



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

# ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χριστοδούλου – Γαλανόπουλος

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χριστοδούλου – Γαλανόπουλος

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Παναγιώτης Α. Καραφώτης, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Οκτωβρίου 2017

.....  
Παύλος Γεωργιλάκης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....  
Κωνσταντίνος Χριστοδούλου - Γαλανόπουλος  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών  
Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Χριστοδούλου - Γαλανόπουλος, 2017.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του μετασχηματισμού κυματιδίων για τον υπολογισμό διαφόρων δεικτών ποιότητας ισχύος. Σήμερα, χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό αυτών των δεικτών ο μετασχηματισμός Fourier, συνεπώς, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι 1) να μετατραπούν κατάλληλα οι εξισώσεις για τον υπολογισμό κάθε δείκτη, ώστε να μπορούν να δεχτούν ως δεδομένα τα παράγωγα του μετασχηματισμού κυματιδίων, 2) η δημιουργία κώδικα σε περιβάλλον Matlab για τον υπολογισμό τους και 3) η χρησιμοποίησή του σε παραδείγματα μονοφασικών και τριφασικών κυκλωμάτων.

Αρχικά παρουσιάζονται οι δείκτες ποιότητας ισχύος που θα μελετηθούν, όπως χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, δηλαδή με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Στην συνέχεια, γίνεται μια εισαγωγή στους μετασχηματισμούς από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, όπου θα αναφερθεί ο μετασχηματισμός Fourier και θα εξηγηθεί με περισσότερη λεπτομέρεια ο μετασχηματισμός κυματιδίων. Ακολούθως, προτείνεται ο τρόπος με τον οποίο θα μετασχηματιστούν οι εξισώσεις των υπό μελέτη δεικτών, ώστε να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός κυματιδίων.

Το είδος του μετασχηματισμού κυματιδίων που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο μετασχηματισμός πακέτου κυματιδίων (Wavelet Packet Transform). Οι δείκτες θα υπολογιστούν για δεκατρία παραδείγματα που έχουν δημιουργηθεί στο περιβάλλον Matlab/Simulink, καθώς και για δύο παραδείγματα στα οποία η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος είναι γνωστές και αναλύονται τα αποτελέσματά τους, ενώ παράλληλα προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ποιότητα ισχύος, σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, μετασχηματισμός κυματιδίων



## **ABSTRACT**

The scope of this diploma thesis is the way in which wavelet transform can be used in calculating power quality indices. Nowadays, Fourier Transform is widely used for the calculation of these indices, so the aim of the diploma thesis is 1) to properly convert the equations of each index so that wavelet transform derivatives will be used as data, 2) to develop Matlab software to effectively calculate them and 3) use this software in examples of single-phase and three-phase circuits.

Initially, power quality indices are presented as they are widely used today, that is, using Fourier Transform. Then, it follows an introduction to the transforms used to transform signals from the time domain to the frequency domain, where the Fourier Transform will be reported, and the wavelet transform will be explained in more detail. It is then proposed how to transform the equations of the studied indices in order to use wavelet transform.

The wavelet transform to be used in this diploma thesis is Wavelet Packet Transform, and the indices will be calculated in thirteen examples created in the Matlab / Simulink environment, as well as in two examples in which voltage and current waveforms known. The obtained results are presented and discussed, whereas future research on the topic is also proposed.

## **KEY WORDS**

Power quality, smart grids, Wavelet Transform





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016–2017 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, επίκουρου καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και δημιουργικό θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Καραφώτη για την υπομονή και την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου σε ότι χρειάστηκα.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος	1
1.2 Μετασχηματισμοί από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας	3
1.3 Αντικείμενο της εργασίας	4
1.4 Δομή της εργασίας	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ</b>	<b>7</b>
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Παραμόρφωση κυματομορφής – Αρμονικές	8
2.3 Ανάλυση σημάτων στο πεδίο της συχνότητας	10
2.4 Ενεργός, άεργος και φαινόμενη ισχύς	11
2.4.1 Φαινόμενη ισχύς	12
2.4.2 Ενεργός ισχύς	12
2.4.3 Άεργος ισχύς	13
2.5 Δείκτες ποιότητας ισχύος	14
2.5.1 Συντελεστής ισχύος	14
2.5.2 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης	15
2.5.3 Δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης	16
2.5.4 Συντελεστής κορυφής	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ</b>	<b>19</b>
3.1 Εισαγωγή	19
3.2 Μετασχηματισμός Fourier	20
3.2.1 Μαθηματικές εξισώσεις μετασχηματισμού Fourier	20
3.2.2 Μειονεκτήματα μετασχηματισμού Fourier	21
3.2.3 Αρχή της αβεβαιότητας – Ανισότητα Heisenberg	21
3.2.4 Παραθυρικός μετασχηματισμός Fourier	22

3.3 Μετασχηματισμός κυματιδίων	23
3.3.1 Συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων	24
3.3.2 Διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων	25
3.3.3 Σχέση μεταξύ φίλτρων, συνάρτησης κλίμακας και μητρικού κυματιδίου	28
3.3.4 Μετασχηματισμός πακέτου κυματιδίων	30

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ**

4.1 Εισαγωγή	33
4.2 Επιλογή κατάλληλων παραμέτρων	35
4.2.1 Μητρικό κυματίδιο	35
4.2.2 Συχνότητα δειγματοληψίας, ζώνες συχνοτήτων και επίπεδο αποσύνθεσης	37
4.3 Αναπαράσταση τάσης, ρεύματος και ισχύος με χρήση μετασχηματισμού κυματιδίων	38
4.4 Υπολογισμός δεικτών ποιότητας ισχύος με χρήση μετασχηματισμού κυματιδίων	41
4.4.1 Ολική αρμονική παραμόρφωση	41
4.4.2 Αρμονική παραμόρφωση	41
4.4.3 Συντελεστής ισχύος	41
4.4.4 Συντελεστής ισχύος κόμβου 0	42
4.4.5 Συντελεστής κορυφής	42

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

5.1 Εισαγωγή	43
5.2 Παραδείγματα με γνωστές τις συναρτήσεις τάσης και ρεύματος	43
5.2.1 Στάσιμες κυματομορφές	45
5.2.2 Μη στάσιμες κυματομορφές	46
5.2.3 Συμπεράσματα και επιλογή κυματιδίων	49
5.3 Παραδείγματα με χρήση του προγράμματος MATLAB/SIMULINK σε μονοφασικό δίκτυο	50
5.3.1 Στοιχεία του κυκλώματος	50
5.3.2 Παράδειγμα 1	52
5.3.3 Παράδειγμα 2	54

5.3.4 Παράδειγμα 3	56
5.3.5 Παράδειγμα 4	58
5.3.6 Παράδειγμα 5	60
5.3.7 Παράδειγμα 6	62
5.3.8 Παράδειγμα 7	64
5.4 Παραδείγματα με χρήση του προγράμματος MATLAB/SIMULINK σε τριφασικό δίκτυο	67
5.4.1 Στοιχεία του κυκλώματος	67
5.4.2 Παράδειγμα 8	69
5.4.3 Παράδειγμα 9	70
5.4.4 Παράδειγμα 10	72
5.4.5 Παράδειγμα 11	74
5.4.6 Παράδειγμα 12	76
5.4.7 Παράδειγμα 13	78
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>81</b>
6.1 Συμπεράσματα	81
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>85</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται η μορφή ενέργειας η οποία συνδέεται με την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων. Μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές και αυτό την κάνει να υπερτερεί απέναντι στις άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο. Μερικά από τα πλεονεκτήματά της είναι τα ακόλουθα:

- Είναι φιλική προς το περιβάλλον κατά τη χρήση της.
- Είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή.
- Μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά σε οποιοδήποτε μέρος απαιτείται.

Λόγω των πλεονεκτημάτων της αυτών, η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται πλέον για την κάλυψη του μεγαλύτερου ποσοστού της ανάγκης σε ενέργεια της ανθρώπινης κοινωνίας και ιδιαίτερα των αστικών αναγκών.

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται καταρχάς μετατροπή κάποιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας πρώτα σε μηχανική και εν συνεχεία μέσω ηλεκτρικών γεννητριών επιτυγχάνεται η μετατροπή σε ηλεκτρική. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται τη σημερινή εποχή παγκοσμίως προέρχεται, κυρίως, από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Ένα μικρό ποσοστό προέρχεται επίσης, από υδροηλεκτρικούς σταθμούς και από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάγκη για παραγωγή ενέργειας με λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις προς το περιβάλλον, υπάρχει σημαντική αύξηση του ποσοστού ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως για παράδειγμα ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια.

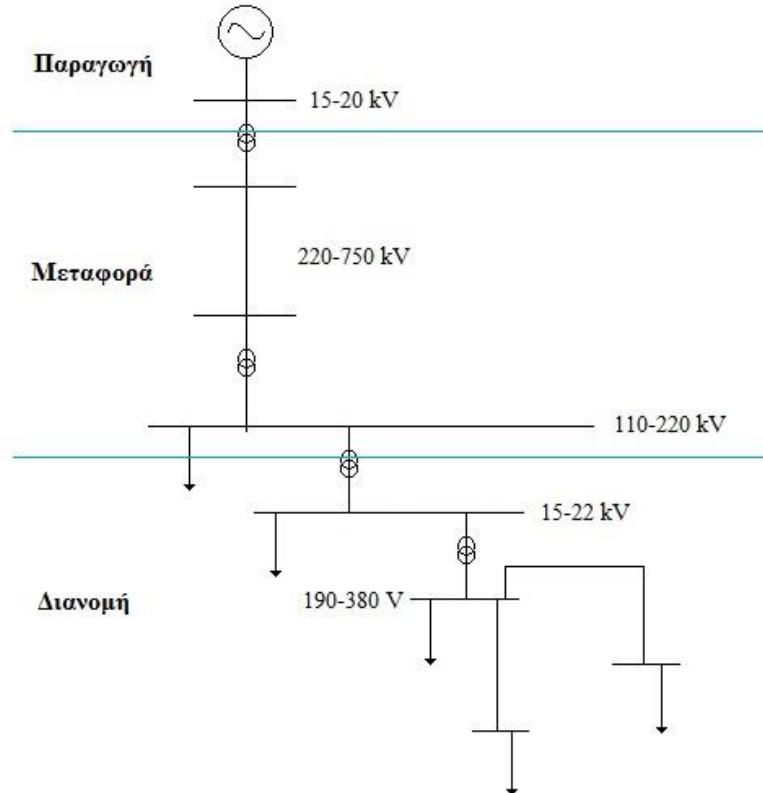
Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στα

σημεία κατανάλωσής της. Για να θεωρηθεί ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε υψηλό επίπεδο, πρέπει να παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια σε οποιαδήποτε περιοχή υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος καθώς και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις. Είναι απαραίτητο να εξασφαλίζει σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές επιτυγχάνεται μέσω τριών ξεχωριστών λειτουργιών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:

- Της παραγωγής.
- Της μεταφοράς.
- Της διανομής.

Λόγω του ότι είναι πολύ δύσκολη, καθώς και οικονομικά ασύμφωρη η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή πρέπει να βρίσκεται σε μία συνεχή ροή από την στιγμή που θα παραχθεί μέχρι και την στιγμή που θα καταναλωθεί, συνεπώς απαιτείται να παράγεται τη στιγμή που καταναλώνεται [1]. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα παράδειγμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας



Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που αφορά την καλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας ή ισχύος. Η σταθερότητα της συχνότητας και της τάσης καθορίζουν σε ένα βαθμό την ποιότητα αυτή, αλλά δεν είναι ικανή για να θεωρηθεί ότι το σύστημα παρέχει υψηλό επίπεδο ποιότητας στους καταναλωτές.

Γενικά, με τον όρο της ποιότητας ισχύος εννοούνται τα χαρακτηριστικά εκείνα της παρεχόμενης τάσης, η απόκλιση των οποίων από τις ονομαστικές τους τιμές, προκαλεί δυσλειτουργία στον ηλεκτρικό εξοπλισμό. Ιδανική μορφή της τάσης θα ήταν ένα καθαρό συνήμιτονο με σταθερή συχνότητα και πλάτος. Κάθε απόκλιση από αυτή την μορφή, ονομάζεται διαταραχή. Η απόδοση μιας συσκευής ενός καταναλωτή μπορεί να μειωθεί σημαντικά από την παρουσία κάποιας τέτοιας διαταραχής [2].

Σήμερα, ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος γίνεται όλο και πιο σημαντικός, λόγω της χρήσης μη γραμμικών και χρονικά μεταβαλλόμενων μονοφασικών ή τριφασικών φορτίων. Τα φορτία αυτά έχουν ιδιαίτερα σημαντική επίδραση στη λειτουργία και στην απόδοση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικημένες, εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές.

Η βελτίωση της απόδοσης αλλά και της ποιότητας ισχύος που προσφέρουν τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές μπορούν να βελτιωθούν με την χρησιμοποίηση των νέων τεχνολογιών, προσφέροντας έτσι βελτιωμένη αξιοπιστία και τη δυνατότητα για την ένταξη σε αυτά περισσότερων μονάδων μεταβλητής παραγωγής, όπως για παράδειγμα μονάδων αιολικής και ηλιακής παραγωγής. Από μόνη της κάποια διαθέσιμη τεχνολογία δεν έχει την ικανότητα να βελτιώσει αισθητά αυτή την απόδοση των δικτύων, όμως ο συνδιασμός των διαθέσιμων τεχνολογιών, όπως σύγχρονων αισθητήριων συστημάτων, συστημάτων επικοινωνιών, εξοπλισμού ελέγχου και έξυπνων συστημάτων διαχείρισης μπορούν να παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα [3].

## **1.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ**

Για τον έλεγχο των προβλημάτων που δημιουργούνται στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος, έχουν καθιερωθεί δείκτες οι οποίοι επιτρέπουν την αναγνώριση διαφόρων πτυχών του προβλήματος και τον καθορισμό αποδεκτών ορίων. Έτσι, σε κάθε περίπτωση χρειάζεται να υπολογιστούν οι δείκτες αυτοί που θα δίνουν πληροφορίες για την ποιότητα της παρεχόμενης στους καταναλωτές ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να μπορέσουν να υπολογιστούν όμως αυτοί οι δείκτες, είναι απαραίτητο να γίνει μια επεξεργασία των σημάτων της τάσης και του ρεύματος, μέσω κάποιων μαθηματικών εργαλείων. Τα μαθηματικά αυτά εργαλεία επιτρέπουν την απεικόνιση στο πεδίο της συχνότητας, ενός σήματος το οποίο είναι γνωστό στο πεδίο του χρόνου, όπως είναι όλα τα σήματα στη φύση. Τα εργαλεία αυτά μετασχηματίζουν με άλλα λόγια, ένα σήμα από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας.

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι το πιο διαδεδομένο μαθηματικό εργαλείο για τη φασματική ανάλυση σημάτων και αποτέλεσε σημαντική ανακάλυψη για πολλούς τομείς. Η ανάλυση Fourier μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε διακριτά είτε σε συνεχή σήματα, και μπορεί να τα αναπαραστήσει αποκλειστικά στο πεδίο του χρόνου ή αποκλειστικά στο πεδίο της συχνότητας. Με στόχο την κάλυψη αδυναμιών της ανάλυσης Fourier, δημιουργήθηκε ο μετασχηματισμός κυματιδίων. Ο μετασχηματισμός αυτός μετασχηματίζει ένα σήμα από το πεδίο του χρόνου ταυτόχρονα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, δίνοντας έτσι περισσότερες πληροφορίες από την ανάλυση Fourier σε κάποιες περιπτώσεις.

### 1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός κυματιδίων για τον υπολογισμό ήδη γνωστών αλλά και νέων δεικτών ποιότητας ισχύος. Ακόμα, μέσα από παραδείγματα και εφαρμογές, θα μελετηθεί η διαφορά που προκύπτει στους δείκτες αυτούς ανάλογα με τον μετασχηματισμό που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των κυματομορφών, και συγκεκριμένα ανάμεσα στον υπό μελέτη μετασχηματισμό κυματιδίων και τον ευρέως διαδεδομένο μετασχηματισμό Fourier. Στόχος είναι να καταδείξει τον ιδανικότερο μετασχηματισμό για τον υπολογισμό της ποιότητας ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται ορισμένοι δείκτες που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα για τον υπολογισμό της ποιότητας ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** δίνεται μια σύντομη περιγραφή της ανάλυσης Fourier και στη συνέχεια εξηγείται αναλυτικά ο μετασχηματισμός κυματιδίων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον διακριτό μετασχηματισμό και συγκεκριμένα στον μετασχηματισμό πακέτου κυματιδίων (Wavelet Packet Transform).
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο οι δείκτες του Κεφαλαίου 2 μετασχηματίζονται για να μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μαθηματικών εξισώσεων του Κεφαλαίου 4 σε παραδείγματα και εφαρμογές ηλεκτρικών δικτύων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της εργασίας.



### ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, το ζήτημα της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών με πολλές δημοσιεύσεις στη διεθνή τεχνική βιβλιογραφία. Ο έλεγχος της ποιότητας γίνεται όλο και πιο σημαντικός, λόγω της χρήσης μη γραμμικών και χρονικά μεταβαλλόμενων μονοφασικών ή τριφασικών φορτίων. Τα φορτία αυτά έχουν ιδιαίτερα σημαντική επίδραση στη λειτουργία και στην απόδοση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικημένες, εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές.

Η υποβάθμιση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να οφείλεται σε παροδικές διαταραχές, όπως για παράδειγμα η πτώση τάσης, αλλά και σε διαταραχές σταθερής κατάστασης, όπως η αρμονική παραμόρφωση και η μη συμμετρία του φορτίου. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δοθεί έμφαση στην αρμονική παραμόρφωση και στους δείκτες που παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος της παραμόρφωσης αυτής, καθώς και της επίπτωσής της στην ποιότητα της ισχύος.

Η παρουσία των αρμονικών στα ηλεκτρικά δίκτυα δύναται να προκαλέσει πολλά προβλήματα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν τον συντονισμό, με συνέπεια τη μειωμένη διάρκεια ζωής των περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ακόμα, μπορούν να προκαλέσουν τη δυσλειτουργία των συσκευών προστασίας του ηλεκτρικού συστήματος, σφάλματα στις μετρήσεις ισχύος, πρόσθετες απώλειες κ.α. [4, 5].

Για τον έλεγχο των προβλημάτων αυτών, έχουν καθιερωθεί παγκοσμίως πρότυπα για την αναγνώριση διαφόρων πτυχών του συγκεκριμένου θέματος και τον καθορισμό αποδεκτών ορίων. Πριν από τη λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της ποιότητας ισχύος, είναι απαραίτητο πρώτα να αναλυθούν και να αξιολογηθούν τα προβλήματα αυτά. Σήμερα, υπάρχουν αρκετά κριτήρια για την ανάλυση της ποιότητας ισχύος. Κάθε ένα από αυτά χρησιμοποιεί ένα τμήμα των πληροφοριών που προκύπτουν από τη φασματική ανάλυση της τάσης και/ή του ρεύματος, ή ακόμα και από την κυματομορφή

τους στο πεδίο του χρόνου, υπολογίζοντας μια τιμή που παρέχει πληροφορίες για την ποιότητα ισχύος. Κάποιοι από αυτούς τους δείκτες είναι ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD), ο συντελεστής ισχύος (PF) και ο συντελεστής κορυφής (CF). Κάθε δείκτης πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων, τα οποία έχουν καθιερωθεί από διεθνή πρότυπα, έτσι ώστε η ποιότητα ισχύος να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα. Η πλειοψηφία των δεικτών αυτών δίνουν τον βαθμό της παραμόρφωσης των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος από την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή και την απώλεια ισχύος που προκύπτει από την παραμόρφωση αυτή.

Σε γενικές γραμμές οι δείκτες ποιότητας ισχύος, όπως και κάθε άλλος δείκτης, παρέχουν πληροφορίες και προσφέρουν μεθόδους για την αποτύπωση των πληροφοριών αυτών σε μια μόνο τιμή. Επίσης αποτελούν συχνά μια βάση σύγκρισης και μπορούν να επεκταθούν έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ευρύτερες συνθήκες εφαρμογής.

## 2.2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ – ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

Οι αρμονικές τάσης ή ρεύματος εντάσσονται στις διαταραχές που αφορούν την παραμόρφωση μιας ιδανικής κυματομορφής τάσης ή ρεύματος. Οποιαδήποτε περιοδική απόκλιση από την καθαρά ημιτονοειδή μορφή μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα άθροισμα από καθαρά ημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Η ονομαστική συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης συχνότητα. Μια ημιτονική κυματομορφή με συχνότητα  $h$  φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη, όπου το  $h$  είναι ακέραιος αριθμός, καλείται αρμονική διαταραχή. Ο λόγος της αρμονικής συχνότητας προς την θεμελιώδη συχνότητα καλείται τάξη της αρμονικής. Για παράδειγμα, η θεμελιώδης συχνότητα του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι 50Hz, άρα ένα ημιτονοειδές σήμα 150Hz ονομάζεται 3<sup>η</sup> αρμονική ή αρμονική 3<sup>ης</sup> τάξης.

Οι αρμονικές είναι βασικά το αποτέλεσμα του εκσυγχρονισμού των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και της χρήσης των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος. Ειδικότερα, η χρήση τροφοδοτικών ισχύος με διακοπτική λειτουργία για τον έλεγχο των φορτίων και τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος, οδήγησε σε ανεπιθύμητες συχνότητες που υπερτίθενται στην τάση τροφοδοσίας. Έτσι, η αρμονική παραμόρφωση προκαλείται κυρίως από εξοπλισμό που παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, δηλαδή από μη γραμμικά φορτία συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Συσκευές ή συστήματα που δημιουργούν αρμονικές υπάρχουν είτε σε βιομηχανικούς, είτε σε εμπορικούς ή οικιακούς καταναλωτές. Μερικά παραδείγματα τέτοιων φορτίων είναι:

- Βιομηχανικός εξοπλισμός όπως μηχανήματα ηλεκτροσυγκολλήσεων, ηλεκτρικοί κλίβανοι, ανορθωτές.
- Ρυθμιστές ταχύτητας μηχανών.
- Τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής (UPS).
- Εξοπλισμός γραφείου όπως Η/Υ, φωτοαντιγραφικά μηχανήματα, μηχανήματα φαξ κ.ά
- Οικιακός εξοπλισμός όπως τηλεοράσεις, φούρνοι μικροκυμάτων, λάμπες φθορισμού.
- Στατικοί αντισταθμιστές.
- Τροφοδοτικά ισχύος διακοπτικής λειτουργίας.
- Ορισμένες συσκευές που σχετίζονται με μαγνητικό κορεσμό όπως μετασχηματιστές.
- Χρήση κατανεμημένης παραγωγής μέσω φωτοβολταϊκών, αιολικών και άλλων συστημάτων.

Τα μη γραμμικά αυτά φορτία αλλοιώνουν την ημιτονοειδή φύση του εναλλασσόμενου ρεύματος, με αποτέλεσμα τη ροή αρμονικών ρευμάτων στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει, διότι το ρεύμα που διαπερνά ένα μη γραμμικό φορτίο δεν είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα του. Η ροή των αρμονικών ρευμάτων προκαλεί αρμονικές τάσεις μέσω των σύνθετων αντιστάσεων του συστήματος και συνεπώς, παραμόρφωση της τάσης τροφοδοσίας. Θεωρείται ότι τα μη γραμμικά φορτία επανεγχύουν τα αρμονικά ρεύματα πίσω προς το δίκτυο διανομής, προς την πηγή του δικτύου.

Μερικά από τα προβλήματα που ενδέχεται να δημιουργηθούν από την παρουσία αρμονικών συχνοτήτων με υπολογίσιμη τιμή, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τα παρακάτω:

1. Οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός κίνησης υπερθερμούνται λόγω της επιπρόσθετης φόρτισης που υφίστανται. Επίσης, καταπονούνται μηχανικά με αποτέλεσμα να υπάρχουν, σε αυξημένο βαθμό, δονήσεις και θόρυβος κατά τη λειτουργία τους.
2. Ο ουδέτερος αγωγός υπερφορτίζεται, καθώς το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων που τον διαρρέουν μπορεί πλέον να μην είναι ίσο με μηδέν. Τα ρεύματα των διαφόρων συχνοτήτων προστίθενται και αποτελούν υπολογίσιμη ποσότητα, ενώ οι τιμές τάσης μεταξύ ουδετέρου-γης είναι μη αποδεκτές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ρεύμα του ουδετέρου να μην είναι εντός των αποδεκτών ορίων τις περισσότερες φορές.
3. Υπάρχουσες διατάξεις πυκνωτών κινδυνεύουν να καταστραφούν σε περιπτώσεις όπου, ο κλάδος στον οποίο συνδέονται, εμφανίζει ίδια συχνότητα με κάποιες από τις

αρμονικές που υπάρχουν στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του συγκεκριμένου κλάδου ελαχιστοποιείται με αποτέλεσμα να αυξάνει κατά πολύ το ρεύμα το οποίο τον διαρρέει. Έτσι οι πυκνωτές υπερθερμαίνονται και ενδέχεται είτε να καταστραφεί το διηλεκτρικό τους, είτε να λιώσουν οι ασφάλειές τους με αποτέλεσμα να τεθούν εκτός λειτουργίας.

4. Τα μέσα ζεύξης και προστασίας φθείρονται και είναι πιθανό να λειτουργήσουν ανεπιθύμητα, ιδιαίτερα αν η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται σε θερμικά μοντέλα ή για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής της έντασης χρησιμοποιείται το πλάτος της κυματομορφής της, το οποίο είναι στην περίπτωση αυτή παραμορφωμένο.
5. Η λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού και των γεννητριών καθίσταται αναξιόπιστη.
6. Σημειώνονται λανθασμένες καταγραφές ηλεκτρικών μεγεθών από τις μετρητικές διατάξεις.
7. Γίνεται σπατάλη ενέργειας με αποτέλεσμα οι λογαριασμοί κατανάλωσης ενέργειας να είναι υψηλότεροι.
8. Μειώνεται η εφεδρεία της ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς τα ρεύματα που διαρρέουν τα καλώδια και τους ηλεκτρικούς πίνακες, είναι σημαντικά μεγαλύτερα λόγω των αρμονικών.

### 2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η Θεωρία Σημάτων δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης σημάτων και συστημάτων στο πεδίο της συχνότητας, ως μια εναλλακτική και συχνά ιδιαίτερα βοηθητική, μεθοδολογία για την κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών ενός σήματος ή συστήματος, καθώς και για την υπολογιστική ανάλυση και επεξεργασία αυτού.

Έτσι, χάρις σε αυτήν, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το πλήθος των αρμονικών που εμπεριέχονται σε ένα σήμα και την επίδραση που έχει η κάθε αρμονική στο υπό ανάλυση σήμα. Στην περίπτωση του υπολογισμού δεικτών ποιότητας ισχύος, το σήμα που θα αναλυθεί στις αρμονικές του συνιστώσες είναι η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος.

Μερικά από τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ανώτερων αρμονικών ενός σήματος είναι:

- ο μετασχηματισμός Fourier

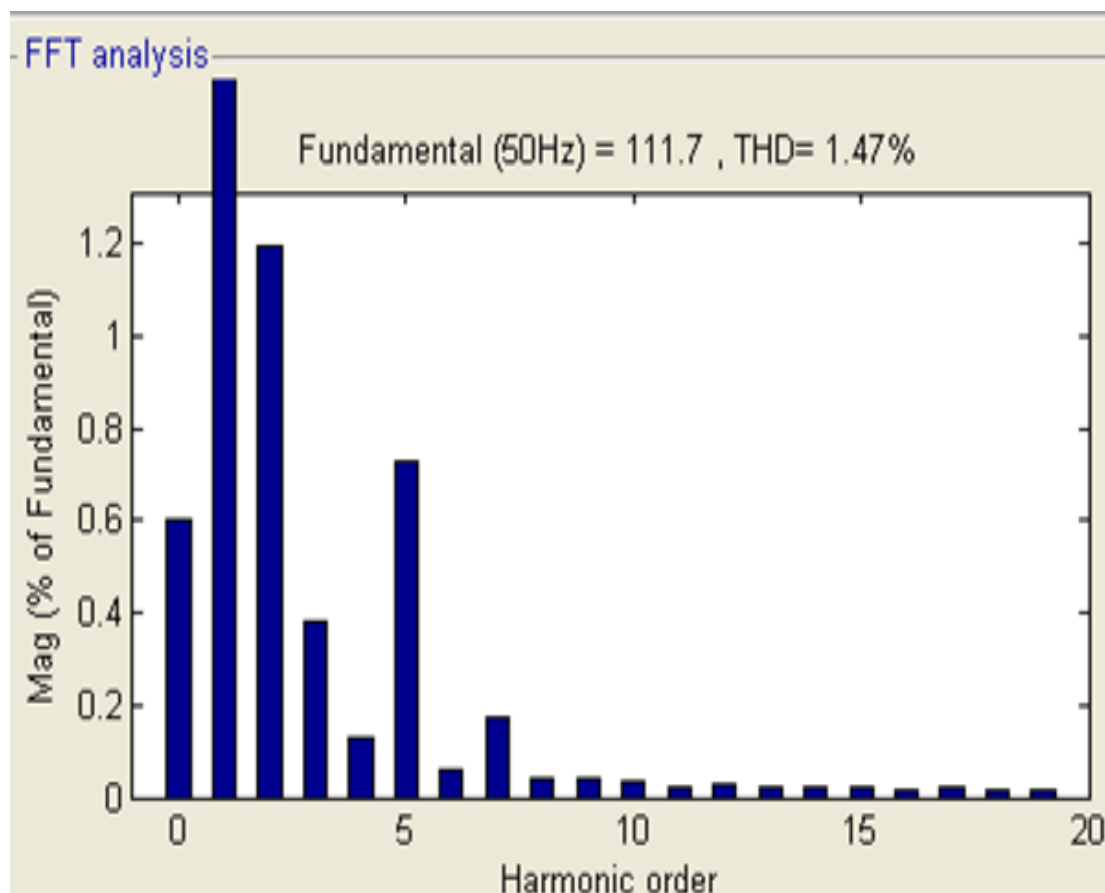


- ο παραθυρικός μετασχηματισμός Fourier
- ο μετασχηματισμός κυματιδίων

Τα εργαλεία αυτά θα παρουσιαστούν λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται το φάσμα ενός σήματος τάσης 50Hz, με τις τιμές των αρμονικών να εκφράζονται ως ποσοστό επί τις εκατό της θεμελιώδους.

