί να εξομοιώσει παραμόρφωση. Η καμπύλη απόκρισης όμως του μοντέλου δεν έχει την ίδια ομοιομορφία που παρουσιάζεται στο πραγματικό υλικό (hardware), παρουσιάζοντας πολλές μεταπτώσεις, τόσο στην θεμελιώδη, όσο και στις υπόλοιπες αρμονικές. Παρ'όλα αυτά, οι όποιες διαφορές είναι σχετικά μικρές σε στάθμη, με τη μέγιστη να φτάνει μόλις τα 5dB.

Για σύγκριση, παρουσιάζεται παρακάτω η καμπύλη απόκρισης του μοντέλου Nebula3 σε σχέση με το πραγματικό υλικό (hardware), και η παράμετρος Total Harmonic Distortion, πάντα για στάθμη σήματος -6dBFS.



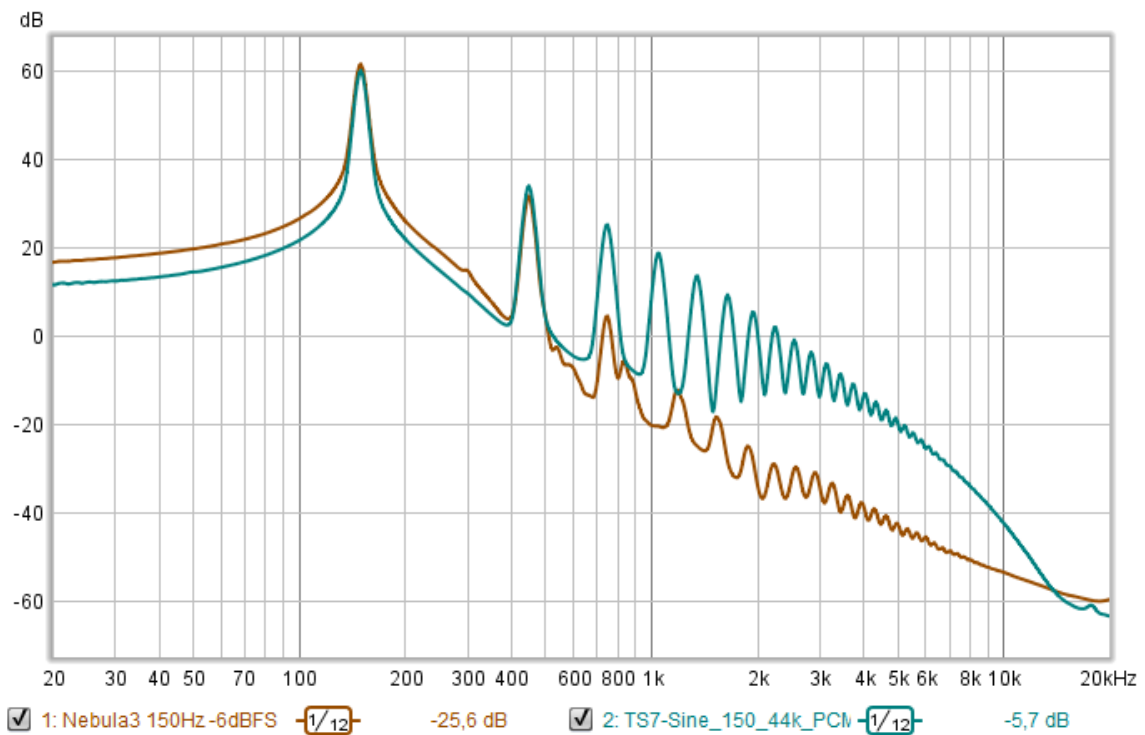
Εικόνα 5-13 Καμπύλες απόκρισης μοντέλου Nebula3 (πράσινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη)



Εικόνα 5-14 Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου Nebula3 (πράσινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (μπλε καμπύλη)

Παρατηρείται πως το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο είναι περιορισμένο στην περίπτωση του μοντέλου Nebula3, με την καμπύλη να μην ακολουθεί ακριβώς αυτή του πραγματικού υλικού.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε ημιτονικό σήμα, συχνότητας 150Hz, και στάθμης -6dBFS, η φασματική ανάλυση του οποίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, σε σχέση με την αντίστοιχη ανάλυση του σήματος που προκύπτει από το πραγματικό υλικό.



**Εικόνα 5-15** Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης Nebula3 (καφέ καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας

Με βάση την προηγούμενη μέτρηση, αναμένεται να εντοπιστεί χαμηλότερες στάθμες αρμονικών σε σχέση με το πραγματικό υλικό. Πράγματι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των αρμονικών, τόσο φθίνουν οι στάθμες στο μοντέλου Nebula3.

## 6. Μοντέλο TS7 με χρήση Deep Learning τεχνικών

### 6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Το 2019, ερευνητές από τη Φιλανδία δημοσίευσαν μελέτη σύμφωνα με την οποία προσομοιώνουν μη γραμμικά ηχητικά συστήματα παραμόρφωσης, κάνοντας χρήση Νευρωνικών Δικτύων (Damskågg, Juvela, & Välimäki, 2019).

Μελέτησαν τρία διαφορετικά συστήματα, μεταξύ των οποίων και το TS7.

Αντιμετωπίζουν το κάθε σύστημα με τη μέθοδο του Black Box, δηλαδή χωρίς να έχουν καμία πληροφορία σχετικά με τη σύσταση του συστήματος, παρά μόνο την έξοδο που παίρνουν, με χρήση ελεγχόμενης εισόδου.

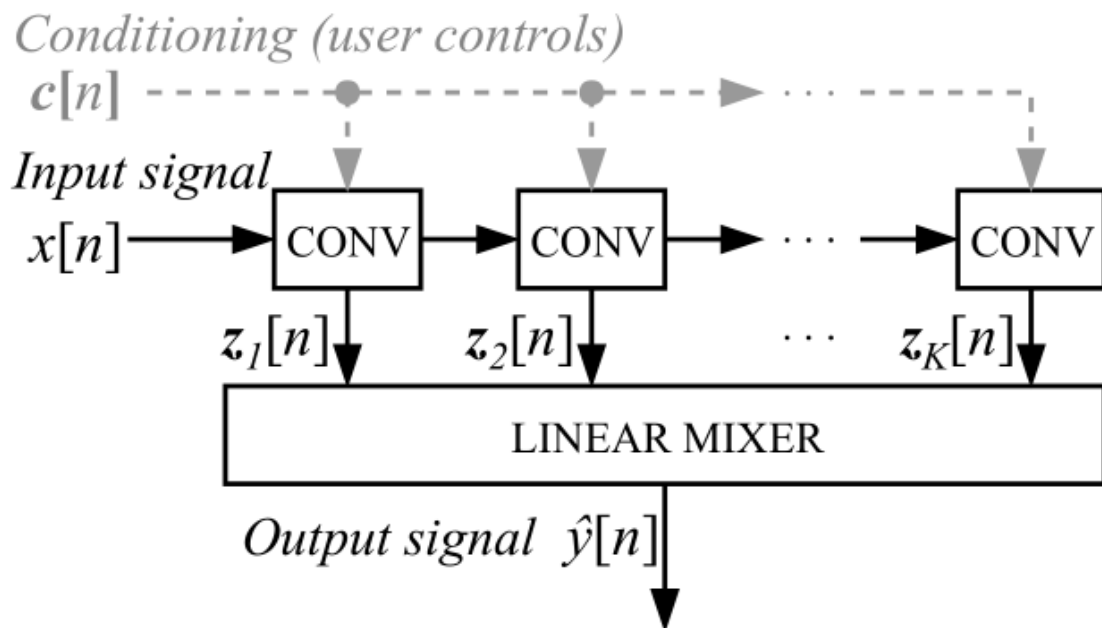


Figure 2: Proposed deep neural network model.

Εικόνα 6-1 Προτεινόμενο μοντέλο νευρωνικού δικτύου (Damskågg, Juvela, & Välimäki, 2019)

Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το νευρωνικό δίκτυο WaveNet για την εκπαίδευση του μοντέλου. Το μοντέλο αποτελείται από ένα πλήθος συνελίξεων, κάθε μία από τις οποίες είναι ένα μοντέλο Wiener: δηλαδή ένα γραμμικό φίλτρο, ακολουθούμενο από μία στατική μη-γραμμικότητα.

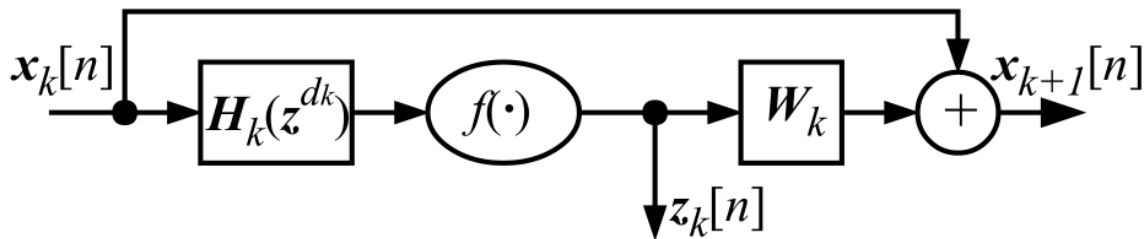


Figure 3: Block diagram of a single convolutional layer.

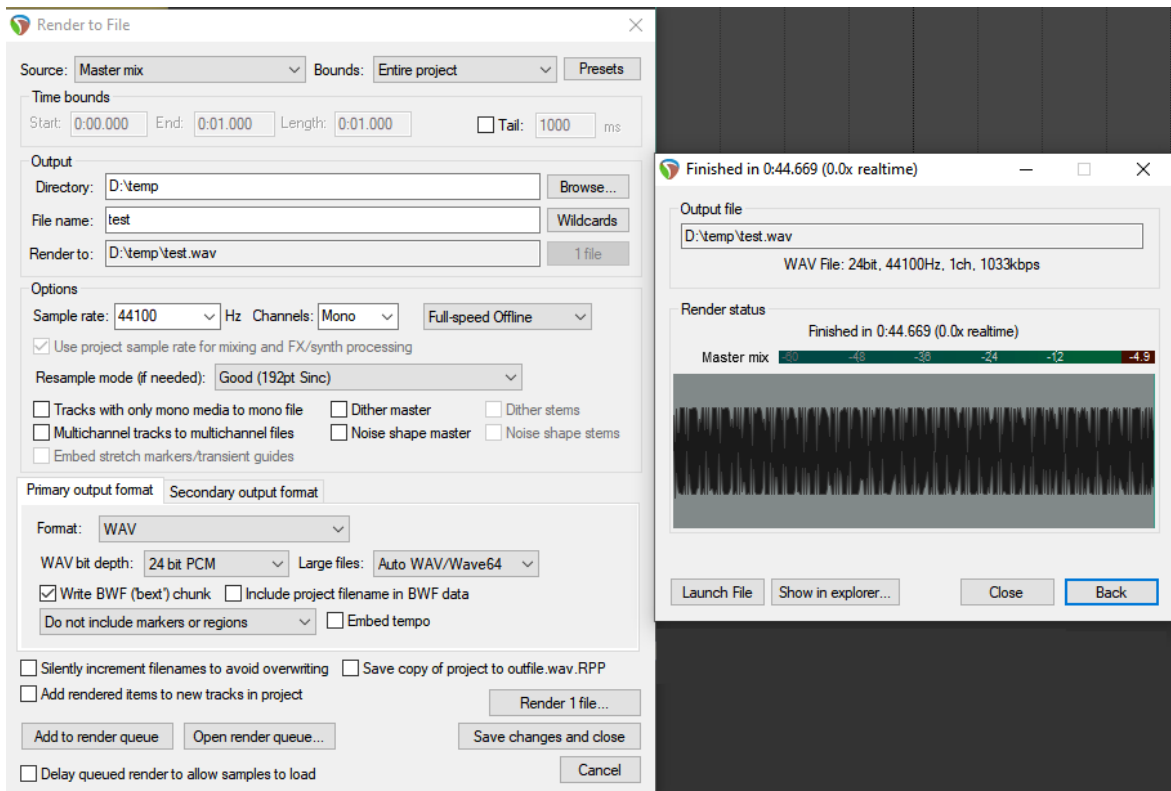
Εικόνα 6-2 Μπλοκ διάγραμμα μίας συνέλιξης

Οι ερευνητές δημιούργησαν το μοντέλο του TS7 για σταθερή κατάσταση, ίδια με αυτή που μελετάται σε αυτή την εργασία, δηλαδή όλα τα ποτενσιόμετρα του υλικού στη μέση.

