ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Μεταπτυχιακή Εργασία

Σχεδιασμός και ανάπτυξη συστήματος μέτρησης παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος με χρήση FPGA

Γιάννης Καντάρης

Εξεταστική επιτροπή: Κ.ΚΑΛΑΙΤΖΑΚΗΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ) Δ. ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΑΤΟΣ (ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ) Γ.ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

XANIA 2008

Πρόλογος

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα μέτρησης ποιότητας ισχύος το οποίο έχει σκοπό τον εντοπισμό και τη μέτρηση παραμέτρων ισχύος με την χρήση FPGA για επίτευξη όσον τον δυνατόν μεγαλύτερης ταχύτητας συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων. Οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο που μου ανέθεσε αυτή την εργασία, για τις συμβουλές του αλλά και για την βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον συνάδελφο μου Σίσκο Αλέξανδρο για τη βοήθεια του, τον κύριο Κουτρούλη Ευτύχη, όπως επίσης και τους καθηγητές κυρίους Πνευματικάτο Διονύσιο και Σταυρακάκη Γεώργιο για τον χρόνο που διέθεσαν για να μελετήσουν την εργασία αυτή.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η θεωρητική ανάπτυξη και η πλήρης υλοποίηση ενός συστήματος μέτρησης ηλεκτρικής ισχύος (power meter) για τον υπολογισμό των παραμέτρων της ισχύος που εφαρμόζονται σε ένα φορτίο. Οι παράμετροι που μετρούνται από το σύστημα που υλοποιήθηκε είναι οι εξής:

- Συχνότητα.
- Στιγμιαία τιμή τάσης και ρεύματος.
- Πραγματική ενεργός τιμή (true rms) τάσης και ρεύματος.
- Στιγμιαία ισχύς.
- Μέση ισχύς.
- Ολική αρμονική παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD).
- Ενέργεια για χρονικό διάστημα επιλογής του χρήστη.
- Διαφορά φάσης των κυματομορφών ρεύματος-τάσης.
- Χρονική διαφορά των κυματομορφών ρεύματος-τάσης.
- Συντελεστής ισχύος.
- Άεργος ισχύς.
- Πραγματική ισχύς.

Για την ανάπτυξη του συστήματος μέτρησης παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν:

- Το αναπτυξιακό σύστημα της FPGA Virtex II pro XUP.
- Δύο 12 bit A/D converters.
- Δυο τελεστικοί ενισχυτές.
- Μετασχηματιστής τάσης.
- Δυο συγκριτές τάσης.

Ο προσανατολισμός της υλοποίησης είναι η όσο τον δυνατόν ταχύτερη επεξεργασία των δεδομένων όπως επίσης και η μεγαλύτερη συχνότητα

δειγματοληψίας της κυματομορφής εισόδου που αντιστοιχεί σε περισσότερα δείγματα άρα και καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων.

Το ισχυόμετρο υλοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να μέτρα με ακρίβεια εκτός από την κυματομορφή δικτύου και οποιαδήποτε άλλη κυματομορφή συχνότητας έως 2,5 kHz. Το σύστημα σε αυτή την εργασία εξετάζεται για διάφορες κυματομορφές εισόδου (κυματομορφή δικτύου, ημιτονοειδή κυματομορφή. τετραγωνική κυματομορφή, τριγωνική κυματομορφή, DC είσοδο) και παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις τα πειραματικά αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται με τα αναμενόμενα. Σε αυτό το στάδιο έγιναν πολλές μετρήσεις οι οποίες είχαν σκοπό τη σύγκριση του ισχυομέτρου της υλοποίησης με όργανα ακριβείας όπως το ισχυόμετρο Fluke 43B, τα πολύμετρα HP 3466A και GW8035F και το DC τροφοδοτικό HP E3630A. Σε όλα τα σετ μετρήσεων το ισχυόμετρο της υλοποίησης έδειξε πολύ υψηλή ακρίβεια σε σχέση με τα άλλα όργανα. Ειδικά στο διάστημα 0-2500 Hz τα ποσοστά σφάλματος των μετρήσεων του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με τα υπόλοιπα όργανα είναι στην χειρότερη περίπτωση μόλις 5%. Στις περισσότερες μάλιστα μετρήσεις τα ποσοστά σφάλματος είναι 0% έως 2%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια του οργάνου δοκιμάστηκε σε μετρήσεις τιμών πολύ χαμηλής τάξης, διαδικασία που ανέβασε το επίπεδο δυσκολίας της διαδικασίας αξιολόγησης του ισχυομέτρου.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγυ	Εισαγωγή7					
2.	Ανασκ	όπηση μεθόδων μέτρησης ισχύος	12				
3.	Μελέτη	ι παραμέτρων ισχύος και μέτρησης ισχύος	39				
3	8.1 Παρ	ράμετροι μέτρησης ισχύος	39				
	3.1.1	Είδη κυματομορφών	39				
	3.1.2	Παράμετροι μέτρησης κυματομορφών	39				
3	3.2 Пою	ότητα ισχύος	49				
	3.2.1	Αρμονικές	50				
	3.2.2	Αποκλίσεις συχνότητας (frequency deviations)	50				
	3.2.3	Μεταβατικά φαινόμενα (transients)	51				
	3.2.4	Θόρυβος (noise)	52				
	3.2.5	Πτώσεις τάσης (voltage sags)	52				
	3.2.6	Διακοπές (interruptions)	53				
	3.2.7	Ανυψώσεις τάσης (voltage swells)	54				
	3.2.8	Flicker	54				
4.	Υλοπο	ίηση συστήματος	55				
4	I.1 Har	dware και υλικά του συστήματος που υλοποιήθηκε	55				
	4.1.1	Το αναπτυξιακό σύστημα της Fpga Virtex II pro XUP	55				
	4.1.2	Σειριακή θύρα RS232	57				
	4.1.3	Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADS7800JP	61				
	4.1.4	Συγκριτής τάσης LM311N	64				
	4.1.5	Μετασχηματιστής τάσης και κύκλωμα με αντιστάσεις μέτρησης	65				
4	ι.2 Αλγ	όριθμοι του συστήματος που υλοποιήθηκε	67				
	4.2.1	Μέτρηση συχνότητας	67				
	4.2.2	Ρύθμιση ρολογιού υλοποίησης	69				

4.2.3		3	Υπολογισμός στιγμιαίας τιμής τάσης, ρεύματος και ισχύος	74		
4.2.4		4	Υπολογισμός rms τιμής	78		
4.2.5		5	Υπολογισμός ενέργειας που καταναλώνεται στο φορτίο	81		
4.2.6		6	Μέτρηση ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)	85		
4.2.7		7	Μέτρηση διαφορά φάσης	91		
4.2.8		8	Συντελεστής ισχύος, άεργος ισχύς και μιγαδική ισχύς	95		
5.	Διε	επαφ	ρή του ισχυομέτρου με ΡC	99		
5	5.1	Χαρ	ρακτηριστικά Microblaze	99		
5	5.2	Διετ	ταφή μεταξύ σχεδίασης και σειριακής θύρας1	01		
	5.2.	1	Γρήγορη μονοκατευθυντική σύνδεση (FSL)1	02		
5	5.3	Προ	οβολή μετρήσεων σε γραφικό περιβάλλον με χρήση Visual Basic 1	05		
6.	Пε	ιραμ	ατικά αποτελέσματα ισχυομέτρου1	07		
6	6.1	Εισ	αγωγή στο περιβάλλον των μετρήσεων1	09		
6	6.2	Мεт	ρήσεις κυματομορφής δικτύου με χρήση μετασχηματιστή1	13		
6	6.3	Мεт	ρήσεις ημιτονοειδών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας 1	27		
6.4 M		Мεт	ρήσεις τετραγωνικών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας 1	40		
6.5 Με		Мεт	ρήσεις τριγωνικών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας 1	54		
6.6 Ma		Мεт	ρήσεις σταθερής συχνότητας με μεταβλητό φορτίο1	67		
6.7 Μέ συχνότητα		Μέτ στητα	ρηση πραγματικής rms τιμής τάσης σε ανοιχτοκύκλωμα για σταθε	ρή 72		
6	6.8	Μέτ	ρηση DC τάσης1	75		
6	6.9	Μέτ	ρηση ενέργειας με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	78		
7.	7. Συμπεράσματα183					
8.	Bı	3λιογ	γραφία1	86		

1. Εισαγωγή

Η μέτρηση ισχύος (Power Measurement) αλλά και η ποιότητα ισχύος (Power Quality) αφορούν ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Αν και καινούργιος όρος, η μέτρηση ποιότητας ισχύος καλύπτει φαινόμενα ήδη γνωστά τα οποία όμως αποκτούν διαφορετική και μεγαλύτερη σημασία στα μοντέρνα Н αυξανόμενη συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. χρήση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και ηλεκτρονικών ισχύος και γενικότερα συσκευών που είναι ευαίσθητες αλλά και δημιουργούν διαταραχές, η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας και οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις του συστήματος καθιστούν την μέτρηση ποιότητας ισχύος σημαντική. Τόσο η ποιότητα της τάσης (voltage quality) καθώς και η ποιότητα ρεύματος (current quality) συνιστούν παράγοντες που επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του δικτύου και έχουν μεγάλη οικονομική σημασία.

Οι εταιρίες ηλεκτρισμού σε όλο τον κόσμο καλούνται να αποδείξουν ότι η παρεχόμενη ισχύς πληροί τις προϋποθέσεις εκείνες που εγγυούνται την λειτουργία των πελατών-φορτίων τους χωρίς προβλήματα. Παράλληλα οι καταναλωτές προσπαθούν να εξασφαλίσουν τις καλύτερες συνθήκες για τα φορτία τους ώστε να περιορίσουν οικονομικές απώλειες που προκαλούνται από προβλήματα στην παροχή ηλεκτρική ισχύος. Προδιαγραφές συντάσσονται από τους αρμόδιους οργανισμούς και λειτουργούν προς το παρόν ως προτεινόμενα όρια. Η πρόβλεψη πάντως είναι ότι στο άμεσο μέλλον θα ισχύσουν ως δεσμευτικοί περιορισμοί για όλους τους εμπλεκόμενους με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Μεγάλος αριθμός μετρητικών συσκευών εγκαθίσταται στο δίκτυο προκειμένου να καταγράψούν τις διαφορετικές συνιστώσες της ποιότητας ισχύος αλλά και για να εντοπισθούν προβλήματα και να βρεθούν οι κατάλληλες πληροφορίες για την λύση τους. Τα οφέλη από τις μετρήσεις είναι πολλαπλά καθώς αυξάνουν την γνώση μας για την λειτουργία του συστήματος.

Η απόκλιση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος από την πρότυπη μπορεί αρκετές φορές να αποβεί ακόμα και επικίνδυνη για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Οι αποκλίσεις αυτές ονομάζονται διαταραχές της ηλεκτρικής ισχύος (electric power disturbances).

Θα μπορούσε να διατυπωθεί ότι η ποιότητα ισχύος είναι μια θεώρηση των πραγμάτων με κέντρο βάρος τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα που καλύπτει είναι σημαντικά, είτε γιατί με συνδέονται με αυξημένο κόστος (για βιομηχανικούς καταναλωτές), είτε ακόμα και με ανθρώπινες ζωές όταν, για παράδειγμα, οι καταναλωτές είναι νοσοκομεία, αεροδρόμια κα.

Η κατασκευή ενός οργάνου για τη μέτρηση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος προκύπτει από την ανάγκη να γνωρίζουμε πόσο αποκλίνει η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος από την πρότυπη. Αναλυτικότερα, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε τι είδους διαταραχές αντιμετωπίζει συχνά το δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος στο οποίο είμαστε συνδεμένοι, πόσο συχνά εμφανίζονται και πόσο έντονες είναι. Κι επειδή όλες οι ηλεκτρονικές ή ηλεκτρικές συσκευές είναι φτιαγμένες για να δουλεύουν μέσα σε αυστηρά καθορισμένα όρια τάσης και συχνότητας, τελικά η κατάληξη όλων των ανωτέρω είναι το πόσο επικίνδυνες μπορεί να αποδειχθούν οι διαταραχές αυτές για τον τροφοδοτούμενο ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, αλλά και για την ηλεκτρική εγκατάσταση. Στην Ευρώπη οι συζητήσεις για την ποιότητα ισχύος και τις δεσμεύσεις σχετικά με αυτή, έχουν ως αφετηρία την Κοινοτική Οδηγία 85/374/ΕΕС του 1985 που αφορά γενικά τις ευθύνες παραγωγών αναφορικά με τα προϊόντα τους. Σύμφωνα με το άρθρο 1 της οδηγίας, ο παραγωγός θα πρέπει να είναι υπόλογος για ζημιά που θα προκαλέσει ελάττωμα του προϊόντος, ενώ στο άρθρο 3 της Οδηγίας δηλώνεται ότι ο όρος «προϊόν» αναφέρεται και στην ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1. Γενικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης των παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος.

Η κεντρική ιδέα λειτουργίας του συστήματος που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε δίνεται στο γενικό διάγραμμα του σχήματος 1. Η κυματομορφή εισόδου οδηγείται σε έναν μετασχηματιστή τάσης ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υποβιβασμό της τιμής της τάσης σε τιμές που μπορούν να υποστούν επεξεργασία από τους μετατροπείς A/D. Στη συνέχεια, με τη χρήση μιας αντίστασης μέτρησης παράγεται η κυματομορφή με βάση την οποία μετράται η τιμή της έντασης του ρεύματος, ενώ με τη χρήση ενός διαιρέτη τάσης παράγεται η κυματομορφή με βάση την οποία μετράται η τιμή της τάσης. Οι κυματομορφές αυτές οδηγούνται στους 2 αντίστοιχους μετατροπείς A/D. Η έξοδος των A/D οδηγεί ψηφιακά πλέον σήματα στην είσοδο της FPGA προκειμένου να υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία και να δώσουν τα αποτελέσματα του ισχυομέτρου. Ένα επίσης αναλογικό τμήμα του συστήματος είναι το κύκλωμα συγκριτή που έχει ως τελικό σκοπό την μέτρηση της περιόδου της κυματομορφής εισόδου. Το κύκλωμα αυτό ουσιαστικά μετατρέπει την περιοδική κυματομορφή εισόδου σε τετραγωνικό παλμό ίσης περιόδου. Η επεξεργασία και η μέτρηση της περιόδου του σήματος γίνεται στη συνέχεια ψηφιακά στην FPGA. Επίσης οι υπόλοιπες λειτουργίες του ισχυομέτρου υλοποιούνται ψηφιακά και είναι η μέτρηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης αλλά και του ρεύματος, η μέτρηση της πραγματικής τιμής ρεύματος τάσης και ισχύος ,η μέτρηση στιγμιαίας τιμής ρεύματος τάσης και ισχύος, η μέτρηση της συχνότητας της κυματομορφής εισόδου, η κατανάλωση ενέργειας, η μέτρηση της διαφοράς φάσης και χρόνου των κυματομορφών ρεύματος-τάσης, η μέτρηση της άεργου ισχύος, η μέτρηση του συντελεστή ισχύος και η μέτρηση του πραγματικού μέρους της μιγαδικής ισχύος. Οι μετρήσεις αυτές με την αρωγή του επεξεργαστή Microblaze του αναπτυξιακού της Virtex II pro XUP στέλνονται μέσω σειριακής σε έναν προσωπικό υπολογιστή και εμφανίζονται σε γραφικό περιβάλλον στην οθόνη του. Χάρη στην εγκατάσταση διεπαφής μεταξύ του υπολογιστή και του αναπτυξιακού ο χρήστης μπορεί να επιλέξει με ποιο τρόπο θα λειτουργήσει το ισχυόμετρο. Συγκεκριμένα το ισχυόμετρο διαθέτει 2 τρόπους λειτουργίας, την απλή και την λειτουργία μέγιστης δυνατής δειγματοληψίας. Η απλή λειτουργία είναι για περιοδικές κυματομορφές εισόδου ενώ η λειτουργία μέγιστης δυνατής δειγματοληψίας αναφέρεται για οποιαδήποτε κυματομορφή εισόδου.

Ένα από τα πλεονέκτημα της υλοποίησης αυτής σε σχέση με ήδη υπάρχουσες είναι η υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας που φθάνει έως και τα 310 KHz. Με την υψηλή αυτή δειγματοληψία λαμβάνεται μεγάλος αριθμός δειγμάτων με αποτέλεσμα η κυματομορφή εισόδου να αποτυπώνεται με μεγάλη ακρίβεια. "Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ο χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων. Αξίζει να αναφερθεί ότι το max frequency της VHDL υλοποίησης σύμφωνα με το place and route της Xilinx είναι 104 MHz. Βλέπουμε δηλαδή ότι η υλοποίηση θεωρητικά μπορεί να λειτουργήσει σε πάρα πολύ υψηλή συχνότητα. Στον τομέα της ποιότητας ισχύος η γρήγορη λήψη των δεδομένων των μετρήσεων παίζει τον πρωτεύοντα ρόλο προκειμένου στην συνέχεια να υπάρχει όσον το δυνατόν ταχύτερη διόρθωση τυχών βλαβών. Ένα επίσης πλεονέκτημα της μεθόδου που ακολουθήθηκε είναι ότι δεν υπάρχει απώλεια στη λήψη δεδομένων για έναν κύκλο μιας περιοδικής κυματομορφής εισόδου. Πολλές υλοποιήσεις θεωρούν την συχνότητα εισόδου σταθερή και με βάση αυτή τη θεώρηση δειγματοληπτούν ένα

αριθμό δειγμάτων ανά κύκλο. Με δεδομένο όμως ότι η κυματομορφή δικτύου παρουσιάζει μικρές μεταβολές οι συγκεκριμένες υλοποιήσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις στις μετρήσεις τους αφού δεν μπορούν να κρατήσουν τον αριθμό δειγμάτων τους σταθερό. Η παρούσα εφαρμογή διαθέτει λειτουργία μέτρησης της συχνότητας έτσι ώστε σε κάθε κύκλο να λαμβάνονται τα απαραίτητα δείγματα χωρίς την εμφάνιση σφάλματος στη διαδικασία δειγματοληψίας.

Στο κεφάλαιο 2 της εργασίας αυτής γίνεται μία αναφορά σε άλλα συστήματα μέτρησης των παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος που έχουν υλοποιηθεί στο παρελθόν. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στις επιμέρους παραμέτρους της διαδικασίας ελέγχου ποιότητας ισχύος. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική παρουσίαση όλων των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα μέτρησης παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος καθώς και των αλγορίθμων με βάση τους οποίους προγραμματίστηκε η FPGA. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στην διεπαφή μεταξύ της FPGA και του προσωπικού υπολογιστή και στον τρόπο που εκπονήθηκε αυτή. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και τα αποτελέσματα αυτής και στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

Ανασκόπηση μεθόδων μέτρησης ισχύος.

Λόγω της ζωτικής αξίας της ομαλής λειτουργίας ενός ηλεκτρικού δικτύου υπάρχουν πολλές μελέτες οι οποίες πραγματεύονται την μέτρηση αλλά και τον έλεγχο της ποιότητας ισχύος. Στόχος των μελετών αυτών είναι η όσο τον δυνατόν καλύτερη μέτρηση των παραμέτρων ισχύος έτσι ώστε να γίνει εντοπισμός διάφορων βλαβών και διαταραχών.

Μια σημαντική έρευνα [1] στον τομέα αυτόν έγινε στην Σιγκαπούρη και περιγράφει την ανάπτυξη ενός συστήματος ελέγχου ισχύος με σκοπό τον εντοπισμό ηλεκτρικών ποσοτήτων σχετικών με τις αρμονικές και τα επίπεδα παραμόρφωσης. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται και ένας νέος αλγόριθμος για τη λήψη σύγχρονων δειγμάτων όταν η συχνότητα της κυματομορφής εισόδου μεταβάλλεται. Επίσης παρουσιάζεται και ένας ακριβής τρόπος για τη μέτρηση ημιτονοειδούς συχνότητας εισόδου καθώς και ένας εικονικός ενεργειακός μετρητής. Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε μια υψηλής απόδοσης κάρτα ανάκτησης δεδομένων 16 αναλογικών εισόδων με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας 100 KHz σε συνδυασμό με ένα PC Pentium 100 MHz. Το σύστημα δειγματοληπτεί 2 κυματομορφές που αντιστοιχούν στο ρεύμα και στην τάση ενός μονοφασικού συστήματος. Οι ηλεκτρικές ποσότητες που μετρούνται στην εργασία αυτή είναι η τάση, το ρεύμα, η ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς, συντελεστής ισχύος, συχνότητα, ολική αρμονική παραμόρφωση και το φάσμα μέχρι και την 15^η αρμονική.

Ο υπολογισμός των αρμονικών και του φάσματος υπολογίζεται με την συμβολή του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT). Για την σωστή υλοποίηση του DFT η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 φορές μεγαλύτερη από τη συχνότητα εισόδου έτσι ώστε να μην υπάρξει φαινόμενο επικάλυψης και τα δείγματα του σήματος εισόδου πρέπει να περιέχονται σε έναν κύκλο ή σε κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του κύκλου αυτού. Οι κύριοι τρόποι για τη σωστή δειγματοληψία του σήματος εισόδου είναι α) η χρησιμοποίηση βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL) β) η εφαρμογή τεχνικών windowing γ) η χρήση

μεταβλητής συχνότητας δειγματοληψίας δ) η χρήση μεταβλητού αριθμού δειγμάτων. Στο paper αυτό η συχνότητα του σήματος εισόδου αρχικά καθορίζεται από μια σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας. Ο αριθμός των δειγμάτων που απαιτούνται να χωρέσουν σε ένα κύκλο στη συνέχεια υπολογίζεται και τροφοδοτείτε στη ρουτίνα του DFT όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Σύγχρονη δειγματοληψία με χρήση μεταβλητού αριθμού δειγμάτων.

Για τον αλγόριθμο της μέτρησης συχνότητας χρησιμοποιείται σαν είσοδο μια ακολουθία διακριτών τιμών του σήματος εισόδου με συχνότητα δειγματοληψίας 5 KHz. Η παρουσία των αρμονικών κάνει τη διαδικασία μέτρησης συχνότητας δύσκολη και σαν αποτέλεσμα οι αρμονικές πρέπει να φιλτράρονται από το σήμα εισόδου για την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα φίλτρο μεταβλητής κατάστασης με ζωνοπερατή έξοδο. Η απλούστερη μέθοδος μέτρησης συχνότητας ενός σήματος είναι με τον εντοπισμό του zero crossing ο οποίος απαιτεί μεγάλο αριθμό δειγμάτων. Άλλος τρόπος είναι η χρήση της θετικής ακολουθίας φάσης που παράγει ο DFT. Ο αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας υπολογίζει τη συχνότητα ενός ημίτονου με γρήγορο και ακριβή τρόπο αναζητώντας τον μέγιστο ρυθμό αλλαγής του σήματος εισόδου. Το γενικό διάγραμμα του συγκεκριμένου αλγορίθμου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3. Γενικό διάγραμμα αλγορίθμου μέτρησης συχνότητας.

Στην εργασία αυτή η μέτρηση της συχνότητας εκπονήθηκε με ακρίβεια 0,008Hz. Η ακρίβεια αυτή επιτεύχθηκε ανεξάρτητα από τη φάση του σήματος εισόδου και από τις μικρές μεταβολές της τάσης. Η συγκεκριμένη εργασία βρίσκει εφαρμογή σε εργασίες όπου απαιτούν συνεχή αξιολόγηση για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς μπορεί ταυτόχρονα να αποθηκεύει δεδομένα και να κάνει υπολογισμούς ταυτόχρονα.

Μια άλλη σημαντική εργασία [2] εκπονήθηκε το 2005 στη Μαλαισία και είχε σκοπό τη δημιουργία ενός οργάνου μέτρησης ισχύος βασισμένου σε ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (DSP). Το συγκεκριμένο paper παρουσιάζει κάποιους νέους αλγόριθμους για την επεξεργασία της κυματομορφής εισόδου σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιώντας το TMS320C6711DSP αναπτυξιακό και τον A/D μετατροπέα TI ADS8364EVM η συγκεκριμένη υλοποίηση εντοπίζει τις διαταραχές αλλά και την πηγή που τις προκαλεί. Η αρχιτεκτονική του οργάνου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Αρχιτεκτονική του οργάνου παρακολούθησης ισχύος.

Η μετρήσεις του οργάνου αφορούν τις μεταβολές της τάσης και τη καταγραφή της αρμονικής παραμόρφωσης. Ο 16 bit A/D έχει ταχύτητα μετατροπής 3,2 μs και μέγιστο ρυθμό εξόδου 250 χιλιάδες δείγματα το δευτερόλεπτο.

Το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης που κατασκευάστηκε για να φέρει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα δίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.



Σχήμα 5. Κύκλωμα διαιρέτη τάσης.

Ο προγραμματισμός του DSP έγινε σε C γλώσσα με χρήση του software Code Composer Studio (CCS) το οποίο προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ο κώδικας μπορεί εύκολα να εξαχθεί στο DSP.
- Η επέκταση του software είναι απλή και προσφέρονται πληροφορίες για τον αλγόριθμο σε πραγματικό χρόνο.
- Μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ του DSP και PC σε πραγματικό χρόνο.

Στην συγκεκριμένη υλοποίηση τα δεδομένα εισόδου αναλύονται με τη χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Για την αξιολόγηση του οργάνου χρησιμοποιήθηκαν 2 ημιτονοειδής κυματομορφές συχνότητας 2 KHz σαν είσοδο του A/D. Τα σήματα αυτά καθώς και η Fourier ανάλυση τους παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 6.



Σχήμα 6. Κυματομορφή εισόδου και FFT ανάλυση.

Το παρόν όργανο σαν πλεονέκτημα σε σχέση με ήδη υπάρχοντα είναι η υψηλή ταχύτητα δειγματοληψίας και συλλογής δεδομένων.

Μια άλλη εργασία που εκπονήθηκε το 2004 [3] και παρουσιάστηκε στο 11° διεθνές συνέδριο για θέματα ποιότητας ισχύος πραγματεύεται μια μέθοδο ελαχιστοποίησης λαθών που προέρχονται από τις παρεκκλίσεις της συχνότητας. Συγκεκριμένα ορισμένες φορές η πραγματική συχνότητα αποκλίνει από την αναμενόμενη ονομαστική της τιμή. Οι αλγόριθμοι που ασχολούνται με θέματα ποιότητας ισχύος συλλέγουν Ν δείγματα σε κάθε κύκλο, σε συχνότητα δειγματοληψίας Ν φορές της ονομαστικής συχνότητας. Πολλοί αλγόριθμοι έχουν σταθερό αριθμό Ν δειγματοληψίας. Σε περίπτωση παρέκκλισης συχνότητας οι αλγόριθμοι αυτοί παρουσιάζουν πρόβλημα. Η συγκεκριμένη εργασία προσπαθεί να εξαλείψει το πρόβλημα αυτό με χρήση μεταβλητού Ν. Σαν αποτέλεσμα αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο που έχει σαν βάση ότι το άθροισμα των τιμών των δειγμάτων για μια περίοδο ενός τέλειου ημιτονοειδούς σήματος είναι 0.

Για την αξιολόγηση του μοντέλου αυτού πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις για διαφορετικούς αριθμούς δειγμάτων ανά περίοδο (64-100-128) για μέχρι και 50% μετατόπιση συχνότητας για ημιτονοειδή σήματα με offset μέχρι 10% DC. Τα 2 παραδείγματα που εξετάστηκαν είναι:

 Α) Ένα ημιτονοειδές σήμα με 1% θόρυβο Gaussian και 10% offset, με 128 δείγματα ανά κύκλο.

Β) Ένα ημιτονοειδής σήμα με 20% τρίτη αρμονική,4% τέταρτη αρμονική,10%
offset, 1% θόρυβο Gaussian, με 128 δείγματα ανά κύκλο.

Η συχνότητα των σημάτων μεταβαλλόταν από 50% ως 150% σε σχέση με την αρχική ονομαστική τιμή. Η φάση μεταβάλλεται από 0-360° μοίρες. Στο παρακάτω σχήμα 7 παρουσιάζονται τα δυο σήματα σε συχνότητα 1.25 της ονομαστικής και φάση 315° μοίρες.



Σχήμα 7. α) Το σήμα Α που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση, β) Το σήμα Β που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο σχήμα 8 η rms τιμή των παραπάνω σημάτων η οποία υπολογίζεται με 2 τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι ο κλασσικός συμβατικός (fixed sampled) και ο άλλος είναι σύμφωνα με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο συγκεκριμένο paper (variable sampled).Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή για κάθε συχνότητα.



Σχήμα 8. α) rms τιμή του σήματος Α για σταθερό και μεταβλητό αριθμό δειγμάτων β) rms τιμή του σήματος Β για σταθερό και μεταβλητό αριθμό δειγμάτων.

Το αποτέλεσμα στην περίπτωση των σταθερών δειγμάτων παρέκκλινε πάνω από 50% του αρχικού πλάτους του σήματος ενώ στην περίπτωση του προτεινόμενου αλγορίθμου το σφάλμα ήταν μικρότερο από 1%.Ο παρακάτω πίνακας 1 παρουσιάζει το σφάλμα που παρουσιάζει η μέθοδος για σταθερά δείγματα ανάλογα με την παρέκκλιση της συχνότητας.

Πίνακας 1. Μέγιστο σφάλμα στον υπολογισμό rsm τιμής για 128 δείγματα ανά κύκλο.

5	Sample	s	128	non- integer	128	non- integer
Δf/f	Normalized Frequencies		first case		second case	
1%	0,99	1,01	0,86%	0,43%	0,89%	0,45%
2%	0,98	1,02	1,5%	0,45%	1,3%	0,47%
5%	0,95	1,05	3,1%	0,45%	2,8%	0,51%
10%	0,90	1,10	6,8%	0,50%	5,9%	0,51%
20%	0,80	1,20	16%	0,59%	15%	0,51%
50%	0,50	1,50	57%	0,59%	68%	0,64%

Το τελικό συμπέρασμα από τα γραφήματα και τους πίνακες δείχνει ότι η συμβατική μέθοδος υπολογισμού rms τιμής με χρήση σταθερού αριθμού δειγμάτων ανά κύκλο παρουσιάζει σημαντικές τιμές σφάλματος ενώ αντίθετα η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει σχεδόν αμελητέες τιμές σφάλματος.

Μια ενδιαφέρουσα εργασία [4] που εκπονήθηκε το 2004 στη Λατινική Αμερική αφορά τον υπολογισμό της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος και της τάσης. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος υπολογισμού του THD είναι με τη χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Οι συμβατικοί 16 bit DSP FFT αλγόριθμοι χρησιμοποιούν υπολογισμούς 16 bit που έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση σφάλματος στον υπολογισμό του πλάτους κάθε αρμονικής. Το σφάλμα αυτό αθροίζεται στον υπολογισμό του τελικού THD με αποτέλεσμα η τιμή του να αυξάνεται. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μείωση του σφάλματος αυτού με τη χρήση hardware DSP 40 bit.

Προκείμενου να εξαλείψει το σφάλμα των υπολογισμών το paper εφαρμόζει δυο φίλτρα για τον υπολογισμό του THD, ένα που ονομάζεται θεμελιώδες φίλτρο (fundamental filter) και ένα το οποίο ονομάζεται φίλτρο παραμόρφωσης (distortion filter). Από το αποτέλεσμα των 2 φίλτρων και με την αρωγή της εντολής "repeat Mac" του DSP υπολογίζεται η ολική αρμονική παραμόρφωση. Προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας μετρήθηκαν 3 AC σήματα. Στο σχήμα 9 παρουσιάζεται το αρχικό σήμα A, το αποτέλεσμα του θεμελιώδους φίλτρου και το άθροισμα των φίλτρων για τις αρμονικές 2 ως 32. Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται το αρχικό σήμα Β, το αποτέλεσμα του θεμελιώδους φίλτρου και το άθροισμα των φίλτρων για τις αρμονικές 2 ως 32. Στο σχήμα 11 παρουσιάζεται το αρχικό σήμα Γ, το αποτέλεσμα του θεμελιώδους φίλτρου και το άθροισμα των φίλτρων για τις αρμονικές 2 ως 32.



