



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Σχεδιασμός και υλοποίηση έξυπνου μετρητή
ηλεκτρικής ενέργειας (smart energy meter)»*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Φούρναρη Μάρου

Επιβλέπων

Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2024

(Υπογραφή)

.....

ΦΟΥΡΝΑΡΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Φούρναρης Μάριος, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την υλοποίηση ενός έξυπνου τριφασικού μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας (Three Phase Smart Energy Meter), με χρήση μικροϋπολογιστικού συστήματος καθώς και όλων των απαραίτητων αισθητηρίων μέτρησης και περιφερειακών, βασισμένος σε κριτήρια χαμηλού κόστους. Σχεδιαστικά, ο έξυπνος μετρητής που υλοποιήθηκε αποτελεί συσκευή η οποία ανήκει στο οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things) και έχει τη δυνατότητα ενοποίησης με συστήματα και εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτήν την αρχιτεκτονική. Το μικροϋπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην κατηγορία μικροελεγκτών υψηλής απόδοσης (high performance), διαθέτει διαυλο 32-bit (χρονισμός έως και 400MHz), αρχιτεκτονική ARM Cortex με DSP (Digital Signal Processor), FPU (DFU - Double Precision Floating Point Unit) διπλής ακρίβειας, καθώς και ένα πλήθος ενσωματωμένων μηχανισμών και λειτουργιών κατάλληλων για την υλοποίηση του βασικού συστήματος μέτρησης (τάση, ρεύμα, ισχύ, συχνότητα και ενέργεια) αλλά και όλων των υπολοίπων βοηθητικών λειτουργιών (μέτρηση περιβαλλοντικών συνθηκών, παραγωγή παλμών ενέργειας, εντολές εξόδου, διεπαφές χρήστη κτλ.).

Μέρος της υλοποίησης αποτελεί και η ανάπτυξη ολοκληρωμένης εφαρμογής απομακρυσμένης οπτικοποίησης, παρακολούθησης και ελέγχου του έξυπνου μετρητή. Ο έξυπνος μετρητής έχει τη δυνατότητα αποστολής των δεδομένων μέτρησης (τάση, ρεύμα, ισχύ, συχνότητα και ενέργεια) σε ψηφιακή πλατφόρμα τύπου νέφους (Grafana), μέσω του διαλειτουργικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT, αναπαριστώντας τα γραφικά σε πραγματικό χρόνο. Η ψηφιακή πλατφόρμα είναι συνδεδεμένη με βάση δεδομένων χρονοσειρών τύπου νέφους (InfluxDB) η οποία διατηρεί το ιστορικό των μετρήσεων, επιτρέποντας την ανάκτηση των δεδομένων στο επιθυμητό χρονικό διάστημα. Επίσης η παρούσα υλοποίηση επιτρέπει την αποστολή απομακρυσμένων εντολών από την ψηφιακή πλατφόρμα προς τον έξυπνο μετρητή ενεργοποιώντας προγραμματισμένες λειτουργίες όπως διαχείριση φορτίου, χειροκίνητη βαθμονόμηση των αισθητηρίων και χειροκίνητο συγχρονισμό του ρολογιού πραγματικού χρόνου.

Τέλος, η όλη κατασκευή είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να μπορεί να συνδεθεί εύκολα με οποιαδήποτε παροχή (χαμηλής ή μέσης τάσης).

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελείται από τις ακόλουθες ενότητες:

- Στην **1^η Ενότητα** (Εισαγωγή) γίνεται μία σύντομη περιγραφή των σύγχρονων αναγκών μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφεται ο σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας και των σταδίων υλοποίησης του έξυπνου μετρητή ενέργειας.
- Στην **2^η Ενότητα** (Έξυπνο δίκτυο και Έξυπνοι μετρητές) περιγράφεται το έξυπνο δίκτυο, οι καινοτομίες και τα πλεονεκτήματα που εισάγει έναντι των παραδοσιακών δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ αναπτύσσονται τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες του έξυπνου μετρητή που αποτελεί και το κεντρικό ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας ως συστατικό στοιχείο ενός έξυπνου δικτύου.
- Στην **3^η Ενότητα** (Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων - IoT) περιγράφεται η φιλοσοφία και η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αντιμετωπίζοντας τον έξυπνο μετρητή που υλοποιείται ως αντικείμενο ενός τέτοιου οικοσυστήματος.
- Στην **4^η Ενότητα** (Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή Ενέργειας – Περιγραφή Υλικού) αναπτύσσονται λεπτομερώς όλα τα συστήματα και τα υποσυστήματα που αποτελούν τον έξυπνο μετρητή και

παρουσιάζονται οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες των λειτουργιών του (προδιαγραφές υλικού, σχηματικά διαγράμματα).

- Στην **5^η Ενότητα** (Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή Ενέργειας – Ανάλυση Συστήματος Μέτρησης) αναλύονται λεπτομερώς οι τεχνικές μέτρησης των ηλεκτρικών μεγεθών και ο τρόπος υλοποίησής τους στο μικροϋπολογιστικό σύστημα του έξυπνου μετρητή.
- Στην **6^η Ενότητα** (Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή Ενέργειας – Περιγραφή Λογισμικού) περιγράφεται το λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε και το οποίο ενοποιεί το υλικό του έξυπνου μετρητή με τους αλγόριθμους των βασικών και των επιμέρους λειτουργιών του. Οι αλγόριθμοι παρουσιάζονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροής για την ευκολότερη κατανόηση της ροής των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν.
- Στην **7^η Ενότητα** παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα κατόπιν εφαρμογής του μετρητή σε πραγματική κατανάλωση ενώ αναπτύσσονται προτάσεις βελτίωσης και μελλοντικής έρευνας.

Λέξεις – κλειδιά: έξυπνος μετρητής, smart grid, smart meter, IoT (Internet of Things), MQTT, A/D conversion, STM32, MQTT Broker, MQTT Client, Grafana, NoSQL, PLL, πρωτόκολλα επικοινωνίας, InfluxDB, QoS, CGI-PLL.

Abstract

This Master Thesis addresses the design, development, and implementation of Three Phase Smart Energy Meter (SEM), using a high-performance microcontroller system including all necessary sensors and peripherals, and based on low-cost criteria. This smart meter, belongs to the Internet of Things (IoT) ecosystem, and thus, is capable of integration with systems and applications that utilize the former architecture.

The microcontroller used has 32-bit bus system with a clock speed up to 400MHz, featuring an ARM Cortex architecture with a Digital Signal Process (DSP) unit, a double-precision Floating Point Unit (FPU), and several embedded mechanisms and functionalities suitable for implementing the primary measuring system (voltage, current, frequency, power, and energy) as well as additional auxiliary functions (environmental condition measurement, energy pulse generation, output commands, user interfaces, etc.).

The whole implementation also includes the development of a comprehensive application for remote monitoring, visualization and control of the smart meter. The smart meter can send measurements to a cloud-based digital platform (Grafana) via the MQTT communication protocol, enabling real-time graphical representation. The digital platform is also connected to a cloud timeseries database (InfluxDB), which maintains the measurement history, allowing data retrieval for any desired time frame. Additionally, this implementation allows remote commands to be sent from the digital platform to the smart meter, activating program functions such as load management, manual sensor calibration and real-time clock synchronization.

Finally, the entire system is designed to easily connect to any power supply (low or medium voltage grid).

The Master Thesis consists of the following sections:

- **1st Section (Introduction):** A brief description of the modern needs for energy measurement, the purpose of this thesis, and the stages of implementing the smart energy meter.
- **2nd Section (Smart Grid and Smart Meters):** Describes the smart grid fundamentals, the innovations, and advantages it introduces over traditional electricity distribution grids, and the characteristics and functions of the smart meter as a component of a smart grid.
- **3rd Section (Internet of Things, IoT):** Describes the philosophy and architecture of the IoT considering the implemented smart meter as part of such an ecosystem.
- **4th Section (Implementation of the Smart Energy Meter – Hardware Description):** Details all systems and subsystems comprising the smart meter, presenting design details of its functions (hardware specifications, schematic diagrams).
- **5th Section (Implementation of the Smart Energy Meter – Measurement System Analysis):** Analyzes the measurement techniques and how they are implemented in the microcontroller system of the smart meter.
- **6th Section (Implementation of the Smart Energy Meter – Software Description):** Describes the software developed to integrate the hardware of the smart meter with the algorithms of its primary and auxiliary functions. The algorithms are presented in flowchart form for easier understanding of the developed programs.
- **7th Section (Experimental Results):** Presents all experimental results following the meter's application in actual consumption and suggests improvements and future research directions.

Key words: smart grid, smart meter, IoT (Internet of Things), MQTT, A/D conversion, STM32, MQTT Broker, MQTT Client, Grafana, NoSQL, PLL, InfluxDB, QoS, CGI-PLL.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κορρέ Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για τη βοήθειά του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

ΜΑΡΙΟΣ Χ. ΦΟΥΡΝΑΡΗΣ

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^Η: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.3 ΣΤΑΔΙΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΞΥΠΙΝΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ	2
ΕΝΟΤΗΤΑ 2^Η: 'ΕΞΥΠΙΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ 'ΕΞΥΠΙΝΟΙ ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	5
2.1 'ΕΞΥΠΙΝΑ ΔΙΚΤΥΑ	5
2.1.1. Ορισμός	5
2.1.2. Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες έξυπνου δικτύου	5
2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΕΞΥΠΙΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	7
2.3 'ΕΞΥΠΙΝΟΣ ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	8
2.3.1. Γενικά.....	8
2.3.2. Χαρακτηριστικά, λειτουργίες και οφέλη έξυπνου μετρητή.....	8
2.3.3. Βασική δομή έξυπνου μετρητή.....	9
2.3.4. Προδιαγραφές έξυπνου μετρητή.....	10
ΕΝΟΤΗΤΑ 3^Η: ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (INTERNET OF THINGS, IOT)	13
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	13
3.2 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΙΟΤ	14
3.3 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΣ ΙΟΤ	15
3.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΙΟΤ.....	16
3.4.1. Γενικά.....	16
3.4.2. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT.....	17
ΕΝΟΤΗΤΑ 4^Η: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ 'ΕΞΥΠΙΝΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ	21
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
4.2 Η ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗ ΠΛΑΚΕΤΑ NUCLEO-H743ZI	22
4.3 ΜΙΚΡΟΪΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ – ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ.....	23
4.4 ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΤΑΣΗΣ	25
4.5 ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	27
4.6 ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ/ΥΓΡΑΣΙΑΣ	29
4.7 ΟΘΟΝΗ ΥΤΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ LCD	30
4.8 ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ ΕΞΟΔΟΥ	31
4.9 ΜΟΝΑΔΑ ΒΟΗΘΗΤΙΚΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ.....	32
ΕΝΟΤΗΤΑ 5^Η: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ 'ΕΞΥΠΙΝΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	35
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	35
5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	41
5.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	46
5.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	48
5.5.1 Βασικοί Ορισμοί.....	48
5.5.2 Υλοποίηση ψηφιακής μέτρησης ισχύος	49
5.6 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	50
5.6.1 Βασικοί Ορισμοί.....	50

5.6.2	Υλοποίηση ψηφιακής μέτρησης ενέργειας.....	51
-------	--	----

ΕΝΟΤΗΤΑ 6Η: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΈΞΥΠΝΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ (FIRMWARE)..... 53

6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
6.2	ΚΥΡΙΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ (MAIN PROGRAM) ΚΑΙ ΚΥΡΙΟ ΝΗΜΑ (MAIN THREAD)	53
6.3	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΥΠΝΟΥ ΜΕΤΡΗΤΗ	55
6.3.1	Ρουτίνα αρχικοποίησης έξυπνου μετρητή.....	55
6.3.2	Νήμα κύριας λειτουργίας έξυπνου μετρητή (Energy Meter thread)	56
6.3.3	Νήμα βοηθητικών μετρήσεων (Auxiliary thread).....	57
6.3.4	Νήμα βαθμονόμησης αισθητηρίων (Calibration thread).....	58
6.3.5	Ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπών (IRQs).....	59
6.3.6	Ρουτίνα παρουσίας σφάλματος (Error Handler)	60
6.3.7	Νήμα παραγωγής παλμών ενέργειας (Energy Pulse Generation Thread).....	61
6.4	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (MQTT INTERFACE)	62
6.4.1	Ρουτίνα αρχικοποίησης MQTT διεπαφής.....	62
6.4.2	Νήμα διαχείρισης αποστολής δεδομένων (MQTT thread)	63
6.4.3	Ρουτίνα λήψης δεδομένων (MQTT incoming data callback)	64
6.5	ΝΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ/ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΧΩΡΟΥ (DHT11 THREAD).....	66
6.6	ΝΗΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΩΡΑΣ (SNTP THREAD)	66
6.7	ΝΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΜΕ ΟΘΟΝΗ ΥΓΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ (LCD THREAD).....	67
6.8	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ	70
6.8.1	Δίκτυο επικοινωνίας ψηφιακής εφαρμογής.....	70
6.8.2	IoT dockers και containers.....	70
6.8.3	MQTT Broker	71
6.8.4	Αναπτυξιακό λογισμικό Node-RED	73
6.8.5	Βάση δεδομένων InfluxDB.....	74
6.8.6	Πλατφόρμα οπτικοποίησης, παρακολούθησης και ελέγχου Grafana.....	76

ΕΝΟΤΗΤΑ 7Η: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ..... 81

7.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	81
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	100
7.3	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ	100
7.4	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	101

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....103

Λίστα Συμβόλων

$ADC1buffer[n]_x$	Καταχωρητής αποτελέσματος A/D μετατροπής ADC1 δείγματος αισθητηρίου τάσης στην φάση x
$ADC1offset_x$	DC offset αισθητηρίου τάσης στην φάση x
$ADC2buffer[n]_x$	Καταχωρητής αποτελέσματος A/D μετατροπής ADC2 δείγματος αισθητηρίου ρεύματος στην φάση x
$ADC2offset_x$	DC offset αισθητηρίου ρεύματος στην φάση x
ADC_{max}	Μέγιστη τιμή καταχωρητή A/D μετατροπής
CT_{ratio}	Σχέση μετασχηματισμού του μετασχηματιστή έντασης
CT_{error}	Σφάλμα μετασχηματισμού του μετασχηματιστή έντασης
$E_{act,x}, E_{react,x}$	Ανα φάση ενεργός και άεργος ενέργεια
$E_{act,total}, E_{react,total}$	Συνολική ενεργός και άεργος ενέργεια
f_b	Βασική συχνότητα δικτύου
f_s	Συχνότητα δειγματοληψίας
f_0	Σταθερά συχνότητας του VCO
f_n	Εκτιμώμενη συχνότητα
$f_{Nyquist}$	Συχνότητα Nyquist
f_{50th}	Συχνότητα 50 th αρμονικής συνιστώσας της τάσης του δικτύου
I_{rms}	Ενεργός τιμή του ρεύματος
$i(t)$	Στιγμιαία ένταση ρεύματος
$i[n]_x$	Δείγμα ρεύματος της φάσης x
k_s	Συντελεστής απόσβεσης (CGI-PLL)
K_i	Σταθερά αναγωγής του ρεύματος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή έντασης στο πρωτεύον
K_{sens}	Ευαισθησία αισθητηρίου ρεύματος
K_{va}, K_{vb}	Σταθερές προσαρμογής της τάσης εξόδου των αισθητηρίων τάσης
k_p, k_i	Ενισχυτική και ολοκληρωτική παράμετρος PI ελεγκτή (CGI-PLL)
$K_{act,x}, K_{react,x}$	Ανα φάση σταθερές προσαρμογής του αποτελέσματος υπολογισμού της ενεργού και άεργου ισχύος
N_s	Πλήθος δειγμάτων συστήματος δειγματοληψίας
N_c	Πλήθος κύκλων μέτρησης
P_x, Q_x, S_x, PF_x	Ανα φάση ενεργός, άεργος, φαινομένη και συντελεστής ισχύος
$P_{total}, Q_{total}, PF_{total}$	Συνολική ενεργός, άεργος, φαινομένη και συντελεστής ισχύος
S_k	Πλάτος k-οστής συνιστώσας σήματος στο πεδίο συχνότητας
T_s	Περίοδος δειγματοληψίας
u_{in}	Σήμα εισόδου CGI-PLL
u_d, u_q	Στιγμιαίες τάσης στον άξονα d-q κατά τον μετασχηματισμό Park (CGI-PLL)

$v_2 \cdot qv_2$	Στιγμιαίες τάσεις εξόδου δεύτερης βαθμίδας OSG του CGI-PLL
V_{rms}	Ενεργός τιμή τάσεως
$v(t)$	Δείγμα τάσης της φάσης x
$v[n]_x$	Δείγμα τάσης της φάσης x
$v_{90}[n]_x$	Δείγμα τάσης φάσης x μετατοπισμένο κατά 90°
$v_{CT}[n]_x$	Δείγμα τάσης δευτερεύοντος μετασχηματιστή έντασης φάσης x
v_{ref}	Τάση αναφοράς μικροελεγκτή έξυπνου μετρητή
y_{pi}	Σήμα εξόδου ελεγκτή PI (CGI-PLL)
$\widehat{\omega t}, \widehat{\theta}$	Εκτιμώμενη γωνία τάσης στη θεμελιώδη συχνότητα
Δf	Ανάλυση συχνότητας

Λίστα Ακρωνυμίων

Ακρωνύμιο	Αγγλική ορολογία	Ελληνική ορολογία
ADC	Analog to Digital Converter	Μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
API	Application Programming Interface	Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών
AMI	Advanced Metering Infrastructure	Προηγμένη υποδομή μέτρησης
DMA	Direct Memory Access	Απευθείας προσπέλαση μνήμης
DER	Distributed Energy Resources	Κατανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι
DSP	Digital Signal Process	Ψηφιακή επεξεργασία σήματος
DFT	Discrete Fourier Transform	Μετασχηματισμός Fourier στο διακριτό χρόνο
FACTS	Flexible AC Transmission Systems	Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
FFT	Fast Fourier Transform	Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier
FPU	Floating-Point Unit	Μονάδα κινητής υποδιαστολής
HAN	Home Area Network	Οικιακό δίκτυο IoT
HTTP	HyperText Transfer Protocol	Πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκειμένου
IoT	Internet of Things	Το διαδίκτυο των πραγμάτων
LPF	Low-Pass Filter	Χαμηλοπερατό φίλτρο
MPU	Memory Protection Unit	Μονάδα προστασίας μνήμης
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	Τηλεμετρία μέσω μεταφοράς μηνυμάτων που βρίσκονται σε ουρά
NVIC	Nested Vectored Interrupt Control	Ένθετος ελεγκτής διανυσμάτων διακοπών
NAN	Neighbor Area Network	Γειτονικό δίκτυο IoT
OSG	Orthogonal Signal Generator	Γεννήτρια ορθογώνιων σημάτων
PLL	Phase -Locked Loop	Διάταξη κλειδώματος φάσης
PI	Proportional Integral Controller	Ελεγκτής PI
PMU	Phasor Metering Unit	Μονάδα μέτρησης φασιθετών

QoS	Quality of Service	Επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας (MQTT)
RFID	Radio Frequency Identification	Αναγνώριση Ραδιοσυχνοτήτων
RMS	Root Mean Square	Ενεργός τιμή σήματος
RTC	Real Time Clock	Ρολόι πραγματικού χρόνου
SNR	Signal to Noise Ratio	Λόγος σήματος προς θόρυβο
SMGW	Smart Meter Gateway	Πύλη έξυπνου μετρητή
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	Σύστημα εποπτείας, ελέγχου και λήψης αποφάσεων
SEM	Smart Energy Meter	Έξυπνος μετρητής ενέργειας
SMPS	Switched-Mode Power Supply	Τροφοδοτικό υψηλής διακοπτικής συχνότητας
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol	Πρωτόκολλο ελέγχου μεταφοράς/ Πρωτόκολλο Διαδικτύου
VCO	Voltage Control Oscillator	Ταλαντωτής ελέγχου τάσης
WAN	Wide Area Network	Δίκτυο ευρείας περιοχής (IoT)
WAMS	Wide Area Monitoring System	Σύστημα παρακολούθησης ευρείας περιοχής
XML	Extensible Markup Language	Εκτεταμένη γλώσσα σήμανσης

Ενότητα 1^η: Εισαγωγή

1.1 Σύγχρονες ανάγκες μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας

Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει την ανάγκη εύρεσης νέων λύσεων για την κάλυψή της με βιώσιμο τρόπο, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει ενεργοποιηθεί ένα σχέδιο υψηλού βαθμού διεύθυνσης παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (αιολικοί, ηλιακοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Ταυτόχρονα η αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής σε συνδυασμό με την σταδιακή απομάκρυνση των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί και μία αβεβαιότητα ως προς τη διαθεσιμότητα της παραγόμενης ενέργειας και την αξιοπιστία του δικτύου.

Συνεπώς η αναλυτική και η υψηλή ακρίβεια στην μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται επιτακτική. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται η αποδοτική διαχείριση ενέργειας διευκολύνοντας την βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και την μείωση των απωλειών. Στο πλαίσιο μαζικής διεύθυνσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΑΠΕ (φωτοβολταϊκών και αιολικών πηγών ενέργειας κατά κύριο λόγο), η αναλυτική μέτρηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση της δυναμικότητας (ικανότητας απορρόφησης) του δικτύου ώστε η ενσωμάτωσή τους σε αυτό να γίνεται με αποδοτικό τρόπο. Με την αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων και γενικότερα την ανάπτυξη των δικτύων υποστήριξης της ηλεκτροκίνησης (δίκτυα φορτιστών πόλης), η παρακολούθηση και ο έλεγχος της ροής ισχύος του δικτύου σε πραγματικό χρόνο αποτελούν ζωτικής σημασίας εργαλεία για την εξασφάλιση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας του δικτύου. Τέλος, σε βιομηχανικό επίπεδο, η ακρίβεια στην μέτρηση της ισχύος είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση της απόδοσης του εξοπλισμού, ώστε να διασφαλίζεται η συμμόρφωση με τους κανονισμούς και να εξευρίσκονται ευκαιρίες για εξοικονόμηση ενέργειας.

Συμπερασματικά λοιπόν, παρουσιάζεται η ανάγκη μετάβασης σε ένα εκσυγχρονισμένο δίκτυο το οποίο θα αποτελείται από «έξυπνες» συσκευές οι οποίες θα μπορούν να καταγράφουν και να προβλέπουν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την λήψη αποφάσεων για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος (θεωρητικό μέρος) αφορά τη σύντομη θεωρητική ανάπτυξη της τεχνολογίας των έξυπνων συσκευών (smart things, IoT devices) και ειδικότερα των μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας (smart energy meters) ως σύγχρονων μέσων παρακολούθησης και εξοικονόμησης ενέργειας στο πλαίσιο της επερχόμενης ενεργειακής μετάβασης.

Το δεύτερο μέρος (εργαστηριακό-κατασκευαστικό μέρος) έχει ως σκοπό τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός τριφασικού έξυπνου μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας με κριτήρια χαμηλού κόστους, ο οποίος θα ενσωματώνει τις περισσότερες από τις λειτουργίες που προσφέρει ένα αντίστοιχος εμπορικού τύπου.

Επιπλέον, μέρος της πρωτότυπης κατασκευής είναι και η ανάπτυξη ηλεκτρονικής πλατφόρμας τύπου νέφους (IoT cloud service platform) αμφίδρομης επικοινωνίας, για την συλλογή και απεικόνιση (data concentration and visualization) των μετρήσεων και των δεδομένων του έξυπνου μετρητή.

1.3 Στάδια υλοποίησης και δοκιμής έξυπνου μετρητή

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια υλοποίησης του έξυπνου μετρητή ενέργειας.

- Σχεδιασμός δομικών στοιχείων του έξυπνου μετρητή, επιλογή και αξιολόγηση των επιμέρους υλικών (αισθητηρίων τάσης, ρεύματος, θερμοκρασίας / υγρασίας, σύστημα τροφοδοσίας, μικροϋπολογιστικό σύστημα, ερμάριο μετρητή κτλ.), έλεγχος διαθεσιμότητας επιλεγμένων υλικών στην αγορά, παραγγελία και παραλαβή απαιτούμενων υλικών.
- Κατασκευή βοηθητικών κυκλωμάτων, συναρμολόγηση και καλωδίωση του έξυπνου μετρητή.
- Σχεδιασμός των επιμέρους αλγορίθμων για την μέτρηση και τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ενεργός και άεργος ισχύς, συντελεστής ισχύος, πραγματική και άεργος ενέργεια, θερμοκρασία, υγρασία κτλ.) αλλά και των διαφόρων λειτουργιών (απρόσκοπτη λειτουργία μετρητή με διατήρηση δεδομένων σε non-volatile μνήμη, παραγωγή παλμών κατανάλωσης, αποστολή δεδομένων σε οθόνη υγρών κρυστάλλων και σε ψηφιακή πλατφόρμα τύπου νέφους κτλ.).
- Βαθμονόμηση των αισθητηρίων τάσης και ρεύματος του μετρητή μέσω οργάνων ακριβείας τα οποία διαθέτει το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της ΣΗΜΜΥ/ΕΜΠ.
- Γραφή κυρίου προγράμματος και υποπρογραμμάτων στην μικροϋπολογιστική μονάδα του μετρητή σε γλώσσα C, μέσω λογισμικού πακέτου διαθέσιμου από την κατασκευάστρια εταιρεία της μικροϋπολογιστικής μονάδας. Αναλυτικά τα υπό ανάπτυξη προγράμματα αφορούν: την υλοποίηση των αλγορίθμων λήψης πρωτογενών σημάτων τάσης, ρεύματος, θερμοκρασίας και υγρασίας, την επεξεργασία και την βαθμονόμησή τους, την εφαρμογή των αλγορίθμων του σχεδιαστικού μέρους για τον υπολογισμό των ενεργών τιμών τάσης και ρεύματος, πραγματικής και άεργου ισχύος, τον συντελεστή ισχύος, την υλοποίηση αλγορίθμου εκτίμησης της συχνότητας και συγχρονισμού των δειγμάτων που λαμβάνονται, τον υπολογισμό της ημερήσιας και συνολικής παραγωγής και κατανάλωσης, την υλοποίηση αλγορίθμου αυτόματης βαθμονόμησης των αισθητηρίων σε συγκριμένες χρονικές στιγμές, την υλοποίηση αλγορίθμου αποθήκευσης των δεδομένων ώστε να μην χάνονται σε περιπτώσεις απώλειας της τάσεως και να ανακτώνται με την επαναφορά της (λειτουργία RTC backup registers), την υλοποίηση προγράμματος απεικόνισης των δεδομένων σε οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD), την υλοποίηση προγράμματος παραγωγής παλμών για την μέτρηση της ακριβείας υπολογισμού της ενέργειας από τον μετρητή (LED pulse generator), την υλοποίηση διεπαφής προγράμματος αποστολής των δεδομένων μέσω δικτύου επικοινωνίας, την υλοποίηση προγράμματος ανίχνευσης μέγιστης κατανάλωσης με κατάλληλη σηματοδότηση ή εντολή (εντολή σε solid state ρελέ).
- Ανάπτυξη δικτυακής πλατφόρμας αμφίδρομης επικοινωνίας με τον έξυπνο μετρητή. Πρόκειται για την ανάπτυξη ενός δικτύου IoT (βλ. σχήμα 6.15), αποτελούμενου από την διεπαφή επικοινωνίας του μετρητή με υλοποιημένο πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT (Message Queuing Transport Telemetry), δηλαδή ανάπτυξη διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (Application

Programming Interface, API) στον μικροελεγκτή ώστε να μπορεί να λειτουργεί ως MQTT client και να στέλνει τα επιλεγμένα δεδομένα σε έναν εξυπηρετητή (MQTT Broker), ανάπτυξη του δρομολογητή (IoT docker) ο οποίος συντονίζει την επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτή - βάσης δεδομένων - εξυπηρετητή ενώ ταυτόχρονα ελέγχει την ορθή λειτουργία των επιμέρους υπηρεσιών, ανάπτυξη διεπαφής αποστολής των επιλεγμένων δεδομένων σε βάση δεδομένων τύπου NoSQL η οποία θα επικοινωνεί με τον μετρητή μέσω πρωτοκόλλου HTTP και θα αποθηκεύει τις μετρήσεις σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ανάπτυξη της πλατφόρμας γραφικής απεικόνισης η οποία θα λαμβάνει μετρήσεις από την NoSQL βάση δεδομένων και θα απεικονίζει τα αποτελέσματα.

- Δοκιμή και παρακολούθηση του έξυπνου μετρητή σε πραγματική κατανάλωση ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την λειτουργία του.

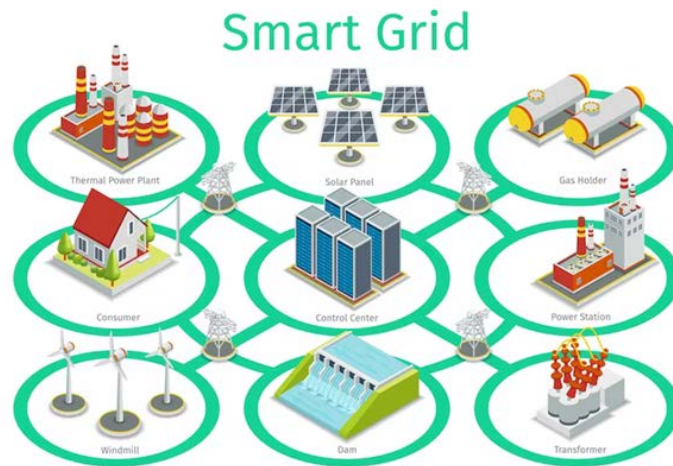
Τα παραπάνω στάδια αναλύονται επαρκώς στην 5^η και 6^η ενότητα.

Ενότητα 2^η: Έξυπνα Δίκτυα και Έξυπνοι Μετρητές Ενέργειας

2.1 Έξυπνα Δίκτυα

2.1.1. Ορισμός

Το έξυπνο δίκτυο (Smart Grid, SG) είναι ένα σύγχρονο δίκτυο ενέργειας που ενσωματώνει τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητας, την σταθερότητα και την ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να αντλεί και να επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο δεδομένα από «έξυπνες» συσκευές με σκοπό την εύρυθμη λειτουργία και την αποδοτικότερη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων του.



Σχήμα 2.1: Τυπικό τοπολογικό διάγραμμα έξυπνου δικτύου (πηγή: enchargingsummit.com).

Αποτελεί μία τεχνολογική εξέλιξη που στοχεύει στη δημιουργία ενός πιο αποδοτικού, αξιόπιστου και βιώσιμου ενεργειακού συστήματος, προσαρμοσμένου στις σύγχρονες ανάγκες της κοινωνίας και της οικονομίας.

2.1.2. Χαρακτηριστικά και τεχνολογίες έξυπνου δικτύου

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι από τους βασικούς πυλώνες που χαρακτηρίζουν τα έξυπνα δίκτυα ως τον ακρογωνιαίο λίθο του εκσυγχρονισμού των ενεργειακών συστημάτων, στοχεύοντας στην ανθεκτικότητα, την αποδοτικότητα και την βιωσιμότητά τους.

- Αλληλεπίδραση μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών σε πραγματικό χρόνο με σκοπό την εξισορρόπηση της ζήτησης και της παραγωγής και τον περιορισμό των αιχμών του δικτύου.
- Πρόσβαση των καταναλωτών σε μία ευρεία επιλογή παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου, περιορίζοντας την πλεονάζουσα χρήση των γραμμών μεταφοράς και διανομής με χρήση προηγμένων μετρητικών συστημάτων (Advanced Metering Infrastructure, AMI) και συστημάτων παρακολούθησης (monitoring systems).
- Αύξηση της αξιοπιστίας ενσωματώνοντας διατάξεις οι οποίες μπορούν να εντοπίζουν έγκαιρα τα σφάλματα του δικτύου και να λαμβάνουν πολύ γρήγορα αυτοματοποιημένες αποφάσεις χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.
- Διευκόλυνση στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DERs) στο δίκτυο, συμβάλλοντας στην μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος.
- Ενισχυμένη ασφάλεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας το ανθεκτικότερο σε κυβερνοεπιθέσεις, ρευματοκλοπές και φυσικές καταστροφές.

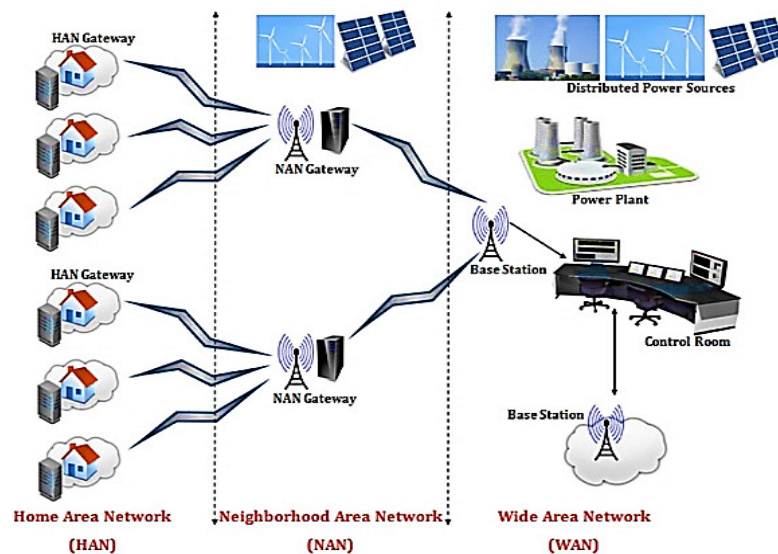
Για την επίτευξη των προηγούμενων στόχων, ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να ενσωματώσει μία πληθώρα από ολοκληρωμένα συστήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από αυτά:

- **Συστήματα εποπτείας, ελέγχου και λήψης αποφάσεων (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA).** Βρίσκουν χρήση κυρίως στον τομέα ελέγχου και παρακολούθησης υποσταθμών, σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας και σε άλλες βιομηχανικές διαδικασίες. Σε ένα έξυπνο δίκτυο μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, υψηλού επιπέδου αυτοματισμούς και προηγμένα μέτρα κυβερνοασφάλειας.
- **Προηγμένα μετρητικά συστήματα (Advanced Metering Infrastructure, AMI).** Πρόκειται για ένα σύγχρονο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία αμφίδρομης επικοινωνίας (two-way communication) μεταξύ δικτύου και καταναλωτών μέσω προηγμένων συσκευών μέτρησης.
- **Συγχρονισμένοι μετρητές φασιθетών (Phasor Measurement Units, PMUs).** Πρόκειται για αισθητήρες υψηλής ταχύτητας εγκατεστημένους στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι μετρούν σε πραγματικό χρόνο τους φασιθέτες (μέτρο και γωνία) της κυματομορφής των ρευμάτων και των τάσεων του δικτύου. Χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας (έως και 60 δείγματα το δευτερόλεπτο) προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με ένα SCADA. Τα δεδομένα αποστέλλονται σε κεντρικές βάσεις δεδομένων χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα επικοινωνίας όπου γίνεται επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Η ενοποίηση πολλών PMUs σε ένα δίκτυο συνθέτουν τα **συστήματα μέτρησης ευρείας περιοχής (Wide Area Measurement System, WAMS).**
- **Έξυπνοι μετρητές ενέργειας (Smart Energy Meters).** Ηλεκτρονικές συσκευές καταγραφής ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (κατανάλωση ή/και παραγωγή) με δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ τους αλλά και με ένα κεντρικό σύστημα συλλογής δεδομένων. Οι συσκευές αυτές αποτελούν το βασικό αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται εκτενής αναφορά σε αυτές.
- **Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Flexible, AC transmission Systems, FATCS).** Πρόκειται για τεχνολογίες οι οποίες βελτιώνουν την ελεγχιμότητα και αυξάνουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να ενισχύσει την ευελιξία και την αξιοπιστία του.