## 2.4 ΕΝΕΡΓΟΣ, ΑΕΡΓΟΣ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ

Οι κλασικοί ορισμοί των ηλεκτρικών μεγεθών ενός συστήματος με ημιτονοειδή διέγερση, όπως η φαινόμενη, η ενεργός και η άεργος ισχύς, ο συντελεστής ισχύος ή οι ακολουθίες των φάσεων δεν ισχύουν όταν υπάρχει παρουσία ανώτερων αρμονικών, όταν δηλαδή υπάρχουν συστήματα με μη ημιτονοειδή είσοδο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μεγέθη που αφορούν κυκλώματα με περιοδική μη ημιτονοειδή διέγερση.



Σχήμα 2.2 Αρμονικές τάσης εκφρασμένες ως επί τοις εκατό ποσοστό της θεμελιώδους

### 2.4.1 Φαινόμενη ισχύς (S)

Η φαινόμενη ισχύς ορίζεται ως το γινόμενο της ενεργού τιμής της τάσης και της ενεργού τιμής του ρεύματος, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.1). Ο ορισμός αυτός ισχύει τόσο για ημιτονοειδείς όσο και για μη ημιτονοειδείς συνθήκες:

$$S = V_{rms}I_{rms} \quad (2.1)$$

Στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση οι τάσεις και τα ρεύματα ισούνται με τις συνιστώσες τους στη θεμελιώδη συχνότητα. Ωστόσο, σε μη ημιτονοειδείς συνθήκες, μια παραμορφωμένη από αρμονικές κυματομορφή αποτελείται από ημίτονα αρμονικών συχνοτήτων με διαφορετικά πλάτη. Τότε, οι rms τιμές των ρευμάτων και των τάσεων ισούνται με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των rms τιμών των επιμέρους αρμονικών, όπως δηλαδή φαίνεται στις εξισώσεις (2.2) και (2.3):

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{max}}^2} \quad (2.2)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{max}}^2} \quad (2.3)$$

όπου  $h$  είναι η τάξη της αρμονικής και  $I_h$ ,  $V_h$  είναι η rms τιμή αυτής της αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα.

### 2.4.2 Ενεργός ισχύς (P)

Η ενεργός ισχύς  $P$  αναφέρεται επίσης και ως μέση ισχύς ή πραγματική ισχύς. Παριστάνει τη χρήσιμη ισχύ που καταναλώνει ένα φορτίο για να παράξει πραγματικό έργο, δηλαδή να μετατρέψει ηλεκτρική ενέργεια σε άλλες μορφές ενέργειας. Πραγματικό έργο παρουσιάζεται όταν τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος είναι συμφασικά. Η ενεργός ισχύς  $P$  υπολογίζεται από το μέσο όρο του γινομένου της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος, δηλαδή από την εξίσωση (2.4):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (2.4)$$

που ισχύει είτε βρισκόμαστε στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση είτε όχι. Στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, η ενεργός ισχύς υπολογίζεται όπως παρακάτω στην εξίσωση (2.5):

$$P = V_1 I_1 \cos(\theta_1) = S \cos(\theta_1) \quad (2.5)$$

όπου  $\theta_1$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος στη θεμελιώδη συχνότητα.

Στην περίπτωση μη ημιτονοειδούς διέγερσης, ο υπολογισμός της ενεργού ισχύος πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις συνεισφορές όλων των επιμέρους αρμονικών. Έτσι αθροίζεται η ενεργός ισχύς κάθε αρμονικής. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή η παραμόρφωση της τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι γενικά μικρή (μικρότερη από 5%), η εξίσωση (2.4) είναι μια καλή προσέγγιση της ενεργού ισχύος ανεξάρτητα από τη διακύμανση του ρεύματος. Αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί όμως όταν υπολογίζεται η φαινόμενη και η άεργος ισχύ και αυτό γιατί αυτές οι δύο ποσότητες επηρεάζονται πολύ από τις διαταραχές. Η φαινόμενη ισχύς  $S$  είναι ένα μέτρο των πιθανών επιπτώσεων του φορτίου στη θερμική ικανότητα του συστήματος. Είναι ανάλογη με την rms τιμή του ρεύματος και ο υπολογισμός της είναι απλός, αν και λίγο πολυπλοκότερος από τη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση.

### 2.4.3 Άεργος ισχύς (Q)

Η άεργος ισχύς  $Q$  αντιπροσωπεύει τον ρυθμό της ενέργειας που απαιτείται για να φορτιστούν χωρητικές και επαγωγικές αντιδράσεις σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σχετίζεται με τα παθητικά στοιχεία ενός συστήματος (επαγωγές και χωρητικότητες). Η άεργος ισχύς δεν παράγει πραγματικό έργο και η εξίσωση (2.6) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φαίνεται παρακάτω:

$$Q = \sum_{h=1}^{h_{max}} V_h I_h \sin(\theta_h) \quad (2.6)$$

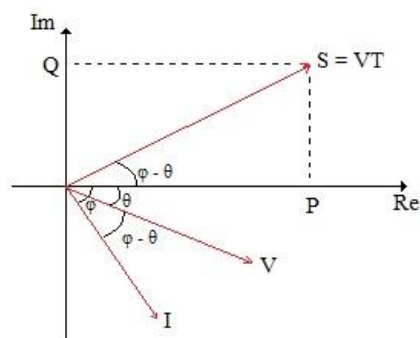
Επίσης στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση ισχύει η σχέση (2.7):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

Όταν το ρεύμα ενός φορτίου περιέχει και ανεπιθύμητες αρμονικές συνιστώσες, τότε η φαινομένη ισχύς αποτελείται από τρεις συνιστώσες ισχύος και συγκεκριμένα από την ενεργό ισχύ,  $P$ , την άεργο ισχύ,  $Q$  και από τη συνιστώσα που προκύπτει από τις ανεπιθύμητες αρμονικές συνιστώσες,  $D$ , η οποία ονομάζεται ισχύς παραμόρφωσης. Οπότε θα ισχύει η σχέση (2.8):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.8)$$

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το τρίγωνο ισχύος κάτω από ημιτονοειδής συνθήκες.



Σχήμα 2.3 Τρίγωνο ισχύος κάτω από ημιτονοειδής συνθήκες

## 2.5 ΔΕΙΚΤΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Κατά την ανάλυση και μελέτη της ποιότητας ισχύος έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι δείκτες, οι οποίοι βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας της εκάστοτε προσφερόμενης υπηρεσίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που έχει διαταραχθεί από την παρουσία ανώτερων αρμονικών. Οι δείκτες αυτοί αρμονικής παραμόρφωσης αποτελούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο μέτρησης της απόδοσης του συστήματος.

Αν και συναντώνται πολλοί διαφορετικοί δείκτες ποιότητας ισχύος στη βιβλιογραφία, ορισμένοι δίνουν ελλιπείς πληροφορίες ή δεν μπορούν να φανούν χρήσιμοι κατά τη μελέτη συγκεκριμένων σημείων του κυκλώματος. Συνεπώς, στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν οι δείκτες που χρησιμοποιούνται συχνότερα στη βιβλιογραφία.

### 2.5.1 Συντελεστής ισχύος

Οι αρμονικές τάσης και ρεύματος που παράγονται από τα μη γραμμικά φορτία αυξάνουν τις απώλειες ισχύος και έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ η σχέση μεταξύ αρμονικών και απωλειών είναι περίπλοκη και δύσκολο να γενικευθεί, η έννοια του συντελεστή ισχύος δίνει ένα σχετικό μέτρο της σχέσης αυτής και οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τις επιπτώσεις που έχουν οι αρμονικές στο σύστημα.

Ο συντελεστής ισχύος είναι μία ένδειξη για το πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού ισχύος προς τη φαινόμενη ισχύ, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.9). Η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της

μονάδα. Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται η τιμή του, τόσο πιο αποδοτικά λειτουργεί το σύστημα.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

Στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, δεδομένου ότι έχουμε μόνο τη θεμελιώδη συχνότητα, ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται ως το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση ο πραγματικός συντελεστής ισχύος ισούται με τον συντελεστή ισχύος μετατόπισης, ο οποίος ορίζεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$dPF = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\theta_1) \quad (2.10)$$

Όπως φαίνεται και από τη σχέση (2.10), ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ορίζεται ως το συνημίτονο της διαφοράς φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών της τάσης και του ρεύματος. Εναλλακτικά ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού ισχύος προς την φαινόμενη ισχύ, που προκύπτουν από τη θεμελιώδη συνιστώσα.

Υπό μη ημιτονοειδείς συνθήκες δεν αρκεί η σχέση (2.10) για να οριστεί ο συντελεστής ισχύος. Τώρα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ενεργός ισχύς τόσο της θεμελιώδους αρμονικής όσο και των ανώτερων αρμονικών, όπως φαίνεται από τη σχέση (2.9).

Ο συντελεστής ισχύος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μονάδα, αφού για σταθερή ωφέλιμη ισχύ όσο πιο χαμηλός είναι ο συντελεστής ισχύος τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη φαινόμενη ισχύς και συνεπώς τόσο μεγαλύτερο είναι το απορροφούμενο από την εγκατάσταση ρεύμα.

Για παράδειγμα με συντελεστή ισχύος ίσο με 0,5 το απορροφούμενο από την εγκατάσταση ρεύμα είναι διπλάσιο του πραγματικού. Έτσι οι μετασχηματιστές και τα καλώδια διανομής υπερφορτίζονται και οι απώλειές τους αυξάνουν ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος.

### 2.5.2 Δείκτης Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD)

Ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, THD) αποτελεί το πιο διαδεδομένο μέτρο αρμονικού περιεχομένου μιας παραμορφωμένης κυματομορφής. Ορίζεται ως το πηλίκο του διανυσματικού αθροίσματος των αρμονικών συνιστωσών (rms τιμή ρεύματος ή τάσης) προς τη θεμελιώδη αρμονική του σήματος, σύμφωνα με την εξίσωση (2.11). Ο THD εκφράζεται συνήθως ως ποσοστιαία τιμή.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} 100\% \quad (2.11)$$

όπου  $M_h$  είναι η rms τιμή της αρμονικής συνιστώσας τάξης  $h$  ενός σήματος  $M$ .

Το ποσοστό της ολικής παραμόρφωσης του ρεύματος δίνεται από την εξίσωση (2.12):

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} 100\% \quad (2.12)$$

Αν ο δείκτης  $THD_i$  είναι μεγαλύτερος από 5%, που είναι ένα κοινώς αποδεκτό όριο μεταξύ χαμηλής και υψηλής αρμονικής παραμόρφωσης, τότε υπάρχει υψηλό επίπεδο παραμόρφωσης. Επίσης, για τις περισσότερες εφαρμογές, είναι επαρκές να θεωρηθεί το αρμονικό εύρος από τη 2<sup>η</sup> έως την 25<sup>η</sup> αρμονική, αλλά τα περισσότερα πρότυπα το προδιαγράφουν έως την 50<sup>η</sup> αρμονική.

Αντίστοιχα για την τάση ισχύει η εξίσωση (2.13):

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} 100\% \quad (2.13)$$

Τα κύρια πλεονεκτήματα του THD είναι:

- Χρησιμοποιείται ευρέως για μια γρήγορη εκτίμηση της αρμονικής παραμόρφωσης.
- Ο υπολογισμός του είναι εύκολος.

Μερικά από τα μειονεκτήματά του είναι:

- Δεν προσφέρει πληροφορίες για το πλάτος.
- Οι λεπτομερείς πληροφορίες για το φάσμα του σήματος έχουν χαθεί.

### 2.5.3 Δείκτης Αρμονικής Παραμόρφωσης (DIN)

Λόγω των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD), στην περίπτωση μη ύπαρξης της θεμελιώδους συνιστώσας, ορισμένα πρότυπα έχουν ορίσει τον δείκτη αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος ως προς την συνολική rms τιμή του (Distortion Index, DIN). Εκφράζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.14):

$$DIN_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2}} 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_{rms}} 100\% \quad (2.14)$$

Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί και ο δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης για την τάση (2.15):

$$DIN_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2}} 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_{rms}} 100\% \quad (2.15)$$

#### 2.5.4 Συντελεστής κορυφής (CF)

Ο συντελεστής κορυφής (Crest Factor, CF) είναι μία ποσότητα στο πεδίο του χρόνου, η οποία δείχνει το μέγεθος της παραμόρφωσης που έχει υποστεί η κορυφή του ημιτονοειδούς σήματος. Ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους προς την rms τιμή ενός σήματος, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.16) για ένα σήμα M.

$$CF_M = \frac{M_{max}}{M_{rms}} \quad (2.16)$$

όπου  $M_{rms} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T M^2(t) dt}$ . Για ένα καθαρό ημίτονο, το πλάτος του ισούται με 1, ενώ η rms τιμή του είναι ίση με 0.707. Έτσι, ο συντελεστής κορυφής ενός καθαρού ημιτόνου ισούται με 1.414. Ο συντελεστής κορυφής μας δίνει πληροφορίες, όχι μόνο για την "καθαρότητα" ενός σήματος, αλλά και για τη δυνατότητα ενός συστήματος να δώσει στην έξοδο μια συγκεκριμένη τάση ή ρεύμα. Από την εξίσωση (2.16) προκύπτουν οι εξισώσεις (2.17) και (2.18) για την τάση και το ρεύμα αντίστοιχα.

$$CF_v = \frac{V_{max}}{V_{rms}} \quad (2.17)$$

$$CF_i = \frac{I_{max}}{I_{rms}} \quad (2.18)$$





## **ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ανάλυση χρόνου-συχνότητας είναι ευρέως διαδεδομένη για την μελέτη μη στάσιμων σημάτων, με εφαρμογές σε τομείς όπως η απεικόνιση και αναγνώριση εικόνας, ερμηνεία σεισμικών κυμάτων, βιοϊατρική κ.α. Τα σχετικά δισδιάστατα γραφήματα χρόνου-συχνότητας είναι πολύ χρήσιμα και επεξηγηματικά καθώς παρέχουν την χρονική μεταβλητότητα των συχνοτικών συνιστωσών ενός σήματος, η οποία δεν μπορεί να προκύψει από τις παραδοσιακές μεθόδους υπολογισμού του φάσματος. Η απεικόνιση χρόνου-συχνότητας (time-frequency representation) ενός σήματος ουσιαστικά μεταφέρει ένα μονοδιάστατο χρονικό σήμα σε μια δισδιάστατη συνάρτηση χρόνου και συχνότητας. Οι περισσότερες απεικονίσεις χρόνου-συχνότητας είναι χρονικά μεταβαλλόμενες απεικονίσεις του φάσματος.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, γίνεται μια γρήγορη περιγραφή του Συνεχούς Μετασχηματισμού Fourier (Continuous-Time Fourier Transform), του Μετασχηματισμού Fourier Διακριτού Χρόνου (Discrete-Time Fourier Transform) καθώς και των πεδίων χρόνου και συχνότητας, όπως αυτά ορίζονται μέσα από την ανάλυση Fourier. Γίνεται επίσης αναφορά στον Παραθυρικό Μετασχηματισμό Fourier (Short-time Fourier), σαν προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί ο κλασικός μετασχηματισμός Fourier για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων. Στη συνέχεια, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην θεωρία κυματιδίων και στη διαφορά της από την ανάλυση Fourier, καθώς και στο πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του Συνεχούς Μετασχηματισμού Κυματιδίων (Continuous Wavelet Transform) ενός σήματος. Εκτενής αναφορά γίνεται ακόμα στον Διακριτό Μετασχηματισμό Κυματιδίων (Discrete Wavelet Transform), στη χρήση των καθρεπτικών φίλτρων (Quadrature Mirror Filters) αλλά και στη σύνδεσή τους με τη θεωρία κυματιδίων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την προηγούμενη ανάλυση αναπτύσσεται ο Μετασχηματισμός Πακέτου Κυματιδίων (Wavelet Packet Transform), ο οποίος και θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική.

## 3.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ FOURIER

Ο μετασχηματισμός Fourier είναι ο πιο διαδεδομένος μετασχηματισμός από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Από την οπτική γωνία της ανάλυσης σημάτων, ο μετασχηματισμός Fourier διευκολύνει την μέτρηση του «συχνοτικού περιεχομένου» ενός σήματος, όπως για παράδειγμα την κατανομή ενέργειας ή ισχύος σε διάφορες ζώνες συχνότητων. Πιο απλά, μπορεί να βοηθήσει να βρεθούν οι υπερισχύουσες ημιτονοειδείς συναρτήσεις σε ένα σήμα. Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier μπορεί να αναλυθεί ένα σήμα σε άπειρο αριθμό ημιτονοειδών συναρτήσεων διαφορετικών συχνότητων.

### 3.2.1 Μαθηματικές εξισώσεις μετασχηματισμού Fourier

Το 1807 ο Jean Baptiste Joseph Fourier ανακοίνωσε την ιδέα του ότι κάθε περιοδική συνάρτηση  $x(t)$ , συνεχής ή μη, μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σειρά άπειρων όρων ημιτονοειδών σημάτων της μορφής (3.1):

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{jm\omega_0 t} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m e^{j\frac{2\pi m}{T}t} \quad (3.1)$$

Οι συχνότητες  $mf_0$  είναι γνωστές ως «αρμονικές» και αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας  $f_0$  και οι όροι  $c_m$  είναι οι συντελεστές Fourier για κάθε αρμονική  $m$ .

Παρόμοιες δυνατότητες υπάρχουν και για τα μη-περιοδικά σήματα. Στην περίπτωση αυτή, το σήμα δεν περιέχει διακεκριμένες μόνο συχνότητες, αλλά ένα συνεχές φάσμα συχνότητων. Η συνάρτηση (3.2):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.2)$$

ονομάζεται πυκνότητα φάσματος του σήματος  $x(t)$  και αποτελεί τον Χρονοσυνεχή Μετασχηματισμό Fourier (CFT). Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνει το αρχικό σήμα  $x(t)$  από το φάσμα του σύμφωνα με τη συνάρτηση (3.3):

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.3)$$

Ένα διακριτό σήμα  $x[n]$ , το οποίο μπορεί να έχει προκύψει από δειγματοληψία ενός σήματος συνεχούς χρόνου, μπορεί επίσης να αναλυθεί χρησιμοποιώντας τον Μετασχηματισμό Fourier Διακριτού Χρόνου (DTFT). Χρησιμοποιώντας ως μεταβλητή

συχνότητας την μεταβλητή  $\Omega = \omega T_s$ , ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier της ακολουθίας  $x[n]$  ορίζεται από την εξίσωση (3.4):

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\Omega n} \quad (3.4)$$

Ο αντίστροφος DTFT επίσης υπάρχει και το αρχικό σήμα μπορεί να ανακατασκευαστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.5):

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\Omega)e^{j\Omega n} d\Omega \quad (3.5)$$

Τα παραπάνω αποτελούν εν πολλοίς όλα τα είδη του μετασχηματισμού Fourier, ο οποίος είναι ευρέως διαδεδομένος, αφού οδήγησε στη δυνατότητα της γνώσης των σημάτων στον χώρο της συχνότητας, γνώση η οποία είναι αναγκαία για πλήθος εφαρμογών τη σημερινή εποχή [6].

### 3.2.2 Μειονεκτήματα μετασχηματισμού Fourier

Ο μετασχηματισμός Fourier, καθώς και ο αντίστροφος μετασχηματισμός, δημιουργούν μια άμεση σχέση μεταξύ του πεδίου του χρόνου και του πεδίου της συχνότητας ( $x(t) \leftrightarrow X(\omega)$ ). Αποτελούν δυο εναλλακτικούς τρόπους να ερμηνευτεί ένα σήμα. Παρόλο που ο μετασχηματισμός επιτρέπει την μετάβαση από το ένα πεδίο στο άλλο, δεν επιτρέπει τον συνδυασμό και των δύο πεδίων. Πιο συγκεκριμένα, πληροφορίες για τις χρονικές συνιστώσες δεν είναι διαθέσιμες όταν το σήμα περιγράφεται στο πεδίο των συχνοτήτων.

Έτσι, ενώ ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια για τα στάσιμα σήματα, πολλά σήματα που αντιμετωπίζονται στις πραγματικές καταστάσεις έχουν συχνοτικό περιεχόμενο που αλλάζει κατά τη διάρκεια του χρόνου. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι καλύτερο να μην χρησιμοποιούνται οι απλές ημιτονοειδείς συναρτήσεις ως συναρτήσεις βάσης και να χαρακτηρίζεται ένα σήμα από το φάσμα συχνότητάς του. Οι κοινές μετατροπές χρόνου-συχνότητας αναπτύχθηκαν με σκοπό τον χαρακτηρισμό της χρονομεταβλητότητας του συχνοτικού περιεχομένου ενός σήματος.

### 3.2.3 Αρχή της Αβεβαιότητας – Ανισότητα Heisenberg

Η ιδιότητα της κλιμάκωσης του μετασχηματισμού Fourier συνεπάγεται ότι, μείωση της χρονικής διάρκειας (εύρος χρόνου) ενός σήματος αυξάνει το εύρος ζώνης συχνοτήτων του και αντίστροφα. Αν αυξηθεί δηλαδή η διακριτική ικανότητα στον χρόνο (time resolution)

ενός συστήματος, τότε το εύρος ζώνης αυξάνεται και άρα η διακριτική του ικανότητα στην συχνότητα (frequency resolution) μειώνεται. Το 1946, ο Gabor ποσοτικοποίησε αυτήν την διαισθητική ιδέα, αποδεικνύοντας ότι το γινόμενο της χρονικής διάρκειας και του εύρους ζώνης ενός σήματος δεν μπορεί να γίνει ποτέ μικρότερο από ένα οικουμενικό ελάχιστο φράγμα. Έτσι προκύπτει η ανισότητα (3.6):

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq \frac{1}{2} \quad (3.6)$$

Ουσιαστικά, η ερμηνεία της Αρχής της Αβεβαιότητας δηλώνει ότι η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time resolution) και η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (frequency resolution) δεν μπορούν να είναι αυθαίρετα μικρές. Συγκεκριμένα, η αύξηση της μίας οδηγεί σε μείωση της δεύτερης και αντίστροφα [7].

### 3.2.4 Παραθυρικός Μετασχηματισμός Fourier (STFT)

Ένας από τους παλαιότερους μετασχηματισμούς χρόνου-συχνότητας ενός χρονικά εξαρτώμενου σήματος, του οποίου το θεωρητικό υπόβαθρο οφείλεται στον Gabor, είναι ο Παραθυρικός Μετασχηματισμός Fourier (Short-Time Fourier – STFT). Βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier, όμως χρησιμοποιεί την έννοια του χρονικού παραθύρου. Έτσι, μπορεί να αναλυθεί καλύτερα ένα μη-στάσιμο σήμα, θεωρώντας ότι στη χρονική διάρκεια του χρονικού παραθύρου που έχει επιλεγεί το κομμάτι του σήματος είναι στάσιμο. Το χρονικό παράθυρο, καθώς μετακινείται στο πεδίο του χρόνου δίνει ως αποτέλεσμα μια διδιάστατη απεικόνιση χρόνου-συχνότητας, το πλάτος της οποίας ονομάζεται «φασματογράφημα» (spectrogram) του σήματος.

Μειώνοντας το μήκος του παραθύρου που χρησιμοποιείται, είναι δυνατόν να βελτιωθεί η ανάλυση στον χρόνο (time resolution), αλλά όπως είναι γνωστό από την Αρχή της Αβεβαιότητας μειώνεται η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (frequency resolution). Δεν γίνεται δηλαδή να γίνουν γνωστές οι ακριβείς συχνότητες που υπάρχουν στο σήμα, αλλά κάποιες ζώνες συχνοτήτων που υπάρχουν σε αυτό.

Επίσης, ενώ ο συμβιβασμός ανάμεσα στη χρονική και συχνοτική πληροφορία μπορεί να είναι χρήσιμος, όταν επιλεγεί ένα συγκεκριμένο μέγεθος για το χρονικό παράθυρο, το παράθυρο αυτό παραμένει το ίδιο για όλες τις συχνότητες. Πολλά σήματα απαιτούν μία πιο ευέλικτη προσέγγιση, που θα μπορεί να μεταβάλλει το μέγεθος του παραθύρου για να καθορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια είτε τον χρόνο είτε τη συχνότητα.

Επιπρόσθετα, λόγω της χρήσης του χρονικού παραθύρου σταθερού πλάτους, κάθε συνιστώσα του υπό εξέταση σήματος με χρονική διάρκεια μικρότερη από αυτή της συνάρτησης παραθύρου, εξαλείφεται μετά από την εφαρμογή του μετασχηματισμού STFT.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω περιορισμοί του μετασχηματισμού STFT, και για επίτευξη καλύτερης ποιότητας ανάλυσης, χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμοί κυματιδίων (wavelet transforms).

### 3.3 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα κυματίδια (wavelets) είναι γνωστά ως μαθηματικά εργαλεία για την ανάλυση χρονικών σειρών ή εικόνων (αλλά όχι αποκλειστικά για αυτά). Αν και αποτελούν ένα σχετικά νέο εργαλείο, από πολλές απόψεις τα κυματίδια είναι η σύνθεση παλαιότερων ιδεών που προσφέρουν νέα και κομψότερα μαθηματικά αποτελέσματα και αποδοτικούς υπολογιστικούς αλγορίθμους. Η κυματιδιακή ανάλυση σε πολλές περιπτώσεις λειτουργεί συμπληρωματικά στις υπάρχουσες τεχνικές και σε άλλες περιπτώσεις λύνει προβλήματα για τα οποία ήταν πολύ μικρή η πρόοδος πριν την εισαγωγή της [8].

Ο όρος κυματίδιο (wavelet) είναι η μετάφραση της γαλλικής λέξης *ondellettes* που σημαίνει μικρό κύμα. Τα κυματίδια είναι δηλαδή συναρτήσεις εντοπισμένες στο πεδίο της συχνότητας γύρω από μια κεντρική συχνότητα και έχουν περιορισμένη χρονική διάρκεια. Ουσιαστικά είναι κυματομορφές περιορισμένης χρονικής διάρκειας, οι οποίες έχουν μηδενική μέση τιμή. Η πιο σημαντική διαφορά με τους μετασχηματισμούς που βασίζονται στην ανάλυση Fourier είναι ότι, οι κυματιδιακές συναρτήσεις τείνουν να είναι ασύμμετρες και μη κανονικές, σε αντίθεση με τις ημιτονοειδείς συναρτήσεις βάσης της ανάλυσης Fourier [9].

Το σήμα δηλαδή στην ανάλυση Fourier αναπτύσσεται ως άθροισμα κυμάτων που εκτείνονται στο άπειρο και ως προς τις δύο κατευθύνσεις. Δεν χαρακτηρίζονται συνεπώς από την ιδιότητα της συμπαγούς υποστήριξης (compact support), δηλαδή δεν έχουν τις μοναδικές μη μηδενικές τιμές τους σε ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ βασική μιας και εξαιτίας της, τα κυματίδια συνιστούν ένα πολύτιμο εργαλείο για την ανάλυση των μεταβατικών στοιχείων ενός σήματος. Τα μεταβατικά στοιχεία ενός σήματος είναι μη μηδενικά μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα [10].