Σχήμα 9. Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα Α.



Σχήμα 10. Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα Β.



Σχήμα 11. Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα Γ.

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε προσομοίωση κάποιων σημάτων τα οποία είχαν παραμόρφωση. Στα σχήματα 12,13 και 14 παρουσιάζονται αυτά τα σήματα με θεωρητικό THD 33%, 10% και 48,34% αντίστοιχα.



Σχήμα 12 . Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα προσομοίωσης με THD 33%.



Σχήμα 13. Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα προσομοίωσης με THD 10%.



Σχήμα 14. Αποτελέσματα φίλτρων για το σήμα προσομοίωσης με THD 48,34%(τετραγωνικός παλμός).

Ο παρακάτω πίνακας 2 δείχνει τις τιμές THD που υπολογίστηκαν σε σχέση με τις ιδανικές τιμές για κάθε μια από τις 6 περιπτώσεις.

Signa	Description	THD (%)		
1		Ideal	Calculated	
1	Real power line AC	-	1,18	
2	Real power line AC	-	0,27	
3	Real power line AC	-	1,18	
4	33% third harmonic	33	32,95	
5	10% fifth harmonic	10	9,98	
6	square wave	48,34	48,15	

Πίνακας 2. Υπολογισμός THD για 6 διαφορετικά σήματα.

Όπως γίνεται αντιληπτό τα αποτελέσματα με την προτεινόμενη μέθοδο είναι αρκετά καλά αφού παρουσιάζουν σχεδόν ταύτιση με τα ιδανικά. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι εύκολα στην υλοποίηση.

Σε μια άλλη ενδιαφέρουσα εργασία [5] προτάθηκε η υλοποίηση μετασχηματισμού με σκοπό τον εντοπισμό διαταραχών ισχύος. Η wavelet σε μια FPGA συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει ένα πλήρες παράδειγμα επεξεργασίας σήματος όπου η ενσωματωμένη βάση wavelet λειτουργεί πολύ αποδοτικά στη παρακολούθηση των μεταβολών του σήματος. Με αυτή την τεχνική οι πληροφορίες για τον χρόνο και την συχνότητα ενοποιούνται διευκολύνοντας τον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου. Για την βελτίωση της υπολογιστικής απόδοσης η προτεινόμενη μέθοδος ξεκινά με software προσομοίωση του wavelet μετασχηματισμού με σκοπό να διατυπωθεί το μαθηματικό μοντέλο. Στη συνέχεια πραγματοποιείτε σύνθεση του κυκλώματος και χρονική ανάλυση με σκοπό την αξιολόγηση του κυκλώματος. Επόμενο βήμα είναι η φόρτωση της υλοποίησης στην FPGA. Τέλος ο σχεδιασμός δοκιμάζεται με σήματα που προσομοιώνουν διάφορες διαταραχές. Το σχήμα 15 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική της συγκεκριμένης υλοποίησης.



Σχήμα 15. Αρχιτεκτονική υλοποίησης.

Τα βασικά βήματα της υλοποίησης είναι τα παρακάτω:

 Μέτρηση δεδομένων: Μέσω μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος μετρούνται το τριφασικό ρεύμα, η τριφασική τάση και η ασταθής μηδενική ακολουθία του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Οι τιμές αυτές στη συνέχεια αποθηκεύονται σε έναν αποθηκευτή δεδομένων.



Σχήμα 16. Γενικό διάγραμμα μέτρησης δεδομένων.

- Κύκλωμα Α/D και κύκλωμα D/A: Το κύκλωμα Α/D χρησιμοποιείται προκειμένου να μετατρέψει τα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή έτσι ώστε να είναι συμβατά με την είσοδο της FPGA. Για τη μετατροπή αυτή χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο 12 bit AD7874. Ο D/A που χρησιμοποιείται είναι το ολοκληρωμένο DAC0800.
- Κύκλωμα μετασχηματισμού wavelet: Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται με 2 FPGA της Xilinx τις XC4010XL. Η πρώτη FPGA κάνει τον πρώτο μετασχηματισμό wavelet και στη συνέχεια το αποτέλεσμα μπορεί να περάσει στη δεύτερη FPGA για περαιτέρω επεξεργασία όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα.

Το 2006 ένα νέο paper [6] προτείνει ένα όργανο παρακολούθησης ποιότητας ισχύος μέσω μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης. Το όργανο αυτό έχει την ικανότητα να αποκτά δείγματα του σήματος από το δίκτυο ισχύος, να υπολογίζει το THD και να προσεγγίζει την αβεβαιότητα (uncertainty) από την οποία επηρεάζεται το τελευταίο αποτέλεσμα. Η υλοποίηση εκπονήθηκε με τη χρήση μιας FPGA της Xilinx, την Virtex II σε γλώσσα VHDL. Η λύση αυτή εξασφαλίζει ταχύτητα, μικρές απώλειες ισχύος και μικρό κόστος.Το γενικό διάγραμμα της συγκεκριμένης σχεδίασης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 17.



Σχήμα 17. Γενικό διάγραμμα ισχυομέτρου.

^{••}Όπως βλέπουμε στη συγκεκριμένη υλοποίηση από μια γραμμή ισχύος μέσω μιας συσκευής μείωσης τάσης (voltage transducer) τα δεδομένα καταλήγουν σε έναν 12 bit A/D μετατροπέα. Στη συνέχεια η δειγματοληπτούμενη κυματομορφή εισάγεται

στην FPGA όπου μετά από επεξεργασία υπολογίζονται οι αρμονικές της και η ολική αρμονική παραμόρφωση.

Σε ένα άλλο paper [7] αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για λύσεις που βασίζονται σε ψηφιακή επεξεργασία σήματος (DSP). Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μια βασισμένη σε DSP υλοποίηση για έλεγχο ποιότητας ισχύος. Τα θέματα που αναπτύσσονται είναι η επιλογή της σωστής αρχιτεκτονικής, η επιλογή του DSP και η κατάλληλη ανάπτυξη του λογισμικού. Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής βασίζεται σε διεπαφή μεταξύ του DSP και ενός προσωπικού υπολογιστή. Αποστέλλονται διεργασίες πραγματικού χρόνου προκειμένου να 'τρέξει' το βέλτιστο hardware στο DSP. O DSP που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Motorola DSP56002 και το ολικό γενικό διάγραμμα της υλοποίησης παρουσιάζεται στο σχήμα 18.



Σχήμα 18. Γενικό διάγραμμα του συστήματος PQM.

Το πρότυπο του παραπάνω συστήματος μπορεί να παρακολουθεί συνεχώς ένα σήμα εισόδου με ονομαστική τιμή 2V p-p και ανάλυση 0,1V.Το σύστημα υπολογίζει έως και την 31^η αρμονική καθώς και άλλες σημαντικές παραμέτρους ισχύος. Το σφάλμα μέτρησης είναι μικρότερο από το αποδεκτό σφάλμα που είναι 5%. Υπολογίστηκαν θεωρητικά και στη συνέχεια μετρήθηκαν οι παράμετροι ισχύος ενός σήματος εισόδου. Συγκεκριμένα μετρήθηκε ένα σήμα τετραγωνικού παλμού 1V peak. Τα αποτελέσματα της υλοποίησης έδειξαν σφάλμα μικρότερο του 2% σε όλες τις περιπτώσεις μέτρησης των παραμέτρων ισχύος.

Σε μια άλλη εργασία [8] του 2004 παρουσιάζεται μια μέθοδος που βασίζεται σε κλιμάκωση περιόδου, επεξεργασία και ανάλυση, όχι μόνο των βασικών παραμέτρων αλλά επίσης θέματα μακράς αλλά και μικρής χρονικής διάρκειας, έτσι ώστε να υπάρχει πραγματικού χρόνου παρακολούθηση και ποσοτική επεξεργασία. Η συγχρονισμένη δειγματοληψία δεδομένων και ο δείκτης σφάλματος χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν μια μη συγχρονισμένη σειριακή δειγματοληψία ,με μια προχωρημένη επαναληπτική φόρμουλα. Η βασική ιδέα είναι ότι τα μη συγχρονισμένα δεδομένα προσεγγίζουν τα συγχρονισμένα με τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων. Η μέθοδος αυτή, από τη σκοπιά του φάσματος ενός περιοδικού σήματος, μειώνει και απαλείφει τη διαρροή φάσματος (spectrum leaking). Επιπρόσθετα η μέθοδος μειώνει τον αριθμό των σημείων δειγματοληψίας σε μια περίοδο και τα δεδομένα δειγματοληψίας για ένα ορισμένο διάστημα δειγματοληψίας.

Order of Harmonic	Practical Values of Harmonic	Practical values of harmonic with leakage	Practical values of harmonic after iteration	Absolute error of iteration
0	6	5.9975	5.998	-0.0002
1	3- <i>i</i>	2.9458-0.9898 i	3.0007-1.0001 <i>i</i>	0.0007-0.0001 i
2	2- <i>i</i>	2.0368-0.9835 i	1.9991-1.0003 <i>i</i>	-0.0009-0.0003 i
3	1- <i>i</i>	0.9759-1.0121 <i>i</i>	1.0005-0.9989 <i>i</i>	0.0005+0.0011 <i>i</i>
4	0	0.0932-0.0247 i	-0.0018-0.0008 i	-0.0018-0.0008 i
5	0	-0.1478+0.0105 i	0.0107+0.0002 <i>i</i>	0.0107+0.0002 <i>i</i>
6	3	2.9590-0.0055 i	2.9812-0.0001 i	-0.0188-0.0001 i
7	0	0.2303+0.0024 <i>i</i>	0.0137+0.0000 <i>i</i>	0.0137+0.0000 <i>i</i>

Πίνακας 3. Αποτελέσματα μεθόδου μεταβλητής περιόδου

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 3) παρατηρείται ότι ο επαναληπτικός αλγόριθμος που εισάγεται σε αυτή την εργασία είναι ακριβής και εφικτός στην υλοποίηση. Αν είναι γνωστή η περίοδος του σήματος εισόδου χρησιμοποιώντας τη προτεινόμενη μέθοδο είναι δυνατή η εκμηδένιση της διαρροής του φάσματος. Αν και είναι δύσκολος ο προσδιορισμός με τη συγκεκριμένη μέθοδο του ΔΤ (χρονικό διάστημα για μη σύγχρονο σήμα), χρησιμοποιείται κυρίως για τη μείωση της διαρροής φάσματος.

Το 2005 παρουσιάστηκε μια εργασία [9] στην οποία υλοποιείται ένα σύστημα το οποίο παρακολουθεί γραμμές ισχύος τάσης και ρεύματος. Τεχνικές ανάλυσης όπως διάγραμμα περιόδου και διάγραμμα φάσματος υποστηρίζονται με σκοπό τον εντοπισμό μεταβολών τάσης και ρεύματος. Η καρδιά του συστήματος είναι ο DSP TMS320CV5416 της Texas Instrument. Για την διεπαφή χρησιμοποιείται ένας

προσωπικός υπολογιστής όπου με την αρωγή της Visual Basic παρουσιάζονται στην οθόνη τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το γενικό διάγραμμα της υλοποίησης παρουσιάζεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19. Γενικό διάγραμμα του συστήματος.

Η υλοποίηση μπορεί να μετρήσει τάση, ρεύμα, συχνότητα, συντελεστή ισχύος καθώς και να κατασκευάσει το φασματόγραμμα όπως και το φάσμα ισχύος. Επίσης το συγκεκριμένο σύστημα βοηθά στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων δικτύου και δρα ανάλογα με σκοπό την επιδιόρθωση και την προστασία. Τα αποτελέσματα επεξεργασίας του συστήματος αυτού δείχνουν ότι το φασματόγραμμα είναι χρησιμότερο εργαλείο από το φάσμα ισχύος στην εργασία χαρακτηρισμού των προβλημάτων της ποιότητας ισχύος.

Σε μια επίσης ενδιαφέρουσα προσέγγιση του προβλήματος [10] της μέτρησης και παρακολούθησης ισχύος παρουσιάστηκε μια θεωρητική προσέγγιση ενός ασύρματου PQM συστήματος βασισμένου σε αισθητήρια τάσης και ρεύματος . Τα επόμενα 2 σχήματα (20,21) παρουσιάζουν το γενικό διάγραμμα αυτής της προσέγγισης καθώς και τα στάδια που ακολουθήθηκαν για να υλοποιηθεί. Αρχικά οι ηλεκτρικοί και μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν τη τάση και το ρεύμα του δικτύου και στη συνέχεια τα σήματα δέχονται την κατάλληλη επεξεργασία με την βοήθεια κυκλωμάτων πριν τη διαμόρφωση και τη μετάδοση. Το σήμα που λαμβάνεται επαναμεταδίδεται στον κεντρικό επεξεργαστή.



Σχήμα 20. Γενικό διάγραμμα συστήματος.





Τέλος αφού ο κεντρικός επεξεργαστής συλλέγει όλα τα απαραίτητα στοιχεία είναι σε θέση να δημιουργήσει τις αντίστοιχες κυματομορφές τάσης και ρεύματος. Το σύστημα αυτό είναι βελτιστοποιημένο ως προς το κόστος, την προσαρμοστικότητα και την φορητότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ασύρματων αισθητήρων βασισμένων σε MEMS οι οποίοι μειώνουν το μέγεθος, ελαττώνουν το κόστος και βελτιώνουν την κατανάλωση ισχύος. Ένα άλλο paper [11] παρουσιάζει μια μελέτη σχετική με την ποιότητα ισχύος, η οποία εκπονήθηκε στη Ριβιέρα. Η εργασία αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις κυματομορφών και κατόπιν στατιστικής ανάλυσης τους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της ποιότητας ισχύος του δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος είναι κάτω από 5% που είναι το όριο που έχει θέσει η ΙΕΕΕ 519-1992.

Σε μια άλλη προσπάθεια [12] του 2004 υλοποιείται ένα σύστημα ελέγχου ισχύος που μετρά παροδικές διαταραχές του ηλεκτρικού δικτύου. Το TransientMeter όπως ονομάστηκε στηρίζεται σε μια κοινή αρχιτεκτονική CORBA (σχήμα 22) προκειμένου να υλοποιήσει την διεπαφή επικοινωνίας, με wavelet μεθόδους για αυτόματη ταξινόμηση και χαρακτηρισμό των σημάτων και ένα έξυπνο κύκλωμα για την ανίχνευση διαταραχών.



Σχήμα 22. Αρχιτεκτονική Transientmeter.

Η αρχιτεκτονική της υλοποίησης αυτής αποτελείται από:

 Σταθμό παρακολούθησης. Ο σταθμός αυτός έχει ένα κύκλωμα για τον εντοπισμό γεγονότων transient στα ηλεκτρικά σήματα. Επίσης διαθέτει ένα λογισμικό που ονομάζεται TransientMeter Server το οποίο επεξεργάζεται τα ψηφιακά σήματα.

- Ένα λογισμικό ελέγχου που ονομάζεται TransientMeter το οποίο χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τις παραμέτρους μέτρησης, να αρχικοποιήσει τους κινητούς σταθμούς παρακολούθησης, να αρχίσει ή να σταματήσει τις μετρήσεις, να αποθηκεύσει τα δεδομένα σε βάσεις, να επεξεργαστεί τα σήματα εισόδου από αρχεία κειμένου, να διαχειριστεί τη βάση δεδομένων.
- Μια βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για τις μετρήσεις και τα γεγονότα διαταραχής.
- Ένα διαδυκτιακό λογισμικό που ονομάζεται TransientMeter Web που επιτρέπει μεταβλητές ερωτήσεις στη βάση, δείχνει τα αποτελέσματα και επιτρέπει τη φόρτωση δειγμάτων γεγονότων σε μορφή αρχείων κειμένου.

Το σύστημα έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για να ανιχνεύει, να ταξινομεί και να μετρά διαταραχές σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον.

Μια άλλη εργασία [13] εισάγει έναν νέο αλγόριθμο για να αποφασίσει τις βέλτιστες κατανομές των ποιοτικών οργάνων ελέγχου ισχύος και για να μειώσει το κόστος του διανεμημένου συστήματος ελέγχου λαμβάνοντας υπόψη τον πλεονασμό δεδομένων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως μια φόρμουλα που μπορεί να χειριστεί από τους γραμμικούς αλγορίθμους ακέραιων αριθμών. Οι κατάλληλοι περιορισμοί συνάγονται από τον ηλεκτρικό κύκλωμα ανεξάρτητα από τις παραμέτρους των φορτίων. Επιπλέον, το πρόβλημα υιοθετείται σε μια γενική μορφή έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί από οποιαδήποτε εργασία βελτιστοποίησης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος για να αξιολογηθεί εφαρμόζεται σε πέντε διαφορετικά συστήματα. Κατόπιν, τα αποτελέσματα συζητούνται από άποψη πλεονασμού δαπανών και δεδομένων. Ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε καθορίζει το βέλτιστο αριθμό και τις βέλτιστες θέσεις των οργάνων ελέγχου ποιότητας ισχύος, ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος ΡQM, και παρατηρεί τις τάσεις και τα ρεύματα σε όλο το δίκτυο.

Ο αλγόριθμος εξαρτάται από την εγκατάσταση ενός αριθμού PQ InfoNodes (PQINs) για να μετρήσει έναν προκαθορισμένο αριθμό ρευμάτων και τάσεων, έτσι ώστε τα υπόλοιπα ρεύματα και οι τάσεις να μπορούν να υπολογιστούν. Το PQIN, που απεικονίζεται στο σχήμα 23, αποτελείται από πομποδέκτες, κάρτα DAQ, υπολογιστές ή επεξεργαστές σήματος με δυνατότητα να στείλουν δεδομένα στον

κεντρικό υπολογιστή. Το λογισμικό του PQIN αποτελείται από δυναμική εκτίμηση κατάστασης, ανίχνευση γεγονότων PQ, ταξινόμηση, και γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη (GUI).



Σχήμα 23. Αρχιτεκτονική PQIN.

Η εισαγωγή αυτής της τεχνικής επιδιώκει να λύσει το υψηλό πρόβλημα δαπανών που συνδέεται με τον έλεγχο ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ένα απλό σύστημα με 6 buses και έχει καταφέρει να μειώσει τον αριθμό των PQIN κατά 66%. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση της έννοιας των γνωστών buses οδηγεί σε μια περαιτέρω μείωση των εγκατεστημένων οργάνων ελέγχου και αυξάνει την αποταμίευση πόρων σε 83%. Επιπλέον, ένας παράγοντας πλεονασμού δεδομένων χρησιμοποιείται στην επιλογή μεταξύ των προτεινόμενων λύσεων. Τέλος, το ποσό αποταμίευσης

Μια άλλη εργασία [14] που δημοσιεύτηκε το 2000 είχε ως σκοπό τον έλεγχο ποιότητας ισχύος έχοντας περιορισμένους πόρους αισθητηρίων και υπολογιστικών πηγών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δειγματοληψίας χρησιμοποιεί την περιοδική φύση των κυματομορφών που εξετάζονται. Τα αραιά δείγματα που λαμβάνονται στην υλοποίηση αυτή επαναπροσδιορίζονται (shuffled) προτού να

χρησιμοποιηθεί FFT για τους υπολογισμούς του φάσματος. Παρέχεται ένας πλήρης χαρακτηρισμός της διαδικασίας shuffling στο πεδίο του χρόνου καθώς και η αντίστροφη διαδικασία στο πεδίο της συχνότητας.

Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε διάφορες περιπτώσεις ενδιαφέροντος για τον έλεγχο της ποιότητα ισχύος και καταδεικνύει ότι οι αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας μπορούν να ανακτηθούν χωρίς λάθος. Αν το σύστημα που περιγράφεται από το σχήμα 24 είναι γραμμικό τότε μπορεί να αναλυθεί η επίδραση κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Για παράδειγμα το στοιχείο που είναι υπεύθυνο για το λευκό θόρυβο σε αναλογικό σήμα εισόδου μετατρέπει ένα ανεξάρτητο όμοια διανεμημένο τμήμα ακολουθίας σε ένα σήμα x(n) και στην με υποδειγματοληψία έκδοση του y (m). Η Fc είναι ή συχνότητα αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου και το Ν δείχνει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του αναλογικού τμήματος λευκού θορύβου. Δεδομένου ότι το FFT είναι ένας ορθογώνιος μετασχηματισμός, το τελικό αποτέλεσμα είναι μια τυχαία συμβολή σε κάθε αρμονική x_k. Η ισχύς αυτή της συμβολής είναι η ίδια για όλες τις αρμονικές ενώ η χρονική μετατόπιση αφήνει τη συχνότητα του λευκού θορύβου αμετάβλητη. Η εφαρμογή του αλγορίθμου του σχήματος 24 σε σήματα όπως χρωματιστός (coloured) θόρυβος ή ενδοαρμονικός (Interharmonic) θόρυβος έχει αποτελέσματα να αλλάξει το περιεχόμενο συχνότητάς τους.



Σχήμα 24.Γενικό διάγραμμα του αλγορίθμου υποδειγματοληψίας.

Κατά συνέπεια η διαδικασία δειγματοληψίας του συγκεκριμένου αλγορίθμου επιτρέπει στους σχεδιαστές να εξαγάγουν περισσότερες ποιοτικές πληροφορίες ισχύος με περιορισμένους πόρους επεξεργασίας σήματος.

Ένα άλλο paper [15] προτείνει έναν μετασχηματισμό wavelet βασισμένο σε μια νέα προσέγγιση ανίχνευσης διαταραχής ισχύος και μέτρησης ποιότητας ισχύος. Αυτή η προσέγγιση υιοθετεί μια σειρά σύνθετων συναρτήσεων ως ζωνοπερατά φίλτρα FIR για να ανιχνεύσει το περιστατικό της διαταραχής και να υπολογίσει ακριβώς τις μέσες τιμές πλάτους και συχνότητας στις αντίστοιχες ζώνες συχνότητάς τους, καθώς ο χρόνος μεταβάλλεται. Η αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης προσέγγισης έχει προσομοιωθεί σε περιβάλλον MATLAB κάτω από ποικίλες διαταραχές όπως στιγμιαία διακοπή, πτώση τάσης, αρμονικές, απόκλιση συχνότητας. Έτσι σε σχέση με τη διόγκωση αυτή με χρήση Simulink παρουσιάζεται το υπολογισμένο πλάτος και η υπολογισμένη συχνότητα τη χρονική



Σχήμα 25. α) Διόγκωση τάσης, β) Πλάτος που υπολογίζεται γ) Συχνότητα που υπολογίζεται.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποτελεσματικότητα και σημαντικά πλεονεκτήματα στην προτεινόμενης προσέγγιση.

Το 2006 δημοσιεύθηκε μια μέθοδος [16] βασισμένη σε γραμμικούς λογικής fuzzy υπολογισμούς για μετρήσεις μεταβολής τάσης. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί ψηφιακά δείγματα τάσης. Το σήμα τάσης μοντελοποιείται σαν γραμμική παράμετρος fuzzy υπολογισμού προβλήματος όπου οι συντελεστές υποτίθεται ότι είναι fuzzy. Η μέθοδος είναι βασισμένη στον γραμμικό προγραμματισμό και χρησιμοποιείται για να λύσει το προκύπτον γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε και οι παράμετροι υπολογίστηκαν επιτυχώς από αυτόν όταν τα δείγματα εισαγωγής είναι δείγματα non-fuzzy αλλά και όταν είναι δείγματα fuzzy. Σε αυτήν την ανάλυση, υποτέθηκε ότι η μεταβολή τάσης (flickering) περιέχει μόνο ένα σήμα τάσης χαμηλής συχνότητας και μικρού πλάτους σε σύγκριση με το σύστημα της κύριας ισχύος.Η μέθοδος ισχύει επίσης για την εκτίμηση του πλάτους και της συχνότητας των διαταραχών flicker της τάσης.

Μια εργασία [17] που δημοσιεύθηκε το 2006 προτείνει 3 κριτήρια για την μέτρηση ανάπτυξη ενός συστήματος κατάλληλου για ισχύος. Επίσης αναπτύσσεται ένα σύνθετο φίλτρο και ο σχετικός αλγόριθμος ο οποίος επιτυγχάνει ακρίβεια στην μέτρηση κάτω από όλες τις συνθήκες και μικρή πολυπλοκότητα. Τα 3 κριτήρια που εξετάζονται είναι η ακρίβεια μετρήσεων, η δυναμική απόδοση και ικανότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Με βάση αυτά τα κριτήρια εξετάζεται η απόδοση τεχνικών μέτρησης. Έχει διαπιστωθεί ότι η απόδοση και η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι έννοιες αντιφατικές στις περισσότερες περιπτώσεις. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται 0 επαναλαμβανόμενος αλγόριθμος αυτής της εργασίας. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να επιτύχει και την υψηλή ακρίβεια μέτρησης αλλά και τη χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, η οποία είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα δειγματοληψίας.

Τέλος ένα paper [18] που δημοσιεύτηκε το 2003 παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός χαμηλού κόστους ψηφιακού συστήματος χρήσιμου για τον ποιοτικό έλεγχο ισχύος και τη διαχείριση ισχύος. Οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος γίνονται μέσω των αισθητήρων Hall και συνδέονται μέσω μιας κάρτας απόκτησης δεδομένων (DAQ) σε έναν προσωπικό υπολογιστή. Το σύστημα αποκτά συνεχώς δεδομένα και
αποθηκεύει σε αρχεία γεγονότα που προκύπτουν από ανωμαλίες που ανιχνεύονται στο σύστημα ισχύος που παρακολουθείται. Διάφορες παράμετροι σχετικές με την ποιότητα ισχύος και τη διαχείριση ισχύος μπορούν να αναλυθούν μέσω 6 διαφορετικών εφαρμογών, που ονομάζονται: «Scope and THD», "Strip Chart", "Wave Shape", "Sags and Swells", "Classical Values" and "p-q Theory". Οι πληροφορίες που προκύπτουν μπορούν να απεικονιστούν στους πίνακες ή και σε διαγράμματα. Είναι επίσης δυνατό να παραχθούν αναφορές σε αρχεία τύπου HTML. Αυτές οι αναφορές μπορούν να σταλούν άμεσα σε έναν εκτυπωτή, να ενσωματωθούν σε άλλες εφαρμογές λογισμικού, ή να προσεγγιστούν μέσω του διαδικτύου χρησιμοποιώντας μια μηχανή αναζήτησης. Η δυνατότητα του συστήματος που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται σε σχέση με τα πλεονεκτήματα της ευελιξίας, του κόστους και της απόδοσης, στο πεδίο του ποιοτικού ελέγχου ισχύος και της διαχείρισης ισχύος. Το σχήμα 26 παρουσιάζει το γενικό διάγραμμα του συστήματος.



Σχήμα 26. Γενικό διάγραμμα συστήματος.

Το σύστημα ελέγχου που αναπτύχθηκε είναι εύκαμπτο, παρουσιάζει φιλική προς το χρήστη διεπαφή και μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης στοιχείων, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί το σκληρό δίσκο PC για αυτόν τον σκοπό. Παράγει αναφορές σε μορφή HTML που μπορούν να προσεγγιστούν μέσω διαδικτύου και μπορεί επίσης να παράγει και στοιχεία για άλλες εφαρμογές που τρέχουν σε περιβάλλον Windows. Μια από τις πιο αξιόλογες εφαρμογές υπολογίζει τις θεωρητικές τιμές pq για ένα τριφασικό σύστημα ισχύος. Αυτός ο τύπος ανάλυσης συμπεριλήφθηκε επειδή μπορεί να βοηθήσει σε προβλήματα σχετικά με την ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος. Αυτή η εφαρμογή μπορεί επίσης να υπολογίσει τις νέες τιμές των στιγμιαίων ρευμάτων και της ισχύς που παράγεται από την πηγή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ενεργού φίλτρου ισχύος που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις αρμονικές του συστήματος ισχύος. Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει 3 ειδών λειτουργίες του συστήματος:

- On line λειτουργία για πραγματικού χρόνου αναλύσεις.
- Λειτουργία με βάση προηγούμενων καταγεγραμμένων γεγονότων διαταραχής.
- Λειτουργία προσομοίωσης γεγονότων με τη βοήθεια Matlab/Simulink.

Μελέτη παραμέτρων ισχύος και μέτρησης ισχύος

3.1 Παράμετροι μέτρησης ισχύος

3.1.1 Είδη κυματομορφών

Οι κυματομορφές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με το αν η έντασή τους παραμένει σταθερή κατά μέτρο και φορά ή αν εναλλάσσεται. Αν η τιμή μιας κυματομορφής παραμένει σταθερή κατά μέτρο και φορά τότε μιλάμε για συνεχή κυματομορφή ενώ αν η τιμή αυτή εναλλάσσεται τότε μιλάμε για εναλλασσόμενη κυματομορφή.

Τα κυκλώματα τα οποία τα διαρρέει ρεύμα σταθερής έντασης και οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δυο σημείων του κυκλώματος δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο ονομάζονται κυκλώματα συνεχούς ρεύματος ή DC (Direct Current Circuits) και αντίστοιχα διαρρέονται από ρεύμα και τάση DC. Τα κυκλώματα τα οποία τα διαπερνούν ρεύματα που μεταβάλλονται με τον χρόνο με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο και οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δυο σημείων του κυκλώματος αλλάζουν χρονικά, ονομάζονται κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος ή AC κυκλώματα (Alternating Current Circuits) και διαρρέονται από ρεύμα και τάση AC.

3.1.2 Παράμετροι μέτρησης κυματομορφών

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων που μπορούν να παρθούν για την μέτρηση μιας κυματομορφής ρεύματος ή μιας κυματομορφής τάσης. Οι πιο συνηθισμένες από αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

3.1.2.1. Περίοδος και συχνότητα κυματομορφής

Περιοδικές ονομάζονται οι κυματομορφές οι οποίες επαναλαμβάνονται ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Τ. Το χρονικό διάστημα αυτό είναι η περίοδος της

κυματομορφής. Η συχνότητα (συμβολίζεται f και μετράται σε Hz) μιας κυματομορφής περιόδου T είναι (σχέση 1):

$$f = \frac{1}{T} \tag{1}$$

3.1.2.2. Στιγμιαία τιμή τάσης, ρεύματος, ισχύος

Σε γενικές γραμμές, σε ένα υλικό περνάει ηλεκτρικό ρεύμα όταν ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται από ένα σημείο του υλικού σε ένα άλλο. Το ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής του ηλεκτρικού φορτίου με τον χρόνο και συμβολίζεται και μετράται σε (Ampere). Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι, δηλαδή, το αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρικών φορτίων σε κάποιο υλικό. Η αιτία, τώρα, της κίνησης των φορτίων μέσα στο υλικό είναι η διαφορά δυναμικού. Τα ηλεκτρικά φορτία κινούνται μεταξύ δυο σημείων ενός υλικού όπου υπάρχει διαφορά δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού (τάση) συμβολίζεται με V και μετράται σε Volt. Όταν περνά ρεύμα μέσα από έναν αγωγό τα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα σταθερά άτομα του πλέγματος που αποτελεί τον αγωγό και χάνουν ενέργεια. Ουσιαστικά, μετατρέπουν ένα μέρος της ενέργειάς τους σε θερμότητα. Έτσι, όταν περνά ρεύμα από μια αντίσταση, αυξάνεται η θερμοκρασία της. Ένα μέτρο της ενέργειας που Watt (W).

Η τιμή της κυματομορφής της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα ενός φορτίου για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ονομάζεται στιγμιαία τιμή τάσης και συμβολίζεται ως V_{στ}. Η τιμή της κυματομορφής του ρεύματος που διαρρέει ένα φορτίο για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ονομάζεται στιγμιαία τιμή έντασης ρεύματος και συμβολίζεται ως Ι_{στ}. Το γινόμενο της στιγμιαίας τιμής της τάσης και της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος μας δίνει την στιγμιαία τιμή της ισχύος ενός φορτίου που διαρρέετε από το συγκεκριμένο ρεύμα και στα άκρα του εφαρμόζεται η συγκεκριμένη τάση (σχέση 2).

$$P_{\sigma\tau} = I_{\sigma\tau} * V_{\sigma\tau}$$
 (2)

3.1.2.3. Πραγματική μέση τιμή τάσης, ρεύματος, ισχύος

Μια οποιαδήποτε κυματομορφή (συγκεκριμένα σε αυτή την εργασία, τάσης, ρεύματος, ισχύος) μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους.