2.2 Αρχιτεκτονική τηλεπικοινωνιών έξυπνου δικτύου

Οι συσκευές που αποτελούν την υποδομή ενός έξυπνου δικτύου, όπως είναι οι έξυπνοι μετρητές, οι μετασχηματιστές ισχύος, οι υποσταθμοί, τα κέντρα ελέγχου ενέργειας, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούν μία καλά δομημένη αρχιτεκτονική τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την μεταφορά της πληροφορίας (σχήμα 2.2). Η αρχιτεκτονική αυτή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή αξιοπιστία, σταθερότητα, ασφάλεια και υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες. Τα βασικότερα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, στα οποία στηρίζεται η αρχιτεκτονική του δικτύου επικοινωνίας ενός έξυπνου δικτύου, είναι τα ακόλουθα:

- **Οικιακό δίκτυο (Home Area Network, HAN).** Ένας έξυπνος μετρητής για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιεί το οικιακό δίκτυο HAN για να ενημερώνει τον πάροχο για την ενέργεια που έχει καταναλωθεί. Το οικιακό δίκτυο HAN συνήθως χρησιμοποιεί πρωτόκολλα Bluetooth, Wired και Wireless Ethernet, Zigbee κτλ.
- **Γειτονικό δίκτυο (Neighbor Area Network, NAN).** Ενεργοποιεί την συλλογή δεδομένων από διάφορους τοπικούς καταναλωτές συνθέτοντας ένα δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN). Για παράδειγμα οι έξυπνοι μετρητές κάθε καταναλωτή από ένα δίκτυο HAN μπορούν να στέλνουν δεδομένα σε πύλες WAN (gateways) μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF).
- **Δίκτυο Ευρείας Περιοχής (Wide Area Network, WAN).** Το δίκτυο WAN δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των έξυπνων μετρητών, των παρόχων και του διαχειριστή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως χρησιμοποιεί τεχνολογίες οπτικών ινών (fiber optics), 3G/LTE (Long Term Evolution)/GSM(Global System for Mobile Communication ή WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
- **Δίκτυο Ευρείας Περιοχής – Μεγάλου εύρους (Long Range WAN, LoRaWAN)** Συνήθως χρησιμοποιείται στην τεχνολογία IoT (Internet of Things), κατάλληλο για εφαρμογές όπως διαχείριση ενέργειας, απόδοση υποδομής και παρεμπόδισης καταστροφών.



Σχήμα 2.2: Τοπικό τοπολογικό διάγραμμα αρχιτεκτονικής τηλεπικοινωνιακού δικτύου έξυπνου δικτύου[1].

2.3 Έξυπνος μετρητής ενέργειας

2.3.1. Γενικά

Ο έξυπνος μετρητής ενέργειας (Smart Energy Meter, SEM) είναι μία νέας γενιάς συσκευή που αποτελείται από ηλεκτρονικές διατάξεις και ένα πλήθος ενσωματωμένων λειτουργιών για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματά του είναι η τεχνολογία αμφίδρομης επικοινωνίας η οποία επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων από και προς το μετρητή. Μπορεί να καταγράφει πληροφορίες, όπως κατανάλωση ενέργειας, τάση, συχνότητα, ρεύμα και συντελεστή ισχύος. Ο καταναλωτής μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτή την πληροφορία ώστε να ενημερώνεται για το προφίλ της κατανάλωσής του, ενώ ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να παρακολουθεί τις μετρήσεις, με στόχο τη διατήρηση της ποιότητας και αξιοπιστίας του δικτύου καθώς και να συλλέγει δεδομένα για την πρόβλεψη της ζήτησης και την τιμολόγηση της ενέργειας.



Σχήμα 2.3: Έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας εμπορικού τύπου. Αριστερά: μονοφασικός Landis+Gyr E470 (πηγή: landisgyr.eu), δεξιά: τριφασικός EDM ATLAS Mk10A (πηγή: edmi-meters.com).

2.3.2. Χαρακτηριστικά, λειτουργίες και οφέλη έξυπνου μετρητή

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες των έξυπνων μετρητών που τους ξεχωρίζουν από τους αντίστοιχους συμβατικού τύπου (ηλεκτρομηχανικούς) που ξέραμε έως σήμερα είναι οι ακόλουθες:

- Χάρη στην τεχνολογία αμφίδρομης μεταφοράς δεδομένων, ο διαχειριστής του δικτύου ενημερώνεται απομακρυσμένα για την κατανάλωση ή ακόμη και για την κατάσταση του έξυπνου μετρητή χωρίς την ανάγκη για επιτόπια παρουσία καταγραφής. Με αυτή την προσθήκη, οι εταιρίες προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας θα έχουν τη δυνατότητα μελλοντικά να επικοινωνούν με τους καταναλωτές ώστε να τους δίνουν ειδικές προσφορές και κίνητρα για εξοικονόμηση ενέργειας με βάση το καταγεγραμμένο ενεργειακό τους προφίλ. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση χρημάτων αφενός μεν στον καταναλωτή, αφετέρου στο συνολικό κόστος των υποδομών ενέργειας.
- Πέρα από τις αναλυτικές μετρήσεις που πραγματοποιεί, ένας έξυπνος μετρητής καταγράφει και συμβάντα τα οποία σχετίζονται με την κατάσταση του δικτύου (υπέρταση, υπόταση, απώλεια φάσης, υπερένταση, απώλεια ουδετέρου, αντίστροφη διαδοχή φάσεων, χαμηλός συντελεστής ισχύος) ή τον ίδιο τον μετρητή (σφάλμα μνήμης, παραβίαση καλύμματος), ενημερώνοντας σχετικά τον διαχειριστή και τον χρήστη.
- Έχει την ικανότητα λήψης αποφάσεων, όπως διαχείριση φορτίου (μέσω αυτόματων εντολών) σε περίπτωση που παραβιαστεί κάποιο πάνω όριο κατανάλωσης.
- Προσφέρει αυτοματοποιημένη τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας και εξόφληση λογαριασμών.

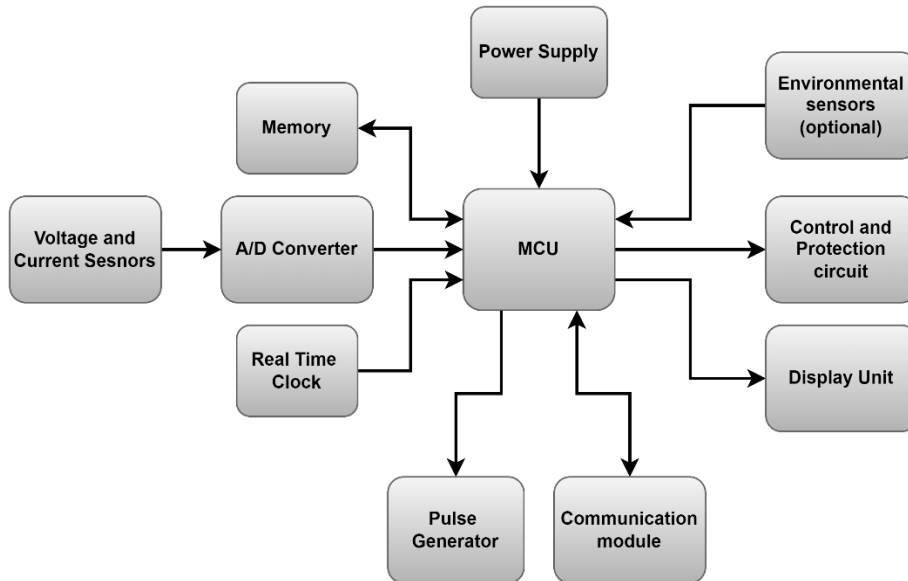
- Όπως αναφέρθηκε, πέρα από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από έναν συμβατικό μετρητή, ο έξυπνος μετρητής πραγματοποιεί αναλυτικές μετρήσεις της ενεργού τιμής της τάσης και της έντασης του ρεύματος, της συχνότητας του δικτύου, της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενεργού και άεργου ισχύος, του συντελεστή ισχύος, ενώ καταγράφει τη μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος και σφάλματα όπως διακοπές της τάσης του δικτύου.
- Έχουν την δυνατότητα απομακρυσμένης παραμετροποίησης και αναβάθμισης λογισμικού με χρήση της τεχνολογίας αμφίδρομης μεταφοράς δεδομένων (two-way communication).
- Πέρα από την καταγραφή της καταναλισκόμενης ενέργειας, μπορούν συνδυαστικά να καταγράφουν και την παραγόμενη ενέργεια ενός παραγωγού/καταναλωτή – prosumer[2].

2.3.3. Βασική δομή έξυπνου μετρητή

Το βασικό δομικό διάγραμμα ενός έξυπνου μετρητή (σχήμα 2.4) τυπικά αποτελείται από τις παρακάτω δομικές μονάδες:

- **Μονάδα τροφοδοσίας (Power Supply Unit):** Τροφοδοτεί όλες τις απαραίτητες μονάδες και τα περιφερειακά του έξυπνου μετρητή.
- **Αισθητήρες τάσεως και ρεύματος (Voltage and Current sensors):** Ολοκληρωμένα κυκλώματα και διατάξεις οι οποίες μετασχηματίζουν την τάση και την ένταση ρεύματος του δικτύου σε κατάλληλης μορφής σήματα για την επεξεργασία τους από την μονάδα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.
- **Μικροελεγκτής (MCU):** Αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του έξυπνου μετρητή. Επεξεργάζεται τα ψηφιακά σήματα που παράγονται από τον Α/D μετατροπέα και υπολογίζει την παραγόμενη ή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον διαχειρίζεται όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες του μετρητή, την επικοινωνία με τις εξωτερικές μονάδες και την ανταλλαγή δεδομένων με την μνήμη.
- **Σύστημα αποθήκευσης δεδομένων (Memory):** Στο σύστημα αποθήκευσης δεδομένων αποθηκεύεται η καταναλισκόμενη/παραγόμενη ενέργεια καθώς και άλλες σχετικές πληροφορίες. Το σύστημα αυτό μπορεί να αποτελείται και από πτητική μνήμη (RAM) σε συνδυασμό με μη πτητική μνήμη (EEPROM ή FLASH).
- **Οθόνη (Display Unit):** Απεικονίζει την καταναλισκόμενη/παραγόμενη ενέργεια καθώς και ένα πλήθος μετρήσεων και συμβάντων στο χρήστη. Μπορεί να είναι είτε τύπου LED είτε τύπου LCD.
- **Μονάδα – διεπαφή επικοινωνίας (Communication module):** Επιτρέπει την επικοινωνία του έξυπνου μετρητή με εξωτερικές μονάδες και συστήματα. Μπορεί να υποστηρίζει ασύρματα (Wi-Fi, Zigbee, LoRa κτλ.) ή ενσύρματα (RS-485, Ethernet κτλ.) πρωτόκολλα επικοινωνίας.
- **Ρολόι πραγματικού χρόνου (Real-Time Clock, RTC):** Φροντίζει ώστε να υπάρχει συνέπεια της καταναλισκόμενης ενέργειας με το χρόνο και να διασφαλίζεται η ορθή τιμολόγησή της.
- **Κύκλωμα ελέγχου και προστασίας (Control and Protection circuit):** Ηλεκτρονική διάταξη, ελεγχόμενη από τον μικροελεγκτή, η οποία εξασφαλίζει προστασία και αξιοπιστία στον έξυπνο μετρητή, παρέχοντας προστασία έναντι υπερτάσεων, υπερεντάσεων και βραχυκυκλωμάτων.
- **Αισθητήρες περιβάλλοντος (Environmental sensors):** Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας οι οποίοι δίνουν πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου της εγκατάστασης την οποία παρακολουθεί ο έξυπνος μετρητής.
- **Μονάδα παραγωγής παλμών (Pulse Generator):** Η κατανάλωση πραγματικής ή άεργου ισχύος συγχρονίζεται μέσω παλμών συγκεκριμένης συχνότητας, όπου κάθε παλμός σηματοδοτεί και την κατανάλωση συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας. Οι παλμοί αυτοί οδηγούνται σε συγκεκριμένες

εξόδους (ηλεκτρικές ή οπτικές – LED) του μετρητή μέσω των οποίων μπορεί να μετρηθεί και να πιστοποιηθεί η ακρίβεια της μέτρησης από εξειδικευμένα εργαλεία.



Σχήμα 2.4: Δομικό διάγραμμα έξυπνου μετρητή ενέργειας.

2.3.4. Προδιαγραφές έξυπνου μετρητή

Ένας τυπικός έξυπνος μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας εμπορικού τύπου διαθέτει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Μέτρηση παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενεργού ενέργειας (kWh), άεργου ενέργειας (kVARh) και μέγιστης ζήτησης (kWh max).
- Μέτρηση μηνιαίας κατανάλωσης/παραγωγής.
- Μέτρηση τάσης και έντασης ρεύματος.
- Εσωτερικό ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC), το οποίο θα μπορεί να διατηρεί την ώρα για 3 χρόνια χωρίς να συνδεθεί στο δίκτυο (υποστήριξη δίσεκτων ετών και αυτόματη αλλαγή θερινής-χειμερινής ώρας).
- Προστασία έναντι παραβίασης καλύμματος μετρητή.
- Ημερολόγιο συμβάντων όπως διακοπή ρεύματος, απώλεια ουδετέρου (για τριφασικούς μετρητές), υπέρβαση ισχύος, άνοιγμα καλύμματος μετρητή, ρύθμιση ρολογιού, αλλαγή παραμέτρων, εσωτερικό σφάλμα κτλ.
- Οπτικές και ηλεκτρικές διεπαφές επικοινωνίας.
- Μονάδες εσωτερικής επικοινωνίας (μόντεμ PLC, θήρα USB, ασύρματο ή ενσύρματο Mbus, RS-485, Ethernet).
- Εσωτερικό ρελέ για την αποσύνδεση χρήστη.
- Παρακολούθηση ποιότητας ισχύος όπως υπέρταση, υπόταση, υπερβολικό ρεύμα.
- Οθόνη LCD με κύλιση των δεδομένων ή με επιλογή μέσω μπουτόν.
- Συσσωρευτής για την αποθήκευση των μετρήσεων σε κατάσταση διακοπής ρεύματος.
- Τιμολογιακός έλεγχος (έως και 6 τιμολογιακές ζώνες με τους αντίστοιχους καταχωρητές ενέργειας).

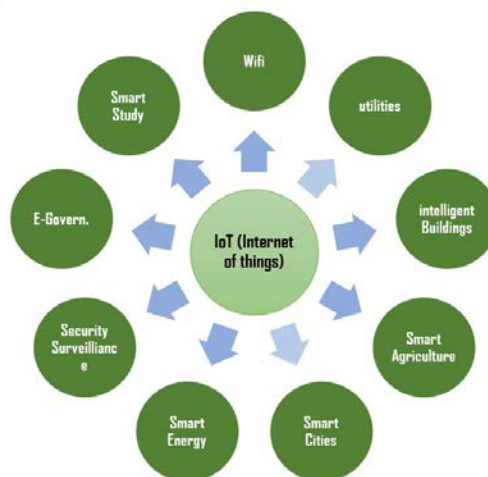
- Έξοδοι ρελέ LED (παλμοί - LED), για τον έλεγχο της ακριβείας μέτρησης πραγματικής ενέργειας μέσω παλμού – σήματος και οπτικής ένδειξης LED.
- Επαναφορά κανονικής λειτουργίας μετρητή μετά από επαναφορά τάσης και μετά την πάροδο το πολύ 5 δευτερολέπτων.
- Δυνατότητα επανάκτησης δεδομένων μετά παρέλευσης 10 ετών από την non-volatile μνήμη του μετρητή, σε περίπτωση συνεχούς έλλειψης τάσης.

Ενότητα 3^η: Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT)

3.1 Γενικά

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of things, IoT)[3] είναι ένα δίκτυο επικοινωνίας μίας πληθώρας αλληλένδετων υπολογιστικών συσκευών, οικιακών συσκευών, αυτοκινήτων, λογισμικών, αισθητήρων καθώς και κάθε αντικειμένου που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα και που επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων. Οι συσκευές αυτές έχοντας ένα μοναδικό αναγνωριστικό (unique identifiers, UID), μπορούν να συνδεθούν σε ένα τοπικό (local) ή παγκόσμιο δίκτυο (web) και να μεταφέρουν δεδομένα χωρίς να είναι απαραίτητη η αλληλεπίδραση ανθρώπου – συσκευών (human – to – machines).

Τα "Things" (πράγματα) στο οικοσύστημα ενός IoT αποτελούν μία ευρεία ποικιλία συσκευών εντελώς διαφορετικών μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα οχήματα με ενσωματωμένους αισθητήρες, κάμερες, κλιματιστικά, φώτα, συστήματα ασφαλείας, ιατρικά εμφυτεύματα, smartwatches κ.α. Τα "Things" αφού διευθυνσιοδοτηθούν μπορούν να συνδεθούν στο IoT και να μεταφέρουν τις διαθέσιμες πληροφορίες.



Σχήμα 3.1: Πεδία εφαρμογής του Δικτύου των Πραγμάτων, Internet of Things, IoT (πηγή: <https://www.geeksforgeeks.org/internet-things-iot-2/>).

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι μία από τις τρεις κορυφαίες τεχνολογικές εξελίξεις της επόμενης δεκαετίας και αποτελεί το επόμενο μεγάλο βήμα στον χώρο της τεχνολογίας. Ο όρος Internet of Things[4] επινοήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τον επιχειρηματία Kevin Ashton. Ο

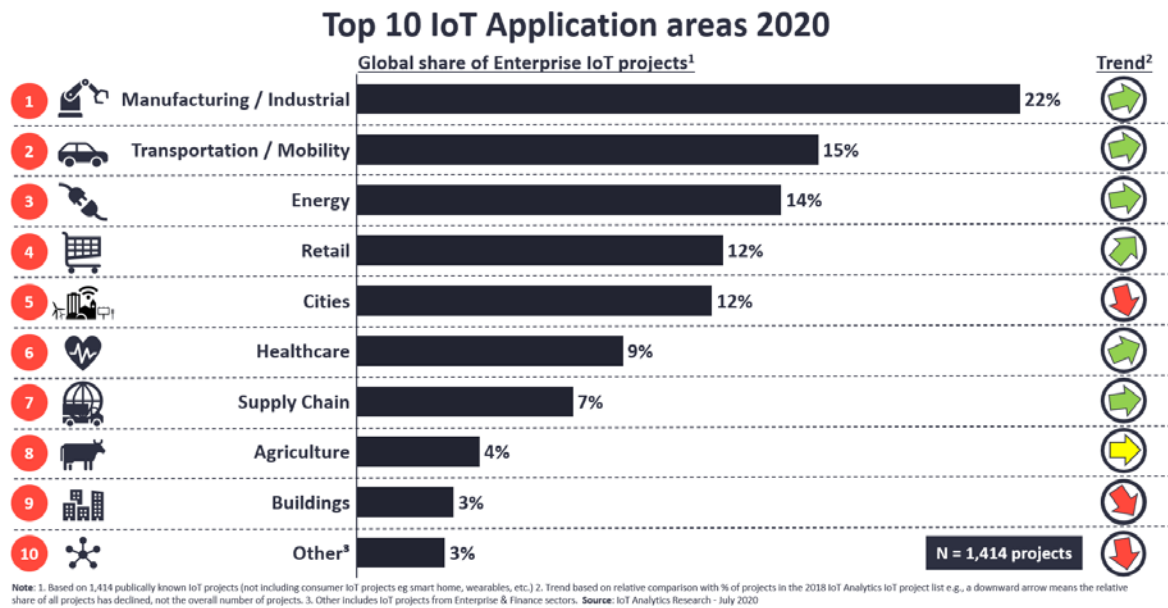
Ashton, ο οποίος είναι ένας από τους ιδρυτές του Auto-ID center στο MIT, ήταν μέλος μιας ομάδας που ανακάλυψε τον τρόπο να συνδέει τα αντικείμενα με το Διαδίκτυο μέσω μιας ετικέτας RFID.

3.2 Πεδία εφαρμογής και τάσεις του ΙοΤ

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι δημοφιλέστερες εφαρμογές της τεχνολογίας ΙοΤ, ενώ παρακάτω αναλύονται οι πιο βασικές εφαρμογές στις οποίες έχει σημειωθεί σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια.

- **Ιατρική και υγειονομική περίθαλψη (Internet of Medical Things).** Η εισχώρηση της τεχνολογίας ΙοΤ στην υγειονομική περίθαλψη, βοηθά στην συγκρότηση ενός νέου ψηφιακού συστήματος υγειονομικής περίθαλψης αξιοποιώντας τους διαθέσιμους ιατρικούς πόρους και υπηρεσίες. Με αυτόν τον τρόπο έξυπνοι αισθητήρες όπως μετρητές αρτηριακής πίεσης και καρδιακού ρυθμού καθώς και προηγμένες συσκευές οι οποίες μπορούν να παρακολουθούν εξειδικευμένα ιατρικά εμφυτεύματα (βηματοδότες, προηγμένα βοηθήματα ακοής κτλ.), ενεργοποιούν ένα σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης της υγείας και ενημέρωσης έκτακτης ανάγκης.
- **Μεταφορές.** Η αλληλεπίδραση μεταξύ έξυπνων αισθητήρων και υφιστάμενης υποδομής του συστήματος μεταφοράς επιτρέπει την ενδοεπικοινωνία, τον έξυπνο έλεγχο κυκλοφορίας, τον έξυπνο χώρο στάθμευσης, τα ηλεκτρονικά συστήματα είσπραξης διοδίων, τη διαχείριση του στόλου, τον έλεγχο των οχημάτων, την ασφάλεια και την οδική βοήθεια. Η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς και αυτοκίνησης με χρήση τεχνολογιών ΙοΤ εισάγει τον όρο “Vehicle-to-Everything (V2X)” που αφορά νέες τεχνολογίες επικοινωνίας στο τομέα μεταφοράς όπως την επικοινωνία όχημα-προς-όχημα (Vehicle-to-Vehicle, V2V), όχημα-προς-υποδομή (Vehicle-to-Infrastructure, V2I) και όχημα-προς-πεζό (Vehicle-to-Pedestrian, V2P).
- **Κτιριακοί και Οικιακοί αυτοματισμοί.** Έξυπνες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την εύρυθμη λειτουργία μηχανικών, ηλεκτρικών, και ηλεκτρονικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους κτιρίων (π.χ. δημοσίων και ιδιωτικών βιομηχανικών, ιδρυματικών κτλ.), σε οικιακούς αυτοματισμούς καθώς και σε συστήματα κτιριακών αυτοματισμών.
- **Γεωργία.** Παράδειγμα μίας τέτοιας εφαρμογής θα μπορούσε να είναι η συλλογή δεδομένων από έξυπνους αισθητήρες σχετικά με τη θερμοκρασία, την υγρασία, τις βροχοπτώσεις, την ταχύτητα του ανέμου, την προσβολή παρασίτων και το περιεχόμενο του εδάφους. Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για την αυτοματοποίηση των γεωργικών διαδικασιών, την λήψη αξιόπιστων αποφάσεων για τη βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας, την ελαχιστοποίηση του κινδύνου και των αποβλήτων και τη μείωση της προσπάθειας που απαιτείται για τη διαχείριση των καλλιεργειών.
- **Περιβαλλοντική παρακολούθηση.** Χρήση έξυπνων αισθητήρων μέτρησης ποιότητας αέρα (μέτρηση επιπέδων ρύπων όπως CO₂, NO_x, PM_{2.5} και PM₁₀) για την ανίχνευση περιοχών με υψηλή ρύπανση. Παρακολούθηση ποιότητας νερού (μέτρηση θερμοκρασίας, pH και χημικών ρύπων) για την έγκαιρη ανίχνευση μόλυνσης και την λήψη μέτρων προστασίας υδάτινων πόρων. Διαχείριση δασών και πυρκαγιών, μέσω αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας και καπνού οι οποίοι εγκαθίστανται σε δασικές περιοχές και έχουν την ικανότητα να ενεργοποιούν συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και πυρόσβεσης.
- **Ενεργειακή Διαχείριση.** Συλλογή δεδομένων από προηγμένα μετρητικά συστήματα (έξυπνοι μετρητές) τα οποία αναλύονται από το σύστημα ΙοΤ με σκοπό τον εντοπισμό ενεργοβόρων ηλεκτρικών συσκευών και περιοχών. Μια άλλη χρήσιμη εφαρμογή των συστημάτων ΙοΤ με σκοπό την ενεργειακή διαχείριση, είναι ως ρυθμιστές χρήσης ενέργειας ανάλογα με τις απαιτήσεις του

φορτίου, μεταφέροντας την κατανάλωση σε ώρες χαμηλότερης ζήτησης και επιτρέποντας έτσι τη μείωση του κόστους ενέργειας και την βελτιστοποίηση της χρήσης των ενεργειακών πόρων.



Σχήμα 3.2: Οι 10 δημοφιλέστερες εφαρμογές του IoT με βάση στατιστικά στοιχεία του 2020 (πηγή: iot-analytics.com).

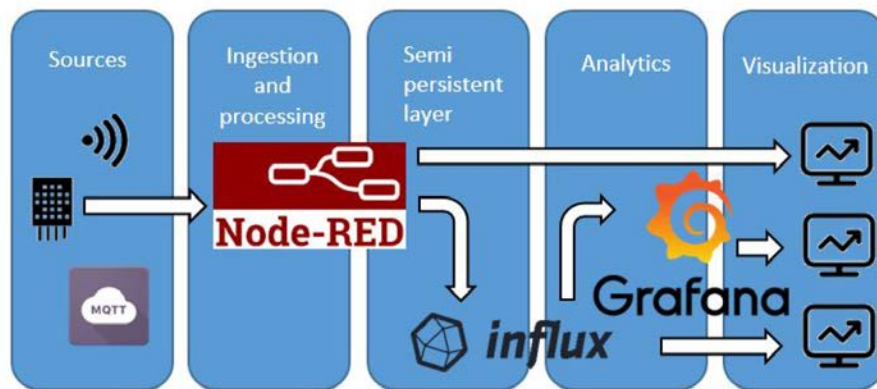
3.3 Η Αρχιτεκτονική ενός IoT

Η αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) περιλαμβάνει διάφορα επίπεδα που επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενοποίηση, επικοινωνία και διαχείριση διασυνδεδεμένων συσκευών. Παρακάτω αναπτύσσεται μια λεπτομερής επισκόπηση μίας τυπικής αρχιτεκτονικής IoT, που συνήθως χωρίζεται σε τέσσερα έως επτά επίπεδα, ανάλογα με τη λεπτομέρεια του μοντέλου:

- Επίπεδο αισθητήρων (Sensor/Source/Device Layer):** Το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει όλες τις συσκευές και αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και να αντιδρούν ανάλογα με τις οδηγίες που λαμβάνουν. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης, έξυπνες συσκευές (έξυπνοι θερμοστάτες, βιομηχανικοί αισθητήρες, wearables παρακολούθησης υγείας) και ενσωματωμένα συστήματα.
- Επίπεδο επεξεργασίας (Processing Layer):** Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες (επίπεδο αισθητήρων ή συσκευών), πραγματοποιώντας μία πρωταρχική επεξεργασία των δεδομένων και εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία της διαδικασίας μεταφοράς αυτών. Αποτελείται από δικτυακές πύλες (gateways), τερματικές συσκευές και προεπεξεργαστές δεδομένων. Για τη μεταφορά των δεδομένων μεταξύ των δύο επιπέδων χρησιμοποιούνται τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας (MQTT, HTTP, CoAP). Για παράδειγμα, ένα καταγραφικό δεδομένων (data logger) συλλέγει δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες και πραγματοποιεί μία αρχική συσσωμάτωση όλων των δεδομένων που παράγουν οι αισθητήρες πριν σταλούν σε μία υπηρεσία νέφους.
- Επίπεδο προσωρινής αποθήκευσης (Semi-Persistent Layer):** Το επίπεδο αυτό αποθηκεύει προσωρινά για μικρό χρονικό διάστημα δεδομένα από αισθητήρες, ενεργοποιώντας την γρήγορη πρόσβαση και ανάκτηση δεδομένων για επεξεργασία και ανάλυση. Αποτελείται από NoSQL βάσεις δεδομένων (MongoDB, Cassandra), in-memory αποθηκευτικούς χώρους (Redis, Memcached), μεσίτες μηνυμάτων (message brokers) όπως Kafka και RabbitMQ. Για

παράδειγμα, μία ουρά μηνυμάτων (message queue) αποθηκεύει προσωρινά δεδομένα πριν επεξεργαστούν και σταλούν σε ένα σύστημα αποθήκευσης μεγάλης διάρκειας.

- **Επίπεδο ανάλυσης δεδομένων (Analytics):** Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την προηγμένη επεξεργασία των δεδομένων, την ανάλυση και την υλοποίηση τεχνικών εκμάθησης (machine learning) για την άντληση ιδεών από τα δεδομένα. Σε αυτό το επίπεδο συμπεριλαμβάνονται πλαίσια επεξεργασίας πολλών δεδομένων (big data processing frameworks), πλατφόρμες εκμάθησης (TensorFlow, Scikit-learn) και μηχανές ανάλυσης. Για παράδειγμα μία μηχανή ανάλυσης η οποία επεξεργάζεται δεδομένα από βιομηχανικούς αισθητήρες η οποία προβλέπει πιθανές αστοχίες εξοπλισμού με σκοπό την βελτιστοποίηση του προγράμματος προληπτικής συντήρησης.
- **Επίπεδο απεικόνισης (Visualization):** Το επίπεδο αυτό επικεντρώνεται στην παρουσίαση δεδομένων, αποτελεσμάτων ανάλυσης (analytics) και ειδοποιήσεων (alerting and notification) στους τελικούς χρήστες χρησιμοποιώντας διάφορα εργαλεία απεικόνισης. Τέτοια εργαλεία είναι τα διαδικτυακά ταμπλό (dashboards) όπως τα Grafana και Kibana, εργαλεία αναφοράς (Tableau, Power BI) και web/mobile εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου επιπέδου είναι ένα ταμπλό που απεικονίζει την μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας σε πραγματικό χρόνο από ένα σύστημα έξυπνης κατοικίας και παρέχει ειδοποιήσεις για την λήψη αποφάσεων από τον χρήστη.



Σχήμα 3.3: Τυπική αρχιτεκτονική IoT[5].

3.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας εφαρμογών IoT

3.4.1. Γενικά

Τα πρωτόκολλα του επιπέδου εφαρμογής (application layer), ορίζουν την μεταφορά δεδομένων μεταξύ των εφαρμογών και συσκευών IoT (σε συνεργασία με πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου). Τα κυριότερα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής που χρησιμοποιούν συστήματα IoT είναι τα MQTT, CoAP, AMQP, XMPP και DDS.

Το πρωτόκολλο AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) είναι βασισμένο στο πιο γνωστό πρωτόκολλο TCP/IP, με τη φιλοσοφία δημοσίευσης/εγγραφής, και είναι σχεδιασμένο για την επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητών με πρωταρχικό στόχο την ελάχιστη απώλεια μηνυμάτων. Είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο στην επεξεργασία χιλιάδων συναλλαγών βάσει σειρά προτεραιότητας, μιας και αναπτύχθηκε στο πλαίσιο τραπεζικών συναλλαγών όπου και συνεχίζει να έχει βασική εφαρμογή.

Το πρωτόκολλο CoAP (Constrained Application Protocol) θεωρείται μία πιο ελαφριά από πλευράς πληροφορίας εκδοχή του HTTP πρωτοκόλλου και δουλεύει βασισμένο στο πιο γνωστό

πρωτόκολλο UDP, με κύρια χρήση σε συσκευές περιορισμένων πόρων που συνδέονται στο ίδιο δίκτυο ή συσκευές διαφορετικών δικτύων που ωστόσο επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κοινού δικτύου.

Το πρωτόκολλο XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol), παλαιότερα γνωστό και ως Jabber, έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές ανταλλαγής άμεσων γραπτών μηνυμάτων (Instant Messaging, streaming XML), είναι βασισμένο στο πρωτόκολλο HTTP επίσης και διευκολύνει στην απευθείας επικοινωνία με συγκεκριμένη διευθυνσιοδοτούμενη συσκευή. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν τα δεδομένα ανταλλάσσονται μεταξύ απομακρυσμένων και όχι άμεσα συσχετιζόμενων συσκευών, όπως για παράδειγμα η επικοινωνία μεταξύ ατόμων.

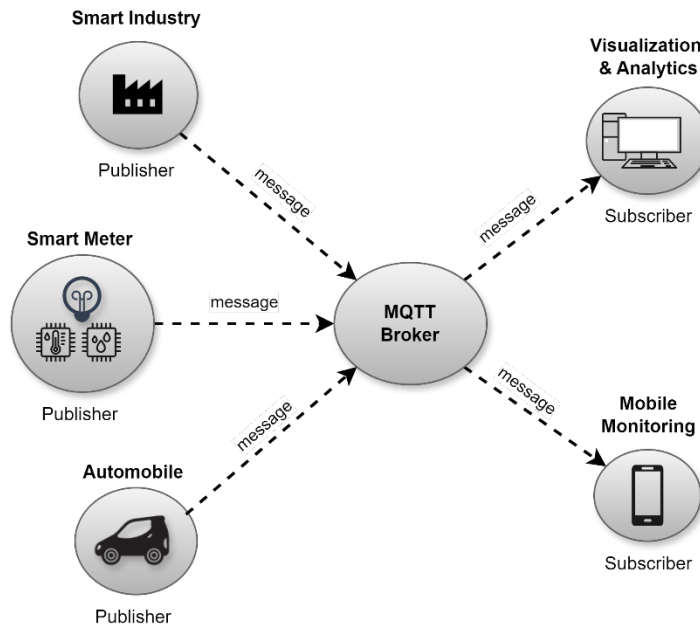
Το πρωτόκολλο DDS (Data-Distribution Service) εξυπηρετεί συσκευές που χρησιμοποιούν άμεσα δεδομένα και τα διαμοιράζει σε άλλες συσκευές χωρίς να είναι απαραίτητη διαμεσολάβηση δομής εξυπηρέτησης (οι συσκευές επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους). Μπορεί να παραδώσει εκατομμύρια μηνύματα ανά δευτερόλεπτο σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα. Προσφέρει τη δυνατότητα διαλογής της πληροφορίας, κάνει χρήση του μοντέλου δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) και επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS).

