

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Β. ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΟΣ, Κ. ΚΟΣΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ, Σ. ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ, Θ. ΛΑΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ,

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

E-MAIL: VKONSTAD@AUTH.GR

ΠΕΡΙΛΗΨΗ – Μια τεχνική μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας μελετάται σε αυτή την εργασία. Το ζήτημα που αναφέρεται είναι η ανάπτυξη ενός κυκλώματος που θα μπορεί να μετράει με ακρίβεια την κατανάλωση ενέργειας ενός ψηφιακού συστήματος παρακολουθώντας το ρεύμα του. Οι μετρήσεις κατανάλωσης για ένα σημαντικό αριθμό κύκλων του ρολογιού μπορούν να προσδιορίσουν τις ενεργειακές παραμέτρους που σχετίζονται με το υλικό και το λογισμικό για συγκεκριμένες ρουτίνες. Περαιτέρω, οι πληροφορίες αυτές μπορούν να είναι χρήσιμες σε τεχνικές βελτιστοποίησης κατανάλωσης. Η προτεινόμενη λύση γίνεται να ολοκληρωθεί μαζί με το ψηφιακό σύστημα, έτσι ώστε να παρέχει παράλληλα την δυνατότητα ενσωματωμένου ελέγχου καλής λειτουργίας.

Λέξεις-Κλειδιά: κυκλώματα χαμηλής κατανάλωσης, μετρήσεις ρεύματος, συστήματα ελέγχου καλής λειτουργίας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βρισκόμαστε σε μια εποχή όπου οι ηλεκτρονικές συσκευές κυριαρχούν. Ένας άνθρωπος είτε στη δουλειά του είτε στη διασκέδάσή του έρχεται καθημερινά αντιμέτωπος με ηλεκτρονικές συσκευές με όλο και πιο μικρές διαστάσεις, που έχουν ως σκοπό και να αυξήσουν την παραγωγικότητά του αλλά και να του παρέχουν καινούριες δυνατότητες στην καθημερινή του δραστηριότητα. Όλες αυτές οι συσκευές έχουν κάποια αποθήκη ενέργειας π.χ. μια μπαταρία, που είναι επιθυμητό να είναι όσο πιο μεγάλη γίνεται, ή διαφορετικά η φορητή συσκευή να μπορεί να λειτουργεί όσο γίνεται περισσότερο χωρίς να χρειαστεί κάποια επαναφόρτιση. Συνεπώς, ενώ πραγματοποιούνται έρευνες στο πως θα γίνουν τα ηλεκτρονικά μικρότερα και εξυπνότερα, είναι απαραίτητες και οι έρευνες στο πως θα γίνουν τα ηλεκτρονικά λιγότερο ενεργοβόρα.

Η συγκεκριμένη εργασία κινείται πάνω σε αυτή την ερευνητική περιοχή. Σκοπός της είναι να σχεδιαστεί και να μελετηθεί ένα κύκλωμα που θα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ψηφιακό σύστημα και να μετρά συνεχώς την κατανάλωση ενέργειας των διαφόρων υποσυστημάτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Ένα τέτοιο κύκλωμα θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αφού για να υπάρξει ενεργειακή βελτίωση σε μια συσκευή, χρειάζεται αρχικά να μπορούμε να μετράμε την κατανάλωσή της.

Αφού ληφθεί ένα ολοκληρωμένο σετ μετρήσεων, θα ακολουθεί το κομμάτι της επεξεργασίας. Γνωρίζοντας το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα υπό μέτρηση θα είναι σχετικά εύκολο να προκύψει η αντίστοιχη ενέργεια που καταναλώθηκε. Με βάση αυτή την πληροφορία η κύρια κίνηση που μπορεί να γίνει είναι η ενεργειακή βελτιστοποίηση του συστήματος. Αυτή είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί σε πολλά στάδια όπως αυτό του σχεδιασμού, με αλλαγή της δομής του συστήματος ή και με αντικατάσταση κάποιων υπομονάδων. Μπορούν να γίνουν επίσης βελτιώσεις στο επίπεδο του λογισμικού, όπως είναι η αλλαγή του εκτελέσιμου κώδικα, ώστε να πραγματοποιείται η ίδια λειτουργία με διαφορετικό τρόπο που να επιφέρει ενεργειακή βελτίωση.

Εκτός από την βελτιστοποίηση μπορούμε να αναφερόμαστε γενικότερα και σε άλλες χρήσεις του μετρητικού συστήματος υπό έρευνα. Ένα ρόλο που μπορεί να διαδραματίσει είναι του ελέγχου σωστής λειτουργίας ενός συστήματος. Έχοντας σε συνεχή λειτουργία το κύκλωμα μέτρησης – παρακολούθησης του ρεύματος το οποίο διαρρέει το υπό έλεγχο σύστημα, θα μπορεί να αντιληφθεί κάποια δυσλειτουργία που θα αποφέρει ένα ρεύμα πέρα από τα αναμενόμενα όρια, και θα πραγματοποιεί στη συνέχεια κάποια λειτουργία ώστε να αντιμετωπιστεί το τυχόν πρόβλημα.