Η έννοια της peak τιμής μιας κυματομορφής φανερώνει τη μέγιστη τιμή της κυματομορφής αυτής (είτε αυτή είναι θετική είτε αρνητική) ως προς το σημείο αναφοράς της. Η έννοια της peak-peak τιμής μιας κυματομορφής φανερώνει την τιμή της απόστασης μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της κυματομορφής αυτής. Ο συνηθέστερος τρόπος προσδιορισμού μιας περιοδικής ΑC κυματομορφής είναι ο προσδιορισμός της μέσης τετραγωνικής ρίζας (rms) της. Επειδή η τάση και το ρεύμα στις εναλλασσόμενες κυματομορφές αλλάζει συνεχώς και είναι στα υψηλότερα και χαμηλότερα σημεία στον κύκλο για μόνο ένα μικροσκοπικό μέρος του κύκλου, η μέγιστη (peak) τιμή τάσης/ ρεύματος δεν είναι τηγή εναλλασσόμενου ρεύματος ή τάσης. Η τάση ή το ρεύμα rms θα δώσει την δυνατότητα να υπολογιστεί το ακριβές έργο που μπορεί να παραχθεί από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος ή τάσης. Η τιμή rms ενός καθαρού κύματος ημιτόνου είναι περίπου τάση το 0.707 της peak τιμής του (σχέση 3).

$$rms_{\rm sin} = \frac{peak}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

Τα βολτόμετρα/ αμπερόμετρα της αγοράς κυρίως μετρούν τις rms τιμές της τάσης και του ρεύματος αντίστοιχα. Το επόμενο σχήμα 27 δείχνει σε κυματομορφή τάσης τις έννοιες που αναλύθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 27. Παράδειγμα κυματομορφής τάσης.

Εάν η κυματομορφή δεν είναι ένα καθαρό ημίτόνο (όπως για παράδειγμα μια τετραγωνική κυματομορφή ή ένα παραμορφωμένο ημίτονο), η σχέση 3 δεν θα δώσει την πραγματική rms τιμή της κυματομορφής αυτής και επομένως δεν θα δώσει μια ακριβή ένδειξη του έργου που μπορεί να παράγει. Για πιο σύνθετα σήματα, χρησιμοποιείται μια μέτρηση που υπολογίζει την τιμή rms από ένα σύνολο δειγμάτων που λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μια τέτοια μέτρηση ονομάζεται πραγματική ενεργός (true rms).Στην συγκεκριμένη υλοποίηση που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας μετρούνται οι πραγματικές μέσες τιμές των κυματομορφών για καλύτερα αποτελέσματα. Ο υπολογισμός της πραγματικής rms τιμής για μια οποιαδήποτε κυματομορφή ρεύματος δίνεται στη σχέση 4.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} I_{\sigma \tau}^{2} dt}$$
(4)

όπου:

- I_{rms} η πραγματική rms τιμή ρεύματος.
- $I_{\sigma\tau}$ η στιγμιαία τιμή ρεύματος.
- Τ η περίοδος της κυματομορφής.

Ο αντίστοιχος υπολογισμός της πραγματικής rms τιμής για μια οποιαδήποτε κυματομορφή τάσης δίνεται στη σχέση 5.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} V_{\sigma\tau}^{2} dt}$$
(5)

όπου:

- V_{rms} η πραγματική rms τιμή της τάσης.
- V_{στ} η στιγμιαία τιμή τάσης.
- Τ η περίοδος της κυματομορφής.

Ο υπολογισμός της πραγματικής μέσης ισχύος που προκύπτει από 2 κυματομορφές τάσης και ρεύματος δίνεται στη σχέση 6.

$$P_{rms} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} P_{\sigma\tau}^{2} dt$$
(6)

όπου:

- Ρ_{μέση} η πραγματική μέση τιμή της ισχύος.
- P_{στ} η στιγμιαία τιμή ισχύος.
- Τ η περίοδος της κυματομορφής.

OI παραπάνω σχέσεις όταν έχουμε διακριτή κυματομορφή άρα και δείγματα διακριτού χρόνου μετατρέπονται στις παρακάτω 3 σχέσεις (7,8 και 9).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} {I_{\sigma \tau_i}}^2}$$
(7)

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} V_{\sigma \tau_i}^2}$$
(8)

$$P_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} P_{\sigma \tau_i}^{2}$$
(9)

όπου:

Ν είναι ο αριθμός δειγμάτων που λαμβάνονται σε μία περίοδο.

3.1.2.4. Ενέργεια

Μια από τις βασικές μετρήσεις ενός ισχυομέτρου είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε ένα φορτίο. Συγκεκριμένα η ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα φορτίο το οποίο διαρρέεται από ρεύμα Ι και στα άκρα του εφαρμόζεται τάση V για ένα χρονικό διάστημα t είναι (σχέση 10):

$$W = V * I * t \tag{10}$$

όπου

- W η ενέργεια που καταναλώνεται στο φορτίο σε Joule.
- V η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του φορτίου για χρονικό διάστημα t.
- Ι η μέση τιμή της έντασηs του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο για χρονικό διάστημα t.
- t το χρονικό διάστημα για το οποίο μετράται η ενέργεια.

3.1.2.5. Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD)

Η ολική αρμονική παραμόρφωση ή THD, μιας κυματομορφής είναι μια μέτρηση της παραμόρφωσης που παρουσιάζει μια κυματομορφή λόγω της παρουσίας αρμονικών. Ορίζεται ως το άθροισμα της ισχύος όλων των αρμονικών μιας

κυματομορφής ως προς την ισχύ της θεμελιώδους αρμονικής. Όσο μικρότερο είναι το THD μιας κυματομορφής τόσο πιο αναλλοίωτο είναι το σήμα μας, δηλαδή τόσο πιο μικρή παραμόρφωση έχει.

Μια αρμονική είναι ένα σήμα ή μια κυματομορφή του οποίου η συχνότητα είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας κάποιου σήματος ή κυματομορφής αναφοράς. Αν το f αντιπροσωπεύει τη θεμελιώδη συχνότητα ενός σήματος AC τότε σε αυτή τη συχνότητα περιλαμβάνεται το μεγαλύτερη μέρος της ενέργειας της κυματομορφής, δηλαδή αυτή είναι η συχνότητα η οποία καθορίζεται για να εμφανιστεί η κυματομορφή.

Για ένα σήμα του οποίου η θεμελιώδης συχνότητα είναι f, η δεύτερη αρμονική έχει συχνότητα 2f, η τρίτη αρμονική έχει μια συχνότητα 3f και τα λοιπά. Αν το w αντιπροσωπεύει το μήκος κύματος του σήματος ή της κυματομορφής, η δεύτερη αρμονική έχει μήκος κύματος w /2, η τρίτη αρμονική έχει μήκος κύματος w/3 και τα λοιπά. Σήματα που εμφανίζονται στις συχνότητες 2 f, 4 f, 6f, κ.λπ, ονομάζονται ζυγές αρμονικές, ενώ τα σήματα που εμφανίζονται στις συχνότητα στις συχνότητες 3f, 5 f, 7f, κ.λπ. ονομάζονται μονές αρμονικές. Ένα σήμα μπορεί, θεωρητικά, να έχει άπειρες αρμονικές.

Σχεδόν όλα τα σήματα περιέχουν την ενέργεια τους στις αρμονικές συχνότητες, εκτός από την ενέργεια στη θεμελιώδη συχνότητα. Εάν όλη η ενέργεια σε ένα σήμα περιλαμβάνεται στη θεμελιώδη συχνότητα, κατόπιν εκείνο το σήμα είναι μια τέλεια κυματομορφή ημιτόνου. Εάν το σήμα δεν είναι τέλειο ημίτονο, έχει σαν αποτέλεσμα κάποια ενέργεια του να περιλαμβάνεται στις αρμονικές του. Μερικές κυματομορφές περιέχουν μεγάλα ποσά ενέργειας τους στις αρμονικές συχνότητες τους. Παραδείγματα τέτοιων κυματομορφών είναι οι τετραγωνικές και τριγωνικές κυματομορφές. Το διάγραμμα της ενέργειας του σήματος ως προς τη συχνότητα ονομάζεται φάσμα του σήματος. Στο σχήμα 28 που ακολουθεί διακρίνεται το φάσμα μιας κυματομορφής τέλειου ημιτόνου αλλά και μιας τετραγωνικής κυματομορφής.



Σχήμα 28. Α)Ημιτονοειδής κυματομορφή και φασματική ανάλυση της, Β)Τετραγωνική κυματομορφή και φασματική ανάλυση της.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό ο υπολογισμός των αρμονικών ενός σήματος εισόδου προϋποθέτει μετασχηματισμό του σήματος αυτού στο πεδίο του χρόνου. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των αρμονικών. Ο πιο συνηθισμένος από αυτούς είναι ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT). Το πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι η μικρή πολυπλοκότητά του και ο μικρός χρόνος υπολογισμού των αποτελεσμάτων. Για διακριτά σήματα χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT).

Έστω μια συνάρτηση x(t), τότε από το θεώρημα Fourier μπορούμε να αναλύσουμε τη συνάρτηση στο χώρο των συχνοτήτων f σύμφωνα με τη σχέση 11:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i2\pi ft}dt$$
(11)

Ο DFT πραγματοποιείται σε διακριτά σήματα. Έτσι με δειγματοληψία N σημάτων της κυματομορφής x(t) δημιουργείται μια ακολουθία x(n) με n=0,1,..N-1,N της οποίας ο μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας δίνεται από τη σχέση 12.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) * e^{-jnk2\pi/N}$$
(12)

Όπου

- X(k) η αρμονική κ με κ=0,1,....,N-1,N.
- x(n) το n δείγμα της κυματομορφής εισόδου.
- Ν ο συνολικός αριθμός των δειγματοληπτομένων σημάτων.
- π ο αριθμός 3,14.

Στη παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των αρμονικών χρησιμοποιείται η παραπάνω σχέση 12.

Αφού υπολογιστούν σωστά οι αρμονικές στη συνέχεια με βάση τη σχέση 13 υπολογίζεται η ολική αρμονική παραμόρφωση μιας κυματομορφής

$$THD = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_{n-1}^2 + h_n^2}}{h_1}$$
(13)

Όπου

- ΤΗD η ολική αρμονική παραμόρφωση.
- h_n η n αρμονική με n=0,1,...,N-1,N.

3.1.2.6. Μιγαδική, άεργος ισχύς και συντελεστής ισχύος

Η μιγαδική ισχύς (complex power) ορίζεται ως εξής [19]:

$$S = VI^* \tag{14}$$

όπου

V καιΙ οι παραστατικοί μιγάδες της τάσης και του ρεύματος.

Η μιγαδική ισχύς είναι μια ποσότητα που δεν αντιστοιχεί σε πραγματικό μέγεθος, αλλά ο ορισμός της διευκολύνει πολύ την ανάλυση ισχύος στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση (HMK). Το μέτρο της μετράται σε VA (Volt-Ampere). Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραστατικών μιγάδων της τάσης και του ρεύματος προκύπτει η σχέση 15:

$$S = \frac{1}{2} V_m I_m e^{j(\varphi_v - \varphi_i)} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\varphi_v - \varphi_i) + j \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\varphi_v - \varphi_i)$$
(15)

όπου

- Ι_m και V_m τα πλάτη της κυματομορφής ρεύματος και τάσης αντίστοιχα.
- φ₁ και φ_v οι γωνίες φάσεις της κυματομορφής ρεύματος και τάσης αντίστοιχα.

Ο 1ος όρος είναι η πραγματική ισχύς (Ραν), για την οποία ισχύει η σχέση 16:

$$P_{\alpha\nu} = \operatorname{Re}[S] = \operatorname{Re}[\frac{1}{2}VI^*] = \operatorname{Re}[\frac{1}{2}VV^*Y_L^*] = \operatorname{Re}[\frac{1}{2}V_m^2Y_L^*] = \frac{1}{2}V_m^2\operatorname{Re}[Y_L]$$
(16)

όπου *RE*[*Y*_L] είναι το ωμικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας του φορτίου. Με αντίστοιχη προσέγγιση, ισχύει η σχέση 17:

$$P_{\alpha\nu} = \frac{1}{2} I_m^2 \operatorname{Re}[Z_L]$$
(17)

Ο 2ος όρος της μιγαδικής ισχύος οονομάζεται άεργη (reactive) ισχύς (σχέση 18) και μετράται σε var (volt-ampere-reactive)

$$Q = \frac{1}{2} V_{m} I_{m} \sin(\varphi_{v} - \varphi_{i}) = \frac{1}{2} V_{m} I_{m} \sin(\varphi_{z})$$
(18)

όπου

• φ_Z η διαφορά φάσης μεταξύ κυματομορφής ρεύματος και τάσης.

Ένα επαγωγικό φορτίο έχει θετική τιμή του φ_Z όπου το ρεύμα καθυστερεί ως προς την τάση. Έτσι ένα επαγωγικό φορτίο απορροφά θετικά var που ονομάζονται καθυστερημένα var. Αντίστροφα ένα χωρητικό φορτίο απορροφά αρνητικά var που ονομάζονται προηγούμενα var.

Η μιγαδική ισχύς μπορεί να γραφεί και ως εξής (σχέση 19):

$$S = P_{\alpha\nu} + jQ \tag{19}$$

Πρέπει να γίνει κατανοητή η φυσική σημασία των P, S, Q. Το κόστος του μεγαλύτερου μέρους των ηλεκτρικών διατάξεων, όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές και γραμμές μεταφοράς, αυξάνει με το S=VI, εφόσον το επίπεδο της ηλεκτρικής μόνωσης τους και το μέγεθος του μαγνητικού τους πυρήνα εξαρτάται από την τάση V, ενώ το μέγεθος των αγωγών τους εξαρτάται από το ρεύμα Ι. Η ισχύς P έχει μια φυσική σημασία εφόσον παριστά τον ρυθμό του χρήσιμου έργου που αποδίδεται συν τις απώλειες ισχύος. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι επιθυμητό η άεργος ισχύς Q να είναι 0.

Με βάση τα παραπάνω ορίζεται [20] μια άλλη φυσική ποσότητα που ονομάζεται συντελεστής ισχύος (power factor PF). Ο συντελεστής ισχύος είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικής απορρόφησης της ενεργού ισχύος από το φορτίο και είναι αδιάστατος (σχέση 20).

$$\Sigma \upsilon v \tau \varepsilon \lambda \varepsilon \sigma \tau \dot{\eta} \varsigma \ \iota \sigma \chi \dot{\upsilon} o \varsigma = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \cos \varphi$$
⁽²⁰⁾

όπου φ η διαφορά φάσης μεταξύ της κυματομορφής ρεύματος και της κυματομορφής της τάσης. Στην ιδανική περίπτωση ο συντελεστής ισχύος θα έπρεπε να είναι 1 (δηλαδή η άεργος ισχύς Q να είναι 0), ώστε να απορροφάται η ισχύς με ένα ελάχιστο πλάτος ρεύματος και έτσι να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες στους αγωγούς μεταφοράς και πιθανώς και στο φορτίο.

3.2 Ποιότητα ισχύος

Τα σημαντικότερα φαινόμενα τα οποία καλύπτει ο όρος ποιότητας ισχύος είναι:

- Αρμονικές
- Αποκλίσεις συχνότητας
- Μεταβατικά φαινόμενα

- Θόρυβος
- Πτώσεις τάσης
- Διακοπές
- Ανυψώσεις τάσεις
- Flicker

3.2.1 Αρμονικές

Οι αρμονικές παραμορφώσεις (σχήμα 29) προκύπτουν όταν αρμονικές συχνότητες προστίθενται στη βασική συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος (για την Ελλάδα 50 Hz). Οι διαταραχές αυτές μπορούν να προκληθούν από συσκευές όπως ανορθωτές ρεύματος, προσαρμοζόμενοι ελεγκτές ρεύματος, φωτιστικά φθορίου, φορτιστές μπαταριών, ηλεκτρονικούς υπολογιστές και γενικά από μη γραμμικά φορτία.



Σχήμα 29 . Κυματομορφή με αρμονική παραμόρφωση.

Σε έντονες αρμονικές παραμορφώσεις, μπορεί να παρουσιαστεί δυσλειτουργία σε υπολογιστές, σε κινητήρες, σε μετασχηματιστές, καθώς και υπερθερμάνσεις σε καλώδια . Οι αρμονικές παραμορφώσεις είναι ίσως η πιο περίπλοκη και λιγότερη κατανοητή διαταραχή.

3.2.2 Αποκλίσεις συχνότητας (frequency deviations)

Σε μεγάλα αλληλοσυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία προφανώς παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα ίδιας συχνότητας, η ονομαστική συχνότητα του δικτύου είναι αρκετά σταθερή και αποκλίσεις από αυτήν παρατηρούνται σπάνια.



Σχήμα 30. Κυματομορφή με απόκλιση συχνότητας.

Ωστόσο, σε μικρά αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, οι αποκλίσεις (σχήμα30) από την ονομαστική συχνότητα μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία σε ηλεκτρονικές συσκευές και να επηρεάσουν την ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων και των ηλεκτρομηχανικά κινούμενων ρολογιών.

Οι αποκλίσεις από την ονομαστική συχνότητα ενός δικτύου προέρχονται κυρίως από την απότομη ανάληψη (υποσυχνότητα) ή απόρριψη (υπερσυχνότητα) μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων.

3.2.3 Μεταβατικά φαινόμενα (transients)

Τα μεταβατικά φαινόμενα είναι ξαφνικές και σημαντικές αποκλίσεις από την πρότυπη κυματομορφή τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 31). Η διάρκειά τους κυμαίνεται περίπου από 200 μsec έως 0,5 sec. Οφείλονται κυρίως σε έντονα και απρόβλεπτα συμβάντα, όπως αστραπές, ηλεκτροστατικές αποφορτίσεις, έντονες μεταβολές φορτίων ή βλάβες στις καλωδιώσεις των δικτύων.



Σχήμα 31. Κυματομορφή με μεταβατικά φαινόμενα

Τα μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να μεταβάλλουν ή ακόμα και να διαγράψουν υπολογιστικά δεδομένα, οδηγώντας σε δύσκολα να εντοπισθούν υπολογιστικά σφάλματα. Σε ακραίες καταστάσεις, τα μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να καταστρέψουν ηλεκτρονικά κυκλώματα και να προκαλέσουν ζημιές σε ηλεκτρικές συσκευές.

3.2.4 Θόρυβος (noise)

Ο θόρυβος, ή πιο συγκεκριμένα ο ηλεκτρικός θόρυβος, είναι μία συνεχής και ταχεία εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων, τα οποία παραμορφώνουν την πρότυπη κυματομορφή τάσης αυξομειώνοντας τις τιμές της (σχήμα 32). Το μέγεθος αυτών των ταχέων μεταβατικών φαινομένων είναι συνήθως πολύ μικρότερο από αυτό των μεμονωμένων μεταβατικών φαινομένων.

Ο θόρυβος προέρχεται κυρίως από ηλεκτροκινητήρες και συσκευές ελέγχου κινητήρων, ηλεκτρικούς φούρνους, ηλεκτρικές συγκολλήσεις, ρελέ, απομονωμένους ατμοσφαιρικούς αποφορτιστές.



Σχήμα 32. Κυματομορφή με θόρυβο.

Παρόλο που ο θόρυβος θεωρείται λιγότερο επικίνδυνη διαταραχή από ένα μεγάλης έντασης μεταβατικό φαινόμενο, σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, σε εξοπλισμό τηλεπικοινωνιών και σε άλλες ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές.

3.2.5 Πτώσεις τάσης (voltage sags)

Η πτώση τάσης είναι μια μικρής διάρκειας μείωση στις τιμές της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 33). Πτώσεις τάσης χρονικής διάρκειας μεγαλύτερης από δύο λεπτά, συνήθως κατηγοριοποιούνται ως υποτάσεις (undervoltage). Συνήθεις αιτίες για πτώσεις τάσης και υποτάσεις είναι σφάλματα δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, εκκινήσεις κινητήρων και εισροές μεγάλων φορτίων στο σύστημα διανομής ενέργειας.



Σχήμα 33. Κυματομορφή με πτώση τάσης.

Οι πτώσεις τάσης μπορούν να προκαλέσουν τη δυσλειτουργία ή και τη διακοπή της λειτουργίας πολλών ευαίσθητων ηλεκτρονικών συσκευών. Οι συνθήκες υπότασης μπορούν να βλάψουν διάφορους τύπους ηλεκτρικών συσκευών.

3.2.6 Διακοπές (interruptions)

Οι διακοπές προκύπτουν όταν η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος μηδενίζεται (σχήμα 34). Οι διακοπές διακρίνονται σε στιγμιαίες, προσωρινές ή μεγάλης διάρκειας. Στιγμιαίες διακοπές θεωρούνται οι διακοπές στις οποίες η παροχή διακόπτεται και αποκαθιστάται αυτόματα σε διάστημα μικρότερο των 2 sec.



Σχήμα 34. Κυματομορφή που έχει υποστεί διακοπή.

Προσωρινές διακοπές θεωρούνται οι διακοπές κατά τις οποίες η παροχή του διακόπτεται για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 2 sec, ωστόσο αποκαθίσταται αυτόματα σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 2 min. Οι διακοπές μακράς διάρκειας διαρκούν περισσότερο από δύο min και μπορεί να απαιτείται η χειρωνακτική επέμβαση για την αποκατάσταση της παροχής του ρεύματος.

Σε μερικές περιπτώσεις οι στιγμιαίες διακοπές μπορεί να μη γίνονται αντιληπτές, ή τουλάχιστον, μπορεί να μην προκαλούν κανένα πρόβλημα. Ωστόσο, ακόμα και οι στιγμιαίες διακοπές μπορούν να διαρκέσουν χρονικά διαστήματα ικανά για τη διακοπή της λειτουργίας ηλεκτρονικών υπολογιστών και διαφόρων ευαίσθητων ηλεκτρικών συσκευών

3.2.7 Ανυψώσεις τάσης (voltage swells)

Η ανύψωση τάσης είναι μία μικρής διάρκειας αύξηση στις τιμές της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος (σχήμα 35). Οι ανυψώσεις τάσης που διαρκούν περισσότερο από 2 min θεωρούνται ως υπερτάσεις (overvoltage). Οι ανυψώσεις τάσης και οι υπερτάσεις συνήθως προκαλούνται από μεγάλες μειώσεις σε φορτία.



Σχήμα 35. Κυματομορφή που έχει υποστεί ανύψωση τάσης.

Όταν παρουσιάζονται πολύ υψηλές τιμές σε ανυψώσεις τάσης, μπορούν να προκληθούν σοβαρές ζημιές σε ηλεκτρικές συσκευές.

3.2.8 Flicker

To flicker μπορεί να οριστεί ως μικρές αλλαγές πλάτους τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος σε συχνότητες μικρότερες των 25 Hz. Το flicker προκαλείται από ταχέως μεταβαλλόμενα φορτία.

To flicker σπάνια προκαλεί ζημιές στις ηλεκτρονικές συσκευές, ωστόσο κάποιες φορές μπορεί να είναι αρκετά ενοχλητικό μια και προκαλεί αισθητές διακυμάνσεις στις εντάσεις φωτισμού των ηλεκτρικών λαμπτήρων.

Υλοποίηση συστήματος

4.1 Hardware και υλικά του συστήματος που υλοποιήθηκε

Σε αυτό το σημείο της εργασίας κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να λειτουργήσει το ισχυόμετρο.

4.1.1 Το αναπτυξιακό σύστημα της Fpga Virtex II pro XUP

Το αναπτυξιακό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι το Virtex II Pro XUP (σχήμα 36). Το αναπτυξιακό αυτό αποτελείτε από μια FPGA Virtex II Pro υποστηριζόμενη από μια συλλογή περιφερειακών στοιχείων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός σύνθετου συστήματος. Το γενικό διάγραμμα του αναπτυξιακού συστήματος Virtex II Pro XUP παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 37:



Σχήμα 36. Φωτογραφία του αναπτυξιακού συστήματος Virtex II Pro XUP.



Σχήμα 37.Το γενικό διάγραμμα του αναπτυξιακού συστήματος Virtex II Pro XUP.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτού του αναπτυξιακού συστήματος είναι τα εξής:

- FPGA Virtex II Pro με ενσωματωμένο τον Power PC 405.
- Έως 2GB DDR SDRAM.
- Ελεγκτή System ACE και Type II CompactFlash για σύνδεση με την FPGA και για την αποθήκευση δεδομένων.
- Υψηλής ταχύτητας SelectMAP FPGA διαμόρφωση από Platform In-System Programmable Configuration PROM.
- Υποστήριξη σε 'Golden' και 'User' FPGA διαμόρφωσης bitstream.
- Συσκευή 10/100 Ethernet PHY.
- Αριθμός πιστοποίησης μοναδικότητας αναπτυξιακού.
- Σειριακή θύρα RS-232 DB9.
- 2 PS-2 σειριακές θύρες.
- 4 LED.
- 4 Διακόπτες.

- 5 κουμπιά (push buttons).
- 6 συνδετήρες επέκτασης μαζί με 80 pin εισόδου/εξόδου με προστασία από υπερτάσεις.
- Υψηλής ταχύτητας συνδετήρες επέκτασης μαζί με 40 pin εισόδου/εξόδου.
- Ηχείο AC-97 CODEC με ενισχυτή ήχου και μεγάφωνο εξόδου.
- Μικρόφωνο και γραμμή εισόδου ήχου.
- XSGA εξόδου συχνότητας 1200x1600x70 Hz.
- 3 σειριακές θύρες ΑΤΑ.
- Επέκταση MGT.
- 100MHz ενσωματωμένο ρολόι, 75MHz ρολόι SATA.
- Παροχή για ρολόι επιλεγμένο από τη χρήστη.
- On-board τροφοδοσία.
- Κύκλωμα reset.
- Κύκλωμα reset του Power PC 405.

Σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας εκτός της ίδιας της Fpga διαδραματίζει 0 μικροεπεξεργαστής Microblaze και που είναι ενσωματωμένος στο συγκεκριμένο αναπτυξιακό. Συγκεκριμένα με την αρωγή του Microblaze αλλά και των διαύλων επικοινωνίας (όπως είναι το OPB και το FSL) που χρησιμοποιεί αυτός επιτυγχάνεται διεπαφή για μεταφορά των μετρήσεων του ισχυομέτρου στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Περισσότερα για τον Microblaze θα αναλυθούν σε μεταγενέστερο κεφάλαιο όπου θα γίνει ανάπτυξη του τρόπου με τον οποίο επιτεύχθηκε η διεπαφή ανάμεσα στο αναπτυξιακό και σε έναν προσωπικό υπολογιστή.

4.1.2 Σειριακή θύρα RS232

To RS-232 (Recommended Standard 232) είναι ένα πρότυπο για σειριακή μετάδοση δυαδικών σημάτων δεδομένων μεταξύ ενός DTE (Data terminal equipment) και ενός DCE (Data Circuit-terminating equipment). Χρησιμοποιείται

συχνά στις σειριακές θύρες των προσωπικών υπολογιστών. Χρησιμοποιείται ένας αγωγός για εκπομπή δεδομένων, ένας για λήψη και μία γείωση.

Το πρότυπο RS-232-C της Electronics Industries Alliance (EIA) του 1969 ορίζει:

- Χαρακτηριστικά ηλεκτρικών σημάτων όπως επίπεδα τάσης, ρυθμό μετάδοσης, χρονισμό και ρυθμό ανόδου των σημάτων, ανώτατο επίπεδο τάσης, συμπεριφορά σε βραχυκύκλωμα, μέγιστη παρασιτική χωρητικότητα και μήκος καλωδίου.
- Μηχανικά χαρακτηριστικά διεπαφής, συνδέσιμα βύσματα και προσδιορισμό pins.
- Λειτουργίες του κάθε κυκλώματος στο βύσμα διεπαφής.
- Τυποποιημένα υποσύνολα των κυκλωμάτων διεπαφής για επιλεγμένες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.

Το πρότυπο δεν ορίζει στοιχεία όπως

- κωδικοποίηση χαρακτήρων (για παράδειγμα, ASCII, Baudot ή EBCDIC)
- τη διαμόρφωση των χαρακτήρων στη ροή δεδομένων (bit ανά χαρακτήρα, bit έναρξης/διακοπής, ισοτιμία)
- πρωτόκολλα για εντοπισμό σφαλμάτων ή αλγόριθμους για συμπίεση δεδομένων.
- ρυθμούς bit για μετάδοση, αν και το πρότυπο αναφέρει ότι προορίζεται για ρυθμούς bit μικρότερους από 20.000 bit ανά δευτερόλεπτο. Πολλές μοντέρνες συσκευές υποστηρίζουν ταχύτητες 115.200 bps και άνω.
- τροφοδοσία ρεύματος σε εξωτερικές συσκευές.

Λεπτομέρειες της διαμόρφωσης χαρακτήρων και του ρυθμού μετάδοσης bit ελέγχονται από το υλικό της σειριακής θύρας, συχνά ένα μοναδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα, το UART, το οποίο μετατρέπει δεδομένα από παράλληλη σε σειριακή μορφή. Μια τυπική σειριακή θύρα περιλαμβάνει εξειδικευμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα για τον οδηγό και το δέκτη, ώστε να μετατρέπει μεταξύ εσωτερικών λογικών επιπέδων και συμβατών με το RS-232 επιπέδων σήματος.

Οι σειριακές θύρες είναι χρήσιμες σε διάφορα είδη διεπαφών. Οι σειριακές θύρες μπορούν να παρέχουν την επικοινωνία μεταξύ μιας μηχανής host και μιας περιφερειακής μηχανής ή την επικοινωνία μεταξύ δυο host μηχανών. Το αναπτυξιακό σύστημα της XUP Virtex-II Pro παρέχει δύο διαφορετικούς τύπους σειριακής θύρας, την RS232 θύρα και δύο PS/2 θύρες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η RS232 θύρα επικοινωνίας. Τα πρότυπα της RS232 καθορίζουν τα επίπεδα τάσης εξόδου μεταξύ -5V -15V για το λογικό 1, και +5V +15V για το λογικό 0. Οι είσοδοι πρέπει να είναι συμβατές με μια γκάμα τάσεων -3V έως -15V για το λογικό 1 και +3V έως +15V για το λογικό 0. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι τα δεδομένα διαβάζονται σωστά ακόμα και σε μέγιστο μήκος καλωδίου 50 μέτρων. Αυτά τα επίπεδα τάσης είναι εκτός πεδίου εμβέλειας τάσης που μπορεί να υποστηρίξει η FPGA Virtex-II Pro κάνοντας απαραίτητη τη χρήση ενός πομποδέκτη. Η FPGA διαθέτει έναν connector τύπου DCE που επιτρέπει στη χρήση ενός καλωδίου 9 ακροδεκτών για να συνδέσει με έναν connector τύπου DTE που είναι διαθέσιμος στους περισσότερους προσωπικούς H/Y και τερματικούς σταθμούς. Το σχήμα 38 παρουσιάζει την υλοποίηση της σειριακής θύρας που χρησιμοποιείται στο αναπτυξιακό σύστημα της XUP Virtex-II Pro.



Σχήμα 38. Υλοποίηση σειριακής θύρας RS232.

Το MAX3388E είναι μια 2,5V τροφοδοτημένη συσκευή που λειτουργεί ως πομποδέκτης για να μετατοπίσει τα επίπεδα των τάσεων που υποστηρίζονται από την FPGA σε εκείνα που απαιτούνται από τις προδιαγραφές RS232. Το MAX3388E έχει δύο δέκτες και τρεις πομπούς και είναι σε θέση να λειτουργήσει με ρυθμό μέχρι 460 kb/s διατηρώντας τα επίπεδα εξόδου της RS232.