Το πρωτόκολλο MQTT (Message Queueing Telemetry Transport) χρησιμοποιεί το μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) για την ανταλλαγή μηνυμάτων όπου ένας κόμβος του δικτύου (client/publisher) μπορεί να στείλει μηνύματα σε έναν ή περισσότερους κόμβους (subscribers) με την χρήση ενδιάμεσου διακομιστή – μεσίτη (broker). Ο μεσίτης (broker) φιλτράρει τα μηνύματα και τα αποστέλλει στους ενδιαφερόμενους κόμβους. Συνεπώς για την επικοινωνία μεταξύ του publisher και του subscriber δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο ένας τον άλλον αλλά σίγουρα πρέπει να γνωρίζουν τον μεσίτη. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πρωτόκολλο αυτό δίνονται στις επόμενες παραγράφους καθώς αποτελεί το πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την υλοποίηση του έξυπνου μετρητή.

3.4.2. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας MQTT

Το MQTT είναι ένα σχετικά ελαφρύ πρωτόκολλο επικοινωνίας, ανοιχτού κώδικα και εύκολο στην υλοποίηση. Είναι το επικρατέστερο πρωτόκολλο για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ ενός κόμβου (client) και ενός IoT δικτύου. Για τους προηγούμενους λόγους το καθιστά ένα από τα πιο κατάλληλα πρωτόκολλα για την υλοποίηση πύλης έξυπνου μετρητή ενέργειας (Smart Meter Gateway, SMGW).

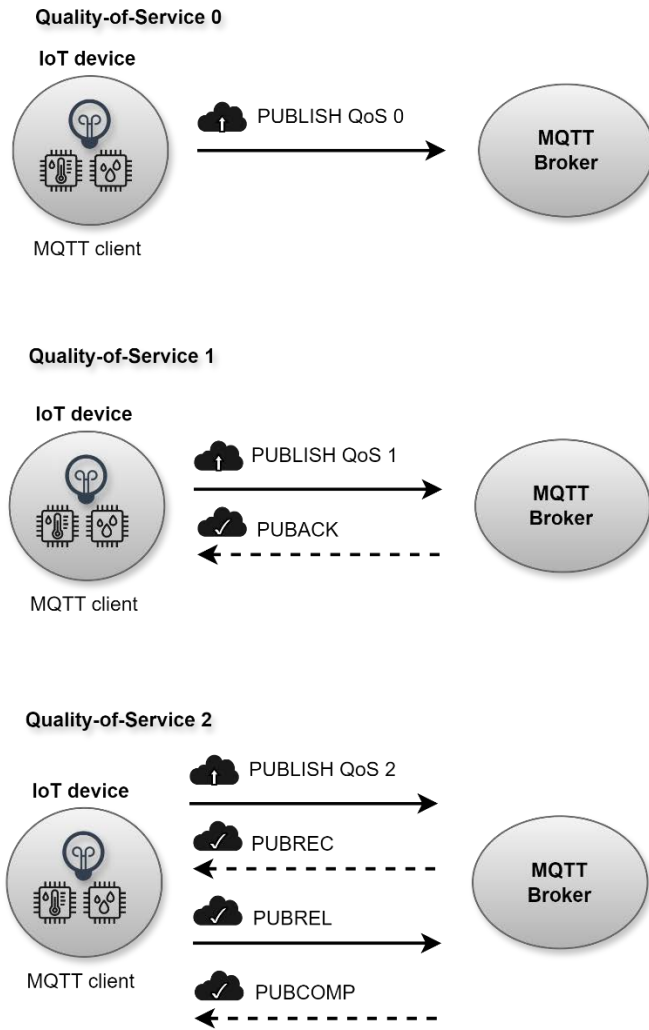
Όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιεί το μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe), όπου οι αποστολείς μηνυμάτων (publishers) δεν στέλνουν μηνύματα σε συγκεκριμένους παραλήπτες (subscribers) αλλά κατηγοριοποιούν τα μηνύματα σε κλάσεις (topics), ανάλογα με την πληροφορία την οποία περιέχουν, χωρίς να γνωρίζουν αν υπάρχουν παραλήπτες και ποιοι είναι αυτοί. Αντίστοιχα, οι παραλήπτες (subscribers) δηλώνουν το ενδιαφέρον τους σε κάποια κλάση μηνυμάτων και εγγράφονται σε αυτήν, λαμβάνοντας έτσι μηνύματα για ένα συγκεκριμένο θέμα (topic) χωρίς να γνωρίζουν τον αποστολέα. Αυτό το μοντέλο οργάνωσης των μηνυμάτων και πελατών προσφέρει το πλεονέκτημα της μεγάλης επεκτασιμότητας του δικτύου, αφού οι αποστολείς και οι παραλήπτες δεν είναι ρητά συνδεδεμένοι μεταξύ τους, ούτε και είναι απαραίτητο να γνωρίζουν την τοπολογία του δικτύου.



Σχήμα 3.4: Τυπικό παράδειγμα αρχιτεκτονικής πρωτοκόλλου MQTT (Message Queuing Telemetry Transport).

Η πληροφορία στέλνεται ως απλό κείμενο (plain text), επομένως η προστασία της από τυχόν υποκλοπές μπορεί να διασφαλιστεί από το TCP πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιείται στα κατώτερα επίπεδα επικοινωνίας. Επίσης, το MQTT υποστηρίζει βαθμονόμηση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), σε τρία επίπεδα:

- **QoS 0** (μόνο μία φορά): Χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση ότι το μήνυμα θα φθάσει στον προορισμό του όχι παραπάνω από μία φορά. Το μήνυμα στέλνεται μία φορά χωρίς ο πελάτης/εξυπηρετητής να ενημερώνει τον αποστολέα για την κατάσταση της παράδοσής του. Συνήθως χρησιμοποιείται όταν το μήνυμα που στέλνεται δεν είναι κρίσιμο ή στέλνεται τακτικά μέσα στο χρόνο.
- **QoS 1** (τουλάχιστο μία φορά): Το μήνυμα στέλνεται ξανά από τον αποστολέα μέχρι να γίνει επιβεβαίωση της παράδοσής του. Το QoS 1 χρησιμοποιείται όταν μήνυμα είναι κρίσιμο. Αυτό επιτυγχάνεται αποστέλλοντας το ίδιο μήνυμα έως ότου ο παραλήπτης το παραλάβει. Συνεπώς το μήνυμα στέλνεται πολλές φορές, εξασφαλίζεται ότι το μήνυμα θα παραδοθεί τουλάχιστο μία φορά στον παραλήπτη, ο αποστολέας αποθηκεύει το μήνυμα έως ότου λάβει ενημέρωση (PUBACK) από τον παραλήπτη.
- **QoS 2** (ακριβώς μία φορά): Χρησιμοποιείται όταν το μήνυμα πρέπει να αποσταλεί αποκλειστικά και μόνο μία φορά. Αυτό το επίπεδο υπηρεσίας χρησιμοποιείται όταν η αποστολή του μηνύματος είναι ζωτικής σημασίας. Ο αποστολέας και ο παραλήπτης φέρουν μία χειραφία δύο επιπέδων για να διαβεβαιώσουν ότι το μήνυμα στάλθηκε ακριβώς μία φορά. Είναι το πιο ασφαλές αλλά ταυτόχρονα και το πιο αργό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας.



Σχήμα 3.5: Κατηγορίες ποιότητας υπηρεσίας (QoS) πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT.

Ενότητα 4^η: Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή – Περιγραφή Υλικού

4.1 Εισαγωγή

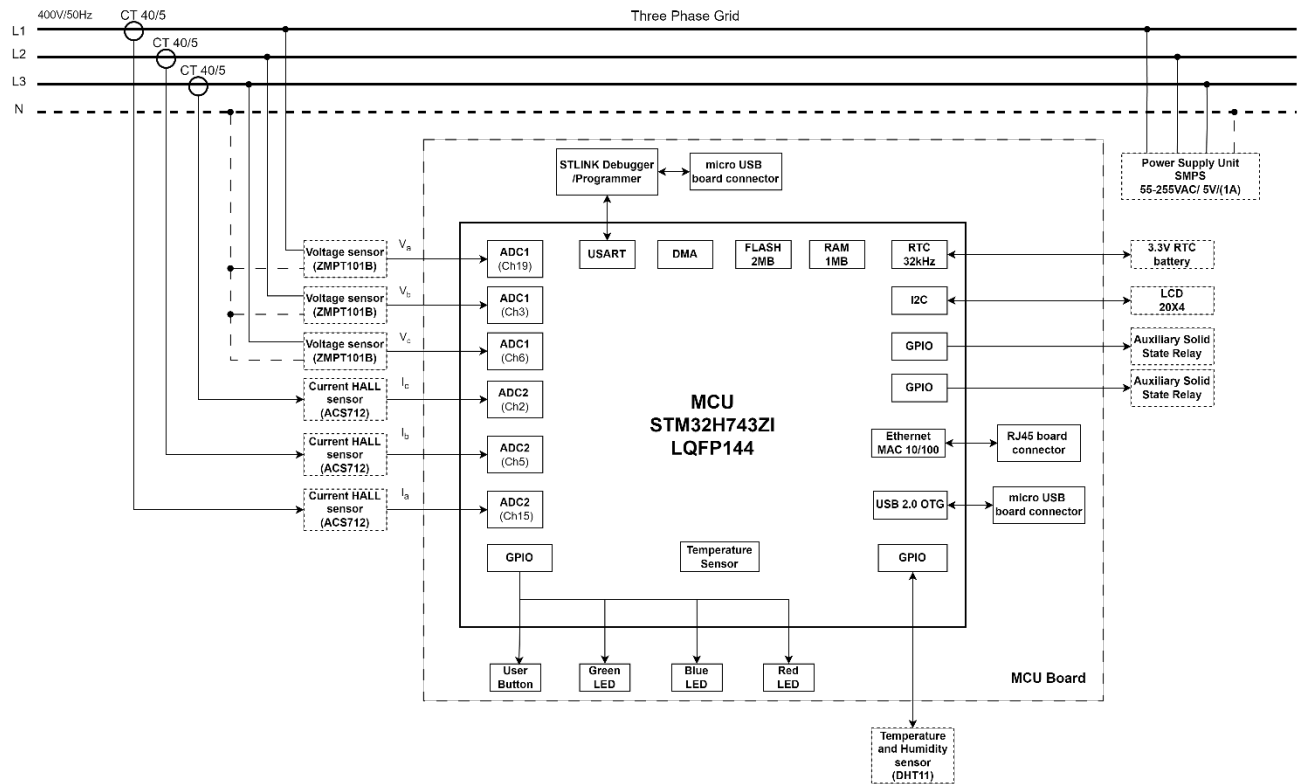
Στην ενότητα αυτή, γίνεται αναλυτική περιγραφή του υλικού το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του έξυπνου μετρητή. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το αναλυτικό δομικό διάγραμμα του έξυπνου μετρητή ο οποίος υλοποιήθηκε και ο οποίος αναλύεται στην παρούσα ενότητα. Η λειτουργία του έξυπνου μετρητή είναι βασισμένη στον μικροελεγκτή STM32H743ZI του κατασκευαστή ST Microelectronics[6]. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-H743ZI η οποία ενσωματώνει τον προηγούμενο μικροελεγκτή καθώς και πλήθος βοηθητικών μονάδων όπως, ολοκληρωμένο κύκλωμα διεπαφής Ethernet με θύρα RJ-45, ολοκληρωμένο κύκλωμα διεπαφής USB, κρύσταλλο 32,768kHz (για τον χρονισμό του RTC), μπουτόν επαναφοράς μικροελεγκτή (mcu reset) και χρήστη (user button), βοηθητικές λυχνίες τύπου LED (ένδειξη σφάλματος/λειτουργίας) και ολοκληρωμένο κύκλωμα προγραμματισμού και διόρθωσης σφαλμάτων (ST-Link debugger). Ο μικροελεγκτής διαβάζει τις τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου μέσω αισθητηρίων τάσης τύπου ZMPT101B[7] και αισθητηρίων ρεύματος τύπου ACS712-5A[8] αντίστοιχα. Τα αισθητήρια αυτά παράγουν κατάλληλα διαμορφωμένα αναλογικά σήματα τα οποία σαρώνονται από τους μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converters, ADCs) του μικροελεγκτή. Η όλη διαδικασία επεξεργασίας των πρωτογενών σημάτων τάσης και ρεύματος καθώς και υπολογισμού των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ισχύ) και των ενεργειών (πραγματική, άεργο),στηρίζεται στο λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε με βάση τους αλγορίθμους που σχεδιάστηκαν και οι οποίοι παρουσιάζονται στην 6^η ενότητα. Πέραν από τη βασική λειτουργία μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ο μετρητής προσφέρει και ένα πλήθος βοηθητικών λειτουργιών, όπως μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του μετρητή μέσω του αισθητηρίου DHT11[9], οπτική απεικόνιση των μετρήσεων του μετρητή σε οθόνη LCD2004A[10], παραγωγή παλμών ενεργού ενέργειας (σηματοδότηση μέσω LED), εντολές απομόνωσης φορτίου σε περίπτωση βλάβης οποιουδήποτε προγραμματισμένου συμβάντος (υπέρβαση ορίου κατανάλωσης κτλ.), αλληλεπίδραση με ψηφιακή πλατφόρμα για την αποστολή των δεδομένων απομακρυσμένα. Η τελευταία λειτουργία αναπτύσσεται λεπτομερώς στην 6^η ενότητα.

Το υλικό του έξυπνου μετρητή απαρτίζεται από τις παρακάτω δομικές μονάδες - κυκλώματα:

- Αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-H743ZI
- Αισθητήρες τάσης
- Αισθητήρες ρεύματος

- Αισθητήρας θερμοκρασίας-υγρασίας
- Μονάδα βοηθητικής τροφοδοσίας
- Οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD)
- Εξωτερικός συσσωρευτής 3V (για την λειτουργία και μόνο του RTC)
- Ηλεκτρονόμοι εξόδου

Το υλικό αυτό τοποθετήθηκε εντός στεγανού προστατευτικού ερμαρίου προστατευτικής κλάσης IP65 .



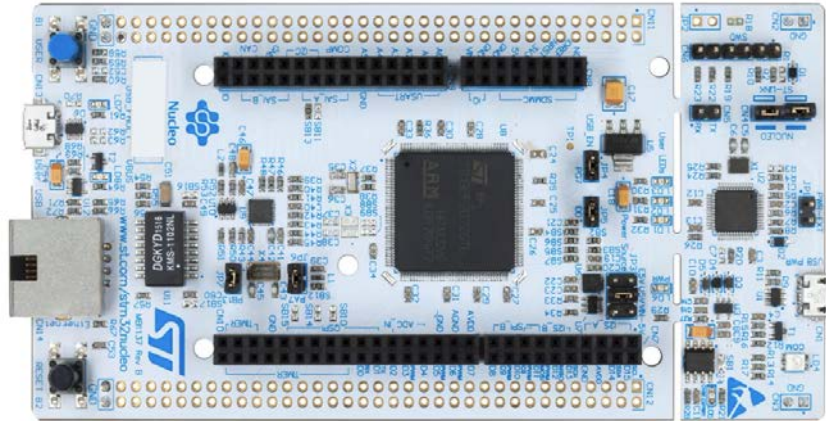
Σχήμα 4.1: Συνοπτικό δομικό διάγραμμα υλικού συστήματος τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας.

4.2 Η Αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-H743ZI

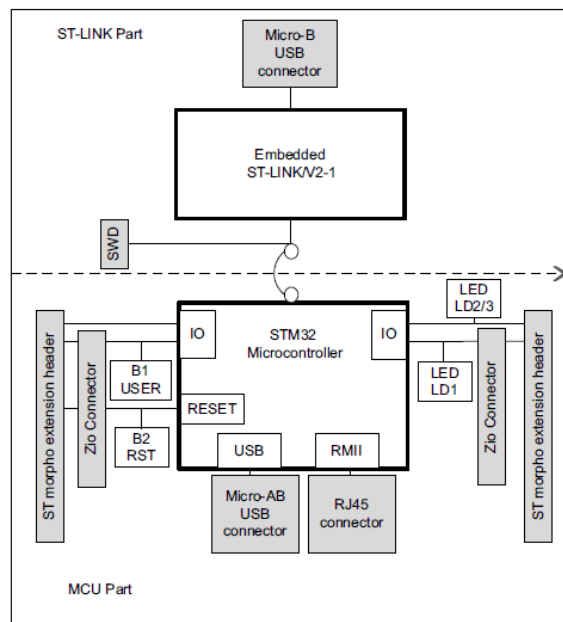
Πρόκειται για μία αναπτυξιακή πλακέτα η οποία διαθέτει ενσωματωμένο το μικροελεγκτή STM32H743ZI ο οποίος θα λέγαμε ότι αποτελεί και την καρδιά του έξυπνου μετρητή καθώς και ένα πλήθος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χαμηλής κατανάλωσης προσφέροντας μία οικονομική και ευέλικτη λύση υλοποίησης πρωτοτύπων. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τον ίδιο τον μικροελεγκτή, η αναπτυξιακή πλακέτα διαθέτει:

- Τρία LED χρήστη (πράσινο, κόκκινο, μπλε).
- Ένα μπουτόν χρήστη (user push-button) και ένα μπουτόν επαναφοράς (reset push-button).
- Κρύσταλλο 32,768kHz.
- Επιλογή τροφοδοσίας με δυνατότητα επιλογής μεταξύ USB θύρας και εξωτερικής πηγής.
- Συμβατότητα με μία ευρεία ολοκληρωμένων αναπτυξιακών περιβαλλόντων (Integrated Development Environment, IDE) συμπεριλαμβανομένων των IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM και STM32CubeIDE.
- Διεπαφή Ethernet συμμορφωμένη με το πρότυπο IEEE-802.3-2002.

- Διεπαφή USB με δυνατότητα χρήσης της ως συσκευή (device only) ή ως δέκτη USB OTG (On-the-Go) πλήρους ταχύτητας (full speed).
- Connector USB Micro-AB ή Type-C®.
- Connector Ethernet RJ-45.
- Ενσωματωμένο programmer/debugger ST-LINK με USB συνδεσιμότητα (χρήση ως αποθηκευτικός χώρος, ως virtual COM θύρα, και ως θύρα για διόρθωση σφαλμάτων).



Σχήμα 4.2: Πραγματική όψη αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-H743ZI της ST Microelectronics[11].



Σχήμα 4.3: Δομικό διάγραμμα αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-H743ZI[11].

4.3 Μικροϋπολογιστική μονάδα – Μικροελεγκτής

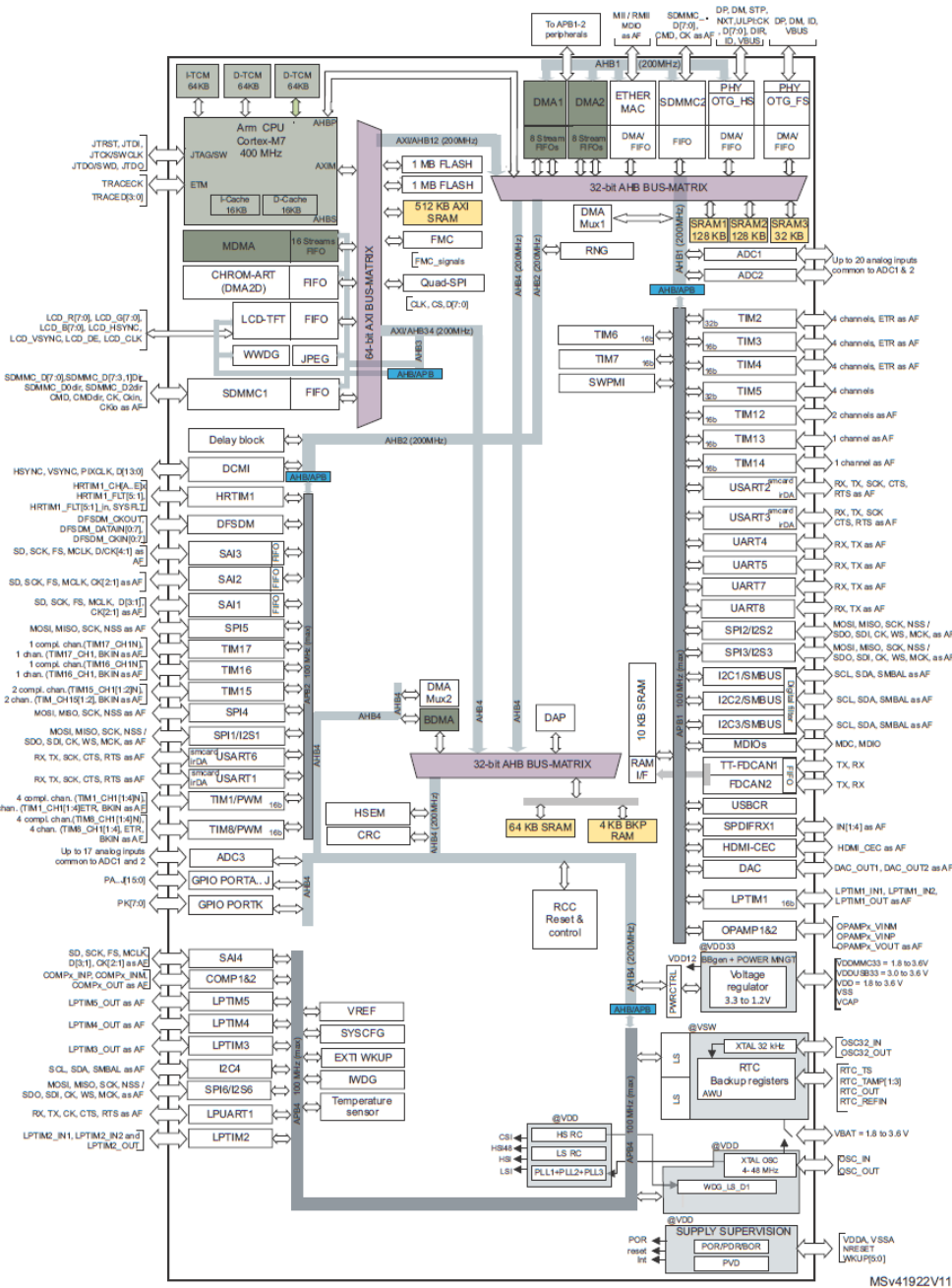
Η υλοποίηση του ψηφιακού ελέγχου της πρωτότυπης κατασκευής του έξυπνου μετρητή έγινε στον μικροελεγκτή STM32H743ZI της ST Microelectronics, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε βρίσκεται ενσωματωμένος στην πλακέτα Nucleo-H743ZI. Πρόκειται για έναν μικροελεγκτή ο οποίος είναι βασισμένος σε υψηλής απόδοσης πυρήνα Arm® Cortex®-M7 32-bit αρχιτεκτονικής RISC, και μπορεί να παρέχει επεξεργαστική ισχύ έως και 400MHz. Ο πυρήνας Cortex®-M7 διαθέτει μονάδα κινητής υποδιαστολής (Floating Point Unit, FPU) και ένα ρεπερτόριο εντολών διαχείρισης δεδομένων και τύπων διπλής ακρίβειας (συμμόρφωση με IEEE 754). Επίσης υλοποιεί ένα πλήρες σύνολο εντολών

ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων (Digital Signal Processing, DSP) και μία μονάδα προστασίας μνήμης (Memory Protection Unit, MPU) η οποία βελτιώνει την ασφάλεια των εφαρμογών.

Ο μικροελεγκτής STM32H743ZI ενσωματώνει υψηλής ταχύτητας μνήμες με Flash memory έως 2Mbytes, 1Mbyte RAM (περιλαμβάνοντας 192Kbytes TCM RAM, 864Kbytes SRAM και 4Kbytes SRAM αντιγράφων ασφαλείας) και ένα μεγάλο εύρος μονάδων εισόδου/εξόδου γενικού σκοπού (General Purpose Inputs/Outputs, GPIO) και περιφερειακών.

Οι βασικότερες περιφερειακές μονάδες τις οποίες διαθέτει είναι:

- Τρεις μονάδες μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC1, ADC2 και ADC3), ακριβείας έως 16-bit (επιλογή μεταξύ 8-bit, 10-bit, 12-bit, 14-bit και 16-bit), οι οποίες διαμοιράζονται έως και είκοσι εξωτερικά κανάλια. Επίσης είναι δυνατή η ταυτόχρονη δειγματοληψία μεταξύ των δύο πρώτων μονάδων (ADC1 και ADC2) σε διπλή λειτουργία (dual mode) ή η παρεμβαλλόμενη δειγματοληψία (interleaved) έως τριών καναλιών. Η δυνατότητα διπλής λειτουργίας (dual mode) μπορεί να φανεί αριετά χρήσιμη όταν για παράδειγμα χρειάζεται να υπολογίσουμε ηλεκτρική ισχύ, καθώς απαιτείται η ταυτόχρονη δειγματοληψία ρεύματος και τάσης. Κάθε ADC διαθέτει ενσωματωμένη μηχανή υπερδειγματοληψίας (oversampler) μέσω της οποίας δίνεται η δυνατότητα συσσώρευσης αποτελεσμάτων από πολλαπλές μετατροπές και εξαγωγής της μέσης τιμής, αυξάνοντας έτσι το εύρος του συνολικού αποτελέσματος έως και 26-bit. Περισσότερα για αυτήν την λειτουργία αναφέρονται στην επόμενη ενότητα.
- Δύο μονάδες μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital to Analog, DAC) ακριβείας 12-bit (1MHz).
- Έως είκοσι δύο μετρητές (timers) και φρουρούς (watchdogs). Συγκεκριμένα διαθέτει, έναν μετρητή υψηλής ακριβείας (2,1ns μέγιστη ακρίβεια), δύο μετρητές 32-bit με δυνατότητες παραγωγής παλμών PWM, σύλληψης εισόδου (Input Capture), σύλληψης εξόδου (Output Capture), μέτρησης παλμών (pulse counter), κωδικοποιητή τεσσάρων τεταρτημορίων (quadrature encoder), δέκα προχωρημένους μετρητές ακριβείας 16-bit για χρήση στον έλεγχο κινητήρων, πέντε μετρητές χαμηλής ισχύος ακριβείας 16-bit, δύο ανεξάρτητους φρουρούς, ένα μετρητή συστήματος (SysTick timer) και ρολόι πραγματικού χρόνου RTC με ακρίβεια υπό δευτερολέπτου και υλοποιημένο ημερολόγιο.
- Τέσσερις ελεγκτές απευθείας προσπέλασης μνήμης (Direct Memory Access controller, DMA). Οι ελεγκτές αυτοί έχουν την ικανότητα να διενεργούν προσπελάσεις από μία θέση μνήμης σε μία άλλη, από μία θέση μνήμης σε ένα περιφερειακό ή από ένα περιφερειακό σε μία θέση μνήμης, χωρίς να απασχολείται η CPU του μικροελεγκτή.
- Έναν ένθετο ελεγκτή διανυσμάτων διακοπών (Nested Vectored Interrupt Controller, NVIC) ο οποίος μπορεί να λάβει έως 150 διαφορετικές διακοπές και να τις διαχειριστεί μέσω δεκαέξι επιπέδων προτεραιότητας.
- Μονάδα ανίχνευσης εξωτερικών διακοπών (EXTernal Interrupt controller, EXTI), η οποία μπορεί να διαχειριστεί έως 89 ανεξάρτητα γεγονότα/διακοπές κάθε ένα από τα οποία είναι αντιστοιχισμένο σε ένα διάνυσμα διακοπής. Κάθε κανάλι μπορεί να ρυθμιστεί ξεχωριστά ώστε να αντιλαμβάνεται διακοπές θετικής, αρνητικής ή θετικής-αρνητικής παρυφής.
- Τέσσερις ενσωματωμένες μονάδες επικοινωνίας I²C (Inter-integrated circuit interface), οι οποίες διαχειρίζονται την επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και του I²C bus, στο οποίο μπορούν να συνδεθούν εξωτερικά ολοκληρωμένα κυκλώματα όπως εξωτερικές μνήμες τύπου EEPROM, αισθητήρες κτλ.



Σχήμα 4.4: Δομικό διάγραμμα μικροελεγκτή STM32H743xI[12].

4.4 Αισθητήρας τάσης

Για τη μέτρηση της τάσης του δικτύου από τον έξυπνο μετρητή απαιτείται ο μετασχηματισμός της (υποβιβασμός) σε μία μορφή επεξεργάσιμη από τους ADCs του μικροελεγκτή. Για το σκοπό αυτό κατά την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια τάσης τύπου ZMPT101B του κατασκευαστή Qingxian ZeMing Langxi Electronic Co.,Ltd (βλ. σχήμα 4.5), ένα για κάθε φάση. Τα αισθητήρια αυτά αποτελούνται από μετασχηματιστές έντασης με λόγο μετασχηματισμού 2mA/2mA (περιελίξεις 1000:1000) για την απομόνωση του μετρούμενου σήματος από το τριφασικό δίκτυο, προσφέρουν γραμμικότητα μεγαλύτερη του 99% (μη-γραμμικότητα μικρότερη του 0,1%) και υψηλή ακρίβεια. Ο μετασχηματιστής είναι εγκατεστημένος σε πλακέτα η οποία περιλαμβάνει ενισχυτική διάταξη (βλ.

σχήμα 4.7) του υποβαθμισμένου σήματος και ένα πολύτροφο ποτενσιόμετρο μέσω του οποίου δίνεται η δυνατότητα κατάλληλης προσαρμογής του σήματος στο επιθυμητό εύρος μέτρησης από τον μικροελεγκτή.

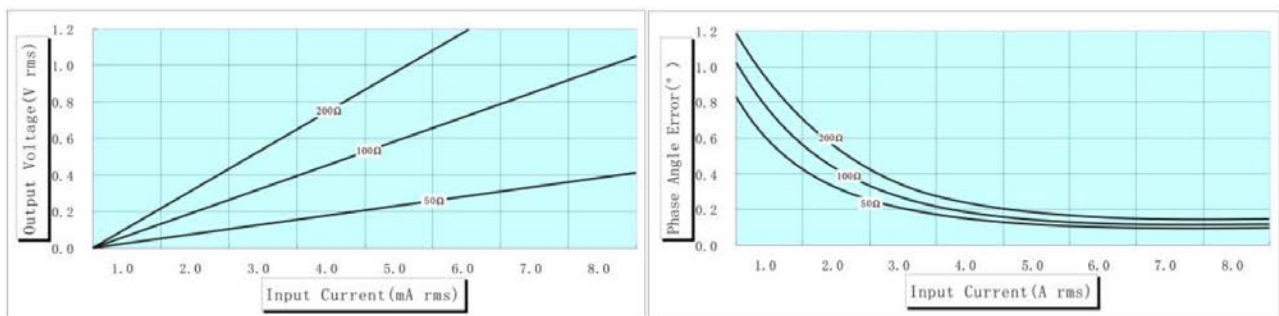
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα τάσης.

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα ZMPT100B

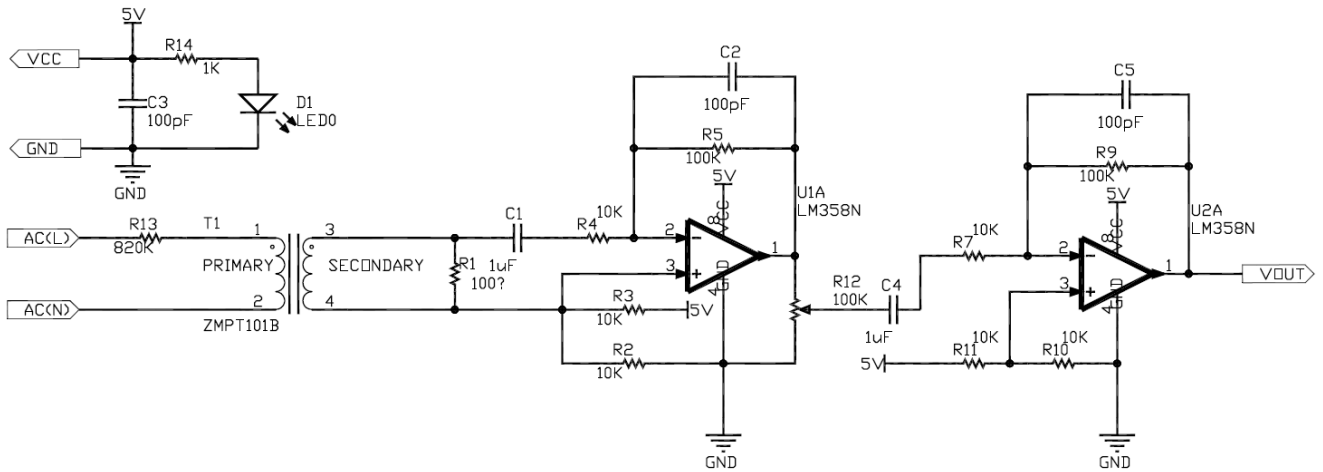
Ονομαστικό ρεύμα εισόδου	2mA
Ονομαστικό ρεύμα εξόδου	2mA
Σχέση τυλιγμάτων Μ/Σ	1000:1000
Σφάλμα φάσης	$\leq 1^\circ$ ($R_s = 100\Omega$)
Εύρος λειτουργίας	0 ~ 1000V και 0~10mA ($R_s = 100\Omega$)
Γραμμικότητα	$\leq 0,1\%$
Επιτρεπτό σφάλμα	$-0,3\% \leq f \leq 0,2\%$ (για είσοδο 2mA και αντίσταση δειγματοληψίας 100Ω)
Τάση απομόνωσης	4000V
Θερμοκρασία λειτουργίας	$-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$
Εσωτερική αντίσταση	120Ω
Διηλεκτρική αντοχή	3000VAC/λεπτό
Κλάση ακρίβειας	0,2



Σχήμα 4.5: Όψη πλακέτας αισθητήριου τάσης ZMPT101B[7].



Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστικές ρεύματος εισόδου σε σχέση με την ενεργό τιμή της τάσεως εξόδου και του σφάλματος φάσης για διαφορετικές αντιστάσεις δειγματοληψίας R_s του ZMPT101B.



Σχήμα 4.7: Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας αισθητηρίου τάσης ZMPT101B.

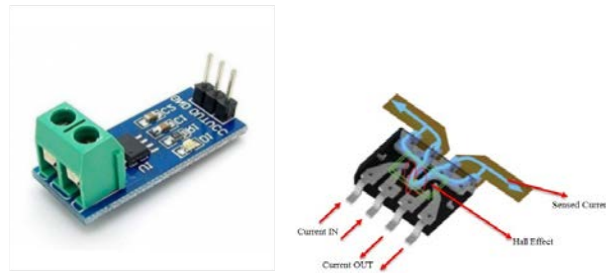
4.5 Αισθητήρας ρεύματος

Για τη μέτρηση του ρεύματος σε κάθε φάση του μετρητή χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια ρεύματος τα οποία εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Hall (Hall Effect)[13], παράγοντας ένα σήμα στην έξοδό τους κατάλληλα διαμορφωμένο για τη μέτρησή του από τους ADCs του μικροελεγκτή. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο ACS712ELCTR-05B-T του κατασκευαστή Allegro. Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα υψηλής ακρίβειας γραμμικό κύλινδρο Hall με έναν χάλκινο διαδρόμο κοντά στην επιφάνεια του ολοκληρωμένου. Η ροή του ρεύματος που εφαρμόζεται στον χάλκινο αυτό αγωγό παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο ο αισθητήρας μετατρέπει σε μία ανάλογη τάση. Η τάση εξόδου του αισθητήρα παρουσιάζει μία γραμμική σχέση ως προς τη ροή του ρεύματος όταν αυτό αυξάνεται δια μέσου του πρωτεύοντος χάλκινου διαδρόμου. Η εσωτερική αντίσταση του χάλκινου διαδρόμου είναι τυπικά 1,2mΩ, συνεπώς οι απώλειες του σήματος εισόδου αμελητέες. Το πάχος του χάλκινου διαδρόμου προσφέρει αντοχή του αισθητήρα σε περιπτώσεις ανεπιθύμητης υπερέντασης (έως και 5 φορές το ονομαστικό ρεύμα). Η είσοδος και η έξοδος του αισθητήρα είναι γαλβανικά απομονωμένες.