### 3.3.1 Συνεχής Μετασχηματισμός Κυματιδίων (Continuous Wavelet Transform)

Ο Συνεχής Μετασχηματισμός Κυματιδίων (CWT) οφείλει την ανακάλυψή του στην επιστημονική ομάδα των P.Goupillaud, A.Grossman και J.Morlet, που έθεσαν τις μαθηματικές του βάσεις το 1984. Η βάση των συνεχών μετασχηματισμών κυματιδίων είναι η θεωρία κυματιδίων (μητρικών κυματιδίων).

Ένα κυματίδιο περιγράφεται από τη συνάρτηση  $\psi_{a,b}(t)$ , η οποία προέρχεται από τη διαστολή και μετατόπιση στον χρόνο της πραγματικής συνάρτησης  $\psi(t)$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.7):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > 0, \quad b \in R \quad (3.7)$$

Η συνάρτηση  $\psi(t)$  ονομάζεται μητρικό κυματίδιο (mother wavelet) και πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις. Η βασικότερη είναι η «συνθήκη της επιτρεψιμότητας» (admissibility condition). Αυτή η συνθήκη είναι απαραίτητη για την ύπαρξη του αντίστροφου μετασχηματισμού κυματιδίων και φαίνεται στην εξίσωση (3.8):

$$\int_0^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega = C < +\infty \quad (3.8)$$

Η συνάρτηση  $\psi$  επίσης δεν πρέπει να έχει dc συνιστώσα, οπότε προκύπτει και η δεύτερη προϋπόθεση που πρέπει να πληροί (3.9):

$$\Psi(\omega = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.9)$$

όπου  $\Psi(\omega)$  είναι ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης  $\psi(t)$ .

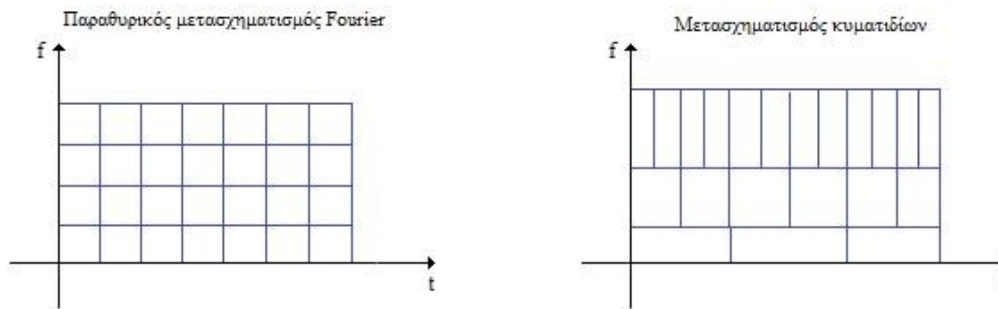
Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων μιας συνάρτησης  $f(t)$  ορίζεται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.10) και (3.11):

$$CWTf(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = f * \xi_a \quad (3.10)$$

$$\xi_a(u) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{-u}{a}\right) \quad \text{και} \quad u = b - t \quad (3.11)$$

Ως εκ τούτου ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων μιας συνάρτησης είναι συνάρτηση δύο παραμέτρων  $a$  και  $b$ . Η παράμετρος  $a$  υποδηλώνει την κλιμάκωση της συνάρτησης  $\psi$ , ενώ η παράμετρος  $b$  τη χρονική μετατόπισή της. Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων υπολογίζεται δηλαδή, χρησιμοποιώντας τη μετατοπισμένη χρονικά και διεσταλμένη εκδοχή της ίδιας συνάρτησης  $\psi$  [11].

Η αρχή της αβεβαιότητας συνεχίζει να ισχύει στην περίπτωση του Συνεχούς Μετασχηματισμού Κυματιδίων, όχι όμως όπως στον Παραθυρικό Μετασχηματισμό Fourier. Τώρα η ανάλυση χρόνου δύναται να γίνει αυθαίρετα καλή στις υψηλές συχνότητες και αντίστοιχα η ανάλυση κλίμακας (συχνότητας) στις χαμηλές συχνότητες. Αυτή η κατάσταση μπορεί να φανεί στο Σχήμα 3.1 [12]



Σχήμα 3.1 Ανάλυση χρόνου και ανάλυση συχνότητας για STFT και WT

### 3.3.2 Διακριτός Μετασχηματισμός Κυματιδίων (DWT)

Ο συνεχής μετασχηματισμός κυματιδίων εφαρμόζεται σε συνεχείς συναρτήσεις της μορφής  $f(t)$  και για συνεχείς τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $b$ . Όμως, στην πραγματικότητα, η πλειοψηφία των σημάτων που υπάρχουν στη φύση και χρειάζονται ανάλυση είναι διακριτού χρόνου. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη για τη χρησιμοποίηση του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων, ο οποίος σε αντίθεση με τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier, δεν μπορεί να προκύψει από τον συνεχή μετασχηματισμό κατευθείαν. Η μετάβαση από τον συνεχή μετασχηματισμό κυματιδίων στον διακριτό μπορεί να γίνει αξιοποιώντας τη θεωρία της Ανάλυσης Πολλαπλής Διακριτικής Ικανότητας (Multiresolution Analysis, MRA). Χάρis σε αυτήν τη θεωρία, για να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός κυματιδίων ενός διακριτού σήματος δεν χρειάζεται ούτε το μητρικό κυματίδιο  $\psi(t)$  ούτε η συνάρτηση κλίμακας (scaling function)  $\varphi(t)$ .

Στον διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων, φίλτρα με διαφορετικές συχνότητες αποκοπής, χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν το σήμα σε διαφορετικές κλίμακες (συχνότητες). Το σήμα περνάει μέσα από μια σειρά υπερπερατών φίλτρων για να αναλυθούν οι υψηλές συχνότητες και μέσα από μια σειρά από βαθυπερατά φίλτρα για να αναλυθούν οι χαμηλές συχνότητες.

Σε κάθε επίπεδο αποσύνθεσης, το σήμα, έστω  $x[n]$ , περνάει από ένα βαθυπερατό φίλτρο μισής ζώνης με κρουστική απόκριση  $h[n]$  και από ένα υψιπερατό φίλτρο μισής ζώνης με κρουστική απόκριση  $g[n]$ . Το βαθυπερατό φίλτρο μισής ζώνης αποκόπτει όλες τις συχνότητες που είναι μεγαλύτερες από το μισό της μέγιστης συχνότητας που υπάρχει στο σήμα  $x[n]$  και το υψιπερατό φίλτρο μισής ζώνης τις συχνότητες που είναι μικρότερες από το μισό της μέγιστης συχνότητας.

Τα σήματα που θα προκύψουν από την ανάλυση με το υψιπερατό και το βαθυπερατό φίλτρο έχουν το μισό εύρος ζώνης από το αρχικό σήμα  $x[n]$ , αλλά τον ίδιο ρυθμό δειγματοληψίας (sampling rate), αφού θα έχουν τον ίδιο αριθμό δειγμάτων  $n$  στον χρόνο. Σύμφωνα με το κριτήριο δειγματοληψίας του Nyquist, ο ρυθμός δειγματοληψίας των σημάτων που προκύπτουν μπορεί να μειωθεί και αυτός στο μισό. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μειώνοντας τον αριθμό των δειγμάτων  $n$  στο μισό, διαγράφοντας κάθε δεύτερο δείγμα στο πεδίο του χρόνου.

Οι δύο αυτές διαδικασίες, της ανάλυσης με τα φίλτρα  $h[n]$  και  $g[n]$ , καθώς και η υποδειγματοληψία των σημάτων που προκύπτουν μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά με τις παρακάτω εξισώσεις (3.12) και (3.13):

$$y_L[k] = \sum_n x[n] \cdot h[2k - n] \quad (3.12)$$

$$y_H[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k - n] \quad (3.13)$$

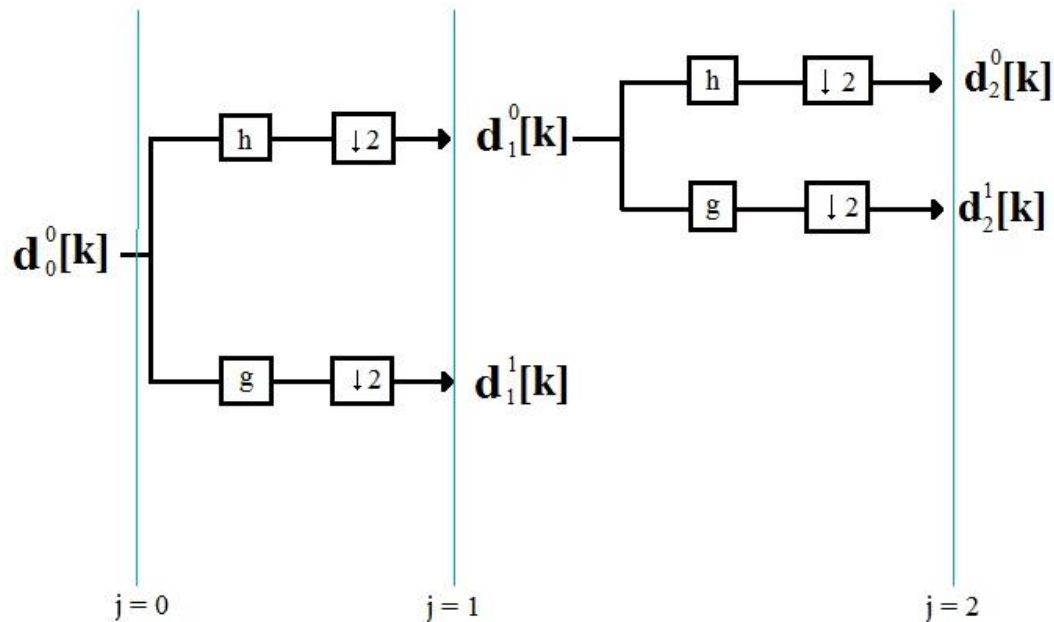
όπου  $x[n]$  το αρχικό σήμα,  $y_L[n]$  το σήμα που προκύπτει από την ανάλυση με το βαθυπερατό φίλτρο και  $y_H[n]$  το σήμα που προκύπτει από την ανάλυση με το υψιπερατό φίλτρο.

Στο επόμενο επίπεδο αποσύνθεσης, το σήμα  $y_L[n]$  αναλύεται και αυτό με τη σειρά του στις υψηλές και στις χαμηλές συχνότητές του, χρησιμοποιώντας τα φίλτρα  $h[n]$  και  $g[n]$  ακριβώς όπως και πριν, ενώ το σήμα  $y_H[n]$  παραμένει ως έχει. Σε κάθε επίπεδο αναλύεται παραπάνω μόνο το σήμα που περιέχει τις χαμηλές συχνότητες, πετυχαίνοντας έτσι καλύτερη ανάλυση στη συχνότητα (frequency resolution) για τις χαμηλές συχνότητες και καλύτερη ανάλυση στον χρόνο (time resolution) για τις υψηλές συχνότητες. Έτσι, δημιουργείται το δέντρο του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ένα δέντρο που έχει προκύψει με ανάλυση διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων 2 επιπέδων ( $j=2$ ). Το αρχικό σήμα είναι το  $d_0^0[k]$ ,  $g[k]$  είναι το υψιπερατό φίλτρο μισής ζώνης και  $h[k]$  το βαθυπερατό φίλτρο μισής ζώνης. Στο σχήμα φαίνεται επίσης και η υποδειγματοληψία που επιδέχονται τα σήματα. Το σήμα  $d_1^0[k]$  είναι το σήμα που έχει προκύψει στο πρώτο επίπεδο αποσύνθεσης ( $j=1$ ) από την ανάλυση του



αρχικού σήματος με το βαθυπερατό φίλτρο. Αν τα δείγματα  $n$  του αρχικού σήματος ήταν  $N$  και η μέγιστη συχνότητα που περιείχε ήταν  $f_{max}$ , τότε το σήμα  $d_1^0[k]$  έχει  $N/2$  δείγματα στο πεδίο του χρόνου και έχει εύρος ζώνης συχνοτήτων  $[0, f_{max}/2]$ . Αντίστοιχα το σήμα  $d_1^1[k]$  είναι το σήμα που προκύπτει στο πρώτο επίπεδο αποσύνθεσης από την ανάλυση του αρχικού σήματος με το υψιπερατό φίλτρο, έχει  $N/2$  δείγματα στο πεδίο του χρόνου και εύρος ζώνης συχνοτήτων  $[f_{max}/2, f_{max}]$ . Τα στοιχεία  $k$  των σημάτων  $d_1^0[k]$  και  $d_1^1[k]$  είναι οι συντελεστές του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων στο πρώτο επίπεδο αποσύνθεσης. Στο δεύτερο επίπεδο αποσύνθεσης ( $j=2$ ), το σήμα  $d_1^0[k]$  αναλύεται με τη χρησιμοποίηση των φίλτρων  $h[k]$  και  $g[k]$  στα σήματα  $d_2^0[k]$  και  $d_2^1[k]$ , τα οποία έχουν  $N/4$  δείγματα στο πεδίο του χρόνου και εύρος ζώνης συχνοτήτων  $[0, f_{max}/4]$  και  $[f_{max}/4, f_{max}/2]$  αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 Δέντρο διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων

Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα φίλτρα  $h'[n]$  και  $g'[n]$  και υπερδειγματοληπώντας τα σήματα που προκύπτουν σε κάθε επίπεδο μπορεί να ανακατασκευαστεί από τους τελικούς συντελεστές του μετασχηματισμού κυματιδίων το αρχικό σήμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εάν τα φίλτρα  $h'[n]$  και  $g'[n]$  κατασκευαστούν από το βαθυπερατό φίλτρο  $h[n]$  και από το υψιπερατό φίλτρο  $g[n]$  υπακούοντας στους εξής κανόνες:

$$h'[n] = h[N - n], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.14)$$

$$g'[n] = g[N - n], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

Επίσης τα φίλτρα  $h[n]$ ,  $g[n]$ ,  $h'[n]$ ,  $g'[n]$  συνδέονται μεταξύ τους με τις παρακάτω σχέσεις:

$$g'[n] = -(-1)^n h'[N - n] = -(-1)^n h[n] \quad (3.16)$$

$$g[n] = (-1)^n h[N - n] = (-1)^n h[n] \quad (3.17)$$

Τα φίλτρα  $h[n]$  και  $g[n]$  τα οποία ικανοποιούν τις εξισώσεις (3.14), (3.15), (3.16) και (3.17) ονομάζονται καθρεπτικά φίλτρα (Quadrature Mirror Filters - QMF).

### 3.3.3 Σχέση μεταξύ φίλτρων, συνάρτησης κλίμακας και μητρικού κυματιδίου

Για να αποδειχτεί η σύνδεση μεταξύ των φίλτρων QMF και της θεωρίας των κυματιδίων, θα χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις συνεχούς μεταβλητής. Τα διακριτά δείγματα θα θεωρηθούν σαν δείγματα που έχουν προκύψει από δειγματοληψία μιας συνεχούς μεταβλητής. Αυτή η θεώρηση είναι απαραίτητη, καθώς τα κυματίδια δεν μπορούν να εκφραστούν με διακριτή μεταβλητή.

Αρχικά, θεωρείται ένα σήμα  $x(t)$  και μια συνάρτηση  $\varphi(t)$ , για την οποία έχει γίνει η υπόθεση ότι οι ακέραιες μετατοπίσεις της,  $\varphi(t-m)$ , μπορούν να αναπαραστήσουν πλήρως το αρχικό σήμα  $x(t)$ . Εφόσον οι συναρτήσεις  $\varphi(t-m)$ , για  $m = 0, 1, 2, \dots, N$ , μπορούν να αναπαραστήσουν μια οποιαδήποτε συνάρτηση  $x(t)$ , θα μπορούν να αναπαραστήσουν και μια διασταλμένη εκδοχή της συνάρτησης  $\varphi(t)$ , όπως για παράδειγμα την  $\varphi(t/2)$ , χρησιμοποιώντας κάποιους συντελεστές  $h'(m)$ . Οπότε προκύπτει η εξίσωση (3.18):

$$\varphi\left(\frac{t}{2}\right) = \sqrt{2} \sum_{m=0}^N h'(m) \varphi(t - m) \quad (3.18)$$

Από την εξίσωση (3.18) και θεωρώντας  $h'(m) = h(N-m)$  μπορεί να προκύψει η παρακάτω εξίσωση (3.19):

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \sqrt{2} \sum_{m=0}^N h'(m) \varphi(2t - m) \\ &= \sqrt{2} \sum_{m=0}^N h(N - m) \varphi(2t - m) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Οι συντελεστές  $h'(m)$  είναι οι συντελεστές του φίλτρου  $h'[n]$  της εξίσωσης (3.14), που χρησιμοποιείται για την σύνθεση του αρχικού σήματος από τους συντελεστές του διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων. Επίσης, οι συναρτήσεις  $\varphi(t)$  ικανοποιούν την εξίσωση (3.20):

$$\int \varphi(t - m)dt = 1 \quad (3.20)$$

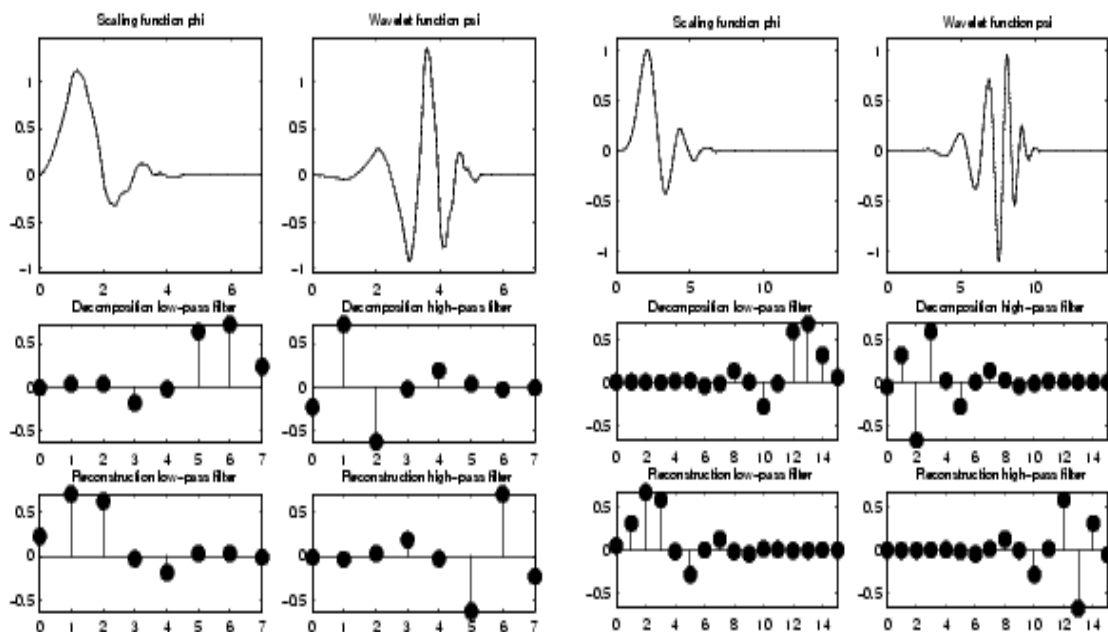
Η συνάρτηση που ικανοποιεί τις εξισώσεις (3.19) και (3.20) ονομάζεται συνάρτηση κλίμακας (scaling function) και χρησιμοποιείται για να παραχθούν τα μητρικά κυματίδια.

Στη συνέχεια, η συνάρτηση του μητρικού κυματιδίου μπορεί να παραχθεί από την εξίσωση (3.21):

$$\begin{aligned} \psi(t) &= \sqrt{2} \sum_{m=0}^N g'(m) \varphi(2t - m) \\ &= \sqrt{2} \sum_{m=0}^N -(-1)^m h'(N - m) \varphi(2t - m) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Συνεπώς, αν είναι γνωστά τα στοιχεία του φίλτρου  $h[n]$ , μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση κλίμακας λύνοντας την εξίσωση (3.19). Εφόσον η συνάρτηση κλίμακας γίνει γνωστή, το μητρικό κυματίδιο δίνεται από την εξίσωση (3.21). Παρόλα αυτά για να αναλυθεί ένα σήμα με τον διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων δεν είναι απαραίτητο να είναι γνωστά ούτε το μητρικό κυματίδιο ούτε η συνάρτηση κλίμακας, παρά μόνο το βαθυπερατό φίλτρο μισής ζώνης  $h[n]$ .

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται δύο κυματίδια, τα κυματίδια Daubechies 4 (db4) και Daubechies 8 (db8), καθώς και τα φίλτρα  $h[n]$ ,  $h'[n]$ ,  $g[n]$  και  $g'[n]$  στα οποία αντιστοιχούν. Για το κυματίδιο Daubechies 4, τα φίλτρα που αντιστοιχούν σε αυτό έχουν 8 στοιχεία, ενώ για το κυματίδιο Daubechies 8 τα φίλτρα έχουν 16 στοιχεία [13].



Σχήμα 3.3 Κυματίδια db4, db8 και QMF φίλτρα [14]

Εφόσον ένα σήμα  $x(t)$  έχει αναλυθεί με τον διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο Σχήμα 3.2, είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί το αρχικό σήμα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κλίμακας και το μητρικό κυματίδιο. Οι τελικοί συντελεστές που έχουν προκύψει από ανάλυση με το υπερβατό φίλτρο  $g[n]$  χρησιμοποιούν το μητρικό κυματίδιο και ο τελευταίος συντελεστής που έχει προκύψει από την ανάλυση με το βαθυπερατό φίλτρο χρησιμοποιεί τη συνάρτηση κλίμακας. Έτσι αν υπάρχουν  $M$  το πλήθος τελικοί συντελεστές, προκύπτει η αναπαράσταση του αρχικού σήματος  $x(t)$  όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.22):

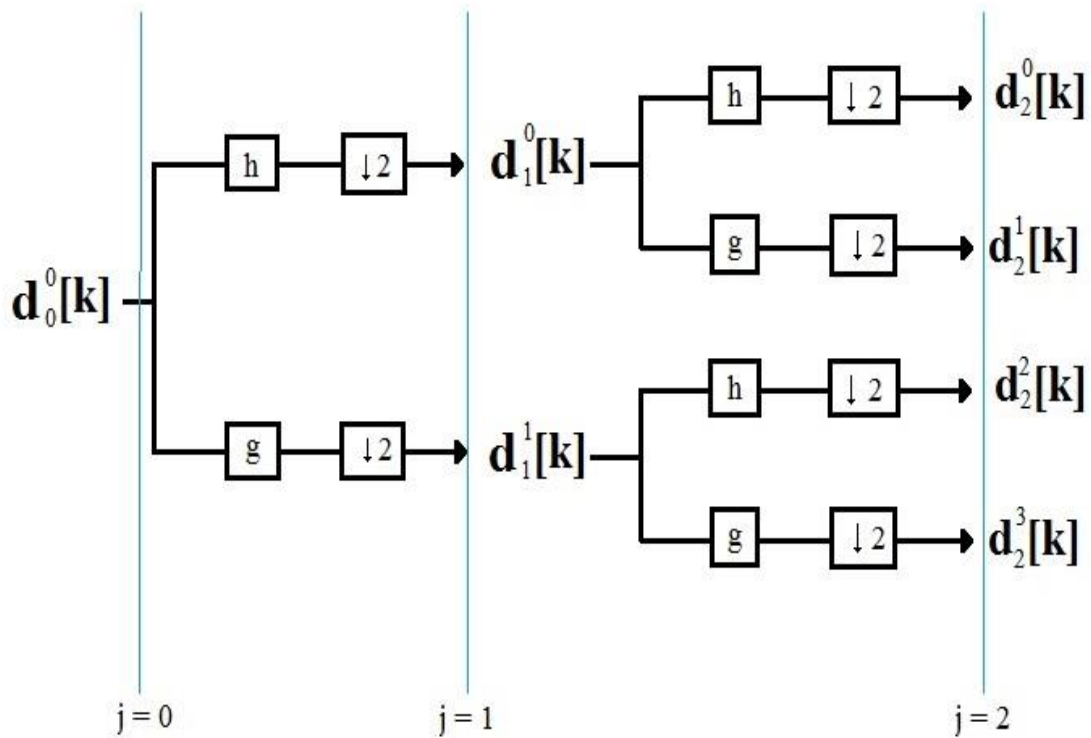
$$x(t) = \sum_k d_{0,k} \varphi_{0,k}(t) + \sum_{n=1}^M \sum_k d_{n,k} \psi_{n,k}(t) \quad (3.22)$$

### 3.3.4 Μετασχηματισμός Πακέτου Κυματιδίων (Wavelet Packet Transform)

Ο Μετασχηματισμός Πακέτου Κυματιδίων (WPT), ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική για την ανάλυση της τάσης και του ρεύματος και τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας ισχύος, είναι ένα είδος διακριτού μετασχηματισμού κυματιδίων, αλλά διαφέρει από τον διακριτό μετασχηματισμό DWT που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3.2.

Ο Διακριτός Μετασχηματισμός Κυματιδίων (DWT) σε κάθε επίπεδο αναλύει περαιτέρω μόνο τους συντελεστές που έχουν προκύψει από τη συνέλιξη με την κρουστική απόκριση του βαθυπερατού φίλτρου  $h[n]$  και αφήνει αναλλοίωτους τους συντελεστές που έχουν προκύψει από τη συνέλιξη με την κρουστική απόκριση του υπερβατού φίλτρου  $g[n]$ . Η διαφορά του Μετασχηματισμού Πακέτου Κυματιδίων έγκειται στο ότι σε κάθε επίπεδο αποσύνθεσης του αρχικού σήματος αναλύονται ξανά με τα QMF φίλτρα όλοι οι συντελεστές, και αυτοί που προκύπτουν με τη χρήση του φίλτρου  $h[n]$  και αυτοί που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το φίλτρο  $g[n]$ . Έτσι προκύπτει ένα WPT δέντρο όπως για παράδειγμα αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.

Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται ένα δέντρο που έχει προκύψει από την ανάλυση του σήματος  $d_0^0[k]$  σε δύο επίπεδα αποσύνθεσης ( $j=2$ ), με τη χρήση του WPT. Οι τελικοί συντελεστές είναι οι  $d_2^n[k]$ , όπου  $n$  είναι ο αντίστοιχος κόμβος. Ο πρώτος κόμβος ξεκινάει πάντα από τη συχνότητα 0, και ο τελευταίος κόμβος τελειώνει στη μέγιστη συχνότητα που υπάρχει στο αρχικό σήμα  $f_{max}$ . Σε αντίθεση με τον Διακριτό Μετασχηματισμό Κυματιδίων κάθε τελικός κόμβος έχει το ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων και τα ίδια δείγματα στον χρόνο, που σημαίνει ότι έχει την ίδια ανάλυση και στη συχνότητα και στον χρόνο.



Σχήμα 3.4 Δέντρο Wavelet Packet Transform

Στον Πίνακα (3.1) φαίνεται η σχέση μεταξύ των επιπέδων αποσύνθεσης, των κόμβων, και του εύρος ζώνης συχνοτήτων του κάθε κόμβου. Στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης, θα υπάρχουν  $2^j$  κόμβοι  $n$ , όπου κάθε ένας κόμβος θα έχει εύρος ζώνης συχνοτήτων  $f_{max}/2^j$ . Αυτό σημαίνει ότι σε όσο περισσότερα επίπεδα αποσυντεθεί ένα σήμα, τόσο καλύτερη θα είναι η ανάλυση στη συχνότητα των συντελεστών που προκύπτουν, αλλά αντίστροφα τόσο χειρότερη η συχνότητα στον χρόνο, καθώς σε κάθε επίπεδο υποδιπλασιάζονται τα δείγματα [15].

Πίνακας 3.1 Εύρος ζώνης συχνοτήτων των κόμβων για 3 επίπεδα αποσύνθεσης

j = 1		j = 2		j = 3	
Κόμβος	Ζώνη Συχνοτήτων	Κόμβος	Ζώνη Συχνοτήτων	Κόμβος	Ζώνη Συχνοτήτων
0	$[0, f_{max}/2]$	0	$[0, f_{max}/4]$	0	$[0, f_{max}/8]$
1	$[f_{max}/2, f_{max}]$	1	$[f_{max}/4, f_{max}/2]$	1	$[f_{max}/8, f_{max}/4]$
		2	$[f_{max}/2, 3f_{max}/4]$	2	$[f_{max}/4, 3f_{max}/8]$
		3	$[3f_{max}/4, f_{max}]$	3	$[3f_{max}/8, f_{max}/2]$
				4	$[f_{max}/2, 5f_{max}/8]$
				5	$[5f_{max}/8, 3f_{max}/4]$
				6	$[3f_{max}/4, 7f_{max}/8]$
				7	$[7f_{max}/8, f_{max}]$

### **ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ**

#### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σήμερα, η εκτίμηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς η παροχή ισχύος σε υψηλό επίπεδο ποιότητας αντιπροσωπεύει μια από τις θεμελιώδεις αρχές πάνω στις οποίες στηρίζονται τα έξυπνα δίκτυα (smart grids). Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση μη γραμμικών φορτίων, όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές κ.α., δημιουργεί παραμορφωμένα, δηλαδή μη ημιτονοειδή, ρεύματα, ακόμα και όταν τα φορτία αυτά τροφοδοτούνται με καθαρά ημιτονοειδή τάση. Τα μη ημιτονοειδή αυτά ρεύματα προκαλούν παραμόρφωση στην κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος σε όλο το μήκος του ηλεκτρικού δικτύου, μειώνοντας έτσι την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές, πολλοί από τους οποίους μπορεί να διαθέτουν συσκευές ευαίσθητες στην παραμόρφωση αυτή.