Υπάρχουν πέντε σήματα από την FPGA στη σειριακή θύρα RS232: RS232_TX_DATA, RS232_DSR_OUT, RS232_CTS_OUT, RS232_RX_DATA, KAI RS232_RTS_IN. Τα δεδομένα που στέλνονται και λαμβάνονται (RS232_RX_DATA, RS232_TX_DATA) παρέχουν την αμφίδρομη μετάδοση στοιχείων, ενώ τα υπόλοιπα 3 σήματα παρέχουν τον hardware έλεγχο της ροής επικοινωνίας.



Σχήμα 39. Τα Pins ενός καλωδίου σειριακής θύρας.

4.1.3 Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADS7800JP

Στην υλοποίηση του ισχυομέτρου χρησιμοποιήθηκαν 2 μετατροπείς A/D 12bit για τη δειγματοληψία της κυματομορφής του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα. Οι μετατροπείς αυτοί είναι ίδιου τύπου ADS7800JP της Texas Instrument και η διάταξη των pin τους παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 40.



Σχήμα 40. Α/D Μετατροπέας ADS7800JP.

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου Α/D είναι τα παρακάτω:

- Δειγματοληψία 333 χιλιάδες δείγματα ανά δευτερόλεπτο (333 K samples per second).
- 2 κανάλια εισόδου. Το ένα δέχεται είσοδο ±10 V και το άλλο ±5 V.
- Έξοδοι 3 καταστάσεων (three-state outputs).
- Εσωτερικό ρολόι αναφοράς.
- Εσωτερικό sample/hold κύκλωμα.
- Μέγιστη έκλυση ισχύος 215 mW.
- Ολοκληρωμένο 24 ακροδεκτών DIP.

Ο ADS7800 είναι τύπου αλλεπάλληλης προσέγγισης (succesive aproximation) και έχει ρυθμό δειγματοληψίας 333 kHz. Ο μέγιστος χρόνος μετατροπής είναι ρυθμισμένος στα 2.70 μs και η υψηλή ταχύτητα δειγματοληψίας εξασφαλίζει συνολικό μέγιστο χρόνο απόκτησης και μετατροπής δεδομένων 3 μs. Η τροφοδοσία λειτουργίας του μετατροπέα είναι +5 V και -15 Volt.

Στο παρακάτω σχήμα 41 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης του μετατροπέα με τις κατάλληλες αντιστάσεις και πυκνωτές που είναι απαραίτητοι για τη σωστή λειτουργία του. Επίσης παρουσιάζονται οι πολλοί σημαντικοί για τη σωστή λειτουργία του ακροδέκτες RC και BUSY (pins 19 και 21 αντίστοιχα) των οποίων η λειτουργία θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 41. Μετατροπέας Α/D ADS7800JP.

Ο ακροδέκτης 2 είναι η είσοδος ±5 V που χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση και οι ακροδέκτες 5 ως 17 η ψηφιακή έξοδος (με εξαίρεση το 13 που είναι η γείωση) που καταλήγει στην FPGA. Για να αρχίσει η μετατροπή μίας τιμής πρέπει να δοθεί στο R/C (ακροδέκτης 19) ένας αρνητικός παλμός (ένα λογικό 0 το λιγότερο για 40 ns και στη συνέχεια να επιστρέψει σε λογικό 1). Κατά τη διάρκεια μιας μετατροπής το BUSY (ακροδέκτης 21) είναι λογικό 0 και μόλις ολοκληρωθεί η μετατροπή γίνεται 1. Άρα στην FPGA προγραμματίστηκε ένα στοιχείο με το σήμα ελέγχου του RC για να ξεκινάει η μετατροπή. Επίσης η FPGA ελέγχει συνεχώς το σήμα BUSY του A/D έτσι ώστε κάθε φορά που έχει καινούρια έξοδο ο ADC να σώζεται στον κατάλληλο καταχωρητή. Έτσι με τα σήματα RC και BUSY επιτυγχάνεται το λεγόμενο handsake μεταξύ της FPGA και του μετατροπέα A/D.

4.1.4 Ο συγκριτής τάσης LM311Ν

Το αναλογικό κομμάτι της υλοποίησης του ισχυομέτρου περιλαμβάνει και δυο συγκριτές τάσεις LM311N με τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Διαφορική τάση εισόδου ±30 V.
- Κατανάλωση ισχύος 135 mW.
- Τροφοδοσία λειτουργίας +5 V έως ±15 V.

Η έξοδος του είναι συμβατή με λογικές RTL-DTL και TTL καθώς και σε κυκλώματα MOS. Έτσι η έξοδος του συγκεκριμένου συγκριτή στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας οδηγείται στην είσοδο της FPGA. Η σύνδεση των ακροδεκτών του παρουσιάζεται στο σχήμα 42:



Σχήμα 42. Σύνδεση ακροδεκτών LM311N.

Η τροφοδοσία που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι -5 V και +10 V στους ακροδέκτες 4 και 8 αντίστοιχα. Η λογική της χρησιμοποίησης του LM311N είναι η σύγκριση της εισόδου με το 0 (για αυτό το λόγο η είσοδος του ακροδέκτη 3 γειώνεται όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα). Σαν αποτέλεσμα έχουμε

λογικό 1 όταν η είσοδος είναι μεγαλύτερη του 0 και λογικό 0 όταν η είσοδος είναι μικρότερη του 0. Τέλος την εφαρμογή μας απλά στην έξοδο (ακροδέκτης 7) με τη χρήση ενός διαιρέτη τάσης υποβιβάζουμε την τάση εξόδου σε επίπεδα επιτρεπτά για την FPGA.



Σχήμα 43. Τρόπος σύνδεσης του LM311 στη παρούσα εργασία.

4.1.5 Μετασχηματιστής τάσης και κύκλωμα με αντιστάσεις μέτρησης

Το αρχικό αναλογικό κομμάτι της υλοποίησης έχει να κάνει με την μετατροπή της τάσης του δικτύου σε επίπεδα που να μπορεί να επεξεργαστεί από τους μετατροπείς A/D. Έτσι αρχικά χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής τάσης προκειμένου να υποβιβάσει τα 220 V του δικτύου σε 10 V. Ο μετασχηματιστής αυτός είναι Philips τύπου 2422-530-23411 με τα εξής χαρακτηριστικά:

Τάση εισόδου 220 Volt.

- Κλιμακωτή τάση εξόδου από 0 έως 260 Volt. Στη εργασία αυτή χρησιμοποιείται η κλίμακα των 10 V.
- Ονοματική τιμή ρεύματος 2.5 Ampere.
- Συχνότητα λειτουργίας από 50 έως 400 Hz.

Στη συνέχεια όπως φαίνεται στο σχήμα 44 χρησιμοποιούνται κάποιες αντιστάσεις μέτρησης προκειμένου να καταλήξουν στους 2 μετατροπείς τα σήματα κατάλληλα διαμορφωμένα.



Σχήμα 44. Κυκλωματικό διάγραμμα υποβιβασμού τάσης και οδήγησης κυματομορφών στους αντίστοιχους Α/D.

Συγκεκριμένα η αντίσταση R1 χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει την κυματομορφή ρεύματος. Η τάση ανάμεσα στα άκρα της αντίστασης R1 οδηγείται στον πρώτο μετατροπέα. Με μια απλή διαίρεση με την τιμή της αντίστασης R1 μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η τιμή της έντασης του ρεύματος. Αντίστοιχα χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης τάσης με τις αντιστάσεις R2 και R3 έτσι ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα η τάση ώστε να οδηγηθεί στην είσοδο του δεύτερου μετατροπέα. Το σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι για τη σωστή λειτουργία της υλοποίησης η γείωση μεταφέρεται στο σημείο που τονίζεται στο σχήμα. "Έτσι με αυτό το κύκλωμα μπορεί να μετρηθεί αξιόπιστα το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο και η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα αυτού.

4.2 Αλγόριθμοι του συστήματος που υλοποιήθηκε

4.2.1 Μέτρηση συχνότητας.

Μια από τις βασικές λειτουργίες του ισχυομέτρου είναι η μέτρηση της περιόδου και κατά συνέπεια της συχνότητας μιας περιοδικής κυματομορφής. Η κυματομορφή αυτή μπορεί να είναι ημίτονο, παραμορφωμένο ημίτονο και οποιαδήποτε κυματομορφή αρκεί να έχει duty cycle 50%. Μεταξύ της κυματομορφής και της FPGA παρεμβάλλεται το ολοκληρωμένο LM311 το οποίο δρα σαν συγκριτής και στην έξοδο του δίνει τετραγωνικό παλμό συχνότητας ίσης με τη συχνότητα της κυματομορφής εισόδου. Ουσιαστικά ο συγκριτής συγκρίνει την κυματομορφή εισόδου με το 0. Όταν η είσοδος είναι μεγαλύτερη από 0 Volt το LM311 βγάζει στην έξοδο 5 Volt ενώ όταν η είσοδος είναι μικρότερη από το 0 volt το LM311 για ημιτονοειδή είσοδο φαίνετε στο σχήμα 45:



Σχήμα 45. Χρονική αντιστοιχία εισόδου-εξόδου του συγκριτή τάσης LM311.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα η έξοδος του LM311 μπορεί να είναι είτε 0 είτε 5 Volt. Αυτές οι τιμές καταλήγουν στην είσοδο της FPGA και τα 0 volt αντιστοιχούν στο λογικό 0 ενώ τα 5 volt αντιστοιχούν στο λογικό ένα. Το σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος του LM311 παρουσιάζεται στο σχήμα 46.



Σχήμα 46. Σχηματικό διάγραμμα LM311.

Στη συνέχεια με ένα πρόγραμμα το οποίο υλοποιείται σε VHDL μετράτε η περίοδος του σήματος εισόδου. Η λογική του προγράμματος είναι η ακόλουθη. Χρησιμοποιώντας το εσωτερικό ρολόι συχνότητας 100 MHz της FPGA μετρούνται πόσοι κύκλοι αυτού του ρολογιού αντιστοιχούν σε μία περίοδο του σήματος εισόδου. Από τον αριθμό αυτό μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η περίοδος άρα και η συχνότητα της κυματομορφής εισόδου με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου 21:

$$T_{\varepsilon\iota\sigma\delta\delta\sigma\upsilon} = A^* T_{clfpga}$$
(21)

Όπου:

- Α είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί στο πόσοι περίοδοι ρολογιού 100 Mhz αντιστοιχούν σε μια περίοδο του σήματος εισόδου.
- Τ_{clfpga} =1/10000000 είναι η περίοδος του ρολογιού της FPGA.

To flow chart του αλγόριθμου για την μέτρηση της συχνότητας και της περιόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 47.



Σχήμα 47. Flow chart του αλγορίθμου για την μέτρηση της συχνότητας και της περιόδου της κυματομορφής εισόδου.

4.2.2 Ρύθμιση ρολογιού υλοποίησης

Ένα σημαντικό και κρίσιμο σημείο της υλοποίησης είναι η σωστή ρύθμιση του ρολογιού της FPGA. Το ρολόι πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα έτσι ώστε η δειγματοληψία της κυματομορφής εισόδου να γίνει με σωστό και ακριβή τρόπο.

Συγκεκριμένα σε κάθε κύκλο ρολογιού υπάρχει δειγματοληψία ενός σημείου της κυματομορφής. Το ρολόι της υλοποίησης ρυθμίζεται διαφορετικά ανάλογα με τις 2 λειτουργίες του ισχυομέτρου:

4.2.2.1. Ρολόι υλοποίησης για απλό τρόπο λειτουργίας ισχυομέτρου.

Σε αυτή την περίπτωση η κυματομορφή εισόδου είναι γνωστό ότι είναι περιοδικής μορφής. Το ισχυόμετρο όταν λειτουργεί με αυτό τον τρόπο κάνει μετρήσεις που έχουν άμεση σχέση με την περίοδο της κυματομορφής εισόδου, όπως είναι ο υπολογισμός της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης αλλά και της μέσης τιμής της κυματομορφής. Για να μετρηθούν με ακρίβεια αυτές οι τιμές θα πρέπει να ρυθμιστεί σωστά η δειγματοληψία άρα και το ρολόι της υλοποίησης. Το σκεπτικό είναι το εξής. Ο μετασχηματισμός Fourier που χρησιμοποιεί το ισχυόμετρο και είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των αρμονικών της κυματομορφής εισόδου είναι 1024 σημείων. Για να είναι ακριβής δηλαδή ο υπολογισμός των αρμονικών θα πρέπει από κάθε περίοδο μιας κυματομορφής εισόδου να λαμβάνονται 1024 σημεία. Οι μετρήσεις δηλαδή που πραγματοποιούνται από το ισχυόμετρο έχουν σταθερό αριθμό δειγμάτων ανεξάρτητα της συχνότητας της κυματομορφής εισόδου. Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω υπάρχει αλγόριθμος στο ισχυόμετρο που υπολογίζει την περίοδο της κυματομορφής εισόδου. Γνωρίζοντας την τιμή της περιόδου του σήματος εισόδου με μια απλή διαίρεση με 1023 υπολογίζεται η περίοδος δειγματοληψίας άρα και η συχνότητα δειγματοληψίας της υλοποίησης. Αν είναι γνωστή η επιθυμητή περίοδος της δειγματοληψίας τότε είναι απλό από το ρολόι της FPGA συχνότητας 100MHz να κατασκευαστεί το ρολόι στο οποίο λειτουργεί η υλοποίηση. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στο flow chart του σχήματος 48.



Σχήμα 48. Αλγόριθμος υπολογισμού του ρολογιού της υλοποίησης για το απλό mode λειτουργίας.

Όπου B είναι ο αριθμός που δηλώνει πόσες φορές χωράει μια περίοδος του ρολογιού της FPGA (100MHz) σε μια περίοδο της επιθυμητής περιόδου δειγματοληψίας. Το B υπολογίζεται με τον εξής τρόπο. Αρχικά υπολογίζεται η περίοδος δειγματοληψίας διαιρώντας την περίοδο της κυματομορφής εισόδου με τον αριθμό 1023. Στη συνέχεια εκ νέου διαιρείται η περίοδος δειγματοληψίας με την περίοδο του ρολογιού της FPGA που είναι ((1/10000000)sec). Έτσι απλά με δυο pipelined διαιρέσεις στην FPGA υπολογίζεται ο αριθμός B.

Ένα παράδειγμα ρύθμισης του ρολογιού της υλοποίησης για κυματομορφή εισόδου 50Hz δίνεται στο σχήμα 49.



Σχήμα 49. Χρονικό διάγραμμα, Α) Περίοδος κυματομορφής εισόδου, Β) Περίοδος ρολογιού FPGA, Γ) Περίοδος δειγματοληψίας.

4.2.2.2. Ρολόι υλοποίησης για τρόπο λειτουργίας μέγιστης συχνότητας δειγματοληψίας.

Το όργανο μέτρησης των παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος που υλοποιήθηκε μπορεί να λειτουργήσει και ανεξάρτητα από την περίοδο της κυματομορφής εισόδου σε περίπτωση που το σήμα εισόδου δεν είναι περιοδικό ή σε περίπτωση που δεν μας ενδιαφέρουν μετρήσεις όπως το THD. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας άρα και η καλύτερη
δυνατή αναπαράσταση του σήματος εισόδου. Το ρολόι της υλοποίησης σε αυτή την περίπτωση ρυθμίζεται στα όρια περίπου του μετατροπέα A/D και συγκεκριμένα στα 310 KHz. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος για την ρύθμιση του ρολογιού (σχήμα 50) είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο (για το mode1) με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση είναι γνωστός ο αριθμός του μετρητή που ρυθμίζει την περίοδο του ρολογιού της υλοποίησης.



Σχήμα 50. Αλγόριθμος υπολογισμού του ρολογιού της υλοποίησης για mode λειτουργίας μέγιστης δειγματοληψίας.

Ένα παράδειγμα ρύθμισης του ρολογιού της υλοποίησης για τον τρόπο λειτουργίας μέγιστης δειγματοληψίας του ισχυομέτρου δίνεται στο σχήμα 51.



Σχήμα 51. Χρονικό διάγραμμα, Α)Περίοδος ρολογιού FPGA, Β) Περίοδος δειγματοληψίας.

4.2.3 Υπολογισμός στιγμιαίας τιμής τάσης, ρεύματος και ισχύος

Το όργανο μέτρησης των παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος που υλοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τη στιγμιαία τιμή μιας οποιασδήποτε κυματομορφής είτε αυτή είναι περιοδική είτε όχι. Έτσι μέσω του μετασχηματιστή τάσης και του διαιρέτη τάσης (R1 και R2) η κυματομορφή που αντιστοιχεί στην τάση καταλήγει στην είσοδο του αντίστοιχου μετατροπέα A/D και από εκεί στην είσοδο J6 της FPGA όπως φαίνετε στο παρακάτω σχήμα. Επίσης μέσω της αντίστασης μέτρησης ρεύματος(R1) η κυματομορφή που αντιστοιχεί στο ρεύμα καταλήγει στην είσοδο J5 του αντίστοιχου μετατροπέα A/D και από εκεί στην είσοδο J5 της FPGA όπως επίσης φαίνετε στο σχήμα 52:



Σχήμα 5. Σχηματικό διάγραμμα εισαγωγής δειγμάτων κυματομορφής ρεύματοςτάσης στην FPGA.

Σαν αποτέλεσμα η Fpga έχει 2 ομάδες 12 bit αριθμών που αντιστοιχούν στη στιγμιαία τάση και το στιγμιαίο ρεύμα αντίστοιχα. Οι αριθμοί αυτοί πολλαπλασιάζονται με το βήμα κβαντισμού του Α/D που είναι :

Bήμα Κβαντισμού=
$$\frac{\max input pp}{2^{A/D \text{ bits}}} = \frac{10}{2^{12}} = 0,00244140625$$
 (22)

Έτσι μπορούμε να έχουμε τη στιγμιαία τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου απλά πολλαπλασιάζοντας τον ακέραιο 12 bit αριθμό που αντιστοιχεί στην τάση με το 0.00244140625. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη η μείωση της

τάσης λόγω του διαιρέτη τάσης. Τελικά η σχέση που υπολογίζει την στιγμιαία τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου είναι:

$$V_{st} = A\kappa \dot{\varepsilon}\rho \alpha \iota o \varsigma 12 bit * B \dot{\eta} \mu \alpha K \beta \alpha v \tau \iota \sigma \mu o \dot{\upsilon} * \frac{R2 + R3}{R2 * R3}$$
(23)

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια της Visual Basic και το τελικό αποτέλεσμα είναι διαθέσιμο στο χρήστη στη οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή. Έτσι μπορούμε να έχουμε τη στιγμιαία τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου σε συχνότητα ίση με τη συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος. Όπως είδαμε προηγουμένως η συχνότητα αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με την περίοδο του σήματος εισόδου ή ακόμα και ανάλογα με το mode που έχει επιλεχθεί να λειτουργεί το ισχυόμετρο.

Αντίστοιχα υπολογίζεται η στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο απλά πολλαπλασιάζοντας τον ακέραιο 12 bit αριθμό που αντιστοιχεί στην ένταση του ρεύματος με το 0.00244140625 .Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης του ρεύματος R1. Τελικά η σχέση που υπολογίζει την στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο είναι:

$$I_{st} = \frac{A\kappa \hat{\epsilon}\rho \alpha \iota o \varsigma 12 bit * B \dot{\eta} \mu \alpha K \beta \alpha \nu \tau \iota \sigma \mu o \dot{\nu}}{R1}$$
(24)

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται επίσης με τη βοήθεια της Visual Basic και το τελικό αποτέλεσμα είναι διαθέσιμο στο χρήστη στη οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή. Όπως και για την τάση έτσι και για την ένταση μπορούμε να έχουμε τη στιγμιαία τιμή της σε συχνότητα ίση με τη συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος.

Λόγω της παραλληλίας πράξεων και υπολογισμού που διαθέτει η FPGA μπορεί εύκολα από το στιγμιαίο ρεύμα που διαρρέει το φορτίο και την στιγμιαία τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του να υπολογιστεί η στιγμιαία ισχύς που καταναλώνει αυτό. Αυτή η τιμή δίνεται από τη σχέση:

$$P_{st} = I_{st} * V_{st}$$
(25)

Δηλαδή η Fpga έχει την δυνατότητα στον ίδιο κύκλο ρολογιού να παίρνει την στιγμιαία τιμή της κυματομορφής της τάσης αλλά και την αντίστοιχή της για την κυματομορφή ρεύματος σε απόλυτη χρονική αντιστοιχία (σχήμα 53).



Σχήμα 53. Χρονική αντιστοιχία δειγματοληψίας κυματομορφής τάσης-ρεύματος.

Δηλαδή τα σημεία Α και Β από τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα δειγματοληπτούνται την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή t με αποτέλεσμα ο υπολογισμός με τη βοήθεια της σχέσης 25 της στιγμιαίας ισχύς να είναι απόλυτα ακριβής.

4.2.4 Υπολογισμός rms τιμής

Μια από τις βασικές λειτουργίες του οργάνου μέτρησης των παραμέτρων ηλεκτρικής ισχύος είναι ο υπολογισμός της ενεργού (rms) τιμής του ρεύματος, της τάσης ενός φορτίου αλλά και της παραγόμενης ισχύς του. Η προς μέτρηση είσοδος μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενη κυματομορφή (ac) είτε σταθερή (dc).Οι δυο αναλογικές είσοδοι (η μια αντιστοιχεί στη τάση και η άλλη στο ρεύμα) καταλήγουν όπως είδαμε και προηγουμένως σε δυο μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D converters) και από εκεί στην FPGA. Η διαδικασία που ακολουθείτε είναι η ίδια και στις δυο περιπτώσεις (τάση-ρεύμα) και περιγράφετε στη συνέχεια. Με τη βοήθεια του προγράμματος που μετράει τη συχνότητα του σήματος εισόδου καθορίζετε η συχνότητα δειγματοληψίας όπως αναλύθηκε και παραπάνω σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο 26:

$$F_s = f_{in} * 1023$$
 (26)

Όπου

- F_s η συχνότητα δειγματοληψίας
- f_{in} η συχνότητα του σήματος εισόδου

Με αυτό τον τρόπο κατά τη διάρκεια μίας περιόδου του σήματος εισόδου δειγματοληπτούνται 1024 σημεία (αριθμός Ν) που ισαπέχουν μεταξύ τους. Η επεξεργασία που ακολουθείτε στη συνέχεια γίνετε με βάση τις σχέσεις 7 και 8 αντίστοιχα που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Για να υπολογιστεί η πραγματική μέση τιμή της τάσης αλλά και του ρεύματος είναι απαραίτητος ο υπολογισμός αρχικά των αντίστοιχων στιγμιαίων τιμών των παραμέτρων αυτών. Ο τρόπος που υλοποιήθηκαν οι παραπάνω σχέσεις σε VHDL δίνετε από το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 54. Όπως βλέπουμε κάθε φορά που έχουμε δειγματοληψία ενός σημείου (στιγμιαία τιμή) αυτό περνάει από ένα module στο οποίο υψώνεται στο τετράγωνο. Στη συνέχεια το αποτέλεσμα της ύψωσης στο τετράγωνο καταλήγει σε ένα νέο module το οποίο προσθέτει τη νέα τιμή με την προηγούμενη που έχει κρατήσει. Όταν συμπληρωθούν Ν τιμές (1024 στην περίπτωση μας) τότε το τελικό άθροισμα καταλήγει σε ένα άλλο module στο οποίο διαιρείτε με τον αριθμό N (1024 στην περίπτωση μας).Στην περίπτωση αυτή για μείωση υπολογιστικής δύναμης η διαίρεση του δυαδικού αριθμού μπορεί να γίνει με ένα shift αριστερά κατά log₂(N) (δηλαδή 10 θέσεων όταν N=1024). Τέλος το αποτέλεσμα της διαίρεσης καταλήγει σε ένα άλλο module το οποίο μας δίνει στην έξοδο την τετραγωνική ρίζα του αριθμού εισόδου. Ο αριθμός αυτός αντιστοιχεί στην rms τιμή της κυματομορφής εισόδου.



Σχήμα 54. Υπολογισμός πραγματικής ενεργού τιμής σε VHDL.

Με τον παραπάνω τρόπο υπολογίζεται και η rms τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου αλλά και η rms τιμή της έντασης που διαρρέει το φορτίο αυτό.

Έχοντας υπολογίσει την στιγμιαία ισχύ που καταναλώνει το φορτίο (με τον τρόπο που αναφέρθηκε στη προηγούμενη παράγραφο) υπολογίζουμε την πραγματική μέση ισχύ που καταναλώνεται στο φορτίο με βάση τη σχάση 9 που αναλύθηκε και παρουσιάστηκε προηγουμένως.

4.2.5 Υπολογισμός ενέργειας που καταναλώνεται στο φορτίο

Μια λειτουργία που υποστηρίζει το ισχυόμετρο της παρούσας υλοποίησης και στα 2 mode λειτουργίας του είναι ο υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώνει το φορτίο για κάποιο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει είναι συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για το οποίο θέλει να μετρηθεί η ενέργεια. Στη συνέχεια το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη το διάστημα αυτό υπολογίζει την ενέργεια με βάση την παρακάτω σχέση:

$$E = P_t * t \tag{27}$$

όπου:

- Ε η ενέργεια που καταναλώνει το φορτίο για ένα χρονικό διάστημα t.
- Pt η ισχύς που καταναλώνει το φορτίο για ένα χρονικό διάστημα t.
- t χρονικό διάστημα σε sec για το οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση.

Η παραπάνω σχέση για ευκολότερη υλοποίηση στην FPGA μετασχηματίζεται ως εξής:

$$E = t * \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} P_{st}^2$$
(28)

όπου nt ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται στο χρονικό διάστημα t για το οποίο υπολογίζεται η ενέργεια. Όπως διαπιστώνεται από την παραπάνω σχέση το Pt της σχέσης 27 αντικαθίσταται με τη βοήθεια της σχέσης με την οποία μετράται η πραγματική μέση ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο. Η διαφορά είναι στον αριθμό των δειγμάτων ο οποίος δεν είναι Ν (αριθμός δειγμάτων μιας περιόδου) αλλά nt (αριθμός δειγμάτων που λαμβάνονται σε χρονικό διάστημα t). Το γενικό διάγραμμα της υλοποίησης της μέτρησης ενέργειας που έγινε σε VHDL δίνεται στο παρακάτω γενικό διάγραμμα του σχήματος 55. Όπως διακρίνεται κάθε φορά που υπάρχει δειγματοληψία ενός σημείου τάσης (στιγμιαία τιμή τάσης) και ενός σημείου έντασης ρεύματος (στιγμιαία τιμή έντασης ρεύματος) αυτό περνάει από ένα module στο οποίο υπολογίζεται η στιγμιαία ισχύς. Στη συνέχεια η τιμή που προκύπτει υψώνεται στο τετράγωνο σε ένα άλλο module. Το αποτέλεσμα της ύψωσης στο τετράγωνο καταλήγει σε ένα νέο module το οποίο προσθέτει τη νέα τιμή με την προηγούμενη που έχει κρατήσει. Όταν συμπληρωθούν nt τιμές τότε το τελικό άθροισμα καταλήγει σε ένα άλλο module στο οποίο διαιρείτε με τον αριθμό nt. Τέλος ο αριθμός που προκύπτεί πολλαπλασιάζεται με το χρονικό διάστημα t και σαν αποτέλεσμα προκύπτει στην έξοδο της FPGA η ενέργεια που καταναλώνεται στο φορτίο για χρονικό διάστημα t.



Σχήμα 55. Υπολογισμός ενέργειας που καταναλώνεται στο φορτίο σε χρόνο t.

Στη διαδικασία αυτής της μέτρησης εισάγεται πλήρως η διαδικασία της διεπαφής του χρήστη με το ισχυομέτρου. Συγκεκριμένα ο χρήστης επιλέγει σε γραφικό περιβάλλον ενός προσωπικού υπολογιστή για πόσο χρόνο θέλει το ισχυόμετρο να μετρήσει κατανάλωση ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή δίνεται στον χρήστη και στα 2 λειτουργίας του ισχυομέτρου. Στο mode λειτουργίας για περιοδικές mode κυματομορφές ο χρήστης δηλώνει για πόσες περιόδους της κυματομορφής εισόδου επιθυμεί να γίνει η μέτρηση. Στο mode λειτουργίας μέγιστης δυνατής δειγματοληψίας ο χρήστης δηλώνει το χρονικό διάστημα για το οποίο επιθυμεί να γίνει η μέτρηση. Το δεδομένο αυτό μέσω σειριακής μεταφέρεται στον Microblaze του αναπτυξιακού συστήματος της FPGA και από εκεί μέσω μιας νέας διεπαφής που επιτυγχάνεται με FSL bus η επιθυμητή αυτή τιμή μεταφέρεται σαν είσοδο στο VHDL project της υλοποίησης μας στην FPGA. Στη συνέχεια με βάση και την είσοδο αυτή γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας από το πρόγραμμα και εν συνεχεία ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία προκείμενου ο χρήστης να δει το αποτέλεσμα της αίτησής του στην οθόνη του προσωπικού υπολογιστή του. Αναλυτικά οι διεπαφές που χρησιμοποιούνται (διεπαφή μεταξύ προσωπικού υπολογιστή και microblaze, καθώς και διεπαφή μεταξύ microblaze και FPGA) προκειμένου να υπάρχει αμφίδρομη σχέση ανάμεσα στο χρήστη και στο ισχυόμετρο θα αναπτυχθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Η σύνθετη διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η διαδικασία της μέτρησης ενέργειας παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα 56:



Σχήμα 56. Περιγραφή διαδικασίας μέτρησης ενέργειας.

4.2.6 Μέτρηση ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD).

Μια από τις πολυπλοκότερες μετρήσεις του ισχυομέτρου της υλοποίησης είναι η μέτρηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα ενός φορτίου αλλά και της κυματομορφής του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο αυτό. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν παράλληλα χάρη στην αρωγή της FPGA που μας δίνει αυτή την δυνατότητα. Η μέτρηση αυτή όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε με βάση τη σχέση 13.

Όπως γίνεται αντιληπτό βασική παράμετρος στη μέτρηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης διαδραματίζουν οι αρμονικές μιας κυματομορφής. Για τον υπολογισμό των αρμονικών η συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιεί την hardware υλοποίηση της Xilinx Fast Fourier Transform V3.2 [21] με τη βοήθεια του προγράμματος core generator. Η υλοποίηση αυτή έχει τη δυνατότητα να διακριτό μετασχηματισμό Fourier υπολογίζει то μιας κυματομορφής χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Cooley-Tukey. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 2 ίδιες υλοποιήσεις αυτού του μετασχηματισμού Fourier που λειτουργούν ταυτόχρονα (μια για μέτρηση των αρμονικών της κυματομορφής της τάσης και μια για μέτρηση αρμονικών της κυματομορφής του ρεύματος). Τα βασικά χαρακτηριστικά του Fast Fourier Transform V3.2 της Xilinx είναι:

- Διαθέτει συμβατότητα με τις FPGA Virtex-II, Virtex-II pro, Virtex-4, Spartan-3 και Spartan-3E.
- Δυνατότητα υπολογισμού κανονικού (forward) αλλά και αντίστροφου (inverse) μετασχηματισμού Fourier. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μόνο forward DFT.
- Μέγεθος μετασχηματισμού N=2^m, με m=3-16. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μετασχηματισμός 1024 σημείων N=1024 (2¹⁰).
- Μέγεθος δεδομένων εισόδου b_x=8-24 bit. Στην υλοποίηση του ισχυομέτρου μας με βάση το δεδομένο ότι η είσοδος του μετασχηματισμού προέρχεται από τον 12 bit A/D το μέγεθος σε bit των δεδομένων εισόδου που επιλέγεται είναι 12.(b_x =12).
- Ο χρήστης του DFT μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε 3 τύπους αριθμητικών πράξεων από τους οποίους καθορίζεται και η μορφή των αποτελεσμάτων εξόδου. Έτσι μπορούμε να έχουμε αποτελέσματα χωρίς διαβαθμίσεις (unscaled), με διαβάθμιση (scaled) καθώς και αποτελέσματα κινητής υποδιαστολής. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται αριθμητική τύπου scaled προκειμένου η έξοδος να είναι σε μορφή που να μπορεί να επεξεργαστεί ευκολότερα (12 bit).
- Επιλογή σειράς εμφάνισης δεδομένων εξόδου. Υπάρχει δυνατότητα τα αποτελέσματα (αρμονικές) να εμφανιστούν είτε με αριθμητική σειρά είτε σε σειρά με την οποία γίνεται ο υπολογισμός τους. Στην παρούσα υλοποίηση

χρησιμοποιείται η σειρά εμφάνισης αποτελεσμάτων με βάση των υπολογισμό τους για λόγους ταχύτητας (αυτό το mode λειτουργίας του DFT είναι πιο γρήγορο).