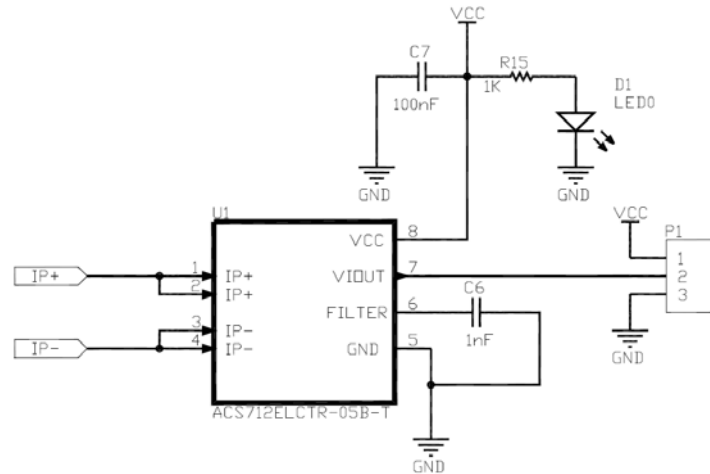
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ρεύματος.

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα ACS712ELCTR-05B-T

Τάση τροφοδοσίας	4,5 ~ 5,5Vdc (5Vdc τυπική)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C ~ 85°C
Τάση αντοχής	2400 VRMS
Ρεύμα τροφοδοσίας	10mA (13mA max)
Εύρος ζώνης συχνότητας	80MHz
Μη γραμμικότητα	1,5%
Αντίσταση εισόδου	1,2mΩ
Εύρος μέτρησης	±5A (AC/DC)
Θόρυβος	21mV
Ευαισθησία	185mV/A τυπικά



Σχήμα 4.8: Όψη πλακέτας αισθητηρίου ρεύματος και ολοκληρωμένου κυκλώματος ACS712ELCTR-05B-T[8].



Σχήμα 4.9: Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας αισθητηρίου ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T.

Ο έξυπνος μετρητής που σχεδιάστηκε είναι μη παρεμβατικού τύπου, δηλαδή δεν διακόπτει το ρεύμα το οποίο μετρά αλλά πραγματοποιεί παράλληλη μέτρηση. Ο αισθητήρας ρεύματος που επιλέχθηκε μπορεί να μετρήσει ρεύμα σε ένα εύρος $\pm 5\text{A}$. Για την παράλληλη μέτρηση του ρεύματος σε κάθε φάση χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής εντάσεως (ΜΕ) τορροειδούς τύπου (current transformer) με ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντα 5Α. Πρακτικά δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στην επιλογή του λόγου μετασχηματισμού για το μετρητή καθώς αυτός μπορεί να μετρήσει οποιοδήποτε ρεύμα υποβαθμισμένο κατά 5Α. Η επιλογή του λόγου εξαρτάται από το εύρος του προς μέτρηση ρεύματος πρωτεύοντος. Θα πρέπει να γίνεται μέριμνα ώστε το εύρος αυτό να μην ξεπερνά το σημείο κορεσμού (knee point) του μετασχηματιστή εντάσεως καθώς στην περίπτωση αυτή το παραγόμενο σήμα στο δευτερεύον μπορεί να εμφανίζει παραμορφώσεις οδηγώντας σε λανθασμένες μετρήσεις.

Ενδεικτικά, στο πλαίσιο δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τρεις μετασχηματιστές εντάσεως με σχέση μετασχηματισμού 40/5Α, Class 3 (1VA), τύπου METSECT5CC004 του κατασκευαστικού οίκου Schneider Electric, οι οποίοι διατέθηκαν από το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.10: Μετασχηματιστής έντασης τύπου METSECT5CC004 (40/5A) της Schneider Electric.

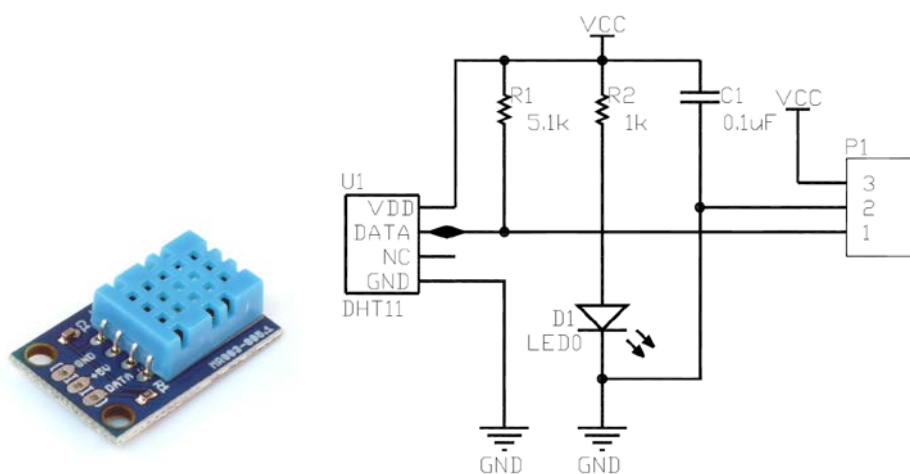
4.6 Αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας

Εντός του έξυπνου μετρητή έχει εγκατασταθεί αισθητήριο τύπου DHT11 του κατασκευαστή Aosong Electronics Co., Ltd για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του περιβάλλοντος χώρου. Το αισθητήριο παράγει ένα βαθμονομημένο ψηφιακό σήμα το οποίο είναι ανάλογο της μετρούμενης θερμοκρασίας και υγρασίας. Χρησιμοποιεί ενσωματωμένη τεχνολογία ψηφιακής σύλληψης (capture technology) για τη διασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας και μακροπρόθεσμης σταθερότητας στην μέτρηση. Αποτελείται από ένα ωμικό στοιχείο για τη μέτρηση της υγρασίας, ένα thermistor τύπου NTC για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, και έναν 8-bit μικροελεγκτή υψηλής απόδοσης, προσφέροντας εξαιρετική ποιότητα, γρήγορη απόκριση και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα θερμοκρασίας - υγρασίας.

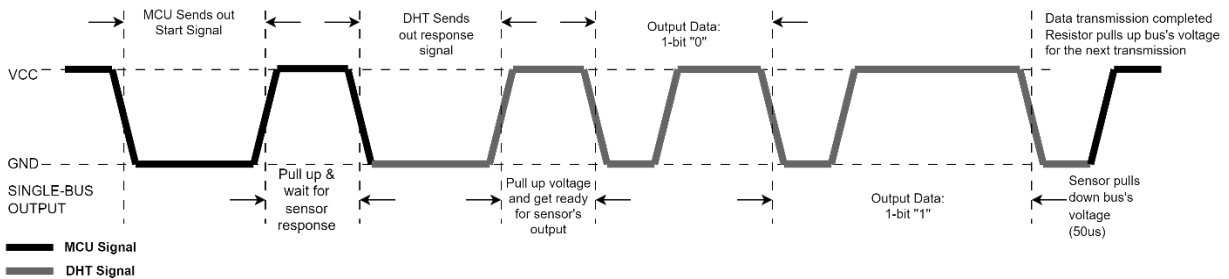
Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα DHT11

Τάση τροφοδοσίας	3~5,5Vdc
Κατανάλωση (σε λειτουργία)	0,5mA (2,5mA max)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C ~ 85°C
Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας	0 ~ 50°C (±2°C)
Εύρος μέτρησης υγρασίας	20 ~ 90%RH (±5%RH)
Χρόνος απόκρισης	~5 δευτερόλεπτα



Σχήμα 4.11: Όψη και σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος αισθητήρα θερμοκρασίας/υγρασίας DHT11.

Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί ένα απλοϊκό σχέδιο αμφίδρομης επικοινωνίας (βλ. σχήμα 4.12) με τον μικροελεγκτή του έξυπνου μετρητή (single-wire bidirectional communication). Αρχικά ο μικροελεγκτής του έξυπνου μετρητή στέλνει ένα σήμα στο αισθητήριο ώστε να μεταβεί από την κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (stand-by) στην κανονική λειτουργία (running mode). Στη συνέχεια ο αισθητήρας απαντάει με μία ακολουθία σημάτων συνολικής πληροφορίας 40-bit τα οποία περιέχουν την τρέχουσα θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. Μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, ο μικροελεγκτής του έξυπνου μετρητή απομονώνει (masking) την ζητούμενη πληροφορία (8-bit πληροφορίας για την θερμοκρασία και 8-bit πληροφορίας για την σχετική υγρασία) από τα συνολικά 40-bit. Περισσότερα για τον αλγόριθμο και το λογισμικό του μετρητή αναφέρονται στην 6^η ενότητα.



Σχήμα 4.12: Παλμοί αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ μικροελεγκτή μετρητή και αισθητηρίου DHT11.

4.7 Οθόνη υγρών κρυστάλλων LCD

Για την απεικόνιση των βασικών μετρήσεων και ενδείξεων του έξυπνου μετρητή χρησιμοποιήθηκε οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD) τεσσάρων σειρών και δέκα έξι χαρακτήρων, τύπου LCD2004 του κατασκευαστή Shenzhen Eone electronics co., LTD. Η οθόνη διαθέτει ενσωματωμένη μονάδα αποκωδικοποίησης με δυνατότητα σειριακής επικοινωνίας πρωτοκόλλου I²C το οποίο αξιοποιεί ο έξυπνος μετρητής για την αποστολή των δεδομένων. Τα δεδομένα εμφανίζονται ομαδοποιημένα (1^η ομάδα: τάση, ρεύμα, συχνότητα, 2^η ομάδα: ισχύς, συντελεστής ισχύος, 3^η ομάδα: εισερχόμενη πραγματική ενέργεια, 4^η ομάδα: εξερχόμενη πραγματική ενέργεια, 5^η ομάδα: εισερχόμενη άεργος ενέργεια, 6^η ομάδα: εξερχόμενη άεργος ενέργεια, 7^η ομάδα: θερμοκρασία/υγρασία και ώρα/ημερομηνία) κυκλικά στην οθόνη ανά 10 δευτερόλεπτα ενώ τα δεδομένα κάθε ομάδας ανανεώνονται κάθε 1 δευτερόλεπτο σύμφωνα με τον αλγόριθμο που έχει υλοποιηθεί.

Πίνακας 4.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά οθόνης LCD2004A

Τάση τροφοδοσίας	2,7~5,5Vdc
Κατανάλωση	0,25mA
Μορφή απεικόνισης	20 χαρακτήρες x 4 γραμμές
Ανάλυση	5 x 8 dots
Διεπαφή επικοινωνίας	I ² C



Σχήμα 4.13: Όψη οθόνης υγρών κρυστάλλων LCD2004.

4.8 Ηλεκτρονόμοι εξόδου

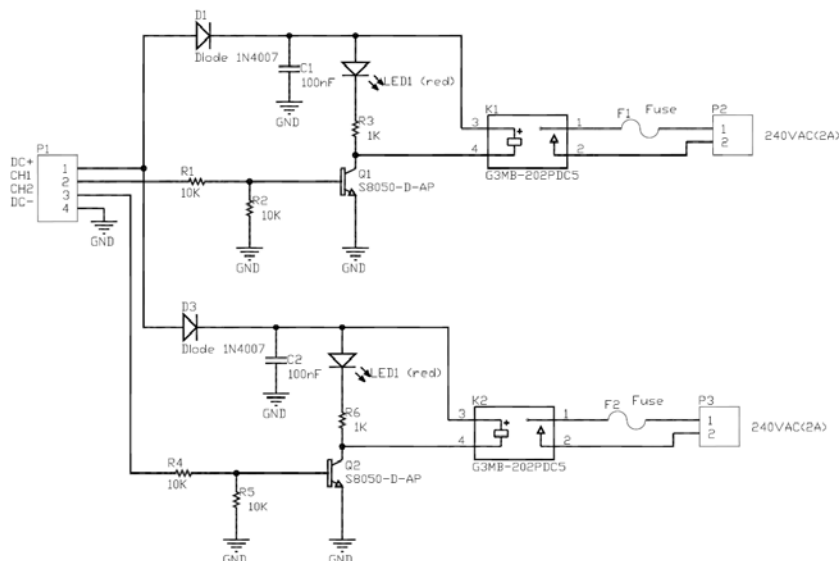
Κατά τον σχεδιασμό του έξυπνου μετρητή προβλέφθηκαν δύο ηλεκτρονόμοι τύπου solid state (SSR) G3MB-202P[14] του κατασκευαστή Omron, με κανονικά ανοιχτές επαφές ξηρού τύπου (Normal Open, NO), οι οποίες μπορούν να δέχονται εντολή από δύο ψηφιακές εξόδους (Digital Outputs) του μικροελεγκτή (STM32H743ZI) του έξυπνου μετρητή. Ο τύπος των ηλεκτρονόμων που επιλέχθηκε προσφέρει γαλβανική απομόνωση μεταξύ μικροελεγκτή και εξωτερικού κυκλώματος, γρήγορη απόκριση, αντοχή στο θόρυβο και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι ηλεκτρονόμοι διεγείρονται όταν οι ψηφιακές αυτές εξόδους του μικροελεγκτή παράγουν λογικό 0 (κλείσιμο της βοηθητικής επαφής), όταν για παράδειγμα η ημερήσια ή συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια υπερβεί κάποιο όριο. Στη συνέχεια οι ηλεκτρονόμοι αυτοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν σαν πιλότοι, ελέγχοντας διακόπτες ισχύος ή τηλεχειριζόμενους διακόπτες με στόχο την επιλεκτική διαχείριση του φορτίου. Φυσικά οι εξόδους αυτοί μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να επιτελούν διαφορετικό σκοπό, δηλαδή για παράδειγμα να σηματοδοτούν κάποιο σφάλμα του μετρητή ή του δικτύου (όπως την απώλεια φάσης). Επίσης δίνεται η δυνατότητα χειροκίνητης διέγερσης μέσω της ψηφιακής πλατφόρμας ελέγχου και παρακολούθησης.

Πίνακας 4.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονόμων G3MB-202P

Τάση εντολής	5Vdc
Ρεύμα εντολής	26,8mA max
Τάση βοηθητικών επαφών	240VAC (2A)
Τάση ελέγχου σήματος	0~1,5Vdc (ON) 2,5~2,5Vdc (OFF)
Τύπος ηλεκτρονόμων	Solid State Relay (SSR)



Σχήμα 4.14: Όψη πλακέτας ηλεκτρονόμων SSR τύπου G3MP-202P της Omron.



Σχήμα 4.15: Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας SSR τύπου G3MP-202P της Omron.

4.9 Μονάδα βοηθητικής τροφοδοσίας

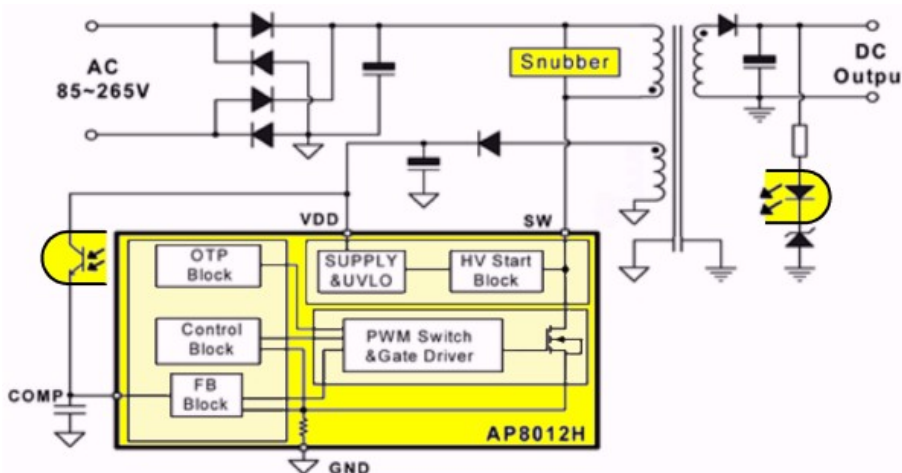
Η μονάδα βοηθητικής τροφοδοσίας (power supply) αποτελείται από έναν AC/DC μετατροπέα τύπου SMPS (Switched-Mode Power Supply) και μοντέλου YS-U5S5 του κατασκευαστή Eshion, και χρησιμοποιείται για την παροχή 5Vdc προς όλες τις κύριες και βοηθητικές διατάξεις του έξυπνου μετρητή όπως, αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-H743ZI, αισθητήρες τάσης, αισθητήρες ρεύματος, αισθητήριο θερμοκρασίας/υγρασίας, Η/Ν (ρελέ) εξόδου, οθόνη κτλ. Η τοπολογία της μονάδας βοηθητικής τροφοδοσίας έχει επιλεγεί με κριτήριο την παροχή εξόδου χαμηλού θορύβου και κατανάλωσης. Επίσης διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα ελέγχου ισχύος το οποίο προστατεύει την έξοδό της από βραχυκύκλωμα ενώ φροντίζει για την ευστάθεια της τάσης εξόδου συναρτήσει της τάσης εισόδου. Δεδομένου ότι ο έξυπνος μετρητής είναι τριφασικός (τεσσάρων αγωγών), η μονάδα θα πρέπει να τροφοδοτείται από οποιαδήποτε φάση του δικτύου παρέχοντας σταθερά 5Vdc στην έξοδό του. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση αυτό επιτυγχάνεται με χρήση τριφασικής ημιγέφυρας στην είσοδο της μονάδας όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18.

Πίνακας 4.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά τροφοδοτικού 5V (YS-U5S5)

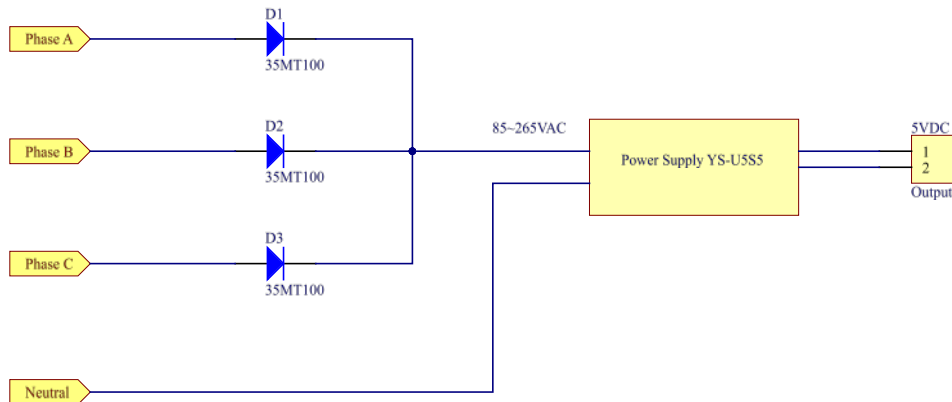
Τάση εισόδου	85~265VAC
Τάση εξόδου	4,8~5,2VDC
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	1A max
Ονομαστικό ρεύμα εξόδου	0,8mA
Ονομαστική ισχύς εξόδου	40W
Απόδοση	80% τυπική



Σχήμα 4.16: Όψη πλακέτας τροφοδοτικού τύπου YS-U5S5 της Eshion.

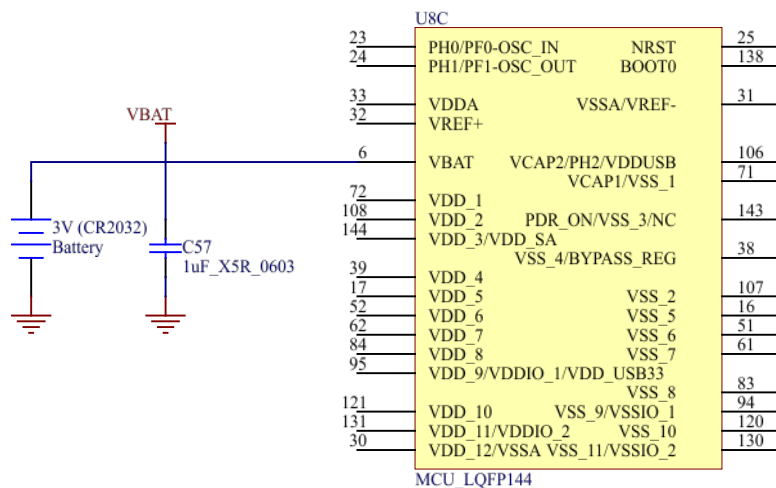


Σχήμα 4.17: Τυπικό σχηματικό διάγραμμα τροφοδοτικού τύπου YS-U5S5 της Eshion.



Σχήμα 4.18: Τριφασική ημι-γέφυρα για την εξασφάλιση παροχής στο τροφοδοτικό από οποιαδήποτε φάση του δικτύου.

Ο μικροελεγκτής διαθέτει αποκλειστικό ακροδέκτη (V_{BAT} pin) στον οποίο μπορεί να συνδεθεί εξωτερική αδιάλειπτη τροφοδοσία για τη διατήρηση της τάσης στο μηχανισμό RTC, τους backup καταχωρητές, και στην backup SRAM σε περίπτωση διακοπής της τριφασικής τροφοδοσίας (ή μονοφασικής). Στην συγκεκριμένη υλοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί εξωτερικός συσσωρευτής 3V τύπου CR2032 και χωρητικότητας 200mAh. Ο συσσωρευτής αυτός είναι επαναφορτιζόμενου τύπου, με εσωτερικό φορτιστή που διαθέτει η αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-H743ZI και σε περίπτωση διακοπής της παροχής του έξυπνου μετρητή διατηρεί την τάση στο περιφερειακό RTC. Όπως θα αναφερθεί σε επόμενη ενότητα, το περιφερειακό RTC διατηρεί συγχρονισμένο τον μικροελεγκτή με την πραγματική ώρα ενώ στους backup καταχωρητές του αποθηκεύονται τα δεδομένα ενέργειας του μετρητή σε ημερήσια βάση. Συνεπώς, με τη βοηθητική αυτή τροφοδοσία αποφεύγεται ο κίνδυνος απρόσμενης απώλειας της προηγούμενης πληροφορίας.



Σχήμα 4.19: Συνδεσμολογία εξωτερικού συσσωρευτή 3V (200mAh) στον μικροελεγκτή STM32H743ZI.

Ενότητα 5^η: Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή – Ανάλυση Συστήματος Μέτρησης

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την παράγραφο αναπτύσσονται οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά τον σχεδιασμό, για την μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών του έξυπνου μετρητή (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ισχύς, ενέργεια κτλ.) αξιοποιώντας τα σήματα που παράγονται από τα αισθητήρια και τις μονάδες που περιεγράφησαν στην προηγούμενη ενότητα, όπως επίσης και η μέθοδος επεξεργασίας και διαχείρισης της πληροφορίας που λαμβάνει και αποστέλλει ο έξυπνος μετρητής.

5.2 Μέτρηση τάσης και καθορισμός συχνότητας δειγματοληψίας

Ένα βασικό ηλεκτρικό μέγεθος το οποίο μπορεί να δώσει σαφή εικόνα της ποιότητας του μετρούμενου σήματος είναι η ενεργός του τιμή (Root Mean Square, RMS). Στα μαθηματικά είναι γνωστή και ως τυπική απόκλιση, δηλαδή ως η στατιστική μέτρηση του πλάτους μίας μεταβλητής ποσότητας. Σε ένα σήμα η τυπική απόκλιση λαμβάνει υπόψη μόνο την ac συνιστώσα ενώ αντίθετα η RMS τιμή μπορεί να μετρήσει και την dc συνιστώσα του σήματος. Υπάρχουν δύο γνωστές μέθοδοι υπολογισμού της RMS τιμής, η μέση RMS (Averaging RMS) και η πραγματική ενεργός τιμή (True RMS). Η τελευταία μέθοδος είναι και η πιο αξιόπιστη, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε μη περιοδικά σήματα και μη γραμμικά φορτία. Η μέτρηση της True RMS απαιτείται στα ηλεκτρικά συστήματα λόγω του ότι τυγχάνει πολλές φορές το ρεύμα ή/και η τάση του δικτύου να είναι μην είναι ημιτονοειδούς μορφής, δηλαδή να περιέχουν ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.

Στον συνεχή χρόνο η RMS τιμή της τάσης εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (5.1)$$

όπου $v(t)$ η στιγμιαία τιμή της τάσης, T η περίοδος και t ο χρόνος.

Αντίστοιχα, στον ψηφιακό κόσμο η προηγούμενη έκφραση αντικαθίσταται από τη σχέση (5.2), σύμφωνα με την οποία ως True RMS τιμή της τάσης λαμβάνεται ο λόγος της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των δειγμάτων της τάσης $v[n]$ προς το πλήθος των συνολικών δειγμάτων που λήφθηκαν N_s .

$$V_{rms} = \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_s-1} v^2[n]}}{N_s} \quad (5.2)$$

Το σήμα που παράγει το αισθητήριο τάσης ZMPT101B είναι υποβαθμισμένο, όπως προαναφέρθηκε, και εμφανίζει ένα offset κατά $V_{cc}/2$, δηλαδή περίπου 2,5V (δεδομένου ότι $V_{cc} = 5V$), καθώς οι ADC του μικροελεγκτή δεν μπορούν να λάβουν αρνητικές τιμές (στην λειτουργία single end mode), και μέγιστη τιμή περίπου 3,3V (δηλαδή περίπου ίση με την τάση αναφοράς V_{REF} του μικροελεγκτή). Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο αυτές παραμέτρους καταλήγουμε στην σχέση (5.3) η οποία και υλοποιήθηκε στον αλγόριθμο μέτρησης.

$$V_{rms} = K_{va} \frac{\sqrt{\sum_{n=0}^{N_s-1} v[n]^2}}{N_s} + K_{vb} \quad (5.3)$$

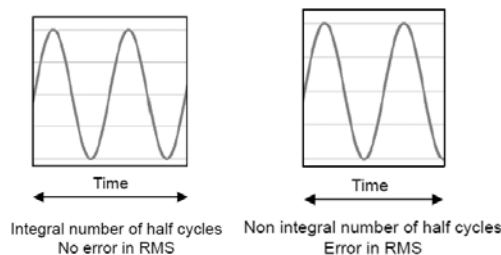
,όπου $v[n]$ είναι το δείγμα τάσης σύμφωνα με την σχέση (5.4), N_s είναι το πλήθος των δειγμάτων, και K_{va}, K_{vb} οι παράγοντες προσαρμογής του αποτελέσματος της True RMS τιμής του σήματος εξόδου του αισθητηρίου στην είσοδο, και οι οποίοι εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις επιμέρους ηλεκτρονικές βαθμίδες του αισθητηρίου.

Το αποτέλεσμα των ADCs κατά την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό είναι 16-bit. Συνεπώς το κάθε δείγμα τάσης μπορεί να εκφραστεί σε Volt με βάση την παρακάτω σχέση:

$$v[n]_x = \frac{ADC1buffer[n]_x - ADC1offset_x}{ADC_{max}} \cdot v_{ref} \quad (5.4)$$

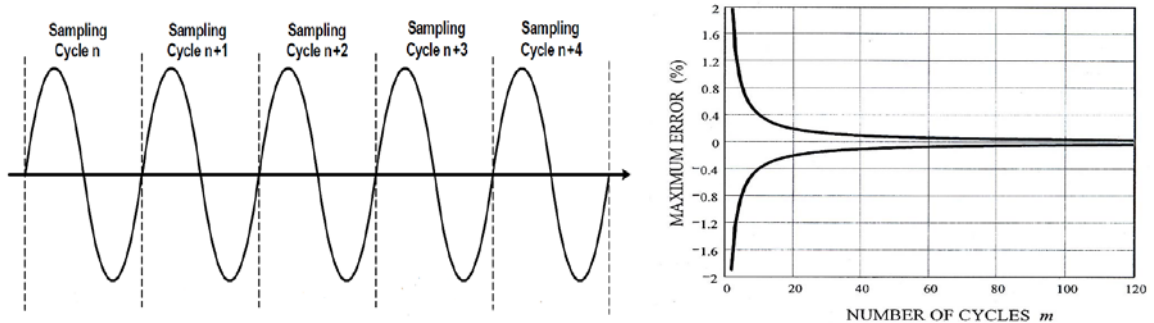
όπου $ADC1buffer[n]_x$ είναι ο καταχωρητής στον οποίο αποθηκεύεται το αποτέλεσμα της μετατροπής του δείγματος n που πραγματοποιήθηκε στη φάση x σε κάθε περίοδο δειγματοληψίας, $ADC_{max} = 2^{16} = 65536$ είναι το μέγιστο αποτέλεσμα που μπορεί να παραχθεί από τη μετατροπή, v_{ref} είναι η τάση αναφοράς του μικροελεγκτή (περίπου 3,3V) και $ADC1offset_x$ είναι η offset τιμή του αισθητηρίου τάσης της φάσης x , η οποία λαμβάνεται μετά τη διαδικασία βαθμονόμησης του (βλ. παράγραφο 6.3.4). Τα αποτελέσματα κάθε μετατροπής (για κάθε μία φάση) αποθηκεύονται στους αντίστοιχους καταχωρητές μέσω της DMA1 (Stream 0) η οποία επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση του κινδύνου απώλειας δεδομένων και ελάφρυνση του φόρτου της CPU του μικροελεγκτή.

Για την χρήση της σχέσης (5.3) είναι σημαντικό να οριστεί το χρονικό παράθυρο παρατήρησης των δειγμάτων (observation window). Το παράθυρο αυτό πρέπει να περιλαμβάνει ακέραιο αριθμό κύκλων περιόδου του σήματος για την αποφυγή σφαλμάτων στην ακρίβεια της μέτρησης (βλ. σχήμα 5.1).



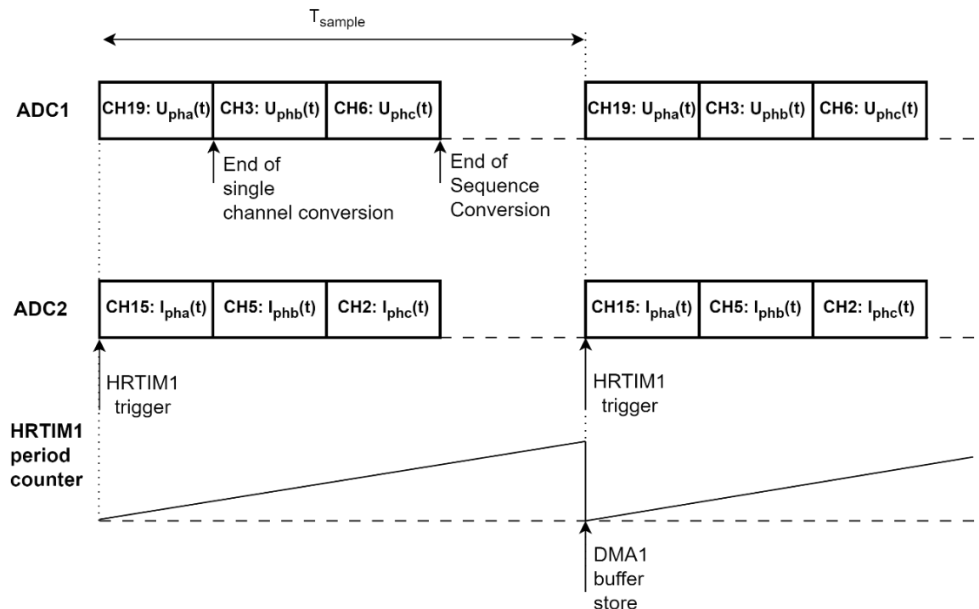
Σχήμα 5.1: Παραδείγματα παραθύρων παρατήρησης μέτρησης RMS με ακέραιο και μη αριθμό κύκλων περιόδου μετρούμενου σήματος.

Εμπειρικά, περιλαμβάνοντας τουλάχιστον 32 κύκλους περιόδου εντός του παραθύρου παρατήρησης κατά τους υπολογισμούς, μπορεί να επιτευχθεί σφάλμα μικρότερο του 0,5% στην μέτρηση της RMS τιμή της τάσης.



Σχήμα 5.2: Δειγματοληψία πολλαπλών κύκλων περιόδου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα (*observation window*) για τη βελτίωση της ακρίβειας υπολογισμού της *True RMS*.

Για τη μέτρηση των τριών τάσεων του τριφασικού συστήματος χρησιμοποιούνται τα κανάλια CH3, CH6 και CH19 του ADC1. Αντίστοιχα για την μέτρηση των τριών ρευμάτων του ίδιου συστήματος χρησιμοποιούνται τα κανάλια CH2, CH5 και CH15 του ADC2 (βλ. σχήμα 5.3). Τα δείγματα τάσης και ρεύματος της ίδιας φάσης του τριφασικού συστήματος είναι αναγκαίο να σαρώνονται την ίδια χρονική στιγμή σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας, καθώς οι ενέργειες που υπολογίζονται στη συνέχεια στηρίζονται στον αρχικό υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος. Επομένως ένα σφάλμα στη γωνία μεταξύ στιγμιαίας τάσης και ρεύματος θα οδηγούσε σε λανθασμένο υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος. Στην παρούσα υλοποίηση αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της διπλής λειτουργίας των δύο ADC (*Dual Mode*), δυνατότητα που παρέχεται από τον μικροελεγκτή.



Σχήμα 5.3: Σχήμα δειγματοληψίας τάσης και ρεύματος από τους ADC1 και ADC2 (*dual regular mode*).

Οι δύο ADCs συγχρονίζονται μέσω του χρονικού υψηλής ακρίβειας HRTIM1 (*High Resolution TIMer 1*). Επί της ουσίας ο HRTIM1 ορίζει την περίοδο δειγματοληψίας T_s . Κάθε φορά που ο

HRTIM1 υπερχειλίζει (δηλαδή μετά το πέρας του χρόνου δειγματοληψίας που έχει οριστεί), δίνεται εντολή (trigger) στους ADCs για σάρωση και μετατροπή των επόμενων δειγμάτων τάσης και ρεύματος στις τρεις φάσεις του.

Στοχεύοντας στο σωστό εντοπισμό των γεγονότων και την παρακολούθηση των παραμέτρων της ποιότητας ισχύος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν κάποιες απαιτήσεις τις οποίες θα πρέπει να ακολουθεί το σύστημα μέτρησης του έξυπνου μετρητή. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-4-30[15], για ένα σύστημα μέτρησης κλάσης A, προτείνεται να λαμβάνεται υπόψη έως και η 50^η αρμονική συνιστώσα στους υπολογισμούς της τάσης με μία μέγιστη ανάλυση 5Hz (δυσμενέστερη ανάλυση).