Ιδιαίτερα σημαντική θα είναι η χρησιμότητά του αν μεταφερθεί σε ολοκληρωμένη μορφή. Σε αυτή την περίπτωση θα είναι εφικτό να βρίσκεται μαζί με όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί όλες τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν. Έτσι, θα μπορεί να αποτελεί κομμάτι ενός συστήματος υπό ανάπτυξη και με αυτοματοποιημένο τρόπο να λαμβάνει εύκολα μετρήσεις αξιολόγησής του. Επίσης, μετά την τελική μορφή ενός συστήματος και θεωρώντας το σύστημα μέτρησης ένα κομμάτι του, θα είναι πραγματοποιήσιμος ο συνεχόμενος έλεγχος σωστής λειτουργίας, μέσα από το ίδιο το ολοκληρωμένο και όχι με τη χρήση κάποιας εξωτερικής βαθμίδας.

2. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Η έρευνα στις τεχνικές μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας είναι σχετικά πρόσφατη, αφού η εξάπλωση των φορητών συσκευών είναι κυρίως φαινόμενο των τελευταίων ετών. Έτσι και η αντίστοιχη βιβλιογραφία δεν είναι μεγάλη αλλά περιλαμβάνει λίγες και σχετικά πρόσφατες προσπάθειες. Υπάρχει ο κύριος διαχωρισμός σε εργασίες που στοχεύουν στην θεωρητική ενεργειακή ανάλυση ενός συστήματος με τη χρήση εξομοιώσεων σε υπολογιστή, ενώ από την άλλη βρίσκονται οι εργασίες που στηρίζονται σε πειραματικές μετρήσεις για μια αντίστοιχη ανάλυση. Βασικοί επεξεργαστές όπως ο ARM7 αναλύονται σε επίπεδο εντολής αντιστοιχίζοντας σε κάθε εντολή μια τιμή ενέργειας κατανάλωσης.

Πιο αναλυτικά, η πρώτη εργασία [1] ασχολείται με τη δημιουργία ενός ενεργειακού μοντέλου σε επίπεδο εντολής για τους ενσωματωμένους RISC επεξεργαστές. Οι ερευνητές της εργασίας προσπάθησαν να αναλύσουν τους RISC επεξεργαστές σε επίπεδο εντολών και να περιγράψουν με κάποιο τρόπο ενεργειακά τις διάφορες αυτές εντολές. Για να πραγματοποιηθούν οι πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιείται ως έχει η τεχνική που εμφανίζεται στην επόμενη εργασία.

Στη δεύτερη εργασία [2] αξιολογείται ο επεξεργαστής ARM7TDMI με μοντελοποίηση σε επίπεδο εντολών και παράλληλη λήψη μετρήσεων. Οι τιμές ρεύματος που μετρούνται είναι σε επίπεδο κύκλου. Το σύστημα μέτρησης αποτελείται από ένα συνδυασμό πυκνωτών τοποθετημένο παράλληλα με το σύστημα υπό μέτρηση έτσι ώστε να του παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για να λειτουργήσει. Από τις μεταβολές στην τάση των πυκνωτών βγαίνουν συμπεράσματα πάνω στην κατανάλωση του συστήματος.

Στις εργασίες [3,4] γίνεται ο ενεργειακός χαρακτηρισμός τριών εμπορικών επεξεργαστών σε επίπεδο εντολής. Και εδώ έχουμε μια πλήρη ανάπτυξη του σετ εντολών του κάθε επεξεργαστή, δίνοντας τις διάφορες ενεργειακές παραμέτρους που θα πρέπει να μετρούνται κάθε φορά. Οι πειραματικές τιμές σε αυτές τις εργασίες λαμβάνονται με τη βοήθεια ενός ψηφιακού πολύμετρου, μετρώντας έτσι μέσες τιμές ενέργειας και όχι στιγμιαίες.

Οι ερευνητές των [5,6] αποσκοπούν στην βελτιστοποίηση του επεξεργαστή ARM7 και του DSP DSP5615 της Motorola με θεωρητική ανάλυση σε επίπεδο εντολής, παρόμοια με αυτή της προηγούμενης μεθόδου αλλά αλλαγμένη σύμφωνα με τα ειδικά χαρακτηριστικά των δυο επεξεργαστών. Η προσπάθεια διαθέτει και πειραματικό κομμάτι όπου πραγματοποιούνται μετρήσεις με τη βοήθεια ενός αμπερομέτρου υψηλής ακρίβειας, το οποίο είναι συνδεδεμένο με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και μετράει μέσες τιμές.

Στην εργασία [7] μετά από τη λήψη κάποιας μέσης τιμής μέτρησης, καταγράφεται επιπλέον και ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης, γιατί εξαιτίας παρασιτικών φαινομένων αλλά και της εξάρτησης του χρόνου εκτέλεσης από τη μορφή των δεδομένων, ο χρόνος εκτέλεσης διαφέρει. Για τις μετρήσεις γίνεται χρήση μιας αντίστασης ακριβείας σε σειρά με το σύστημα υπό μέτρηση. Η κυματομορφή που προκύπτει στα άκρα της για κάθε εντολή καταγράφεται με ένα ψηφιακό παλμογράφο υψηλής δειγματοληψίας. Η χρήση αντίστασης σημαίνει απλότητα αλλά παράλληλα πρόσθετο θερμικό θόρυβο, ενώ ανάλογα με το ρεύμα που την διαρρέει αλλάζει η τάση στα άκρα της και κατ' επέκταση στα άκρα του συστήματος υπό μέτρηση, δηλαδή δεν διατηρείται σταθερή η τροφοδοσία του συστήματος.