Δυνατότητα επιλογής από 3 διαθέσιμες αρχιτεκτονικές: Pipelined αρχιτεκτονική η οποία επιτρέπει συνεχή επεξεργασία δεδομένων. Radix-4 αρχιτεκτονική η οποία προσφέρει στο χρήστη δυνατότητα να επιλέγει πότε θα φορτωθούν τα δεδομένα στον DFT (load) και πότε θα παρθούν τα αποτελέσματα αυτών στην έξοδο (unload). Radix-2 αρχιτεκτονική η οποία έχει επίσης φάσεις load-unload αλλά είναι λιγότερο πολύπλοκη. Στο ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκε pipelined αρχιτεκτονική η

Το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 57 δείχνει την χρονική αλληλουχία με την οποία επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός Fourier pipelined αρχιτεκτονικής:



Σχήμα 57. Διαδικασία υπολογισμού μετασχηματισμού Fourier σε χρονική αντιστοιχία.

Ο μετασχηματισμός αυτός στην έξοδο του παρουσιάζει δεδομένα σε μιγαδική μορφή. Συγκεκριμένα υπολογίζεται το πραγματικό μέρος (xk_re στο διάγραμμα 57 57) και το φανταστικό μέρος (xk_im στο διάγραμμα 57) στην έξοδο. Επίσης δέχεται στην είσοδο πραγματικό και φανταστικό μέρος (xn_re και xn_im στο διάγραμμα 57). Στην υλοποίηση του ισχυομέτρου χρησιμοποιήθηκε η πραγματική μόνο είσοδος (αφού δεν υπήρχε φανταστικό μέρος) ενώ χρησιμοποιήθηκαν και οι δυο 12 bit έξοδοι μιας αρμονικής προκειμένου να υπολογιστεί η τελική τιμή της με βάση τη σχέση:

Η σχέση 13 μετασχηματίζεται ως εξής λαμβάνοντας υπόψη το δεδομένο ότι μια αρμονική αποτελείται από το φανταστικό και το πραγματικό της μέρος.

$$THD = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 \dots + h_n^2}}{h_1} = \frac{\sqrt{\sqrt{(h_2 real^2 + h_2 imag^2)^2} + \sqrt{(h_3 real^2 + h_3 imag^2)^2} + \dots + \sqrt{(h_n real^2 + h_n imag^2)^2}}}{\sqrt{(h_1 real^2 + h_1 imag^2)}} = (29)$$
$$= \frac{\sqrt{h_2 real^2 + h_2 imag^2 + h_3 real^2 + h_3 imag^2 + \dots + h_n real^2 + h_n imag^2}}{h_1 real}$$

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι για το ισχυόμετρό μας λαμβάνονται υπόψη οι 31 πρώτες αρμονικές της κυματομορφής του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο και αντίστοιχα οι 31 πρώτες αρμονικές της κυματομορφής της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου. Η διαδικασία του υπολογισμού της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω γενικό διάγραμμα του σχήματος 58.



Σχήμα 58. Γενικό διάγραμμα υπολογισμού ολικής αρμονικής παραμόρφωσης κυματομορφής.

Το παραπάνω γενικό διάγραμμα υλοποιείται παράλληλα 2 φορές, μια για τον υπολογισμό της THD της τάσης στα άκρα του φορτίου και μια για τον υπολογισμό της THD του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Η υλοποίηση είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις. Ο μηχανισμός λειτουργεί παράλληλα επειδή η είσοδος είναι από διαφορετικούς μετατροπείς A/D (ένας μετατροπέας A/D για την κυματομορφή της τάσης και ένας δεύτερος μετατροπέας A/D για την κυματομορφή του ρεύματος). Η διαδικασία και στις δυο περιπτώσεις είναι η εξής: Το ρολόι της υλοποίησης έχει ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο, όπως έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι ώστε σε μια περίοδο της κυματομορφής εισόδου ο DFT να λαμβάνει 1024 δείγματα αυτής της κυματομορφής. Αφού τα δείγματα αυτά ληφθούν από το module του DFT τότε κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας το module δίνει στην έξοδο του τις αρμονικές (αποτελέσματα μετασχηματισμού Fourier). Οι αρμονικές 2 έως 31 υψώνονται στον τετράγωνο και αθροίζονται σε ένα νέο module. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τετραγωνική ρίζα του αριθμού που προκύπτει. Τέλος, ο αριθμός αυτός (στο σχήμα 59 ονομάζεται Α)

επίσης κρατηθεί από τις εξόδους του DFT και το τελικό αποτέλεσμα είναι η ολική αρμονική παραμόρφωση της κυματομορφής εισόδου.

Αναλυτικά τα παραπάνω και ο ακριβής αλγόριθμος της μέτρησης αυτής δίνονται στο παρακάτω flow chart του σχήματος 59:



Σχήμα 59. Flow chart του αλγορίθμου υπολογισμού του THD.

4.2.7 Μέτρηση διαφορά φάσης

Μια άλλη παράμετρο την οποία έχει την το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της κυματομορφής του ρεύματος που διαρρέει ένα φορτίο και της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η μέτρηση αυτή είναι πολύ σημαντική αφού είναι η βάση για την μέτρηση και άλλων παραμέτρων όπως ο συντελεστής ισχύος. Αρχικά μετράται η χρονική διαφορά ανάμεσα στις δυο κυματομορφές και στη συνέχεια από αυτή υπολογίζεται η αντίστοιχη διαφορά φάσης. Η διαδικασία υπολογισμού της χρονικής διαφοράς των δυο κυματομορφών έχει την ίδια φιλοσοφία με την διαδικασία υπολογισμού της περιόδου μιας κυματομορφής που αναπτύχθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης έχει και αναλογικό κομμάτι. Αρχικά οι δυο κυματομορφές περνάνε αντίστοιχα από 2 συγκριτές τάσεις LM311N και στη συνέχεια οι έξοδοι των συγκριτών οδηγούνται στην είσοδο της FPGA. Το αποτέλεσμα είναι στην είσοδο της FPGA να υπάρχουν 2 τετραγωνικοί παλμοί που αντιστοιχούν στην περίοδο των δυο κυματομορφών. Οδηγώντας τους παλμούς αυτούς στην είσοδο μιας πύλης XOR στην έξοδο παράγεται ένα σήμα το οποίο αντιστοιχεί στην χρονική διαφορά που έχουν οι 2 κυματομορφές εισόδου. Συγκεκριμένα η χρονική διαφορά των 2 κυματομορφών ισούται με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σήμα εξόδου της πύλης XOR είναι λογικό 1 (σχήμα 60).



Σχήμα 60. Χρονική αντιστοιχία δυο κυματομορφών με διαφορά φάσης.

Έχοντας λοιπόν, το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης των δύο κυματομορφών (τάσης-ρεύματος) αναπτύσσεται ο παρακάτω αλγόριθμος για τον υπολογισμό του χρονικού διαστήματος αυτού, καθώς και της αντίστοιχης διαφοράς φάσης. Αυτό που γίνεται είναι η μέτρηση του χρόνου στον οποίο η έξοδος της πύλης XOR είναι λογικό 1. Η διαδικασία της μέτρησης αυτής είναι ίδια με την διαδικασία μέτρησης περιόδου μιας κυματομορφής. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια όπου η έξοδος της XOR είναι 1ενεργοποιείται ένας μετρητής ο οποίος αυξάνεται σε κάθε κύκλο ρολογιού της FPGA. Γνωρίζοντας ότι το ρολόι της FPGA έχει συχνότητα 100 MHz και την τιμή του μετρητή που αντιστοιχεί στο διάστημα που η έξοδος της XOR είναι 1, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από τη σχέση 30 η χρονική διαφορά ΔΤ των δύο κυματομορφών.

$$\Delta T = A \cdot T_{\text{clfpga}}$$
(30)

Όπου:

- Α είναι ο αριθμός που αντιστοιχεί στο πόσοι περίοδοι ρολογιού 100 Mhz αντιστοιχούν στο διάστημα που η έξοδος της XOR είναι 1.
- Τ_{clfpga} =(1/10000000)sec είναι η περίοδος του ρολογιού της FPGA.

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το ΔΤ υπολογίζεται η διαφορά φάσης των δύο κυματομορφών με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\Delta \Phi = \frac{\Delta T \cdot 360}{T} \tag{31}$$

όπου Τ η περίοδος της κυματομορφής.

Γραφικά, ο αλγόριθμος του υπολογισμού της διαφοράς φάσης των δύο κυματομορφών παρουσιάζεται στο παρακάτω flowchart του σχήματος 61:



Σχήμα 61. Flow chart υπολογισμού χρονικής διαφοράς και διαφοράς φάσης κυματομορφών ρεύματος και τάσης.

Με βάση τα παραπάνω και με την αρωγή του αντίστοιχου VHDL κώδικα υλοποιείται η μέτρηση της διαφοράς φάση και της χρονικής διαφοράς των κυματομορφών εισόδου και τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε γραφικό περιβάλλον στην οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή.

4.2.8 Συντελεστής ισχύος, άεργος ισχύς και μιγαδική ισχύς

Γνωρίζοντας τη διαφορά φάσης των κυματομορφών ρεύματος και τάσης (ο υπολογισμός της ΔΦ αναπτύχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο συντελεστής ισχύος με βάση τη σχέση:

$$\Sigma \upsilon \nu \tau \varepsilon \lambda \varepsilon \sigma \tau \eta \varsigma \ \iota \sigma \chi \upsilon o \varsigma = \cos(\Delta \Phi) \tag{32}$$

Ο υπολογισμός του συνημίτονου σε hardware δεν είναι απλή διαδικασία. Για το λόγω αυτό έγινε χρήση της υλοποίησης της Xilinx sine/cosine look up table v5.0 [22] (σχήμα 62).



Σχήμα 62. To module της Xilinx sine/cosine look up table v5.0.

Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του παραπάνω module είναι τα εξής:

- Συμβατότητα με τις FPGA Virtex II, Virtex II pro, Virtex E, Virtex 4, Spartan II, Spartan IIE, Spartan 3.
- Ικανότητα επιλογής χρήστη του αποθηκευτικής χωρητικότητας της μνήμης.
- Υποστήριξη εισόδου από 3 έως 10 bits.
- Υποστήριξη εξόδου από 4 έως 32 bits.

To module cosine δέχεται για είσοδο μια ακέραια χωρίς πρόσημο τιμή THETA. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το μέγεθος σε bits της εισόδου αλλά και της εξόδου. Η παρακάτω σχέση καθορίζει τη σχέση μεταξύ της εισόδου THETA και της πραγματικής τιμής ΔΦ σε radians.

$$\Delta \Phi = \text{THETA} \cdot \frac{2\pi}{2^{\text{THETA}_{WIDTH}}} \alpha \kappa \tau i \nu i \alpha$$
(33)

όπου :

- π ο αριθμός 3,14.
- ΔΦ η διαφορά φάσης δυο κυματομορφών
- ΤΗΕΤΑ η είσοδος του module υπολογισμού του συνημίτονου.
- THETA_WIDTH το μέγεθος σε bits του αριθμού THETA.

Η γωνία όμως ΔΦ που έχει μετρηθεί είναι σε μοίρες οπότε η σχέση 33 μετατρέπεται στη σχέση 34:

$$\Delta \Phi = \text{THETA} \cdot \frac{2\pi}{2^{\text{THETA}_{WIDTH}}} \cdot \frac{180}{\pi} \mu oi \,\rho \varepsilon \varsigma = \frac{360}{2^{\text{THETA}_{WIDTH}}} \,\mu oi \,\rho \varepsilon \varsigma \tag{34}$$

Το core υπολογίζει το cos(ΔΦ) και παρουσιάζει την έξοδο σε 2's complement μορφή. Τα όρια των τιμών εξόδου κυμαίνονται στα εξής διαστήματα:

$$\frac{-2^{OYTPUT} - WIDTH^{-1}}{2^{OYTPUT} - WIDTH^{-1}}, \frac{+2^{OYTPUT} - WIDTH^{-1}}{2^{OYTPUT} - WIDTH^{-1}}$$

όπου OYTPUT_WIDTH το μέγεθος σε bits του αριθμού στην έξοδο του module υπολογισμού του συνημίτονου.

Στη συνέχεια η τιμή της εξόδου αποκωδικοποιείται από τον χρήστη και εμφανίζεται στην οθόνη του σε γραφικό περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζει το ισχυόμετρο της παρούσας εργασίας τον συντελεστή ισχύος.

Μια επίσης σημαντική μέτρηση που υποστηρίζει το ισχυόμετρο είναι η μέτρηση της άεργους ισχύος. Η μέτρηση αυτή είναι εφικτή από τη στιγμή που υπολογίζεται η πραγματική μέση ισχύς που καταναλώνει το φορτίο και η διαφορά φάσης μεταξύ των κυματομορφών τάσης και ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Έχοντας υπολογίσει τα δυο αυτά μεγέθη με έναν απλό pipeline πολλαπλασιασμό υπολογίζεται εύκολα και το φυσικό μέγεθος της άεργους ισχύος Q. Η μέτρηση αυτή όπως και οι προηγούμενες είναι διαθέσιμες σε γραφικό περιβάλλον στην οθόνη του χρήστη.

Μια άλλη μέτρηση που υλοποιεί το ισχυόμετρο έχει να κάνει με την μέτρηση της μιγαδικής ισχύος. Συγκεκριμένα μετράται το πραγματικό μέρος της μιγαδικής ισχύος με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$RE[S] = \sqrt{\pi^2 + Q^2} \tag{35}$$

Η σχέση αυτή με βάση του ότι η τιμή 3,14 είναι δύσκολο να εκφραστεί σε VHDL μετασχηματίζεται ως εξής:

$$RE[S] = \frac{2^8 \cdot \sqrt{\pi^2 + Q^2}}{2^8} = \frac{\sqrt{2^{16} \cdot (\pi^2 + Q^2)}}{2^8} = \frac{\sqrt{646158, 7456 + 2^{16} \cdot Q^2}}{2^8} \approx \frac{\sqrt{646158 + 2^{16} \cdot Q^2}}{2^8}$$
(36)

Με τον παραπάνω τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις αφού βασική προϋπόθεση είναι να αποφευχθούν οι πράξεις που αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος. Για τον λόγω αυτό ο αριθμητής και ο παρονομαστής πολλαπλασιάστηκαν με αριθμό τέτοιο ώστε η τελική διαίρεση σε VHDL να γίνει με όσο τον δυνατόν λιγότερους πόρους (με ένα απλό shift δεξιά 8 θέσεων.Το γενικό διάγραμμα του υπολογισμού του πραγματικού μέρους της μιγαδικούς ισχύος δίνεται στο σχήμα 63.



Σχήμα 63. Γενικό διάγραμμα υπολογισμού πραγματικού μέρους μιγαδικής ισχύος.

Η διαδικασία υπολογισμού δηλαδή είναι η εξής. Σε ένα module υψώνεται η τιμή της άεργους ισχύος (που έχει ήδη υπολογιστεί) στο τετράγωνο. Στη συνέχεια σε ένα άλλο module πολλαπλασιάζεται η τιμή που υπολογίστηκε στο πρώτο module με τον αριθμό A (2¹⁶=65536) όπως φαίνεται στη σχέση 36. Έπειτα σε ένα τρίτο module προστίθεται η έξοδος του δεύτερου module με τον σταθερό προϋπολογισμένο αριθμό B 646158. Έπειτα υπολογίζεται η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος αυτού και τέλος γίνεται η τελική διαίρεση με τον αριθμό 256 (shift δεξιά κατά n=8 θέσεις). Το τελικό αποτέλεσμα που, που αντιπροσωπεύει το πραγματικό μέρος της άεργους ισχύος), προωθείται μέσω της σειριακής, και παρουσιάζεται στην οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή.

5. Διεπαφή του ισχυομέτρου με PC

Για το interface της εφαρμογής της παρούσας εργασίας με τον προσωπικό υπολογιστή κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση του προγράμματος EDK (Embedded Processor Development Kit) προκειμένου να σταλούν δεδομένα στη σειριακή θύρα του αναπτυξιακού συστήματος της Virtex II Pro Xup.Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε στο στούντιο πλατφόρμων της Xilinx XPS.

5.1 Χαρακτηριστικά Microblaze.

Για την επίτευξη της επικοινωνίας με την σειριακή θύρα RS232 έγινε χρήση του επεξεργαστή Microblaze [23]. Ο 32 bit μαλακός πυρήνας επεξεργασίας Xilinx MicroBlaze έχει βελτιστοποιηθεί για εφαρμογές σε FPGA της οικογένειας Virtex.. Ο MicroBlaze είναι τύπου RISC (reduced instruction set computer) και το block διάγραμμα του παρουσιάζετε στο παρακάτω σχήμα 64:



Σχήμα 64.Γενικό διάγραμμα MicroBlaze.

Ο MicroBlaze είναι ιδιαίτερα διαμορφώσιμος και επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει ένα συγκεκριμένο σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που απαιτούνται σύμφωνα με το σχεδιασμό του. Το σταθερό σύνολο χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του επεξεργαστή περιλαμβάνει τα εξής:

• Τριάντα δύο 32 bit καταχωρητές γενικού σκοπού.

- 32 bit εντολές με τρεις τελεστέους και δυο τρόπους διεύθυνσιοδότησης.
- 32 bit bus διευθύνσεων.
- Movó pipeline.

Εκτός από αυτά τα στατικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα ο επεξεργαστής MicroBlaze παραμετρικοποιείται έτσι ώστε είναι για να επιτρέψει ορισμένα πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Στον παρακάτω πίνακα 4 παρατίθονται κάποια από τα χαρακτηριστικά αυτά γνωρίσματα που υποστηρίζουν διάφορες εκδόσεις του MicroBlaze.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα διάφορων εκδόσεων του MicroBlaze

Feature	MicroBlaze Versions			
	v2.00a	v2.10a	v3.00a	v4.00a
Version Status	deprecated	deprecated	deprecated	active
On-chip Peripheral Bus (OPB) data side interface	option	option	option	option
On-chip Peripheral Bus (OPB) instruction side interface	option	option	option	option
Local Memory Bus (LMB) data side interface	option	option	option	option
Local Memory Bus (LMB) instruction side interface	option	option	option	option
Hardware barrel shifter	option	option	option	option
Hardware divider	option	option	option	option
Instruction cache	option	option	option	option
Data cache	option	option	option	option
Hardware debug logic	option	option	option	option
Fast Simplex Link (FSL) interfaces	0-7	0-7	0-7	0-7
Machine status set and clear instructions	-	option	option	option
CacheLink support	-	-	option	option
Hardware exception support	-	-	option	option
Pattern compare instructions	-	-	-	option
Floating point unit (FPU)	-	-	-	option
Disable hardware multiplier ¹	-	-	-	option
Hardware debug readable ESR and EAR	-	-	-	Yes

1. Used in Virtex-II and subsequent families, for saving MUL18 or DSP48 primitives

5.2 Διεπαφή μεταξύ σχεδίασης και σειριακής θύρας

Στη συγκεκριμένη εργασία η χρήση του Microblaze έχει σκοπό να δημιουργήσει διεπαφή μεταξύ της υλοποίησης σε VHDL του ισχυομέτρου και της σειριακής θύρας. Για να επιτευχθεί η διεπαφή χρησιμοποιήθηκαν από τον παραπάνω πίνακα το OPB (On chip peripheral bus) interface καθώς και το FSL (Fast simplex link) interface [24] με τρόπο που παρουσιάζετε στο παρακάτω σχήμα 65:



Σχήμα 65. Το γενικό διάγραμμα του interface.

Ο πυρήνας MicroBlaze οργανώνεται ως αρχιτεκτονική του Χάρβαρντ με χωριστά buses interfaces για την πρόσβαση δεδομένων και τις πρόσβαση εντολών. Οι διεπαφές που υποστηρίζονται είναι οι ακόλουθες τρεις:

- Τοπικό bus μνήμης (LMB).
- Περιφερειακό bus της IBM (OPB).
- Xilinx CacheLink (XCL).

Το LMB παρέχει την πρόσβαση μονού-κύκλου στη block RAM .Η CacheLink διεπαφή προορίζεται για χρήση σε συνδυασμό με εξωτερικούς ελεγκτές μνήμης. Η διεπαφή OPB παρέχει σύνδεση με on-chip και off-chip περιφερειακές μονάδες καθώς και με τη μνήμη.Ο microblaze επίσης υποστηρίζει 8 θύρες γρήγορης μονοκατευθυντικής σύνδεσης (FSL). Κάθε μια από αυτές τις 8 θύρες διαθέτει μια κύρια (master) και μια δευτερεύουσα (slave) διεπαφή FSL. Στη παρούσα εργασία αυτό που ενδιαφέρει είναι η σύνδεση του microblaze με τη σειριακή θύρα και για αυτό το σκοπό όπως χρησιμοποιήθηκε η διεπαφή. Από το σχήμα 65 φαίνεται ότι η σύνδεση του microblaze με το project VHDL του ισχυομέτρου πραγματοποιήθηκε με διεπαφή FSL.

5.2.1 Γρήγορη μονοκατευθυντική σύνδεση (FSL)

Το FSL_V20, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα υλοποίηση, είναι ένα ομοιοκατευθυνόμενο κανάλι επικοινωνίας από σημείο σε σημείο που χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει επικοινωνία μεταξύ οποιωνδήποτε δύο στοιχείων σχεδίασης της FPGA κατά την εφαρμογή μιας διεπαφής με FSL. Η διεπαφή FSL είναι διαθέσιμη στον επεξεργαστή Xilinx MicroBlaze. Οι διεπαφές χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν στοιχεία από και προς τον επεξεργαστή στην FPGA.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του FSL είναι:

- Εφαρμόζει επικοινωνία από σημείο προς σημείο βασισμένο σε FIFO ουρά.
- Παρέχεται ο μηχανισμός για ubshared και non-arbitrated επικοινωνία. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη γρήγορη μεταφορά δεδομένων-λέξεων μεταξύ της master και slave εφαρμογή της διεπαφής FSL.

- Παρέχει ένα πρόσθετο bit ελέγχου για το σχολιασμό των στοιχείων που διαβιβάζονται. Αυτό το κομμάτι ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη slave διεπαφή για πολλαπλάσιους σκοπούς. Παραδείγματος χάριν, για να αποκωδικοποιήσει τη λέξη που διαβιβάζεται ως λέξη ελέγχου ή για να χρησιμοποιήσει το κομμάτι για να δείξει την έναρξη ή το τέλος της μετάδοσης ενός πλαισίου.
- Η FIFO ουρά μπορεί να έχει βάθος από ένα ως 8Κ.
- Υποστηρίζει σύγχρονο και ασύγχρονο τρόπο λειτουργίας της FIFO ουράς.
 Αυτό επιτρέπει στη κύρια και τη δευτερεύουσα μεριά της διεπαφής FSL να μπορεί να έχει διαφορετικό ρολόι.
- Υποστηρίζει SRL16 και δίπορτη LUT RAM ή Block RAM βασισμένη στη FIFO υλοποίηση.

Το block διάγραμμα του FSL παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 66.



Σχήμα 66. Γενικό διάγραμμα διαύλου FSL.

Τα παραπάνω σήματα αντιστοιχούν:

- FSL_M_Clk: Αυτό το σήμα παρέχει το ρολόι εισόδου στη master διεπαφή του FSL bus όταν χρησιμοποιείται η ασύγχρονη λειτουργία της FIFO.
- FSL_M_Data: Τα δεδομένα εισόδου στη master διεπαφή του FSL bus.
- FSL_M_Control: Σήμα ελέγχου 1 bit το οποίο διαβιβάζεται μαζί με τα δεδομένα εισόδου σε κάθε κύκλο ρολογιού.
- FSL_M_Write: Σήμα εισόδου που ελέγχει αν μπορούν να εγγραφούν δεδομένα στη master διεπαφή της FIFO.

- FSL_M_FULL: Σήμα εξόδου της master διεπαφής που δηλώνει ότι η FIFO είναι γεμάτη.
- FSL_S_Clk: Αυτό το σήμα παρέχει το ρολόι εισόδου στη slave διεπαφή του FSL bus όταν χρησιμοποιείται η ασύγχρονη λειτουργία της FIFO.
- FSL_S_Data: Τα δεδομένα εξόδου στη slave διεπαφή του FSL bus.
- FSL_S_Control: Σήμα ελέγχου 1 bit το οποίο διαβιβάζεται μαζί με τα δεδομένα εξόδου σε κάθε κύκλο ρολογιού.
- FSL_S_Read: Σήμα εξόδου της slave διεπαφής το οποίο ελέγχει τη λειτουργία διαβάσματος της FIFO.
- FSL_S_Exists: Σήμα εξόδου της slave διεπαφής το οποίο δηλώνει ότι η FIFO περιέχει έγκυρα δεδομένα.

Στο παρόν project κρίθηκε απαραίτητη η εγκατάσταση δυο bus FSL V20. Στο πρώτο τέθηκε master το VHDL project του ισχυομέτρου και slave o microblaze. Στο δεύτερο τέθηκε master o microblaze και slave το VHDL project του ισχυομέτρου. Το πρώτο bus χρησιμεύει στο να στέλνονται οι μετρήσεις του ισχυομέτρου στον MicroBlaze (από εκεί στέλνονται στη σειριακή μέσω του OPB). Συγκεκριμένα το VHDL project δίνει με πολυπλεξία στο χρόνο μια μέτρηση κάθε φορά στην έξοδο του. Η μέτρηση αυτή περιλαμβάνει τα δεδομένα που είναι 28 Bit συν 4 bit που χρησιμεύουν στον προσδιορισμό της μέτρησης αυτής. Έτσι στη συνέχεια ο microblaze δεχόμενος τις μετρήσεις τις προωθεί στη σειριακή με ένα αναγνωριστικό χαρακτήρα για το τι αντιπροσωπεύει κάθε μια μέτρηση. Το δεύτερο bus χρησιμεύει στο να στέλνονται πληροφορίες από τον microblaze στο περιφερειακό VHDL project. Συγκεκριμένα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει κάποια χαρακτηριστικά λειτουργίας του ισχυομέτρου όπως είναι για παράδειγμα σε ποιο mode θα λειτουργεί ή για πόση χρονική διάρκεια θα μετρήσει ενέργεια. Αυτές οι εντολές δίνονται από το PC καταλήγουν στην σειριακή θύρα και από εκεί μέσω της διεπαφής OPB στον Microblaze. Στη συνέχεια ο Microblaze ως master του συγκεκριμένου FSL bus στέλνει την πληροφορία στο περιφερειακό VHDL project. Για την υλοποίηση αυτών των bus επιλέχθηκε FIFO μιας θέσης. Για τα δεδομένα επιλέχθηκε το μέγιστο δυνατόν μέγεθος 32 bit.

5.3 Προβολή μετρήσεων σε γραφικό περιβάλλον με χρήση Visual Basic

Το επόμενο βήμα της παρούσας εργασίας είναι η διαχείριση των δεδομένων της σειριακής θύρας από ένα πρόγραμμα, με σκοπό την τελική εμφάνιση τους σε γραφικό περιβάλλον στην οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή. Το πρόγραμμα το οποίο επιλέχθηκε έτσι ώστε να παρουσιαστούν οι μετρήσεις του ισχυομέτρου σε γραφικό περιβάλλον είναι η Visual Basic 6. Το πλεονέκτημα της χρήσης του συγκεκριμένου προγράμματος, είναι η εύχρηστη και γρήγορη επικοινωνία που παρουσιάζει αυτό με τη σειριακή. Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε Visulal Basic έχει δυο κύριες κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση είναι αυτή της αποκρυπτογράφησης των δεδομένων της σειριακής και η δεύτερη είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στην οθόνη.

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο αναπτύχθηκε ο τρόπος διαχείρισης των δεδομένων από το πρόγραμμα C που αναπτύχθηκε στο EDK. Το πρόγραμμα αυτό ουσιαστικά επεξεργάζεται τα δεδομένα που δέχεται από το VHDL project και με μια περαιτέρω διαδικασία που θα αναλυθεί στη συνέχεια τα προωθεί στη σειριακή. Επειδή η σειριακή λειτουργεί με ASCII χαρακτήρες το πρόγραμμα C στέλνει στη σειριακή τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την προσθήκη ενός ειδικού χαρακτήρα στο τέλος κάθε πληροφορίας που στέλνεται. Ο πρόσθετος αυτός χαρακτήρας είναι διαφορετικός για κάθε πληροφορία-μέτρηση και χρησιμεύει για την αποκωδικοποίηση αυτής από τη Visual Basic.

Το πρώτο βήμα για τη διαχείριση της σειριακής θύρας σε περιβάλλον Visual Basic είναι η αρχική επιλογή από το μενού της Visual Basic. Συγκεκριμένα από το path Project-Compnents επιλέγεται η επιλογή MSComm Control. Στη συνέχεια με τη χρήση της συνάρτησης "Private Sub cmdStart_Click()" αρχικοποιούνται οι ρυθμίσεις της σειριακής θύρας που χρησιμοποιείται. Για την εφαρμογή που εκπονήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας οι ρυθμίσεις αυτές είναι

- Baud rate 9600 bits/sec.
- Μη διαθέσιμο parity bit.
- Μέγεθος δεδομένων 8 bit.

• Ένα stop bit.

Μια άλλη σημαντική συνάρτηση είναι η "Private Sub cmdSend_Click()" μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να στείλει δεδομένα στην σειριακή. Αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιείται προκειμένου ο χρήστης να διαλέξει σε ποιο mode θα λειτουργεί το ισχυόμετρο και επίσης για να επιλέξει το χρονικό διάστημα μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας. Αντίθετα τα δεδομένα λαμβάνονται από την σειριακή με χρήση της συνάρτησης "Private Sub txtReceivedText_Change()"

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα δεδομένα που στέλνονται από την FPGA στη σειριακή έχουν ένα πρόσθετο bit αναγνωριστικό. Με τη συνάρτηση "InStr()"εντοπίζεται αρχικά ο χαρακτήρας που προσδιορίζει μια συγκεκριμένη μέτρηση. Για παράδειγμα η InStr(txtReceivedText, "A") εντοπίζει αν η πληροφορία που στέλνεται από τη σειριακή έχει στο τέλος της τον χαρακτήρα Α που αντιστοιχεί για παράδειγμα στην μέτρηση της στιγμιαίας τάσης που έχει το φορτίο στα άκρα του. Με αυτό τον τρόπο εντοπίζονται και κατατάσσονται όλες οι μετρήσεις και εν συνεχεία με χρήση της συνάρτησης Replace() ο χαρακτήρας προσδιορισμού αφαιρείται. Τέλος το καθαρό πια αποτέλεσμα προβάλλεται ανάλογα με την μέτρηση στο κατάλληλο σημείο(Label). Για παράδειγμα αν θέλουμε να προβληθεί στο τέταρτο Label η μέτρηση της στιγμιαίας καλείται η εντολή "Label4.Caption = stigmiaia_tasi".

6. Πειραματικά αποτελέσματα ισχυομέτρου

Το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας (σχήμα 67) υποβλήθηκε σε ποικίλες μετρήσεις προκειμένου να αξιολογηθούν οι ακριβείς δυνατότητές του.



Σχήμα 67. Το ισχυόμετρο της παρούσας υλοποίησης.