Όπως φαίνεται στη σχέση (5.5), η ανάλυση Δf εξαρτάται από τη συχνότητα του συστήματος f_b και των κύκλων μέτρησης N_c . Συνεπώς η μέγιστη ανάλυση των 5Hz προκύπτει αναλύοντας 10 κύκλους των 50Hz.

$$\Delta f = \frac{f_b}{N_c} \quad (5.5)$$

Για να είναι δυνατή η αναπαράσταση συχνοτήτων έως 2500Hz (έως την 50^η αρμονική), η συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος μέτρησης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 5000 δείγματα το δευτερόλεπτο (5000Hz) ή 100 δείγματα ανά κύκλο θεμελιώδους συχνότητας f_b , λαμβάνοντας υπόψη το θεώρημα Nyquist (βλ. σχέση 5.6)[16].

$$f_{Nyquist} > 2 \cdot f_{50^{th}} > 2 \cdot 2500 > 5000Hz \quad (5.6)$$

Λαμβάνοντας δείγματα από 10 κύκλους βασικής συχνότητας f_b με συχνότητα δειγματοληψίας 5000Hz, απαιτείται ένας πίνακας 1000 δειγμάτων. Ωστόσο οι αλγόριθμοι υπολογισμού φασματικών περιεχομένων, όπως ο FFT (Fast Fourier Transform) ή ο DFT (Discrete Fourier Transform), λειτουργούν πιο αποδοτικά όταν το πλήθος των δειγμάτων (διάσταση του πίνακα) είναι δύναμη του δύο. Συνεπώς η κοντινότερη δύναμη του δύο δίνει ως αποτέλεσμα 1024 δείγματα για συνολικά 10 κύκλους βασικής συχνότητας και άρα προκύπτει μία ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψίας 5120Hz.

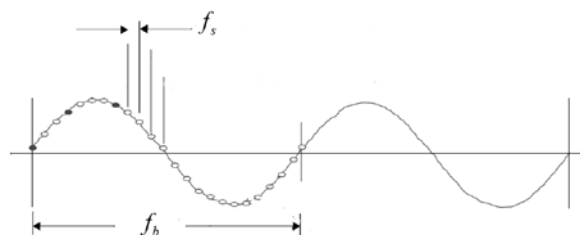
Στην παρούσα υλοποίηση επιλέγεται η μέτρηση 64 κύκλων ($N_c = 64$) και ένας πίνακας πλήθους 8129 ($N_s = 2^{13}$) δειγμάτων. Συνεπώς η ακρίβεια μέτρησης που προκύπτει με βάση την σχέση (5.5) είναι:

$$\Delta f = \frac{50}{64} = 0,78125Hz \quad (5.7)$$

Συμπερασματικά, η συχνότητα δειγματοληψίας που επιλέγεται είναι:

$$f_s = \frac{N_s}{N_c} f_b = \frac{8192}{64} \cdot 50 = 6400Hz \quad (5.8)$$

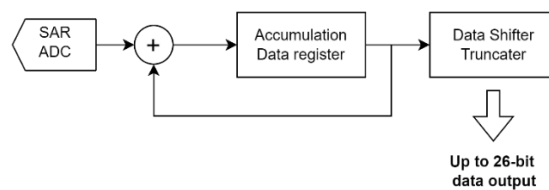
Άρα το χρονικό HRTIM1 ρυθμίζεται ώστε να ενεργοποιεί τους μηχανισμούς μετατροπής των αναλογικών σημάτων τάσης και ρεύματος (ADC1 και ADC2) σε ψηφιακά κάθε 156,25μs (T_s).



Σχήμα 5.4: Γραφική σχέση θεμελιώδους συχνότητα περιοδικού σήματος και συχνότητας δειγματοληψίας.

Οι ADCs του μικροελεγκτή διαθέτουν ενσωματωμένο μηχανισμό υπερδειγματοληψίας (oversampler), ο οποίος επιτρέπει τη συσσώρευση πολλών δειγμάτων (από 2 έως 1024 δείγματα) με συχνότητα δειγματοληψίας πολλαπλάσια της βασικής f_s χωρίς την επιβάρυνση της CPU του μικροελεγκτή. Τα αποτελέσματα από κάθε μετατροπή συσσωρεύονται, λαμβάνεται η μέση τους τιμή και τέλος αποθηκεύονται σε έναν καταχωρητή με αυξημένο εύρος έως και 26-bit (βλ. σχέση 5.9 και σχήμα 5.5). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται είτε για την αύξηση της ευαισθησίας του ADC είτε ως βασικό φίλτρο, βελτιώνοντας το SNR (Signal-to-Noise-Ratio). Στον σχεδιασμό του έξυπνου μετρητή χρησιμοποιείται ως ένα πρωτογενές φίλτρο για την ελάττωση των διακυμάνσεων στην είσοδο των καναλιών των ADC λόγω θορύβου.

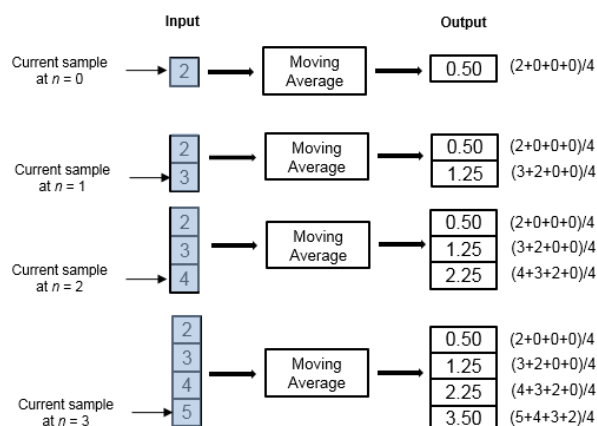
$$x_{ovr} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{n=0}^{N_s-1} conversion(t_n) \tag{5.9}$$



Σχήμα 5.5: Μηχανισμός υπερδειγματοληψίας (oversampling) των ADCs του STM32H743ZI.

Κατά τον σχεδιασμό και κατόπιν δοκιμών επιλέγεται $N_s = 128$ και $M = 128$ (oversampling ratio x128, oversampling shifter 7). Ουσιαστικά κάθε 156,25μs λαμβάνονται 128 δείγματα τάσης και ρεύματος (ανά 0,278μs περίπου) και στη συνέχεια διαιρούνται με το 128 παράγοντας ένα αποτέλεσμα 16-bit.

Συνοψίζοντας, ο υπολογισμός της True RMS της τάσης στηρίζεται στη σχέση (5.3) για ένα παράθυρο παρατήρησης 8192 δειγμάτων ($N_s=8192$) ή 64 κύκλων, και πραγματοποιείται σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας (6400Hz). Για να είναι εφικτός ο υπολογισμός αυτός χωρίς περαιτέρω σφάλματα, ακολουθείται η μέθοδος κινητού παραθύρου (moving average window), όπου, σύμφωνα με αυτή, σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας το πρώτο δείγμα ανάμεσα από τα 8192 αποσύρεται από τον πίνακα δειγμάτων, όλα τα υπόλοιπα στοιχεία μετακινούνται μία θέση αριστερά στον πίνακα και στο τελευταίο στοιχείο εισέρχεται το νέο δείγμα (First In First Out, FIFO). Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της λογικής για τέσσερα δείγματα τάσης. Οι καταχωρητές $ADC1buffer[n]_x$ κάθε φάσης της σχέσης (5.4) περιέχουν το αποτέλεσμα υπερδειγματοληψίας σύμφωνα με τη σχέση (5.9).

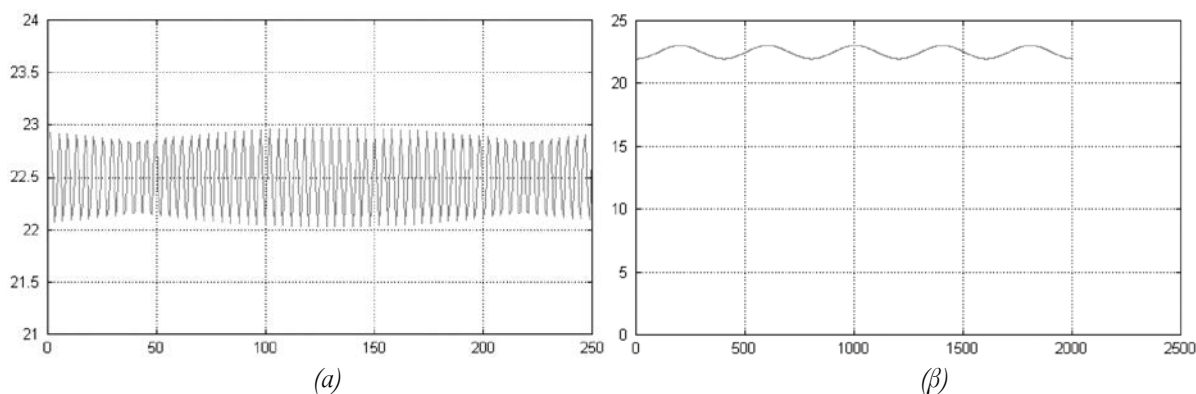


Σχήμα 5.6: Παράδειγμα μεθόδου κινητού παραθύρου (moving average window).

Η προηγούμενη μεθοδολογία λειτουργεί αρκετά αποδοτικά με δεδομένο ότι η συχνότητα του δικτύου είναι ακριβώς 50Hz (ακέραια τιμή). Στην πραγματικότητα η συχνότητα του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μεταβάλλεται έως $\pm 2\%$ (49Hz έως 51Hz). Η συνθήκη αυτή προκαλεί το φαινόμενο διαρροής φάσματος (spectral leakage) στο πεδίο της συχνότητας, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο, ενώ μπορεί να προκαλέσει απώλεια συγχρονισμού του μηχανισμού δειγματοληψίας (non-coherent sampling)[17], οδηγώντας σε σημαντικά σφάλματα κατά τη μέτρηση της στιγμιαίας ισχύος ή την εκτίμηση της συχνότητας.

Συγχρονισμένη δειγματοληψία (coherent sampling) καλείται η δειγματοληψία ενός περιοδικού σήματος όταν ο αριθμός των δειγμάτων σε κάθε περίοδο του σήματος παραμένει ίδιος[17][18]. Η χρονική στιγμή δειγματοληψίας του πρώτου δείγματος παραμένει στην ίδια θέση του παραθύρου παρατήρησης σε σχέση με τη γωνία του σήματος (ή διαφορετικά, τα δείγματα στα οποία η τάση μηδενίζεται βρίσκονται πάντα στις ίδιες θέσεις του πίνακα δειγμάτων).

Αντίθετα, μη συγχρονισμένη δειγματοληψία (non-coherent sampling) καλείται η δειγματοληψία ενός περιοδικού σήματος όπου ο αριθμός των δειγμάτων σε κάθε περίοδο δεν είναι ακέραιος αριθμός[17][18]. Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται η δειγματοληψία να ξεκινά στην ίδια θέση σχετικά με τη γωνία του σήματος. Οι χρονικές στιγμές λήψης των διαδοχικών δειγμάτων μπορούν να διαφέρουν. Για παράδειγμα, για τη δειγματοληψία μίας περιόδου του σήματος μπορεί να απαιτηθούν 128,76 δείγματα και όχι 128 (8192/64). Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα δειγματοληψίας (sample rate) ώστε η δειγματοληψία να είναι συγχρονισμένη (ακέραιο πλήθος δειγμάτων). Αποτέλεσμα της μη συγχρονισμένης δειγματοληψίας είναι η εμφάνιση ενός παρασιτικού σήματος στον υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος οδηγώντας σε διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε περίοδο (βλ. σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: (α) Κωματομορφή στιγμιαίας ισχύος ανά 100 κύκλους των 50Hz (τυχαίο παράδειγμα), (β) κωματομορφή παρασιτικής συχνότητας περιόδου F_H ανά κύκλο των 50Hz (τυχαίο παράδειγμα).

Στην παρούσα υλοποίηση το προηγούμενο πρόβλημα αντιμετωπίζεται μεταβάλλοντας την συχνότητα δειγματοληψίας σε κάθε κύκλο (σε κάθε υπερχειλίση του HRTIM1) δειγματοληψίας με βάση την εκτίμηση συχνότητας του προηγούμενου κύκλου (η μέθοδος εκτίμησης συχνότητας είναι αντικείμενο της επόμενης παραγράφου). Για παράδειγμα, έστω πίνακας 8192 δειγμάτων (128 δείγματα ανά κύκλο από τους συνολικά 64) και έστω ότι η συχνότητα του δικτύου στον προηγούμενο κύκλο εκτιμήθηκε 50,1Hz. Αυτό σημαίνει ότι για να αναπαρασταθεί η κάθε περίοδος του σήματος από ακριβώς 128 σημεία θα πρέπει η συχνότητα δειγματοληψίας να αυξηθεί σε 6412,8Hz. Αντίστοιχα, αν η συχνότητα του δικτύου εκτιμηθεί ως 49,9Hz τότε η συχνότητα δειγματοληψίας θα πρέπει να μειωθεί σε 6387,2Hz. Άρα δεδομένου ότι ο έξυπνος μετρητής θα πρέπει να μετρά τη συχνότητα του δικτύου εντός

των ορίων διακύμανσής της $\pm 2\%$ (49Hz έως 51Hz), η συχνότητα δειγματοληψίας θα μεταβάλλεται εντός των παρακάτω ακραίων τιμών.

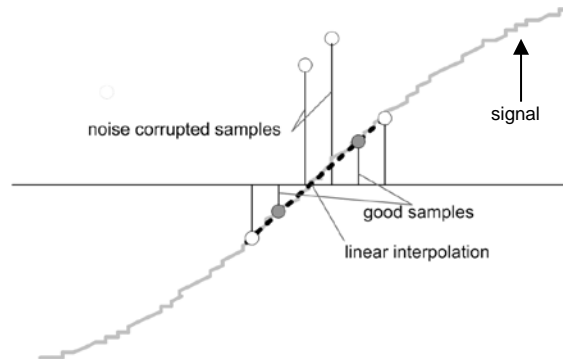
$$6272\text{Hz} < f_s < 6528\text{Hz} \quad (5.10)$$

5.3 Εκτίμηση συχνότητας

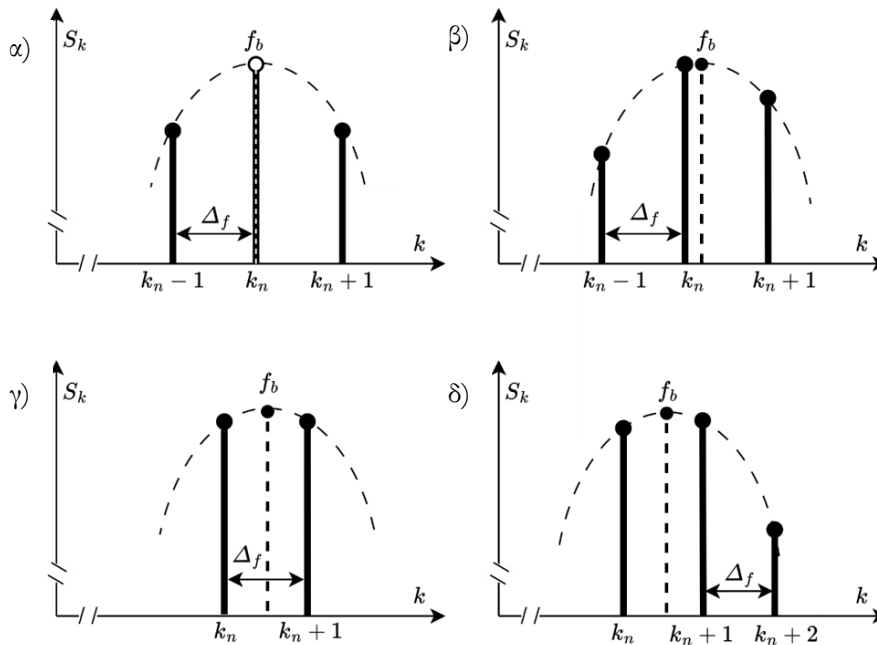
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι εκτίμησης και μέτρησης της συχνότητας, η χρήση των οποίων εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια αλλά και από τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Μερικές από τις πιο γνωστές είναι οι εξής:

- **Zero-crossing.** Αποτελεί την πιο απλή μέθοδο, η οποία στηρίζεται στη μέτρηση του κύκλου του μετρούμενου σήματος. Πιο συγκεκριμένα ένας μετρητής (counter) αυξάνει κάθε φορά που εντοπίζεται zero-cross (σημεία μηδενισμού του σήματος). Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να μετρηθεί η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο σημείων μηδενισμού του σήματος. Εάν ο μηχανισμός zero-crossing είναι αρκετά ακριβής και η ακρίβεια του μετρητή αρκετά καλή, τότε η μέτρηση μπορεί να είναι απλή και πρακτική. Η μέθοδος αυτή υστερεί όταν το σήμα έχει υψηλό αρμονικό περιεχόμενο ή θόρυβο. Στην περίπτωση αυτή μία διαταραχή γύρω από τα σημεία μηδενισμού μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά zero-crossing, με αποτέλεσμα την εισαγωγή μεγάλων σφαλμάτων στη μέτρηση (βλ. σχήμα 5.8).
- **IpDFT (Interpolated Discrete Fourier Transform).** Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ανάλυση των δειγμάτων σε συχνότητες με χρήση του μετασχηματισμού DFT (ή FFT). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγοντας ένα πεπερασμένο παράθυρο συχνοτήτων μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα μέτρα κάθε αρμονικής συνιστώσας πολλαπλάσιας της βασικής f_b στο πεδίο συχνοτήτων S_k . Το πλήθος των αρμονικών συνιστωσών που μπορούμε να επεξεργαστούμε εξαρτάται από την ανάλυση συχνότητας Δf (βλ. σχέση 5.7). Το πρόβλημα εμφανίζεται όταν το παράθυρο παρατήρησης δεν περιέχει ακέραιο πλήθος περιόδων του σήματος λόγω μη συγχρονισμένης δειγματοληψίας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη διαρροή φάσματος στο πεδίο συχνοτήτων (spectral leakage effect) ή αλλιώς την εμφάνιση ενδοαρμονικών (interharmonics) μεταξύ των βασικών αρμονικών συνιστωσών. Στη συνέχεια για την εκτίμηση της συχνότητας εφαρμόζονται αλγόριθμοι παρεμβολής μεταξύ των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν από την ανάλυση DFT (βλ. σχήμα 5.9). Ένας τέτοιος γνωστός αλγόριθμος είναι ο IpDFT, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιεί για παράδειγμα εκθετική, παραβολική ή Gaussian παρεμβολή (interpolation). Η ακρίβεια στη μέτρηση εξαρτάται από την ανάλυση συχνότητας Δf και συγκεκριμένα όσο πιο μικρό είναι το εύρος τόσο πιο ακριβής η ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων. Ο περιορισμός έγκειται στο μεγάλο πλήθος δειγμάτων το οποίο απαιτείται και στην πολυπλοκότητα των υπολογισμών.
- **PLL (Phase Locked Loop).** Πρόκειται για μία διάταξη η οποία δέχεται ως είσοδο την τάση του δικτύου (είτε μονοφασικού είτε τριφασικού συστήματος) και παράγει την γωνία της φροντίζοντας να την διατηρεί σταθερή μέσω κλειστού ελέγχου ανεξάρτητα από τις διάφορες διαταραχές του δικτύου (ασυμμετρία τάσεων, υπόταση, μεταβολές της συχνότητας, αρμονικές κτλ.). Στην απλή της εκδοχή αποτελείται από έναν εντοπιστή φάσης (Phase Detection, PD) ή μία γεννήτρια ορθογώνιων σημάτων (Orthogonal Signal Generator, OSG), ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (Low Pass Filter, LPF) και έναν ταλαντωτή ελέγχου τάσης (Voltage Control Oscillator, VCO). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και πιο εξελιγμένες διατάξεις όπως SOGI-PLL (Second Order Generalized

Integrator, PLL), SRF-PLL (Synchronous Reference Frame-based, PLL), DDSRF-PLL (Double Decoupled Synchronous Reference Frame-based, PLL) κτλ.



Σχήμα 5.8: Στιγμιότυπο εκτίμησης συχνότητας με τη μέθοδο zero-crossing όταν το μετρούμενο σήμα εμφανίζει αρμονικές ή παρασιτικό θόρυβο[19].



Σχήμα 5.9: Αρχή μεθόδου παρεμβολής μεταξύ τριών αρμονικών συνιστωσών. Στο σχήμα α) η εκτιμώμενη βασική αρμονική συνιστώσα βρίσκεται ακριβώς στο μέγιστο bin του φάσματος, στο σχήμα β) η εκτιμώμενη αρμονική συνιστώσα είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο bin του φάσματος, στο σχήμα γ) η εκτιμώμενη αρμονική συνιστώσα βρίσκεται ακριβώς μεταξύ δύο bin ίδιου μέτρου, στο σχήμα δ) η εκτιμώμενη αρμονική συνιστώσα βρίσκεται πριν την αμέσως μεγαλύτερη σε πλάτος και μετά την αμέσως μικρότερη[20].

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η διάταξη CGI-PLL (Cascaded Generalized Integrator PLL). Πρόκειται για μία πιο σύνθετη εκδοχή του SOGI-PLL η οποία παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς την ευστάθεια όταν η κυματομορφή της τάσης του δικτύου περιέχει dc συνιστώσα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.10, το CGI-PLL αποτελείται από δύο στάδια OSG, έναν PI ελεγκτή που στην περίπτωση αυτή λαμβάνει το ρόλο του χαμηλοπερατού φίλτρου και τον VCO. Πρακτικά, το σήμα εισόδου u_{in} μετασχηματίζεται σε ένα ορθογώνιο σύστημα τάσεων v_2 και q_2

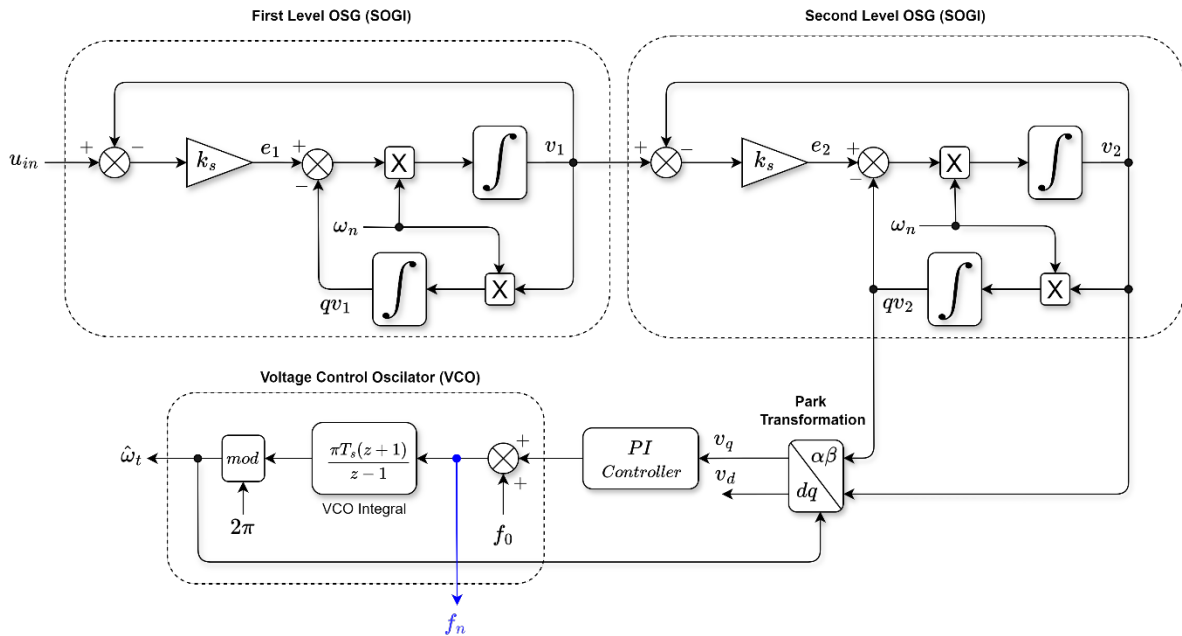
διαμέσου των δύο βαθμίδων OSG. Οι συναρτήσεις μεταφοράς των δύο βαθμίδων OSG καθώς και του ισοδύναμού τους φαίνονται στις σχέσεις (5.11) έως (5.14) όπου k_s είναι ο συντελεστής απόσβεσης των OSG, ω_n η μετρούμενη γωνιακή συχνότητα του δικτύου σε rad/s και $\hat{\omega}_r = \hat{\theta}$ η εκτιμώμενη γωνία.

$$H_{d1}(s) = \frac{V_1(s)}{U_{in}(s)} = H_{d2}(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{k_s \omega_n s}{s^2 + k_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.11)$$

$$H_{q1}(s) = \frac{qV_1(s)}{U_{in}(s)} = H_{q2}(s) = \frac{qV_2(s)}{V_1(s)} = \frac{k_s \omega_n^2}{s^2 + k_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.12)$$

$$H_d(s) = H_{d1}(s) \cdot H_{d2}(s) = \left(\frac{k_s \omega_n s}{s^2 + k_s \omega_n s + \omega_n^2} \right)^2 \quad (5.13)$$

$$H_q(s) = H_{d1}(s) \cdot H_{q2}(s) = \frac{k_s^2 \omega_n^3 s}{(s^2 + k_s \omega_n s + \omega_n^2)^2} \quad (5.14)$$

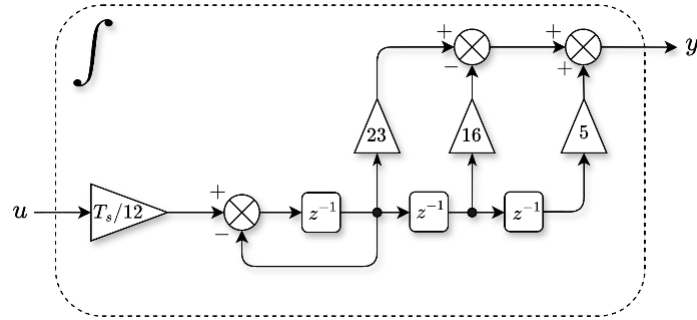


Σχήμα 5.10: Δομικό διάγραμμα τοπολογίας CGI-PLL (Cascaded Generalized Integrator – Phase Locked Loop) για την μέτρηση της συχνότητας του δικτύου.

Όπως φαίνεται και στο τελευταίο σχήμα, η κάθε βαθμίδα OSG αποτελείται από δύο ολοκληρωτές. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε τρίτης τάξης μέθοδος ολοκλήρωσης, καθώς, σύμφωνα με τις [21][22], αποτελεί την βέλτιστη μέθοδο (ανάμεσα σε δεύτερης τάξης και τραπεζοειδούς ολοκλήρωσης) κατά την υλοποίηση OSG σε διακριτό χρόνο. Στο σχήμα 5.11 φαίνεται το δομικό διάγραμμα του ολοκληρωτή τρίτης τάξης ενώ στη σχέση (5.15) η εξίσωση διαφορών που το περιγράφει.

$$y[n] = y[n-1] + \frac{T_s}{12} \{23u[n-1] - 16u[n-2] + 5u[n-3]\} \quad (5.15)$$

,όπου T_s η περίοδος δειγματοληψίας σύμφωνα με την σχέση (5.9).



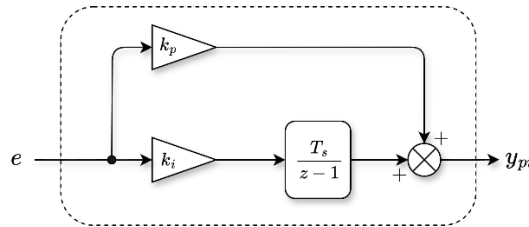
Σχήμα 5.11: Δομικό διάγραμμα ολοκληρωτή τρίτης τάξης ο οποίος χρησιμοποιείται στους OSG.

Στη συνέχεια οι δύο τάσεις που παράγονται από τον δεύτερο OSG μετασχηματίζονται στις dc συνιστώσες u_d και u_q μέσω του μετασχηματισμού Park[23] σύμφωνα με τη σχέση (5.15).

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ qv_2 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Η τάση u_q οδηγείται στην είσοδο του ελεγκτή PI ο οποίος φροντίζει να διατηρεί την τάση αυτή κοντά στο μηδέν (ιδανικά μηδέν), επιτυγχάνοντας κλείδωμα (phase lock) ή αλλιώς συγχρονισμό της εκτιμώμενης γωνίας $\hat{\theta}$ με αυτή του δικτύου. Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή PI φαίνεται στο σχήμα 5.12, όπου k_p και k_i είναι η ενισχυτική και η ολοκληρωτική παράμετρος του αντίστοιχα. Στη σχέση (5.17) φαίνεται η εξίσωση διαφορών του ελεγκτή.

$$y_{pi}[n] = y_{pi}[n-1] + e[n] \cdot k_p + e[n-1] \cdot (k_i \cdot T_s - k_p) \quad (5.17)$$



Σχήμα 5.12: Δομικό διάγραμμα ελεγκτή PI.

Η εκτιμώμενη γωνία $\hat{\theta}$ της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης του δικτύου παράγεται από τον τραπεζοειδή ολοκληρωτή του VCO σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$\hat{\omega}_i[n] = \hat{\omega}_i[n-1] + \pi T_s \{ f_n[n] + f_n[n-1] \} \quad (5.18)$$

Τέλος η μετρούμενη συχνότητα του δικτύου f_n λαμβάνεται ως το άθροισμα του σφάλματος που προκύπτει στην έξοδο του PI ελεγκτή y_{pi} και μίας σταθερής συχνότητας f_0 η οποία βοηθά στη δυναμική απόκριση του τελικού σταδίου του CGI-PLL.

$$f_n[n] = f_0 + y_{pi}[n] \quad (5.19)$$

Οι προηγούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας T_s των σημάτων εισόδου ενώ η μετρούμενη συχνότητα f_n χρησιμοποιείται επιπλέον για τον καθορισμό της νέας

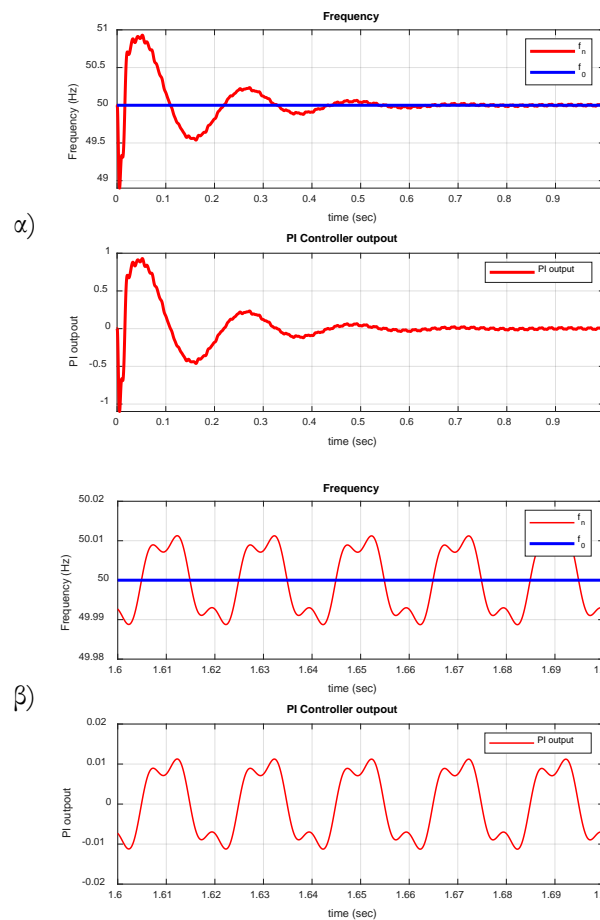
συχνότητας δειγματοληψίας f_s του επόμενου κύκλου. Στον πίνακα 5.1 φαίνονται οι παράμετροι του CGI-PLL οι οποίοι επιλέχθηκαν για την υλοποίηση κατόπιν πειραματικών δοκιμών.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι υλοποίησης CGI-PLL

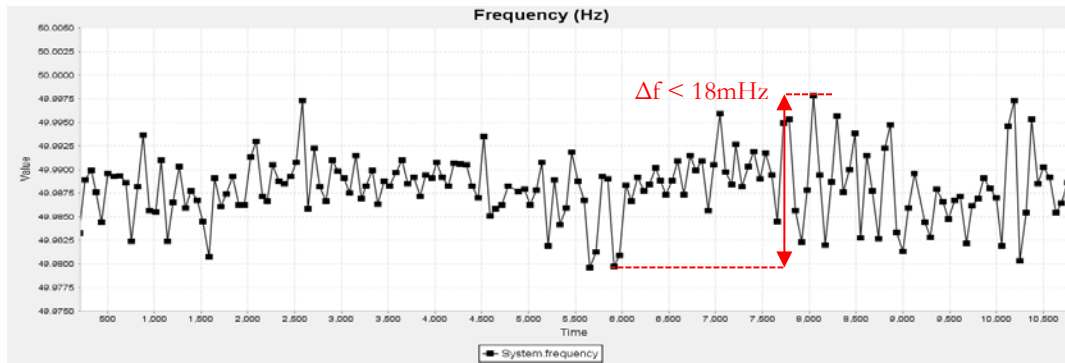
Περιγραφή	Παράμετρος	τιμή
Συντελεστής απόσβεσης (damping factor) OSG	k_s	$\sqrt{2}$
Σταθερά VCO	f_0	50 Hz
Συχνότητα δειγματοληψίας ⁽¹⁾	f_s	6272 Hz ~ 6528 Hz
Περίοδος δειγματοληψίας ⁽¹⁾	T_s	153,19 us ~ 159,44 us
Παράμετροι PI ελεγκτή	k_p	3
	k_i	120

(1) Η συχνότητα δειγματοληψίας μεταβάλλεται ώστε να διατηρείται ακέραιο το πλήθος κύκλων εντός του πίνακα δειγμάτων N_s (coherent sampling).

Στο σχήμα 5.13 φαίνεται το θεωρητικό σφάλμα μεταβατικής και μόνιμης κατάστασης (~10mHz) το οποίο επιτυγχάνεται στη μέτρηση της συχνότητας του δικτύου με βάση τις παραμέτρους του πίνακα 5.1, ως αποτέλεσμα προσομοίωσης με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Matlab, ενώ στο σχήμα 5.14 φαίνεται το πραγματικό σφάλμα για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων.



Σχήμα 5.13: Κυματομορφή εξόδου PI ελεγκτή και εκτιμώμενης συχνότητας: (α) στην μεταβατική και (β) στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για συχνότητα δειγματοληψίας 6400Hz.



Σχήμα 5.14: Πραγματική μεταβολή της συχνότητας. Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε μέσω debugger (STM Studio).