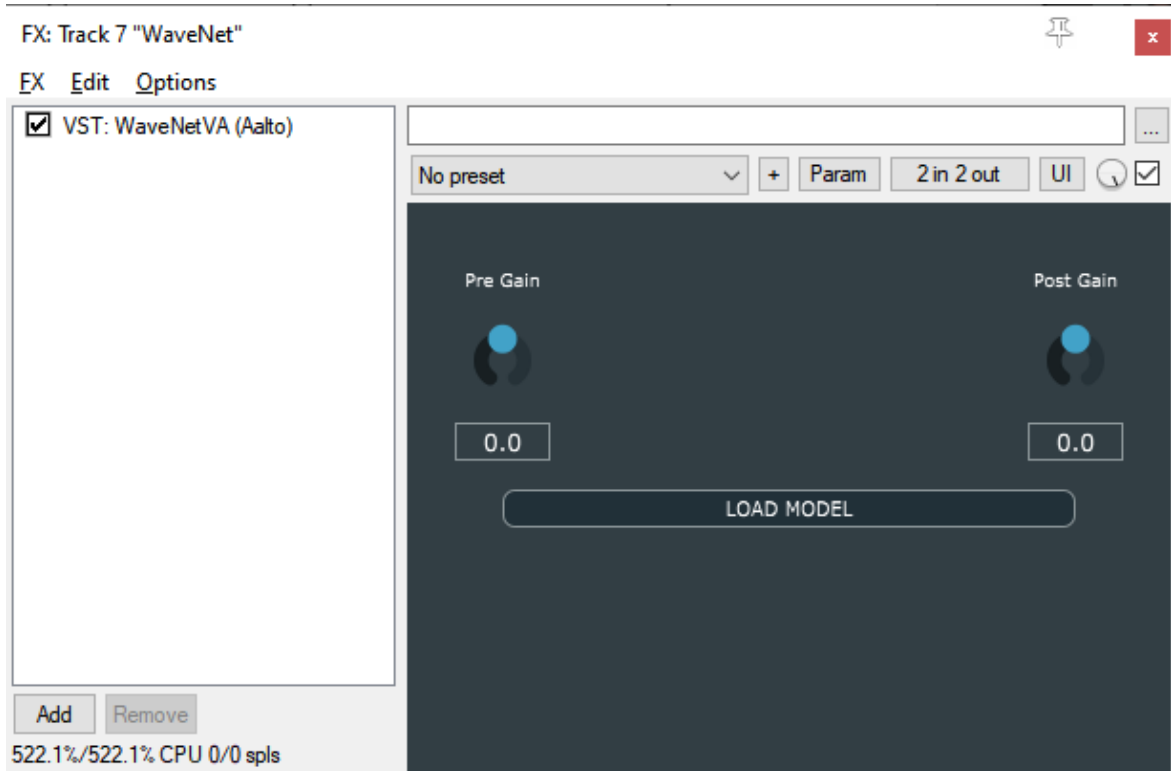
Τελικά δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα (WaveNet1, WaveNet2, WaveNet3), με αυξανόμενο βαθμό πολυπλοκότητας, και τελικής ακρίβειας. Ακόμη και το πιο πολύπλοκο από αυτά, μπορεί να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο σε ένα τυπικό υπολογιστή για την εποχή της συγγραφής της εργασίας. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, πως ο γραφών δεν αντιμετώπισε την ίδια συμπεριφορά, μιας και στον δικό του υπολογιστή/περιβάλλον, το λογισμικό έτρεχε πολύ αργά: συγκεκριμένα, για την επεξεργασία σήματος ενός δευτερολέπτου, χρειάστηκε 44 δευτερόλεπτα. Για τη συμπεριφορά αυτή μπορεί να φταίνε ασυμβατότητες μεταξύ των εκδόσεων των βιβλιοθηκών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της μεταγλώττισης (compilation).

Ο γραφών κατέβασε την τελική υλοποίηση που έκαναν διαθέσιμη ως εφαρμογή ανοιχτού κώδικα, και μέσω των λογισμικών JUCE, Framework για δημιουργία realtime ηχητικών εφαρμογών σε μορφή Steinberg VST (JUCE | JUCE, n.d.) και του Microsoft Visual Studio 2017 (Integrated Development Environment), δημιούργησε την εφαρμογή που μπορεί να φορτώσει τα παρεχόμενα μοντέλα.





Εικόνα 6-3 Στιγμιότυπο οθόνης που δείχνει πως για ηχητικό σήμα διάρκειας ενός δευτερολέπτου, χρειάστηκαν 44 για την επεξεργασία του μέσω WaveNet



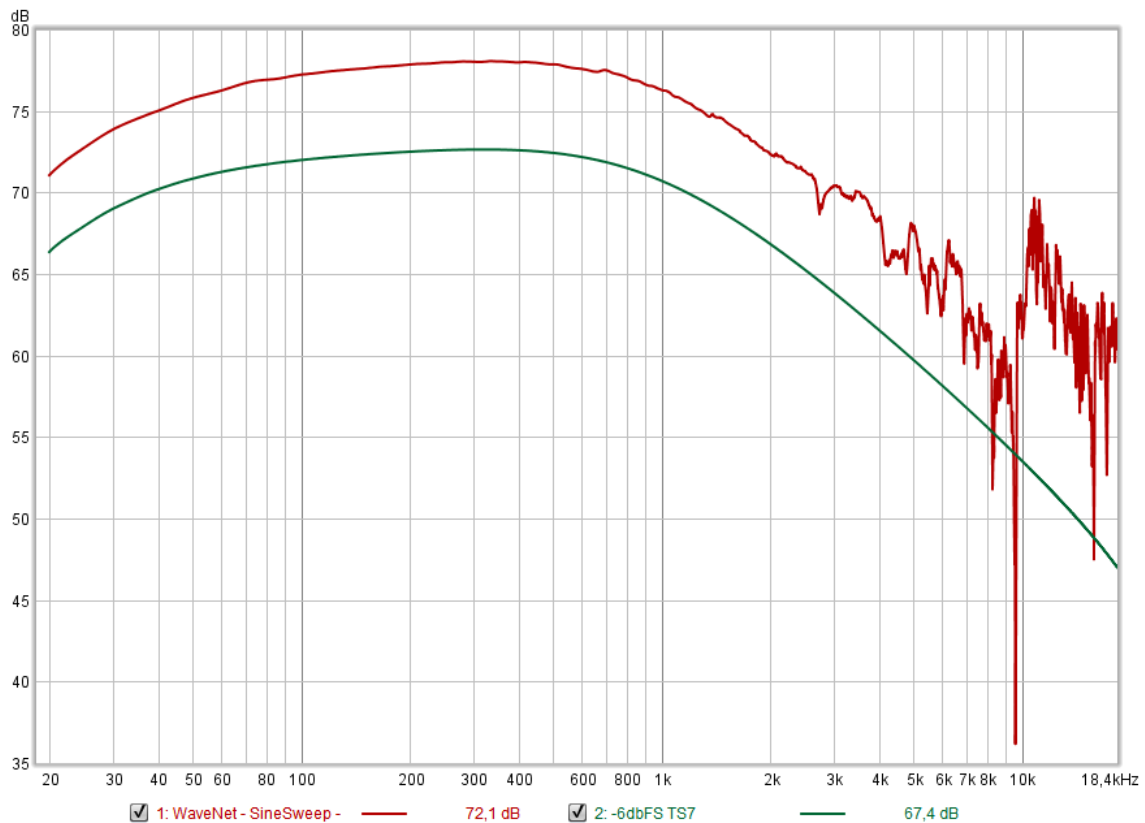
Εικόνα 6-4 Στιγμιότυπο οθόνης λογισμικού που δημιουργήθηκε μέσω JUCE-Visual Studio

Έχοντας τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν συνθετικά σήματα για την αξιολόγηση του συστήματος.

## 6.2 Χρήση του μοντέλου και ακουστική αξιολόγηση

Το παραγόμενο αρχείο VST φορτώθηκε στο λογισμικό Reaper, και χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο WaveNet3-ts7.json.

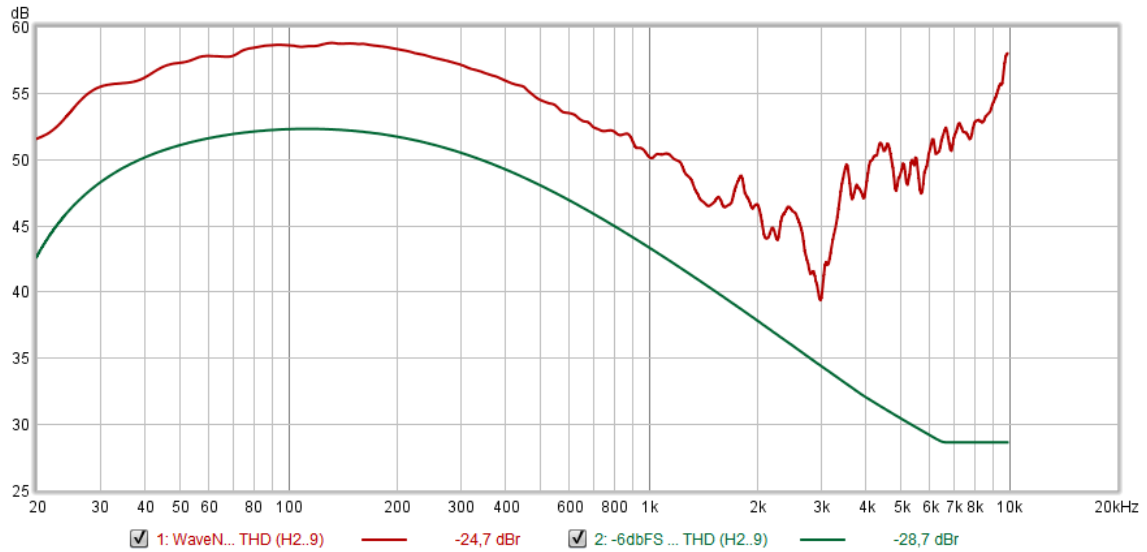
Για την αξιολόγηση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν συνθετικά σήματα, όπως και με τις περιπτώσεις των μοντέλων Nebula3, και Spice, πιο συγκεκριμένα: σήμα διέγερσης απλού ημιτόνου, στάθμης -6dBFS και συχνότητας 150Hz, και σήμα μέτρησης όπως προέκυψε από το REW, με τις εξής παραμέτρους: στάθμη -6dBFS, 20Hz-20kHz, 1 pass, length 2M, συχνότητας δειγματοληψίας 44.100Hz και ανάλυσης 24bit.



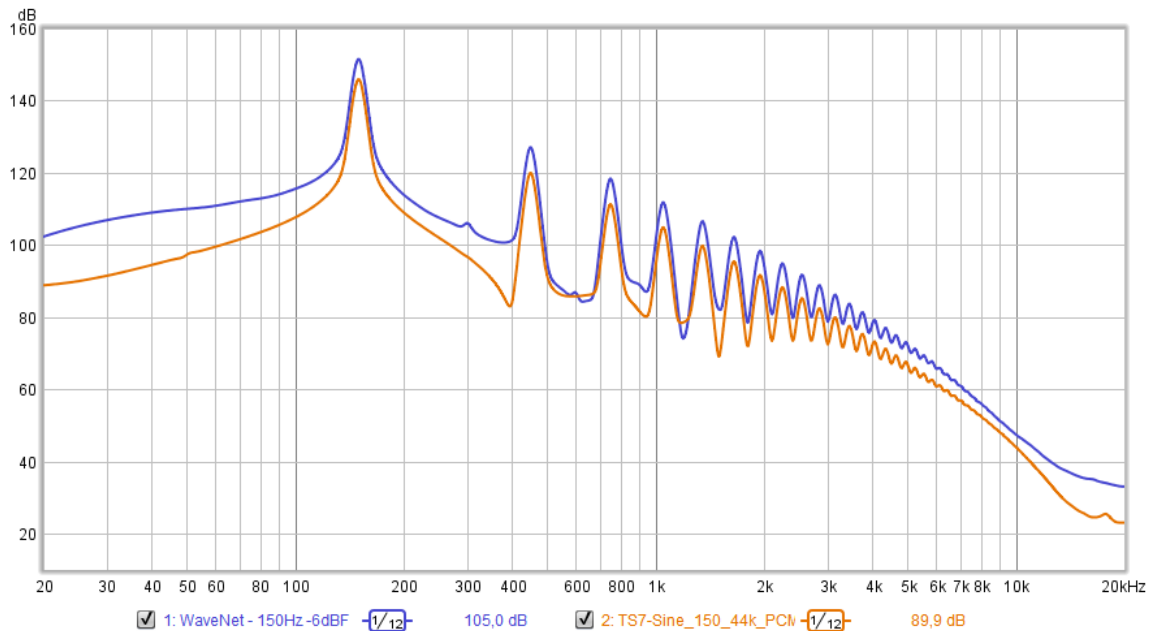
Εικόνα 6-5 Καμπύλη απόκρισης μοντέλου WaveNet (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη)

Παρατηρείται πως η καμπύλη απόκρισης του WaveNet μοντέλου, από τα 20Hz μέχρι και περίπου το 1kHz, είναι κατά περίπου 5dB υψηλότερη σε σχέση με αυτή του TS7, και την ακολουθεί πιστά. Από το 1kHz και πάνω, παρουσιάζεται σημαντική αστάθεια.