Στα πλαίσια αυτών των μετρήσεων έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του ισχυομέτρου της εργασίας αυτής με τα αποτελέσματα ενός ισχυομέτρου του εμπορίου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται κάτω από τις ίδιες συνθήκες και για τα 2 ισχυόμετρα έτσι ώστε να είναι απόλυτα ακριβής. Το ισχυόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση είναι το FLUKE 43B power quality analyzer. Το

συγκεκριμένο όργανο μέτρησης παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια και είναι από τα καλύτερα της κατηγορίας του. Αναλυτικά τα βασικά του χαρακτηριστικά του είναι:

- Μέτρηση πραγματικής rms τιμής τάσης (ac+dc) από 0-1250 Volt με ακρίβεια ±1%.
- Μέτρηση πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος (ac+dc) από 0-1250 kAmpere με ακρίβεια ±1%.
- Μέτρηση συχνότητας με εύρος συχνοτήτων 0-15 KHz και ακρίβεια ±0.5%.
- Μέτρηση μέσης ισχύος για μονοφασικά και τριφασικά συστήματα με εύρος 0-1,56 Gwatt και ακρίβεια ±4% σε σχέση με την ισχύ αναφοράς και ±2% σε σχέση με την συνολική ισχύ.
- Μέτρηση συντελεστή ισχύος με εύρος τιμών 0-1 και ακρίβεια ±0.04%.
- Μέτρηση των 51 πρώτων αρμονικών με ακρίβεια ±3% για τη θεμελιώδη, ±5% για τις αρμονικές 2-31 και ±15% για τις αρμονικές 32-51.
- Μέτρηση THD με εύρος τιμών 0%-99.99% και ακρίβεια ±3%.
- Μέτρηση διαταραχών sags-swells με ακρίβεια ±2%.
- Μέτρηση inrush ρευμάτων με ακρίβεια ±5%.
- Δυνατότητα εγγραφής δεδομένων από 4 λεπτά ως 16 ημέρες.

Επίσης για τον ίδιο σκοπό της σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν και όργανα που επίσης διαθέτει το εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης και είναι:

- Ψηφιακό πολύμετρο Hewlett Packard τύπου 3466Α.
- Ψηφιακό πολύμετρο της GW τύπου 8035F.
- Τροφοδοτικό ακριβείας Hewlett Packard τύπου E3630A.
- Γεννήτρια κυματομορφών της GW τύπου GFG-813.

Όλα τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 68.


Σχήμα 68. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις.

6.1 Εισαγωγή στο περιβάλλον των μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο οι μετρήσεις του ισχυομέτρου της παρούσας εργασίας εμφανίζονται σε γραφικό περιβάλλον στην οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή. Σε αυτό το σημείο θα δοθούν τα αποτελέσματα κάποιων μετρήσεων προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι μετρήσεις καθώς και να παρουσιαστεί το γραφικό περιβάλλον της Visual Basic.

Αρχικά η πρώτη φόρμα που εμφανίζεται στον χρήστη όταν ξεκινήσει η εφαρμογή δίνεται στο σχήμα 69.



Σχήμα 69. Πρώτη φόρμα διεπαφής υποδοχής χρήστη.

Στην συνέχεια ο χρήστης επιλέγοντας το κουμπί "Συνέχεια" περνάει στην επόμενη φόρμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 70.



Σχήμα 70. Δεύτερη φόρμα διεπαφής-επιλογή χρήστη του mode λειτουργίας του ισχυομέτρου.

Σε αυτή την φόρμα ο χρήστης καλείται να επιλέξει τον τρόπο λειτουργίας με τον οποίο θα λειτουργήσει το ισχυόμετρο. Επιλέγοντας το mode1 το ισχυόμετρο μετρά παραμέτρους ισχύος μιας οποιασδήποτε περιοδικής κυματομορφής εισόδου. Η τρίτη φόρμα (κουμπί "Mode1") εμφανίζει τις παραμέτρους αυτές και στο σχήμα 71 παρουσιάζεται μια τέτοια φόρμα που αναφέρεται σε μετρήσεις που έγιναν στο κύκλωμα του σχήματος 74 με φορτίο 23.5 Ω.

🖻 РМЗ								
Επιλέξτα ενέργει	ε για πόι α της κι	σους περιά ψατομορφ	όδους θα υπολογιστεί οής εισόδου	n	Send	comm port	1	
Επιλέξτε start για εμα	ράνιση ι	αποτελεσμ	άτων Start					
Στιγμιαίο ρεύμα	83	mΑ	Μέση τιμή ρεύματος	305	mΑ	Διαφορά φάσης	179	0
Στιγμιαία τάση	5644	mV	Μέση τιμή τάσης	6171	mV	Διαφορά χρόνου	999	μs
Στιγμιαία ισχύ	1269	m₩	Περίοδος	49977	mHz	Συντελεστής ισχύς	-999	
Μέση ισχύ	1881	m₩	THD κυματομορφής ρευματος	3	%	Άεργος ισχύς	32	Var
Ενέργεια	19268	314mWµs	THD κυματομορφής τάσης	3	%	Πραγματικό μέρος μιγαδικής ισχύς	3140	
				Exit				

Σχήμα 71. Τρίτη φόρμα.-μετρήσεις ισχυομέτρου σε mode λειτουργίας 1 για φορτίο 23.5 Ω.

Στη φόρμα αυτή ο χρήστης εκκινεί τη διαδικασία εγκαθίδρυσης επικοινωνίας με τη σειριακή επιλέγοντας το κουμπί "Start". Στη συνέχεια δίνει σαν είσοδο των αριθμών των περιόδων για τους οποίους επιθυμεί να μετρηθεί η ενέργεια που καταναλώνεται στο φορτίο και έπειτα επιλέγει το κουμπί "Send". Το αποτέλεσμα είναι από τη σειριακή να μεταφερθούν στην συγκεκριμένη φόρμα 15 διαφορετικές μετρήσεις που πραγματοποιεί τι ισχυόμετρο. Επιλέγοντας το κουμπί "Exit" ο χρήστης μπορεί να τερματίσει τη σύνδεση με τη σειριακή.

Από την δεύτερη φόρμα ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το κουμπί "Mode2" θέτοντας έτσι το ισχυόμετρο στην αντίστοιχη λειτουργία. Σε αυτή την λειτουργία το ισχυόμετρο κάνει 5 συγκεκριμένες μετρήσεις για οποιεσδήποτε κυματομορφές εισόδου. Έτσι στο mode 2 μπορεί να μετρηθεί από μια dc είσοδο (σχήμα 72), μια μη περιοδική κυματομορφή αλλά και μια περιοδική κυματομορφή (σχήμα 73). Όλες οι μετρήσεις σε αυτό το mode γίνονται με τη μέγιστη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας.

🖻 PM4				
Επιλέξτε η ενέργε	το χρόνο ια της κυμ	σε ms για τον οπο ιατομορφής εισόδ	ίο θα υπολογιστεί ου	Send
Επιλέξτε start για ε	μφάνιση	αποτελεσμάτων	Start	
comm port				
Στιγμιαίο ρεύμα	411	mA		
Στιγμιαία τάση	6254	mV		
Στιγμιαία ισχύ	57	m₩		
Μέση ισχύ	2311	m₩		
Ενέργεια	2675	μWs		
		(
E:	kit			

Σχήμα 72. Τέταρτη φόρμα.-μετρήσεις ισχυομέτρου σε mode λειτουργίας 2.

PM4			
Επιλέξτε η ενέργε	το χρόνο ια της κυ	σε ms για τον οπο ιατομορφής εισόδ	ίο θα υποἰογιστεί
Επιλέξτε start για ε	μφάνιση	αποτελεσμάτων	Start
comm port		32	í
Στιγμιαίο ρεύμα	1254	mA	
Στιγμιαία τάση	1235	mV	
Στιγμιαία ισχύ	1760	mW	
Μέση ισχύ	1605	mW	
Ενέργεια	3198	μΨμs	
E	kit		

Σχήμα 73. Τέταρτη φόρμα.-μετρήσεις ισχυομέτρου σε mode λειτουργίας 2 για dc τάση 1,23V και dc ρεύμα 1,25A.

Στη τέταρτη φόρμα (όπως και στη δεύτερη) ο χρήστης εκκινεί τη διαδικασία εγκαθίδρυσης επικοινωνίας με τη σειριακή επιλέγοντας το κουμπί "Start". Στη συνέχεια δίνει σαν είσοδο τον χρόνο (σε msec) για τον οποίο επιθυμεί να μετρηθεί η πραγματική μέση ισχύς αλλά και η ενέργεια που καταναλώνεται στο φορτίο και έπειτα επιλέγει το κουμπί "Send". Το αποτέλεσμα είναι από τη σειριακή να

μεταφερθούν στην συγκεκριμένη φόρμα 5 διαφορετικές μετρήσεις που πραγματοποιεί τι ισχυόμετρο. Επιλέγοντας το κουμπί "Exit" ο χρήστης μπορεί να τερματίσει τη σύνδεση με τη σειριακή.

6.2 Μετρήσεις κυματομορφής δικτύου με χρήση μετασχηματιστή

Μια από τις βασικές μετρήσεις που έγιναν στα πλαίσια της αξιολόγησης του ισχυομέτρου της εργασίας αυτής είναι η μέτρηση των παραμέτρων ισχύος ενός φορτίου το οποίο συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης. Αναλυτικά το κύκλωμα με βάση το οποίο πραγματοποιείται το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 74.



Σχήμα 74. Διάγραμμα κυκλώματος υποβιβασμού τάσης και οδήγησης κυματομορφών στους αντίστοιχους Α/D (R1=0.82 Ω, R=R3=1KΩ).

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται είναι Philips με δυνατότητα ρύθμισης τάσης εξόδου 0-260 Volt και ονομαστική τιμή έντασης ρεύματος 2.5 Ampere. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα ρυθμίζεται σε τάση εξόδου 10 Volt. Για τον περαιτέρω υποβιβασμό της τάσης σε πλαίσια συμβατά με την είσοδο του μετατροπέα A/D χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης τάσης αποτελούμενος από τις αντιστάσεις R2,R3

1 ΚΩ και τύπου metal film για μεγαλύτερη ακρίβεια. Σαν αποτέλεσμα η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας με το 2 (αφού R1=R2) την τάση στα άκρα της αντίστασης R3. Η αντίσταση R1 (0,82 Ω metal film) χρησιμοποιείται ως αντίσταση μέτρησης έντασης ρεύματος δηλαδή μετρώντας την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της με βάση την σχέση 37 υπολογίζεται η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.82}$$
(37)

Προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις κρίθηκε απαραίτητη η ενίσχυση της κυματομορφής που αντιστοιχεί στο ρεύμα. Συγκεκριμένα και επειδή οι μετρήσεις γίνονται για χαμηλές τιμές έντασης ρεύματος η αντίστοιχη κυματομορφή τάσης στα άκρα της αντίστασης R1 παρουσιάζει πολύ χαμηλή peak-to-peak τιμή. Ενισχύοντας αυτή την κυματομορφή απαλείφεται τυχόν σφάλμα κβαντισμού που μπορεί να εμφανιστεί στον A/D μετατροπέα όταν αυτός λειτουργεί σε τόσο χαμηλό range τιμών. Για την επίτευξη της ενίσχυσης χρησιμοποιείται ο τελεστικός ενισχυτής μεγάλης ακρίβειας OP 07CN σε διάταξη που εμφανίζεται στο σχήμα 75.



Σχήμα 75. Συνδεσμολογία τελεστικού ενισχυτή για κέρδος τάσης.

Η παραπάνω συνδεσμολογία παρουσιάζει κέρδος τάσης σύμφωνα με την σχέση:

$$Tάση εξόδου = Tάση εισόδου \cdot (1 + \frac{R2}{R1})$$
(38)

Έτσι με την κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων R1,R2 οι οποίες είναι metal film για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογίζεται η ενίσχυση της κυματομορφής που αντιστοιχεί στο ρεύμα ανάλογα με τις ανάγκες του κυκλώματος.

Μετά την πλήρη ανάλυση του κυκλώματος που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτού του σετ μετρήσεων στη συνέχεια ακολουθεί αναφορά των μετρήσεων που πάρθηκαν και ανάλυση αυτών. Η διαδικασία των μετρήσεων ακολούθησε την παρακάτω διαδικασία. Στο κύκλωμα του σχήματος 74 εφαρμόσθηκαν διάφορα φορτία και για κάθε φορτίο έγιναν μετρήσεις όπως αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5. Σύγκριση ισχυομέτρου FLUKE43B με ισχυόμετρο παρούσας υλοποίησης για φορτίο 10,2Ω.

FLUKE 43B	Power meter		Σύγκριση %
	υλοποίησης	Digital	
		plymeter	

Συχνότητα Hz	50.03	49.995		0.06
Τάση (true rms) V	5.276	5.234		0.7
ΤΗD τάσης %	3.1	3.1		0
Ρεύμα (true rms) A	0.66	0.585	0.573	12/2
ΤΗD ρεύματος %	3.1	3		3
Μέση ισχύ W	3.42	3.089	3.023	9.6/2
Συντελεστής ισχύος	0.998	0.999		0.1
Άεργος ισχύς Var	0.17	0.15		11

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν όταν στη θέση του φορτίου τοποθετήθηκε ωμική αντίσταση 10,2 Ω. Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν άλλοι 5 παρόμοιοι πίνακες για φορτία 5.1 Ω,15.3 Ω,23.5 Ω,47 Ω και 94 Ω. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε κάθε πίνακα είναι τα εξής:

 Μέτρηση συχνότητας από το Fluke 43B, μέτρηση συχνότητας από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.

- Μέτρηση πραγματικής rms τιμής τάσης από το Fluke 43B, μέτρηση πραγματικής rms τιμής τάσης από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση THD τιμής της κυματομορφής τάσης από το Fluke 43B, μέτρηση THD τιμής της κυματομορφής τάσης από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος από το Fluke 43B, μέτρηση πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε, μέτρηση πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος από το ψηφιακό πολύμετρο του εργαστηρίου και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση THD τιμής της κυματομορφής ρεύματος από το Fluke 43B, μέτρηση THD τιμής της κυματομορφής ρεύματος από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση πραγματικής μέσης ισχύος από το Fluke 43B, μέτρηση πραγματικής μέσης ισχύος από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε, υπολογισμός πραγματικής μέσης ισχύος σύμφωνα με την ένταση του ρεύματος του πολυμέτρου του εργαστηρίου σε συνδυασμό με την τάση του Fluke και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση συντελεστή ισχύος από το Fluke 43B, μέτρηση συντελεστή ισχύος από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.
- Μέτρηση άεργου ισχύος από το Fluke 43B, μέτρηση άεργου ισχύος από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και σύγκριση % αυτών των τιμών.

Η χρήση του ψηφιακού πολυμέτρου του εργαστηρίου κρίθηκε απαραίτητη διότι παρατηρήθηκε ότι το Fluke 43B παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις στη μέτρηση μικρών τιμών έντασης ρεύματος. Ο λόγος είναι ότι το Fluke 43B μετρά την ένταση του ρεύματος με την αρωγή μιας αμπερομετρικής πένσας η οποία δεν παρουσιάζει ακρίβεια σε χαμηλές τιμές έντασης ρεύματος. Για το λόγο αυτό και για καλύτερη σύγκριση αποτελεσμάτων η ένταση του ρεύματος μετράται και με πολύμετρο. Η μέση ισχύς που μετρά το Fluke 43B μπορεί επίσης να παρουσιάζει απόκλιση για τον ίδιο λόγο (κακή μέτρηση ρεύματος) και για αυτό το λόγο υπολογίζεται επιπρόσθετα η μέση ισχύς πολλαπλασιάζοντας την τάση που μετρά

το Fluke 43B με την ένταση του ρεύματος που μετράει το πολύμετρο. Οι % συγκρίσεις που έγιναν υπολογίστηκαν με βάση τη σχέση 39:

$$\Sigma \acute{\upsilon} \gamma \kappa \rho \imath \sigma \eta = 100 \cdot \frac{|\mu \acute{\varepsilon} \tau \rho \eta \sigma \eta_{Fluke} - \mu \acute{\varepsilon} \tau \rho \eta \sigma \eta_{power_meter}|}{\mu \acute{\varepsilon} \tau \rho \eta \sigma \eta_{Fluke}} \%$$
(39)

όπου μέτρηση_{Fluke} η μέτρηση που λαμβάνεται από το ισχυόμετρο Fluke 43B ενώ όπου μέτρηση_{power_meter} η μέτρηση που λαμβάνεται από το ισχυόμετρο της παρούσας υλοποίησης.

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτουν τα διαγράμματα που ακολουθούν και μας δίνουν μια πρώτη εικόνα για τις δυνατότητες του ισχυομέτρου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής τη εργασίας. Αρχικά δίνονται τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις διακυμάνσεις της τάσης (σχήμα 76), της έντασης του ρεύματος (σχήμα 77) αλλά και της ισχύος (σχήμα 78) που καταναλώνει το φορτίο, σε σχέση με την τιμή του φορτίου αυτού.



Σχήμα 76. Διάγραμμα μετρήσεων true rms τιμής τάσης από τα δυο ισχυόμετρα(Fluke 43B,ισχυόμετρο υλοποίησης) για διαφορετικά φορτία.



Σχήμα 77. Διάγραμμα μετρήσεων true rms τιμής έντασης ρεύματος από τα δυο ισχυόμετρα(Fluke 43B,ισχυόμετρο υλοποίησης) και από το πολύμετρο για διαφορετικά φορτία.





Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερή η ταύτιση των μετρήσεων σε μεγάλο βαθμό αν εξαιρεθεί η μέτρηση ρεύματος από το Fluke 43B που όπως είχε προαναφερθεί αποκλίνει. Αναλυτικότερα σε ποσοστά απόκλισης % τα διαγράμματα για τις ίδιες μετρήσεις παρουσιάζονται στα σχήματα 79,80 και 81.



Σχήμα 79. Σύγκριση % rms τιμής τάσης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του Fluke 43B.



Σχήμα 80. Σύγκριση % rms τιμής έντασης ρεύματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του Fluke 43B και σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του πολυμέτρου.



Σχήμα 81. Σύγκριση % τιμής μέσης ισχύος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του Fluke 43B και σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που υπολογίζεται.

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω διαγράμματα είναι η σε μεγάλο βαθμό ταύτιση των μετρήσεων της rms τιμής της τάσης που παρουσιάζει το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B. Συγκεκριμένα τα δυο όργανα για όλα τα φορτία παρουσιάζουν απόκλιση τιμών κάτω του 1% (κυμαίνεται από 0.3%-0.8%). Η σύγκριση του ισχυομέτρου της υλοποίησης με το Fluke 43B όσον αφορά την ένταση του ρεύματος παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ποσοστό σφάλματος το οποίο κυμαίνεται από 3%-17%. Το σφάλμα αυτό οφείλεται λόγω της χαμηλής ακρίβειας της αμπερομετρικής πένσας του Fluke 43B και αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι το ποσοστό σφάλματος για την ίδια μέτρηση μεταξύ του ισχυομέτρου της υλοποίησης και του Fluke είναι σημαντικά μικρότερο ως και αμελητέο (0%-3%). Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα ποσοστού σφάλματος μέσης ισχύος. Λόγω της όχι καλής ακρίβειας του Fluke στη μέτρηση ρεύματος και τα αντίστοιχα διαγράμματα ισχύς του Fluke παρουσιάζει ποσοστά σφάλματος πολύ υψηλά σε σχέση με το ισχυόμετρο της παρούσας υλοποίησης (3%-15%). Αντίθετα οι τιμές μέσης ισχύος του ισχυομέτρου της υλοποίησης παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις τιμές της μέσης ισχύος που υπολογίσθηκαν με πολλαπλασιασμό των τιμών τάσης του Fluke με τις αντίστοιχες τιμές έντασης ρεύματος του πολυμέτρου. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης αυτής είναι 1%-5%.

Η μέτρηση της συχνότητας επίσης παρουσιάζει μεγάλη σύγκλιση τιμών ανάμεσα στα δυο ισχυόμετρα όπως παρουσιάζεται από τον επόμενο πίνακα 6.

Φοοτίο	Συγνότητα (Hz)	Συγνότητα (Hz)	Σύνκοιση %
Φορτιο	FLUKE 43B	Power meter	
	I LOKE 45D	I ower meter	
5.1 Ω	50	49.979	0.042
10.2 Ω	50.03	49.995	0.069958
15.3 Ω	50	50.028	0.056
23.5 Ω	49.95	49.875	0.15015
47 Ω	50	50.08	0.16
94 Ω	50.08	49.997	0.165735

Πίνακας 6. Σύγκριση τιμών συχνότητας για διαφορετικά φορτία.

Όπως παρουσιάζεται από τον πίνακα αλλά και από το διάγραμμα του σχήματος 82 το ισχυόμετρο της υλοποίησης παρουσιάζει εξαιρετική ακρίβεια στη μέτρηση της συχνότητας σε σχέση με το Fluke 43B. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος των δυο οργάνων σε όλες τις μετρήσεις συχνότητας είναι κάτω του 0.16%.



Σχήμα 82. Σύγκριση % συχνότητας που μετρά το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρά το Fluke 43B.

Μια άλλη μέτρηση στην οποία τα ισχυόμετρα παρουσιάζουν πολύ μεγάλο ποσοστό ταύτισης τιμών είναι η μέτρηση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής του ρεύματος αλλά και η αντίστοιχη μέτρηση για την κυματομορφή της τάσης. Οι πίνακες 7 και 8 παρουσιάζουν σε αντιστοιχία τις τιμές THD κυματομορφής τάσης και THD κυματομορφής ρεύματος που μετρούν τα 2 ισχυόμετρα.

Φορτίο	THD τάσης % FLUKE 43B	THD τάσης % Power meter	Σύγκριση %
5.1 Ω	3	3	0
10.2 Ω	3.1	3.1	0
15.3 Ω	3	2.9	3.333333
23.5 Ω	3.3	3.2	3.030303
47 Ω	3.1	3	3.225806
94 Ω	3.2	3.1	3.125

Πίνακας 7. Σύγκριση τιμών ΤΗD κυματομορφής τάσης για διαφορετικά φορτία.

Πίνακας 8. Σύγκριση τιμών THD κυματομορφής ρεύματος για διαφορετικά φορτία.

Φορτίο	ΤΗD ρεύματος FLUKE 43B %	THD ρεύματος Power meter %	Σύγκριση %
5.1 Ω	3.2	3.2	0
10.2 Ω	3.1	3	3.225806
15.3 Ω	3.5	3.5	0
23.5 Ω	3.5	3.6	2.857143
47 Ω	3	3	2.433333
94 Ω	4.1	4	4.761905

Όπως παρατηρείται από τους πίνακες 7 και 8 το Fluke 43B και το ισχυόμετρο της υλοποίησης μετρούν με τα ίδια σχεδόν αποτελέσματα την ολική αρμονική παραμόρφωση μιας κυματομορφής. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης THD τάσης του ισχυομέτρου της εργασίας αυτής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρά το Fluke 43B κυμαίνεται από 0%-3,33%. Το ποσοστό σφάλματος της σχέση με την αντίστοιχη τιμή που μετρά το Fluke 43B κυμαίνεται από 0%-4,76%

.Όπως γίνεται αντιληπτό τα ποσοστά σφάλματος (σχήμα 83) της μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης είναι πολύ μικρά κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις THD του ισχυομέτρου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι ακριβείς. Ένα επίσης ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι το THD που αντιστοιχεί στην κυματομορφή του ρεύματος είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το THD που αντιστοιχεί στην κυματομορφή της τάσης. Αυτό συμβαίνει διότι η κυματομορφή που αντιστοιχεί στην τάση έχει μεγαλύτερη peak-to-peak τιμή κάτι που οδηγεί σε μικρότερο THD σύμφωνα με τη σχέση 13. Αντίθετα η κυματομορφή που αντιστοιχεί στο ρεύμα έχει μικρότερη peak-to-peak τιμή κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερο THD σύμφωνα με την ίδια σχέση. Επίσης μια αξιοσημείωτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει στις μετρήσεις του THD των κυματομορφών είναι ότι κυμαίνονται μεταξύ 3%-4% και όχι 0% όπως είναι η ολική αρμονική παραμόρφωση ενός τέλειου ημιτόνου. Η εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι ότι η κυματομορφή δικτύου δεν είναι τέλειο ημίτονο καθώς επίσης και η παρουσία του μετασχηματιστή μπορεί να προσδίδει επιπλέον ολική αρμονική παραμόρφωση.



Σχήμα 83. Διάγραμμα σύγκρισης % μετρήσεων THD τάσης και ρεύματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B.

Δυο άλλες μετρήσεις που τίθενται προς σύγκριση μεταξύ των δυο ισχυομέτρων είναι ο συντελεστής ισχύος και η άεργος ισχύς. Τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν από τα 2 ισχυόμετρα παρουσιάζονται στους πίνακες 9 και 10.

Φορτίο	Συντελεστής	Συντελεστής	Σύγκριση %
	ισχύος	ισχύος	
	FLUKE 43D	Power meter	
5.1 Ω	0.999	0.997	0.2002
10.2 Ω	0.998	0.999	0.1002
15.3 Ω	0.999	0.999	0
23.5 Ω	1	1	0
47 Ω	1	1	0
94 Ω	1	1	0

Πίνακας. Σύγκριση τιμών συντελεστή ισχύος για διαφορετικά φορτία.

Πίνακας. Σύγκριση τιμών άεργου ισχύος για διαφορετικά φορτία.

Φορτίο	Άεργος ισχύς(var) FLUKE 43B	Άεργος ισχύς(var) Power meter	Σύγκριση %
5.1 Ω	0.172	0.291	69.18605
10.2 Ω	0.119	0.105	11.76471
15.3 Ω	0.03	0.04	33.33333
23.5 Ω	0	0	0
47 Ω	0	0	0
94 Ω	0	0	0

Από τους παραπάνω πίνακες μπορούν να εξαχθούν ποικίλα συμπεράσματα. Αρχικά παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση τιμών μεταξύ των δυο οργάνων στη μέτρηση του συντελεστή ισχύος. Σύμφωνα με τη θεωρία και επειδή το φορτίο είναι καθαρά ωμικό στοιχείο θα έπρεπε η κυματομορφή του ρεύματος να είναι απολύτως συμφασική με την κυματομορφή της τάσης, δηλαδή ο συντελεστής ισχύος να είναι πάντα 1. Στις μετρήσεις βλέπουμε ότι αυτό δεν συμβαίνει και αυτό οφείλεται στην παρουσία του μετασχηματιστή ο οποίος αλλοιώνει την καθαρά ωμική συμπεριφορά του κυκλώματος. Σαν αποτέλεσμα σε ορισμένες μετρήσεις οι κυματομορφές εμφανίζουν μικρή διαφορά φάσης άρα και συντελεστή ισχύος κοντά στο 1. Τα δύο όργανα εμφανίζουν πολύ μικρό σφάλμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 84, στην μέτρηση του συντελεστή ισχύος άρα υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στη συγκεκριμένη μέτρηση. Συγκεκριμένα το σφάλμα του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B στην μέτρηση του συντελεστή ισχύος είναι μικρότερο του 0,2%. Τα δεδομένα όμως αλλάζουν όσον αφορά την μέτρηση της άεργους ισχύος όπου παρουσιάζονται σχετικά μεγάλες αποκλίσεις στα 2 όργανα. Τα ποσοστά σφάλματος παρουσιάζουν διακυμάνσεις από 0%-69% όπως φαίνεται και στο σχήμα 85. Οι συγκεκριμένες αποκλίσεις οφείλονται στην αδυναμία του Fluke 43B να μετρήσει αξιόπιστα την μέση ισχύ που καταναλώνει το φορτίο και σαν αποτέλεσμα και την άεργο ισχύ. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως λόγω της χρήσης αμπερομετρικής πένσας το ισχυόμετρο Fluke 43B δεν παρουσιάζει ακρίβεια για χαμηλές τιμές ρεύματος.



Σχήμα 84. Διάγραμμα σύγκρισης % μετρήσεων συντελεστή ισχύος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για διαφορετικά φορτία.



Σχήμα 85. Διάγραμμα σύγκρισης % μετρήσεων άεργους ισχύος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για διαφορετικά φορτία

6.3 Μετρήσεις ημιτονοειδών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας

Ένα επίσης σημαντικό σετ μετρήσεων το οποίο έγινε στα πλαίσια της αξιολόγησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης της παρούσας εργασίας έχει ως επίκεντρο την συμπεριφορά του ισχυομέτρου καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε σχέση με το Fluke 43B το οποίο είναι από τα πιο αξιόπιστα όργανα του εμπορίου για τη μέτρηση υψηλών συχνοτήτων αφού θεωρητικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μπορεί να μετρήσει κυματομορφές έως 15 KHz. Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων δίνεται στο σχήμα 86.



Σχήμα 86. Τοπολογία κυκλώματος για μετρήσεις σε διάφορες συχνότητες.

Η γεννήτρια κυματομορφών του εργαστηρίου που χρησιμοποιείται ρυθμίζεται έτσι ώστε να παράγει ημιτονοειδή κυματομορφή στην έξοδο της. Επειδή η γεννήτρια μπορεί να παράγει στην έξοδο της πολύ μικρή ένταση ρεύματος οι τιμές της τάσης, της έντασης του ρεύματος αλλά και της ισχύος που μετρούνται είναι αρκετά μικρές. Με αυτό τον τρόπο δοκιμάζεται η ακρίβεια του οργάνου που υλοποιήθηκε σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό. Για την αποφυγή του σφάλματος κβαντισμού του μετατροπέα A/D οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος ενισχύονται με τη χρήση 2 τελεστικών ενισχυτών ακριβείας πριν οδηγηθούν στους αντίστοιχους μετατροπείς. Ο ακριβής τρόπος της ενίσχυσης και η τοπολογία των τελεστικών αναπτύχθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Το φορτίο στο συγκεκριμένο σετ μετρήσεων είναι 14,7 Ω και η συχνότητα μεταβάλλεται από 29 Hz έως 10500 Hz. Συγκεκριμένα στο διάστημα αυτό πάρθηκαν 45 διαφορετικές ομάδες μετρήσεων. Οι παράμετροι που εξετάζονται από τη κάθε ομάδα μετρήσεων είναι:

- Η συχνότητα που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και η % σύγκριση των τιμών αυτών.
- Η πραγματική rms τιμή τάσης που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και η % σύγκριση των τιμών αυτών.
- Η τιμή της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και η % σύγκριση των τιμών αυτών.
- Η πραγματική rms τιμή της έντασης του ρεύματος που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε, από το ψηφιακό πολύμετρο του εργαστηρίου και η % σύγκριση των τιμών αυτών.
- Η τιμή της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής του ρεύματος που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε και η % σύγκριση των τιμών αυτών.
- Η πραγματική μέσης ισχύς που μετράται από το Fluke 43B, από το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε, ο υπολογισμός της πραγματικής μέσης ισχύος σύμφωνα με την ένταση του ρεύματος του πολυμέτρου του εργαστηρίου σε συνδυασμό με την τάση του Fluke και η %σύγκριση των τιμών αυτών.

Περισσότερα σετ μετρήσεων εκπονήθηκαν στην περιοχή 0 Hz-2500 Hz όπου και τα δυο ισχυόμετρα παρουσίασαν μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις τους. Στο σχήμα 87 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μετρήσεων συχνότητας του ισχυομέτρου της παρούσας υλοποίησης αλλά και του Fluke 43B σε σχέση με την ένδειξη συχνότητας της γεννήτριας κυματομορφών. Όπως αναμενόταν το διάγραμμα αυτό έχει τη μορφή μιας ευθείας γραμμής. Για υψηλές συχνότητες όπου μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων η ευθεία γραμμή παρουσιάζει κλίση.