5.4 Μέτρηση ρεύματος

Η φιλοσοφία μέτρησης του ρεύματος στηρίζεται επίσης στη λογική που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 5.2. Το αισθητήριο ρεύματος ACS712ELCTR-05B παράγει στην έξοδό του μία τάση ανάλογη του μετρούμενου ρεύματος (τυπική ευαισθησία 185mV/A) με ένα offset $V_{cc}/2$, δηλαδή περίπου 2,5V (δεδομένου ότι $V_{cc} = 5V$). Η RMS του μετρούμενου ρεύματος (στο πρωτεύον τύλιγμα του ΜΕ) υπολογίζεται διαδοχικά με βάση τις ακόλουθες σχέσεις.

$$v_{CT}[n]_x = \frac{ADC2buffer[n]_x - ADC2offset_x}{ADC_{max}} v_{ref} \quad (5.20)$$

$$I_{rms} = K_i \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N_s-1} v_{CT}[n]^2}{N_s}} \quad (5.21)$$

$$K_i = K_{sens} CT_{ratio} (1 \pm CT_{error}) \quad (5.22)$$

όπου $v_{CT}[n]_x$ είναι το δείγμα τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα του ΜΕ και K_i ο παράγοντας αναγωγής του αποτελέσματος της True RMS τιμής της τάσεως του δευτερεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ στο πρωτεύον. Ο παράγοντας αναγωγής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη σχέση μετασχηματισμού CT_{ratio} του ΜΕ που χρησιμοποιείται (στην παρούσα υλοποίηση είναι 40:5), το σφάλμα ρεύματος CT_{error} στο δευτερεύον του ΜΕ σύμφωνα με την εξίσωση (5.23), και την ευαισθησία του αισθητήρα ρεύματος K_{sens} (περίπου 1/0,0185).

Στον καταχωρητή $ADC2Buffer[n]_x$ αποθηκεύεται το τελικό αποτέλεσμα της Α/D μετατροπής από τον ADC2 για το κανάλι που αντιστοιχεί στη φάση x και αφού έχει προηγηθεί υπερδειγματοληψία (oversampling ratio x128) με βάση την σχέση (5.9). Ο καταχωρητής $ADC2offset_x$ είναι η offset τιμή του αισθητήριου ρεύματος που αντιστοιχεί στη φάση x η οποία λαμβάνεται μετά τη διαδικασία βαθμονόμησής του (βλ. παράγραφο 6.3.4).

Το σφάλμα μεταξύ ρεύματος δευτερεύοντος και πρωτεύοντος του Μ/Σ έντασης μπορεί να ειφραστεί ποσοστιαία από την ακόλουθη σχέση.

$$CT_{error} = 100 \cdot \frac{I_2 \cdot CT_{ratio} - I_1}{I_1} \quad (5.23)$$

όπου I_2 και I_1 τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του Μ/Σ έντασης αντίστοιχα.

Το σφάλμα αυτό διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του Μ/Σ έντασης. Οι ΜΕ είναι κατηγοριοποιημένοι σε διαφορετικές κλάσεις (accuracy classes) ανάλογα με το σφάλμα αυτό. Η κλάση ακριβείας ειφράζεται ως το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα μετασχηματισμού για ένα δεδομένο ρεύμα. Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα τυπικά οριακά σφάλματα για ΜΕ διαφορετικής κλάσης ενώ στον πίνακα 5.3 τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΜΕ που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική δοκιμή του έξυπνου μετρητή.

Πίνακας 5.2: Τυπικές τιμές σφάλματος μετασχηματισμού για διαφορετικές κλάσεις Μ/Σ έντασης

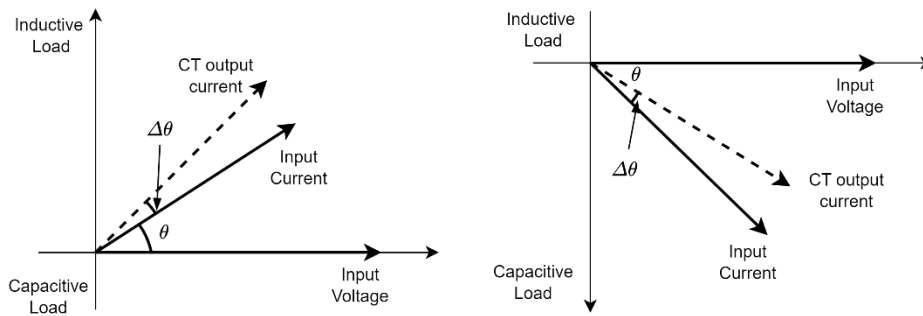
κλάση ακριβείας	Σφάλμα μετασχηματισμού (%)					Καθυστέρηση φάσης ± (%)				
	Ονομαστικό ρεύμα (%)					Ονομαστικό ρεύμα (%)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,1		0,4	0,2	0,1	0,1		15	8	5	5
0,2		0,75	0,35	0,2	0,2		30	15	10	10
0,5		1,5	0,75	0,5	0,5		90	45	30	30
1		3	1,5	1,0	1,0		180	90	60	60
		Ονομαστικό ρεύμα (%)				Ονομαστικό ρεύμα (%)				
		50		120						
3	3	3			Δεν ορίζεται για τις κλάσεις 3 και 5					
5	5	5								

Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά Μ/Σ έντασης πειραματικών δοκιμών

Κατασκευαστής	Schneider Electric
Τύπος	METSECT5CC004
Ρεύμα δευτερεύοντος	5A
Κλάση ακριβείας	Class B (3) at 1VA
Ρεύμα πρωτεύοντος	40A
Σχέση μετασχηματισμού	40/5
Θερμικό ρεύμα [I _{th}]	2,4kA
Αντοχή σε δυναμικό ρεύμα	2,5 I _{th}
Μέγιστος δείκτης ασφαλείας	Fs ≤ 5
Ονομαστική τάση μόνωσης	3kV
Κλάση ηλεκτρικής μόνωσης	Class B
Ονομαστική τάση λειτουργίας	≤ 720VAC 50/60Hz

Ένα ζήτημα που χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα κατά τον σχεδιασμό του μετρητικού συστήματος είναι το σφάλμα φάσης (phase error or phase lag) που εισάγει ο ΜΕ στη μέτρηση του ρεύματος λόγω της ισοδύναμης επαγωγικής αντίδρασης που παρουσιάζει. Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο για διαφορετικά φορτία, θεωρώντας θ την πραγματική γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος σε

μία φάση και $\Delta\theta$ τη γωνία μεταξύ ρεύματος δευτερεύοντος και πρωτεύοντος του ΜΕ. Η φασική αυτή μετατόπιση του ρεύματος στο δευτερεύον του ΜΕ δεν επηρεάζει τους υπολογισμούς της ενεργού τιμής του ρεύματος, όμως επηρεάζει σημαντικά τους υπολογισμούς ενεργού και άεργου ισχύος (βλ. παράγραφο 5.5). Στην παρούσα υλοποίηση το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται μέσω του λογισμικού, δημιουργώντας μία τεχνητή καθυστέρηση (phase shift) του δείγματος του ρεύματος σε σύγκριση με το δείγμα της τάσης ανάλογη του εκτιμώμενης φασικής μετατόπισης $\Delta\theta$.



Σχήμα 5.15: Μεταβολή του μετρούμενου ρεύματος λόγω φασικής μετατόπισης του ρεύματος στο δευτερεύον του Μ/Σ έντασης για διάφορα φορτία.

5.5 Μέτρηση Ισχύος

Μία κρίσιμη διεργασία για μία μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) ή ενός μικροελεγκτή ο οποίος είναι ενσωματωμένος σε έναν μετρητή ενέργειας είναι ο ακριβής υπολογισμός της ενεργού ενέργειας, άεργου ενέργειας, πραγματικής ισχύος, άεργου ισχύος, φαινόμενης ισχύος, συντελεστή ισχύος, RMS τιμή τάσης και ρεύματος. Η ενεργός και η άεργος ενέργεια μερικές φορές αναφέρονται και ως χρεωστέα ποσότητα (billing quantities). Οι υπόλοιπες ποσότητες υπολογίζονται για πληροφοριακούς σκοπούς και συχνά καλούνται μη χρεωστέες (non-billing quantities).

5.5.1 Βασικοί Ορισμοί

Η ενεργός ισχύς P μετράται σε W και εκφράζεται ως γινόμενο της τάσης και του σε φάση εναλλασσόμενου ρεύματος. Γενικά, η μέση ισχύς ενός πλήθους κύκλων έχει την ίδια τιμή με αυτήν που υπολογίζεται για έναν κύκλο. Συνεπώς, εύκολα μπορεί να βρεθεί η πραγματικής ισχύς μίας μακράς διάρκειας περιοδικής κυματομορφής, απλά υπολογίζοντας τη μέση του τιμή οποιουδήποτε κύκλου σε μία περίοδο T .

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (5.24)$$

Η άεργος ισχύς Q μετράτε σε VAR και εκφράζεται ως γινόμενο της τάσης, του ρεύματος και του ημιτόνου της μεταξύ τους γωνίας. Η άεργος ισχύς υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και η πραγματική ισχύς με τη διαφορά ότι η τάση μετατοπίζεται κατά 90° .

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t - 90^\circ) \cdot i(t) dt \quad (5.25)$$

Η συνολική ισχύς σε ένα εναλλασσόμενο κύκλωμα, είτε παράγεται είτε καταναλώνεται, καλείται και φαινόμενη ισχύς S . Η φαινόμενη ισχύς μετράται σε VA. Για μία γενική κυματομορφή με υψηλές

αρμονικές συνιστώσες η φαινόμενη ισχύς δίνεται από το γινόμενο της RMS τιμής της φασική τάσης και του ρεύματος

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (5.26)$$

Για μία ημιτονοειδή κυματομορφή χωρίς αρμονικές συνιστώσες (ιδανική), η φαινόμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο του τριγώνου ισχύος, δηλαδή ως το διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής και της άεργης ισχύος.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.27)$$

Τέλος ο συντελεστής ισχύος εκφράζεται ως ο λόγος της πραγματικής προς τη φαινόμενη ισχύ και λαμβάνει τιμές από -1 έως 1.

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (5.28)$$

όπου φ η γωνία μεταξύ της τάσης και του ρεύματος ημιτονοειδούς συστήματος.

5.5.2 Υλοποίηση ψηφιακής μέτρησης ισχύος

Το γινόμενο των δειγμάτων $v[n]$ και $i[n]$ σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας T_s εκφράζει τη στιγμιαία ισχύ που καταναλώνεται ή παράγεται σε αυτή τη χρονική στιγμή. Η πραγματική ισχύς μπορεί να υπολογιστεί ως η μέση τιμή αυτών των ποσοτήτων σε κάθε κύκλο έχοντας ως δεδομένο παράθυρο παρατήρησης. Αν λάβουμε υπόψη και τη φασική μετατόπιση $\Delta\theta$ που εισάγει ο ΜΕ στο δείγμα του ρεύματος (για την οποία έγινε λόγος στην παράγραφο 5.4), τότε η πραγματική και άεργος ισχύς μπορούν να υπολογιστούν από τον μικροελεγκτή του έξυπνου μετρητή σύμφωνα με τις σχέσεις (5.29) και (5.30) αντίστοιχα.

$$P_x = K_{act,x} \cdot \frac{\sum_0^{N_s-1} v[n] \cdot i[n-m]}{N_s} \quad (5.29)$$

$$Q_x = K_{react,x} \cdot \frac{\sum_0^{N_s-1} v_{90}[n] \cdot i[n-m]}{N_s} \quad (5.30)$$

όπου $K_{act,x}$ και $K_{react,x}$ οι παράγοντες μορφοποίησης (scaling factors) της πραγματικής και άεργου ισχύος της φάσης x , $v_{90}[n]$ το δείγμα τάσης την στιγμή n μετατοπισμένο κατά 90° , και m η χρονική μετατόπιση του δείγματος ρεύματος $i[n]$ στο διακριτό χρόνο, που ισοδυναμεί με χρονική μετατόπιση $\Delta\theta$ στο συνεχή χρόνο t .

Ο καθορισμός του $\Delta\theta$ και εν συνεχεία του m είναι πολύ βασικός έτσι ώστε να μην οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα η εφαρμογή των σχέσεων (5.29) και (5.30). Υπάρχουν αρκετοί τρόποι αντιστάθμισης αυτής της χρονικής μετατόπισης. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιούμε χρονική καθυστέρηση στο δείγμα ρεύματος $i[n]$ τέτοιας διάρκειας ώστε οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για δεδομένο ωμικό φορτίο ($\cos\varphi=1$) να ταυτίζονται ($\Delta\theta \rightarrow 0$) χρονικά. Μετά από δοκιμές του

έξυπνου μετρητή σε διάφορα φορτία καταλήξαμε προσεγγιστικά σε $\Delta\theta \approx 27^\circ$. Δεδομένου ότι η περίοδος δειγματοληψίας είναι περίπου 156,25μs, το σφάλμα διακριτότητας του πίνακα δειγμάτων είναι περίπου 2,8125°. Άρα η κοντινότερη χρονική μετατόπιση που μπορούμε να επιτύχουμε είναι για $m = 10$ δηλαδή $\Delta\theta \approx 28,125^\circ$. Συνεπώς καταλήγουμε ότι το σφάλμα στη μέτρηση της πραγματικής και αέργου ισχύος με βάση τις σχέσεις (5.29) και (5.30) είναι περίπου 1,125° (4,16%). Για τον πιο ακριβή προσδιορισμό της φασικής αυτής μετατόπισης και τη μείωση του προηγούμενου σφάλματος μπορούμε να εφαρμόσουμε γραμμική παρεμβολή μεταξύ δύο δειγμάτων.

Αναφορικά με τον τρόπο υπολογισμού της αέργου ισχύος (βλ. σχέση 5.30), η μέθοδος μετατόπισης της τάσης κατά 90° χρησιμοποιείται για τους παρακάτω λόγους:

- Επιτρέπει την ακριβή μέτρηση της αέργου ισχύος για πολύ μικρά ρεύματα
- Συμμορφώνεται με τις μεθόδους μέτρησης που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα

Για τον υπολογισμό του κατά 90° μοίρες μετατοπισμένου δείγματος τάσης $v_{90}[n]$ αλλά και του μετατοπισμένου ρεύματος $i[n-m]$, χρησιμοποιείται η εκτιμώμενη συχνότητα f_n που προκύπτει από τη σχέση (5.19). Καθώς η συχνότητα του δικτύου μεταβάλλεται, είναι σημαντικό πρώτα να υπολογίζεται η συχνότητα με ακρίβεια και στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί η φασική μετατόπιση αντίστοιχα. Μετά τον υπολογισμό της πραγματικής και αέργου ισχύος, η φαινόμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση.

$$S_x = \sqrt{P_x^2 + Q_x^2} \quad (5.31)$$

Τέλος για τον υπολογισμό των τριφασικών μεγεθών εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις.

$$P_{total} = \sum_{x=1}^3 P_x = P_1 + P_2 + P_3 \quad (5.32)$$

$$Q_{total} = \sum_{x=1}^3 Q_x = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (5.33)$$

$$S_{total} = \sqrt{P_{total}^2 + Q_{total}^2} \quad (5.34)$$

$$PF_{total} = \begin{cases} \frac{|P_{total}|}{S_{total}} & , \text{χωρητικό} \\ & \text{φορτίο/γεννήτρια} \\ -\frac{|P_{total}|}{S_{total}} & , \text{επαγωγικό} \\ & \text{φορτίο/γεννήτρια} \end{cases} \quad (5.35)$$

5.6 Μέτρηση Ενέργειας

5.6.1 Βασικοί Ορισμοί

Η ενεργός ενέργεια εκφράζει την πραγματική ισχύ που παράγεται από μία πηγή ή καταναλώνεται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε ένα χρονικό διάστημα και μετράται σε Watt hours (Wh). Τυπικά, η ενεργός ενέργεια σε μία μονοφασική εφαρμογή υπολογίζεται ως το άπειρο ολοκλήρωμα της στιγμιαίας κυματομορφής της τάσης $v(t)$ και του ρεύματος $i(t)$.

$$E_{act} = \int_0^{\infty} v(t) \cdot i(t) dt \quad (5.36)$$

Η άεργος ενέργεια δίνεται από το χρονικό ολοκλήρωμα του γινομένου της τάσης $v(t)$, του ρεύματος $i(t)$ και του ημιτόνου της μεταξύ τους γωνίας. Η άεργος ενέργεια μετρείται σε Volt-Ampere-Reactive hours (VARh). Τυπικά, η άεργος ενέργεια σε μία μονοφασική εφαρμογή υπολογίζεται ως το άπειρο ολοκλήρωμα της στιγμιαίας κυματομορφής της τάσης μετατοπισμένης κατά 90° ($v(t-90^\circ)$) και του ρεύματος $i(t)$.

$$E_{react} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} v(t-90^\circ) \cdot i(t) dt \quad (5.37)$$

5.6.2 Υλοποίηση ψηφιακής μέτρησης ενέργειας

Εάν οι σχέσεις (5.29) και (5.30) πολλαπλασιαστούν με τον χρόνο, τότε λαμβάνουμε τις αντίστοιχες ενέργειες δηλαδή την εισερχόμενη ή εξερχόμενη ενεργό και άεργο ισχύ σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα Δt . Στην παρούσα υλοποίηση λαμβάνουμε ένα δείγμα κάθε $156,25\mu s$ (T_s). Επομένως αν πολλαπλασιάσουμε τις σχέσεις (5.29) και (5.30) με T_s λαμβάνουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις ενέργειας για $\Delta t = T_s$ σε Watt seconds (Ws) και Volt-Ampere-Reactive seconds (VARs) αντίστοιχα.

$$E_{act,x} = K_{act,x} \cdot \frac{\sum_0^{N_s-1} v[n] \cdot i[n-m]}{N_s} \cdot T_s \quad (5.38)$$

$$E_{react,x} = K_{react,x} \cdot \frac{\sum_0^{N_s-1} v_{90}[n] \cdot i[n-m]}{N_s} \cdot T_s \quad (5.39)$$

Πρακτικά, το λογισμικό του έξυπνου μετρητή μπορεί να συσσωρεύει το άθροισμα των γινομένων των δειγμάτων τάσης και ρεύματος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ισχύος, για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, και να παρουσιάζει το αποτέλεσμα της ενέργειας με βάση τις προηγούμενες σχέσεις. Ωστόσο είναι πιο πρακτικό να συσσωρεύεται μία συγκεκριμένη ποσότητα και στη συνέχεια να προσαυξάνεται κάποιος μετρητής (counter) για την ένδειξη κατανάλωσης ή παραγωγής συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας. Στην παρούσα υλοποίηση συσσωρεύονται 10 Wh (0,01 kWh) πριν προσαυξηθεί ο μετρητής. Αυτή η τιμή εκφράζει το όριο ανάλυσης του μετρητή. Η τιμή αυτή ισοδυναμεί με 36000 Watt seconds ($10Wh \cdot 60 \cdot 60$) Ακριβώς η ίδια λογική ακολουθείται για την άεργο ενέργεια (η ανάλυση είναι ίση με 0,01 kVARh). Αυτό σημαίνει ότι ο μετρητής προσαυξάνεται κάθε φορά που το δεύτερο μέλος των εξισώσεων (5.38) και (5.39) γίνει ίσο με 36000. Επί της ουσίας, το λογισμικό του έξυπνου μετρητή ελέγχει τις παρακάτω ισότητες σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας και αυξάνει τους επιμέρους μετρητές αναλόγως.

$$\frac{\sum_0^{N_s-1} v[n] \cdot i[n-m]}{N_s} = \frac{36000}{K_{act,x} \cdot T_s} \quad (5.40)$$

$$\frac{\sum_0^{N_s-1} v_{90}[n] \cdot i[n-m]}{N_s} = \frac{36000}{K_{react,x} \cdot T_s} \quad (5.41)$$

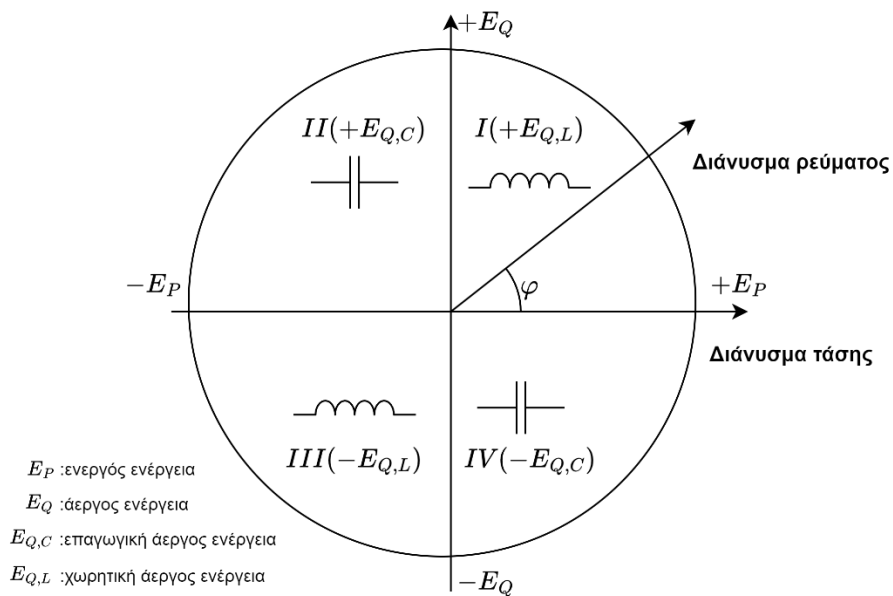
Για τον υπολογισμό των αντίστοιχων ενεργειών ενός τριφασικού συστήματος εφαρμόζονται οι ακόλουθες σχέσεις.

$$E_{act,total} = \sum_{x=1}^3 E_{act,x} = E_{act,1} + E_{act,2} + E_{act,3} \quad (5.42)$$

$$E_{react,total} = \sum_{x=1}^3 E_{react,x} = E_{react,1} + E_{react,2} + E_{react,3} \quad (5.43)$$

Στην πράξη υπάρχουν τέσσερις συσσωρευτές ενέργειας και τέσσερις αντίστοιχα μετρητές οι οποίοι προσαυζάνονται ανάλογα με το πρόσημο της ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.16 υπάρχουν τέσσερα σενάρια που χαρακτηρίζουν την μεταφερόμενη ενέργεια:

- **I τεταρτημόριο** ($P > 0, Q > 0$): Το ρεύμα ρέει από το δίκτυο προς τον έξυπνο μετρητή ενώ απορροφάται άεργος ισχύς από το δίκτυο (φορτίο με επαγωγικό συντελεστή ισχύος - ωμικο-επαγωγικό).
- **II τεταρτημόριο** ($P < 0, Q > 0$): Το ρεύμα ρέει από τον έξυπνο μετρητή προς το δίκτυο ενώ εγχέεται άεργος ισχύς στο δίκτυο (γεννήτρια με χωρητικό συντελεστή ισχύος).
- **III τεταρτημόριο** ($P < 0, Q < 0$): Το ρεύμα ρέει από τον έξυπνο μετρητή προς δίκτυο ενώ απορροφάται άεργος ισχύς από το δίκτυο (γεννήτρια με επαγωγικό συντελεστή ισχύος).
- **IV τεταρτημόριο** ($P > 0, Q < 0$): Το ρεύμα ρέει από το δίκτυο προς τον έξυπνο μετρητή ενώ εγχέεται άεργος ισχύς από το φορτίο (φορτίο με χωρητικό συντελεστή ισχύος - ωμικοχωρητικό).



Σχήμα 5.16: Ορισμός των τεσσάρων τεταρτημορίων για τη μέτρηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενότητα 6^η: Υλοποίηση Έξυπνου Μετρητή – Περιγραφή Λογισμικού (Firmware)

6.1 Εισαγωγή

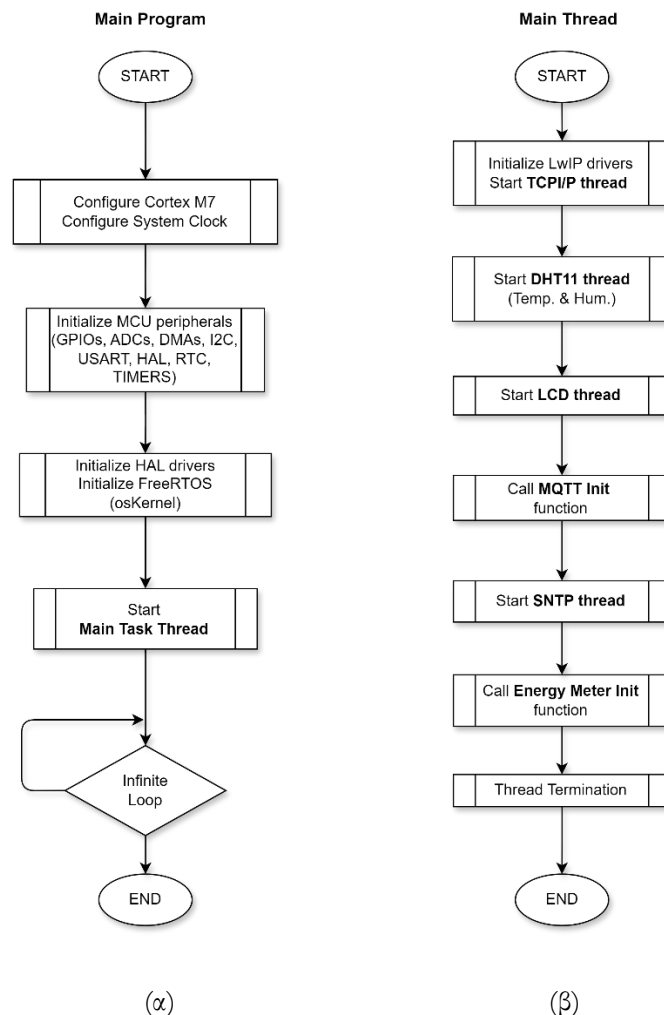
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το λογισμικό (firmware) το οποίο αναπτύχθηκε στον μικροελεγκτή STM32H743ZI το οποίο υλοποιεί τη λειτουργία του τριφασικού έξυπνου μετρητή. Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκε το υλικό που χρησιμοποιήθηκε αλλά και οι υπολογιστικές μέθοδοι του μετρητικού συστήματος του έξυπνου μετρητή. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζονται τα προγράμματα (κύρια και βοηθητικά) τα οποία αναπτύχθηκαν, υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροής για την ευκολότερη κατανόηση, και τα οποία εκτελούν τις βασικές και βοηθητικές λειτουργίες του έξυπνου μετρητή. Ο κώδικας των προγραμμάτων έχει γραφτεί σε γλώσσα C μέσω του ολοκληρωμένου αναπτυξιακού λογισμικού STM32CubeIDE, το οποίο παρέχεται δωρεάν από τον κατασκευαστή του μικροελεγκτή. Ο κατασκευαστής παρέχει επίσης όλες τις απαραίτητες βιβλιοθήκες, οδηγούς (drivers) και APIs (Application Program Interfaces) που χρειάζεται το πρόγραμμα για να αναγνωρίσει την CPU, τα περιφερειακά του μικροελεγκτή καθώς και τις υπομονάδες της αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-H743ZI.

Κατά τον σχεδιασμό επιλέχθηκε η δομή του λογισμικού του μικροελεγκτή να είναι βασισμένη σε λειτουργικό πραγματικού χρόνου (Real-Time Operation System, RTOS)[25]. Η χρήση RTOS σε ενσωματωμένα συστήματα όπως στην προκείμενη περίπτωση, βελτιστοποιεί τον χρόνο εκτέλεσης των διεργασιών (tasks) μέσω χρονοπρογραμματιστή πραγματικού χρόνου, με διακοπές βασισμένες στην προτεραιότητα (preemptive priority-based scheduler), και παρέχει αξιόπιστη και ασφαλή διαχείριση της μνήμης που διαμοιράζονται οι διάφορες διεργασίες μέσω σημαφόρων (semaphores)[25] ή σημάτων συγχρονισμού (signals). Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί RTOS από διάφορες εταιρείες, όπως τα FreeRTOS[26] της Amazon, Keil RTX της Arm και embOS της Segger. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε το FreeRTOS της Amazon, καθώς προσφέρεται δωρεάν, είναι αρκετά ελαφρύ καθώς απαιτεί ελάχιστη μνήμη από το μικροϋπολογιστικό σύστημα, είναι συμβατό με διαφορετικής αρχιτεκτονικής συστήματα και αναπτυξιακά εργαλεία, ενώ προσφέρει ευελιξία και εύκολη επεκτασιμότητα.

6.2 Κύριο πρόγραμμα (main program) και κύριο νήμα (main thread)

Τα προγράμματα του έξυπνου μετρητή είναι δομημένα σε διαφορετικά νήματα (threads)[26] και εκτελούνται διαδοχικά μέσω του χρονοπρογραμματιστή (scheduler)[26] ανά προτεραιότητα. Το κύριο πρόγραμμα είναι το πρώτο πρόγραμμα που εκτελεί ο μικροελεγκτής την στιγμή που θα τροφοδοτηθεί

για πρώτη φορά με τάση. Το κύριο πρόγραμμα αρχικοποιεί τον πυρήνα Cortex M7 του μικροελεγκτή, το ρολόι χρονισμού (System Clock), τη μνήμη, τη μονάδα προστασίας μνήμης (Memory Protection Unit, MPU), τις βασικές περιφερειακές μονάδες (ADC, DMA, GPIO, I2C, RTC, Timers, USART κτλ.), ενεργοποιεί τις υψηλού επιπέδου βιβλιοθήκες συναρτήσεων διαχείρισης υλικού HAL (Hardware Abstract Layer), τους οδηγούς του FreeRTOS και τον χρονοπρογραμματιστή (scheduler). Τέλος δημιουργεί και εκκινεί το βασικό νήμα (main thread). Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του βασικού προγράμματος (main program) και του βασικού νήματος (main thread).



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής (α) κύριου προγράμματος (main program) και (β) κύριου νήματος (main thread).

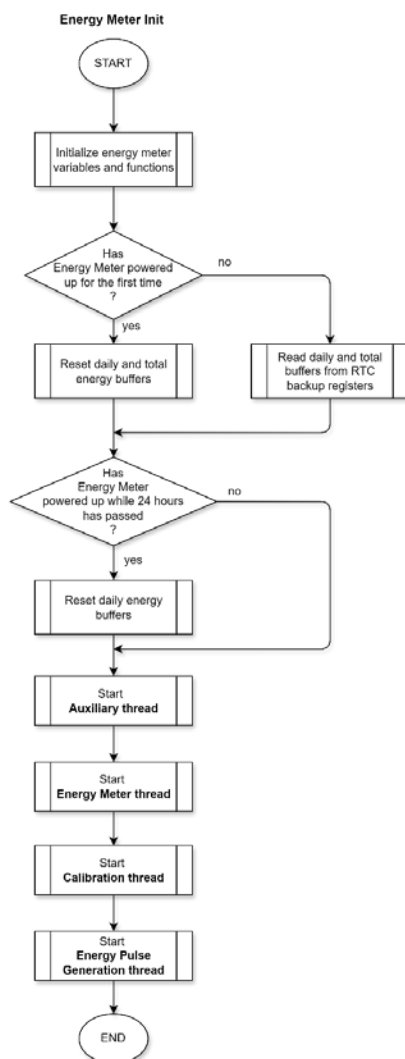
Το κύριο νήμα στην ουσία αρχικοποιεί τις μεταβλητές, τις συναρτήσεις και τις βιβλιοθήκες οι οποίες έχουν υλοποιηθεί και εκκινεί τα νήματα, δηλαδή τα υποπρογράμματα τα οποία τις χρησιμοποιούν για τη λειτουργία του έξυπνου μετρητή. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα και με το σχήμα 6.1(β), το κύριο νήμα αρχικοποιεί τους οδηγούς του LwIP (Lightwave Internet Protocol)[27] οι οποίοι ανιχνεύουν και διαχειρίζονται τον ethernet controller του μικροελεγκτή, ώστε να είναι δυνατή η συνδεσιμότητα με το διαδίκτυο, εκκινεί το TCP/IP νήμα (TCP/IP thread), δημιουργώντας τον δίαυλο επικοινωνίας TCP/IP τον οποίο χρησιμοποιεί ο έξυπνος μετρητής ως βασικό πρωτόκολλο πίσω από το MQTT και το SNTP (δηλαδή τα πρωτόκολλα MQTT και SNTP αποτελούν πρωτόκολλα υψηλού επιπέδου ενώ το TCP/IP είναι το πρωτόκολλο χαμηλού επιπέδου, απαραίτητο για να λειτουργήσουν τα δύο πρώτα), το νήμα επικοινωνίας του μικροελεγκτή με το αισθητήριο θερμοκρασίας-υγρασίας DHT11 (DHT11 thread),

το νήμα επικοινωνίας του μικροελεγκτή με την οθόνη υγρών κρυστάλλων LCD (LCD thread), καλεί την ρουτίνα αρχικοποίησης της αμφίδρομης επικοινωνίας του μικροελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου MQTT (MQTT Init), εκκινεί το νήμα επικοινωνίας του μικροελεγκτή με εξυπηρετητή NTP (Network Time Protocol server) μέσω πρωτοκόλλου SNTP (Simple Network Time Protocol) για τη λήψη της πραγματικής ώρας και τον συγχρονισμό – βαθμονόμηση του εσωτερικού RTC (SNTP thread), και τέλος την κλήση της υπορουτίνας αρχικοποίησης του οδηγού που έχει δημιουργηθεί και περιέχει τη βασική λειτουργία του έξυπνου μετρητή (Energy Meter Init).

6.3 Πρόγραμμα έξυπνου μετρητή

6.3.1 Ρουτίνα αρχικοποίησης έξυπνου μετρητή

Αρχικά εκτελείται η ρουτίνα αρχικοποίησης του έξυπνου μετρητή Energy Meter Init (βλ. σχήμα 6.2).



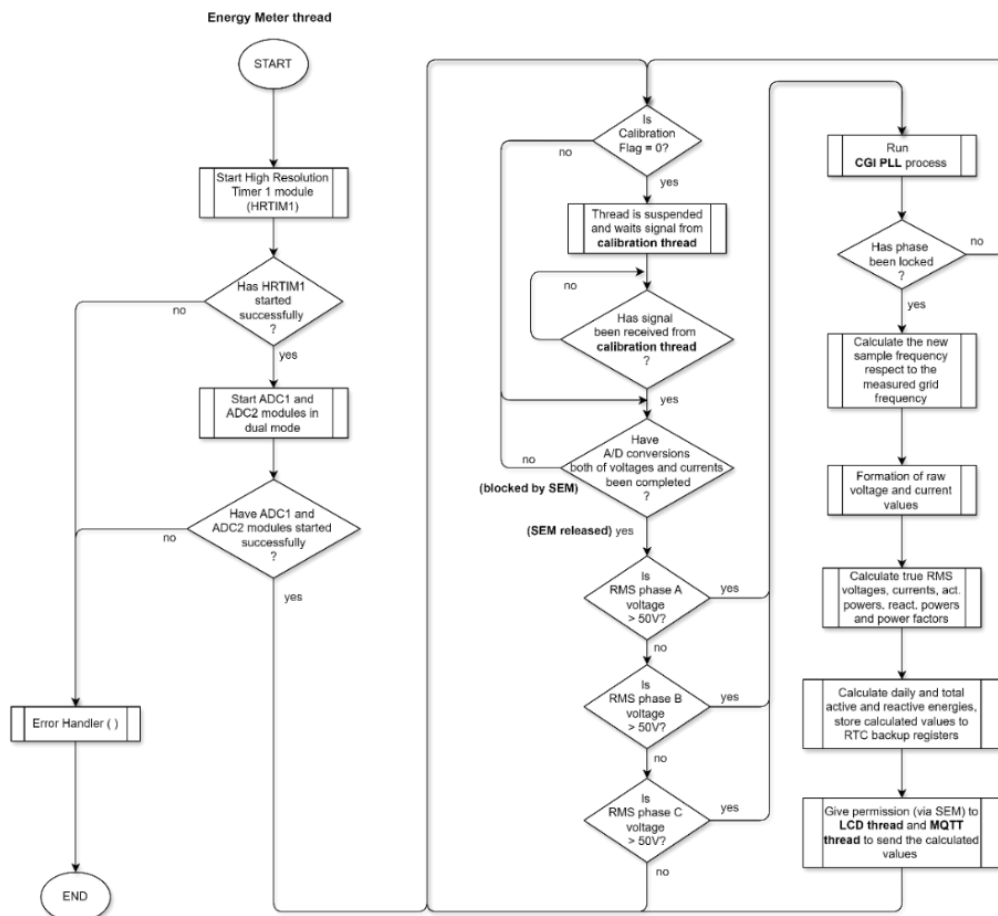
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής ρουτίνας αρχικοποίησης έξυπνου μετρητή.