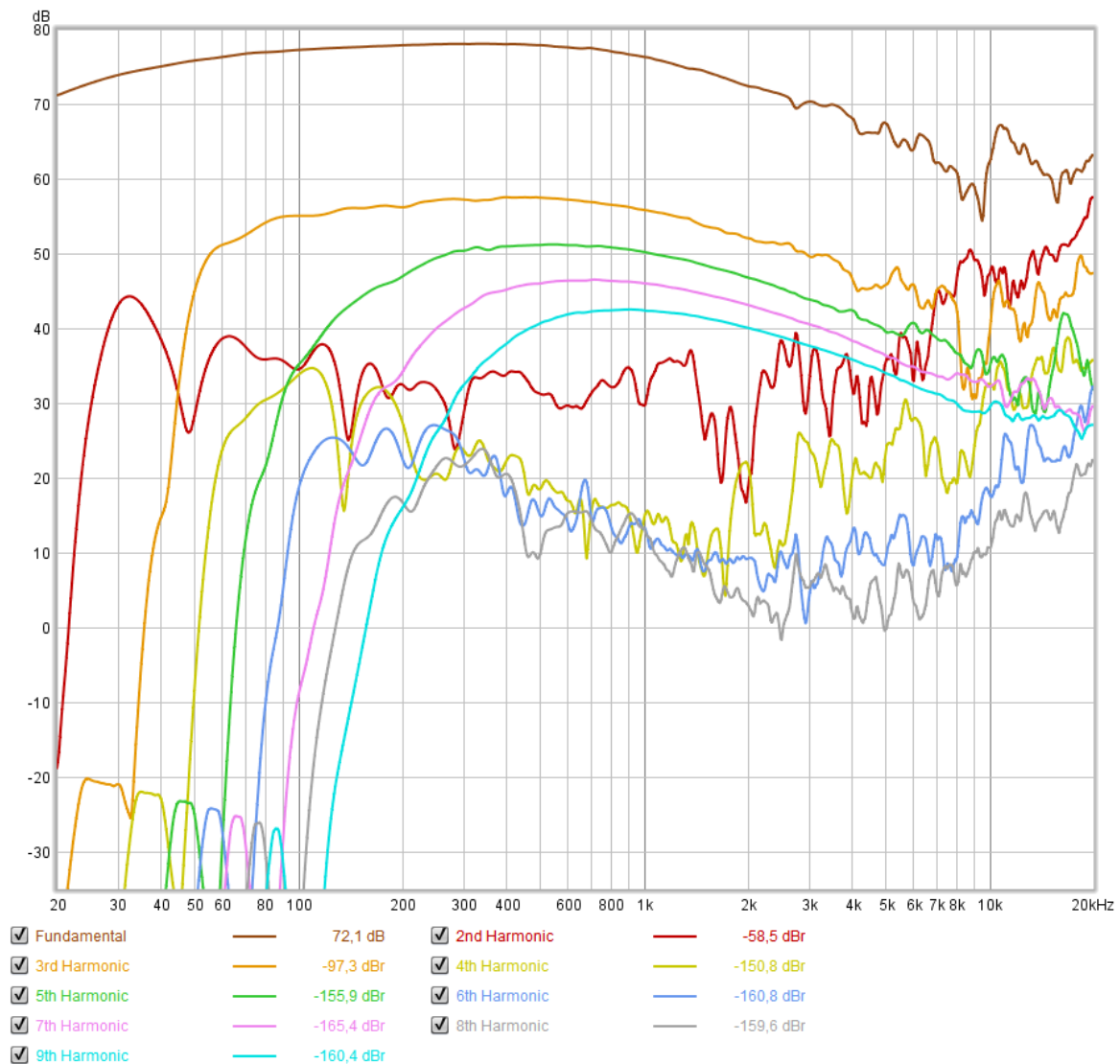
Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τη μορφή της καμπύλης THD, όπως φαίνεται παρακάτω:



**Εικόνα 6-6** Στάθμες παραμέτρου Total Harmonic Distortion μοντέλου WaveNet (κόκκινη καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πράσινη καμπύλη)



**Εικόνα 6-7** Φασματική ανάλυση σήματος 150Hz και στάθμης -6dBFS μέσα εξομοίωσης WaveNet (μπλε καμπύλη) και πραγματικού υλικού (πορτοκαλί καμπύλη) με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας



**Εικόνα 6-8 Στάθμες 9 πρώτων αρμονικών μοντέλου WaveNet, -6dBFS**

Παρατηρείται πως με τη μέθοδο εξομοίωσης βασισμένη στο WaveNet, το αρμονικό περιεχόμενο ακολουθείται αρκετά κοντά, τουλάχιστον για χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, ενώ παρατηρείται κάποια αστάθεια σε πιο ψηλές, μεγαλύτερες από 1kHz συχνότητες. Σε τεστ πραγματικών σημάτων κιθάρας, το αποτέλεσμα ήταν ακουστικά πολύ κοντά στο πραγματικό, χωρίς να αναγνωρίζονται ηχητικά τεχνουργήματα (artifacts).

## 7. Σύγκριση μοντέλων λογισμικού

### 7.1 Επιλογή πειραματικών σημάτων

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί σύγκριση του πραγματικού υλικού, με τις μεθόδους ψηφιακής μοντελοποίησης που παρουσιάστηκαν. Η σύγκριση θα γίνει χρησιμοποιώντας σήμα διέγερσης σάρωσης ημιτόνου σε διάφορες στάθμες, για την αποτύπωση της καμπύλης απόκρισης, και του THD (Total Harmonic Distortion) των πρώτων εννέα αρμονικών, όπως αυτά αναλύονται από το λογισμικό REW. Επιπλέον θα χρησιμοποιηθούν απλά ημίτονα σε διάφορες συχνότητες, για την περαιτέρω ανάλυση αρμονικού περιεχομένου.

Οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν για σήματα σε στάθμες και συχνότητες κατά το δυνατόν κοντά σε αυτά που έχουν προδιαγραφεί για το συγκεκριμένο υλικό, δηλαδή σε σήμα ηλεκτρικής κιθάρας.

Συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις για επίπεδα σήματος:

- -3dBFS
- -6dBFS
- -9dBFS

Όπως καταγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (4.2), το εύρος αυτό είναι τυπικό για παίξιμο ηλεκτρικής κιθάρας. Δεν περιλαμβάνει ακραίο, πολύ δυνατό, ή πολύ ήσυχο παίξιμο, που συνήθως είναι προβληματικό στη μελέτη, είτε λόγω πιθανού ψαλιδισμού του σήματος στην περίπτωση της υψηλής στάθμης, είτε λόγω χαμηλού SNR (Signal to Noise Ratio) στην περίπτωση της χαμηλής στάθμης.

Επιπλέον μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν για συγκεκριμένες συχνότητες, ώστε να γίνει σωστή φασματική ανάλυση των ανώτερων αρμονικών που παράγονται. Οι συχνότητες είναι οι εξής:

- 82Hz ~ E2 (82,41Hz)
- 330Hz ~ E4 (329,64Hz)
- 1.319Hz ~ E6 (1318,64Hz)

Οι συχνότητες είναι οι στρογγυλοποιημένες στο κοντινότερο ακέραιο νότες E2, E4 και E6. Μια εξάχορδη ηλεκτρική κιθάρα, σε τυπικό κούρδισμα (E-A-D-G-B-E), και 24 τάστα, έχει

εύρος από νότα E2 (81,41Hz) μέχρι E6 (1.318,64Hz). Έτσι, μελετώνται οι 2 ακραίες τιμές, και μία ενδιάμεση.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, όλες οι μετρήσεις γίνονται με τα ποτενσιόμετρα του TS7 στις μέσες τιμές.

Χρησιμοποιούνται κοινά χρώματα στα παρακάτω διαγράμματα, για συνοχή μεταξύ των αποτελεσμάτων, αν και τα χρώματα αναφέρονται και ξεχωριστά στον υπότιτλο (legend) κάθε εικόνας. Συγκεκριμένα:

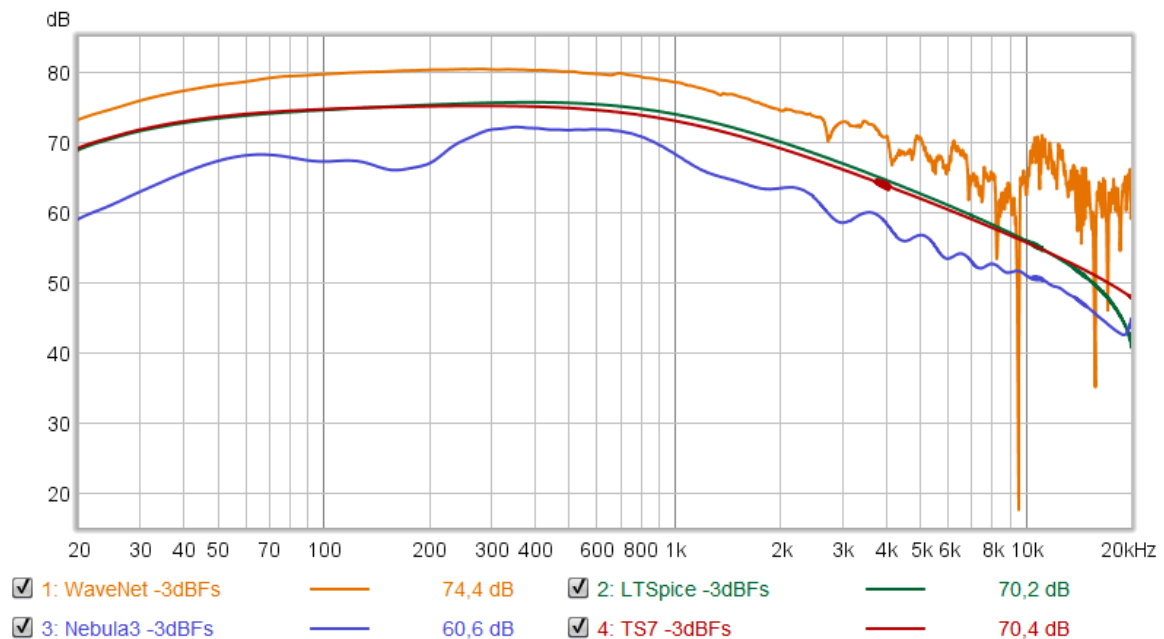
Σύστημα	Χρώμα
TS7	Κόκκινο
Nebula3	Μπλε
LTSpice	Πράσινο
WaveNet	Πορτοκαλί

Πίνακας 5 Αντιστοίχιση χρωμάτων-καμπυλών

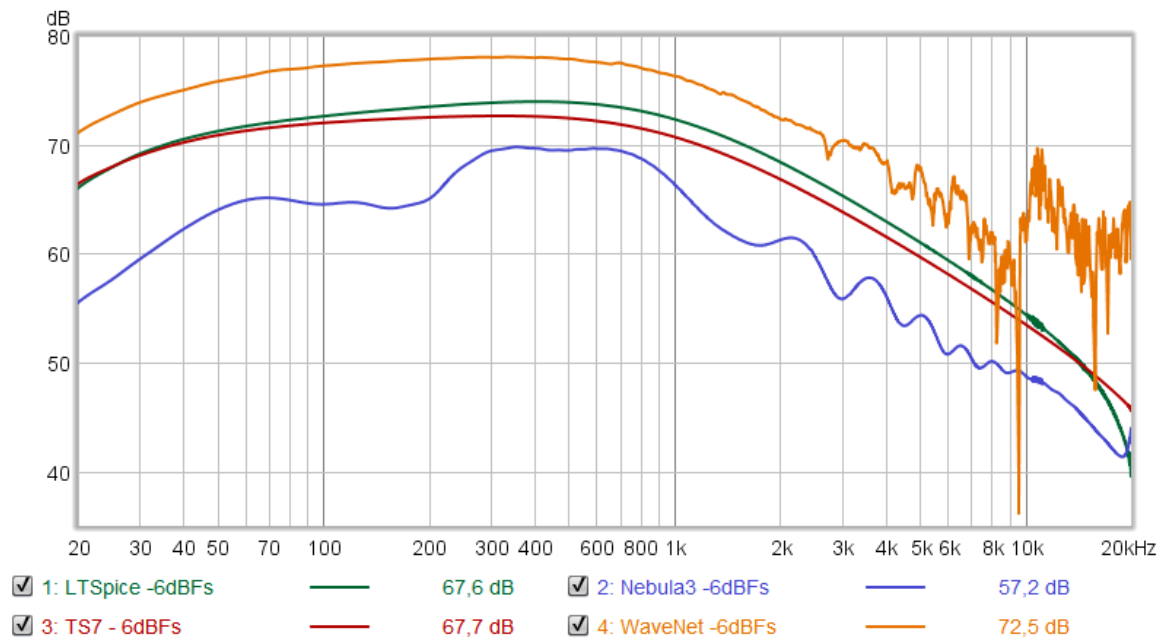
Για την αποτύπωση των παρακάτω σχημάτων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό REW.