Σχήμα 87. Διάγραμμα συχνότητας που μετρήθηκε από το Fluke 43B αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο σχήμα 88 το ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση της συχνότητας του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B. Τα δυο όργανα παρουσιάζουν μεγάλη σύγκλιση τιμών. Συγκεκριμένα για συχνότητες 0Hz-3000 Hz τα δύο όργανα παρουσιάζουν σφάλμα μικρότερο του 1% στις 33 από τις 36 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα συχνότητας. Μετά τα 3 KHz το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται σταδιακά φτάνοντας το μέγιστο 8,78% για συχνότητα 10,5 KHz.



Σχήμα 88. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο σχήμα 89 το ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση της συχνότητας του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με τη γεννήτρια κυματομορφών GW GFG-813. Τα δυο όργανα παρουσιάζουν μεγάλη σύγκλιση τιμών. Συγκεκριμένα για συχνότητες 0 Hz-3000 Hz τα δύο όργανα παρουσιάζουν σφάλμα μικρότερο του 1% στις 35 από τις 36 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα συχνότητας. Μετά τα 3 KHz το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται σταδιακά φτάνοντας το μέγιστο 7,8% για συχνότητα 10,5 KHz.



Σχήμα 89. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε την γεννήτρια κυματομορφών.

Το επόμενο διάγραμμα του σχήματος 90 παρουσιάζει τις τιμές rms της τάσης που μέτρησαν τα δυο ισχυόμετρα σε σχέση με τη συχνότητα που μεταβαλλόταν. Παρατηρείται σύγκλιση τιμών σε μεγάλο βαθμό ειδικά για συχνότητες που κυμαίνονται από 0 KHz -3 KHz.



Σχήμα 90. Διάγραμμα τάσης rms που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα 91 παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το ισχυόμετρο Fluke 43B για την μέτρηση της rms τιμής της τάσης σε διάφορες συχνότητες. Για διακύμανση συχνότητας από 0 KHz-

2,5 KHz το ποσοστό σφάλματος σε 30 από τις 36 μετρήσεις είναι κάτω του 1% και οι υπόλοιπες 6 είναι μεταξύ του 1%-2%. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 2,5 KHz το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται σταδιακά αρχικά αγγίζοντας το 5% σε συχνότητες μέχρι 3,5KHz και τελικά φτάνοντας και το 35% για τιμές γύρω στα 10 KHz όπου και προφανώς τα ισχυόμετρα έχουν σταματήσει να μετρούν σωστά.



Σχήμα 91. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Ένα σημαντικό δεδομένο για την περαιτέρω ανάλυση της αξιοπιστίας των μετρήσεων των δυο οργάνων είναι ότι θεωρητικά από την ανάλυση του κυκλώματος η τιμή rms της τάσης δεν παρουσιάζει μεταβολές με την αύξηση της συχνότητας. Σε θεωρητικό δηλαδή επίπεδο η τιμή rms της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου του σχήματος 86 παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της συχνότητας της ημιτονοειδής κυματομορφής εισόδου. Με βάση τις 10 πρώτες τιμές που μετρούν τα δύο όργανα, για συχνότητες 0 Hz-370 Hz, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών ο οποίος είναι 314,14 mV. Η τιμή αυτή της τάσης θεωρείται ακριβής αφού τα όργανα σε χαμηλές συχνότητες μετρούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Με βάση αυτή την τιμή η οποία θεωρητικά θα έπρεπε να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της συχνότητας σχεδιάσθηκε το διάγραμμα του σχήματος 92. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απόκλισης των δυο ισχυομέτρων από την θεωρούμενη σωστή τιμή μέτρησης των 314,14 mV.



Σχήμα 92. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης και από το Fluke 43B σε σχέση με τη μέση τιμή 314,14 mV.

Σε περιοχές συχνότητας 0 KHz έως 2,5 KHz τα δύο όργανα παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ακρίβεια και το σφάλμα τους σε σχέση με την τιμή 314,14 mV είναι κάτω του 1% σε 65 από τις 68 συνολικά μετρήσεις. Μέχρι και τα 4,2 KHz τα δυο όργανα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και το ποσοστό σφάλματος αγγίζει το 4%.Μετά τα 4 KHz τα ποσοστά σφάλματος αυξάνονται και για τα δυο ισχυόμετρα με την διαφορά ότι το σφάλμα του Fluke αυξάνει με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με το σφάλμα του ισχυομέτρου της υλοποίησης. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης του Fluke φτάνει το 21,9% για συχνότητα 10,5 KHz, ενώ για την ίδια συχνότητα το αντίστοιχο ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης αυτής της εργασίας είναι 7%.

Η επόμενη προς εξέταση μέτρηση είναι αυτή της rms τιμής του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Όπως έχει προαναφερθεί το ισχυόμετρο Fluke 43B δεν έχει καθόλου καλή ακρίβεια για μετρήσεις τις τάξεως των λίγων miliampere όπως αυτή και για αυτό το λόγο ως όργανο σύγκρισης χρησιμοποιείται το πολύμετρο του εργαστηρίου της εταιρίας GW 8035F. Στο σχήμα 93 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ρεύματος που μετρήθηκαν από το πολύμετρο αλλά και από το ισχυόμετρο της εργασίας αυτής σε σχέση με τη συχνότητα. Όπως φαίνεται για μετρήσεις των δυο οργάνων σχεδόν ταυτίζονται. Από

3 KHz και πάνω το ισχυόμετρο της παρούσας εργασίας αρχίζει να αποκλίνει από τις τιμές του πολυμέτρου.



Σχήμα 93. Διάγραμμα τιμών rms ρεύματος που μετρήθηκε από το πολύμετρο του εργαστηρίου αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο επόμενο σχήμα 94 δίνεται το ποσοστό σφάλματος μέτρησης της rms τιμής του ρεύματος του ισχυομέτρου που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία σε σχέση με αντίστοιχη τιμή του πολυμέτρου σε διάφορες συχνότητες. Το σφάλμα από 0 KHz - 2,5 KHz είναι σχεδόν μηδενικό αφού συγκεκριμένα οι 33 από τις 36 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα έδειξαν το ίδιο αποτέλεσμα και για τα δύο όργανα. Από τα 2,5 KHz και για μεγαλύτερες συχνότητες το ποσοστό σφάλματος ανεβαίνει και φτάνει το μεγάλο ποσοστό του 70% για συχνότητα 10,5 KHz.



Σχήμα 94. Διάγραμμα σφάλματος ρεύματος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το πολύμετρο GW 8035F.

Με βάση τις τιμές της έντασης του ρεύματος που μετριέται από το πολύμετρο GW 8035F και τις rms τιμές της τάσης που μετριέται από το Fluke 43B για τις αντίστοιχες συχνότητες υπολογίζεται η μέση ισχύς που συγκρίνεται με την πραγματική μέση ισχύ που μετριέται από το ισχυόμετρο της υλοποίησης. Οι τιμές αυτές της μέσης ισχύος (σχήμα 95) παρουσιάζουν μεγάλη σύγκλιση για συχνότητες μέχρι 3 KHz ενώ όσο αυξάνει η συχνότητα αρχίζουν να διαφοροποιούνται όλο και περισσότερο. Συγκεκριμένα οι τιμές κυμαίνονται από 7000 μW-8000 μW για συχνότητες έως 3 KHz ενώ στη συνέχεια όπως αναμενόταν οι τιμές διαφοροποιούνται όπως συνέβη και στις μετρήσεις της τάσης αλλά και του ρεύματος. Σαν αποτέλεσμα η πραγματική μέση ισχύς αυξάνει ως τα 10500 μW για συχνότητα 10.5 KHz ενώ η μέση ισχύς που υπολογίζεται από το την rms τάση που μετρά το Fluke 43B και από την rms ένταση ρεύματος που μετρά το πολύμετρο μειώνεται σταδιακά φτάνοντας γύρο στα 6000 μW στα 10,5 KHz. Η σε μεγάλο βαθμό ταύτιση των τιμών για συχνότητες έως 3 KHz δείχνει την ακρίβεια του οργάνου που υλοποιήθηκε αλλά και την ικανότητα του να μετρά ακόμα και σε επίπεδα μWatt.



Σχήμα 95. Διάγραμμα τιμών πραγματικής μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και αυτής που υπολογίστηκε σε διάφορες συχνότητες.

Στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 96) παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος της μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο. Πράγματι για μετρήσεις έως 3 KHz το ποσοστό αυτό είναι κάτω του 10% και συγκεκριμένα στις 31 από τις 36 μετρήσεις σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι κάτω του 5%. Το ποσοστό αυτό δείχνει μεγάλη ακρίβεια αν ληφθεί υπόψη το δεδομένο ότι η τάξη τιμών των μετρήσεων είναι πολύ μικρή. Από τα 3 KHz και πάνω το σφάλμα



Σχήμα 96. Διάγραμμα σφάλματος μέσης ισχύος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο.

Η τελευταία ομάδα μετρήσεων που τίθεται προς σύγκριση σε αυτό το σετ μετρήσεων είναι αυτή της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος. Στο σχήμα 97 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης για διάφορες συχνότητες όπως αυτή μετρήθηκε από το Fluke 43B αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αυτής της εργασίας. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι το Fluke 43B μετρά THD μόνο στα όρια συχνοτήτων 0 KHz-2 KHz. Μετά τα 2 KHz, σε αντίθεση με το ισχυόμετρο της υλοποίησης, το Fluke 43B δεν μπορεί να μετρήσει ολική αρμονική παραμόρφωση. Μέχρι τα 2 KHz παρατηρούμε αρκετά μεγάλη ταύτιση στις τιμές των 2 οργάνων. Οι τιμές THD κυμαίνονται από 0,3% έως 0,5%. Στις 25 από τις 32 μετρήσεις οι τιμές THD της κυματομορφής της τάσης που μετρόσεις είναι της τάξεως 0,1%-0,2%.



Σχήμα 97. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής τάσης % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα 98 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της έντασης του ρεύματος για διάφορες συχνότητες όπως μετρήθηκαν από τα δυο ισχυόμετρα. Μέχρι τα 2 KHz, συχνότητα για την οποία το Fluke 43B μπορεί να πάρει μέτρηση, παρατηρούμε αρκετά μεγάλη ταύτιση στις τιμές των 2 οργάνων. Οι τιμές THD κυμαίνονται από 0,7% έως 1,3% και στις 24 από τις 32 μετρήσεις οι τιμές THD της κυματομορφής της έντασης του ρεύματος που μετρούν τα δυο όργανα ταυτίζονται απόλυτα. Η απόκλιση στις υπόλοιπες 8 μετρήσεις είναι της τάξεως 0,1%-0,2%.

Όπως γίνεται αντιληπτό το ισχυόμετρο της συγκεκριμένης υλοποίησης μετρά την ολική αρμονική παραμόρφωση με πολύ μεγάλη ακρίβεια κάτι που αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων THD της κυματομορφής της τάσης αλλά και από τα αντίστοιχα της κυματομορφής του ρεύματος. Παρατηρήθηκε ότι το THD και των δυο κυματομορφών αυτού του σετ μετρήσεων είναι μικρότερης τάξης μεγέθους από το αντίστοιχο του προηγούμενου σετ. Αυτό είναι απολύτως λογικό αφού το προηγούμενο σετ μετρήσεων είχε είσοδο την κυματομορφή δικτύου μέσω ενός μετασχηματιστή ενώ αυτό το σετ μετρήσεων είχε είσοδο την κυματομορφών. Συμπερασματικά το ημίτονο της γεννήτριας κυματομορφών

αυτό το σετ ασκήσεων είναι πιο κοντά στο θεωρητικό 0% σε σχέση με τις προηγούμενες.



Σχήμα 98. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής ρεύματος % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

6.4 Μετρήσεις τετραγωνικών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας

Ένα άλλο σημαντικό σετ μετρήσεων το οποίο έγινε επίσης στα πλαίσια της αξιολόγησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης της παρούσας εργασίας καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται, έχει να κάνει με μετρήσεις για τετραγωνική κυματομορφή εισόδου. Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων δίνεται στο σχήμα 99 και είναι όμοιο με αυτά του προηγούμενου σετ μετρήσεων με τη διαφορά ότι στην είσοδο αντί για ημιτονοειδή κυματομορφή έχουμε τετραγωνική κυματομορφή.



Σχήμα 99. Τοπολογία κυκλώματος για μετρήσεις σε διάφορες συχνότητες με είσοδο τετραγωνική κυματομορφή.

Η γεννήτρια κυματομορφών του εργαστηρίου που χρησιμοποιείται ρυθμίζεται έτσι ώστε να παράγει τετραγωνική κυματομορφή στην έξοδο της. Για την αποφυγή του σφάλματος κβαντισμού του μετατροπέα A/D, όπως και στο προηγούμενο σετ μετρήσεων, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος ενισχύονται με τη χρήση 2 τελεστικών ενισχυτών ακριβείας πριν οδηγηθούν στους αντίστοιχους μετατροπείς. Το φορτίο στο συγκεκριμένο σετ μετρήσεων είναι 11,4 Ω και η συχνότητα μεταβάλλεται από 30 Hz έως 10047 Hz. Συγκεκριμένα στο διάστημα

αυτό πάρθηκαν 43 διαφορετικές ομάδες μετρήσεων. Οι παράμετροι που εξετάζονται από τη κάθε ομάδα μετρήσεων είναι όμοιες με αυτές που μετρήθηκαν για ημιτονοειδή είσοδο όπως και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις (ισχυόμετρο Fluke 43B, πολύμετρο GW 8035F).

Στο σχήμα 100 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μετρήσεων συχνότητας του ισχυομέτρου της παρούσας υλοποίησης αλλά και του Fluke 43B σε σχέση με την ένδειξη συχνότητας της γεννήτριας τετραγωνικών κυματομορφών. Όπως αναμενόταν το διάγραμμα αυτό έχει τη μορφή μιας ευθείας γραμμής εκτός από τις υψηλές συχνότητες όπου μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων.



Σχήμα 100. Διάγραμμα συχνότητας που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης για τετραγωνική είσοδο.

Το ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση της συχνότητας του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη μέτρηση του Fluke 43B παρουσιάζεται στο σχήμα 101. Παρατηρείται ότι για μετρήσεις σε συχνότητες έως και 4 KHz το ποσοστό σφάλματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι πάρα πολύ μικρό. Συγκεκριμένα στις 29 από τις 36 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι μικρότερο του 1%. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 4 KHz το η απόκλιση ανάμεσα στα δυο όργανα αυξάνεται με συνέπεια το ποσοστό σφάλματος να αγγίζει το 7% για μετρήσεις γύρω στα 10 KHz.



Σχήμα 101. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B για τετραγωνική είσοδο.

Το αντίστοιχο διάγραμμα που συγκρίνει τη συχνότητα όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με την ένδειξη της γεννήτριας κυματομορφών παρουσιάζεται στο σχήμα 102. Παρατηρείται ότι για μετρήσεις σε συχνότητες έως και 2,5 KHz το ποσοστό σφάλματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι σε όλες τις μετρήσεις κάτω του 2,1%. Συγκεκριμένα στις 28 από τις 33 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι μικρότερο του 1,5%.



Σχήμα 102. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με τη γεννήτρια κυματομορφών για τετραγωνική είσοδο.

Το επόμενο διάγραμμα του σχήματος 103 παρουσιάζει τις rms τιμές της τάσης που μέτρησαν τα δυο ισχυόμετρα σε σχέση με τη συχνότητα που μεταβαλλόταν για τετραγωνική πάντα κυματομορφή εισόδου. Παρατηρείται πολύ μεγάλο ποσοστό ταύτισης τιμών ειδικά για συχνότητες έως 3 KHz ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες τα δυο ισχυόμετρα παρουσιάζουν μετρήσεις που αποκλίνουν.



Σχήμα 103. Διάγραμμα τάσης rms που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα 104 παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το ισχυόμετρο Fluke 43B για την μέτρηση της rms τιμής
της τάσης σε διάφορες συχνότητες. Συγκεκριμένα για συχνότητα έως 1 KHz το ποσοστό σφάλματος στις περισσότερες μετρήσεις είναι κάτω του 2% Για συχνότητες από 1 KHz έως 2,5 KHz το ποσοστό σφάλματος στις περισσότερες μετρήσεις είναι μεταξύ 2%-4%. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 2,5 KHz το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται σταδιακά αρχικά αγγίζοντας το 6% σε συχνότητες μέχρι 3,5 KHz και τελικά φτάνοντας και το 153% για τιμές γύρω στα 10 KHz όπου και προφανώς τα ισχυόμετρα έχουν σταματήσει να μετρούν σωστά.



Σχήμα 104. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Σε θεωρητικό επίπεδο, όπως και στο προηγούμενο σετ μετρήσεων, η τιμή rms της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου του σχήματος 99 παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της συχνότητας της τετραγωνικής κυματομορφής εισόδου. Με βάση τις 10 πρώτες τιμές που μετρούν τα δύο όργανα, για συχνότητες 0 Hz-450 Hz, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών ο οποίος είναι 447,5 mV. Με βάση αυτή την τιμή σχεδιάσθηκε το διάγραμμα του σχήματος 105. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απόκλισης των δυο ισχυομέτρων από την θεωρούμενη σωστή τιμή μέτρησης των 447,5 mV. Είναι φανερό ότι οι μετρήσεις του ισχυομέτρου της παρούσας εργασίας έχουν μικρότερο ποσοστό σφάλματος από τις αντίστοιχες του Fluke 43B. Αναλυτικά οι μετρήσεις του ισχυομέτρου της παρουσιάζουν σφάλμα 0% έως 2% για

συχνότητα 0-1.7 KHz, 2% έως 10% για συχνότητες 1.7 KHz-8 KHz ενώ το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται στα 40%-50% για συχνότητες 8 KHz-10 KHz. Αντίστοιχα οι μετρήσεις του Fluke 43B παρουσιάζουν σφάλμα 0% έως 2% για συχνότητα 0-850Hz, 2% έως 10% για συχνότητες 900 Hz-3 KHz ενώ το σφάλμα αυξάνεται σταδιακά αγγίζοντας το 50% για συχνότητες γύρω στα 10 KHz.



Σχήμα 105. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης και από το Fluke 43B σε σχέση με τη μέση τιμή 447,5 mV.

Η επόμενη προς εξέταση μέτρηση είναι αυτή της rms τιμής της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Όπως και στο προηγούμενο σετ μετρήσεων ως όργανο σύγκρισης χρησιμοποιείται το πολύμετρο του εργαστηρίου της εταιρίας GW 8035F. Στο σχήμα 106 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ρεύματος που μετρήθηκαν από το πολύμετρο αλλά και από το ισχυόμετρο της εργασίας αυτής σε σχέση με τη συχνότητα. Όπως φαίνεται για μετρήσεις έως 2.5 KHz οι μετρήσεις των δυο οργάνων σχεδόν ταυτίζονται και είναι 42 mA-43 mA. Από 2.5 KHz και πάνω το ισχυόμετρο της παρούσας εργασίας αρχίζει να αποκλίνει από τις τιμές του πολυμέτρου.



Σχήμα 106. Διάγραμμα τιμών ρεύματος rms που μετρήθηκε από το πολύμετρο αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο επόμενο σχήμα 107 δίνεται το ποσοστό σφάλματος μέτρησης της rms τιμής έντασης του ρεύματος του ισχυομέτρου που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία σε σχέση με αντίστοιχη τιμή του πολυμέτρου σε διάφορες συχνότητες. Το σφάλμα από 0 KHz -2,5 KHz είναι 0%-2.3% και συγκεκριμένα οι 19 από τις 32 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα έδειξαν το ίδιο αποτέλεσμα και για τα δύο όργανα. Από τα 2,5 KHz και για μεγαλύτερες συχνότητες το ποσοστό σφάλματος ανεβαίνει και φτάνει το μεγάλο ποσοστό του 85% για συχνότητα 10 KHz.



Σχήμα 107. Διάγραμμα σφάλματος ρεύματος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το πολύμετρο GW 8035F.

Με βάση τις τιμές της έντασης του ρεύματος που μετριέται από το πολύμετρο GW 8035F και τις rms τιμές της τάσης που μετριέται από το Fluke 43B για τις αντίστοιχες συχνότητες υπολογίζεται η μέση ισχύς που συγκρίνεται με την πραγματική μέση ισχύ που μετριέται από το ισχυόμετρο της υλοποίησης. Οι προς σύγκριση τιμές είναι αρκετά κοντινές για συχνότητες έως 2.5 KHz ενώ στη συνέχεια όπως αναμενόταν οι τιμές διαφοροποιούνται όπως συνέβη και στις μετρήσεις της τάσης αλλά και του ρεύματος. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 108.



Σχήμα 108. Διάγραμμα τιμών πραγματικής μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και αυτής που υπολογίστηκε σε διάφορες συχνότητες.

Στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 109) παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος της μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο. Πράγματι για μετρήσεις έως 3 KHz το ποσοστό αυτό είναι κάτω του 10% και συγκεκριμένα στις 26 από τις 33 μετρήσεις σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι κάτω του 5%. Το ποσοστό αυτό δείχνει μεγάλη ακρίβεια αν ληφθεί υπόψη το δεδομένο ότι η τάξη τιμών των μετρήσεων είναι πολύ μικρή. Από τα 3 KHz και πάνω το σφάλμα



Σχήμα 109. Διάγραμμα σφάλματος μέσης ισχύος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο.

Στα σχήματα 110 και 111 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του THD της κυματομορφής της τάσης και το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για την μέτρηση αυτή σε συνάρτηση με τη μεταβολή της συχνότητας. Το Fluke 43B όπως είναι γνωστό μετράει THD μέχρι τα 2 KHz ενώ αντίθετα το ισχυόμετρο της υλοποίησης δεν έχει τέτοιο περιορισμό. Οι τιμές της THD της τάσης κυμαίνονται και για τα δύο όργανα μεταξύ 31%-42,7% για τις συχνότητες 0 KHz-2 KHz. Το ισχυόμετρο της υλοποίησης συνεχίζει να μετράει THD στα ίδια επίπεδα για συχνότητα έως 5 KHz ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες οι μετρήσεις αυξάνονται φτάνοντας το 65% στα 10 KHz.



Σχήμα 110. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής τάσης % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος της μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης, το ποσοστό σφάλματος είναι κάτω του 4% για μετρήσεις έως 1 KHz ενώ το μέγιστο ποσοστό σφάλματος είναι 8.6% για συχνότητα 1700 Hz.



Σχήμα 111. Διάγραμμα σφάλματος THD κυματομορφής τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Στα σχήματα 112 και 113 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του THD της κυματομορφής της έντασης του ρεύματος και το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για την μέτρηση αυτή σε σχέση με τη μεταβολή της συχνότητας. Οι τιμές της THD της τάσης κυμαίνονται και για τα δύο όργανα μεταξύ 30,4%-42,1% για συχνότητες έως 2 KHz. Το ισχυόμετρο της υλοποίησης συνεχίζει να μετράει THD στα ίδια επίπεδα για συχνότητες έως 5 KHz ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες οι μετρήσεις αυξάνονται.



Σχήμα 112. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής ρεύματος % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος της μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης, το ποσοστό σφάλματος είναι κάτω του 3% για τις περισσότερες μετρήσεις έως 1 KHz ενώ το μέγιστο ποσοστό σφάλματος είναι 9.87% για συχνότητα 2 KHz.



Σχήμα 113. Διάγραμμα σφάλματος THD ρεύματος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

6.5 Μετρήσεις τριγωνικών κυματομορφών με μεταβολή συχνότητας

Ένα άλλο σημαντικό σετ μετρήσεων το οποίο έγινε επίσης στα πλαίσια της αξιολόγησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης της παρούσας εργασίας καθώς η συχνότητα μεταβάλλεται έχει να κάνει με μετρήσεις για τριγωνική κυματομορφή εισόδου. Το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο σετ μετρήσεων δίνεται στο σχήμα 114 και είναι όμοιο με αυτά των προηγούμενων σετ μετρήσεων με τη διαφορά ότι στην είσοδο αντί για ημιτονοειδή ή τετραγωνική κυματομορφή έχουμε τριγωνική κυματομορφή.



Σχήμα 114. Τοπολογία κυκλώματος για μετρήσεις σε διάφορες συχνότητες με είσοδο τριγωνική κυματομορφή.

Η γεννήτρια κυματομορφών του εργαστηρίου που χρησιμοποιείται αυτή τη φορά ρυθμίζεται έτσι ώστε να παράγει τριγωνική κυματομορφή στην έξοδο της. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος ενισχύονται και πάλι με τη χρήση 2 τελεστικών ενισχυτών ακριβείας πριν οδηγηθούν στους αντίστοιχους μετατροπείς. Το φορτίο στο συγκεκριμένο σετ μετρήσεων είναι 11,4 Ω και η συχνότητα μεταβάλλεται από 50 Hz έως 10036 Hz. Συγκεκριμένα στο διάστημα αυτό πάρθηκαν 44 διαφορετικές ομάδες μετρήσεων. Οι παράμετροι που εξετάζονται από τη κάθε ομάδα μετρήσεων είναι όμοιες με αυτές που μετρήθηκαν για

ημιτονοειδή και τετραγωνική είσοδο όπως και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις (ισχυόμετρο Fluke 43B ,πολύμετρο GW 8035F).

Στο σχήμα 115 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μετρήσεων συχνότητας του ισχυομέτρου της παρούσας υλοποίησης αλλά και του Fluke 43B σε σχέση με την ένδειξη συχνότητας της γεννήτριας τριγωνικών κυματομορφών. Όπως αναμενόταν το διάγραμμα αυτό έχει τη μορφή μιας ευθείας γραμμής εκτός από τις υψηλές συχνότητες όπου μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων κυρίως από την πλευρά του ισχυομέτρου της υλοποίησης.



Σχήμα 115. Διάγραμμα συχνότητας που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης για τριγωνική είσοδο.

Το ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση της συχνότητας του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη μέτρηση του Fluke 43B παρουσιάζεται στο σχήμα 116. Για μετρήσεις σε συχνότητες έως και 2.5 KHz το ποσοστό σφάλματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι πάρα πολύ μικρό. Συγκεκριμένα στις 26 από τις 33 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι μικρότερο του 1%. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 2.5 KHz το η απόκλιση ανάμεσα στα δυο όργανα αυξάνεται σταδιακά αγγίζοντας το 8% για μετρήσεις γύρω στα 10 KHz.



Σχήμα 116. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B για τριγωνική είσοδο.

Το ποσοστό σφάλματος στη μέτρηση της συχνότητας του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη μέτρηση της γεννήτριας κυματομορφών φαίνεται στο σχήμα 117. Για μετρήσεις σε συχνότητες έως και 2.5 KHz το ποσοστό σφάλματος της συγκεκριμένης μέτρησης είναι πάρα πολύ μικρό και κάτω του 1,5%. Συγκεκριμένα στις 29 από τις 33 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι μικρότερο του 1%. Για συχνότητες μεγαλύτερες του 2.5 KHz το η απόκλιση ανάμεσα στα δυο όργανα αυξάνεται σταδιακά αγγίζοντας το 7,5% για μετρήσεις γύρω στα 10 KHz.



Σχήμα 117. Διάγραμμα σφάλματος συχνότητας που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με την αντίστοιχη ένδειξη της γεννήτριας κυματομορφών για τριγωνική είσοδο.

Το επόμενο διάγραμμα του σχήματος 118 παρουσιάζει τις rms τιμές τάσης που μέτρησαν τα δυο ισχυόμετρα σε συνάρτηση με τη συχνότητα που μεταβαλλόταν για τριγωνική πάντα κυματομορφή εισόδου. Οι μετρήσεις των δυο ισχυομέτρων για συχνότητες έως 3 KHz είναι πολύ κοντινές ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες τα δυο ισχυόμετρα παρουσιάζουν μετρήσεις που αποκλίνουν όλο και περισσότερο όσο αυξάνει η συχνότητα.





Στο σχήμα 119 παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το ισχυόμετρο Fluke 43B για την μέτρηση της rms τιμής της τάσης σε διάφορες συχνότητες. Για συχνότητα έως 2 KHz το ποσοστό σφάλματος στις 27 από τις 30 μετρήσεις είναι κάτω του 2%. Για συχνότητες μεγαλύτερες από 2 KHz το ποσοστό σφάλματος αυξάνεται σταδιακά αρχικά αγγίζοντας το 6% σε συχνότητες μέχρι 4 KHz και τελικά φτάνοντας και το 60% για τιμές γύρω στα 10 KHz.



Σχήμα 119. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Σε θεωρητικό επίπεδο, όπως και στα προηγούμενα σετ μετρήσεων, η τιμή rms της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου του σχήματος 114 παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της συχνότητας της τριγωνικής κυματομορφής εισόδου. Με βάση τις 10 πρώτες τιμές που μετρούν τα δύο όργανα, για συχνότητες 0 Hz-456 Hz, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών ο οποίος είναι 262,3 mV. Με βάση αυτή την τιμή σχεδιάσθηκε το διάγραμμα του σχήματος 120. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρουσιάζονται τα ποσοστά απόκλισης των δυο ισχυομέτρου της υλοποίησης παρουσιάζουν σφάλμα έως 1% για συχνότητα έως 2 KHz. Στο αντίστοιχο διάστημα συχνοτήτων οι 21 από τις 30 μετρήσεις του Fluke 43B παρουσιάζουν ποσοστό σφάλματος κάτω του 1%. Στη συνέχεια και για μεγαλύτερες συχνότητες το ποσοστό σφάλματος αυξάνει και για τα δυο όργανα με σαφή πάντα την υπεροχή του ισχυομέτρου της υλοποίησης.



Σχήμα 120. Διάγραμμα σφάλματος τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης και από το Fluke 43B σε σχέση με τη μέση τιμή 262,3 mV.

Η επόμενη προς εξέταση μέτρηση είναι αυτή της rms τιμής της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο. Όπως και στο προηγούμενο σετ μετρήσεων ως όργανο σύγκρισης χρησιμοποιείται το πολύμετρο του εργαστηρίου της εταιρίας GW 8035F. Στο σχήμα 121 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης του ρεύματος που μετρήθηκαν από το πολύμετρο αλλά και από το ισχυόμετρο της εργασίας αυτής σε σχέση με τη συχνότητα. Όπως φαίνεται για μετρήσεις έως 4.5 KHz οι μετρήσεις των δυο οργάνων σχεδόν ταυτίζονται και είναι 24 mA-25 mA. Από 4.5 KHz και πάνω το ισχυόμετρο της παρούσας εργασίας αρχίζει να αποκλίνει από τις τιμές του πολυμέτρου.



Σχήμα 121. Διάγραμμα τιμών ρεύματος rms που μετρήθηκε από το πολύμετρο αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα 122 δίνεται το ποσοστό σφάλματος μέτρησης της rms τιμής του ρεύματος του ισχυομέτρου που υλοποιήθηκε σε αυτή την εργασία σε σχέση με αντίστοιχη τιμή του πολυμέτρου σε διάφορες συχνότητες. Το σφάλμα από 0 KHz - 4,5 KHz είναι πολύ μικρό και συγκεκριμένα οι 29 από τις 38 μετρήσεις που έγιναν σε αυτό το διάστημα έδειξαν το ίδιο αποτέλεσμα και για τα δύο όργανα. Από τα 4,5 KHz και για μεγαλύτερες συχνότητες το ποσοστό σφάλματος ανεβαίνει και φτάνει το μεγάλο ποσοστό του 240% για συχνότητα 10 KHz.



Σχήμα 122. Διάγραμμα σφάλματος ρεύματος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το πολύμετρο GW 8035F.

Με βάση τις τιμές της έντασης του ρεύματος που μετριέται από το πολύμετρο GW 8035F και τις rms τιμές της τάσης που μετριέται από το Fluke 43B για τις αντίστοιχες συχνότητες υπολογίζεται η μέση ισχύς που συγκρίνεται με την πραγματική μέση ισχύ που μετριέται από το ισχυόμετρο της υλοποίησης. Οι προς σύγκριση τιμές είναι αρκετά κοντινές για συχνότητες έως 4.5 KHz ενώ στη συνέχεια όπως αναμενόταν οι τιμές διαφοροποιούνται όπως συνέβη και στις μετρήσεις της τάσης αλλά και του ρεύματος. Οι τιμές όπως φαίνεται από το διάγραμμα του σχήματος 123 είναι της τάξης των μWatt κάτι που μεγαλώνει τον δείκτη δυσκολίας των μετρήσεων.