Παρόμοια προσπάθεια, όσον αφορά την πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκε και στην εργασία [8]. Ο επεξεργαστής που μελετήθηκε σε αυτή την περίπτωση είναι ο XScale της Intel. Πρόκειται για έναν αρκετά πιο πολύπλοκο επεξεργαστή με περισσότερους παράγοντες να παίζουν ρόλο στην ενέργεια που καταναλώνεται. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός συνόλου αντιστάσεων, οι οποίες όμως βρίσκονται σε ένα εξελιγμένο σύστημα λήψης μετρήσεων, μια κάρτα NI-DaQ της National Instruments, συνδεδεμένη με έναν υπολογιστή. Η τιμή των αντιστάσεων είναι αρκετά μικρή (100mΩ) ώστε να θεωρούμε ότι επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό το σύστημά, τόσο από άποψη μεταβολής των τροφοδοσιών, όσο και από την άποψη θερμικού θορύβου

Επίσης, στις εργασίες [9,10] η μέθοδος με την οποία καταγράφεται το ρεύμα του συστήματος υπό μέτρηση περιλαμβάνει τη χρήση ενός καθρέφτη ρεύματος με αντίσταση στην έξοδό του και ενός ψηφιακού παλμογράφου υψηλής δειγματοληψίας για την καταγραφή των κυματομορφών τάσης στα άκρα της αντίστασης. Στη συνέχεια η κατανάλωση ενέργειας προκύπτει από το ολοκλήρωμα του ρεύματος με τη βοήθεια της καταγραφείσας κυματομορφής. Το ολοκλήρωμα προκύπτει σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή. Χωρίς να επηρεάζεται πλέον το σύστημα είναι δυνατή η καταγραφή στιγμιαίων τιμών ρεύματος.

Τέλος η εργασία [11] ανήκει στην ίδια ερευνητική ομάδα με την παρούσα εργασία και αναφέρεται στην ίδια μέθοδο, αλλά βρισκόμενη σε πιο πρώιμα στάδια ανάπτυξης.

3. Η ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Ο κύριος τρόπος μέτρησης της κατανάλωσης ενός συστήματος είναι η παρακολούθηση του ρεύματος από την τροφοδοσία του, εφόσον κάθε φορά δεν επηρεάζουμε τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Η υψηλή συχνότητα λειτουργίας των ψηφιακών συστημάτων δεν αποτελεί κάποιο ζήτημα σε μετρήσεις ενέργειας, γιατί η συνολική ενέργεια προκύπτει σαν ολοκλήρωμα και όχι αναγκαία με βάση κάποια στιγμιαία πληροφορία.

Ένα στοιχείο που πρέπει να καθορίσουμε πριν ξεκινήσουμε είναι το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει να περιγράψουμε ενεργειακά, που μπορεί να κυμαίνεται από λίγους κύκλους του ρολογιού έως ένα αρκετά μεγαλύτερο αριθμό κύκλων, όπως 100 ή 500 αλλά και παραπάνω. Στην περίπτωση του συστήματος που θα αναπτύξουμε επιθυμούμε να παίρνουμε μακροσκοπικές στο χρόνο μετρήσεις και όχι μετρήσεις σε επίπεδο κύκλου. Θέλουμε να μετράμε κυρίως ολόκληρες ρουτίνες αλλά με καλή ακρίβεια και όχι επιμέρους εντολές. Αυτό έμμεσα σημαίνει ότι δεν μας ενδιαφέρουν οι γρήγορες μεταβάσεις του ρεύματος που πιθανώς να προκαλεί το επεξεργαστικό σύστημα, αλλά η μέση τιμή του, από την οποία θα προκύπτει το ολοκλήρωμα που θα αποτελεί την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Όταν έχουμε ένα ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο έχει τάση στα άκρα του V και διαρρέεται από ρεύμα I τότε η στιγμιαία ισχύς που καταναλώνει είναι

$$P = VI \quad (1)$$

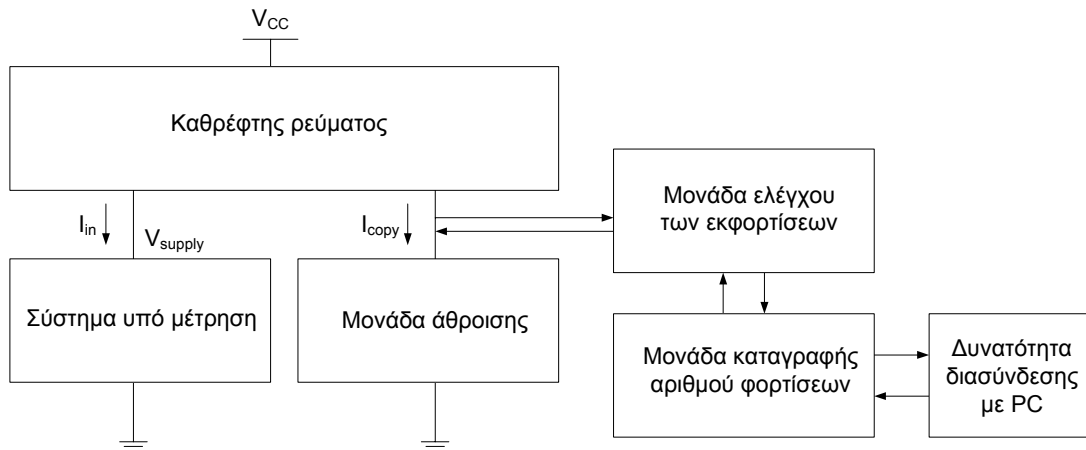
Αν ολοκληρωθεί η παραπάνω σχέση για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε θα ληφθεί η συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε στο διάστημα αυτό. Δηλαδή θα έχουμε