Σύμφωνα με αυτήν, ελέγχεται εάν ο έξυπνος μετρητής τροφοδοτείται για πρώτη φορά με τάση και στην περίπτωση αυτή μηδενίζει όλους τους καταχωρητές (buffers) που διατηρούν την ημερησία και την συνολική ενεργό (εισερχόμενη και εξερχόμενη) και άεργο ενέργεια (εξερχόμενη και εισερχόμενη). Στην αντίθετη περίπτωση διαβάζονται οι τιμές (και αποθηκεύονται στους καταχωρητές ενέργειας) που έχουν αποθηκευτεί στους εφεδρικούς (backup) καταχωρητές του RTC την τελευταία φορά που

τροφοδοτήθηκε ο έξυπνος μετρητής με τάση. Οι ημερήσιοι καταχωρητές ενέργειας (ενεργού και άεργου, εισερχόμενης και εξερχόμενης) μηδενίζονται μετά το πέρας της ημέρας (κάθε μέρα στις 12:00π.μ.) ύστερα από ειδοποίηση του RTC (RTC alarm A) μέσω διακοπής (interrupt). Στη συνέχεια δημιουργείται και εκκινεί το νήμα υπολογισμών όλων των ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ισχύεις, ενέργειες) Energy Meter thread, το νήμα δευτερευουσών μετρήσεων, όπως θερμοκρασία CPU μικροελεγκτή (MCU temperature), τάση αναφορά (reference voltage) και τάση συσσωρευτή (battery voltage), Auxiliary thread, το νήμα βαθμονόμησης της τάσης εξόδου (αφαίρεση offset τάσης) των αισθητηρίων τάσης και ρεύματος Calibration thread, και το νήμα παραγωγής παλμών ενέργειας Energy Pulse Generation thread.

6.3.2 Νήμα κύριας λειτουργίας έξυπνου μετρητή (Energy Meter thread)

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος που εκτελεί την βασική λειτουργία του έξυπνου μετρητή (Energy Meter thread). Αρχικά ενεργοποιείται ο μετρητής υψηλής ακρίβειας HRTIM1, ο οποίος κρατά σταθερή την συχνότητα δειγματοληψίας (βλ. ενότητα 5.2). Σε περίπτωση που ο μετρητής δεν εκκινήσει κανονικά τότε καλείται η ρουτίνα Error Handler() η οποία ενημερώνει το σύστημα για το σχετικό σφάλμα (βλ. παράγραφο 6.3.6) και διακόπτεται η λειτουργία μέτρησης. Στην αντίθετη περίπτωση ενεργοποιούνται οι μονάδες ADC1 και ADC2 και εκκινούν σε διπλή λειτουργία (dual mode). Στην περίπτωση μη ορθής εκκίνησης καλείται επίσης η ρουτίνα Error Handler() και διακόπτεται η λειτουργία μέτρησης. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος βαθμονόμησης της τάσης εξόδου των αισθητηρίων τάσης και ρεύματος (offset calibration).

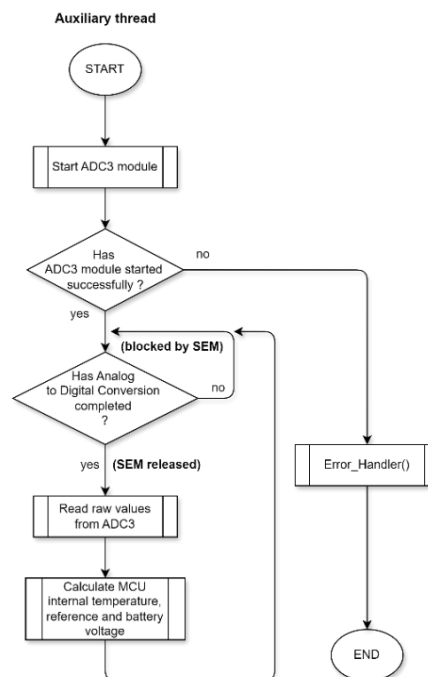


Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής νήματος κύριας λειτουργίας έξυπνου μετρητή Energy Meter thread.

Στην περίπτωση που τα αισθητήρια είναι ήδη βαθμονομημένα (`calib_flag = 1`) το πρόγραμμα συνεχίζει στην επόμενη εντολή. Στην αντίθετη περίπτωση (`calib_flag = 0`) το νήμα αναστέλλεται (`suspend`), δηλαδή το πρόγραμμα που εκτελείται εντός του νήματος σταματά, δίνεται σήμα στο νήμα βαθμονόμησης (`calibration thread`) να συνεχίσει (το οποίο προηγουμένως ήταν σε κατάσταση αναστολής) και να πραγματοποιήσει έναν κύκλο βαθμονόμησης (βλ. παράγραφο 6.3.4). Όταν η βαθμονόμηση ολοκληρωθεί τότε δίνεται σήμα στο νήμα κύριας λειτουργίας να συνεχίσει από εκεί που είχε σταματήσει (`resume`). Το νήμα στη συνέχεια περιμένει την ολοκλήρωση της A/D μετατροπής και των έξι καναλιών (των τριών τάσεων και των τριών ρευμάτων) από τους ADC1 και ADC2. Όταν η A/D μετατροπή ολοκληρωθεί ελέγχονται με τη σειρά τους οι RMS τιμές των τάσεων στις τρεις φάσεις του δικτύου. Η πρώτη που θα βρεθεί να έχει τιμή μεγαλύτερη των 50V (κατώφλι) εισάγεται ως παράμετρος στη διεργασία εκτίμησης συχνότητας και του ελέγχου κλειδώματος φάσης CGI-PLL (βλ. παράγραφο 5.3). Εάν όλες οι τάσεις είναι κάτω των 50V τότε το πρόγραμμα επανέρχεται στην κατάσταση ελέγχου βαθμονόμησης των αισθητηρίων. Εφόσον η ρουτίνα CGI-PLL δώσει σήμα ότι η φάση έχει κλειδωθεί, τότε το πρόγραμμα προχωρά στον υπολογισμό όλων των ενεργειακών παραμέτρων του έξυπνου μετρητή και την αποθήκευσή τους στους εφεδρικούς καταχωρητές του RTC (RTC backup registers) για τη διατήρηση του ιστορικού. Στην αντίθετη περίπτωση (εάν η φάση δεν έχει κλειδωθεί) πραγματοποιεί την ίδια διαδικασία (εκτέλεση της ρουτίνας εκτίμησης της συχνότητας) στον επόμενο κύκλο δειγματοληψίας έως ότου κλειδωθεί η φάση. Κατόπιν το πρόγραμμα δίνει το δικαίωμα στα νήματα LCD thread και MQTT thread, απελευθερώνοντας τους αντίστοιχους σημαφόρους (`semaphores`), να διαβάσουν τις μετρήσεις που υπολογίστηκαν. Τέλος, το πρόγραμμα επιστρέφει στο σημείο ελέγχου βαθμονόμησης των αισθητηρίων εκτελώντας και πάλι την προηγούμενη διαδικασία.

6.3.3 Νήμα βοηθητικών μετρήσεων (Auxiliary thread)

Στο σχήμα 6.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος που πραγματοποιεί τις δευτερεύουσες μετρήσεις του έξυπνου μετρητή, όπως τη μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του μικροελεγκτή (MCU temperature), την τάση αναφορά (reference voltage) και την τάση συσσωρευτών (battery voltage).

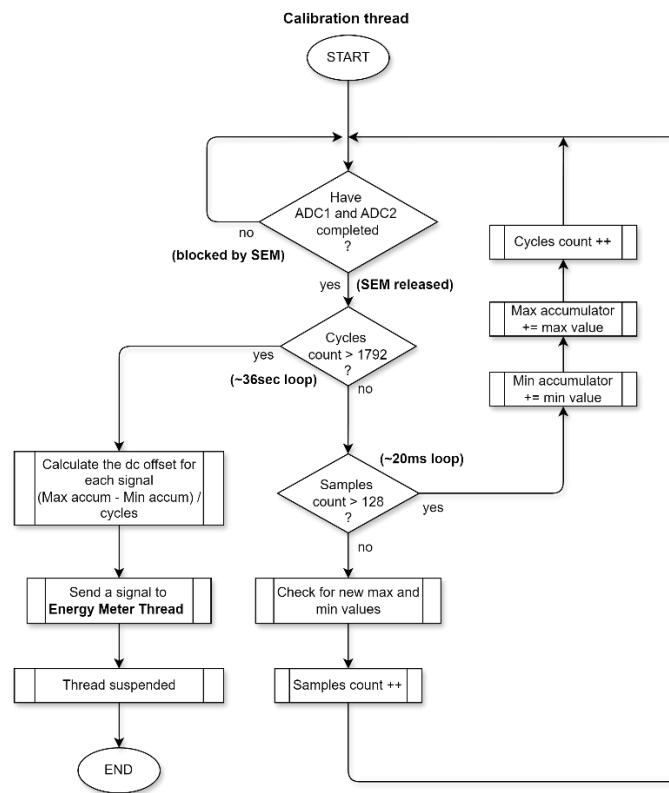


Σχήμα 6.4: Διάγραμμα ροής βοηθητικών μετρήσεων έξυπνου μετρητή (Auxiliary thread).

Αρχικά ενεργοποιείται η μονάδα ADC3. Σε περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στην ενεργοποίησή της καλείται η υπορουτίνα Error Handler() ενημερώνοντας το σύστημα για το σχετικό σφάλμα και το πρόγραμμα σταματά. Στην περίπτωση που ο ADC3 εκκινήσει χωρίς προβλήματα το πρόγραμμα αναμένει την ολοκλήρωση της A/D μετατροπής και τη φόρτωση των αποτελεσμάτων στο Stream2 της DMA1. Στη συνέχεια, από την DMA παραλαμβάνονται οι πρωτογενείς τιμές (raw values) της A/D μετατροπής και βάσει αυτών υπολογίζονται η εσωτερική θερμοκρασία (MCU internal temperature), η τάση αναφοράς (reference voltage) της CPU του μικροελεγκτή καθώς και η τάση του συσσωρευτή (battery voltage) του RTC. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέσω του ατέρμονος βρόχου που φαίνεται στο σχήμα 6.4.

6.3.4 Νήμα βαθμονόμησης αισθητηρίων (Calibration thread)

Στο σχήμα 6.5 φαίνεται το νήμα βαθμονόμησης της τάσης εξόδου των αισθητηρίων τάσεως (ZMPT101B) και ρεύματος (ACS712ELCT-05B) του έξυπνου μετρητή.



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα ροής νήματος βαθμονόμησης τάσεως εξόδου αισθητηρίων τάσης και ρεύματος έξυπνου μετρητή (Calibration thread).

Στο νήμα αυτό υπολογίζονται οι offset τιμές της τάσης που παράγουν τα αισθητήρια τάσεως και ρεύματος ώστε οι κυματομορφές τους να είναι συμμετρικές ως προς το μηδέν (και όχι ως προς την dc αυτή συνιστώσα). Ο αλγόριθμος υπολογισμού των τιμών αυτών ακολουθεί την παρακάτω σχέση (6.1).

$$offset_x = \frac{\max \left[\sum_{k=0}^n u_x(k) \right] - \min \left[\sum_{k=0}^n u_x(k) \right]}{2} \quad (6.1)$$

όπου x είναι το κανάλι από το οποίο λαμβάνονται τα δείγματα $u_x(n)$ και n είναι το πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των offset τιμών.

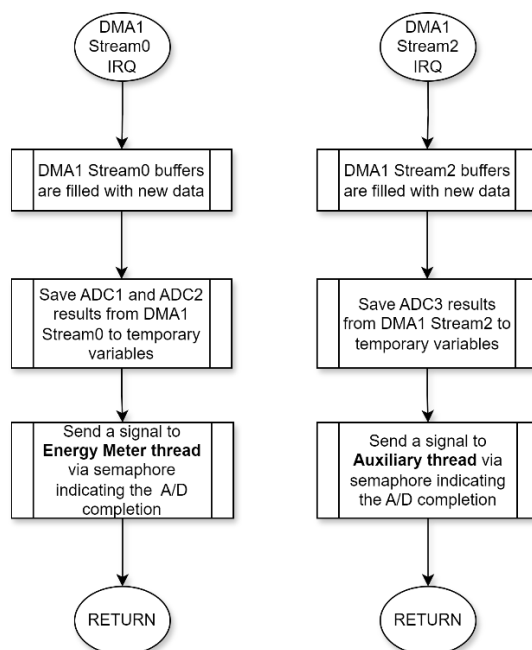
Η βαθμονόμηση διαρκεί περίπου 36 δευτερόλεπτα (1792 κύκλοι x 128 δείγματα x 156,25 s). Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αποτελείται από δυο βρόχους επανάληψης. Ο εμφωλευμένος βρόγχος αναζητά ανάμεσα από 128 δείγματα ενός κύκλου του σήματος (διάστημα περίπου 20ms) τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή. Τα αποτελέσματα αυτά αποθηκεύονται σε δύο συσσωρευτές (συγκρατείται το άθροισμα των μεγίστων και των ελάχιστων). Οι συσσωρευτές αυτοί (accumulators) ενημερώνονται σε κάθε ανακύκλωση του εξωτερικού βρόγχου. Μετά το πέρας των περίπου 36 δευτερολέπτων υπολογίζονται οι έξι offset τιμές (των έξι συνολικά σημάτων) με βάση τη σχέση (6.1), στέλνεται εντολή απελευθέρωσης (resume signal) του νήματος κύριας λειτουργίας έξυπνου μετρητή Energy Meter thread, το οποίο προηγουμένως βρισκόταν σε κατάσταση αναστολής (βλ. παράγραφο 6.3.2), και τέλος το νήμα βαθμονόμησης μεταβαίνει σε κατάσταση αναστολής (suspend) περιμένοντας εκ νέου σήμα από το νήμα κύριας λειτουργίας του μετρητή για τον επόμενο κύκλο βαθμονόμησης.

Στην παρούσα υλοποίηση η βαθμονόμηση των αισθητηρίων πραγματοποιείται:

- Όταν ο έξυπνος μετρητής τροφοδοτείται για πρώτη φορά με τάση
- Κάθε δύο ώρες (μέσω του RTC alarm B)
- Κατ' εντολή του χρήστη μέσω γεφύρωσης pin ή μέσω της ηλεκτρονικής πλατφόρμας

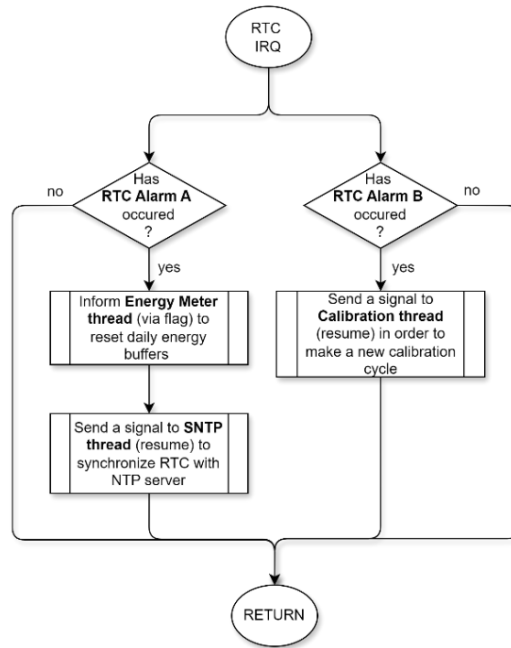
6.3.5 Ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπών (IRQs)

Ένας από τους σημαντικότερους μηχανισμούς του μικροελεγκτή είναι οι ρουτίνες εξυπηρέτησης αιτημάτων διακοπής (Interrupt Requests - IRQs ή Interrupt Service Routines - ISRs). Οι μηχανισμοί αυτοί χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό των περιφερειακών μονάδων του μικροελεγκτή και του προγράμματος του χρήστη προσφέροντας μεγαλύτερη αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, η παρούσα υλοποίηση αξιοποιεί τις ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπών των μονάδων DMA1 και DMA3 (οι οποίες συνεργάζονται εσωτερικά με τους ADC1, ADC2 και ADC3 αντίστοιχα) ώστε να διαβάζονται τα δεδομένα της A/D μετατροπής από τα αντίστοιχα νήματα (Energy Meter thread και Auxiliary thread) όταν αυτά είναι έτοιμα.



Σχήμα 6.6: Διάγραμμα ροής ρουτινών εξυπηρέτησης διακοπής των περιφερειακών μονάδων DMA1 και DMA3 του STM32H743ZI.

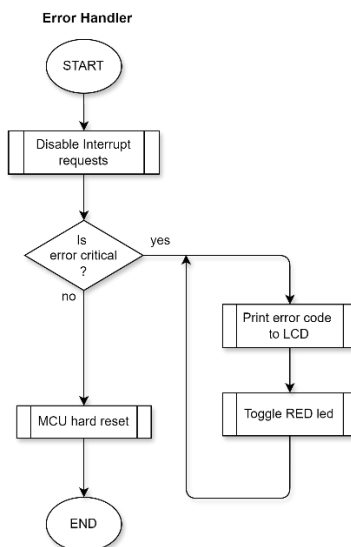
Επίσης το πρόγραμμα αξιοποιεί τα IRQs της περιφερειακής μονάδας RTC ενημερώνοντας το πρόγραμμα κάθε φορά που παρουσιάζεται alarm από τον RTC. Συγκεκριμένα το RTC διαθέτει δύο alarms (Α και Β). Το πρώτο χρησιμοποιείται για την ενημέρωση αλλαγής ημέρας (το IRQ του RTC alarm Α εκτελείται κάθε μέρα στις 12:00π.μ.) ώστε να μηδενίζονται οι ημερήσιοι καταχωρητές ενέργειας και να πραγματοποιείται συγχρονισμός της ώρας του RTC με τον NTP εξυπηρετητή (βλ. παράγραφο 6.7), ενώ το δεύτερο ενεργοποιεί κάθε δύο ώρες την περιοδική βαθμονόμηση των αισθητηρίων (δηλαδή στέλνει σήμα ελευθέρωσης του νήματος βαθμονόμησης κάθε δύο ώρες).



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ροής ρουτινών εξυπηρέτησης διακοπής alarm περιφερειακής μονάδας RTC.

6.3.6 Ρουτίνα παρουσίας σφάλματος (Error Handler)

Η ρουτίνα παρουσίας σφάλματος (Error Handler) χρησιμοποιείται σε διάφορα σημεία του κώδικα και καλείται στην περίπτωση που κάποια περιφερειακή μονάδα του μικροελεγκτή ή λειτουργία του μετρητικού συστήματος παρουσιάσει βλάβη (βλ. σχήμα 6.8).

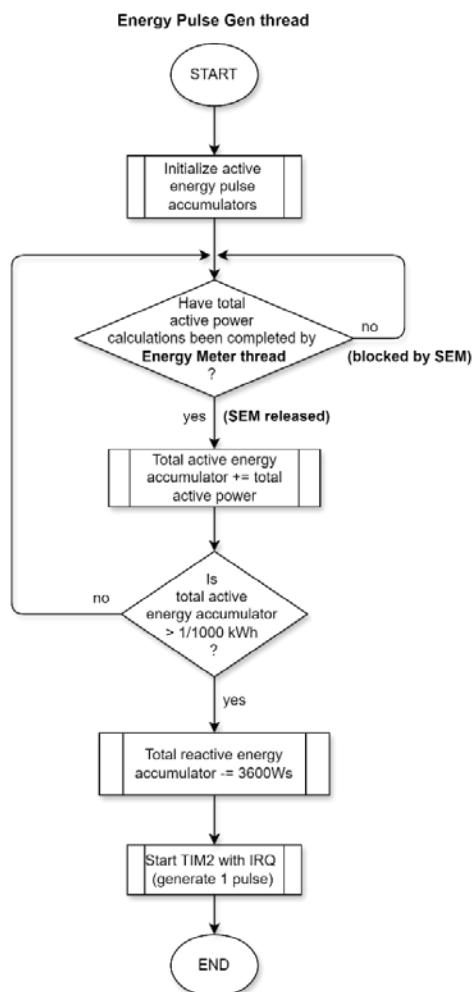


Σχήμα 6.8: Διάγραμμα ροής ρουτίνας παρουσίας σφάλματος (Error Handler).

Τέτοια σφάλματα μπορεί να είναι η αποτυχημένη αρχικοποίηση, ενεργοποίηση, απενεργοποίηση και ρύθμιση κάποιας περιφερειακής μονάδας του μικροελεγκτή, η αποτυχημένη εγγραφή ή ανάκτηση δεδομένων προς και από τους backup καταχωρητές του RTC, εσωτερικό σφάλμα CPU, σφάλμα μνήμης κτλ. Κάθε ένα από τα σφάλματα αυτά έχει ένα αναγνωριστικό κωδικό (error code) ώστε το σύστημα να αντιλαμβάνεται αν αυτό το σφάλμα είναι κρίσιμο ή όχι για τη λειτουργία του έξυπνου μετρητή. Σύμφωνα και με τον αλγόριθμο που φαίνεται στο σχήμα 6.8, αν το σφάλμα δεν είναι κρίσιμο τότε πραγματοποιείται επανεκκίνηση του λογισμικού του έξυπνου μετρητή ενώ στην αντίθετη περίπτωση αναβοσβήνει μόνιμα το κόκκινο LED της αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-H743ZI και τυπώνεται στην LCD οθόνη ο κωδικός του σχετικού σφάλματος ενημερώνοντας τον χρήστη.

6.3.7 Νήμα παραγωγής παλμών ενέργειας (Energy Pulse Generation Thread)

Όπως έχει προαναφερθεί στην παράγραφο 2.4, στις προδιαγραφές ενός έξυπνου μετρητή ενέργειας περιλαμβάνεται τις περισσότερες φορές και ένας μηχανισμός παραγωγής ενεργειακών παλμών όπου το πλήθος των παλμών αυτών σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο σηματοδοτεί μία προκαθορισμένη ποσότητα κατανάλωσης ενέργειας και έχει σκοπό τη βαθμονόμηση του μετρητή από εξωτερικές συσκευές. Στο σχήμα 6.9 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος (Energy Pulse Generator thread) παραγωγής παλμών εισερχόμενης ενεργού ενέργειας (κατανάλωσης) που έχει αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσει τον σκοπό αυτό.



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα ροής νήματος παραγωγής παλμών εισερχόμενης ενεργού ενέργειας (Energy Pulse Generator thread).

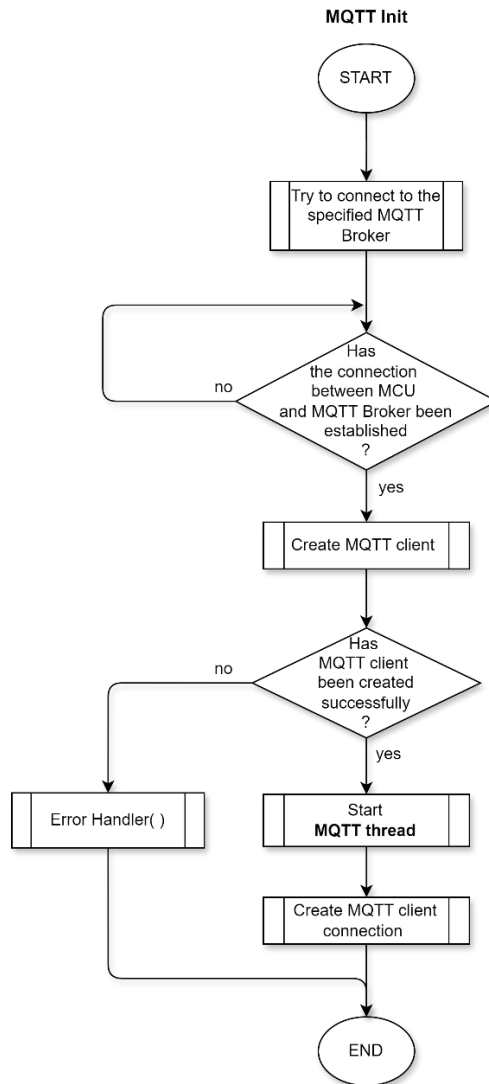
Ο ρυθμός παραγωγής των παλμών ενέργειας εκφράζεται σε πλήθος παλμών ανά kWh (imp/kWh) και μπορεί να λάβει τιμές όπως 1000, 2000, 3200, 6400 imp/kWh, ανάλογα με τις προδιαγραφές του έξυπνου μετρητή. Στην παρούσα υλοποίηση επιλέγουμε 1000 imp/kWh, δηλαδή ανά κάθε 1000 παλμούς καταναλώνεται 1 kWh. Οι παλμοί αυτοί οδηγούνται στο μπλε LED της αναπτυξιακής πλακέτας Nucleo-H743ZI (οπτική ένδειξη) και στο pin PB7 (GPIOB Pin 7), απ' όπου μέσω γαλβανικά απομονωμένου κυκλώματος μπορούν να μετρηθούν από εξωτερικό όργανο με σκοπό τη μελλοντική βαθμονόμηση του μετρητή. Ένας συσσωρευτής συγκρατεί το άθροισμα της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας. Η ενημέρωση του συγκεκριμένου συσσωρευτή πραγματοποιείται εφόσον το νήμα κύριας λειτουργίας του μετρητή (Energy Meter Thread) δώσει σήμα (απελευθέρωση σημαφόρου) ότι ο υπολογισμός της συνολικής εισερχόμενης ενεργού ισχύος έχει ολοκληρωθεί (συγχρονισμός των δύο νημάτων μέσω σημαφόρου). Εάν ο συσσωρευτής έχει τιμή μεγαλύτερη από 3600Ws (που αντιστοιχεί σε 1/1000 kWh) τότε δίνεται εντολή παραγωγής ενός παλμού. Η διάρκεια των παλμών έχει οριστεί σε 80ms και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο Timer2 του μικροελεγκτή. Στη συνέχεια η υπολειπόμενη ποσότητα ενέργειας (αυτή που προκύπτει από τη διαφορά) διατηρείται για τον επόμενο κύκλο. Η λειτουργία του προηγούμενου αλγορίθμου μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με το ακόλουθο παράδειγμα.

Έστω ότι ο έξυπνος μετρητής παρακολουθεί την κατανάλωση τριφασικού ωμικού φορτίου ($\cos\varphi = 1$) το οποίο καταναλώνει σταθερά 40A ανά φάση. Θεωρώντας σταθερό δίκτυο διανομής με φασική RMS τιμή 230V, το συνολικό φορτίο έχει πραγματική ισχύ περίπου 27,6kW. Θεωρώντας επίσης ότι η συχνότητα του δικτύου είναι σταθερή 50Hz τότε και η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 6400Hz (συγχρονισμένη δειγματοληψία). Στην περίπτωση αυτή σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας ο έξυπνος μετρητής αντιλαμβάνεται κατανάλωση ίση με 4,3125 Ws ($27,6kW \times 156,25\mu s$). Συνεπώς χρειάζονται περίπου 843,78 κύκλοι ώστε ο μετρητής να μετρήσει ακριβώς 3600 Ws κατανάλωση, πράγμα μη εφικτό. Άρα μετά από 844 κύκλους δειγματοληψίας ο έξυπνος μετρητής θα μετρήσει 3639,75 Ws ($4,3125 Ws \times 844$ κύκλοι), θα παραχθεί ένας παλμός και στο συσσωρευτή θα παραμείνει υπόλοιπο 39,75 Ws ($3639,7 Ws - 3600 Ws$).

6.4 Πρόγραμμα αποστολής και λήψης δεδομένων (MQTT interface)

6.4.1 Ρουτίνα αρχικοποίησης MQTT διεπαφής

Στο σχήμα 6.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής της ρουτίνας αρχικοποίησης της διεπαφής MQTT, δηλαδή ο αλγόριθμος που δημιουργεί τον δίαυλο επικοινωνίας μέσω πρωτοκόλλου MQTT για την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων από και προς τον έξυπνο μετρητή. Αρχικά, γίνεται προσπάθεια σύνδεσης του μικροελεγκτή, του οποίου η διεύθυνση IP είτε έχει καθοριστεί τοπικά (χειροκίνητα) είτε αυτόματα μέσω DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), με τον προκαθορισμένο MQTT Broker. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται ο HiveMQ (broker.hivemq.com)[28]. Εφόσον επιτευχθεί σύνδεση με τον MQTT Broker, καλείται η συνάρτηση δημιουργίας της οντότητας MQTT client. Σε περίπτωση αποτυχίας (επιστροφή τιμής null) καλείται η ρουτίνα παρουσίας σφάλματος Error Handler() (βλ. παράγραφο 6.3.6) και το πρόγραμμα σταματά. Στην αντίθετη περίπτωση δημιουργείται το νήμα MQTT thread το οποίο είναι υπεύθυνο για την αποστολή των δεδομένων προς τον MQTT Broker. Τέλος, δημιουργείται ο δίαυλος επικοινωνίας μεταξύ του MQTT client (έξυπνος μετρητής) και του MQTT Broker (εξυπηρετητής ή μεσίτης).

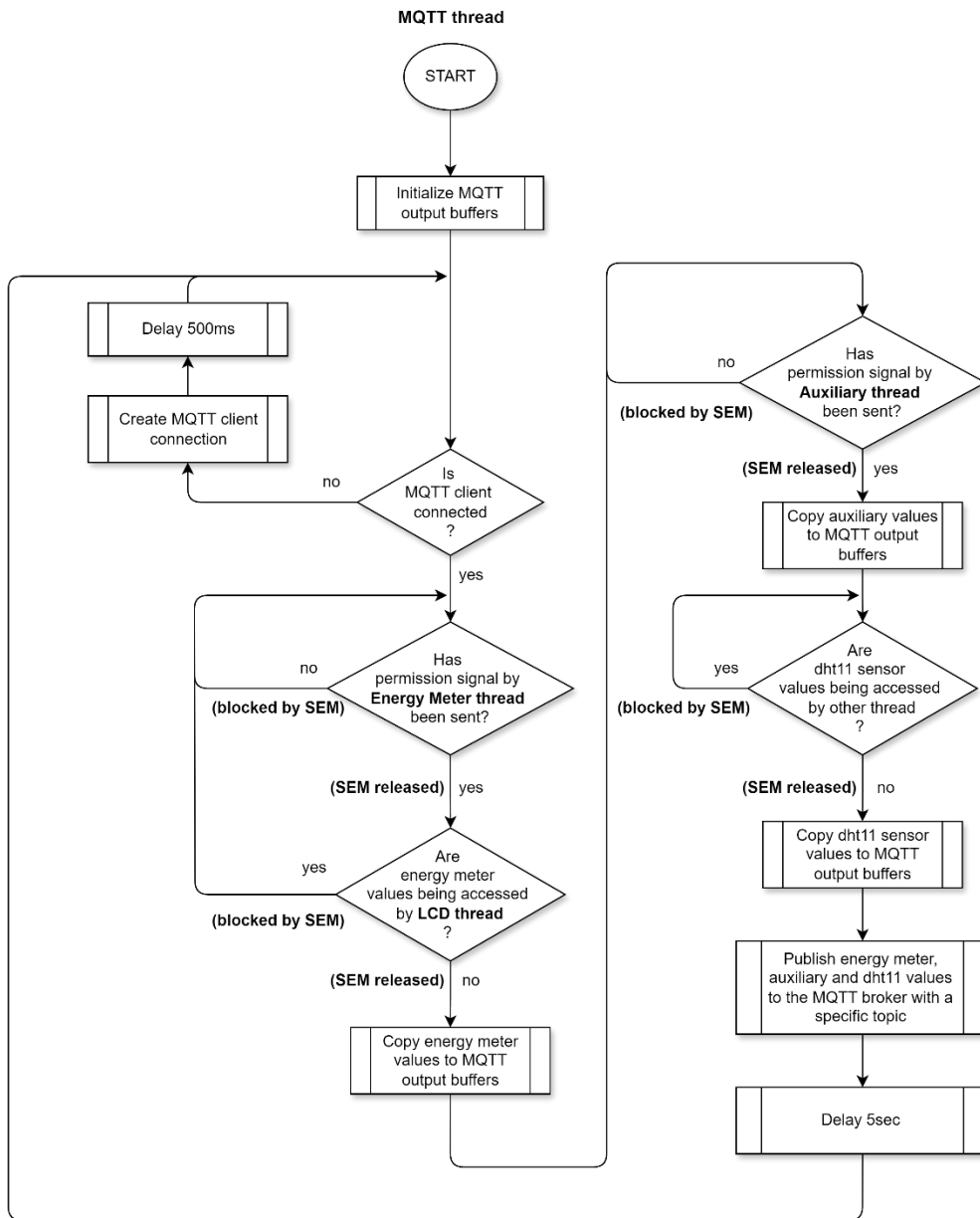


Σχήμα 6.10: Διάγραμμα ροής ρουτίνας αρχικοποίησης MQTT διεπαφής (MQTT init).

6.4.2 Νήμα διαχείρισης αποστολής δεδομένων (MQTT thread)

Στο σχήμα 6.11 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος που διαχειρίζεται την αποστολή των δεδομένων του έξυπνου μετρητή προς τον MQTT Broker. Στην αρχή πραγματοποιείται αρχικοποίηση των μεταβλητών εξόδου του MQTT διαύλου που έχει ήδη δημιουργηθεί. Στη συνέχεια ελέγχεται εάν ο διαύλος επικοινωνίας είναι ενεργός. Στην περίπτωση που δεν είναι ενεργός πραγματοποιείται νέα προσπάθεια σύνδεσης. Στην αντίθετη περίπτωση το πρόγραμμα περιμένει σήμα από το νήμα κύριας λειτουργίας του μετρητή (Energy Meter thread) το οποίο σηματοδοτεί ότι νήμα μπορεί να προσπελάσει τις μεταβλητές των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί και εφόσον το νήμα λειτουργίας της LCD οθόνης δεν πραγματοποιεί ήδη προσπέλαση σε αυτές. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αντιγραφή των κύριων μεταβλητών του έξυπνου μετρητή (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ισχύς, ενέργεια) στις μεταβλητές εξόδου του διαύλου επικοινωνίας (MQTT output buffers). Κατά τον ίδιο τρόπο (ελέγχοντας την πρόσβαση στις μεταβλητές των αντίστοιχων νημάτων) αντιγράφονται και όλες οι υπόλοιπες δευτερεύουσες μετρήσεις στους καταχωρητές εξόδου του διαύλου. Τέλος, αυτοί αποστέλλονται στον MQTT Broker (HiveMQ) μέσω ενός μοναδικού αναγνωριστικού θέματος (MQTT topic). Στην παρούσα υλοποίηση το topic το οποίο ταξινομεί τις μεταβλητές που αποστέλλονται από

τον έξυπνο μετρητή είναι το `mqtt/MCU/EnergyMeterMF743/data`. Η προηγούμενη διαδικασία εκτελείται κάθε 5 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα ροής νήματος διαχείρισης αποστολής δεδομένων (MQTT thread).