## 7.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

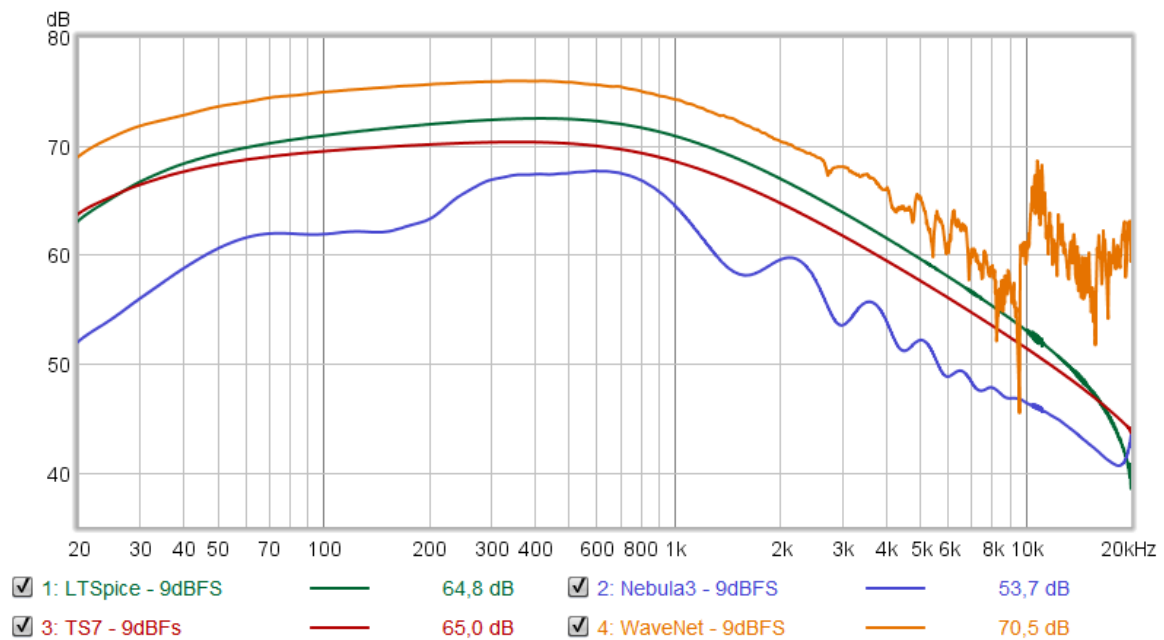
### 7.2.1 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης



Εικόνα 7-1 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -3dBFS, 20Hz-20kHz

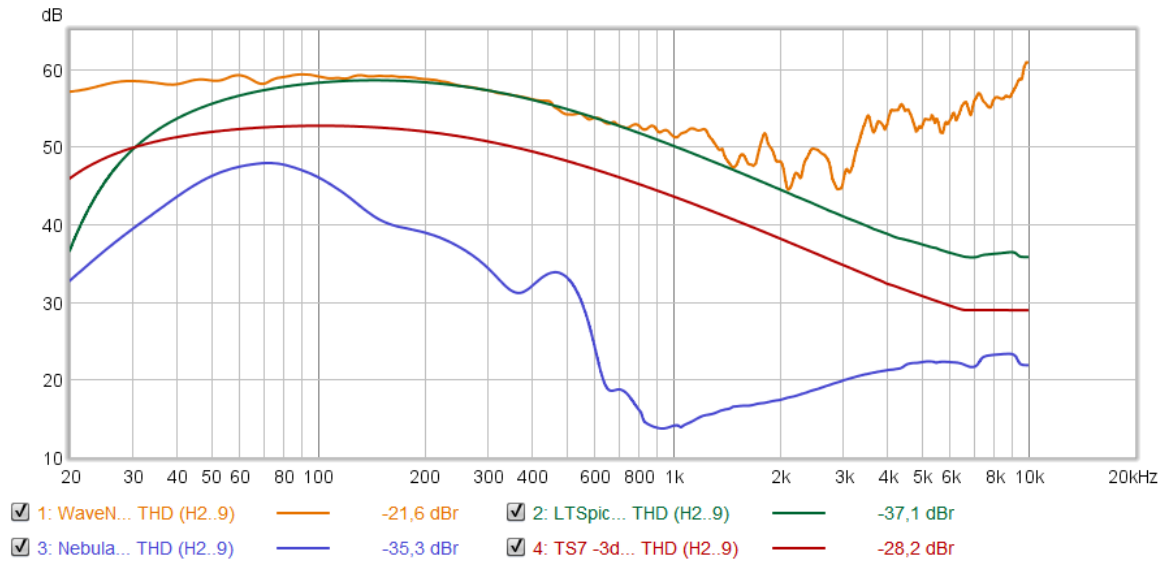


Εικόνα 7-2 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -6dBFS, 20Hz-20kHz

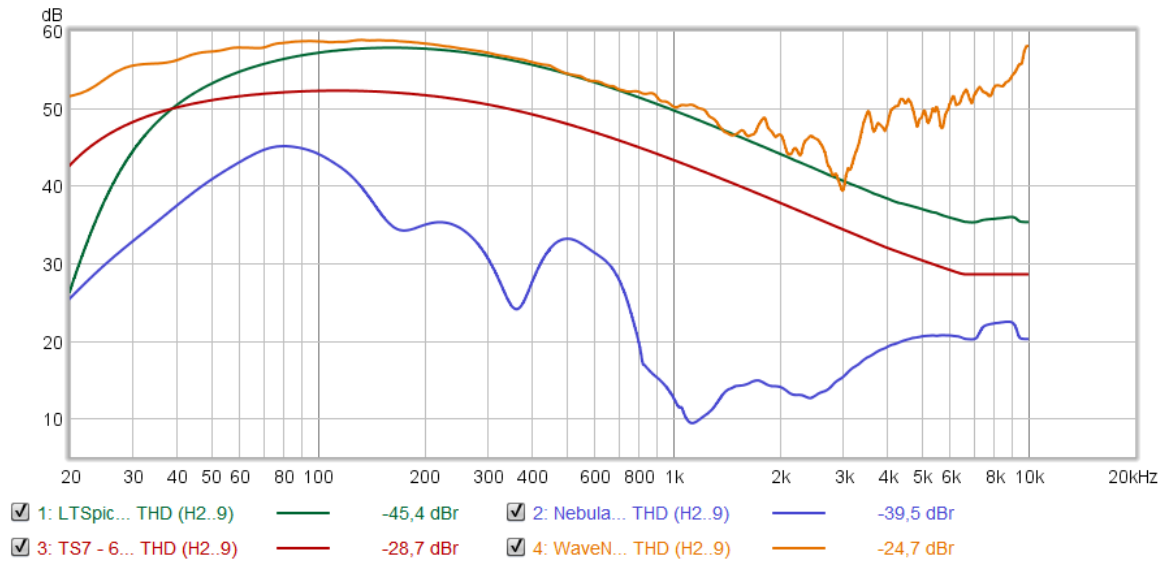


Εικόνα 7-3 Συγκριτικές καμπύλες απόκρισης στάθμης -9dBFS, 20Hz-20kHz

## 7.2.2 Στάθμη Total Harmonic Distortion (THD)

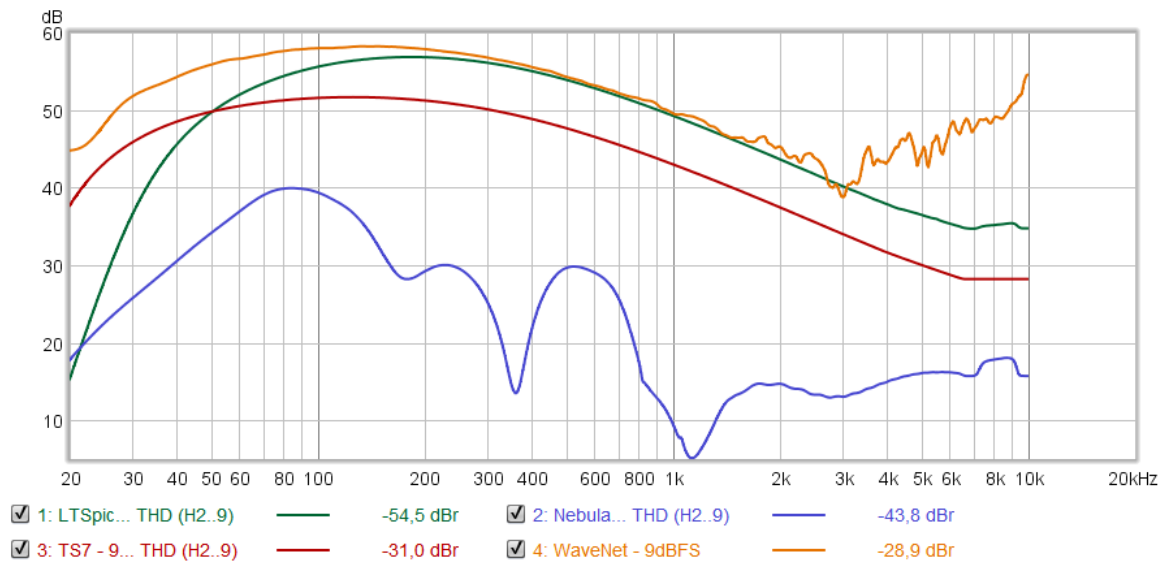


Εικόνα 7-4 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -3dBFS



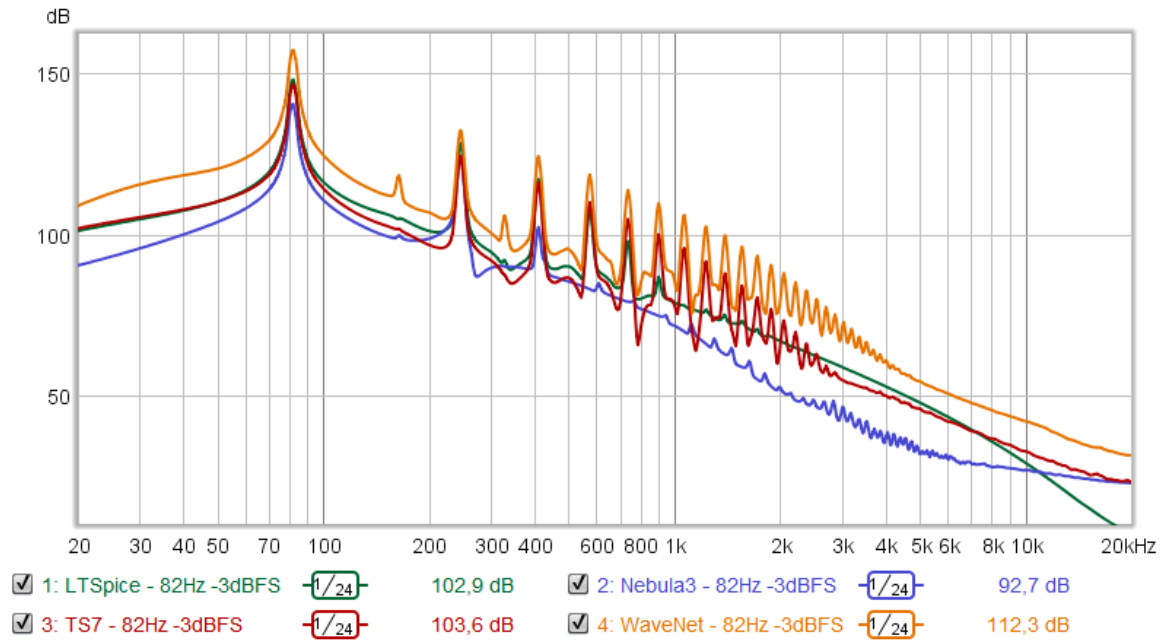
Εικόνα 7-5 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -6dBFS