Αυτές οι διαταραχές στην ποιότητα ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε στάσιμες και μη στάσιμες, με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κυματομορφών της τάσης και/ή του ρεύματος. Οι στάσιμες κυματομορφές έχουν στατιστικά χαρακτηριστικά που δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο, ενώ οι μη στάσιμες έχουν χρονο-μεταβλητά χαρακτηριστικά τα οποία μπορεί να είναι ημιτονοειδή ή συνημιτονοειδή.

Εφόσον οι διαταραχές στην ποιότητα ισχύος μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη απόδοση του συστήματος, πράγμα που έχει αρνητική επίδραση στην οικονομική λειτουργία του, η εκτίμηση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος γίνεται εξαιρετικά σημαντική, τόσο για τις ηλεκτρικές εταιρίες, όσο και για τους καταναλωτές, ιδιαίτερα στα πλαίσια των έξυπνων δικτύων.

Η ακριβής εκτίμηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος απαιτεί αποδεκτούς και εγκεκριμένους δείκτες για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των διαφόρων διαταραχών της ποιότητας ισχύος. Οι δείκτες αυτοί πρέπει να προσαρμόζονται στις υπάρχουσες παραμορφωμένες κυματομορφές. Οι σύγχρονοι και ακριβείς δείκτες ποιότητας ηλεκτρικής

ισχύος θα πρέπει να μπορούν να αποκαλύπτουν και να ποσοτικοποιούν τις διαταραχές, όπως για παράδειγμα τις βυθίσεις τάσης και την αρμονική παραμόρφωση, που σχετίζονται συχνά με αυτό που ονομάζεται «κρυφό κόστος».

Οι υπάρχοντες δείκτες ποιότητας ισχύος που είναι ευρέως διαδεδομένοι σήμερα βασίζονται, όπως παρουσιάστηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, στην ανάλυση Fourier. Οι σειρές και ο μετασχηματισμός Fourier μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα μόνο για στάσιμες κυματομορφές, των οποίων η συχνότητα δειγματοληψίας τους είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητάς τους, και δεν περιέχουν μεταβατικά ή δυναμικά χαρακτηριστικά, όπως επισημάνθηκε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Σε περίπτωση που μια κυματομορφή δεν έχει αυτά τα χαρακτηριστικά, εμφανίζονται σημαντικά σφάλματα και είναι δύσκολο να εξαχθούν ακριβείς πληροφορίες για την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος μέσα από τους κλασσικούς δείκτες.

Για την αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών, είχε αρχικά προταθεί η χρήση του Παραθυρικού Μετασχηματισμού Fourier για τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας ισχύος. Εφόσον όμως, το παράθυρο του Παραθυρικού Μετασχηματισμού Fourier διατηρείται σταθερό, η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας είναι και αυτή σταθερή και ίση με Δf. Έτσι το μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός ανάμεσα στην ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας.

Για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί που θέτει ο Παραθυρικός Μετασχηματισμός Fourier στον υπολογισμό της ποιότητας ισχύος, προτάθηκε στη συνέχεια η χρησιμοποίηση του Μετασχηματισμού Κυματιδίων, και συγκεκριμένα του Wavelet Packet Transform. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να παρέχει ομοιόμορφες ζώνες συχνοτήτων, ενώ παράλληλα προσφέρει μεγάλη ευελιξία για την ανακατανομή των ζωνών αυτών με βάση την απαίτηση της εκάστοτε μέτρησης.

Σε αυτό το κεφάλαιο, οι δείκτες που έχουν παρουσιαστεί ήδη στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναδιατυπώνονται και επαναπροσδιορίζονται στο πεδίο χρόνου-συχνότητας, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Wavelet Packet, έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια και να δοθεί το μέγεθος της διαταραχής σε μη στάσιμες κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Επίσης, παρουσιάζεται και ένα νέο είδος συντελεστή κορυφής, ο οποίος μπορεί να δώσει πληροφορίες για κάθε ζώνη συχνοτήτων ξεχωριστά.



## 4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

### 4.2.1 Μητρικό κυματίδιο

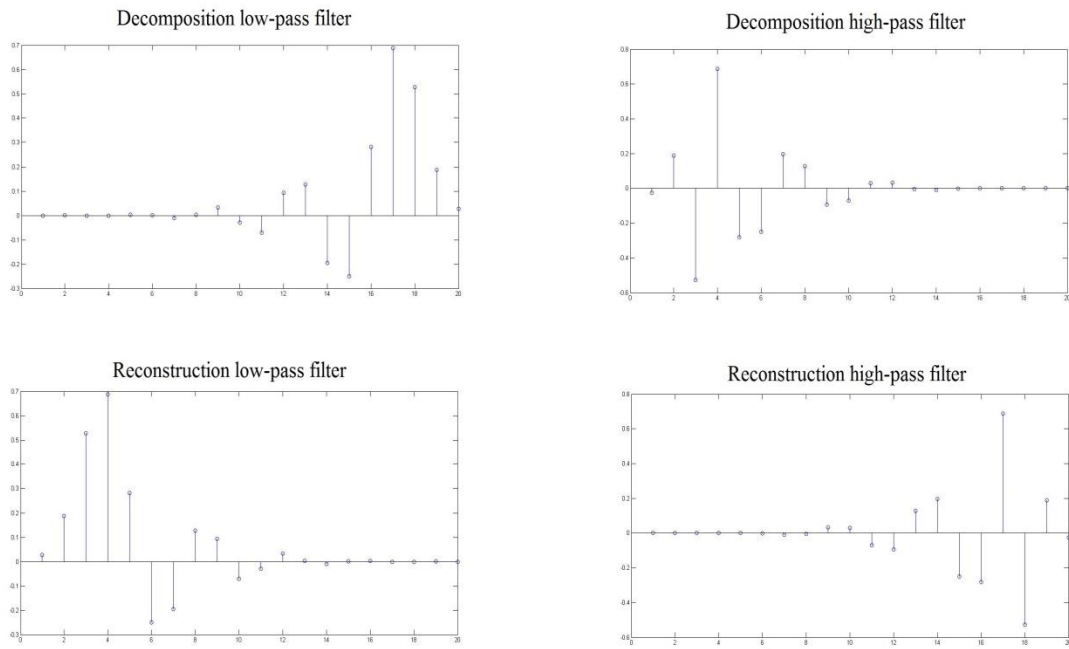
Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε μητρικό κυματίδιο αντιστοιχεί σε δύο καθρεπτικά φίλτρα μισής ζώνης, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των σημάτων στον διακριτό μετασχηματισμό κυματιδίων (DWT) και στον μετασχηματισμό Wavelet Packet (WPT).

Χρησιμοποιώντας διαφορετικά κυματίδια από διαφορετικές οικογένειες κυματιδίων, μπορεί να επηρεαστούν τα αποτελέσματα σε σημαντικό βαθμό. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η επιλογή του καταλληλότερου μητρικού κυματιδίου, το οποίο μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεσμεύοντας ιδανικά όσο το δυνατόν λιγότερη υπολογιστική ισχύ. Εφόσον τα φίλτρα στα οποία αντιστοιχούν τα μητρικά κυματίδια είναι διακριτού χρόνου, όσο λιγότερα στοιχεία έχουν, τόσο λιγότερη υπολογιστική ισχύ θα δεσμεύεται στον υπολογισμό των συντελεστών ενός σήματος, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας. Για παράδειγμα, τα φίλτρα που αντιστοιχούν στο κυματίδιο της οικογένειας Daubechies, db10, θα έχουν 20 στοιχεία, ενώ του κυματιδίου db40 θα έχουν 80 στοιχεία, με αποτέλεσμα αν επιλεγεί το db40 σαν μητρικό κυματίδιο, να καθυστερεί υπερβολικά η επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και να αυξάνεται η μνήμη η οποία δεσμεύεται από το υπολογιστικό σύστημα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από παραδείγματα τα οποία θα παρουσιαστούν στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, τα κυματίδια τα οποία δίνουν τα πιο ακριβή αποτελέσματα είναι το κυματίδιο db10 της οικογένειας Daubechies και το κυματίδιο sym30 της οικογένειας Symlet. Η διαφορά τους είναι ότι, χρησιμοποιώντας το κυματίδιο sym30 έναντι του db10, προκύπτουν ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, θυσιάζοντας όμως αρκετά σε υπολογιστική ισχύ που δεσμεύεται. Η τελική επιλογή ανάμεσα στα δύο αυτά κυματίδια εξαρτάται από τον συμβιβασμό που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση ανάμεσα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και στην υπολογιστική ισχύ που δεσμεύεται από το σύστημα.

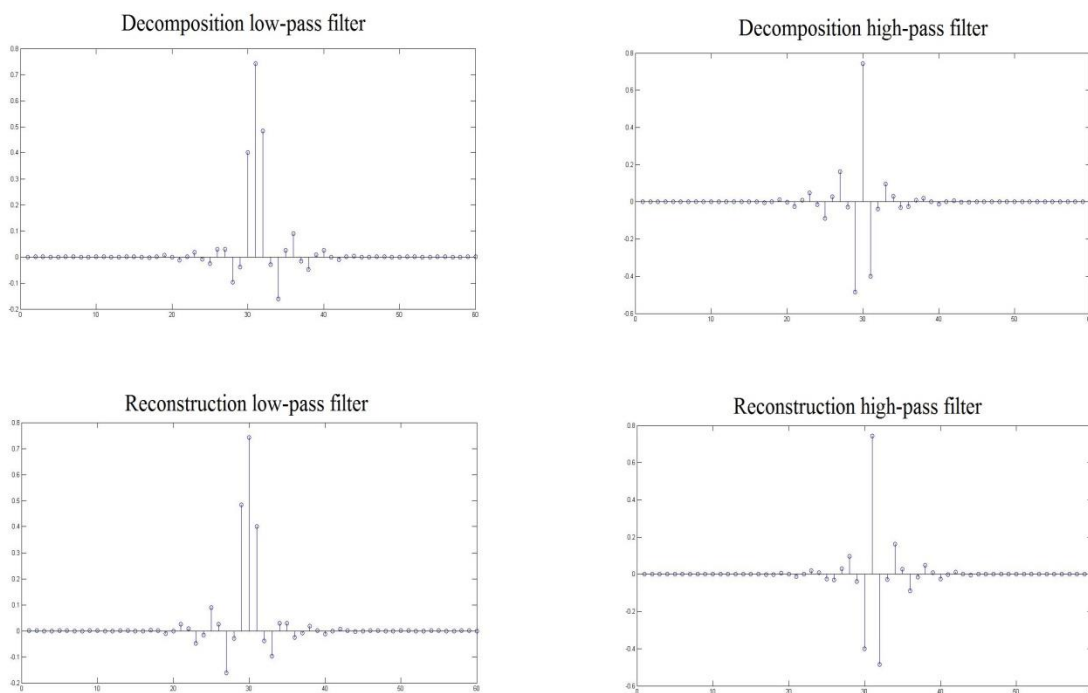
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται τα καθρεπτικά φίλτρα μισής ζώνης που αντιστοιχούν στο κυματίδιο db10, με 20 στοιχεία το καθέ ένα, και χρησιμοποιούνται στον μετασχηματισμό Wavelet Packet. Στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζονται τα καθρεπτικά φίλτρα μισής ζώνης που αντιστοιχούν στο κυματίδιο sym30 και έχουν 60 στοιχεία το κάθε ένα. Από τα δύο αυτά σχήματα φαίνεται η διαφορά στο πλήθος των στοιχείων ανάμεσα στα δύο κυματίδια.

db10 QMF Filters



Σχήμα 4.1 Φίλτρα μισής ζώνης που αντιστοιχούν στο κυματίδιο db10

sym30 QMF Filters



Σχήμα 4.2 Φίλτρα μισής ζώνης που αντιστοιχούν στο κυματίδιο sym30

#### 4.2.2 Συχνότητα δειγματοληψίας, ζώνες συχνότητων και επίπεδο αποσύνθεσης

Όπως είναι γνωστό, όλα τα σήματα τα οποία επεξεργάζονται από ένα υπολογιστικό σύστημα είναι διακριτά. Έτσι, οποιαδήποτε κυματομορφή, και στην συγκεκριμένη περίπτωση η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος, έχει υποστεί δειγματοληψία. Η απόσταση μεταξύ των ισαπεχουσών στιγμών της κυματομορφής που έχει υποστεί δειγματοληψία ονομάζεται περίοδος δειγματοληψίας ( $T_s$ ). Στη συνέχεια ορίζεται το μέγεθος της συχνότητας δειγματοληψίας ως το αντίστροφο της περιόδου δειγματοληψίας ( $F_s = 1/T_s$ ).

Από τη θεωρία Σημάτων, είναι γνωστό το θεώρημα της δειγματοληψίας, το οποίο αναφέρει ότι οποιοδήποτε φασματικά περιορισμένο σήμα  $x(t)$ , με μέγιστη φασματική συνιστώσα στη συχνότητα  $f_{max}$  (Hz), μπορεί να ανασυσταθεί από ισαπέχοντα δείγματά του χωρίς καμία απώλεια πληροφορίας υπό την προϋπόθεση ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από  $2f_{max}$ . Αυτό σημαίνει αντίστροφα ότι, το σήμα  $x[n]$  που έχει υποστεί δειγματοληψία περιέχει αναλλοίωτες τις πληροφορίες για τις συχνότητες μέχρι την συχνότητα  $F_s/2$ , η οποία είναι δηλαδή η μέγιστη που μπορεί να αναπαραστήσει το σήμα  $x[n]$  με ακρίβεια. Όλες οι φασματικές συνιστώσες για συχνότητες μεγαλύτερες από αυτή, χάνονται.

Στην προκειμένη περίπτωση που μελετάται, τα σήματα που θα αναλυθούν είναι η τάση και το ρεύμα, τα οποία συμβολίζονται με  $v[t]$  και  $i[t]$ , όπου  $t = 0, T_s, 2T_s, \dots, t_{max}$  και  $N$  είναι το πλήθος των στοιχείων των διανυσμάτων  $v[t]$  και  $i[t]$ . Δηλαδή, τα σήματα αυτά, αναπαρίστανται στον υπολογιστή σαν πίνακες  $v[n]$  και  $i[n]$ , όπου  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  και ο πίνακας που θα αντιστοιχεί στις χρονικές στιγμές είναι ο  $t[n]$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ , με  $t[1] = 0$ ,  $t[2] = T_s$ ,  $t[3] = 2T_s$ ,  $\dots$ ,  $t[N] = t_{max}$ .

Σύμφωνα με το προηγούμενο θεώρημα θα πρέπει να επιλεγεί η περίοδος δειγματοληψίας, συνεπώς και η συχνότητα δειγματοληψίας, τέτοια ώστε να περιέχονται όλες εκείνες η συχνότητες που είναι επιθυμητό να αναλυθούν. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας, τόσο καλύτερη είναι η αναπαράσταση των κυματομορφών στον διακριτό χρόνο, άρα και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα είναι πιο ακριβή. Αυξάνοντας όμως τη συχνότητα της δειγματοληψίας, αυξάνεται και το μέγεθος των διανυσμάτων  $v[n]$  και  $i[n]$ , με συνέπεια να αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τους υπολογισμούς. Θα πρέπει δηλαδή να συνυπολογιστεί η υπολογιστική ισχύς που δύναται να διατεθεί και η επιθυμητή ακρίβεια, ώστε να επιλεγεί η συχνότητα δειγματοληψίας, η οποία θα περιέχει τις πιο σημαντικές φασματικές συνιστώσες, αλλά και θα επιτρέπει ικανοποιητική ταχύτητα στους υπολογισμούς.

Ένας ακόμα παράγοντας που θα πρέπει να υπολογιστεί είναι το πλήθος  $N$  των στοιχείων των διανυσμάτων  $v[n]$  και  $i[n]$ , το οποίο, για να αναλυθούν τα σήματα με μετασχηματισμό κυματιδίων, θα πρέπει να είναι δύναμη του 2. Βέβαια και να μην επιλεγεί το πλήθος των στοιχείων να δύναμη του 2, τα αποτελέσματα δεν θα έχουν μεγάλη απόκλιση από τα πραγματικά. Η σχέση ανάμεσα στη συχνότητα δειγματοληψίας, στο πλήθος των στοιχείων των διανυσμάτων και τον μέγιστο χρόνο  $t_{max}$  φαίνεται στην εξίσωση (4.1):

$$F_s = \frac{N}{t_{max}} \quad (4.1)$$

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που θα πρέπει επίσης να καθοριστεί είναι το επίπεδο αποσύνθεσης στο οποίο θα αναλυθούν τα σήματα της τάσης και του ρεύματος. Είναι ήδη γνωστό από το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ότι, στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης θα υπάρχουν  $2^j$  κόμβοι. Οι κόμβοι αυτοί έχουν άμεση σχέση με τις ζώνες συχνοτήτων (frequency bands) στις οποίες χωρίζονται τα αρχικά σήματα, αφού κάθε κόμβος αντιστοιχίζεται και σε μια ζώνη. Το εύρος ζώνης κάθε μιας ζώνης συχνοτήτων ( $fb_{BW}$ ) θα σχετίζεται με τη συχνότητα δειγματοληψίας και το επίπεδο αποσύνθεσης, σύμφωνα με την εξίσωση (4.2):

$$fb_{BW} = \frac{F_s}{2^{j+1}} \quad (4.2)$$

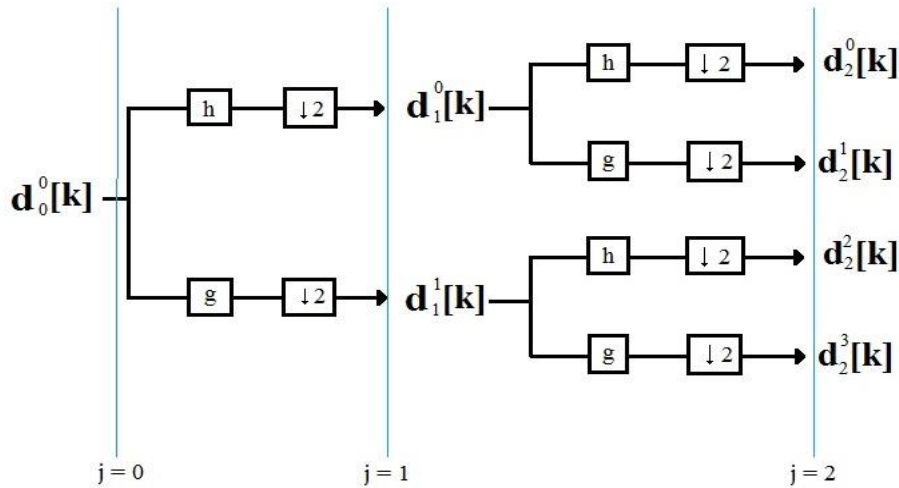
Σύμφωνα με τα παραπάνω και για να αναλυθούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι περιττές αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες στην πράξη είναι αυτές που δημιουργούν την παραμόρφωση, επιλέγεται το εύρος ζώνης κάθε μίας ζώνης συχνοτήτων να είναι ίσο με το διπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας. Έτσι για ένα ηλεκτρικό σύστημα που λειτουργεί σε θεμελιώδη συχνότητα 50 Hz, όπως είναι το ευρωπαϊκό και κατ' επέκταση το ελληνικό, το εύρος ζώνης κάθε ζώνης συχνοτήτων επιλέγεται ίσο με 100 Hz, ενώ για ένα σύστημα όπως το αμερικάνικο, που λειτουργεί σε θεμελιώδη συχνότητα 60 Hz, επιλέγεται 120 Hz.

Έτσι επιλέγοντας αυθαίρετα το εύρος ζώνης κάθε ζώνης συχνοτήτων αλλά και τη συχνότητα δειγματοληψίας, υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι που είναι απαραίτητες μέσω των εξισώσεων (4.1) και (4.2).

### 4.3 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΑΣΗΣ, ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το δέντρο αποσύνθεσης του μετασχηματισμού Wavelet Packet, το οποίο έχει παρουσιαστεί και στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Θεωρείται ότι η αρχική

κυματομορφή  $d_0^0[k]$  είναι η κυματομορφή της τάσης και έχει  $2^N$  στοιχεία. Υπενθυμίζεται, ότι σε αυτή την περίπτωση, στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης, τα διανύσματα που προκύπτουν από την ανάλυση με τον μετασχηματισμό Wavelet Packet,  $d_j^n[k]$  έχουν  $2^{N-j}$  στοιχεία, τα οποία ονομάζονται συντελεστές του μετασχηματισμού της τάσης στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης και κόμβο  $n$ . Επίσης όπως είναι γνωστό στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης θα υπάρχουν  $2^j$  κόμβοι.



**Σχήμα 4.3** Δέντρο αποσύνθεσης με τη χρήση του μετασχηματισμού Wavelet Packet

Αν  $v(t)$  είναι η πραγματική αναλογική κυματομορφή της τάσης, τότε αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί με τη χρήση των συντελεστών αυτών και των κατάλληλα μετατοπισμένων και κλιμακωμένων εκδοχών της συνάρτησης κλίμακας  $\phi(t)$  και του μητρικού κυματιδίου  $\psi(t)$ , όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.3):

$$\begin{aligned}
 v(t) &= \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^{2i}(k) \psi_{j,k}^{2i}(t)] + \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^{2i+1}(k) \psi_{j,k}^{2i+1}(t)] \\
 &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^0(k) \phi_{j,k}(t)] + \sum_{i=1}^{2^{j-1}-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^{2i}(k) \psi_{j,k}^i(t) \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Η συνολική rms τιμή της τάσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο τους συντελεστές που προκύπτουν από την ανάλυση με τον μετασχηματισμό Wavelet Packet, σύμφωνα με την εξίσωση (4.4):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (d_j^i(k))^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^j-1} (V_j^i)^2} \quad (4.4)$$

όπου  $V_j^i$  είναι η rms τιμή της τάσης της ζώνης συχνοτήτων που αντιστοιχεί στον  $i$  κόμβο στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (4.5):

$$V_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (d_j^i(k))^2} \quad (4.5)$$

Αντίστοιχα με τις εξισώσεις (4.3), (4.4) και (4.5) προκύπτουν από την ανάλυση της κυματομορφής του ρεύματος οι εξισώσεις (4.6), (4.7) και (4.8), όπως παρουσιάζονται παρακάτω, θεωρώντας τους συντελεστές του μετασχηματισμού Wavelet Packet για το ρεύμα στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης και στον  $i$  κόμβο είναι  $b_j^i(k)$  για  $k = 0, 1, 2, \dots, 2^{N-j} - 1$ .

$$i(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^0(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{i=1}^{2^j-1} \left( \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^{2^i}(k) \psi_{j,k}^i(t) \right) \quad (4.6)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (b_j^i(k))^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{2^j-1} (I_j^i)^2} \quad (4.7)$$

$$I_j^i = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (b_j^i(k))^2} \quad (4.8)$$

Χρησιμοποιώντας τους ίδιους συντελεστές που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί και η ενεργός ισχύς, τόσο η συνολική όσο και κάθε μίας ζώνης συχνοτήτων ξεχωριστά. Κάνοντας την παραδοχή (4.9):

$$\int v(t)i(t)dt = \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)b_j^i(k)] \quad (4.9)$$

μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ενεργός ισχύς στο πεδίο συχνότητας-χρόνου όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.10):

$$P = \frac{1}{2^N} \sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)b_j^i(k)] = \sum_{i=0}^{2^j-1} P_j^i \quad (4.10)$$

όπου  $P_j^i$  είναι η ενεργός ισχύς του κόμβου  $i$  στο  $j$  επίπεδο αποσύνθεσης και υπολογίζεται από την εξίσωση (4.11):

$$P_j^i = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} [d_j^i(k)b_j^i(k)] \quad (4.11)$$

Τέλος, για τον υπολογισμό της φαινόμενης ισχύος, είναι απαραίτητος πρώτα ο υπολογισμός των rms τιμών της τάσης και του ρεύματος σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.4), (4.5), (4.7) και (4.8). Η συνολική φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.12), ενώ η φαινόμενη ισχύς της ζώνης συχνοτήτων που αντιστοιχεί στην θεμελιώδη συχνότητα σύμφωνα με την εξίσωση (4.13): [16, 17]

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (4.12)$$

$$S_j^0 = V_j^0 I_j^0 \quad (4.13)$$

## 4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΔΙΩΝ

### 4.4.1 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion, THD)

Ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί στο πεδίο συχνότητας-χρόνου βασιζόμενος στις rms τιμές της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα, και σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.14) και (4.15) αντίστοιχα: [18]

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{2^j-1} (V_j^i)^2}}{V_j^0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (d_j^i(k))^2}{\sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (d_j^0(k))^2}} \quad (4.14)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{2^j-1} (I_j^i(k))^2}}{I_j^0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (b_j^i(k))^2}{\sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (b_j^0(k))^2}} \quad (4.15)$$

### 4.4.2 Αρμονική Παραμόρφωση (Distortion Index, DIN)

Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (DIN) ορίζεται σε αυτή την περίπτωση ως ο λόγος του διανυσματικού αθροίσματος των rms τιμών κάθε κόμβου εκτός του κόμβου 0, προς την rms τιμή της αρχικής κυματομορφής. Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.16) και του ρεύματος στην εξίσωση (4.17) [18].

$$DIN_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{2^j-1} (V_j^i)^2}}{V_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (d_j^i(k))^2}{\sum_{n=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (d_j^i(k))^2}} \quad (4.16)$$

$$DIN_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{2^j-1} (I_j^i)^2}}{I_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (b_j^i(k))^2}{\sum_{i=0}^{2^j-1} \sum_{k=0}^{2^{N-j-1}} (b_j^i(k))^2}} \quad (4.17)$$

### 4.4.3 Συντελεστής ισχύος (Power factor, PF)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ο συντελεστής ισχύος ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού ισχύος, προς τη φαινόμενη, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (4.18). Οι ισχείς λαμβάνονται στην περίπτωση της ανάλυσης με μετασχηματισμό Wavelet Packet από τις εξισώσεις (4.10) και (4.12) [18].

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P_j^0 + \sum_{i=1}^{2^j-1} P_j^i}{V_{rms} I_{rms}} \quad (4.18)$$

#### 4.4.4 Συντελεστής ισχύος κόμβου 0 (Node Zero Power Factor, PFnz)

Στην περίπτωση της ανάλυσης με μετασχηματισμό Wavelet Packet, ο συντελεστής ισχύος μετατόπισης (Displacement Factor), που έχει παρουσιαστεί στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αντικαθίσταται με τον συντελεστή ισχύος κόμβου 0 (Node Zero Power Factor). Ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού ισχύος του κόμβου 0, προς τη φαινόμενη ισχύ του κόμβου 0, όπως υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.11) και (4.13) αντίστοιχα. Ο συντελεστής ισχύος κόμβου 0 υπολογίζεται δηλαδή σύμφωνα με την εξίσωση (4.19) [18]:

$$PF_{NZ} = \frac{P_j^0}{S_j^0} \quad (4.19)$$

#### 4.4.5 Συντελεστής κορυφής (Crest Factor, CF)

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται δυο συντελεστές κορυφής [18]. Ο νέος συντελεστής που ορίζεται ονομάζεται Συντελεστής Κορυφής Κόμβου (Node Crest Factor) και αποτελεί στην ουσία τον συντελεστή κορυφής υπολογισμένο για κάθε ζώνη συχνοτήτων (κόμβο) ξεχωριστά, όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.20), όπου έχει υπολογιστεί για την τάση:

$$CF_i = \frac{\max_k \{d_j^i\}}{V_j^i}, i = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1 \quad (4.20)$$

Ο δεύτερος συντελεστής κορυφής (Total Crest Factor) υπολογίζεται για τη συνολική κυματομορφή όπως έχει ήδη παρουσιαστεί και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, και υπολογίζεται όπως φαίνεται παρακάτω, έστω για την τάση:

$$CF_{Total} = \frac{\max_i \{ \max_k \{d_j^i\} \}}{V_{rms}} \quad (4.21)$$



## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν παραδείγματα και εφαρμογές υπολογισμού ποιότητας ισχύος με τη χρήση του μετασχηματισμού Wavelet Packet, για γνωστές και μη, κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Οι κυματομορφές αυτές θα δίνονται είτε από αρχείο excel, στην περίπτωση που είναι γνωστή η μαθηματική περιγραφή τους, είτε με τη μορφή πινάκων από το πρόγραμμα προσομοίωσης MATLAB/SIMULINK.