$$E = \int P dt = \int VI dt \quad (2)$$

Αν θεωρήσουμε ότι διατηρούμε την τάση στα άκρα του στοιχείου σταθερή τότε προκύπτει ένα ολοκλήρωμα που εξαρτάται από τον χρόνο και από την κυματομορφή του ρεύματος σε όλο το χρονικό διάστημα. Διαφορετικά, το ολοκλήρωμα που προκύπτει με σταθερή τάση είναι ίσο με το συνολικό φορτίο που αντιστοιχεί για το συγκεκριμένο ρεύμα και το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αν θελήσουμε να υπολογίσουμε τη μέση τιμή της ισχύος για το συγκεκριμένο διάστημα δεν έχουμε παρά απλά να διαιρέσουμε το παραπάνω ολοκλήρωμα με τον αντίστοιχο χρόνο. Συνεπώς παρακολουθώντας το ρεύμα το οποίο διαρρέει το κύκλωμα ανά πάσα στιγμή μπορούμε να γνωρίζουμε την κατανάλωσή του.

Η τεχνική που μελετήθηκε φαίνεται στο σχήμα 1. Ένας κατάλληλος τρόπος για να πραγματοποιούμε την καταγραφή του ρεύματος και παράλληλα να αφήσουμε το σύστημα υπό μέτρηση όσο το δυνατόν ανεπηρέαστο είναι με τη βοήθεια ενός καθρέφτη ρεύματος, δημιουργώντας ένα πιστό αντίγραφο του ρεύματος που θέλουμε να καταγράψουμε. Τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε για τον καθρέφτη είναι τα εξής: Σφάλμα καθρεφτισμού όσο το δυνατόν μικρότερο και θερμική σταθερότητα. Επειδή μιλάμε για το ολοκλήρωμα του ρεύματος και όχι για την ίδια την κυματομορφή του, οι απαιτήσεις σε συχνότητες λειτουργίας δεν είναι ιδιαίτερες. Τα τρανζίστορ είναι ρηρ γιατί πρέπει το σύστημα υπό μέτρηση να δουλεύει με αναφορά το δυναμικό της γης, μια και διαφορετικά είναι πιθανόν να δημιουργηθούν προβλήματα θορύβου.

Στη συνέχεια χρειάζεται να ολοκληρώσουμε το ρεύμα που καταγράψαμε. Μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την ολοκλήρωση με τη βοήθεια του ίδιου του κυκλώματος χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό πυκνωτών σαν μονάδα άθροισης. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι ενδεικτική του φορτίου που έχει αποθηκεύσει και κατ' επέκταση της κατανάλωσης του συστήματος υπό μέτρηση. Παρακολουθώντας την τάση αυτή μπορούμε να παίρνουμε μετρήσεις ενδεικτικές της κατανάλωσης του συστήματος υπό αξιολόγηση.



Σχήμα 1 – Μπλοκ διάγραμμα της προτεινόμενης τεχνικής

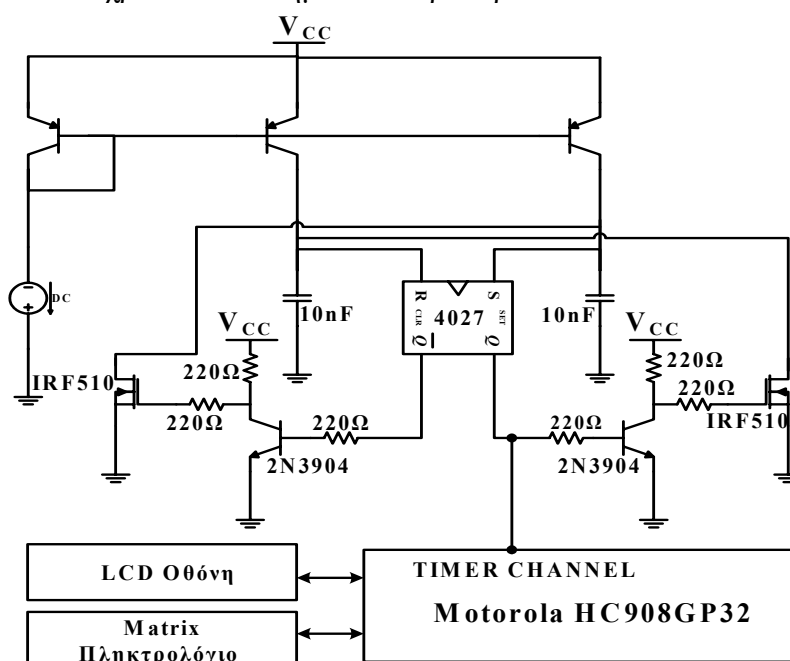
Ο πυκνωτής δεν πρέπει να γεμίζει εντελώς και πρέπει να τον αδειάζουμε σε τακτά χρονικά διαστήματα, καταγράφοντας παράλληλα πόσες φορές τον εκφορτίσαμε. Για αυτό το λόγο στην έξοδο του καθρέφτη παράλληλα με τη μονάδα άθροισης τοποθετούμε μια μονάδα ελέγχου εκφορτίσεων της μονάδας άθροισης. Αυτή η μονάδα αναλαμβάνει να παρακολουθεί διαρκώς την πληρότητα της μονάδας άθροισης (π.χ. την τάση στα άκρα του πυκνωτή) και με βάση κάποιο τρόπο λειτουργίας να πραγματοποιεί την εκφόρτιση της.