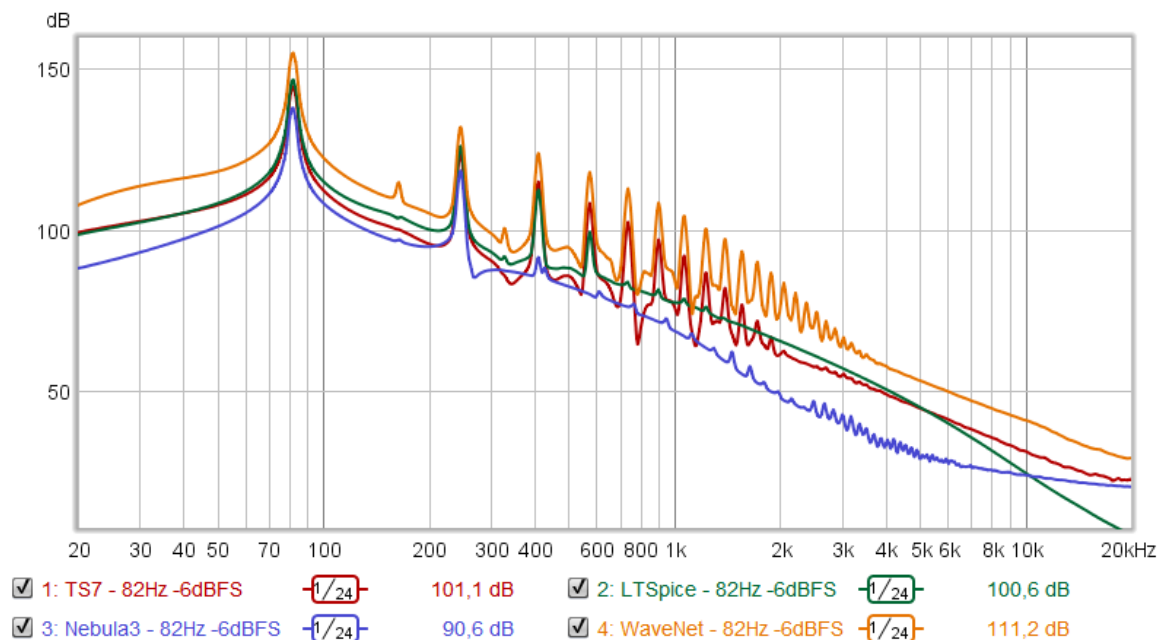


Εικόνα 7-6 Συγκριτικές καμπύλες THD, για σήμα εισόδου -9dBFS

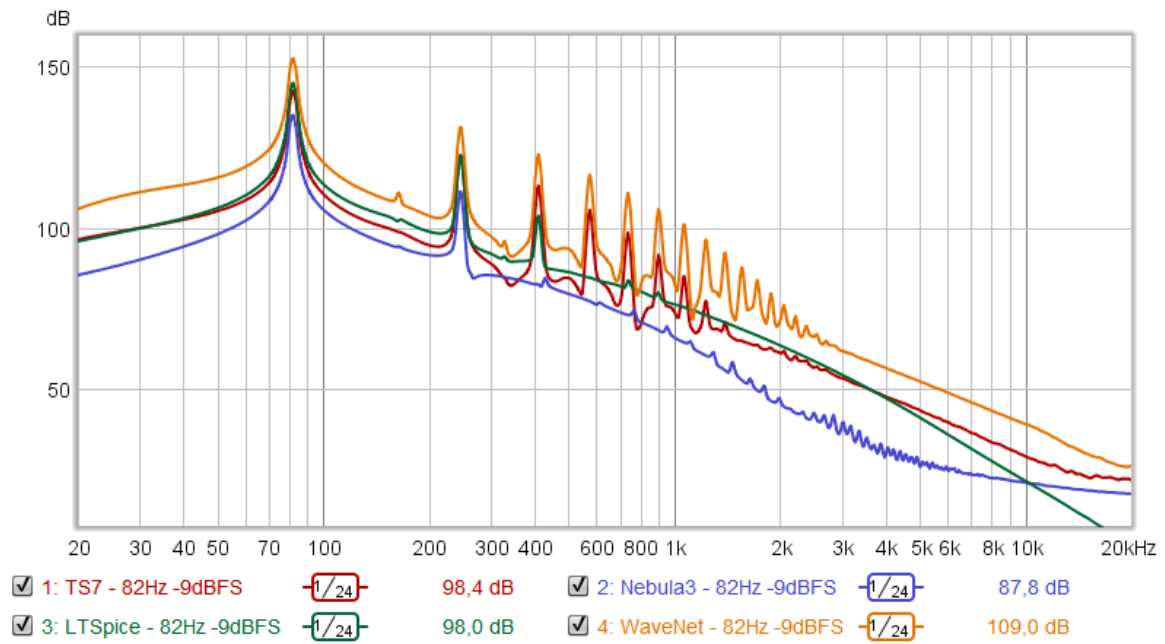
### 7.2.3 Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 82Hz



Εικόνα 7-7 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

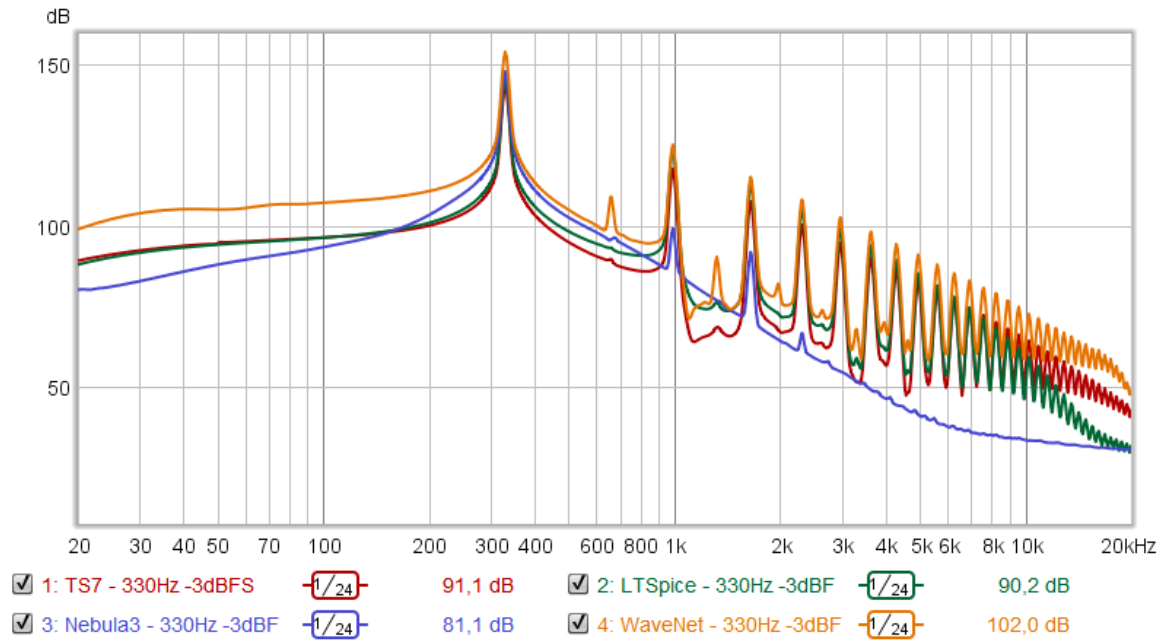


Εικόνα 7-8 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

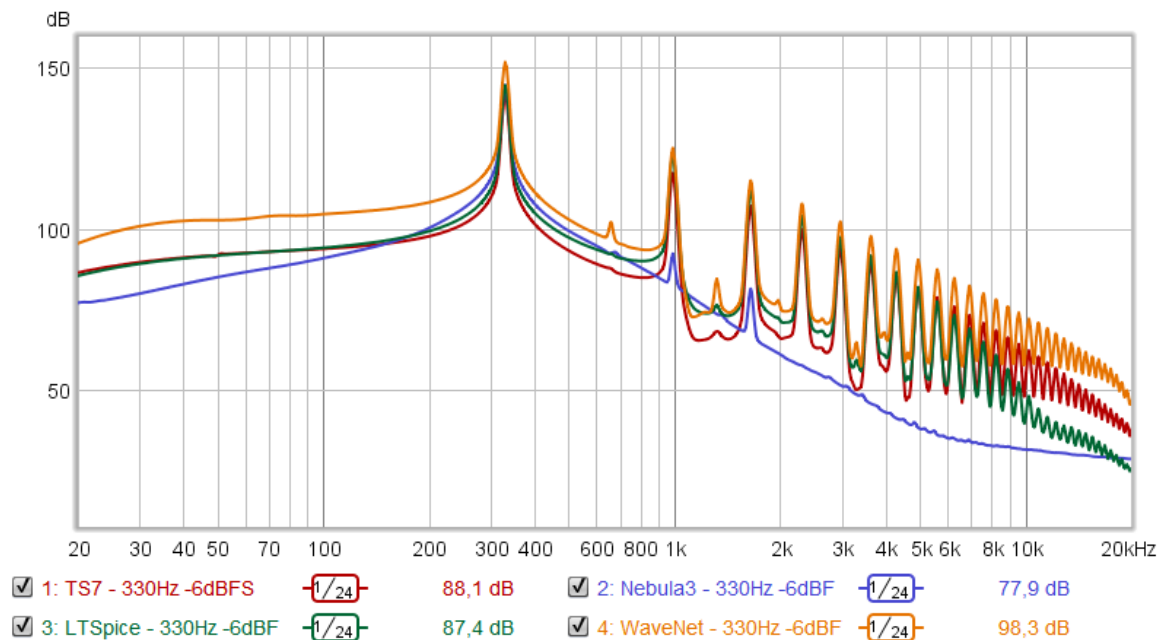


Εικόνα 7-9 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 82 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

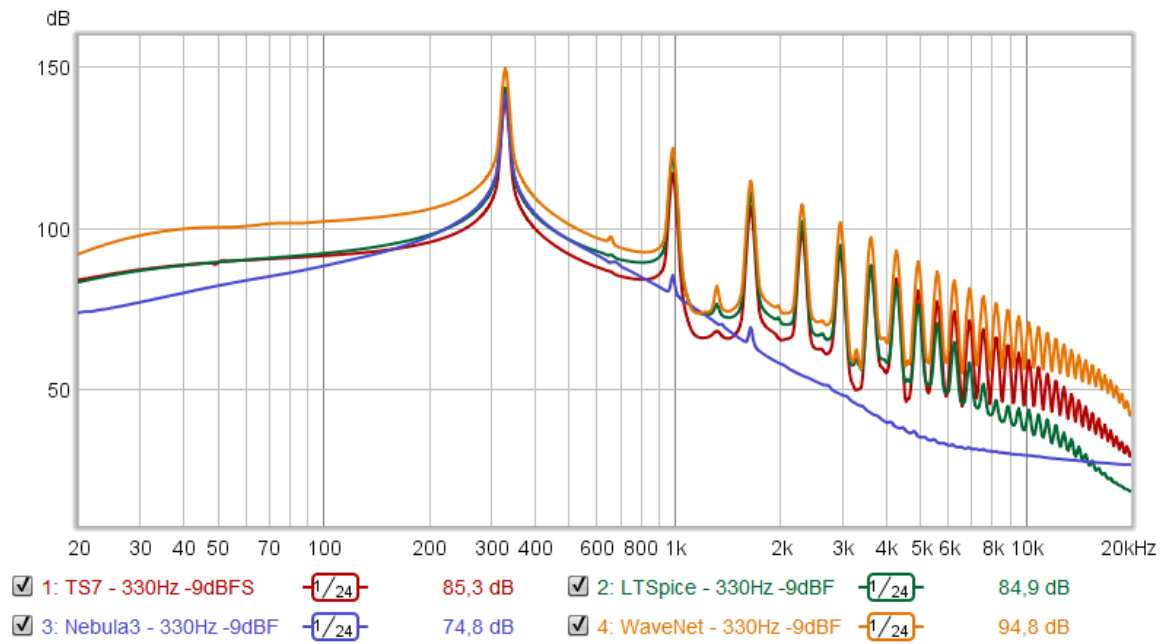
### 7.2.4 Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 330Hz