### 5.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΓΝΩΣΤΕΣ ΤΙΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν δύο παραδείγματα, στα οποία τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος θα δίνονται μέσω αρχείου excel. Η μαθηματική εξίσωση των κυματομορφών αυτών θα είναι γνωστή και έτσι θα είναι γνωστές και οι πραγματικές τιμές των δεικτών ποιότητας ισχύος.

Στη συνέχεια, θα υπολογιστούν οι δείκτες αυτοί με τη χρήση του μετασχηματισμού Wavelet Packet για διαφορετικά μητρικά κυματίδια και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές τιμές. Θα επιλεγούν έτσι, τα καταλληλότερα μητρικά κυματίδια που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα παραδείγματα.

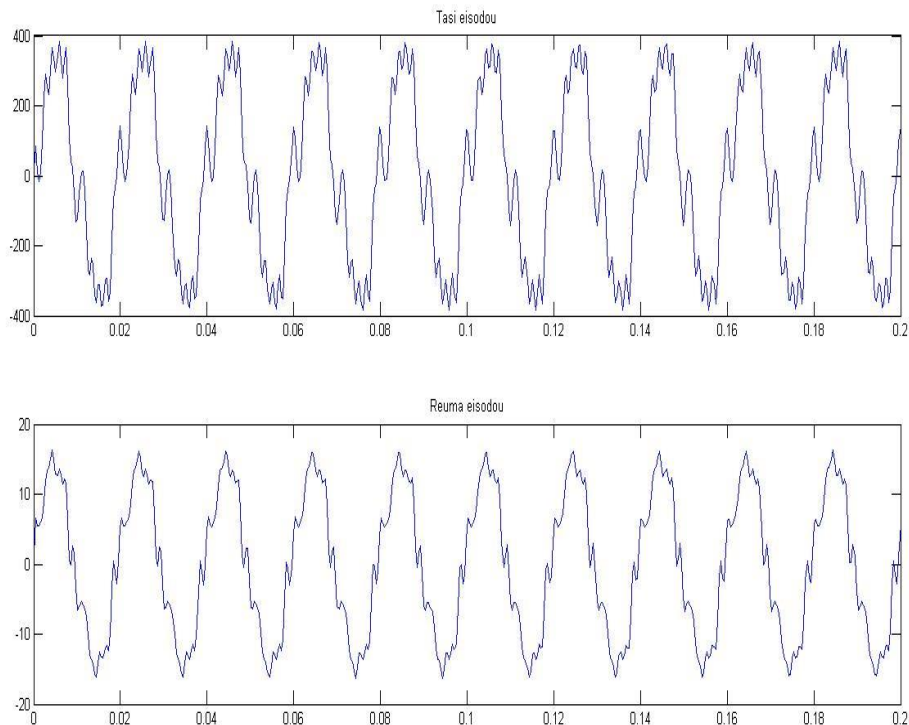
#### 5.2.1 Στάσιμες κυματομορφές

Σε αυτό το παράδειγμα αναλύονται δύο στάσιμες κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1 και των οποίων η μαθηματική περιγραφή

τους δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις (5.1) και (5.2) αντίστοιχα. Η θεμελιώδης συχνότητα  $f$  των κυματομορφών αυτών είναι 50 Hz.

$$v(t) = 230\sqrt{2} \sin(2\pi ft) + 46\sqrt{2} \sin(2\pi 3ft + 135^\circ) + 46\sqrt{2} \sin(2\pi 5ft + 150^\circ) + 23\sqrt{2} \sin(2\pi 7ft + 140^\circ) + 18,4\sqrt{2} \sin(2\pi 9ft + 40^\circ) + 23\sqrt{2} \sin(2\pi 11ft + 15^\circ) + 23\sqrt{2} \sin(2\pi 13ft + 150^\circ) \quad (5.1)$$

$$i(t) = 10\sqrt{2} \sin(2\pi ft + 10^\circ) + \sqrt{2} \sin(2\pi 3ft + 150^\circ) + 0,8\sqrt{2} \sin(2\pi 5ft + 135^\circ) + 0,8\sqrt{2} \sin(2\pi 7ft - 22,5^\circ) + 0,9\sqrt{2} \sin(2\pi 9ft + 20^\circ) + 0,7\sqrt{2} \sin(2\pi 11ft + 45^\circ) + 0,8\sqrt{2} \sin(2\pi 13ft + 120^\circ) \quad (5.2)$$



**Σχήμα 5.1** Κυματομορφές παραδείγματος 1 (Στάσιμες κυματομορφές)

Στους Πίνακες 5.1 έως 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση με τη χρήση του μετασχηματισμού Wavelet Packet, καθώς και η σύγκρισή τους με τις πραγματικές τιμές των δεικτών ποιότητας ισχύος. Συγκεκριμένα, στους Πίνακες 5.1 και 5.2, παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη οι πραγματικές τιμές κάθε δείκτη και στις υπόλοιπες στήλες οι τιμές που προκύπτουν με κάθε μητρικό κυματίδιο ξεχωριστά. Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 φαίνονται επίσης στη δεύτερη στήλη οι πραγματικές τιμές των δεικτών και σε κάθε

επόμενη στήλη η επί τοις εκατό ποσοστιαία διαφορά της τιμής που προκύπτει από την ανάλυση με κάθε μητρικό κυματίδιο με την πραγματική τιμή κάθε δείκτη.

**Πίνακας 5.1 Τιμές δεικτών ποιότητας ισχύος**

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		db10	db20	db30	db43	coif1
<b>THD<sub>v</sub></b>	<b>0.3412</b>	<b>0.3490</b>	<b>0.3431</b>	<b>0.3428</b>	<b>0.3428</b>	<b>0.5308</b>
<b>THD<sub>i</sub></b>	<b>0.2054</b>	<b>0.2166</b>	<b>0.2074</b>	<b>0.2070</b>	<b>0.2069</b>	<b>0.4453</b>
<b>DIN<sub>v</sub></b>	<b>0.3229</b>	<b>0.3295</b>	<b>0.3245</b>	<b>0.3243</b>	<b>0.3243</b>	<b>0.4688</b>
<b>DIN<sub>i</sub></b>	<b>0.2012</b>	<b>0.2117</b>	<b>0.2030</b>	<b>0.2027</b>	<b>0.2026</b>	<b>0.4068</b>
<b>dPF</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>

**Πίνακας 5.2 Τιμές δεικτών ποιότητας ισχύος (συνέχεια πίνακα 5.1)**

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		coif5	sym2	sym10	sym20	sym30
<b>THD<sub>v</sub></b>	<b>0.3412</b>	<b>0.3474</b>	<b>0.5396</b>	<b>0.3483</b>	<b>0.3430</b>	<b>0.3429</b>
<b>THD<sub>i</sub></b>	<b>0.2054</b>	<b>0.2143</b>	<b>0.4531</b>	<b>0.2154</b>	<b>0.2071</b>	<b>0.2070</b>
<b>DIN<sub>v</sub></b>	<b>0.3229</b>	<b>0.3282</b>	<b>0.4749</b>	<b>0.3289</b>	<b>0.3244</b>	<b>0.3244</b>
<b>DIN<sub>i</sub></b>	<b>0.2012</b>	<b>0.2095</b>	<b>0.4127</b>	<b>0.2105</b>	<b>0.2028</b>	<b>0.2027</b>
<b>dPF</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9847</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>	<b>0.9848</b>

Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση τα κυματίδια coif1 και sym2, τα οποία δίνουν αποτελέσματα που διαφέρουν πολύ από τις πραγματικές τιμές, όλα τα υπόλοιπα κυματίδια δίνουν αποτελέσματα τα οποία είναι αρκετά κοντά στα πραγματικά, στην περίπτωση στάσιμων κυματομορφών. Τα κυματίδια που δίνουν τις πιο ακριβείς τιμές είναι τα sym30 και db30 σε αυτή την περίπτωση.

Πίνακας 5.3 Ποσοστιαίες (%) διαφορές από τις πραγματικές τιμές

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		(% ποσοστιαία διαφορά)				
		db10	db20	db30	db43	coif1
THD <sub>v</sub>	0,3412	2,289	0,557	0,472	0,478	55,561
THD <sub>i</sub>	0,2054	5,452	0,949	0,764	0,728	116,782
DIN <sub>v</sub>	0,3229	2,044	0,504	0,429	0,434	45,193
DIN <sub>i</sub>	0,2012	5,214	0,910	0,733	0,698	102,171
dPF	0,9848	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,173

Πίνακας 5.4 Ποσοστιαίες (%) διαφορές από τις πραγματικές τιμές (συνέχεια πίνακα 5.3)

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		(% ποσοστιαία διαφορά)				
		coif5	sym2	sym10	sym20	sym30
THD <sub>v</sub>	0,3412	1,824	58,144	2,079	0,513	0,496
THD <sub>i</sub>	0,2054	4,310	120,586	4,850	0,849	0,796
DIN <sub>v</sub>	0,3229	1,636	47,064	1,862	0,465	0,450
DIN <sub>i</sub>	0,2012	4,124	105,118	4,640	0,814	0,763
dPF	0,9848	0,000	-0,630	0,000	0,000	0,000

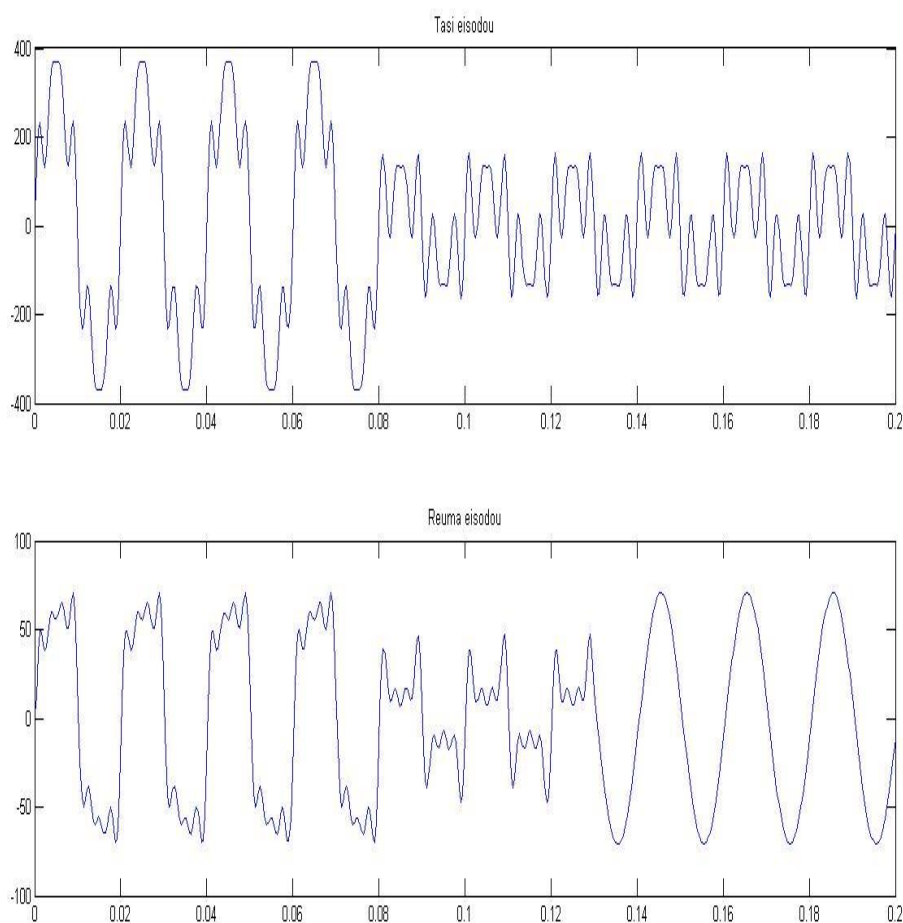
### 5.2.2 Μη στάσιμες κυματομορφές

Στην εφαρμογή αυτή δίνονται προς ανάλυση δύο κυματομορφές των οποίων τα χαρακτηριστικά των αρμονικών τους συνιστωσών δεν είναι αναλλοίωτα στον χρόνο.

Η κυματομορφή της τάσης θα περιέχει τη θεμελιώδη συνιστώσα, 50 Hz, με πλάτος που μεταβάλεται στον χρόνο. Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας θα είναι  $240\sqrt{2}$  για χρόνο μέχρι  $t = 0,08 \text{ sec}$  και στη συνέχεια θα παίρνει την τιμή  $72\sqrt{2}$  μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Εκτός από τη θεμελιώδη συνιστώσα, η τάση θα περιέχει επίσης την 5<sup>η</sup> και την 7<sup>η</sup> αρμονική με πλάτη  $60\sqrt{2}$  και  $40\sqrt{2}$  αντίστοιχα, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η κυματομορφή του ρεύματος θα περιέχει τη θεμελιώδη συνιστώσα με πλάτος  $50\sqrt{2}$  μέχρι το χρόνο  $t = 0.08 \text{ sec}$ ,  $15\sqrt{2}$  για  $t \in [0.08, 0.13)$  και ξανά  $50\sqrt{2}$  μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Θα περιέχει ακόμα την 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα μέχρι το χρόνο  $t = 0.13 \text{ sec}$ , με πλάτη  $12,5\sqrt{2}$ ,  $10\sqrt{2}$  και  $7,5\sqrt{2}$  αντίστοιχα, και στη συνέχεια θα μηδενίζονται.

Οι κυματομορφές αυτές της τάσης και του ρεύματος φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 5.2.



**Σχήμα 5.2 Κυματομορφές παραδείγματος 2 (Μη στάσιμες κυματομορφές)**

Στους Πίνακες 5.5, 5.6, 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών ποιότητας ισχύος και συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές, ακριβώς όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα. Στην περίπτωση αυτή στην οποία αναλύονται μη στάσιμες κυματομορφές ρεύματος και τάσης, φαίνεται ότι τα κυματίδια sym20 και sym30 δίνουν τα καλύτερα

αποτελέσματα. Όλα βέβαια τα κυματίδια, με εξαίρεση και πάλι τα *coif1* και *sym2*, δίνουν αποτελέσματα αρκετά κοντά στα πραγματικά.

**Πίνακας 5.5 Τιμές δεικτών ποιότητας ισχύος**

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		db10	db20	db30	db43	coif1
<b>THD<sub>v</sub></b>	<b>0,4461</b>	<b>0,4574</b>	<b>0,4485</b>	<b>0,4496</b>	<b>0,4503</b>	<b>0,6032</b>
<b>THD<sub>i</sub></b>	<b>0,3243</b>	<b>0,3366</b>	<b>0,3267</b>	<b>0,3286</b>	<b>0,3308</b>	<b>0,5207</b>
<b>DIN<sub>v</sub></b>	<b>0,4074</b>	<b>0,4160</b>	<b>0,4092</b>	<b>0,4101</b>	<b>0,4106</b>	<b>0,5165</b>
<b>DIN<sub>i</sub></b>	<b>0,3085</b>	<b>0,3190</b>	<b>0,3105</b>	<b>0,3121</b>	<b>0,3141</b>	<b>0,4618</b>
<b>dPF</b>	<b>0,8750</b>	<b>0,8803</b>	<b>0,8793</b>	<b>0,8804</b>	<b>0,8808</b>	<b>0,8799</b>
<b>PF</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>

**Πίνακας 5.6 Τιμές δεικτών ποιότητας ισχύος (συνέχεια πίνακα 5.5)**

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		coif5	sym2	sym10	sym20	sym30
<b>THD<sub>v</sub></b>	<b>0,4461</b>	<b>0,4593</b>	<b>0,6030</b>	<b>0,4508</b>	<b>0,4474</b>	<b>0,4477</b>
<b>THD<sub>i</sub></b>	<b>0,3243</b>	<b>0,3399</b>	<b>0,5294</b>	<b>0,3335</b>	<b>0,3262</b>	<b>0,3262</b>
<b>DIN<sub>v</sub></b>	<b>0,4074</b>	<b>0,4174</b>	<b>0,5164</b>	<b>0,4110</b>	<b>0,4084</b>	<b>0,4086</b>
<b>DIN<sub>i</sub></b>	<b>0,3085</b>	<b>0,3218</b>	<b>0,4679</b>	<b>0,3163</b>	<b>0,3101</b>	<b>0,3101</b>
<b>dPF</b>	<b>0,8750</b>	<b>0,8825</b>	<b>0,8768</b>	<b>0,8788</b>	<b>0,8790</b>	<b>0,8792</b>
<b>PF</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,8320</b>

**Πίνακας 5.7 Ποσοστιαίες (%) διαφορές από τις πραγματικές τιμές**

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet				
		(% ποσοστιαία διαφορά)				
		db10	db20	db30	db43	coif1
<b>THD<sub>v</sub></b>	<b>0,4461</b>	<b>2,542</b>	<b>0,503</b>	<b>0,791</b>	<b>0,952</b>	<b>35,227</b>
<b>THD<sub>i</sub></b>	<b>0,3243</b>	<b>3,802</b>	<b>0,732</b>	<b>1,311</b>	<b>2,005</b>	<b>60,564</b>
<b>DIN<sub>v</sub></b>	<b>0,4074</b>	<b>2,107</b>	<b>0,442</b>	<b>0,659</b>	<b>0,792</b>	<b>26,789</b>

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet (% ποσοστιαία διαφορά)				
		db10	db20	db30	db43	coif1
<b>DINi</b>	<b>0,3085</b>	<b>3,416</b>	<b>0,657</b>	<b>1,179</b>	<b>1,804</b>	<b>49,707</b>
<b>dPF</b>	<b>0,8750</b>	<b>0,606</b>	<b>0,487</b>	<b>0,618</b>	<b>0,661</b>	<b>0,559</b>
<b>PF</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

Πίνακας 5.8 Ποσοστιαίες (%) διαφορές από τις πραγματικές τιμές (συνέχεια πίνακα 5.7)

Δείκτες	Πραγματικές τιμές	Μετασχηματισμός Wavelet Packet (% ποσοστιαία διαφορά)				
		coif5	sym2	sym10	sym20	sym30
<b>THDv</b>	<b>0,4461</b>	<b>2,950</b>	<b>35,166</b>	<b>1,051</b>	<b>0,298</b>	<b>0,361</b>
<b>THDi</b>	<b>0,3243</b>	<b>4,819</b>	<b>63,245</b>	<b>2,824</b>	<b>0,586</b>	<b>0,593</b>
<b>DINv</b>	<b>0,4074</b>	<b>2,442</b>	<b>26,747</b>	<b>0,874</b>	<b>0,249</b>	<b>0,301</b>
<b>DINi</b>	<b>0,3085</b>	<b>4,325</b>	<b>55,664</b>	<b>2,540</b>	<b>0,522</b>	<b>0,531</b>
<b>dPF</b>	<b>0,8750</b>	<b>0,853</b>	<b>0,210</b>	<b>0,429</b>	<b>0,454</b>	<b>0,483</b>
<b>PF</b>	<b>0,8320</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>

### 5.2.3 Συμπεράσματα και επιλογή κυματιδίων

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των δύο αυτών εφαρμογών, για όλα τα μητρικά κυματίδια εκτός των coif1 και sym2, οι διαφορές ανάμεσα στις πραγματικές τιμές των δεικτών και σε αυτών που προκύπτουν από την ανάλυση με Wavelet Packet μετασχηματισμό, είναι πολύ μικρές. Το μητρικό κυματίδιο που δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις ταυτόχρονα είναι το κυματίδιο sym30, με το μειονέκτημα όμως της μειωμένης ταχύτητας υπολογισμών. Από την άλλη πλευρά, το μητρικό κυματίδιο που δεσμεύει τους λιγότερους υπολογιστικούς πόρους, αλλά ταυτόχρονα δίνει και ικανοποιητικά αποτελέσματα, όχι όμως τα καλύτερα δυνατά, είναι το κυματίδιο db10. Αυτά είναι και τα δύο κυματίδια τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, χωρίς αυτή η επιλογή αυτή να είναι δεσμευτική.

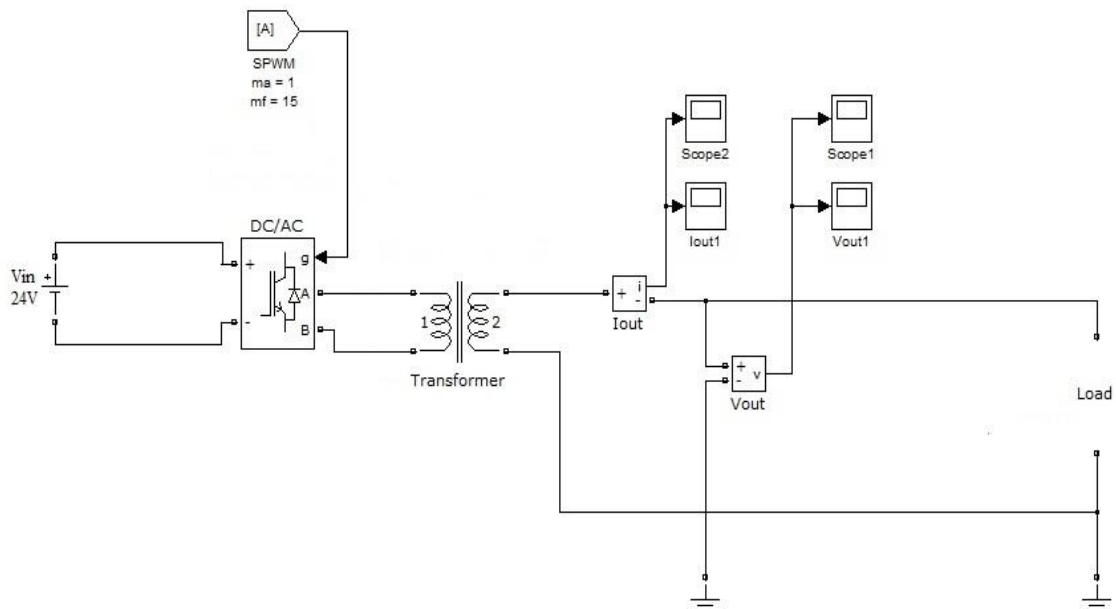
## 5.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB/SIMULINK ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

### 5.3.1 Στοιχεία του κυκλώματος

Για τις ανάγκες των συγκεκριμένων παραδειγμάτων έχει δημιουργηθεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης SIMULINK ένα μονοφασικό κύκλωμα, στο οποίο θα προστίθενται στη συνέχεια φορτία και θα λαμβάνονται η τάση και το ρεύμα φορτίου ως δεδομένα για τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας ισχύος. Επίσης θα λαμβάνονται απευθείας από το πρόγραμμα προσομοίωσης οι τιμές των δεικτών THD τάσης και ρεύματος, υπολογισμένες με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier, με σκοπό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Το κύκλωμα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

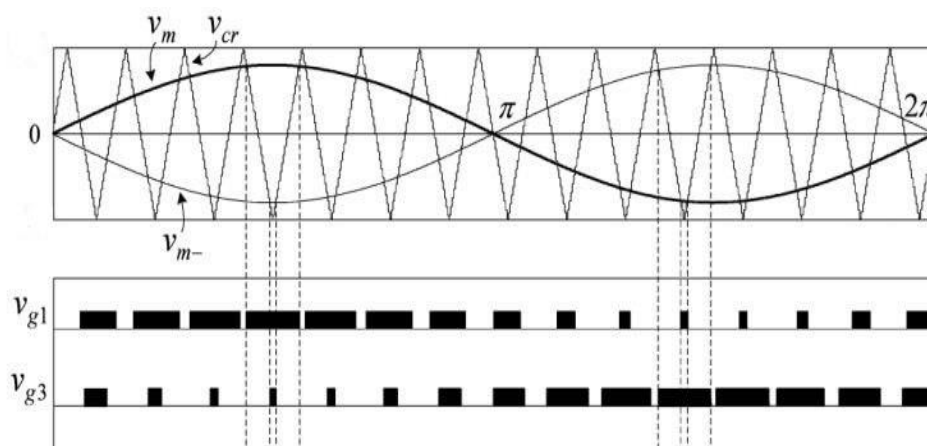
- Συνεχής τάση εισόδου 24V
- Αντιστροφέας γέφυρας με IGBT, ελεγχόμενος με τεχνική SPWM
- Μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης 15/230 V
- Μετρητές τάσης και ρεύματος φορτίου.



Σχήμα 5.3 Μονοφασικό κύκλωμα



Η έξοδος της τάσης του αντιστροφέα ελέγχεται με την τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM). Στην τεχνική αυτή, σε επίπεδο κυκλώματος ελέγχου, δημιουργούνται δύο ημιτονοειδή σήματα αναφοράς, ένα για κάθε σκέλος ή μια φάση της γέφυρας του αντιστροφέα, με διαφορά 180 μοιρών μεταξύ τους και μια τριγωνική κυματομορφή η οποία ονομάζεται κυματομορφή φέροντος σήματος. Και τα τρία αυτά σήματα είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους και οι κυματομορφές τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.



**Σχήμα 5.4** Κυματομορφές φέροντος σήματος, σημάτων αναφοράς και σημάτων ελέγχου του αντιστροφέα

Η συχνότητα του σήματος αναφοράς προσδιορίζει την επιθυμητή συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα 50 Hz. Η συχνότητα του φέροντος σήματος προσδιορίζει την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα, καθώς και τη συχνότητα των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών.

Στη συνέχεια, μια κυματομορφή αναφοράς και η τριγωνική κυματομορφή εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή, στην έξοδο του οποίου δημιουργείται η κυματομορφή  $V_{g1}$  του Σχήματος 5.4. Επίσης, εφαρμόζοντας στην είσοδο ενός δεύτερου συγκριτή, τη δεύτερη κυματομορφή αναφοράς και το ίδιο φέρον σήμα, δημιουργείται στην έξοδο του συγκριτή η κυματομορφή  $V_{g3}$ . Αυτές οι κυματομορφές  $V_{g1}$ ,  $V_{g3}$  αλλά και οι ανάστροφές τους ορίζουν τους παλμούς οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα [19].

Το πλάτος της θεμελιώδους φασικής τάσης εξόδου δίνεται από την εξίσωση (5.3):

$$\hat{V}_{ao,1} = \frac{V_{in} m_a}{2} \quad (5.3)$$

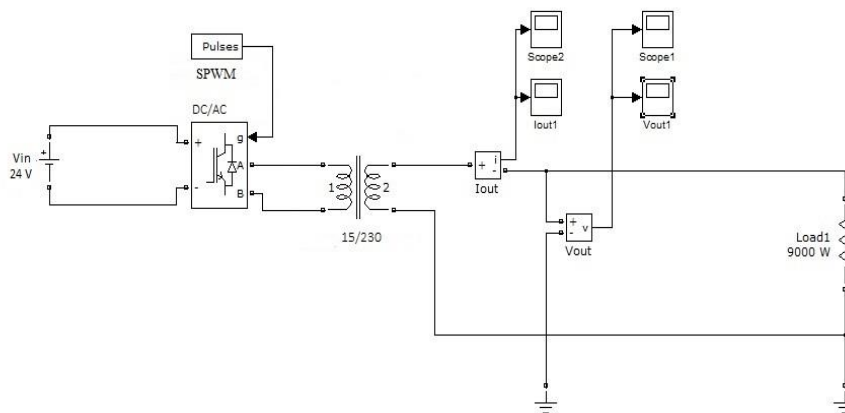
όπου  $m_a = \frac{\text{πλάτος σήματος αναφοράς}}{\text{πλάτος φέροντος σήματος}} = \text{συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους}$ .

### 5.3.2 Παράδειγμα 1

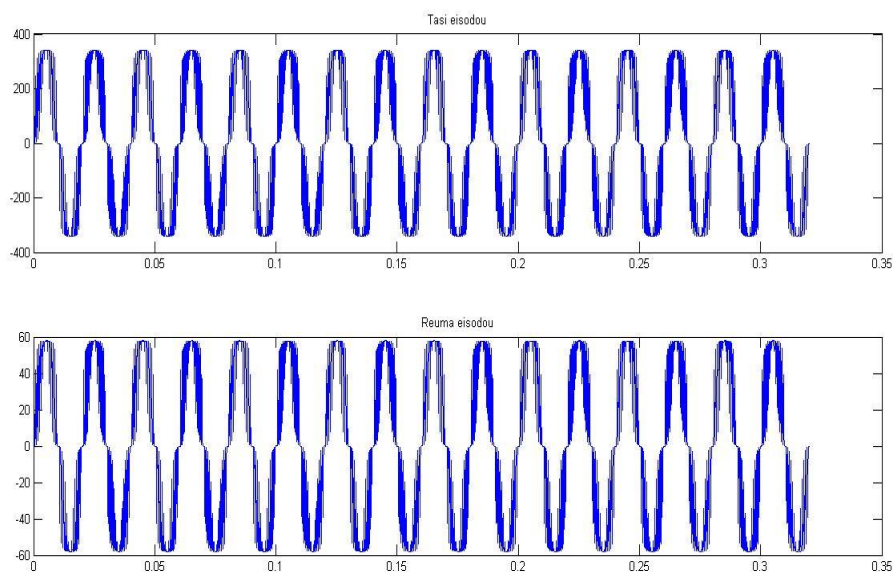
Στο πρώτο παράδειγμα συνδέεται στο κύκλωμα ωμικό φορτίο 9 kW και η διάρκεια της προσομοίωσης είναι 0,32 sec. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 25,6 kHz και οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα είναι στάσιμα κύματα, όπως μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 5.6. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται και το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Στον Πίνακα 5.9 παρουσιάζεται ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσης και του ρεύματος όπως προκύπτει με ανάλυση WPT αλλά και μετασχηματισμό Fourier. Όπως προκύπτει στην περίπτωση αυτή, στην οποία οι κυματομορφές είναι στάσιμες, δεν υπάρχει καμία διαφορά ανάμεσα στους δείκτες.