Δίπλα στη μονάδα ελέγχου και σε συνεχή αλληλεπίδραση με αυτή βρίσκεται μια μονάδα καταγραφής του αριθμού των φορτίσεων. Αυτό το ρόλο μπορεί να τον διαδραματίσει ένα απλό ψηφιακό κύκλωμα, όπως είναι ένας counter, ή ένα πιο πολύπλοκο, όπως είναι ένας μικροελεγκτής. Η μονάδα αυτή αλληλεπιδρά με τη μονάδα ελέγχου, γιατί η μο-

νάδα ελέγχου είναι που αντιλαμβάνεται μια πλήρη φόρτιση. Τέλος στο διάγραμμα αυτό εμφανίζεται και μια μονάδα ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή που είναι πιθανόν να βρίσκεται συνδεδεμένη με τη μονάδα καταγραφής. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής θα μας παρέχει τη δυνατότητα ταχύτερης και πιο ολοκληρωμένης διαχείρισης του συστήματος μέτρησης.

Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε στην πράξη και που ακολουθεί σε τρόπο λειτουργίας το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 2. Αποτελείται από έναν διπλό pnp καθρέφτη ρεύματος με ένα πυκνωτή στον κάθε κλάδο εξόδου, ένα flip flop με τις εισόδους του συνδεδεμένες στα άκρα των πυκνωτών και δύο διακόπτες ανάμεσα από τις εξόδους του flip flop και των δύο πυκνωτών. Το flip flop ρυθμίζει ώστε οι διακόπτες να ανοίγουν κλείνουν εναλλάξ. Η κατάσταση του flip flop αλλάζει με βάση τις τάσεις στα άκρα των πυκνωτών. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κλάδοι έτσι ώστε όταν ο ένας πυκνωτής εκφορτίζεται ο άλλος να συνεχίζει να αθροίζει το ρεύμα εισόδου και έτσι να μην υπάρχουν κενά στη λειτουργία του συστήματος μέτρησης.

Στο σύστημα αυτό υπάρχει ένας μικροελεγκτής με το ρόλο της κεντρικής μονάδας ελέγχου και επεξεργασίας του συστήματος και δυο περιφερειακά υποσυστήματα, ένα πληκτρολόγιο τύπου matrix και μια οθόνη LCD 4x20. Υπό κανονικές συνθήκες, το σύστημα αυτό έχει συνδεδεμένο έναν ακροδέκτη από τον timer του μικροελεγκτή στην μια από τις δυο εξόδους του flip flop. Ο ακριβής τρόπος καταγραφής είναι ο εξής: Ο μικροελεγκτής ρυθμίζεται με το πληκτρολόγιο ως προς το χρονικό διάστημα, που θα ανοίγει ένα παράθυρο στον ακροδέκτη του timer έτσι ώστε να δέχεται εξωτερικά σήματα. Αφού πραγματοποιηθεί αυτή η ρύθμιση και ενώ το όλο το σύστημα λειτουργεί κανονικά, με τη χρήση ενός πλήκτρου στο πληκτρολόγιο του μικροελεγκτή, ενεργοποιείται το χρονικό παράθυρο και ο μικροελεγκτής καταγράφει τον αριθμό των φορτίσεων, έτσι όπως φαίνονται στην μια από τις δύο εξόδους του flip flop. Όταν θα κλείσει το χρονικό παράθυρο, απεικονίζεται στην LCD οθόνη ο αριθμός των γεγονότων που κατεγράφησαν. Αυτή η τιμή αποτελεί ένα νούμερο χαρακτηριστικό του μέσου ρεύματος που διέρρευε το σύστημα υπό μέτρηση κατά το χρονικό διάστημα του παραθύρου.



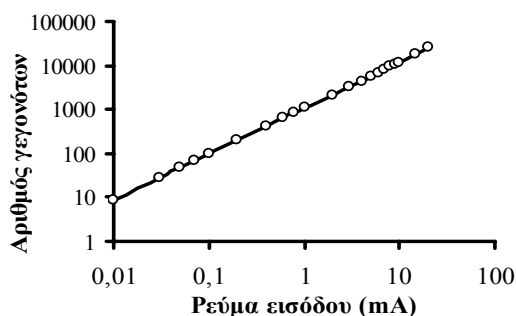
Σχήμα 2 – Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο

Έχοντας αυτό το κύκλωμα υπό τον έλεγχο μας, πραγματοποιούμε ένα σετ μετρήσεων όπου τοποθετούμε ένα dc ρεύμα στην είσοδο και καταγράφουμε το αριθμό των φορτίσεων που προκύπτει για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Πραγματοποιούμε μια

σάρωση για το διάστημα των ρευμάτων από 0,01mA έως 10mA. Κατά την διαδικασία των μετρήσεων τα νούμερα που προέκυπταν από τον μικροελεγκτή είχαν μια διασπορά μέχρι και 1%, η οποία κυρίως οφείλεται στη θερμοκρασιακή εξάρτηση του καθρέφτη.