Εικόνα 7-10 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

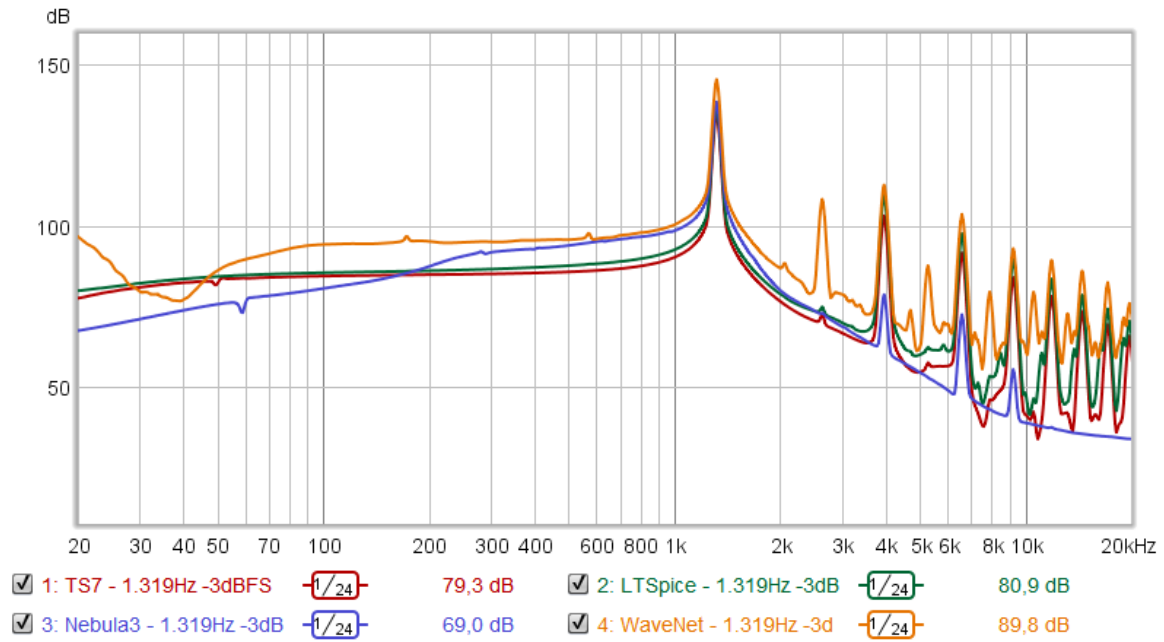


Εικόνα 7-11 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

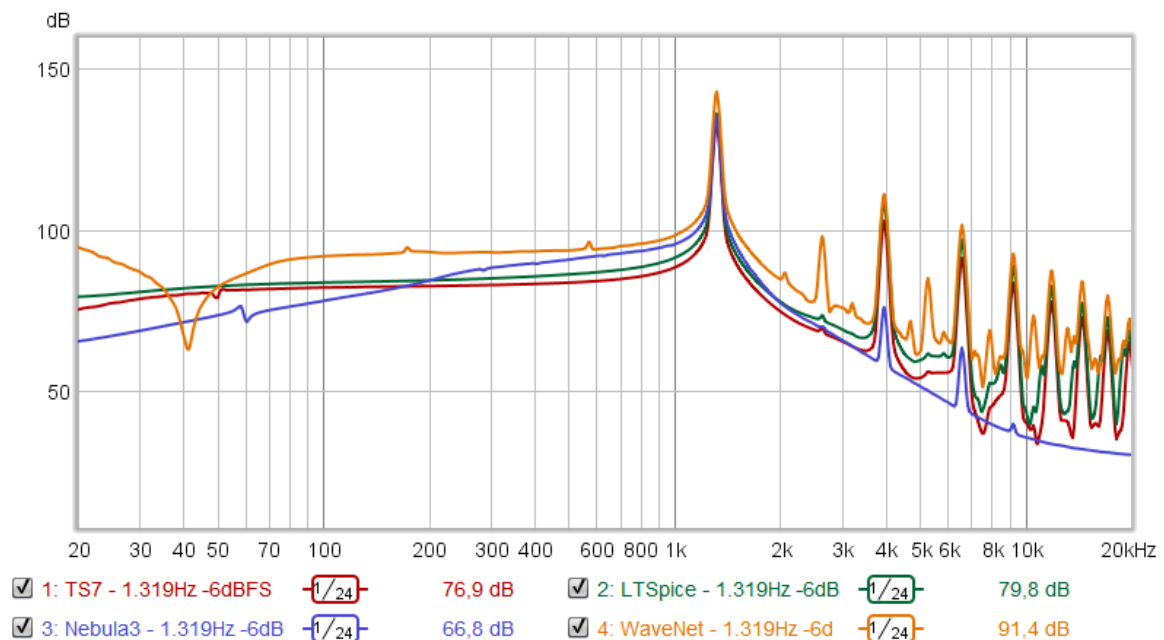


Εικόνα 7-12 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 330 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

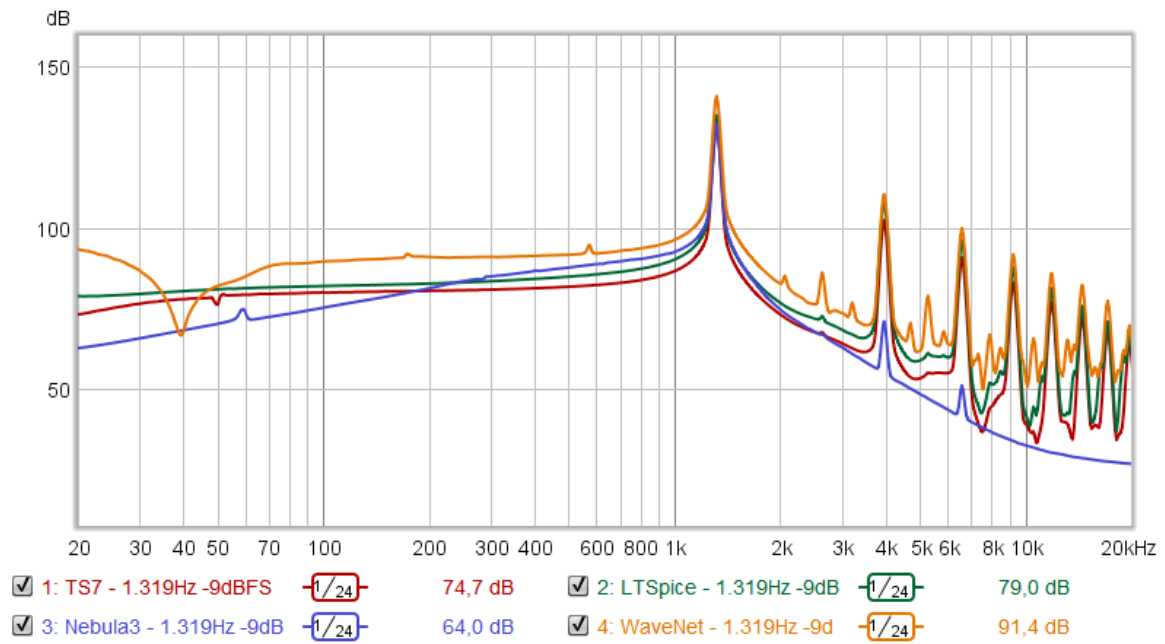
### 7.2.5 Στάθμη αρμονικών για σήμα ημιτόνου 1.319Hz



Εικόνα 7-13 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -3dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας



Εικόνα 7-14 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -6dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας



Εικόνα 7-15 Στάθμες αρμονικών για σήμα ημιτονικό 1.319 Hz, στάθμης -9dBFS, Smoothing 1/24 οκτάβας

### 7.3 Εκτίμηση αποτελεσμάτων

Παρατηρείται πως μεταξύ των τριών μεθόδων εξομοίωσης, η εξομοίωση μέσω LTSpice ακολουθεί πιο κοντά την καμπύλη απόκρισης του TS7. Η καμπύλη του Nebula 3 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε στάθμη, ακόμα και σε χαμηλές συχνότητες, που οι υπόλοιποι μέθοδοι δείχνουν να αντιδρούν σωστά. Η καμπύλη απόκρισης του WaveNet δείχνει να είναι αρκετά κοντά, μέχρι και περίπου το 1kHz, συχνότητα πάνω από την οποία παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις.

Οι διάφορες στάθμες σήματος εισόδου δεν δείχνουν να επηρεάζουν ιδιαίτερα το αποτέλεσμα των καμπύλων απόκρισης, πλην της περίπτωσης του WaveNet, όπου παρατηρείται μικρότερες διακυμάνσεις στις ψηλές συχνότητες, όσο πιο δυνατό είναι το σήμα εισόδου.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και για τις στάθμες THD, δηλαδή σταθερά μεγάλες διακυμάνσεις στη απόκριση του Nebula3, και καλή συμπεριφορά για τις υπόλοιπες μεθόδους. Και πάλι παρατηρείται ασταθής συμπεριφορά για το WaveNet σε συχνότητες μεγαλύτερες από 1kHz, όπου παρατηρείται αύξηση του αρμονικού περιεχομένου, ιδιαίτερα για συχνότητες πάνω από 3kHz.

Η συμπεριφορά των συστημάτων δε δείχνει να επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη στάθμη σήματος εισόδου.

Η ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου για τις διάφορες στάθμες/συχνότητες δείχνει παρόμοια εικόνα: καλή συμπεριφορά του LTSpice, καλή συμπεριφορά του WaveNet μέχρι και τα πρώτα kHz, από όπου και μετά παρουσιάζεται αδικαιολόγητη αύξηση της στάθμης των αρμονικών, και κακή συμπεριφορά του Nebula3, όπου τόσο ο αριθμός, αλλά και οι στάθμες των αρμονικών είναι πολύ χαμηλότερα σε σχέση με το αρχικό σύστημα.



## 8. Συμπεράσματα

Μετά τη μελέτη των αποτελεσμάτων, μπορούμε να κρίνουμε τις μεθόδους με βάση την ακρίβειά τους σε σχέση με το αρχικό υλικό (TS7).

### 8.1 Μοντέλο LTSpice

Η μοντελοποίηση μέσω λογισμικού LTSpice έφερε τα πιο κοντινά αποτελέσματα, χωρίς όμως να είναι εκατό τοις εκατό ακριβές. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η ακρίβεια του κυκλώματος είναι άμεσα συνυφασμένη με την ακρίβεια των επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν. Συνεπώς, καλύτερα μοντέλα των παθητικών και ενεργών στοιχείων θα έφερναν καλύτερα αποτελέσματα. Επί πλέον, λογισμικά τύπου Spice άλλων κατασκευαστών, πάλι μπορεί να φέρουν διαφορετικά, καλύτερα ή χειρότερα αποτελέσματα. Στα θετικά λοιπόν του συγκεκριμένου τρόπου μοντελοποίησης είναι η ακρίβεια του αποτελέσματος, στα αρνητικά όμως η δυσκολία της δημιουργίας του μοντέλου, και η αναγκαία επεξεργαστική ισχύς που απαιτείται κατά την λειτουργία του.

Καταρχάς απαιτείται πλήρη πρόσβαση στο κύκλωμα του προς μελέτη συστήματος, που το κατατάσσει σε μέθοδο «άσπρου κουτιού» (white box), που σημαίνει πως υπάρχει πρόσβαση σε κάθε υποσύστημα της συσκευής. Όμως αυτό δεν θα πρέπει να θεωρείται πάντοτε δεδομένο. Πολλοί κατασκευαστές μπορεί να έχουν καλύψει στοιχεία της ηλεκτρονικής πλακέτας με μαύρη κόλλα (epoxy), αφαίρεση της οποίας οδηγεί στην καταστροφή του κυκλώματος, ακριβώς για να αποτρέψουν την αντιγραφή του κυκλώματος. Επί πλέον, σε περίπτωση εξωτικών ή σπάνιων στοιχείων, η μοντελοποίηση κρίνεται πολύ δύσκολη έως και αδύνατη, αν ο κατασκευαστής δε δίνει μοντέλα για τα στοιχεία αυτά. Δύσκολη επίσης κρίνεται η μοντελοποίηση πιο πολύπλοκων στοιχείων, όπως μετασχηματιστών, ή λυχνίων κενού, μοντέλα των οποίων ακόμη και σήμερα δεν αντιδρούν ακριβώς όπως τα αντίστοιχα υλικά.

Τέλος ακόμη και αν η ακρίβεια του μοντέλου είναι υψηλή, η χρήση αυτού είναι αργή, και σε καμία περίπτωση δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

### 8.2 Μοντέλο Nebula3

Η μοντελοποίηση μέσω του λογισμικού Nebula3 έφερε μέτρια αποτελέσματα. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συμπεριλαμβάνεται το γεγονός πως δε χρειάζεται πρόσβαση στο εσωτερικό της συσκευής, μιας και αντιμετωπίζεται ως «γκρίζο κουτί» (gray box

modelling). Είναι όμως γνωστός ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να αναλυθεί, και οι σχετικές εξισώσεις που θα το πετύχουν. Επί πλέον οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο Nebula3 μπορούν και μοντελοποιούν και συστήματα χρονικά μεταβλητά, κάτι που δε μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία.