Στον Πίνακα 5.10 φαίνονται όλοι οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος που έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4. Οι συντελεστές κορυφής κόμβων (Πίνακας 5.11) θα παρουσιαστούν μόνο στο 1<sup>ο</sup> παράδειγμα και μόνο οι 17 πρώτοι, καθώς υπάρχουν 128 κόμβοι σε κάθε μια προσομοίωση και θα ήταν αδύνατο να παρουσιαστούν όλοι.



Σχήμα 5.5 Κύκλωμα 1<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.6 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

Πίνακας 5.9 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 1

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THDv (%)	30,28	30,26	30,26	0,02	0
THDi (%)	30,28	30,26	30,26	0,02	0

Πίνακας 5.10 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 1

Δείκτες	db10	sym30
DINv (%)	28,98	28,96
DINi (%)	28,98	28,96
PF	1	1
PFnz	1	1
Total Crest Factor	1,403	1,527

Πίνακας 5.11 Συντελεστές κορυφής κόμβων 0-17

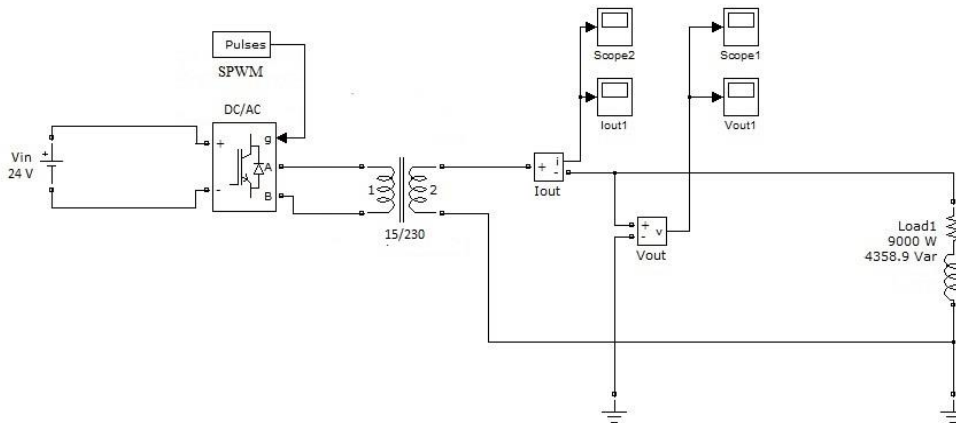
Κόμβοι	Ζώνη συχνοτήτων (Hz)	Συντελεστής κορυφής κόμβου	
		db10	sym30
0	0-100	1,466	1,596
1	100-200	1,599	1,639
2	200-300	1,797	1,579
3	300-400	2,057	2,911
4	400-500	1,389	1,658
5	500-600	1,554	1,964
6	600-700	1,583	1,511
7	700-800	1,859	1,727
8	800-900	1,406	1,598
9	900-1000	1,430	1,593
10	1000-1100	1,259	1,275
11	1100-1200	1,202	1,301
12	1200-1300	1,434	1,784
13	1300-1400	1,445	1,626
14	1400-1500	1,181	1,618
15	1500-1600	1,484	1,741
16	1600-1700	1,382	1,160

### 5.3.3 Παράδειγμα 2

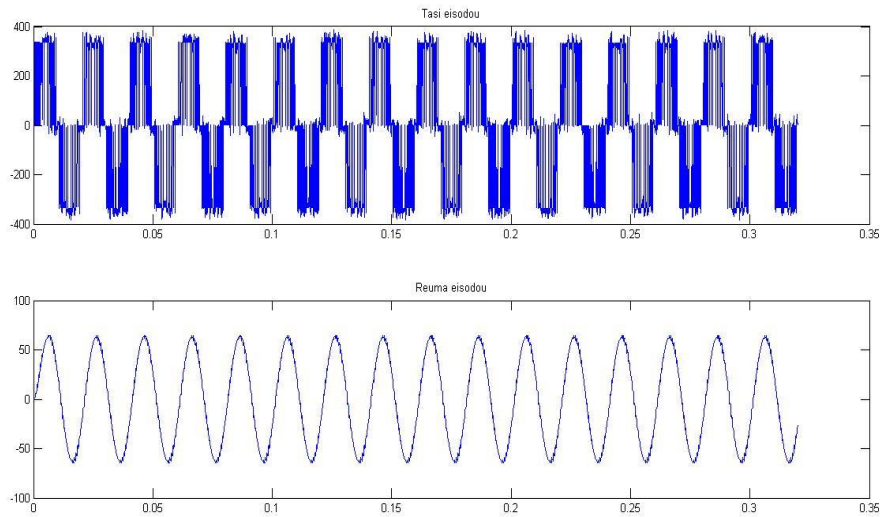
Στο δεύτερο παράδειγμα συνδέεται στο κύκλωμα ωμικό επαγωγικό φορτίο 9000 W και 4358,9 Var. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι 0,32 sec και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 25,6 kHz.

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται το κύκλωμα του παραδείγματος 2, και στο Σχήμα 5.8 οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος, οι οποίες όπως μπορεί να φανεί είναι στάσιμες.

Στον Πίνακα 5.12 παρουσιάζεται ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης υπολογισμένος με χρήση του μετασχηματισμού WPT αλλά και του μετασχηματισμού Fourier, καθώς και η διαφορά τους επί τοις εκατό. Η διαφορά και σε αυτό το παράδειγμα στο οποίο οι κυματομορφές είναι στάσιμες είναι ελάχιστη, δηλαδή μικρότερη από 1%.



Σχήμα 5.7 Κύκλωμα 2<sup>οο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.8 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

Πίνακας 5.12 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 2

Δείκτες ποιότητας ισχύος	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THDv (%)	53,10	53,07	52,88	0,22	0,19
THDi (%)	4,09	3,86	3,28	0,81	0,58

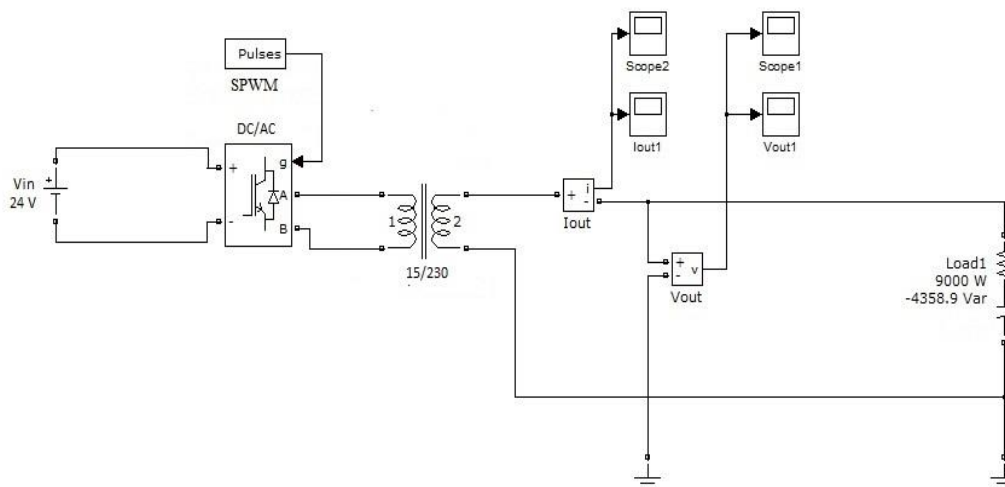
Στον Πίνακα 5.13 φαίνονται και οι υπόλοιποι δείκτες του Κεφαλαίου 4, που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

**Πίνακας 5.13 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 2**

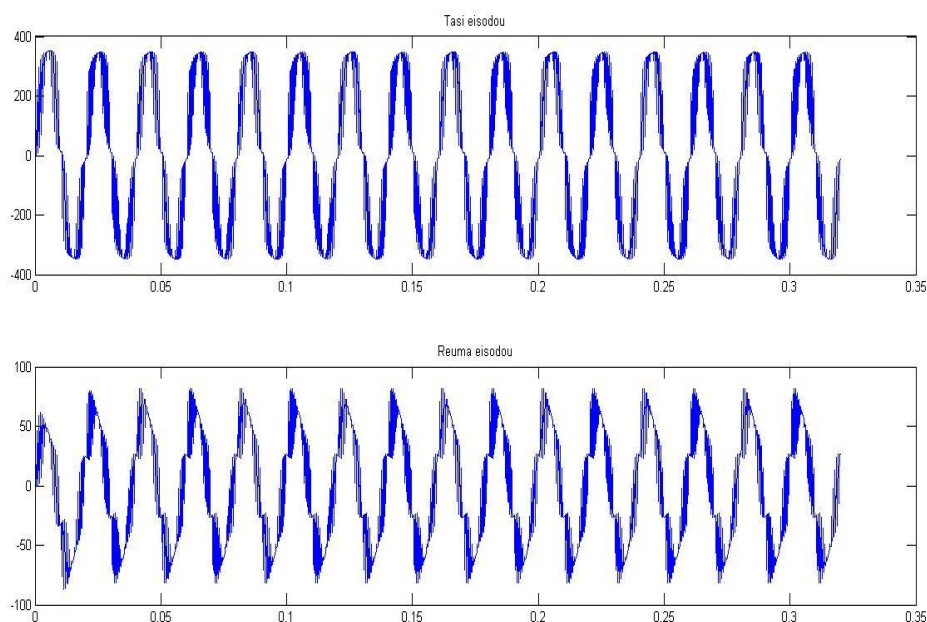
Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>46,90</b>	<b>46,88</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>4,09</b>	<b>3,85</b>
<b>PF</b>	<b>0,795</b>	<b>0,795</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,292</b>	<b>1,437</b>

### 5.3.4 Παράδειγμα 3

Στο 3<sup>ο</sup> παράδειγμα συνδέεται ωμικό χωρητικό φορτίο 9000 W και -4358,9 Var, η διάρκεια της προσομοίωσης είναι 0,32 sec και η συχνότητα δειγματοληψίας 25,6 kHz. Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται το κύκλωμα που έχει χρησιμοποιηθεί για το παράδειγμα 3 και στο Σχήμα 5.10 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου.



**Σχήμα 5.9 Κύκλωμα 3<sup>ο</sup> παραδείγματος**



**Σχήμα 5.10** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζεται ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) όπως έχει υπολογιστεί με την χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier, καθώς και η διαφορά τους επί τοις εκατό. Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται όλοι οι υπόλοιποι δείκτες υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

Όπως παρατηρείται και σε αυτό το παράδειγμα, στο οποίο οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος είναι στάσιμα κύματα, δεν υπάρχει καμία διαφορά ανάμεσα στους δείκτες που υπολογίστηκαν με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier και WPT.

**Πίνακας 5.14** Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 3

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THD <sub>v</sub> (%)	26,40	26,37	26,37	0,03	0
THD <sub>i</sub> (%)	29,60	29,58	29,58	0,02	0

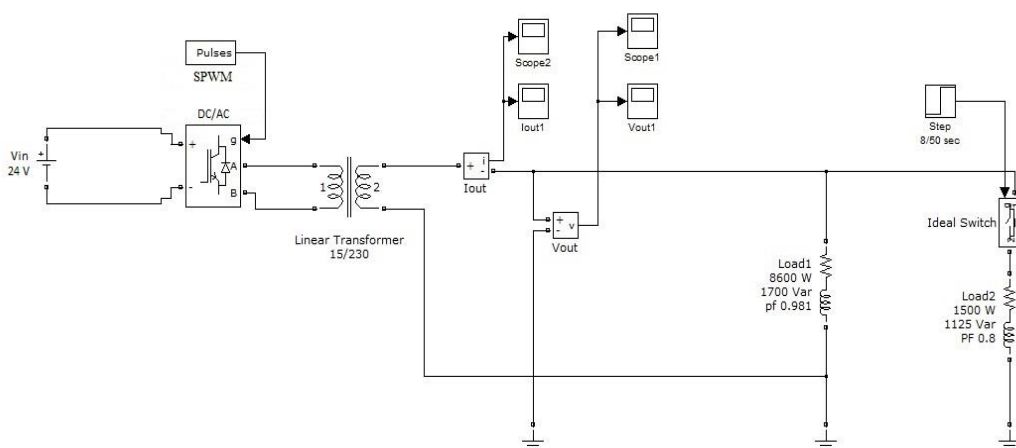
Πίνακας 5.15 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 3

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>25,52</b>	<b>25,50</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>28,38</b>	<b>28,37</b>
<b>PF</b>	<b>0,905</b>	<b>0,905</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,899</b>	<b>0,899</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,459</b>	<b>1,565</b>

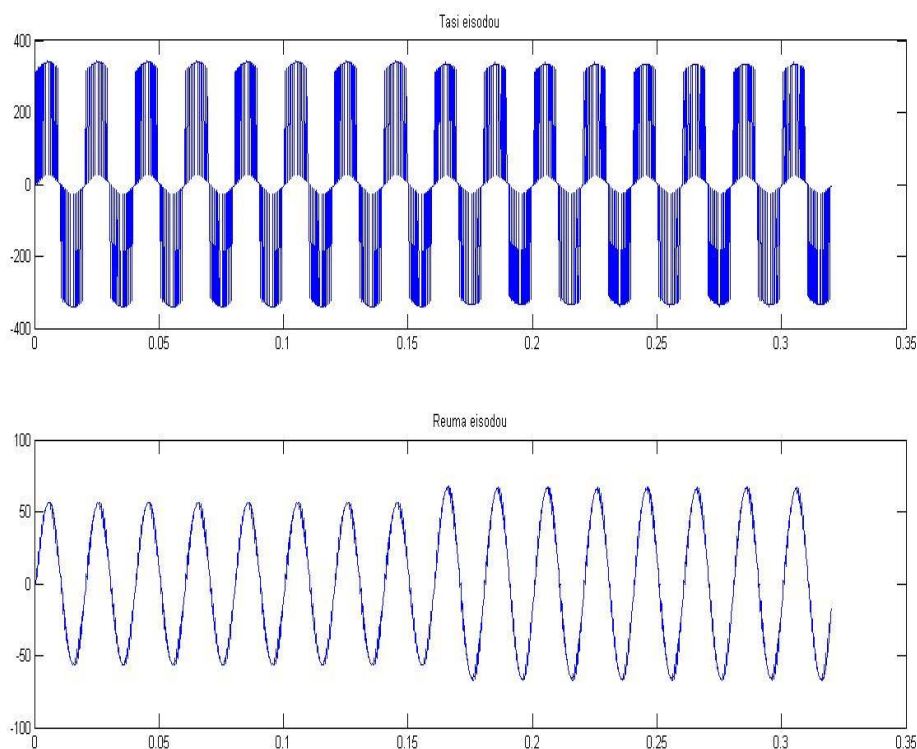
### 5.3.5 Παράδειγμα 4

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα συνδέονται στο κύκλωμα δύο φορτία. Το πρώτο φορτίο είναι ωμικό επαγωγικό 8600 W και 1700 Var και είναι συνδεδεμένο σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, δηλαδή για 0,32 sec. Το δεύτερο φορτίο είναι επίσης ωμικό επαγωγικό 1500 W και 1125 Var και συνδέεται μετά από 0,16 sec.

Στο παράδειγμα αυτό, οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου του κυκλώματος δεν είναι στάσιμες, αλλά το δεύτερο φορτίο που συνδέθηκε είναι αρκετά μικρότερο από το πρώτο με αποτέλεσμα η κυματομορφή της τάσης να είναι σχεδόν στάσιμο κύμα, ενώ του ρεύματος να έχει μια μικρή παραμόρφωση, όπως μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 5.12. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται και το κύκλωμα το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί στο παράδειγμα 4.

Σχήμα 5.11 Κύκλωμα 4<sup>ο</sup> παραδείγματος





**Σχήμα 5.12** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και από τη σύγκριση του δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.16. Παρατηρείται και πάλι ότι η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες είναι μηδενική. Στον Πίνακα 5.17 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος που έχουν μελετηθεί.

**Πίνακας 5.16** Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 4

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THD <sub>v</sub> (%)	48,06	48,04	48,04	0,02	0
THD <sub>i</sub> (%)	6,48	6,34	6,20	0,28	0,14

**Πίνακας 5.17 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 4**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>43,31</b>	<b>43,30</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>6,46</b>	<b>6,33</b>
<b>PF</b>	<b>0,874</b>	<b>0,874</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,966</b>	<b>0,966</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,320</b>	<b>1,452</b>

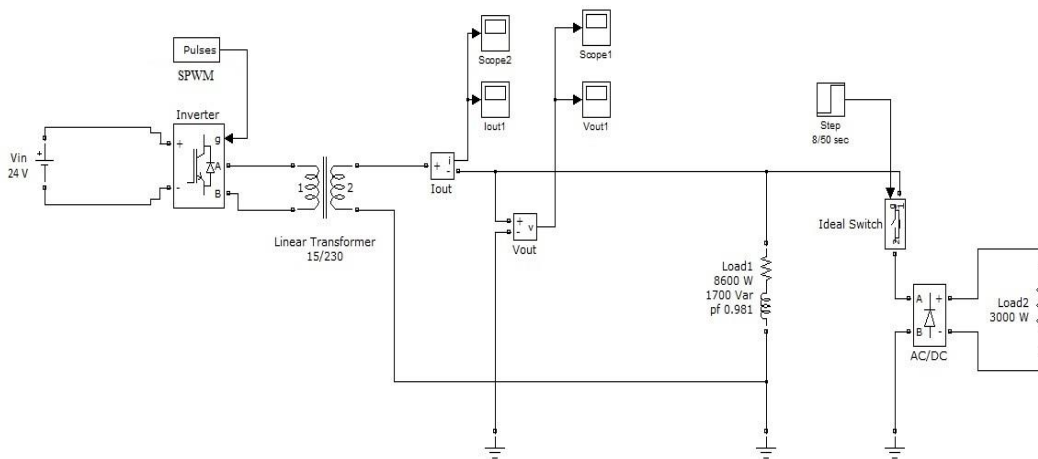
### 5.3.6 Παράδειγμα 5

Σε αυτό το παράδειγμα το πρώτο φορτίο είναι ίδιο με το πρώτο φορτίο του προηγούμενου παραδείγματος, δηλαδή 8600 W και 1700 Var, ενώ το δεύτερο αντικαθίσταται από ένα ωμικό φορτίο 3000 W που συνδέεται μέσω ενός ανορθωτή με διόδους και λειτουργεί από τα 0,16 sec μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

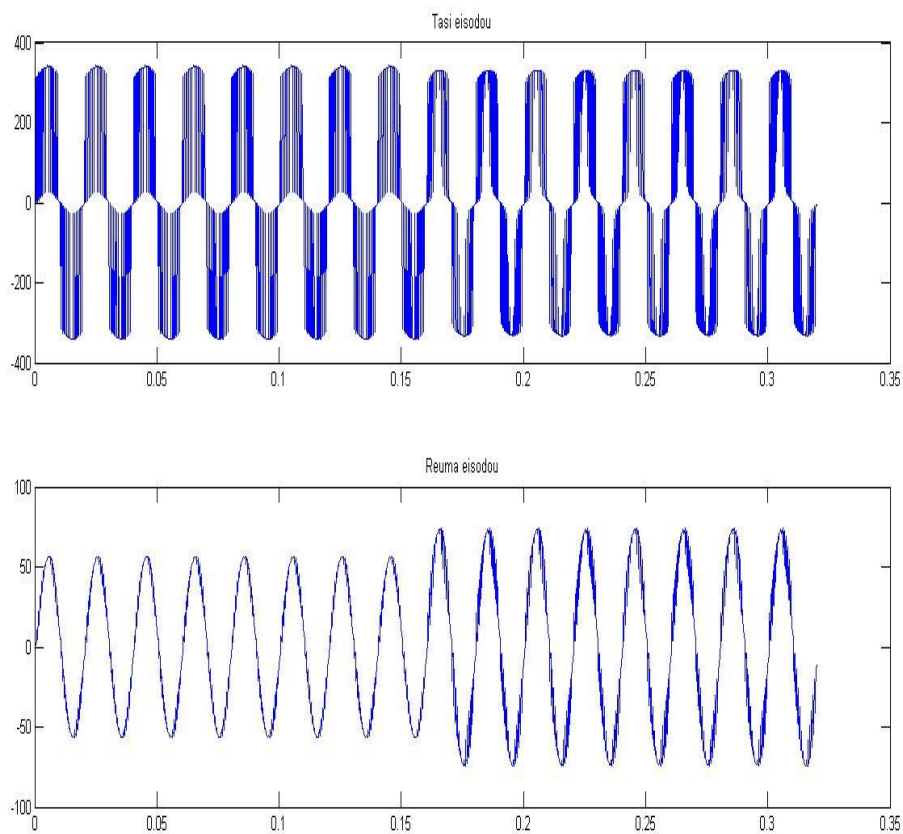
Σε αυτή την περίπτωση το δεύτερο φορτίο που συνδέεται είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του παραδείγματος 4 και επίσης χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής με διόδους, ο οποίος προσθέτει ακόμα μεγαλύτερη αρμονική παραμόρφωση από τα μέσα της προσομοίωσης και μετά. Συνεπώς, το ρεύμα και η τάση εξόδου του κυκλώματος είναι μη στάσιμα κύματα.

Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται το κύκλωμα του παραδείγματος 5 και στο Σχήμα 5.14 οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου αυτού του κυκλώματος.

Στον Πίνακα 5.18 παρουσιάζεται, όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης υπολογισμένος με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT αλλά και του μετασχηματισμού Fourier. Στις τελευταίες στήλες υπολογίστηκε και η διαφορά τους η οποία όπως μπορεί να φανεί ότι δεν είναι αμελητέα, καθώς είναι μεγαλύτερη του 1%. Στον Πίνακα 5.19 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.



Σχήμα 5.13 Κύκλωμα 5<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.14 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

**Πίνακας 5.18 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 5**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>44,64</b>	<b>44,62</b>	<b>43,02</b>	<b>1,62</b>	<b>1,60</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>10,52</b>	<b>10,44</b>	<b>9,19</b>	<b>1,33</b>	<b>1,25</b>

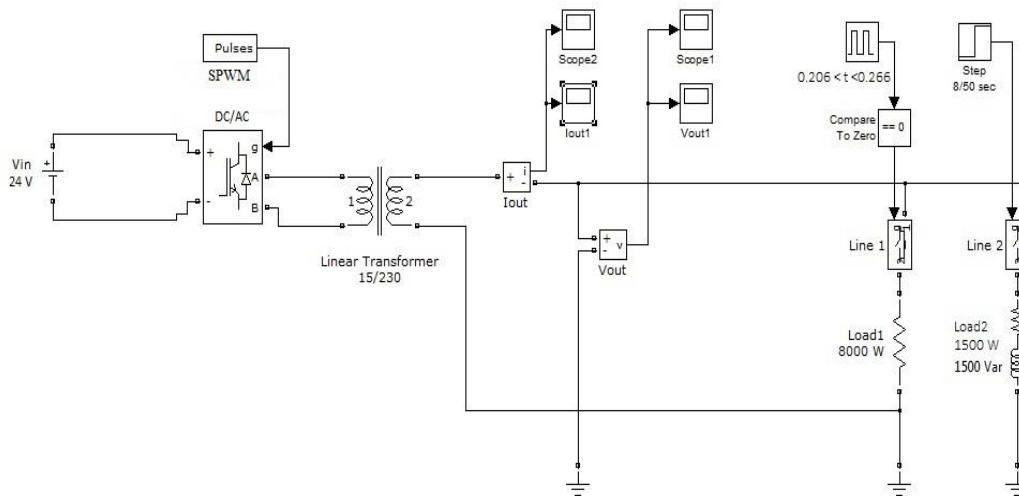
**Πίνακας 5.19 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 5**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>40,76</b>	<b>40,75</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>10,47</b>	<b>10,38</b>
<b>PF</b>	<b>0,911</b>	<b>0,911</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,975</b>	<b>0,975</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,342</b>	<b>1,478</b>

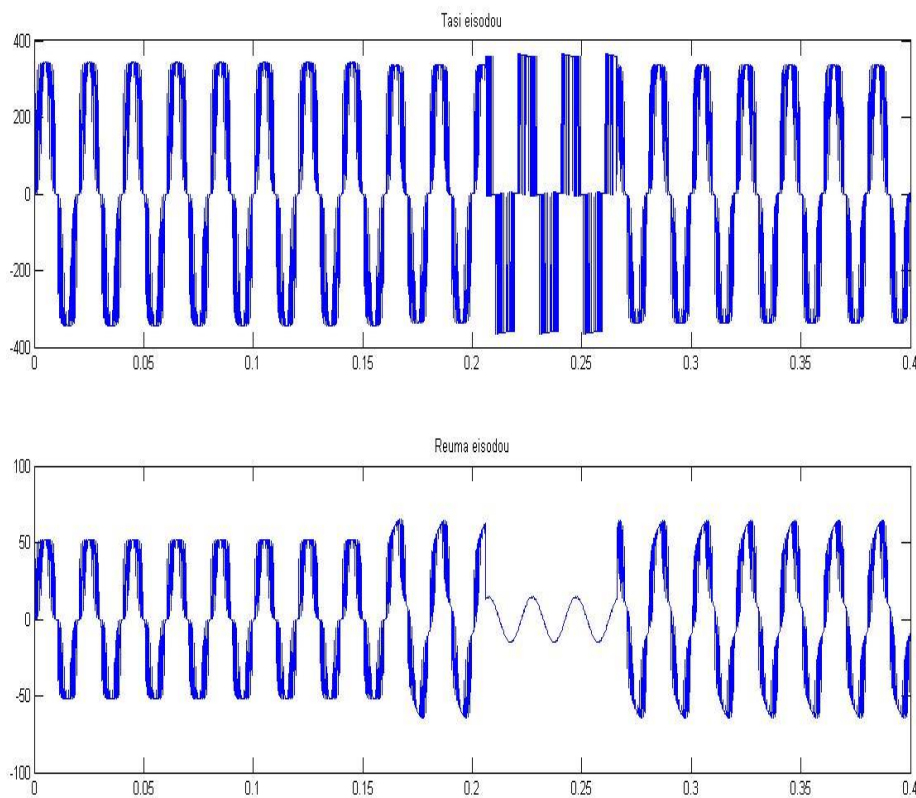
### 5.3.7 Παράδειγμα 6

Στο παράδειγμα αυτό συνδέονται στο κύκλωμα δύο φορτία. Το πρώτο είναι ένα ωμικό φορτίο 8000 W, το οποίο είναι συνδεδεμένο συνεχώς εκτός από το χρονικό διάστημα από τα 0,206 sec μέχρι τα 0,266 sec. Το δεύτερο φορτίο είναι ένα ωμικό επαγωγικό φορτίο 1500 W και 1500 Var, το οποίο συνδέεται στο κύκλωμα από τα 0,16 sec μέχρι το τέλος της προσομοίωσης, όπως μπορεί να φανεί και από το κύκλωμα του Σχήματος 5.15. Η προσομοίωση διαρκεί 0,4 sec και οι κυματομορφές εξόδου που προκύπτουν φαίνονται στο Σχήμα 5.16, από το οποίο φαίνεται ότι πρόκειται για μη στάσιμα κύματα.

Όπως μπορεί να φανεί από τον Πίνακα 5.20, στον οποίο παρουσιάζεται ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος, η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες που υπολογίστηκαν με μετασχηματισμό WPT και Fourier είναι αρκετά μεγάλη, ειδικά για την τάση που ξεπερνάει το 3%. Στον Πίνακα 5.21 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος που έχουν μελετηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.