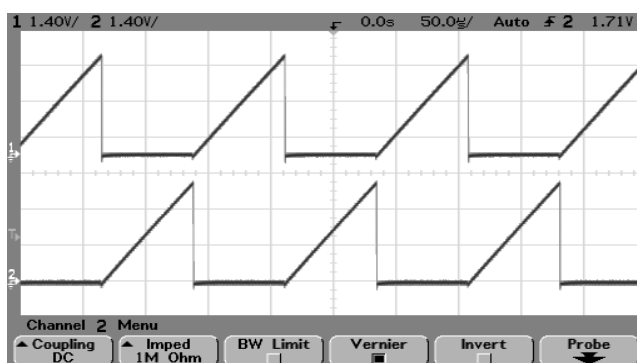
Στο διάγραμμα του σχήματος 3, παρατηρούμε τη γραμμική σχέση μεταξύ του ρεύματος εισόδου και του αριθμού των φορτίσεων ενός εκ των δυο πυκνωτών. Η εξίσωση που περιγράφει αυτή τη σχέση είναι η

$$I_{IN} = 0.0008029 \times N + 0.19838 \quad (3)$$



Σχήμα 3 – Η γραμμική σχέση που προκύπτει για dc ρεύματα εισόδου όπου N ο αριθμός των φορτίσεων και I_{in} το ρεύμα εισόδου. Με τη βοήθεια αυτής της σχέσης είναι πλέον εφικτό να αντιστοιχούμε μια μέση τιμή ρεύματος σε κάθε αριθμό γεγονότων που καταγράφεται από τον μικροελεγκτή και να γνωρίζουμε για το σύστημα υπό μέτρηση το μέσο ρεύμα που το διαρρέει. Φυσικά, θα πρέπει να φροντίζουμε κάθε φορά να μετράμε για κατάλληλο χρονικό διάστημα, ή τουλάχιστον να ανάγουμε τις μετρήσεις που θα παίρνουμε στο χρονικό διάστημα που αναφέρεται στην καμπύλη που υπολογίσαμε.

Για να είναι πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος, στο σχήμα 4 απεικονίζονται οι κυματομορφές τάσης στα άκρα των πυκνωτών για 1mA dc ρεύμα εισόδου. Σε αυτό το σχήμα είναι φανερές οι εναλλάξ φορτίσεις των πυκνωτών. Όταν ο ένας πυκνωτής φορτίζει ο δεύτερος διατηρείται αφόρτιστος, ενώ όταν ο φορτιζόμενος πυκνωτής φτάσει κάποιο όριο τάσης τότε ρόλοι εναλλάσσονται. Οι φορτίσεις σε αυτό το σχήμα είναι γραμμικές γιατί το ρεύμα εισόδου είναι σταθερό.



Σχήμα 4 – Κυματομορφές τάσης στους πυκνωτές για 1mA ρεύμα εισόδου

Θέλοντας να εντοπίσουμε τα όρια του κυκλώματος σχετικά με τις διαφορές ρεύματος που μπορεί να διακρίνει, δώσαμε στην είσοδο κάποια παραπλήσια ρεύματα και ταυτόχρονα παίζοντας με το χρόνο καταγραφής πήραμε τον πίνακα που φαίνεται στο σχήμα 5. Σε αυτόν τον πίνακα απεικονίζονται μετρήσεις για δυο χρονικά διαστήματα, για 153,6ms και για 1,64s. Στην πρώτη περίπτωση πραγματοποιούμε αλλαγές στο ρεύμα εισόδου της τάξης των 10μΑ και καταγράφουμε διαφορές στον αριθμό φορτίσεων, περίπου 10 φορτίσεις ανά 10μΑ. Στην δεύτερη περίπτωση πραγματοποιώντας ακόμα μικρότερες αλλαγές του ρεύματος (1μΑ), καταγράφουμε διαφορές στον αριθμό φορτίσεων, περίπου

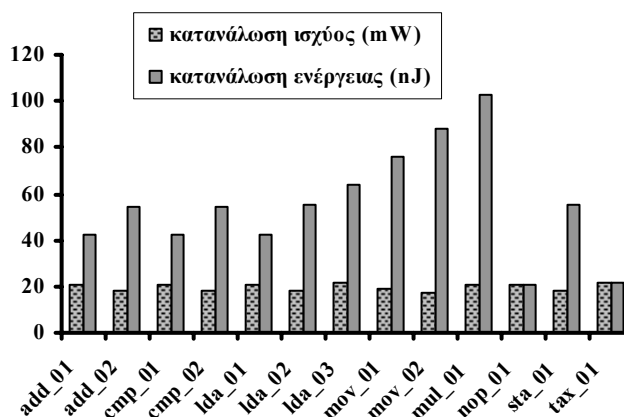
11 φορτίσεις ανά 1μΑ. Δηλαδή, παρατηρούμε ότι το σύστημα μας μετράει στην πρώτη περίπτωση με διακριτική ικανότητα 1μΑ ανά φόρτιση και στην δεύτερη περίπτωση με 0,09μΑ ανά φόρτιση. Θεωρούμε ότι τα νούμερα αυτά είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Από τις τελευταίες μετρήσεις καθίσταται σαφές ότι η διακριτική ικανότητα είναι άμεσα εξαρτημένη από το χρονικό διάστημα καταγραφής. Αυτό σημαίνει ότι ενδείκνυται να καταγράφουμε για μεγάλα χρονικά διαστήματα, μια και παίρνουμε πιο σαφή πληροφορία. Σε περιπτώσεις όπου το σύστημα υπό μέτρηση επαναλαμβάνει κάποιο πρόγραμμα σε συνεχή μορφή, τότε πράγματι μας βολεύει να χρησιμοποιούμε ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν όμως έχουμε σκοπό να μετρήσουμε μόνο ένα κομμάτι ενός προγράμματος και γενικότερα τις διακυμάνσεις που εμφανίζονται κατά την εκτέλεσή του, τότε δεν μπορούμε να μεγαλώνουμε το χρόνο όσο θέλουμε, γιατί αυξάνοντας το χρόνο πηγαίνουμε από πιο στιγμιαίες σε πιο μέσες τιμές.