Σχήμα 123. Διάγραμμα τιμών πραγματικής μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και αυτής που υπολογίστηκε σε διάφορες συχνότητες.

Στο σχήμα 124 παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος της μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο. Για συχνότητα έως 4.5 KHz στις 32 από τις 38 μετρήσεις σε αυτό το διάστημα το σφάλμα είναι κάτω του 10%. Το ποσοστό αυτό δείχνει μεγάλη ακρίβεια αν ληφθεί υπόψη το δεδομένο ότι η τάξη τιμών των μετρήσεων είναι πολύ μικρή. Από τα 4.5 KHz και πάνω το σφάλμα μεγαλώνει φτάνοντας το 400% στη συχνότητα των 10 KHz όπου προφανώς και η μέτρηση είναι τελείως λανθασμένη.



Σχήμα 124. Διάγραμμα σφάλματος μέσης ισχύος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από το Fluke 43B και το πολύμετρο.

Στα σχήματα 125 και 126 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του THD της κυματομορφής της τάσης και το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για την μέτρηση αυτή σε σχέση με τη μεταβολή της συχνότητας. Οι τιμές της THD της τάσης κυμαίνονται και για τα δύο όργανα μεταξύ 8,8%-11,5% για συχνότητες έως 2 KHz όπου και το Fluke 43B μπορεί να μετρήσει. Το ισχυόμετρο της υλοποίησης συνεχίζει να μετράει THD στα ίδια επίπεδα για συχνότητα έως 5 KHz ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες οι μετρήσεις αυξάνονται φτάνοντας το 45% στα 10 KHz.



Σχήμα 125. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής τάσης % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος της μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης, το ποσοστό σφάλματος είναι κάτω του 4% για μετρήσεις έως 1,4 KHz ενώ το μέγιστο ποσοστό σφάλματος είναι 10,2% για συχνότητα 1700 Hz.



Σχήμα 126. Διάγραμμα σφάλματος THD τάσης % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

Στα σχήματα 127 και 128 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του THD της κυματομορφής της έντασης του ρεύματος και το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B για την μέτρηση αυτή σε σχέση με τη μεταβολή της συχνότητας. Οι τιμές της THD της τάσης κυμαίνονται και για τα δύο όργανα μεταξύ 9,6%-11,1% για συχνότητες έως 2 KHz. Το ισχυόμετρο της υλοποίησης συνεχίζει να μετράει THD στα ίδια επίπεδα για συχνότητα έως 5 KHz ενώ για μεγαλύτερες συχνότητες οι μετρήσεις αυξάνονται φτάνοντας το 35% στα 10 KHz.



Σχήμα 127. Διάγραμμα τιμών THD κυματομορφής ρεύματος % που μετρήθηκε από το Fluke αλλά και από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε διάφορες συχνότητες.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος της μέτρησης της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης, το ποσοστό σφάλματος είναι κάτω του 3% για τις περισσότερες μετρήσεις έως 1.2 KHz ενώ το μέγιστο ποσοστό σφάλματος είναι 13% για συχνότητα 2 KHz.



Σχήμα 128. Διάγραμμα σφάλματος THD ρεύματος % που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που μετρήθηκε από το Fluke 43B.

6.6 Μετρήσεις σταθερής συχνότητας με μεταβλητό φορτίο

Διατηρώντας την διάταξη του σχήματος 86 πραγματοποιείται το επόμενο σετ μετρήσεων. Σε αυτές τις μετρήσεις η συχνότητα επιλέγεται να είναι σταθερή στα

1000Hz, η είσοδος είναι κυματομορφή ημιτόνου που παράγεται από τη γεννήτρια κυματομορφών και το φορτίο είναι μεταβλητό. Συγκεκριμένα για φορτία τοποθετούνται διαδοχικά 11 αντιστάσεις με τιμές από 5,1 Ω έως 130 Ω. Για κάθε φορτίο γίνονται οι εξής μετρήσεις:

- Πραγματική rms τιμή τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου.
- Πραγματική rms τιμή έντασης του ρεύματος που διαρρέει το φορτίο.
- Πραγματική μέση ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο.

Στα σχήματα 129 και 130 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αναφέρονται στην μέτρηση της πραγματικής rms τιμής της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του κάθε φορτίου. Συγκεκριμένα στο σχήμα 129 παρουσιάζονται οι τιμές όπως αυτές μετρήθηκαν από το ισχυόμετρο της υλοποίησης και από το Fluke 43B. Οι τιμές αυτές σχεδόν ταυτίζονται για τα φορτία και κυμαίνονται από 95 mV έως 1429 mV. Η ταύτιση αυτή επιβεβαιώνεται από το σχήμα 130 το οποίο παρουσιάζει το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης και απόλο το σχέση με αυτή του Fluke 43B. Το ποσοστό πραγματικά είναι πολύ μικρό και κυμαίνεται από 0% έως 1,43%. Στις 8 μάλιστα από τις 11 μετρήσεις είναι κάτω του 1%.



Σχήμα 129. Μέτρηση πραγματικής rms τιμής τάσης για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το Fluke 43B.



Σχήμα 130. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης πραγματικής rms τιμής τάσης, για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B.

Στα σχήματα 131 και 132 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αναφέρονται στην μέτρηση της πραγματικής rms τιμής της έντασης του ρεύματος που εφαρμόζεται στα άκρα του κάθε φορτίου. Αναλυτικά στο σχήμα 131 παρουσιάζονται οι τιμές όπως αυτές μετρήθηκαν από το ισχυόμετρο της υλοποίησης και από το πολύμετρο της GW 8035F (η αντίστοιχη μέτρηση του Fluke 43B δεν είναι αξιόπιστη λόγω της χαμηλής τάξης τιμών της έντασης του ρεύματος). Οι τιμές αυτές σχεδόν ταυτίζονται για τα φορτία και κυμαίνονται από 11 mA έως 21 mV. Οι μικρές αυτές τιμές προσδίδουν μεγαλύτερη δυσκολία στη μέτρηση. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται και στο σχήμα 132 το οποίο παρουσιάζει το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με αυτή του πολυμέτρου, οι 9 από τις 11 μετρήσεις είναι ίδιες και για τα δυο όργανα. Αυτό δείχνει μεγάλη ακρίβεια στην μέτρηση της rms τιμής της έντασης του ρεύματος από το ισχυόμετρο της υλοποίησης.



Σχήμα 131. Μέτρηση πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το πολύμετρο GW 8035F.



Σχήμα 132. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης πραγματικής rms τιμής έντασης ρεύματος, για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το πολύμετρο GW 8035F.

Τέλος για αυτό το σετ μετρήσεων γίνεται σύγκριση της πραγματικής μέσης ισχύος που μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από την rms τιμή της τάσης που μέτρησε το Fluke 43B και από την αντίστοιχη rms τιμή της έντασης του ρεύματος που μέτρησε το πολυμέτρου GW

8035F. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 133,134 Στο σχήμα 133 φαίνεται ότι οι τιμές της πραγματικής μέσης ισχύος κυμαίνονται από 1995 μW έως 16110 μW και ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλη σύγκλιση. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος κυμαίνεται από 0,6% έως 6% ενώ ο μέσος όρος του σφάλματος είναι μόλις 2,75% σύμφωνα με το σχήμα 134.



Σχήμα 133. Μέτρηση πραγματικής μέσης ισχύος για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το Fluke 43B.



Σχήμα 134. Ποσοστό σφάλματος μέτρησης πραγματικής μέσης ισχύος για διαφορετικά φορτία με σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το Fluke 43B.

Το συμπέρασμα από αυτό το σετ μετρήσεων είναι πως στο 1 KHz η ακρίβεια του ισχυομέτρου της υλοποίησης διατηρείται σε πολύ υψηλά επίπεδα ακόμα και σε χαμηλές μετρήσεις της τάξης των λίγων mA ή mV.

6.7 Μέτρηση πραγματικής rms τιμής τάσης σε ανοιχτοκύκλωμα για σταθερή συχνότητα

Σε αυτό το σετ μετρήσεων μετρήθηκε σε ανοιχτοκύκλωμα η rms τιμή της τάσης που παράγεται από την γεννήτρια κυματομορφών. Η γεννήτρια ρυθμίστηκε στο να παράγει ημιτονοειδή έξοδο, σε σταθερή συχνότητα 1000 Hz και αλλάζοντας το πλάτος της κυματομορφής πάρθηκαν 31 μετρήσεις με τις rms τιμές να κυμαίνονται από 100 mV έως 3235 mV. Για τη σύγκριση των τιμών του ισχυομέτρου της υλοποίησης χρησιμοποιήθηκε το ισχυόμετρο Fluke 43B καθώς και το πολύμετρο της Hewlett Packard 3466A.

Στο σχήμα 135 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της rms τάσης που μετρά το ισχυόμετρο της εργασίας καθώς και οι αντίστοιχες που μετράει το ισχυόμετρο Fluke 43B. Οι δυο χαρακτηριστικές φαίνετε να ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό για όλες τις τιμές της τάσης.



Σχήμα 135. Διάγραμμα μέτρησης πραγματικής rms τιμής τάσης για σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το Fluke 43B.

Το ακριβές ποσοστό ταύτισης των δυο παραπάνω χαρακτηριστικών εκφράζεται στο επόμενο σχήμα 136 το οποίο παρουσιάζει το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με αυτή του Fluke 43B. Το ποσοστό σφάλματος είναι μικρότερο του 1,6% και στις 31 μετρήσεις. Ο μέσος όρος του ποσοστού σφάλματος για τις 31 αυτές μετρήσεις είναι μόλις 0,88%.



Σχήμα 136. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης πραγματικής rms τιμής τάσης, για σταθερή συχνότητα, του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το Fluke 43B.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αντίστοιχη σύγκριση του ισχυομέτρου της υλοποίησης με το πολύμετρο αυτή την φορά. Στο σχήμα 137 παρουσιάζονται οι τιμές της rms τάσης που μετρά το ισχυόμετρο της εργασίας καθώς και οι αντίστοιχες που μετράει το πολύμετρο της Hewlett Packard 3466A. Οι δυο χαρακτηριστικές φαίνεται να ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό για όλες τις τιμές της τάσης.



Σχήμα 137. Διάγραμμα μέτρησης πραγματικής rms τιμής τάσης για σταθερή συχνότητα, όπως αυτή μετρήθηκε από το ισχυόμετρο της υλοποίησης αλλά και από το πολύμετρο της Hewlett Packard 3466A.

Ο ακριβής βαθμός ταύτισης των δυο παραπάνω χαρακτηριστικών εκφράζεται στο επόμενο σχήμα 138 το οποίο παρουσιάζει το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με αυτή του πολυμέτρου της Hewlett Packard 3466A. Το ποσοστό σφάλματος είναι μικρότερο του 1,4% και στις 31 μετρήσεις. Ο μέσος όρος του ποσοστού σφάλματος για τις 31 αυτές μετρήσεις είναι μόλις 0,5%.



Σχήμα 138. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης πραγματικής rms τιμής τάσης, για σταθερή συχνότητα, του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το πολύμετρο της Hewlett Packard 3466A.

6.8 Μέτρηση DC τάσης

Το ισχυόμετρο της υλοποίησης εκτός από AC κυματομορφές μπορεί να μετρήσει και DC κυματομορφές. Σε αυτό το σετ μετρήσεων έγιναν 44 μετρήσεις DC τάσης από 100mV έως 4970mV. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιείται εκτός από το ισχυόμετρο της υλοποίησης, το πολύμετρο της HP 3466A, το ισχυόμετρο Fluke 43B καθώς και το DC τροφοδοτικό της HP E3630A. Για αυτό το σετ μετρήσεων επιλέγεται το δεύτερο mode λειτουργίας του ισχυομέτρου αφού η είσοδος δεν είναι περιοδική κυματομορφή. Σε αυτό το mode λειτουργίας το ισχυόμετρο λειτουργεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Στο σχήμα 139 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της DC τάσης όπως αυτές καταγράφτηκαν από τα 4 όργανα. Οι 4 αντίστοιχες χαρακτηριστικές συμπίπτουν τόσο πολύ που διακρίνονται με δυσκολία στο διάγραμμα.





Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση των παραπάνω μετρήσεων. Στο σχήμα 140 παρουσιάζεται το διάγραμμα για τη σύγκριση των μετρήσεων του ισχυομέτρου της υλοποίησης με τις μετρήσεις του DC τροφοδοτικού (τιμές που αναγράφονται στο τροφοδοτικό). Το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος φανερώνει μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις του ισχυομέτρου τηε υλοποίησης. Συγκεκριμένα το μέγιστο ποσοστό σφάλματος που παρουσιάστηκε στις 44 αυτές μετρήσεις είναι μόλις 1%. Το σφάλμα στις περισσότερες μετρήσεις είναι κάτω του 0,4% ενώ ο μέσος όρος του σφάλματος για όλες τις μετρήσεις είναι 0,29%.



Σχήμα 140. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης DC τάσης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το τροφοδοτικό HP E3630A.

Στο σχήμα 141 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τη σύγκριση των μετρήσεων του ισχυομέτρου της υλοποίησης με τις μετρήσεις του ισχυομέτρου

Fluke 43B. Το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος φανερώνει επίσης μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις του ισχυομέτρου της υλοποίησης. Συγκεκριμένα το μέγιστο ποσοστό σφάλματος που παρουσιάστηκε στις 44 αυτές μετρήσεις είναι μεν 2,9% αλλά αναφέρεται σε μια μόνο μέτρηση. Το σφάλμα στις περισσότερες μετρήσεις είναι κάτω του 0,3% ενώ ο μέσος όρος του σφάλματος για όλες τις μετρήσεις είναι 0,28%.



Σχήμα 141. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης DC τάσης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το ισχυόμετρο Fluke 43B.

Στο σχήμα 142 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τη σύγκριση των μετρήσεων του ισχυομέτρου της υλοποίησης με τις μετρήσεις του πολυμέτρου HP 3466A. Το διάγραμμα του ποσοστού σφάλματος φανερώνει όπως και τα προηγούμενα 2 μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις του ισχυομέτρου της υλοποίησης. Συγκεκριμένα το ποσοστό σφάλματος που παρουσιάστηκε στις 44 αυτές μετρήσεις μόνο σε δυο από αυτές είναι πάνω του 1%. Το σφάλματος για όλες τις μετρήσεις είναι 0,28%.



Σχήμα 142. Ποσοστό % σφάλματος μέτρησης DC τάσης του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με το πολύμετρο HP 3466A.

Συμπερασματικά στην μέτρηση της DC τάσης τα 4 όργανα μετρούν με μεγάλη ακρίβεια και το ποσοστό σφάλματος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με τα υπόλοιπα 3 όργανα είναι της τάξεως του 0,28% με 0,29%.

6.9 Μέτρηση ενέργειας με μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας

Το ισχυόμετρο της υλοποίησης όταν επιλέγεται να λειτουργεί στο δεύτερο mode όπως έχει προαναφερθεί μετρά με την μέγιστη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας. Δυο από τις μετρήσεις που γίνονται σε αυτό το mode είναι η μέτρηση της πραγματικής ισχύος αλλά και της ενέργειας που καταναλώνει το προς μέτρηση φορτίο για ένα χρονικό διάστημα που επιλέγεται από τον χρήστη. Σε αυτό το σετ αποτελεσμάτων εξετάζονται αυτές οι δυο μετρήσεις. Οι κυματομορφές εισόδου(τάση, ρεύμα) σε αυτό το mode λειτουργίας μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής περιοδικές ή μη περιοδικές.

Επιλέγοντας την διάταξη του σχήματος 86 με φορτίο 11,4 Ω γίνονται οι μετρήσεις της μέσης ισχύος αλλά και της ενέργειας που καταναλώνει το φορτίο σε συνάρτηση με τον χρόνο, όταν η είσοδος είναι ημιτονοειδής κυματομορφή συχνότητας 1000 Hz. Συγκεκριμένα γίνονται 10 μετρήσεις επιλέγοντας χρόνο μέτρησης απο 1 msec έως 10msec. Η επιλογή ημιτονοειδούς κυματομορφής εισόδου έγινε για λόγους ευκολότερης σύγκρισης με μετρήσεις που πάρθηκαν από το Fluke 43B και από το πολύμετρο GW 8035F.

Ο τρόπος υλοποίησης της μέτρησης της πραγματικής μέσης ισχύος στο δεύτερο mode λειτουργίας διαφέρει από τον αντίστοιχο του πρώτου mode λειτουργίας. Η βάση και στις δυο μετρήσεις είναι η σχέση 9:

$$P_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} P_{\sigma \tau_i}^{2}$$

Η διαφορά είναι ότι στο πρώτο mode λειτουργίας που αναφέρεται αποκλειστικά σε περιοδικές κυματομορφές το N αντιστοιχεί στον αριθμό σημείων που δειγματοληπτούνται σε μια περίοδο των κυματομορφών του ρεύματος και της τάσης (1024 σημεία). Αντίθετα στο δεύτερο mode λειτουργίας το N αντιστοιχεί στον αριθμό των σημείων που δειγματοληπτούνται από τις κυματομορφές εισόδου στο αντίστοιχο διάστημα που επιλέγει ο χρήστης με τη μέγιστη πάντα συχνότητας δειγματοληψίας. Για παράδειγμα ο χρήστης επιλέγοντας 1 msec οδηγεί το ισχυόμετρο στο να δειγματοληπτήσει 310 σημεία της κυματομορφής εισόδου με συχνότητα δειγματοληψίας 310 KHz και με βάση αυτά τα 310 σημεία να υπολογίσει την μέση ισχύ και έπειτα την ενέργεια.

Με κυματομορφή εισόδου συχνότητας 1 KHz και επιλογή από τον χρήστη ως χρονικό διάστημα 1 msec ουσιαστικά υπολογίζεται η πραγματική μέση ισχύς για μια περίοδο της κυματομορφής εισόδου. Στη συνέχεια επιλέγοντας 2 msec μετρούνται 2 περίοδοι της κυματομορφής εισόδου. Με την παραδοχή ότι η κυματομορφή στις 2 αυτές περιόδους δεν παρουσιάζει μεταβολές θεωρητικά και στα 2 msec η πραγματική μέση ισχύς που υπολογίζεται είναι όμοια με τη πραγματική μέση ισχύ για μια περίοδο της κυματομορφής εισόδου. Αυτό ισχύει όταν ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του αριθμού των σημείων που αντιστοιχούν σε μια περίοδο της κυματομορφής εισόδου.

Για την σύγκριση των τιμών μετρήθηκε η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου από το Fluke 43B (V=495mV) και η αντίστοιχη τιμή του ρεύματος που το διαρρέει από το πολύμετρο GW 8035F (I=45mA). Από αυτές τις τιμές υπολογίστηκε η πραγματική μέση ισχύς που καταναλώνει το φορτίο (P=22275μW)

και με βάση αυτή την τιμή έγιναν οι συγκρίσεις που ακολουθούν. Πράγματι βλέπουμε (σχήμα 143) ότι οι τιμές που μετρήθηκαν από το PowerMeter της υλοποίησης και αυτές που αντίστοιχα υπολογίσθηκαν θεωρητικά με τη βοήθεια του ισχυομέτρου Fluke 43B και του πολυμέτρου GW 8035F ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό. Οι τιμές που μετρήθηκαν από το ισχυόμετρο της υλοποίησης για χρονική είσοδο από 1msec έως 10msec κυμαίνονται από 22500 μW έως 22684 μW.





Αναλυτικά οι παραπάνω μετρήσεις οδηγούν σε ποσοστά σφάλματος (σχήμα 144), στη μέτρηση της μέσης ισχύος του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με την θεωρητική τιμή που υπολογίστηκε, μεταξύ του 1% και του 1,8%. Ο μέσος όρος του ποσοστού σφάλματος για τη συγκεκριμένη μέτρηση είναι 1,49%. Το ποσοστό σφάλματος αυτό είναι πολύ μικρό αν αναλογιστούμε ότι οι μετρήσεις είναι της τάξεως των μW.


Σχήμα 144. Ποσοστό σφάλματος μέτρησης πραγματικής μέσης ισχύος σε σύγκριση με την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή.

Στη συνέχεια στα σχήματα 145 και 146 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στην μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνει το φορτίο από το ισχυόμετρο της υλοποίησης σε σύγκριση με τη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή. Η τιμή αυτή που τίθεται ως βάση σύγκρισης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πραγματική μέση ισχύ με το αντίστοιχο χρονικό διάστημα της μέτρησης. Οι τιμές που προκύπτουν είναι αρκετά κοντινές όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 22275 μW*msec έως 235980 μW*msec.





Στο σχήμα 146 παρουσιάζεται το ποσοστό σφάλματος της μέτρησης της ενέργειας που καταναλώνει το φορτίο. Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 0,3% έως 5,9%. Ο μέσος όρος του ποσοστού σφάλματος για τη συγκεκριμένη μέτρηση είναι 2,16%.



Σχήμα 146. Ποσοστό σφάλματος μέτρησης ενέργειας σε σύγκριση με την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή.

7. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία έγινε η θεωρητική μελέτη αλλά και η κατασκευή ενός πλήρους συστήματος μέτρησης παραμέτρων ισχύος με την αρωγή του αναπτυξιακού συστήματος της FPGA Virtex II pro XUP. Το ισχυόμετρο που υλοποιήθηκε έχει δυο διαφορετικά mode λειτουργίας. Το πρώτο αναφέρεται σε περιοδικές κυματομορφές και εξετάζει 15 διαφορετικές μετρήσεις παραμέτρων ισχύος. Σε αυτό το mode λειτουργίας αναπτύχθηκε αλγόριθμος ρύθμισης της συχνότητας δειγματοληψίας ο οποίος επιτρέπει τη μέτρηση περιοδικών κυματομορφών διαφόρων συχνοτήτων και όχι μόνο κυματομορφές δικτύου (50Hz) όπως υποστηρίζουν κάποιες άλλες υλοποιήσεις. Το δεύτερο mode λειτουργίας αναφέρεται σε κυματομορφές οποιασδήποτε μορφής και εξετάζει 5 μετρήσεις παραμέτρων ισχύος. Όλες οι μετρήσεις αφού μελετήθηκαν θεωρητικά υλοποιήθηκαν σε hardware στην FPGA με χρήση γλώσσας VHDL. Για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων υλοποιήθηκε φιλική προς τον χρήστη διεπαφή έτσι ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ισχυομέτρου να εμφανίζονται στην οθόνη ενός προσωπικού υπολογιστή. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ο μικροεπεξεργαστής Microblaze της FPGA Virtex II pro έτσι ώστε να σταλούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων στη σειριακή θύρα του αναπτυξιακού και στη συνέχεια με τη βοήθεια ενός προγράμματος της Visual Basic τα αποτελέσματα μεταφέρονται από τη σειριακή θύρα στην οθόνη του προσωπικού υπολογιστή του χρήστη. Ένα πλεονέκτημα της υλοποίησης αυτής είναι ότι ο χρήστης μέσω της διεπαφής αυτής μπορεί να παρέμβει στον τρόπο λειτουργίας του ισχυομέτρου επιλέγοντας το χρονικό διάστημα για το οποίο επιθυμεί να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση (μέτρηση ενέργειας ή μέσης ισχύος) καθώς φυσικά και το mode λειτουργίας στο οποίο θέλει να λειτουργήσει το ισχυόμετρο. Το ισχυόμετρο της εργασίας αυτής στη συνέχεια και αφού υλοποιήθηκε τέθηκε στη διαδικασία της αξιολόγησης (validation). Σε αυτό το στάδιο έγιναν πολλές μετρήσεις οι οποίες είχαν σκοπό τη σύγκριση του ισχυομέτρου της υλοποίησης με όργανα ακριβείας όπως το ισχυόμετρο Fluke 43B, τα πολύμετρα HP 3466A και GW8035F και το DC τροφοδοτικό HP E3630A. Σε όλα τα σετ μετρήσεων το ισχυόμετρο της υλοποίησης έδειξε πολύ υψηλή ακρίβεια σε σχέση με τα άλλα όργανα. Ειδικά στο διάστημα 0-2500Hz τα ποσοστά σφάλματος των μετρήσεων του ισχυομέτρου της υλοποίησης σε σχέση με τα υπόλοιπα όργανα είναι στην χειρότερη περίπτωση μόλις 5%. Στις περισσότερες μάλιστα μετρήσεις τα ποσοστά σφάλματος είναι 0% έως 2%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια του οργάνου δοκιμάστηκε σε μετρήσεις τιμών πολύ χαμηλής τάξης, διαδικασία που ανέβασε το επίπεδο δυσκολίας της διαδικασίας αξιολόγησης του ισχυομέτρου.

Η επιλογή της FPGA στην υλοποίηση του ισχυομέτρου έγινε με το σκεπτικό της επίτευξης όσον το δυνατόν μεγαλύτερης ταχύτητας. Η σχεδίαση έγινε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να γίνει εκμετάλλευση της δυνατότητας της FPGA για αρχιτεκτονικές παράλληλων υπολογισμών και ομοχειρίας (pipeline). Έτσι οι υπολογισμοί των παραμέτρων ισχύος γίνονται παράλληλα στις περισσότερες μετρήσεις (όταν η μια μέτρηση δεν εξαρτάται από το αποτέλεσμα της άλλης). Η δυνατότητα αυτή της FPGA αυξάνει ακόμα περισσότερο την ταχύτητα των υπολογισμών κάτι που δεν γίνεται σε άλλες υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν μικροελεγκτή ή DSP.

Γενικότερα η φιλοσοφία της υλοποίησης της εργασίας αυτής έχει δυο κεντρικές κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση έχει να κάνει με το αναλογικό κομμάτι της υλοποίησης και με την όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση των κυματομορφών εισόδου (κυματομορφή ρεύματος-κυματομορφή τάσης). Με αυτό το σκεπτικό έγινε η επιλογή των δυο μετατροπέων Α/D. Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς που επιλέχθηκαν έχουν συχνότητα δειγματοληψίας που φτάνει έως τα 330 KHz. Ειδικά στο δεύτερο mode λειτουργίας του ισχυομέτρου γίνεται πλήρη εκμετάλλευση αυτής της συχνότητας δειγματοληψίας και οι μετατροπείς λειτουργούν με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Με αυτό τον τρόπο οι κυματομορφές εισόδου αναπαριστούνται με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και κατά συνέπεια οι μετρήσεις είναι περισσότερο ακριβείς. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της υλοποίησης είναι η υψηλότερη από αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες υλοποιήσεις ισχυομέτρων στο παρελθόν.

Η δεύτερη βασική κατεύθυνση της υλοποίησης είναι η όσον το δυνατόν γρηγορότερη επεξεργασία των δεδομένων έτσι ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων όσον το δυνατόν με μεγαλύτερη ταχύτητα. Το max frequency της VHDL υλοποίησης σύμφωνα με το place and route της Xilinx είναι

104MHz. Βλέπουμε δηλαδή ότι η υλοποίηση θεωρητικά μπορεί να λειτουργήσει σε πάρα πολύ υψηλή συχνότητα. Ο ρόλος της ταχύτητας με την οποία εξάγονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι πολύ σημαντικός στον τομέα του ελέγχου της ποιότητας ισχύος. Όσο γρηγορότερα γίνει αντιληπτό για παράδειγμα ένα πρόβλημα στο δίκτυο τόσο ταχύτερα θα ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις που πρέπει να γίνουν για τη διόρθωσή του. Λόγω της υψηλής ταχύτητας επεξεργασίας των δεδομένων, σε μια μελλοντική εργασία το PowerMeter της υλοποίησης αυτής θα μπορούσε να αποτελέσει την ¨καρδιά¨ ενός συστήματος Power Quality Monitoring.

Ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης είναι το χαμηλό της κόστος. Ένας υπολογισμός του κόστους κατασκευής της υλοποίησης της εργασίας αυτής δεν ξεπερνάει τα 110€ την στιγμή που ένα αντίστοιχο σε ακρίβεια και δυνατότητες ισχυόμετρο του εμπορίου όπως είναι το Fluke 43B κοστίζει περίπου 2200€.

8. Βιβλιογραφία

[1] C J Farhat. Power Quality Monitoring and Analysis. IEEE Catalogue 98(1998)

[2] Mohammad E Salem, Azah Mohamed, Salina Abd.Samad and Ramizi Mohamed. Development of a DSP-Based Power Quality Monitoring Instrument for Real-Time Detection of Power Disturbances.IEEE PEDS 2005.

[3] **Gerson Eduardo Mog and Eduardo Parente Ribeiro**. One Cycle AC RMS Calculations for Power Quality Monitoring under Frequency Deviation. 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power

[4]**Gerson Eduardo Mog and Eduardo Parente Ribeiro**.Total Harmonic Distortion Calculation by Filtering for Power Quality Monitoring. 2004 IEEE/PES Transmission 8 Distribution Conference & Exposition: Latin America.

[5] **Shyh-Jier Huang, Tsai-Ming Yang, and Jiann-Tseng**. FPGA Realization of Wavelet Transform for Detection of Electric Power System Disturbances. IEEE Transactions on Power Delivery. 17(2002)

[6] **Claudio De Capua, Emilia Romeo and Giovanni Zoccali**. Uncertainty Evaluation of a THD Meter based on FPGA platform. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006. IMTC 2006. Proceedings of the IEEE (1603 – 1607).

[7] **A. Lakshmikanth and Medhat M. Morcos**. A Power Quality Monitoring System: A Case Study in DSP-Based Solutions for Power Electronics.IEEE Transactions on instrumentation and measurement 50(2001).

[8] Hang-Geng Yang, Xian-Yong Xiao, Ji Yang, and Wen-Lin Jiang. The Decreasing Spectrum Leaking Method for Power Quality Monitoring systems. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004) 2004 Hong Kong.

[9] Abdul Rahim bin Abdullah and Ahmad Zuri bin Sha'ameri. Real-Time Power Quality Monitoring System Based On TMS320CV5416 DSP Processor.IEEE PEDS 2005. [10] **S. R. I. Gabran, G. S. A. Shaker, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama**. Real-Time Power Quality Monitoring Using MEMS Based Wireless Current Sensors. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation.Niagara Falls, Canada 2005.

[11] Eloi Ngandui and Cedric Meignant. Power Quality Monitoring and Analysis of a University Distribution System. IEEE 2001.

[12] **P. Daponte, M. Di Penta and G. Mercurio**. TransientMeter: A Distributed Measurement System for Power Quality Monitoring. IEEE Transactions on power delivery 19(2004).

[13] Mohamed Amin Eldery, Ehab F. El-Saadany, Magdy M. A. Salama and Anthony Vannelli. A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm. IEEE Transactions on power delivery 21(2006).

[14] Hanoch Lev-Ari, Aleksandar M. Stankovic and S. Lin. Application of Staggered Undersampling to Power Quality Monitoring. IEEE Transactions on Power delivery 15(2000).

[15] **Tao Lin, Mineo Tsuji and Eiji Yamada**.Wavelet approach to Power Quality Monitoring.IEEE 2001.The 27 Annual conference of IEEE Industrial Electronics Society.

[16] A.M. Al-Kandari, S.A. Soliman and R.A. Alammari. Power quality analysis based on fuzzy estimation algorithm: Voltage flicker measurements. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2006.

[17] **Tao Lin and Alexander Domijan, Jr**.Real time measurement of power disturbances Part 1. Survey and a novel complex filter approach. Electric Power Systems Research 76(2006)1027-1032

[18] **Jose Batista, Jog L. Afonso and Julio s. Martins**. Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC.IEEE 2003.

[19] Σημειώσεις Μαθήματος Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων. Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος.

[20] Ηλεκτρονικά Ισχύος. Mohan, Underland and Robbins. Εκδόσεις Τζιόλα 1996.

[21] Xilinx logicore product specification.Fast Fourier Transform V3.2

- [22] Xilinx logicore product specification.Sine/cosine look up table v5.0.
- [23] MicroBlaze Processor Reference Guide. Embedded Development kit 7.1i.
- [24] Xilinx logicore product specification.Fast Simplex Link(FSL) V2.11a