Σχήμα 5.15 Κύκλωμα 6<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.16 Κομωμορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

**Πίνακας 5.20** Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 6

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>36,41</b>	<b>36,39</b>	<b>33,21</b>	<b>3,20</b>	<b>3,18</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>29,61</b>	<b>29,78</b>	<b>28,25</b>	<b>1,36</b>	<b>1,53</b>

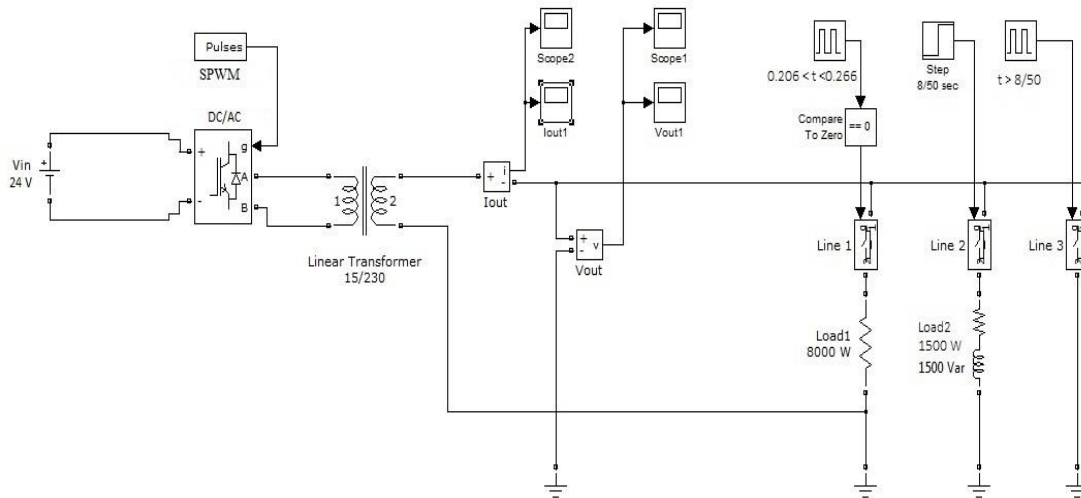
**Πίνακας 5.21** Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 6

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>34,21</b>	<b>34,19</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>28,39</b>	<b>28,54</b>
<b>PF</b>	<b>0,917</b>	<b>0,916</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,932</b>	<b>0,933</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,264</b>	<b>1,408</b>

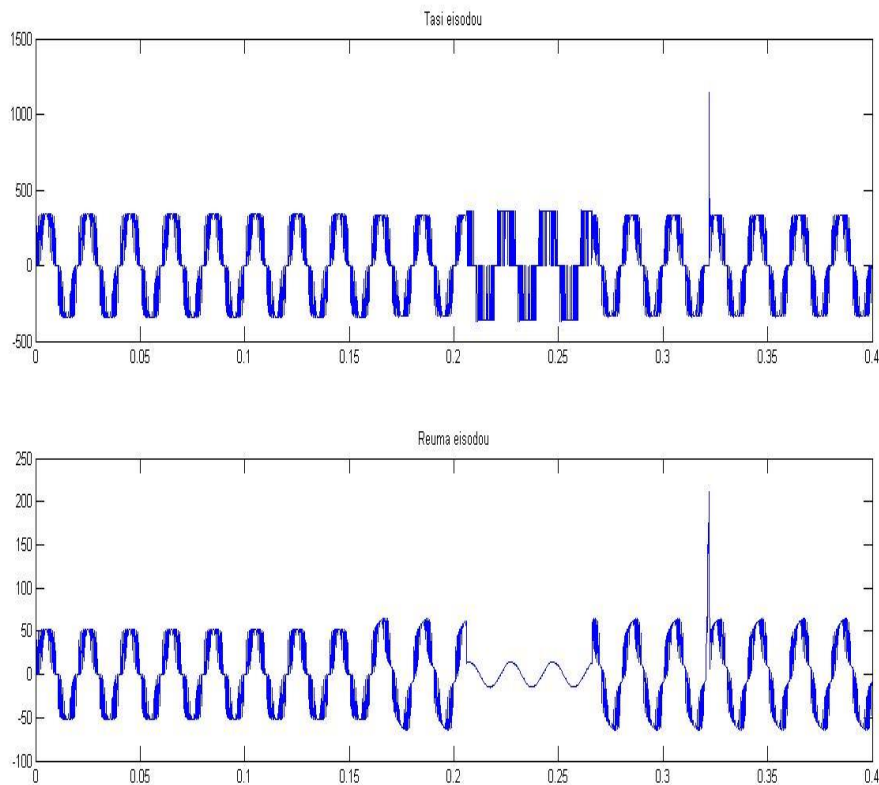
### 5.3.8 Παράδειγμα 7

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, συνδέονται δύο φορτία με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και του παραδείγματος 6. Διαφέρει όμως από αυτό στο γεγονός ότι, προστίθεται ένα βραχυκύκλωμα στα 0,32 sec το οποίο διαρκεί για 0,002 sec. Παρακάτω φαίνονται το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στο Σχήμα 5.17 και οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου στο Σχήμα 5.18.

Στον Πίνακα 5.22, όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, παρουσιάζεται ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης υπολογισμένος με χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier και στον Πίνακα 5.23 οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος με χρήση μόνο του μετασχηματισμού WPT.



Σχήμα 5.17 Κύκλωμα 7<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.18 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.22 η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες που υπολογίστηκαν με WPT και Fourier είναι αρκετά μεγάλη, μεγαλύτερη του 3%. Ειδικά για τον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος, παρατηρείται ότι, με τον μετασχηματισμό Fourier η τιμή του παραμένει ίδια με του παραδείγματος 6, στο οποίο τα φορτία ήταν ίδια αλλά απουσίαζε το βραχυκύκλωμα, ενώ με το μετασχηματισμό WPT αυξήθηκε πάνω από 3%.

Από αυτό συμπεραίνεται ότι, όταν οι δείκτες ποιότητας ισχύος υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier, δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από φαινόμενα τα οποία διαρκούν πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, σε αντίθεση με τους δείκτες που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

**Πίνακας 5.22 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 7**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THD <sub>v</sub> (%)	36,85	36,83	33,16	3,69	3,67
THD <sub>i</sub> (%)	33,16	33,16	28,38	4,78	4,78

**Πίνακας 5.23 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 7**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
DIN <sub>v</sub> (%)	34,58	34,56
DIN <sub>i</sub> (%)	31,48	31,48
PF	0,902	0,902
PF <sub>nz</sub>	0,931	0,931
Total Crest Factor	1,262	1,478



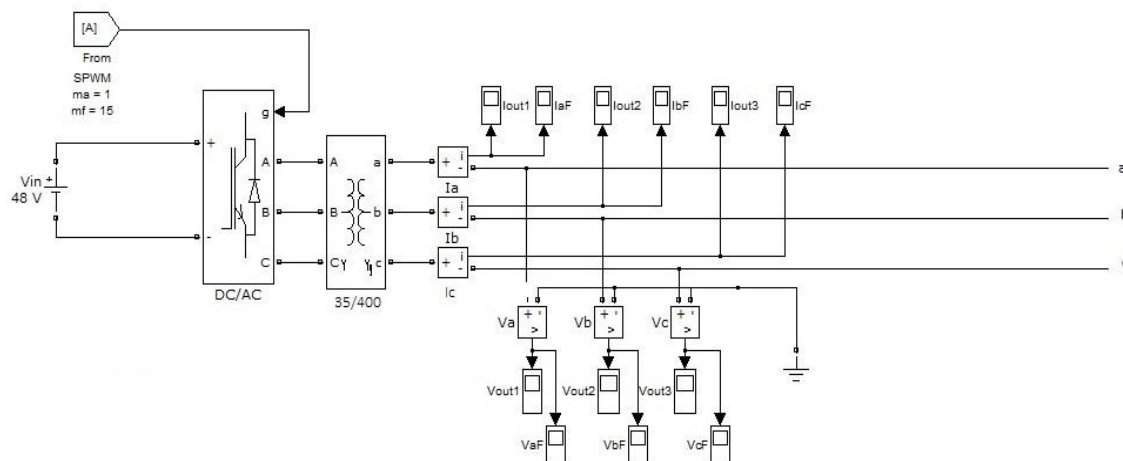
## 5.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB/SIMULINK ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

### 5.4.1 Στοιχεία του κυκλώματος

Για τις συγκεκριμένες εφαρμογές δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα MATLAB/SIMULINK ένα τριφασικό κύκλωμα, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.19. Στο κύκλωμα αυτό θα συνδέονται συμμετρικά τριφασικά φορτία από τα οποία θα υπολογίζονται οι δείκτες ποιότητας ισχύος, οι οποίοι θα είναι ο μέσος όρος των δεικτών ποιότητας ισχύος των τριών φάσεων. Οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος θα υπολογιστούν και με μετασχηματισμό Fourier απευθείας από το πρόγραμμα προσομοίωσης, ώστε να γίνει σύγκριση και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Το κύκλωμα θα περιλαμβάνει:

- Πηγή συνεχούς τάσης 48 V
- Αντιστροφέα με IGBT, ελεγχόμενο με τεχνική SPWM
- Μετασχηματιστή ανύψωσης 35/400 V
- Μετρητές φασικής τάσης και ρεύματος γραμμής



Σχήμα 5.19 Τριφασικό κύκλωμα

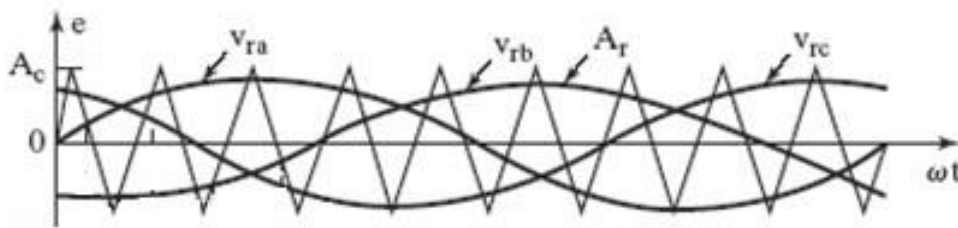
Για τον έλεγχο του τριφασικού αντιστροφέα με την τεχνική έλεγχου της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς, μία για κάθε ημιγέφυρα με διαφορά μεταξύ τους  $120^\circ$ , και μια

τριγωνική κυματομορφή φέροντος σήματος. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς προς το πλάτος της κυματομορφής του φέροντος σήματος δίνει τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτος όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.4). Ο λόγος της συχνότητας του φέροντος κύματος προς τη συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς μας δίνει τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση (5.5).

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \quad (5.4)$$

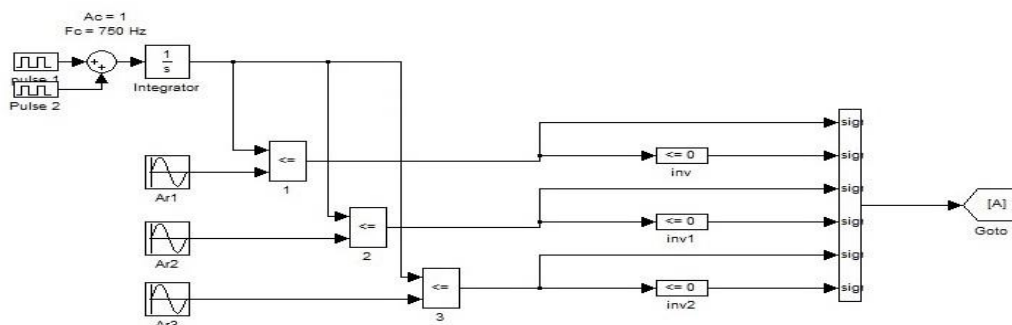
$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (5.5)$$

Αντίστοιχα με την τεχνική ελέγχου SPWM για μονοφασικό αντιστροφέα, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, τα σημεία τομής μεταξύ των τριών κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φέροντος, ορίζουν τους παλμούς οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών, καθώς και τις τάσεις εξόδου των τριων ημιγεφυρών, σε σχέση με το υποθετικό ουδέτερο σημείο O [19].



Σχήμα 5.20 Κυματομορφές αναφοράς και φέροντος σήματος

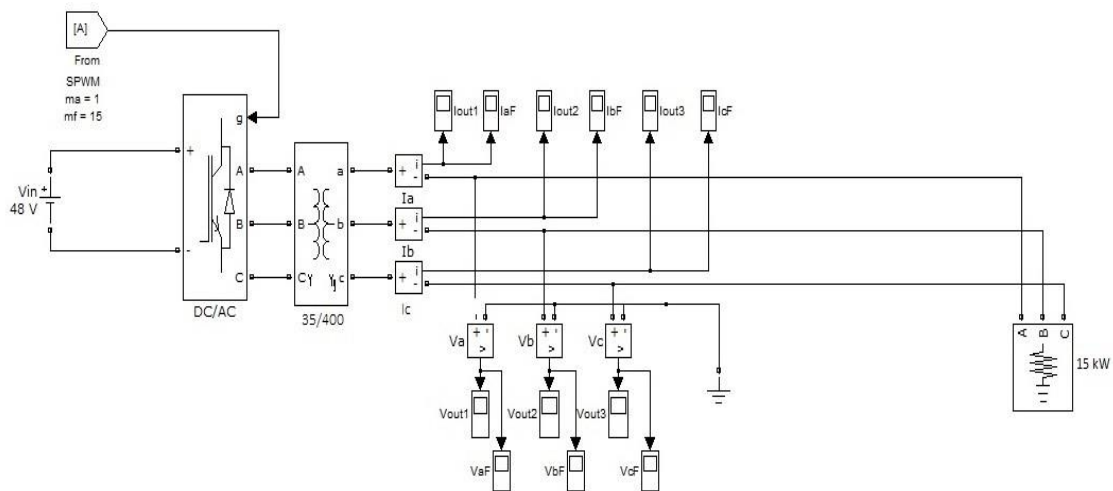
Οι κυματομορφές αναφοράς και φέροντος σήματος φαίνονται στο Σχήμα 5.20 και το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθούν οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21.



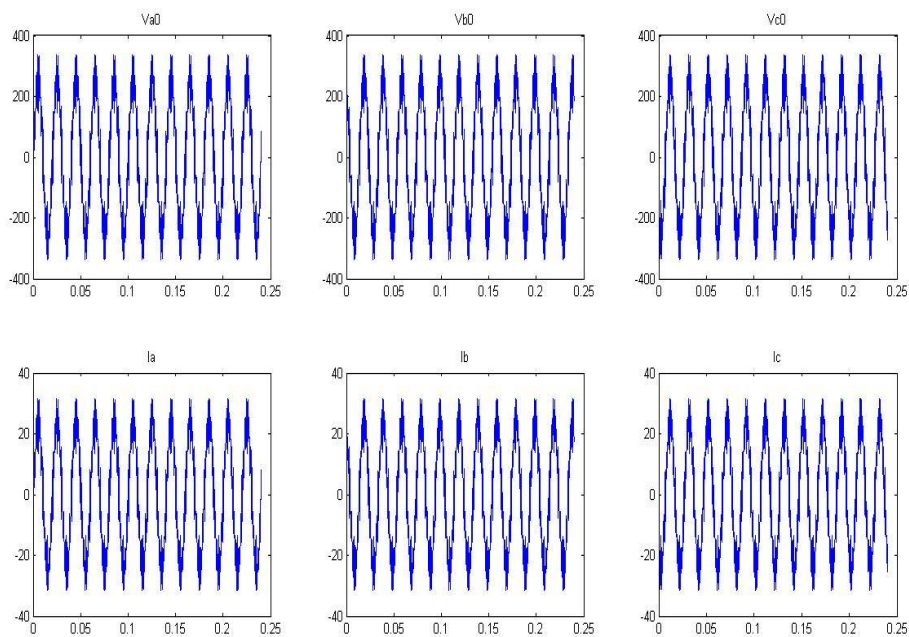
Σχήμα 5.21 Κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα

### 5.4.2 Παράδειγμα 8

Στο παράδειγμα αυτό συνδέεται στο κύκλωμα ωμικό φορτίο 15kW σε συνδεσμολογία αστέρα γειωμένου. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι 0,24 δευτερόλεπτα. Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται το κύκλωμα του παραδείγματος 8 και στο Σχήμα 5.23 οι κυματομορφές της φασικής τάσης και των ρευμάτων γραμμής και των 3 φάσεων. Οι κυματομορφές αυτές είναι στάσιμες, καθώς τα χαρακτηριστικά τους παραμένουν αναλλοίωτα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.22 Κύκλωμα 8<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.23 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Στον Πίνακα 5.24 παρουσιάζονται οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και Fourier, αλλά και η διαφορά τους επί τοις εκατό. Στον πίνακα αυτό φαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ των δεικτών που έχουν υπολογιστεί με WPT και Fourier είναι ελάχιστη. Στον Πίνακα 5.25 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες που έχουν μελετηθεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

**Πίνακας 5.24 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 8**

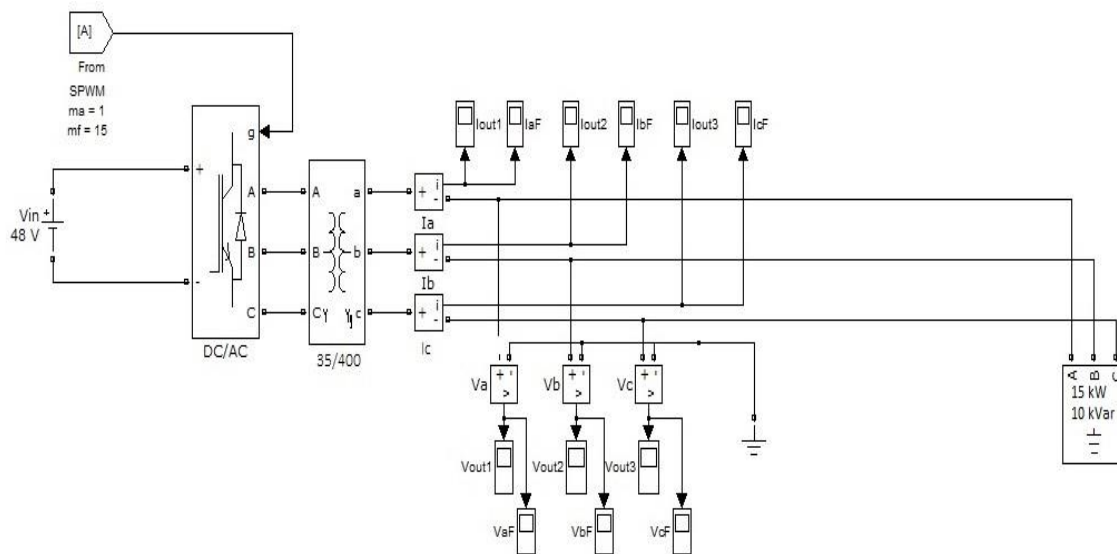
Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THDv (%)	24,56	24,52	24,40	0,16	0,12
THDi (%)	24,56	24,52	24,40	0,16	0,12

**Πίνακας 5.25 Δείκτες ποιότητας ισχύος παραδείγματος 8**

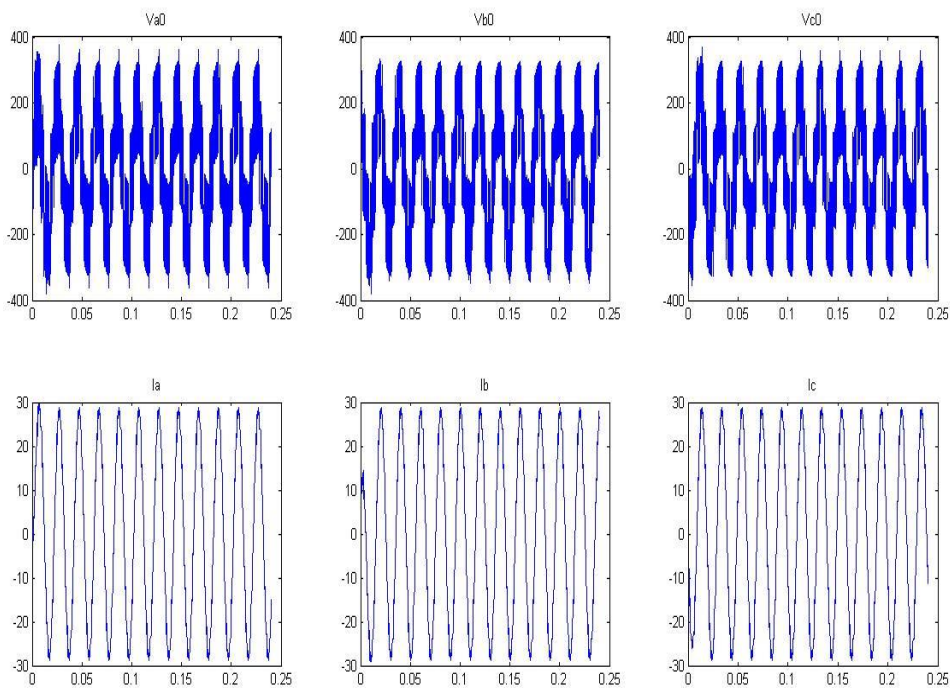
Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
DINv (%)	23,85	23,82
DINi (%)	23,85	23,82
PF	1	1
PFnz	1	1
Total Crest Factor	1,604	1,621

### 5.4.3 Παράδειγμα 9

Στο παράδειγμα αυτό συνδέεται στο κύκλωμα συμμετρικό τριφασικό φορτίο 15 kW και 10 kVar με συνδεσμολογία αστέρα. Ο χρόνος της προσομοίωσης είναι και πάλι 0,24 sec. Το κύκλωμα του παραδείγματος 9 μπορεί να φανεί στο Σχήμα 5.24 και οι κυματομορφές εξόδου που προκύπτουν από την προσομοίωση στο Σχήμα 5.25, οι οποίες είναι και σε αυτήν την περίπτωση στάσιμα κύματα.



Σχήμα 5.24 Κύκλωμα 9<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.25 Κομματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Στον Πίνακα 5.26 παρουσιάζονται οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier. Η διαφορά των δεικτών φαίνεται στις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα, ανάλογα με το κυματίδιο που έχει χρησιμοποιηθεί. Στον Πίνακα 5.27 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

Από τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει φαίνεται ότι οι διαφορές και σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρές, ειδικά στους δείκτες της τάσης είναι κάτω του 1%, ενώ στους δείκτες του ρεύματος είναι σχετικά μικρές αλλά όχι αμελητέες.

**Πίνακας 5.26 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 9**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THD <sub>v</sub> (%)	56,72	56,68	56,59	0,13	0,09
THD <sub>i</sub> (%)	6,84	6,65	5,36	1,48	1,29

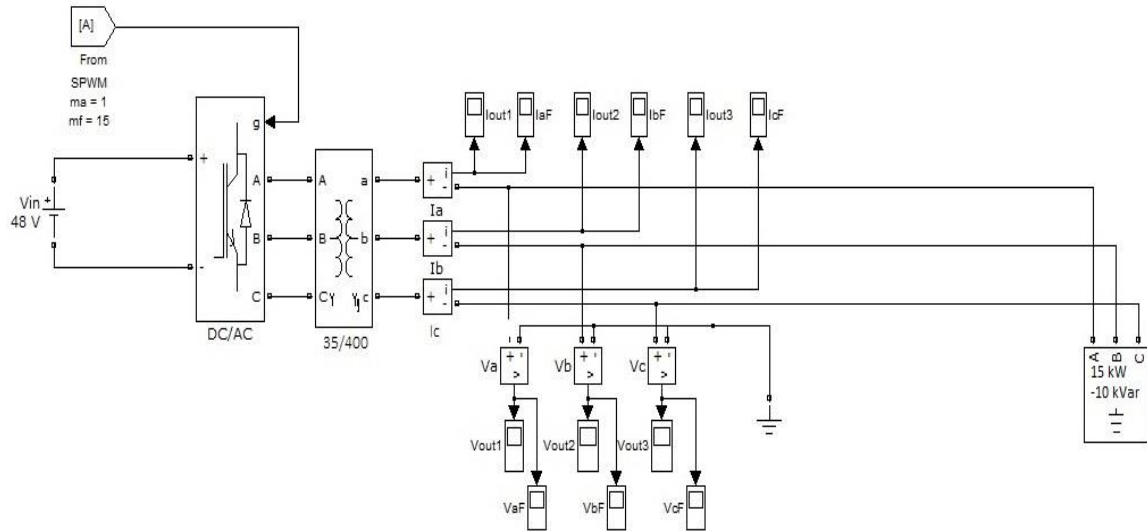
**Πίνακας 5.27 Δείκτες ποιότητας ισχύος παραδείγματος 9**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
DIN <sub>v</sub> (%)	49,33	49,31
DIN <sub>i</sub> (%)	6,83	6,63
PF	0,729	0,729
PF <sub>nz</sub>	0,837	0,837
Total Crest Factor	1,483	1,483

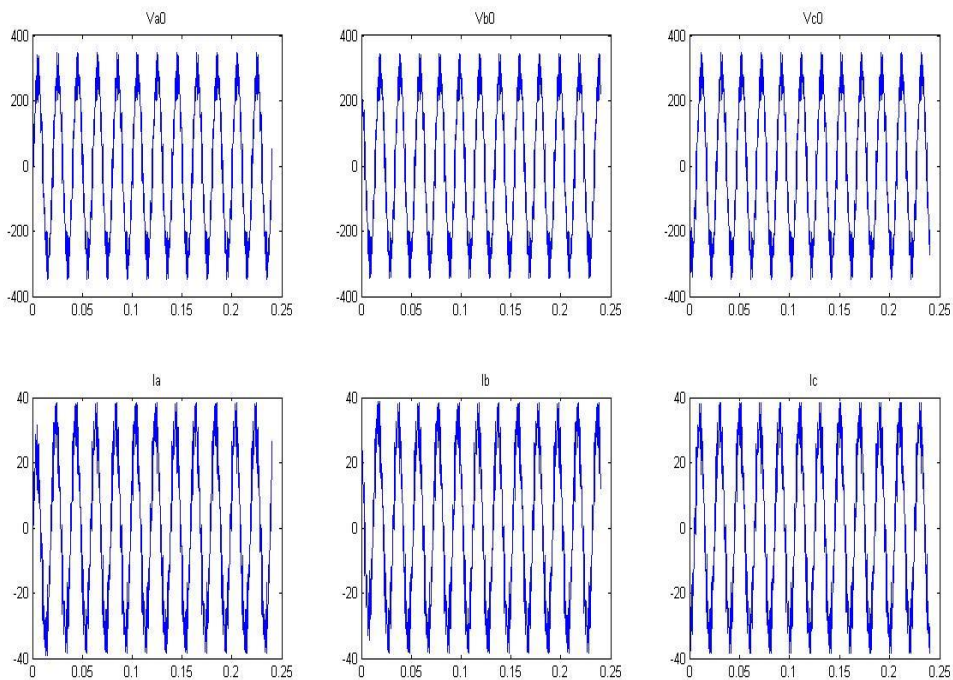
#### 5.4.4 Παράδειγμα 10

Σε αυτό το παράδειγμα στο κύκλωμα συνδέεται ωμικό χωρητικό φορτίο 15 kW και 10 kVar, όπως φαίνεται στο κύκλωμα του παραδείγματος. Ο χρόνος προσομοίωσης και σε

αυτό το παράδειγμα είναι 0,24 sec και οι φασικές τάσεις εξόδου καθώς και τα ρεύματα γραμμής φαίνονται στο Σχήμα 5.27.



Σχήμα 5.26 Κύκλωμα 10<sup>ου</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.27 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Στον Πίνακα 5.28 φαίνονται, όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα, οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και Fourier, καθώς και η διαφορά τους. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά είναι ελάχιστη όπως φαίνεται στις δύο τελευταίες στήλες.