Χρόνος καταγραφής	Ρεύμα εισόδου (mA)	Αριθμός φορτίσεων
153,6ms	1	1071
	0,990	1061
	0,980	1050
	0,970	1039
1,64s	1	11386
	0,999	11375
	0,998	11362
	0,997	11351

Σχήμα 5 – Μετρήσεις για τον υπολογισμό της διακριτικής ικανότητας

Αφού είδαμε τη συμπεριφορά του κυκλώματός μας σε διάφορα σταθερά ρεύματα εισόδου, στη συνέχεια θα κάνουμε ακόμα ένα βήμα και θα δούμε ένα ενδεικτικό σετ μετρήσεων σε πραγματικές συνθήκες και συγκεκριμένα στον μικροελεγκτή της Motorola MC68HC908GP32. Τα προγράμματα που θα εκτελέσουμε σε αυτόν τον μικροελεγκτή είναι σχετικά απλά και θα μας βοηθήσουν να εκτιμήσουμε κατά πόσο το κύκλωμά μπορεί να μετράει σωστά. Είναι μικρά προγράμματα αποτελούμενα από μια εντολή σε επανάληψη και μια εντολή που να εξασφαλίζει το συνεχόμενο βρόγχο του προγράμματος. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει το σχήμα 6.



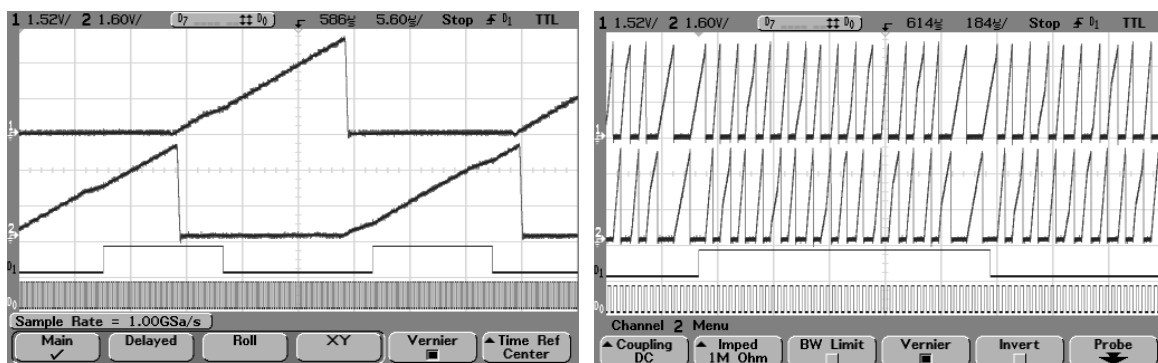
Όνομα αρχείου	Επαναλαμβανόμενη εντολή	Κατανάλωση ισχύος (mW)
add_01	add #\$00	21,04
add_02	add mem (mem=#\$00)	18,20
cmp_01	cmp #\$01	20,97
cmp_02	cmp mem (mem=#\$01)	18,20
lda_01	lda #\$00	20,97

lda_02	lda mem (mem=#\$00)	18,31
lda_03	lda rom	21,21
mov_01	mov #\$00,mem	18,93
mov_02	mov mem1,mem2 (mem1=#\$00)	17,70
mul_01	mul (ορίσματα #\$00)	20,62
nop_01	nop	21,11
sta_01	sta mem (τιμή #\$00)	18,34
sta_02	tax (τιμή #\$00)	21,37

Σχήμα 6 – Μετρήσεις του μικροελεγκτή MC68HC908GP32

Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται δυο δεδομένα για την κάθε εντολή. Το πρώτο είναι η μέση κατανάλωση ισχύος της κάθε εντολής ενώ το δεύτερο είναι η μέση κατανάλωση ενέργειάς της. Στον πίνακα του σχήματος φαίνεται και το είδος της εντολής που επαναλαμβάνεται. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στις περιπτώσεις των εντολών lda παρατηρούμε τα εξής: Στην ρουτίνα lda_01 δίνεται στον accumulator μια απευθείας τιμή, η εντολή διαρκεί 2 κύκλους και εμφανίζει μέση κατανάλωση ισχύος 20,97mW. Στην ρουτίνα lda_02 δίνεται η ίδια τιμή στον accumulator από μια θέση μνήμης, η εντολή διαρκεί 3 κύκλους και εμφανίζει μέση κατανάλωση ισχύος 18,31mW. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η δεύτερη ρουτίνα είναι πιο ενεργοβόρα, γιατί παρότι η μέση κατανάλωση ισχύος είναι μικρότερη, η εντολή αυτή διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Δηλαδή, προκύπτει το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι η πρόσβαση στην μνήμη είναι πιο ενεργοβόρα από την ανάθεση στον accumulator μιας τιμής απευθείας. Συγκρίνοντας και τις υπόλοιπες ρουτίνες, προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα, δείχνοντας έτσι ότι το σύστημα λειτουργεί σωστά σε ικανοποιητικό βαθμό.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του μικροελεγκτή κατεγράφησαν κυματομορφές ενδεικτικές της λειτουργίας του συστήματος μας, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7 – Κυματομορφές από τις μετρήσεις του μικροελεγκτή