Οι δυνατότητες που δίνει σε επίπεδο αρμονικών, είναι σχετικά περιορισμένες, μιας και λαμβάνει υπόψη μόνο τις πρώτες 10 αρμονικές. Συνήθως όμως είναι αρκετές για να αποδώσει σωστά το χαρακτήρα πολλών συστημάτων με μικρά επίπεδα παραμόρφωσης, όπως compressors, limiters και άλλα.

Το τελικό αποτέλεσμα που αποδίδει, είναι άμεσα συνυφασμένο με τον τρόπο που δημιουργήθηκε το μοντέλο. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, οι μεταβλητές που ζητάει το λογισμικό είναι πολυάριθμες, ενώ δεν αναλύονται με σαφήνεια στο παρεχόμενο εγχειρίδιο. Πιθανώς να μπορούσε να προκύψει καλύτερο αποτέλεσμα, με περαιτέρω τροποποιήσεις των μεταβλητών.

### **8.3 Μοντέλο WaveNet**

Τέλος η μοντελοποίηση με χρήση νευρωνικών δικτύων απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, τουλάχιστον για συχνότητες μέχρι και το 1kHz.

Το προς εξομίωση σύστημα αντιμετωπίζεται ως μαύρο κουτί, και έτσι απαιτείται πρόσβαση μόνο στην είσοδο και την έξοδο αυτού, κάτι που είναι σαφώς θετικό. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν από μόνα τους να ανακαλύψουν σχέσεις μεταξύ εισόδου και εξόδου, κατά τη διάρκεια εκμάθησης του προς μελέτη συστήματος από το δίκτυο, κάτι που το κάνει τρομερά ευέλικτο στο εύρος των συστημάτων που μπορεί να εξομιώσει. Επιπλέον, η επεξεργαστική ισχύς που χρειάζεται για να τρέξει το μοντέλο είναι σχετικά μικρή, έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει σε πραγματικό χρόνο, αν και ο γραφών δεν είδε τέτοια συμπεριφορά, με το λογισμικό να χρειάζεται πολλαπλάσιο χρόνο.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

Acustica Audio. (n.d.). *NAT3 Quick Start*. Acustica Audio.

Analog Devices. (n.d.). *LTspice | Design Center | Analog Devices*. Retrieved from Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

Anselmi, J. J. (2017, Φεβρουάριος 23). *Ride the Feedback: A Brief History of Guitar Distortion - VICE*. Retrieved from VICE - Original reporting and documentaries on everything that matters in the world.: [https://www.vice.com/en\\_ca/article/wn7ja9/ride-the-feedback-a-brief-history-of-guitar-distortion](https://www.vice.com/en_ca/article/wn7ja9/ride-the-feedback-a-brief-history-of-guitar-distortion)

Buskin, R. (2009, September). *The Kinks 'You Really Got Me' | Classic Tracks*. Retrieved from Sound On Sound | The World's Premier Music Recording Technology Magazine: <https://www.soundonsound.com/people/kinks-you-really-got-me-classic-tracks>

Damskögg, E.-P., Juvela, L., & Välimäki, V. (2019). Real-Time Modeling of Audio Distortion Circuits with Deep Learning. *Proceedings of the 16th Sound & Music Computing Conference SMC 2019*, (pp. 332-339). Malaga, Spain.

Davies, R. (1964). You Really Got Me [Recorded by T. Kinks].

Del Sordo, G., & Spratley, O. (2007). *Nebula3 User's Guide*.

Electrosmash. (2020, Ιανουάριος). *ElectroSmash - Tube Screamer Circuit Analysis*. Retrieved from ElectroSmash - Electronics for Audio Circuits.: <https://www.electrosmash.com/tube-screamer-analysis>

exabugs. (2016, 04 06). *How to use LTspice (adding parts)*. Retrieved from <https://qiita.com/exabugs/items/5bfb3a575ce05bb6cbde>

Farina, A. (2000). *Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique*. Parma.

Farina, A. (2007, October 5-8). Realtime auralization employing a not-linear, not-time-invariant convolver. *Audio Engineering Society Convention Paper*.

- Focusrite Audio Engineering. (n.d.). Retrieved from [https://resource.focusrite.com/sites/default/files/focusrite/downloads/7095/userguide\\_esaffirepro24eng05.pdf](https://resource.focusrite.com/sites/default/files/focusrite/downloads/7095/userguide_esaffirepro24eng05.pdf)
- Guitar Verdict. (Πρόσβαση 26 Νοεμβρίου 2019). *Ibanez TS9 Tube Screamer Review - Guitar Verdict*. Retrieved from Guitar Verdict - Guitar reviews, amp reviews, effect reviews, blog and more [Guitar Verdict | Guitar reviews, amp reviews, effect reviews, blog and more: https://www.guitarverdict.com/effect/ibanez-ts9-tube-screamer-review/](https://www.guitarverdict.com/effect/ibanez-ts9-tube-screamer-review/)
- Houghton, M. (2009, Αύγουστος). *Focusrite Saffire Pro 24*. Retrieved from Sound On Sound | The World's Premier Music Recording Technology Magazine: <https://www.soundonsound.com/reviews/focusrite-saffire-pro-24>
- Ibanez. (n.d.). Retrieved from PCB Layout Bottom: [http://www2.ibanez.com/parts/2002\\_PARTS/electronics/tonelok/pcb\\_layout/TS7-01bottom.pdf](http://www2.ibanez.com/parts/2002_PARTS/electronics/tonelok/pcb_layout/TS7-01bottom.pdf)
- Ibanez. (n.d.). *Mechanical BOM*. Retrieved from [http://www2.ibanez.com/parts/2003\\_PARTS/electronics/tonelok/mechanism\\_parts/TS7.html](http://www2.ibanez.com/parts/2003_PARTS/electronics/tonelok/mechanism_parts/TS7.html)
- Ibanez. (n.d.). *PCB Layout Top*. Retrieved from [http://www2.ibanez.com/parts/2002\\_PARTS/electronics/tonelok/pcb\\_layout/TS7-02top.pdf](http://www2.ibanez.com/parts/2002_PARTS/electronics/tonelok/pcb_layout/TS7-02top.pdf)
- Ibanez. (n.d.). *TS7 Electronics BOM*. Retrieved from [http://www2.ibanez.com/parts/2003\\_PARTS/electronics/tonelok/electric\\_parts/TS7.html](http://www2.ibanez.com/parts/2003_PARTS/electronics/tonelok/electric_parts/TS7.html)
- Ibanez. (n.d.). *TS7 Schematic*. Retrieved from [http://www2.ibanez.com/parts/2002\\_PARTS/electronics/tonelok/circuit%20diagram/TS7-01.pdf](http://www2.ibanez.com/parts/2002_PARTS/electronics/tonelok/circuit%20diagram/TS7-01.pdf)
- Ibanez. (n.d.). *TS7 Specifications*. Retrieved from [http://www2.ibanez.com/parts/2003\\_PARTS/electronics/tonelok/spec/TS7.html](http://www2.ibanez.com/parts/2003_PARTS/electronics/tonelok/spec/TS7.html)
- Jaeger, R. C. (1997). *Microelectronic Circuit Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc.

- Jagger, M., & Richards, K. (1965). (I Can't Get No) Satisfaction [Recorded by T. R. Stones]. *JUCE / JUCE*. (n.d.). Retrieved from <https://juce.com/>
- Keen, R. (1998). *The Technology of the Tube Screamer*. Retrieved from GEO The Guitar Effects Oriented Web Page: [http://www.geofex.com/Article\\_Folders/TStech/tsxtech.htm](http://www.geofex.com/Article_Folders/TStech/tsxtech.htm)
- Mulcahy, J. (n.d.). *REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software*. Retrieved from REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software: <https://www.roomeqwizard.com/>
- New Japan Radio co., Ltd. (2016, 6 10). *NJM4558 / NJM4558D NJM4558M NJM4558L NJM4558V NJM4558E / DUAL OPERATIONAL AMPLIFIER*. Retrieved from <https://www.njr.com/semicon/products/NJM4558.html>
- Orman, J. (2002). *Guitar Pickup Signal*. Retrieved from <http://www.muzique.com/lab/pick.htm>
- Panasonic. (n.d.). *MA2B150 (MA150), MA2B162 (MA162) Specification Sheet*. Retrieved from [https://www.mikrocontroller.net/attachment/407958/MA2B150\\_\\_001.pdf](https://www.mikrocontroller.net/attachment/407958/MA2B150__001.pdf)
- Reilly, N. (2015, 11 18). *LTSpice simulations of guitar pedals*. Retrieved from Wherein The Chicken: <http://cushychicken.github.io/posts/ltspice-tube-screamer/>
- Sennewald, H. (2003, 12 23). *LTSpice@groups.io | Files*. Retrieved from [https://groups.io/g/LTSpice/files/z\\_yahoo/Lib/Potentiometer](https://groups.io/g/LTSpice/files/z_yahoo/Lib/Potentiometer)
- Thompson, A. (2019, Αύγουστος 15). *The Story of the Tube Screamer - GuitarPlayer.com*. Retrieved from Electric & Acoustic Guitar Gear, Lessons, News, Blogs, Video, Tabs & Chords - GuitarPlayer.com: <https://www.guitarplayer.com/gear/the-story-of-the-tube-screamer>
- Walker, M. (2008, February). *Acustica Audio Nebula 3*. Retrieved from <https://www.soundonsound.com/reviews/acustica-audio-nebula-3>
- Πακτίτης, Σ. (2002). *Φίλτρα LC, ενεργά, Διακοπόμενων Πυκνωτών*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

## Παράρτημα Α – Προδιαγραφές κάρτας ήχου Focusrite Saffire Pro24

### Performance Specifications

#### Instrument Inputs (Inputs 1 and 2)

- Frequency Response: 20Hz - 20kHz +/- 0.1dB
- Gain Range: +13dB to +60dB
- THD+N: 0.004% (measured with 0dBu input and 20Hz/22kHz bandpass filter)
- Noise: -87dBu (20Hz/22kHz bandpass filter)

#### Analogue Audio Outputs (Outputs 1-6)

- 6 Electronically Balanced Outputs
- Maximum Output Level (0dBFS): +16dBu
- THD+N: 0.001% (0dBFS input, 20Hz/22kHz bandpass filter)

Εικόνα A-1 Χαρακτηριστικά εισόδων και εξόδων κάρτας ήχου Focusrite Saffire PRO 24, όπως φαίνονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή (Focusrite Audio Engineering)

## Παράρτημα Β – Λίστες υλικών TS7

BOTTOM PCB					
NO.	Mkr.	Q'TY	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		1	A1	91071240-01	BATTERY SNAP SN-3-1 100MM
2		1	C1	91155714-00	C,MYLAR 0.02U50VJ
3		2	C16,C43	91177780-40	C,ELEC 0.47U63V(4x5)P=2.5
4		1	C18	91158386-20	C,CERAMIC TP51P50V
5		1	C31	91177770-40	C,ELEC0.22U50V (4x5)P=2.5
6	PING HSIAN	1	C32	91177550-21	C, ELEC 1U50V(4x5)P2.5
7		1	C33	91177770-40	C,ELEC0.22U50V (4x5)P=2.5
8	TAI YANG	1	C34	91155710-00	C, MYLAR 0.047M 50VJ
9		1	C37	91173055-40	C, ELEC 100U25V(MS5)P=2.5
10		1	C38	91173054-40	C, ELEC 47U25V(MS5) P=2.5
11		2	C44,C45	91174990-40	C,ELEC 1U50V(BP)P=2.5MM
12		2	D3,D4	91650273-50	DIODE MA-150(TP)
13	TOSHIBA(T)	1	D7	91650205-50	DIODE LT 1N4003 TP 0.6MM
14		1	J3	91445169-00	DC POWER JACK(SCD-014-5)
15		1	JP3	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
16		1	P101	91432310-20	PLUG B3B-PH-3P (RED)
17	JST	1	P102	91432310-00	PLUG B3B-PH 3P
18	JST	1	P201	91432330-00	PLUG 5P B5P-PH-K
19	JST	1	P301	91432340-00	PLUG B6B-PH 6P
20		2	J501,J502	91445174-00	SOCKET 604A-06PGBSAA3
21		2	R1,R28	91130720-50	RESISTOR R-16 TP JFT 1K
22	DAN ZAN	2	R5,R13	91130960-50	RESISTOR R-16 TP JFT 10K
23	DAN ZAN	2	R26,R54	91130960-50	RESISTOR R-16 TP JFT 10K
24	DAN ZAN	1	R27	91131130-50	RESISTOR R-16 TP JFT 51K
25		2	R30,R47	91130720-50	RESISTOR R-16 TP JFT 1K
26	DAN ZAN	1	R31	91130780-50	RESISTOR R-16 TP JFT 1.8K
27		1	R49	91130720-50	RESISTOR R-16 TP JFT 1K
28		1	R50	91130560-50	RESISTOR R-16 TP JFT 220
29		2	R53,R65	91131370-50	RESISTOR R-16 TP JFT 510K
30	DAN ZAN	2	R59,R60	91130960-50	RESISTOR R-16 TP JFT 10K
31	DAN ZAN	1	R61	91130940-50	RESISTOR R-16 TP JFT 8.2K
32		1	R66	91131370-50	RESISTOR R-16 TP JFT 510K
33	DAN ZAN	1	R85	91130880-50	RESISTOR R-16 TP JFT 4.7K
34	TOSHIBA	2	TR1,TR2	91633094-20	TR, 2SC-1815GR(TP)
35	JRC	1	U2	91670081-00	IC NJM4558D (8P)