Στον Πίνακα 5.29 φαίνονται επίσης όλοι οι υπόλοιποι δείκτες που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

**Πίνακας 5.28 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 10**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>17,24</b>	<b>17,19</b>	<b>16,95</b>	<b>0,29</b>	<b>0,24</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>20,95</b>	<b>20,92</b>	<b>20,51</b>	<b>0,44</b>	<b>0,41</b>

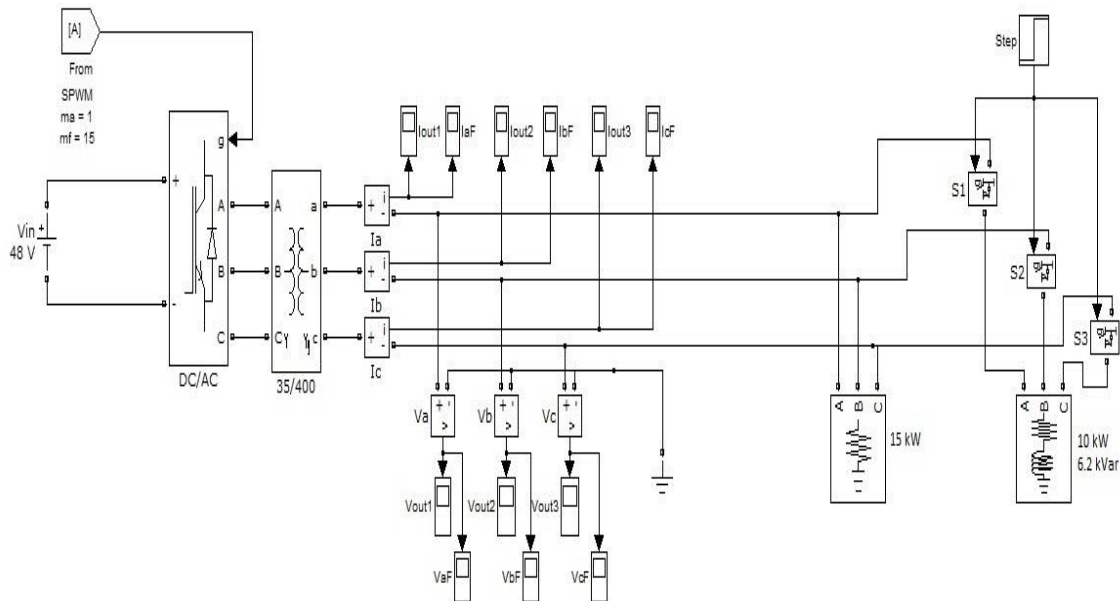
**Πίνακας 5.29 Δείκτες ποιότητας ισχύος παραδείγματος 10**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>16,99</b>	<b>16,94</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>20,50</b>	<b>20,48</b>
<b>PF</b>	<b>0,838</b>	<b>0,838</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,833</b>	<b>0,833</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,623</b>	<b>1,643</b>

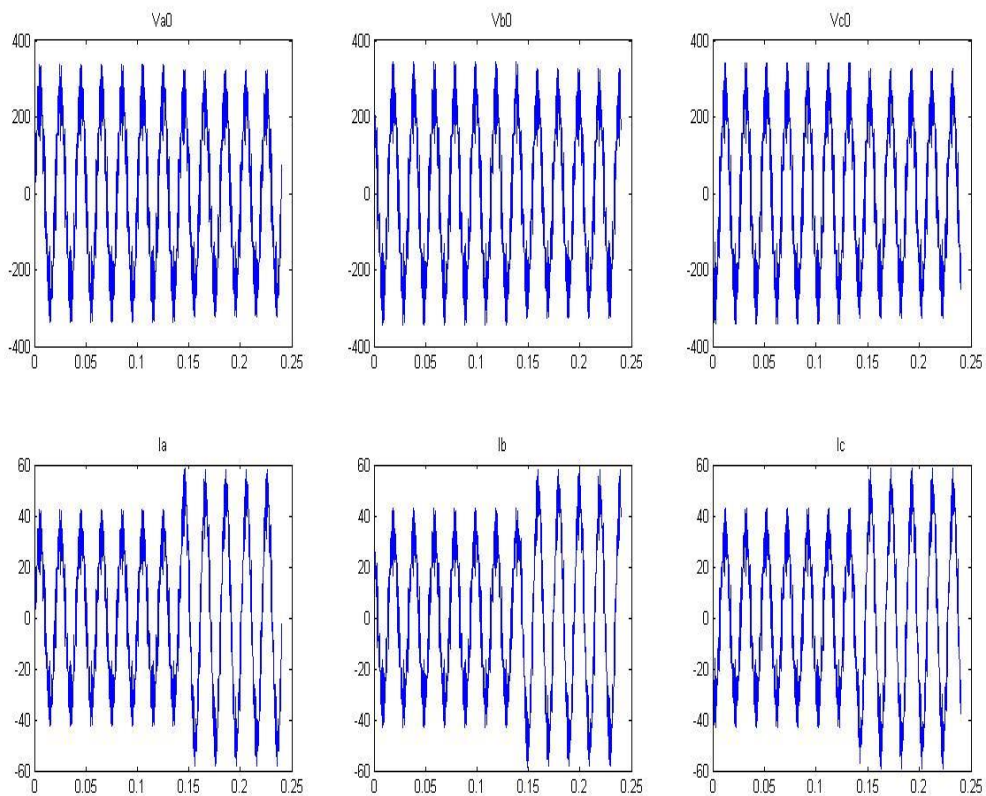
#### 5.4.5 Παράδειγμα 11

Σε αυτό το παράδειγμα συνδέονται δύο φορτία. Το πρώτο είναι ένα ωμικό φορτίο 20kW και το δεύτερο είναι ένα ωμικό επαγωγικό φορτίο 10 kW και 6,2 kVar. Το πρώτο φορτίο είναι μόνιμα συνδεδεμένο, ενώ το δεύτερο φορτίο συνδέεται από το 0,14 δευτερόλεπτο και μετά. Το κύκλωμα του 11<sup>ου</sup> παραδείγματος φαίνεται στο Σχήμα 5.28 και οι κυματομορφές που προκύπτουν στο Σχήμα 5.29.





Σχήμα 5.28 Κύκλωμα 11<sup>ο</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.29 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Στον Πίνακα 5.30 παρουσιάζονται, υπολογισμένοι με τη χρήση τόσο του μετασχηματισμού WPT όσο και του μετασχηματισμού Fourier, οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος. Στις δύο τελευταίες στήλες έχει υπολογιστεί και παρουσιάζεται η διαφορά τους, η οποία είναι και σε αυτήν την περίπτωση σχεδόν μηδενική.

Στον Πίνακα 5.31 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος για τους οποίους έχει γίνει λόγος στο Κεφάλαιο 4.

**Πίνακας 5.30 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 11**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>27,02</b>	<b>26,98</b>	<b>26,88</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>22,19</b>	<b>22,13</b>	<b>22,42</b>	<b>0,23</b>	<b>0,29</b>

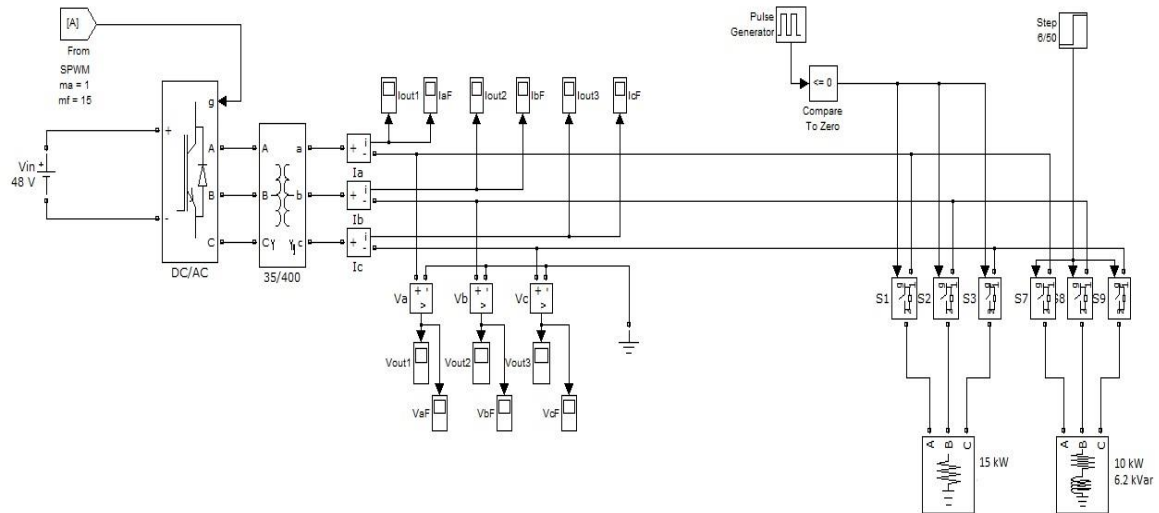
**Πίνακας 5.31 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 11**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>26,08</b>	<b>26,05</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>21,66</b>	<b>21,61</b>
<b>PF</b>	<b>0,969</b>	<b>0,969</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,968</b>	<b>0,968</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,630</b>	<b>1,642</b>

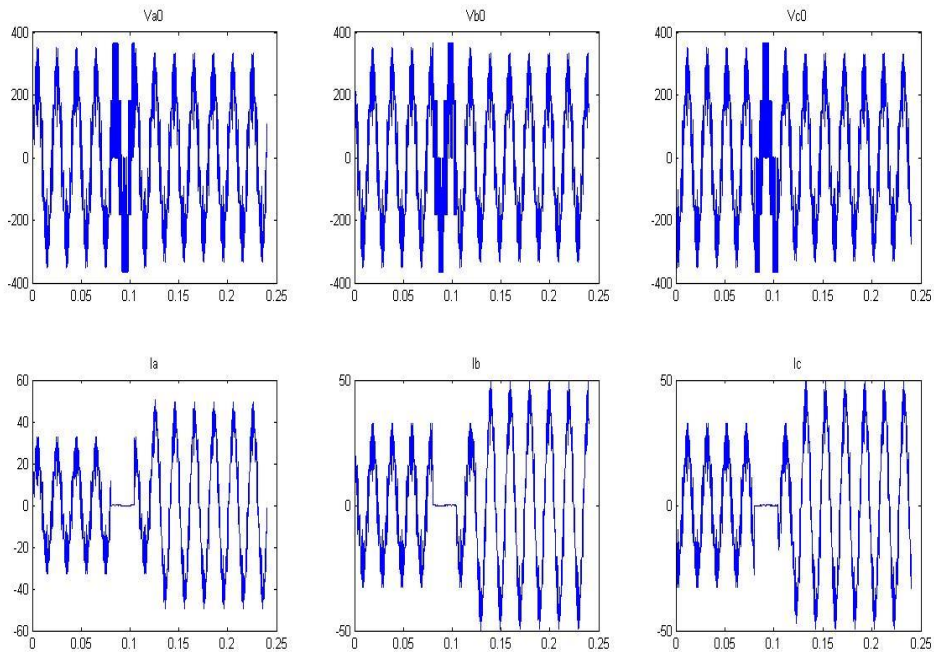
#### 5.4.6 Παράδειγμα 12

Σε αυτό το παράδειγμα συνδέονται στο κύκλωμα και πάλι δύο φορτία. Το πρώτο φορτίο, το οποίο είναι ένα ωμικό φορτίο 15 kW, είναι συνδεδεμένο από την αρχή της προσομοίωσης αλλά αποσυνδέεται στα 0,08 δευτερόλεπτα για 0,024 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια επανασυνδέεται στο κύκλωμα. Το δεύτερο είναι ένα ωμικό επαγωγικό φορτίο 10kW και 6,2 kVar το οποίο συνδέεται από την μέση της προσομοίωσης μέχρι το τέλος της. Το

κύκλωμα του παραδείγματος 12 φαίνεται στο Σχήμα 5.30. Οι φασικές τάσεις εξόδου και τα ρεύματα γραμμής του κυλώματος φαίνονται στο Σχήμα 5.31, από το οποίο μπορεί να φανεί ξεκάθαρα ότι πρόκειται για μη στάσιμα κύματα.



Σχήμα 5.30 Κύκλωμα 12<sup>ου</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.31 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος, υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier, καθώς και η διαφορά τους μπορεί να φανεί στον Πίνακα 5.32. Από τα αποτελέσματα αυτού του πίνακα συμπεραίνεται ότι, παρόλο που η διαφορά στον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος είναι ελάχιστη, η διαφορά στον δείκτη ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης είναι αρκετά μεγάλη.

Στον Πίνακα 5.33 παρουσιάζονται και οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT.

**Πίνακας 5.32 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 12**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>37,73</b>	<b>37,70</b>	<b>33,04</b>	<b>4,69</b>	<b>4,66</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>23,91</b>	<b>23,85</b>	<b>23,76</b>	<b>0,15</b>	<b>0,09</b>

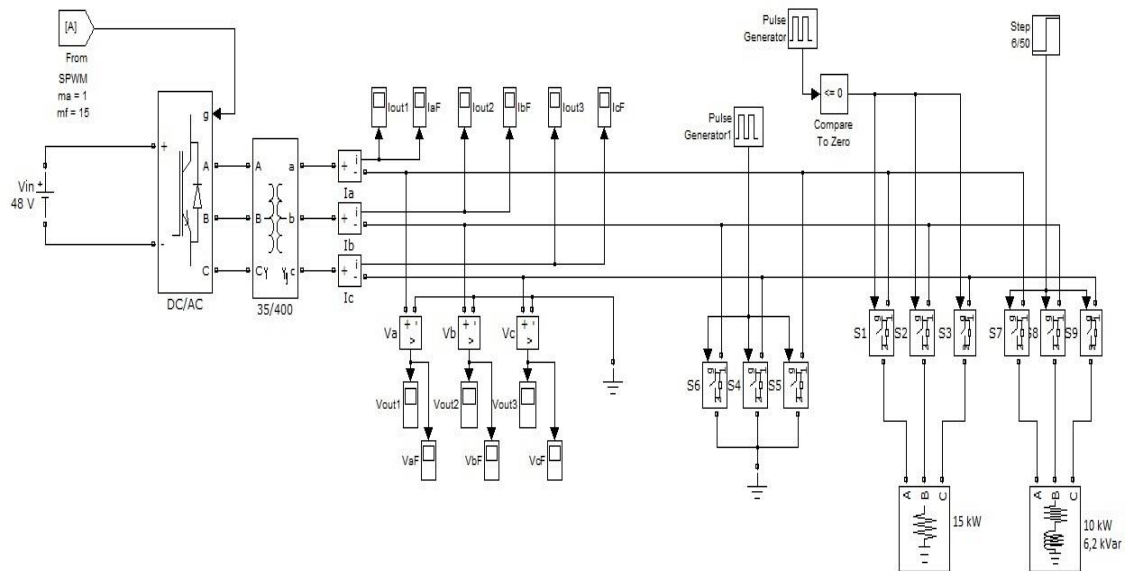
**Πίνακας 5.33 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 12**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>35,30</b>	<b>35,28</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>23,26</b>	<b>23,20</b>
<b>PF</b>	<b>0,883</b>	<b>0,883</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0,900</b>	<b>0,900</b>
<b>Total Crest Factor</b>	<b>1,638</b>	<b>1,659</b>

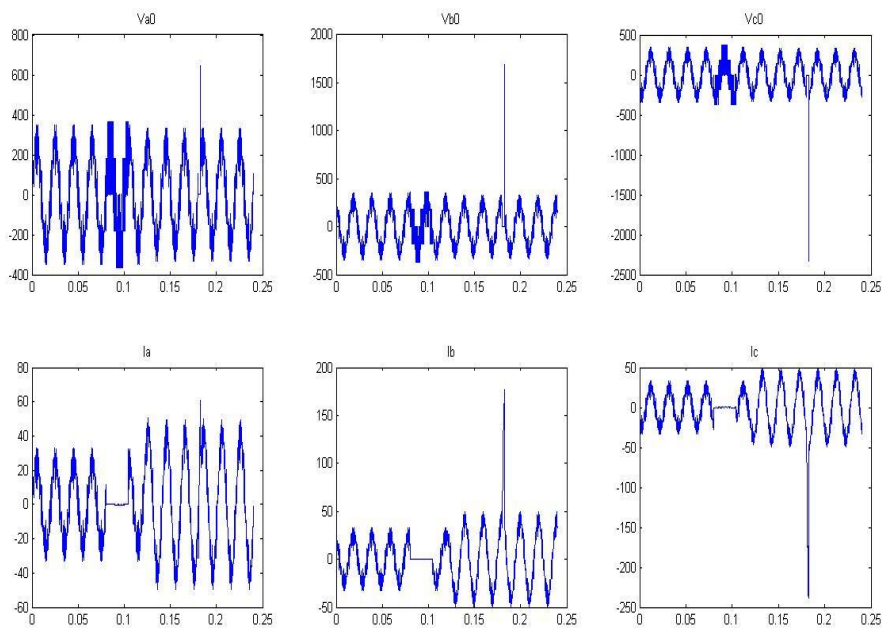
#### 5.4.7 Παράδειγμα 13

Στο παράδειγμα αυτό συνδέονται στο κύκλωμα ακριβώς τα ίδια φορτία με αυτά του παραδείγματος 12, στις ίδιες χρονικές στιγμές με του προηγούμενου παραδείγματος.

Επιπλέον, δημιουργείται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα για χρονικό διάστημα 0,0024 δευτερολέπτων στο 0,18 δευτερόλεπτο. Στο Σχήμα 5.32 φαίνεται το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και οι κυματομορφές των φασικών τάσεων και των ρευμάτων γραμμής στο Σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.32 Κύκλωμα 13<sup>ου</sup> παραδείγματος



Σχήμα 5.33 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Στον Πίνακα 5.34 παρουσιάζονται οι δείκτες ολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης και ρεύματος, υπολογισμένοι με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier, καθώς και η διαφορά τους.

Όπως μπορεί να φανεί ξεκάθαρα σε αυτόν τον πίνακα η διαφορά είναι πάρα πολύ μεγάλη ανάλογα με τον μετασχηματισμό που έχει χρησιμοποιηθεί, περίπου 10%, τόσο για την τάση όσο και για το ρεύμα. Αυτό που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του μονοφασικού δικτύου, το βραχυκύκλωμα που προστέθηκε σε σχέση με το παράδειγμα 12 προκάλεσε μικρή αλλαγή στους δείκτες στην περίπτωση που αυτοί υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier. Αντίθετα, όταν αυτοί υπολογίστηκαν με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT το βραχυκύκλωμα προκάλεσε μεγάλη αύξηση, για αυτό το λόγο αυξήθηκε τόσο πολύ η διαφορά τους.

Οι υπόλοιποι δείκτες ποιότητας ισχύος που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT μπορούν να φανούν στον Πίνακα 5.35.

**Πίνακας 5.34 Δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης με WPT και Fourier παραδείγματος 13**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet		Μετασχηματισμός Fourier	Διαφορά WPT – Fourier (%)	
	db10	sym30		db10	sym30
THD <sub>v</sub> (%)	43,32	43,29	33,97	9,35	9,32
THD <sub>i</sub> (%)	34,91	34,60	24,25	10,66	10,35

**Πίνακας 5.35 Δείκτες ποιότητας ισχύος με WPT παραδείγματος 13**

Δείκτες	Μετασχηματισμός Wavelet Packet	
	db10	sym30
DIN <sub>v</sub> (%)	39,69	39,66
DIN <sub>i</sub> (%)	32,76	32,51
PF	0,809	0,809
PF <sub>nz</sub>	0,872	0,869
Total Crest Factor	1,608	1,631

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ****6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στους πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένες οι διαφορές των δεικτών ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier, όλων των παραδειγμάτων του Κεφαλαίου 5. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται μόνο η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες που για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκε το κυματίδιο sym30, στην περίπτωση της ανάλυσης με μετασχηματισμό WPT.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα παραδείγματα του μονοφασικού δικτύου, ενώ στον Πίνακα 6.2 τα παραδείγματα του τριφασικού δικτύου. Επίσης στη δεύτερη στήλη κάθε πίνακα μπορεί να φανεί εάν οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος σε κάθε παράδειγμα είναι στάσιμα κύματα.

**Πίνακας 6.1 Διαφορά δείκτη THD με WPT και Fourier παραδειγμάτων μονοφασικού δικτύου Κεφαλαίου 5**

<b>Αριθμός παραδείγματος</b>	<b>Χαρακτηρισμός κυματομορφών</b>	<b>Διαφορά THD τάσης (%)</b>	<b>Διαφορά THD ρεύματος (%)</b>
<b>1</b>	<b>Στάσιμες</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>Στάσιμες</b>	<b>0,19</b>	<b>0,58</b>
<b>3</b>	<b>Στάσιμες</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>4</b>	<b>Μη στάσιμες</b>	<b>0</b>	<b>0,14</b>
<b>5</b>	<b>Μη στάσιμες</b>	<b>1,60</b>	<b>1,25</b>
<b>6</b>	<b>Μη στάσιμες</b>	<b>3,18</b>	<b>1,53</b>
<b>7</b>	<b>Μη στάσιμες</b>	<b>3,67</b>	<b>4,78</b>

**Πίνακας 6.2 Διαφορά δείκτη THD με WPT και Fourier παραδειγμάτων τριφασικού δικτύου Κεφαλαίου 5**

Αριθμός παραδείγματος	Χαρακτηρισμός κυματομορφών	Διαφορά THD τάσης (%)	Διαφορά THD ρεύματος (%)
8	Στάσιμες	0,12	0,12
9	Στάσιμες	0,09	1,29
10	Στάσιμες	0,24	0,41
11	Μη στάσιμες	0,10	0,29
12	Μη στάσιμες	4,66	0,09
13	Μη στάσιμες	9,32	10,35

Από τους Πίνακες 6.1 και 6.2 μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση που οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος είναι στάσιμες, οι διαφορές ανάμεσα στους δείκτες που έχουν υπολογιστεί με τη χρήση του μετασχηματισμού WPT και του μετασχηματισμού Fourier είναι πολύ μικρές, κάτω από 1% στις περισσότερες περιπτώσεις. Γνωρίζοντας ότι ο μετασχηματισμός Fourier είναι ιδανικός για την ανάλυση στάσιμων κυματομορφών και δίνει ακριβή αποτελέσματα, οι δείκτες που χρησιμοποιούν τον μετασχηματισμό κυματιδίων θα δίνουν και αυτοί αποτελέσματα πολύ κοντά στα πραγματικά, και σε αρκετές περιπτώσεις ακριβή αποτελέσματα.
- Παρατηρείται ότι σε αρκετές περιπτώσεις μη στάσιμων κυματομορφών τάσης και ρεύματος, η διαφορά στους δείκτες είναι αρκετά μεγάλη. Όσο περισσότερα μεταβατικά χαρακτηριστικά ή αυξομειώσεις φορτίων υπάρχουν σε ένα κύκλωμα τόσο περισσότερο αυξάνεται η απόκλιση ανάμεσα στους δείκτες που υπολογίζονται με τον μετασχηματισμό WPT και σε αυτούς που υπολογίζονται με τον μετασχηματισμό Fourier. Γνωρίζοντας ότι για την ανάλυση μη στάσιμων κυματομορφών καταλληλότερος από τους δύο μετασχηματισμούς είναι ο μετασχηματισμός κυματιδίων, παρατηρείται ότι σε μερικές περιπτώσεις οι δείκτες που έχουν υπολογιστεί με το μετασχηματισμό Fourier μπορούν να δώσουν επισφαλή αποτελέσματα. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις μη στάσιμων κυματομορφών, όπως των παραδειγμάτων 4 και 11, που η διαφορά των δύο μεθόδων είναι μικρή.
- Παρατηρήθηκε, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραδειγμάτων 6-7 και 12-13, ότι η προσθήκη ενός πολύ μικρού σε διάρκεια αλλά μεγάλου σε τιμή φαινομένου,



όπως ένα βραχυκύκλωμα, αφήνει σχεδόν ανεπηρέαστους τους δείκτες που έχουν υπολογιστεί με τον μετασχηματισμό Fourier. Αντίθετα, οι δείκτες που έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό WPT αυξάνονται αρκετά. Αυτό σημαίνει ότι οι δεύτεροι είναι πιο ευαίσθητοι σε μεταβατικά φαινόμενα μικρής διάρκειας απ' ότι οι πρώτοι.

Στα παραδείγματα 1-13 του προηγούμενου κεφαλαίου έχουν χρησιμοποιηθεί τα κυματίδια db10 και sym30, για τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας ισχύος. Στον Πίνακα 6.3, παρουσιάζεται ο μέσος όρος των διαφορών όλων των παραδειγμάτων στις τιμές του κάθε δείκτη, ανάλογα με το κυματίδιο που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της τάσης και του ρεύματος.

**Πίνακας 6.3 Μέσος όρος διαφορών δεικτών ανάλογα με τα κυματίδια που χρησιμοποιήθηκαν**

Δείκτες ποιότητας ισχύος	Μέσος όρος διαφορών δεικτών ποιότητας ισχύος (db10 - sym30)
<b>THD<sub>v</sub> (%)</b>	<b>0,03</b>
<b>THD<sub>i</sub> (%)</b>	<b>0,104</b>
<b>DIN<sub>v</sub> (%)</b>	<b>0,023</b>
<b>DIN<sub>i</sub> (%)</b>	<b>0,096</b>
<b>PF</b>	<b>0</b>
<b>PF<sub>nz</sub></b>	<b>0</b>

Είναι γνωστό από τις δύο εφαρμογές του κεφαλαίου 5 στις οποίες ήταν γνωστές οι εξισώσεις των τάσεων και των ρευμάτων, ότι το κυματίδιο που δίνει τα πιο ακριβή αποτελέσματα είναι το sym30, αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα των υπολογισμών, ενώ χρησιμοποιώντας το κυματίδιο db10 προκύπτουν αποτελέσματα που αποκλίνουν λίγο από τα πραγματικά, αλλά ο υπολογισμός των δεικτών είναι αρκετά γρήγορος.

Από τον Πίνακα 6.3 παρατηρείται ότι στην πράξη η διαφορά στις τιμές των δεικτών ανάλογα με το κυματίδιο που έχει χρησιμοποιηθεί (db10 ή sym30), είναι αρκετά μικρή, δηλαδή μικρότερη από 0,1%. Ειδικά για τους συντελεστές ισχύος τα δύο κυματίδια δίνουν

ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί στην πράξη να χρησιμοποιηθεί το κυματίδιο db10 όταν απαιτείται ταχύτητα, χωρίς να σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι ακριβή.

## 6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει μελετηθεί ο τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός κυματιδίων για τον υπολογισμό διαφόρων δεικτών ποιότητας ισχύος. Οι δείκτες που έχουν μελετηθεί είναι ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) τάσης και ρεύματος, ο δείκτης αρμονικής παραμόρφωσης (DIN) τάσης και ρεύματος, ο συντελεστής κορυφής (CF), ο συντελεστής ισχύος (PF) και ο συντελεστής ισχύος κόμβου 0 (PFnz). Αυτοί οι δείκτες υπολογίστηκαν για διάφορα παραδείγματα μονοφασικών και τριφασικών κυκλωμάτων. Στην περίπτωση των τριφασικών κυκλωμάτων μελετήθηκε μόνο η περίπτωση συμμετρικής πηγής και συμμετρικών φορτίων.

Πιθανή μελλοντική επέκταση της εργασίας είναι η μελέτη με τη χρήση του μετασχηματισμού κυματιδίων, μη συμμετρικών τριφασικών κυκλωμάτων, είτε η ασυμμετρία προκύπτει λόγω ασυμμετρίας των φορτίων είτε λόγω ασυμμετρίας της πηγής [20]. Μπορεί να μελετηθεί ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός για τον υπολογισμό της θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας των τάσεων ή των ρευμάτων, αλλά και τον υπολογισμό δεικτών που ποσοτικοποιούν την ασυμμετρία αυτή, όπως του δείκτη VUF (Voltage Unbalance Factor).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [2] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems*, Electric Power Systems Research 81 (2011) 1117-1123
- [3] Π. Σ. Γεωργιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
- [4] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on Wavelet Packet transform; Part 1: Mathematical formulation*, Can. J. Elect. Comput. eng., Vol. 35, No. 1, Winter 2010
- [5] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on wavelet packet transform; Part 2: case studies and results*, Can. J. Elect. Comput. eng., Vol. 35, No. 1, Winter 2010
- [6] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, A.H. Nawab, *Σήματα και Συστήματα*. Εκδόσεις Φούντας, 2011
- [7] Γ. Καραγιάννης, Π. Μαραγκός, *Βασικές Αρχές Σημάτων και Συστημάτων*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2010
- [8] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *On the Implementation of Time-frequency Transforms for Defining Power Components in Non-sinusoidal Situations: A Survey*, Electric Power Components and Systems, 37:373-392, 2009

- 
- [9] Shie Qian, *Introduction to Time-Frequency and Wavelet Transforms*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002
- [10] P.M. Bentley, J.T.E. McDonnell, *Wavelet transforms: an introduction*, Electronics & Communication Engineering Journal, August 1994
- [11] Stephane Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, San Diego: Academic Press, 1999
- [12] Stephane G. Mallat, *A Theory for Multiresolutional Signal Decomposition: The Wavelet Representation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7, July 1989
- [13] K. Tapan, Magdalena Salazar-Palma, Michael C. Wicks, *Wavelet Applications in Engineering Electromagnetics*, Boston: Artech House, 2002
- [14] [http://radio.feld.cvut.cz/matlab/toolbox/wavelet/ch06\\_a28.html](http://radio.feld.cvut.cz/matlab/toolbox/wavelet/ch06_a28.html)
- [15] S. Suja, J. Jerome, *Measurement of Harmonics Using Wavelet Packets*, Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol7, No2, Summer-Fall 2008
- [16] E.Y. Hamid, R. Mardiana, Z.I. Kawasaki, *Method for RMS and power measurements based on the wavelet packet transform*, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol 149, No2, March 2002
- [17] E.Y. Hamid, Z. Kawasaki, R. Maridiana, *Wavelet Packet Transform for Rms and Power Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, 17(2)P.460-P.466
- [18] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *Novel power quality indices based on wavelet packet transform for non-stationary sinusoidal and non-sinusoidal disturbances*, Electric Power System Research 80 (2010) 753-759
- [19] Στέφανος Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών, 2014
- [20] Walid G. Morsi, M.E. El-Hawary, *Wavelet Packet Transform-Based Power Quality Indices for Balanced and Unbalanced Three-Phase Systems Under Stationary or Nonstationary Operating Conditions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009