Στην πρώτη εικόνα παρατηρούμε τις κυματομορφές στους πυκνωτές κατά την εκτέλεση ενός απλού προγράμματος στο μικροελεγκτή, όπου σε ένα πλήρη κύκλο εκτελούνται πολλές εντολές nop (No OPeration) ενώ στο ενδιάμεσο από αυτές τις εντολές ένα rip εξόδου πηγαίνει στο λογικό 1 και έπειτα στο λογικό 0 μια φορά σε κάθε επανάληψη. Στο σχήμα αυτό βλέπουμε τόσο το ρολόι όσο και το rip που αλλάζει συνεχώς. Παρατηρούμε ότι πλέον η καμπύλες φόρτισης δεν είναι απόλυτες ευθείες, χαρακτηριστικό των μεταβολών του ρεύματος που καταναλώνει ο μικροελεγκτής κατά την εκτέλεση της απλής αυτής ρουτίνας. Στο δεξιό σχήμα έχουμε βλέπουμε τις κυματομορφές που προκύπτουν για μια πολύ μικρότερη τιμή ρολογιού (50KHz έναντι 1MHz που ισχύει στο αριστερό σχήμα). Πλέον είναι πιο εμφανείς οι διαφορετικές κλίσεις στις κυματομορφές των πυκνωτών και έτσι μας δίνεται μια πιο καθαρή εικόνα για τη λειτουργία του κυκλώματος.

Θέλοντας να συνοψίσουμε από τις μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες, θεωρούμε ότι έχει επιτευχθεί ο βασικός στόχος με ικανοποιητική ακρίβεια και διακριτική ικανότητα. Εκτελώντας προγράμματα μιας εντολής σε επανάληψη και γνωρίζοντας περίπου το αναμενόμενο αποτέλεσμα προσπαθήσαμε να επαληθεύσουμε τη σωστή λειτουργία του συστήματός μας. Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, αφού για παράδειγμα σε εντολές που πότε γινόταν πρόσβαση στη μνήμη και πότε όχι, είχαμε μεγαλύτερη κατανάλωση όταν γινόταν χρήση της μνήμης, όπως ήταν και το αναμενόμενο.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση και ο έλεγχος ενός κυκλώματος ικανού να μετράει την κατανάλωση ενέργειας ψηφιακών συστημάτων με αρκετά καλή ακρίβεια. Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της μεθόδου που υλοποιήθηκε είναι η υψηλή ακρίβεια, η ικανότητα ενσωμάτωσης του κυκλώματος στο ίδιο ολοκληρωμένο με το ψηφιακό σύστημα, καθώς επίσης και η ικανότητα να πραγματοποιούνται μετρήσεις χωρίς να υπάρχει εξάρτηση από το ρολόι λειτουργίας του ψηφιακού συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sheayun Lee, Andreas Ermedahl, Sang Lyul Min, "An Accurate Instruction-Level Energy Consumption Model for Embedded RISC Processors", Proceedings of the ACM SIGPLAN workshop on Languages, compilers and tools for embedded systems, p.1-10, August 2001
- [2] N. Chang, K. Kim, and H. G. Lee, "Cycle-Accurate Energy Measurement and Characterization, with a Case Study of the ARM7TDMI," IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 10, No.2 pp. 146-154, April 2002
- [3] Vivek Tiwari, Sharad Malik, and Andrew Wolfe, "Power Analysis of Embedded Software: A First Step Towards Software Power Minimization", IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol.2, No.4, pp. 437-445, December 1994.
- [4] Vivek Tiwari, Sharad Malik, Andrew Wolfe, Mike Tien-Chien Lee, "Instruction level power analysis and optimization of software", Journal of VLSI Signal Processing Systems, v.13 n.2-3, p.223-238, Aug./Sept. 1996
- [5] G. Sinevriotis and Th. Stouraitis, "Power Analysis of The ARM 7 Embedded Microprocessor", Proc. of the 9th Inter. Workshop of Power and Timing Modelling, Optimization and Simulation (PATMOS '99), pp. 261-270, Greece, Oct. 1999
- [6] Sinevriotis G. and Stouraitis Th.: SOFLOPO: Low Power Software Development for Embedded Applications. Public Final Report, European Commission, ESD Best Practice: Pilot Action for Low Power Design (2001)
- [7] J. T. Russell, and M. F. Jacome, "Software Power Estimation and Optimization for High Performance, 32bit Embedded Processors," in Proceedings of the International Conference of Computer Design (ICCD '98), October 1998
- [8] A. Varma, Intel Corp. and Univ. of Maryland/College Park; E. Debes, I. Kozintsev, Intel Corp, B. L. Jacob, Univ. of Maryland/College Park "Instruction-Level Power Dissipation in the Intel XScale Embedded Microprocessor", Proceedings of SPIE Vol. #5683, January 2005
- [9] N. Kavvadias, P. Neofotistos, S. Nikolaidis, K. Kosmatopoulos and Th. Laopoulos, "Measurement Analysis of the Software-Related Power Consumption in Microprocessors", Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2003), May 2003
- [10] T. Laopoulos, P. Neofotistos, K. Kosmatopoulos, and S. Nikolaidis, "Measurement of Current Variations for the Estimation of Software-related Power Consumption", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.52.N.4, August 2003
- [11] V. Konstantakos, K. Kosmatopoulos, S. Nikolaidis, and Th. Laopoulos, "In-Chip Configuration for Monitoring Power Consumption in Micro-processing Systems", IEEE International

Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sept. 2005