36		2	W10,W11	97888306-10	JUMP WIRE P=10MM
37		1	W13	97888306-10	JUMP WIRE P=10MM
38		4	W14-W17	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
39		1	W19	97888306-05	JUMP WIRE P=5MM
40		2	W27,W30	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
41		2	W3,W8	97888306-10	JUMP WIRE P=10MM
42		1	W32	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
43		2	W34,W35	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
44		2	W5,W6	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM

**Πίνακας 6** Λίστα ηλεκτρονικών υλικών κύριας, κάτω πλακέτας (bottom PCB) (Ibanez)

FUNCTION SW PCB					
NO.	Mkr.	Q'TY	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		2	C40,C47	91158231-21	C, CERAMIC 0.047M 50VZ TP
2	KCK	2	C41,C42	91158001-20	C, CERAMIC TP 0.001M 50VK
3	KCK	2	C48,C49	91158001-20	C, CERAMIC TP 0.001M 50VK
4	KCK	1	C50	91158051-20	C, CERAMIC TP 0.0022M 50V
5		1	D9	91740261-00	LED L-424HDT(RED)
6		1	D9	92603333-00	LED HOLDER LEDS-7
7		1	J101	91071229-01	3P INPUT1 WIRE
8		1	J201	91071232-01	5P FUN2 WIRE
9		1	J401	91071236-00	2P FUN5 WIRE
10	DAN ZAN	1	R62	91130960-50	RESISTOR R-16 TP JFT 10K
11	DAN ZAN	1	R68	91131040-50	RESISTOR R-16 TP JFT 22K
12	DAN ZAN	4	R69-R72	91131440-50	RESISTOR R-16 TP JFT 1M
13		1	R73	91131200-50	RESISTOR R-16 TP JFT 100K
14		2	R74,R80	91131200-50	RESISTOR R-16 TP JFT 100K
15	DAN ZAN	1	R87	91131320-50	RESISTOR R-16 TP JFT 330K
16	DAN ZAN	2	R88,R89	91131140-50	RESISTOR R-16 TP JFT 56K
17		1	R90	91130320-50	RESISTOR R-16 TP JFT 22
18	TOSHIBA	4	TR10-TR13	91633094-20	TR, 2SC-1815GR(TP)
19		1	SW2	91340129-00	SLIDE SW SSSU022NA2-TK
20		1	SW3	91350402-00	PUSH SW SPPB512300

**Πίνακας 7** Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας διακόπτη (function switch PCB) (Ibanez)



INPUT PCB					
NO.	Mkr.	Q'TY	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		1	J1	91445168-00	PHONEJACK JY-6317A-02-030
2		1	J102	91071230-00	3P INPUT2 WIRE

**Πίνακας 8** Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας βύσματος εισόδου (input PCB) (Ibanez)

OUTPUT PCB					
NO.	Mkr.	Q'TY	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		1	C35	91158329-20	C,ML CERAMIC 0.1U 50VK TP
2		1	C36	91173053-40	C, ELEC 10U25V(MS5) P=2.5
3	ROHM	2	D13,D14	91650221-50	DIODE TP 1SS133T
4		1	JP1	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM
5		1	J2	91445168-00	PHONEJACK JY-6317A-02-030
6		1	J301	91071235-00	6P OUTPUT WIRE
7	JST	1	P401	91432300-00	PLUG B2B-PH 2P
8		2	Q1,Q6	91640051-20	JFET 2SK118-O(M) TE4
9		1	R55	91130640-50	RESISTOR R-16 TP JFT 470
10		1	R58	91131200-50	RESISTOR R-16 TP JFT 100K
11		1	R75	91131370-50	RESISTOR R-16 TP JFT 510K
12		1	TR10	91633094-20	TR,2SC-1815GR(TP)
13		4	W28,W29	97888306-06	JUMP WIRE P=6MM

**Πίνακας 9** Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας βύσματος εξόδου (output PCB) (Ibanez)

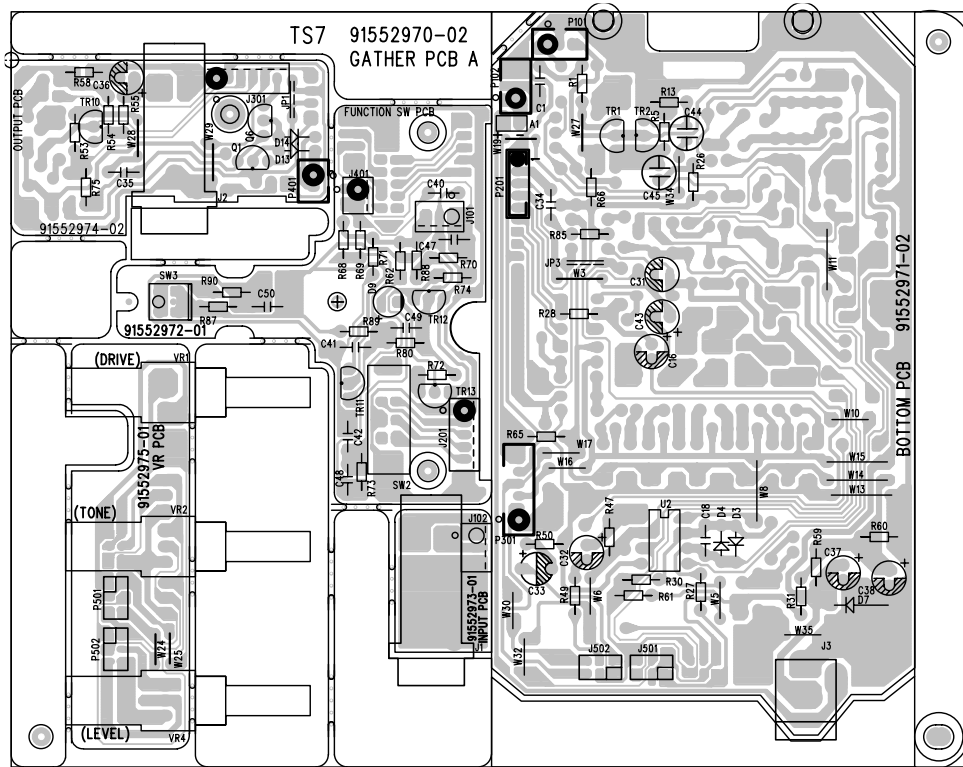
VR PCB					
NO.	Mkr.	Q'TY	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		1	VR1	91720377-00	VR RK097111T045-TK500KA
2		1	VR2	91720373-00	VR RK097111T046-TK 20KB
3		1	VR4	91720376-00	VR RK097111T019-TK100KB
4		2	P501,P502	91445173-00	CONNECTOR 603A-06PGBRAA3
5		2	W24,W25	97888306-05	JUMP WIRE P=5MM

**Πίνακας 10** Λίστα ηλεκτρονικών υλικών πλακέτας ποτενσιόμετρων (VR PCB) (Ibanez)

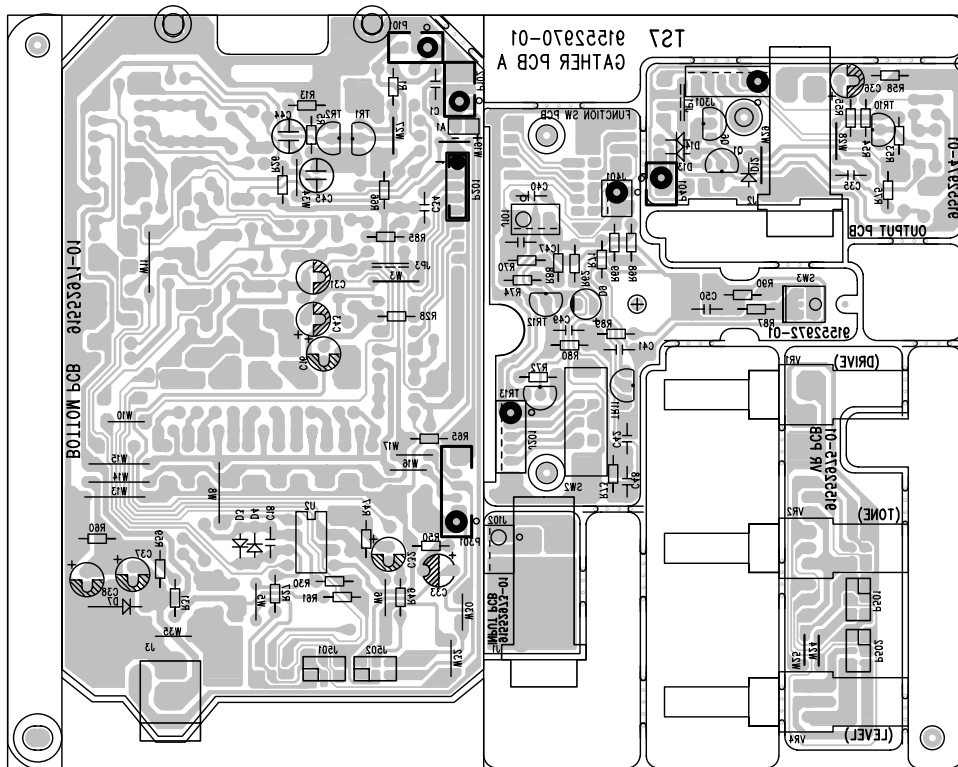
MECHANICAL					
NO.	Mkr.	PCS	REF-NO.	PARTS NO.	DESCRIPTION
1		1		92603355-01	PEDAL(3331)TS7
2		1		92603332-01	PEDAL BRACKET
3		2	PEDAL BKT	97830726-05	SCREW PTT-B M2.6x5(BLK)
4		1		92603339-02	BODY TS7
5		2	BODY,PEDAL	92603334-00	SPRING PIN $\phi$ 2x10L
6		3		92603393-00	BATTERY CUSHION 8x8x8
7		1	BODY,PEDAL	92940068-00	WASHER@2.5 x4x0.45T
8		2		92603346-00	SPRING PEDAL
9		1		91510034-00	BATTERY 6F22UG 9V
10		2		92603325-00	JACK BRACKET
11		2	IN,OUT JACK	97818012-00	NUT M12
12		4	JACK BKT	97830130-08	SCREW PTT-B M3x8
13		1		92603330-00	PUSH BUTTON
14		1		92603326-01	KNOB BRACKET
15		3		92603328-01	VR KNOB
16		3	VR1-VR3	92940055-00	WASHER VR
17		3	VR1-VR3	97818007-00	NUT, VR CEN 7
18		1		92603327-00	VR BRACKET
19		3	VR BRACKET	97830130-08	SCREW PTT-B M3x8
20		1		92603329-00	SPRING PUSH BTM
21		1	BOTTOM PCB	92603409-00	BTM PCB CUSHION
22		1	BOTTOM PCB	92942100-00	LOCK WASHER@3
23		1		92603343-01	BOTTOM PLATE
24		1		92603344-01	BOTTOM RUBBER
25		4	BOTTOM PLATE	97832430-08	SCREW BTT-B M3x8 (BLK)
26		1	FUNCTION PCB	97832426-06	SCREW BTT-B M2.6x6(NI-BLK)
27		3	FUNCTION PCB	97830130-08	SCREW PTT-B M3x8
28		2	BOTTOM PCB	97832430-08	SCREW BTT-B M3x8 (BLK)

Πίνακας 11 Λίστα μηχανικών υλικών κατασκευαστή (Ibanez)





Εικόνα Γ-2 Διάγραμμα πλακέτας TS7 κατασκευαστή , πάνω όψη (Ibanez)



Εικόνα Γ-3 Διάγραμμα πλακέτας TS7 κατασκευαστή, κάτω όψη (Ibanez)

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.