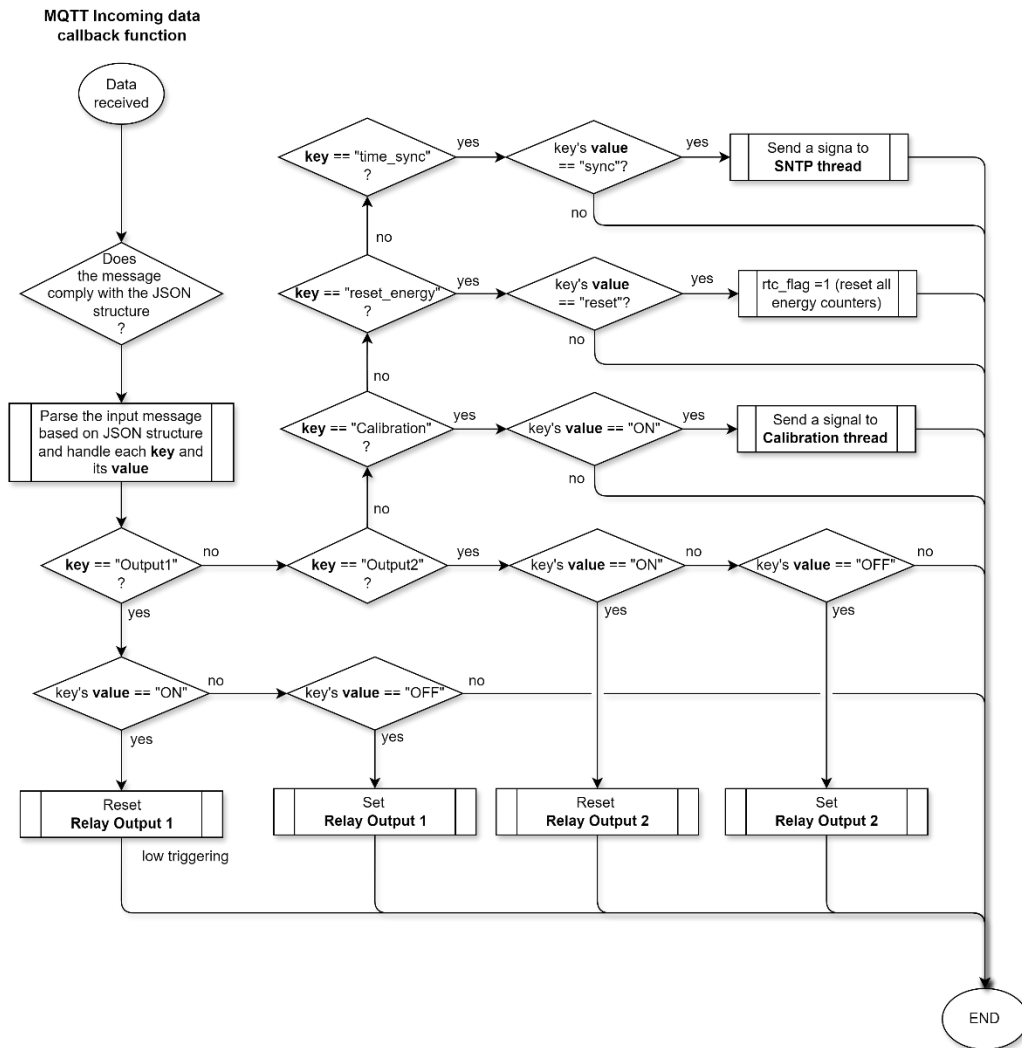
6.4.3 Ρουτίνα λήψης δεδομένων (MQTT incoming data callback)

Δεδομένου ότι ο διάλογος επικοινωνίας μεταξύ έξυπνου μετρητή (MQTT client) και εξυπηρετητή (MQTT Broker) είναι ενεργός τότε η ρουτίνα λήψης δεδομένων της οποίας το διάγραμμα ροής φαίνεται στο σχήμα 6.12 καλείται αυτόματα (χρήση συναρτήσεων τύπου callback) κάθε φορά που λαμβάνονται δεδομένα από τον MQTT Broker και τα οποία αναφέρονται σε συγκεκριμένο θέμα (topic) στο οποίο ο MQTT client (έξυπνος μετρητής) είναι εγγεγραμμένος συνδρομητής (subscriber). Στην παρούσα υλοποίηση ο έξυπνος μετρητής εγγράφεται στο topic `mqtt/MCU/EnergyMeterMF743/commands`, με QoS (Quality of Service) επιπέδου 1. Επομένως ο έξυπνος μετρητής μπορεί να παρακολουθεί τα μηνύματα τα οποία στέλνονται στο παραπάνω θέμα και στη συνέχεια αναλύοντας τα δεδομένα του

μηνύματος να λαμβάνει αποφάσεις σχετικές με αυτά. Τα δεδομένα επί της ουσίας είναι ένα αλφαριθμητικό (string) που έχει την ακόλουθη δομή JSON (JavaScript Object Notation):

```

“{
  “key 1” : “value 1”
  “key 2” : “value 2”
  .
  .
  “key n” : “value n”
}”
    
```

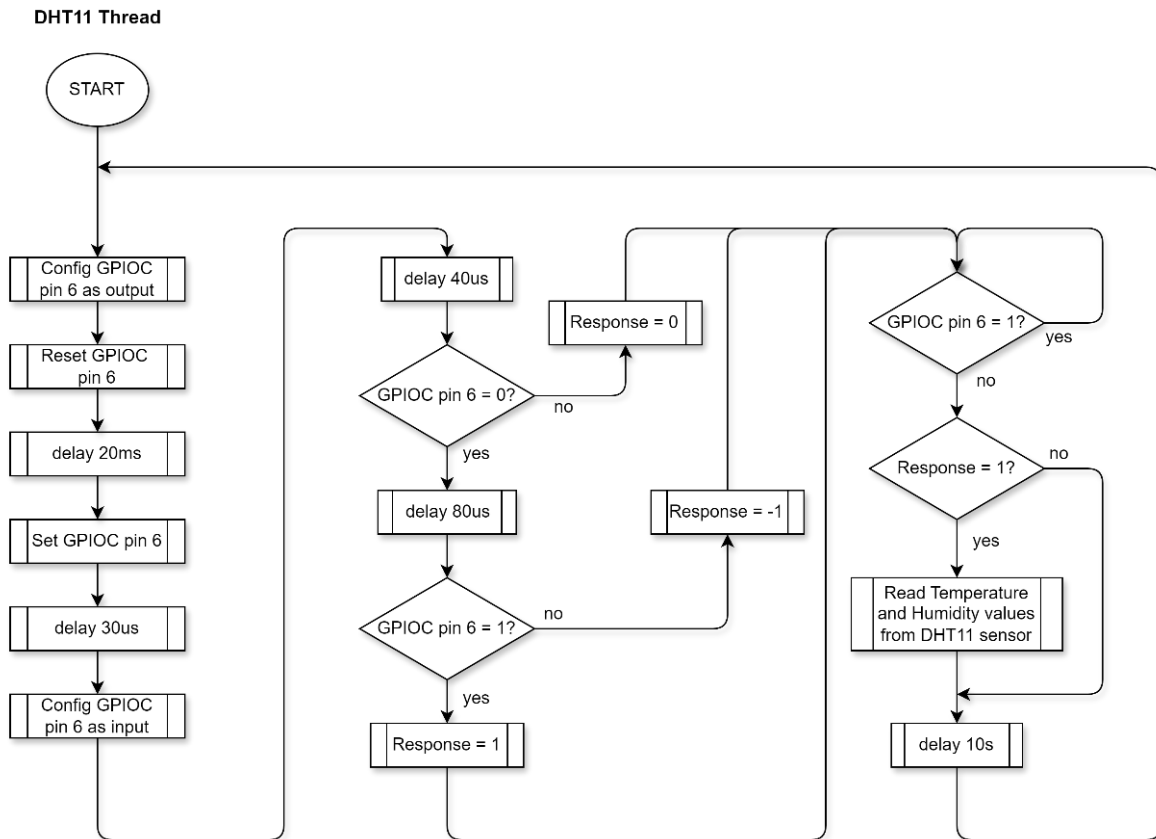


Σχήμα 6.12: Διάγραμμα ροής ρουτίνας χειρισμού εισερχόμενων δεδομένων μέσω του διαύλου MQTT (MQTT incoming data function).

Σύμφωνα λοιπόν με την προηγούμενη δομή, το πρόγραμμα απομονώνει τις λέξεις κλειδιά (keys), τα οποία στην παρούσα υλοποίηση μπορεί να είναι Output1, Output2, Calibration, reset_energy ή time_sync και στη συνέχεια διαβάζει τις αντίστοιχες τιμές τους (values) εκτελώντας τις αντίστοιχες χειροκίνητες εντολές (χειροκίνητη όπλιση/αφόπλιση των δύο εξόδων των ηλεκτρονόμων που περιεγράφησαν στην παράγραφο 4.8, χειροκίνητη εντολή εκτέλεσης κύκλου βαθμονόμησης της εξόδου των αισθητηρίων τάσης και ρεύματος, χειροκίνητος μηδενισμός καταχωρητών ενέργειας, χειροκίνητος συγχρονισμός ώρας με RTC).

6.5 Νήμα μέτρησης θερμοκρασίας/υγρασίας χώρου (DHT11 thread)

Στο σχήμα 6.13 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος που διαχειρίζεται την επικοινωνία με το αισθητήριο DHT11 για τη λήψη των δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας του χώρου.



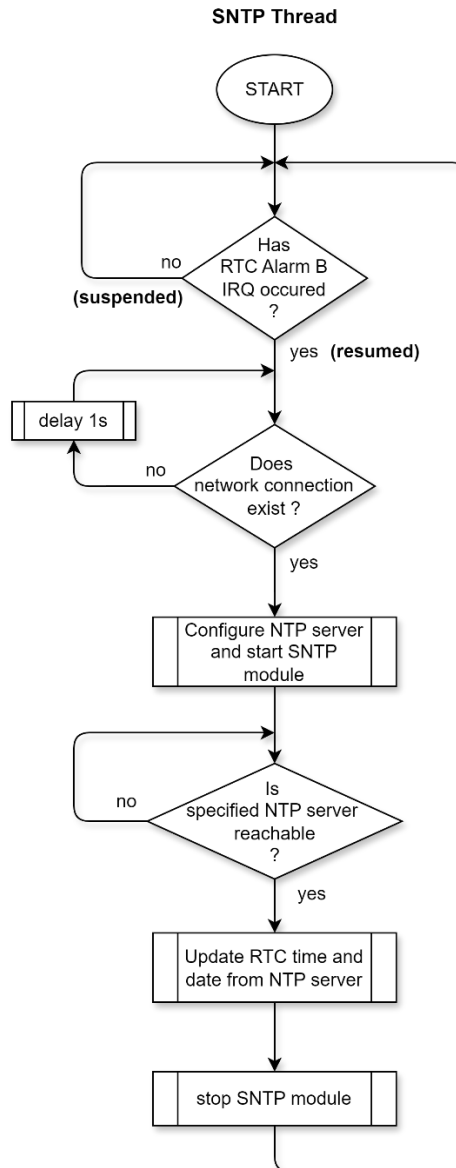
Σχήμα 6.13: Διάγραμμα ροής νήματος επικοινωνίας με αισθητήριο θερμοκρασίας-υγρασίας DHT11 (DHT11 Thread).

Ο αλγόριθμος ακολουθεί τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.6. Ο ακροδέκτης (pin) ο οποίος χρησιμοποιείται για τη λήψη της ακολουθίας παλμών του σχήματος 4.12 είναι ο PC6 (GPIOC Pin 6). Για τη δημιουργία καθυστέρησης της τάξης των μs χρησιμοποιήθηκε ο Timer7 (TIM7). Η ενημέρωση των μεταβλητών θερμοκρασίας και υγρασίας πραγματοποιείται κάθε δέκα δευτερόλεπτα.

6.6 Νήμα συγχρονισμού ώρας (SNTP thread)

Στο σχήμα 6.14 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος συγχρονισμού της ώρας του RTC μέσω NTP εξυπηρετητή. Το νήμα αρχικά βρίσκεται σε αναστολής (suspended) αναμένοντας σήμα απεμπλοκής από τη ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής του RTC Alarm B. Η τελευταία (βλ. παράγραφο 6.3.5 και σχήμα 6.7) καλείται κάθε μέρα στις 12:00 π.μ. δίνοντας σήμα απεμπλοκής (resume) στο νήμα συγχρονισμού ώρας (SNTP thread). Στη συνέχεια ελέγχεται αν υπάρχει φυσική σύνδεση με το διαδίκτυο (ethernet link), ενεργοποιείται η διεπαφή SNTP και καταχωρείται ο εξυπηρετητής από τον οποίο θα ανακτηθεί η ώρα. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται το σύμπλεγμα διακομιστών χρόνου *gr.pool.ntp.org*. Εφόσον υπάρχει πρόσβαση στον διακομιστή χρόνου, ανακτάται η ώρα και καταχωρείται στον αντίστοιχο καταχωρητή του RTC πραγματοποιώντας τον συγχρονισμό, και τέλος διακόπτεται η λειτουργία της διεπαφής SNTP για λόγους οικονομίας σε υπολογιστικούς πόρους (η

λειτουργία συγχρονισμού εκτελείται κάθε 24 ώρες). Το πρόγραμμα επιστρέφει σε κατάσταση αναστολής περιμένοντας το επόμενο σήμα.

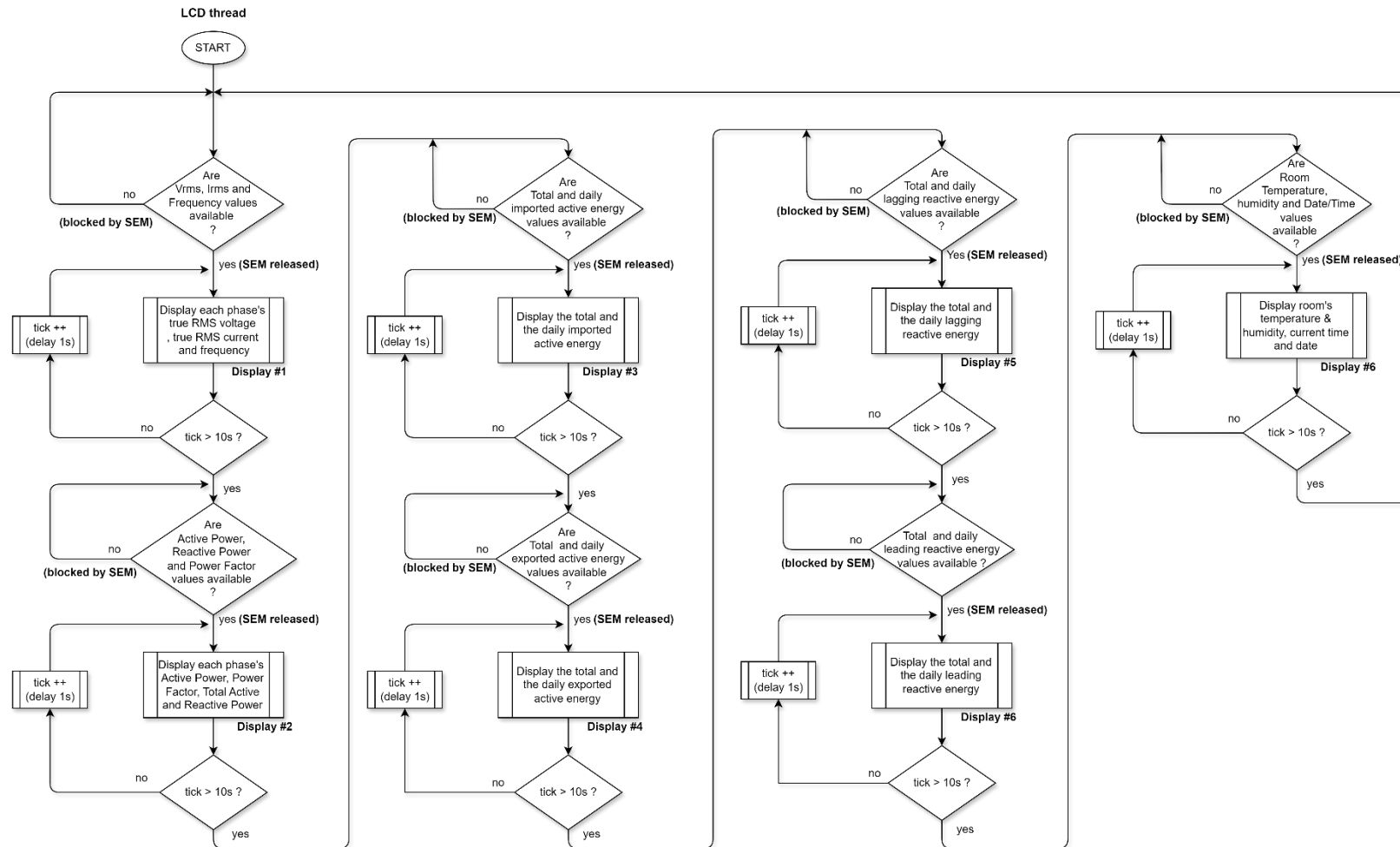


Σχήμα 6.14: Διάγραμμα ροής νήματος συγχρονισμού της ώρας του RTC μέσω NTP εξυπηρετητή.

6.7 Νήμα επικοινωνίας με οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD thread)

Στο σχήμα 6.15 φαίνεται το διάγραμμα ροής του νήματος που χειρίζεται την επικοινωνία του μικροελεγκτή με την οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD thread) για την απεικόνιση των απαραίτητων μηνυμάτων. Η επικοινωνία του μικροελεγκτή με την οθόνη γίνεται μέσω σειριακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας I²C. Η λειτουργία της οθόνης παρέχει οπτική επαφή με τον χρήστη, δίνοντας πληροφορίες για τις τρέχουσες τιμές των μετρήσεων που πραγματοποιεί ο έξυπνος μετρητής όπως επίσης και για την κατάστασή του. Στην οθόνη απεικονίζονται οι βασικές μετρήσεις του έξυπνου μετρητή, όπως ανά φάση τάση, ρεύμα, συντελεστής ισχύος, ανά φάση και συνολική εξερχόμενη/εισερχόμενη ενεργός και άεργος ισχύς, συνολική και ημερήσια εξερχόμενη/εισερχόμενη ενεργός και άεργος ενέργεια, συχνότητα, θερμοκρασία-υγρασία χώρου, ημερομηνία και ώρα. Τα προηγούμενα δεδομένα είναι ομαδοποιημένα

σε επτά οθόνες οι οποίες ενημερώνονται κυκλικά κάθε 10 δευτερόλεπτα, ενώ τα δεδομένα κάθε οθόνης ανακυκλώνονται κάθε ένα δευτερόλεπτο. Επίσης μέσω της οθόνης ο χρήστης μπορεί να ενημερώνεται και για συμβάντα όπως γενικά σφάλματα, κατάσταση αρχικοποίησης και βαθμονόμησης.

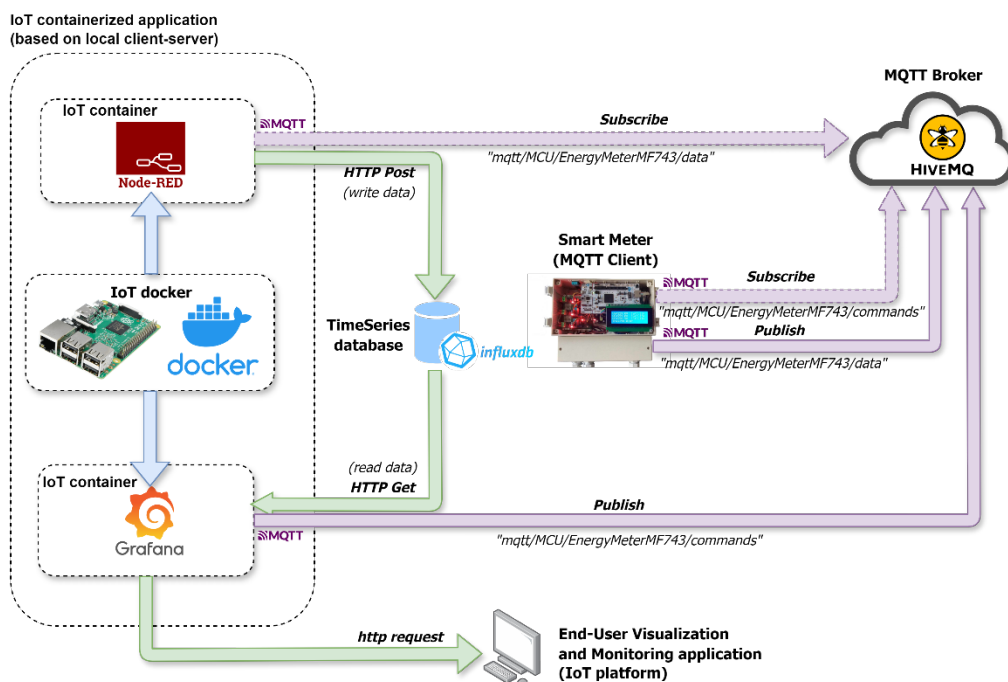


Σχήμα 6.15: Διάγραμμα ροής νήματος επικοινωνίας μικροελεγκτή με οθόνη LCD (LCD thread).

6.8 Ανάπτυξη ψηφιακής πλατφόρμας

6.8.1 Δίκτυο επικοινωνίας ψηφιακής εφαρμογής

Η ψηφιακή πλατφόρμα η οποία υλοποιήθηκε στηρίζεται στην αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) η οποία αναλύθηκε στην παράγραφο 3.3. Αποτελείται από έναν τοπικό εξυπηρετητή ο οποίος στην ορολογία των IoT εφαρμογών καλείται docker[29](ή «κλιμενεργάτης») και σκοπό έχει την παρακολούθηση της ορθής λειτουργίας των διαφόρων δομικών στοιχείων της IoT εφαρμογής, γνωστών και ως containers[29], τη βάση δεδομένων, και την εφαρμογή τελικού χρήστη η οποία προσφέρει οπτικοποίηση των μετρήσεων του έξυπνου μετρητή ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα απομακρυσμένων εντολών προς αυτόν. Στο σχήμα 6.16 φαίνεται ένα πιο ρεαλιστικό δομικό διάγραμμα του πραγματικού δικτύου επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων βαθμίδων που απαρτίζουν την IoT ψηφιακή εφαρμογή η οποία αναπτύχθηκε και περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 6.16: Δομικό διάγραμμα του δικτύου επικοινωνίας της πραγματικής ψηφιακής εφαρμογής οπτικοποίησης, παρακολούθησης και ελέγχου έξυπνου μετρητή που υλοποιήθηκε.

6.8.2 IoT dockers και containers

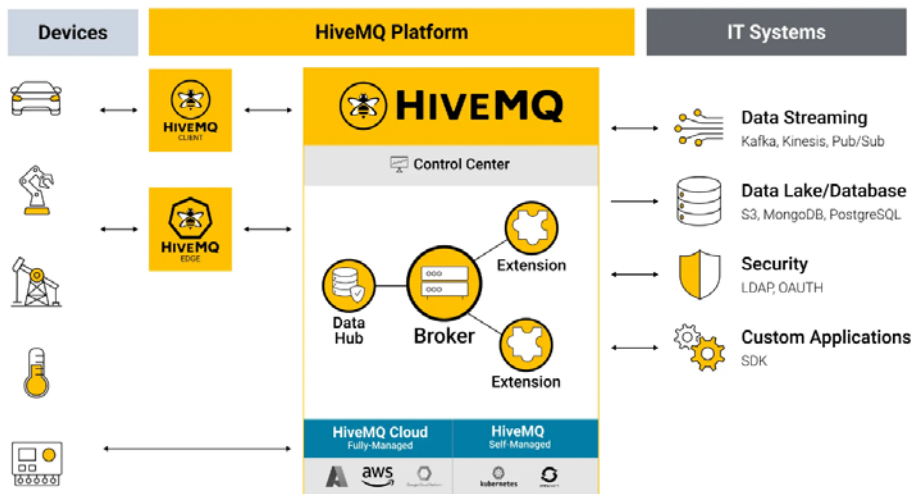
Η ανάπτυξη IoT εφαρμογών με χρήση docker και containers προσφέρει: α) φορητότητα (portability) της εφαρμογής και των εξαρτήσεων της σε διαφορετικά περιβάλλοντα, το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό πλεονέκτημα λόγω της ποικιλομορφίας που παρουσιάζει το υλικό και το λογισμικό των διαφόρων IoT συσκευών, β) ευελιξία, που επιτρέπει την ανάπτυξη και την δοκιμή διαφορετικών εφαρμογών εύκολα και γρήγορα, και τη μεταφορά των containers από το τοπικό περιβάλλον ανάπτυξης στο περιβάλλον παραγωγής χωρίς αλλαγές, γ) επεκτασιμότητα (scalability), δίνοντας την δυνατότητα διαχείρισης πολλαπλών IoT συσκευών και δεδομένων, γ) και τέλος ασφάλεια μέσω ισχυρής απομόνωσης των λειτουργιών της εφαρμογής. Ο docker μπορεί να είναι ένας μικρο-υπολογιστής, μία συστάδα υπολογιστών (cluster) ή μία υπηρεσία νέφους (cloud clustered ή non

clustered). Τα containers στην ουσία είναι οι εφαρμογές οι οποίες εκτελούνται στο ίδιο περιβάλλον με τον docker και ελέγχονται από αυτόν.

Στην παρούσα υλοποίηση, αποκλειστικά και μόνο για τους σκοπούς επίδειξης (demonstration) της συνολικής εφαρμογής, ως docker έχει χρησιμοποιηθεί ένα Raspberry Pi 2[30], το οποίο λειτουργεί ως ένας τοπικός client-server. Τα containers τα οποία ελέγχει ο docker είναι οι εφαρμογές Node-RED και Grafana, η χρησιμότητα των οποίων αναλύεται στη συνέχεια (βλ. σχήμα 6.16).

6.8.3 MQTT Broker

Ο ρόλος του εξυπηρετητή (MQTT Broker) σε μία εφαρμογή που χρησιμοποιεί το διαλειτουργικό πρωτόκολλο MQTT έχει αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες. Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται ο δημόσιος εξυπηρετητής HiveMQ. Ο HiveMQ broker σχεδιάστηκε με σκοπό την διαχείριση και ανάπτυξη εφαρμογών μεγάλης κλίμακας καθώς και μηνυμάτων μεγάλου όγκου, εκπληρώνοντας τις προσδοκίες μεγάλων οργανισμών οι οποίοι ζητούν υψηλή αξιοπιστία, ασφάλεια και δυνατότητες οργάνωσης και διαχείρισης των τηλεπικοινωνιακών υποδομών τους. Πρόκειται για έναν εξυπηρετητή τύπου νέφους, ανοιχτού κώδικα ο οποίος προσφέρει ταχύτητα, επεκτασιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια κατά την μεταφορά των δεδομένων μεταξύ IoT συσκευών.



Σχήμα 6.17: Γενική άποψη λειτουργίας HiveMQ Broker (πηγή: <https://www.hivemq.com/products/mqtt-broker/>).

Ο έξυπνος μετρητής ως πελάτης (MQTT client) του δικτύου δημοσιεύει (publish) τις μετρήσεις του στο συγκεκριμένο εξυπηρετητή κάθε πέντε δευτερόλεπτα. Οι παράμετροι της διεπαφής του μικροελεγκτή του έξυπνου μετρητή για την πρόσβαση στον HiveMQ broker είναι οι ακόλουθες:

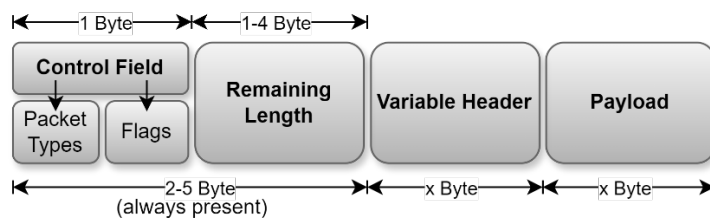
Πίνακας 6.1: Παράμετροι διεπαφής MQTT μικροελεγκτή (MQTT Client)

Broker	broker.hivemq.com
Port	1883
Version	MQTT V3.1.1
ClientID	EnergyMeterMF743
username	N/A
password	N/A
QoS	0
Keepalive	60
Retain	false

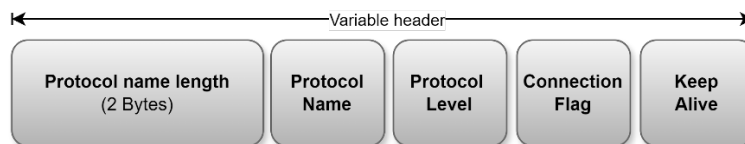
Συγκεκριμένα, ο μικροελεγκτής του έξυπνου μετρητή συνδέεται στην θύρα 1883 της διεύθυνσης broker.hiveq.com. Η έκδοση του πρωτοκόλλου MQTT που χρησιμοποιείται από όλες τις βαθμίδες της εφαρμογής που ανήκουν σε αυτό το δίκτυο (μικροελεγκτής, HiveMQ broker, Node-RED) είναι η 3.1.1. Το χαρακτηριστικό αναγνωριστικό (ClientID) του μικροελεγκτή, ο οποίος λαμβάνει το ρόλο του πελάτη (MQTT client), είναι “EnergyMeterMF743” ενώ δεν χρησιμοποιείται αυθεντικοποίηση (authentication). Δηλαδή στην παρούσα υλοποίηση δεν χρησιμοποιούμε όνομα (username) και κωδικό (password). Η παράμετρος keepalive έχει τεθεί στα 60 δευτερόλεπτα και ορίζει το μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο η επικοινωνία μεταξύ πελάτη (MQTT client) και εξυπηρετητή (MQTT broker) μπορεί να μείνει σε αδράνεια. Αν παρέλθει ο χρόνος που ορίζει η keepalive (σε δευτερόλεπτα) τότε ο πελάτης θεωρεί ότι υπάρχει πρόβλημα με τη σύνδεση στον εξυπηρετητή, τερματίζει τη σύνδεση και πραγματοποιεί νέα προσπάθεια (βλ. σχήμα 6.11). Αντίστοιχα ο εξυπηρετητής θεωρεί ότι ο πελάτης έχει αποσυνδεθεί και άρα καθαρίζει τη σύνδεση. Το retain είναι στην ουσία μία σημαία (flag) η οποία συμπεριλαμβάνεται στο μήνυμα που στέλνει ο πελάτης προς τον εξυπηρετητή. Εάν το σήμα αυτό είναι αληθές (true) τότε ο εξυπηρετητής θα στείλει το τελευταίο μήνυμα που έλαβε από τον συγκεκριμένο πελάτη σε όλους τους πελάτες οι οποίοι πρόκειται να εγγραφούν (subscribe) στο topic του αρχικού για πρώτη φορά. Τονίζεται ότι στην παρούσα υλοποίηση δεν χρησιμοποιείται αυτή η λειτουργία. Τέλος το επίπεδο υπηρεσίας QoS ορίστηκε σε 0.

Υπενθυμίζεται ότι ο έξυπνος μετρητής δημοσιεύει (publisher) τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς του στο topic “*mqtt/MCU/EnergyMeterMF743/data*” ενώ ταυτόχρονα ως εγγεγραμμένος (subscriber) στο topic *mqtt/MCU/EnergyMeterMF743/commands*” λαμβάνει εντολές από την ψηφιακή εφαρμογή.

Τα πακέτα των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μέσω του MQTT v3.1.1 πρωτοκόλλου έχουν την δομή που φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 6.18: Δομή μηνύματος πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT V3.1.1.



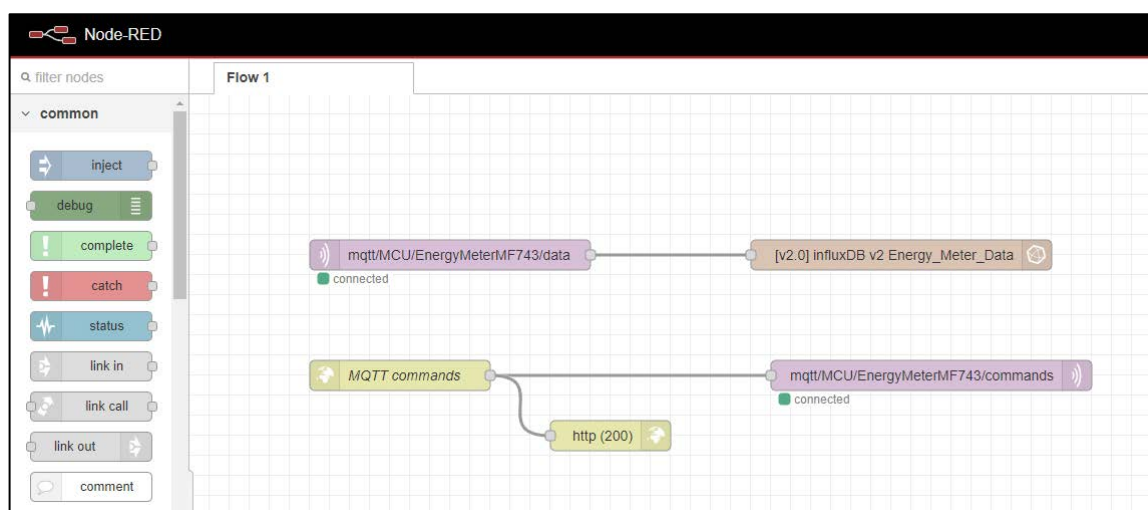
Σχήμα 6.19: Δομή περιεχομένου μεταβλητού τμήματος (variable header) μηνύματος πρωτοκόλλου επικοινωνίας MQTT V3.1.1.

Το μήνυμα αποτελείται από: α) το σταθερό τμήμα (fixed header) στο οποίο καθορίζεται ο τύπος του πακέτου (packet type), τα σήματα πακέτου (packet flags) και το υπολειπόμενο πακέτο (remaining length ή remaining packet), β) το μεταβλητό τμήμα (variable header), το οποίο περιλαμβάνει τα μεταδεδομένα (metadata) του πακέτου, όπως το όνομα του πακέτου (protocol name), το μήκος του ονόματος πρωτοκόλλου του πακέτου (protocol packet length), το επίπεδο του πρωτοκόλλου (protocol level) και τις σχετικές σημαίες (connection lags), όπως QoS, σημαία διατήρησης (retain flag), σημαία

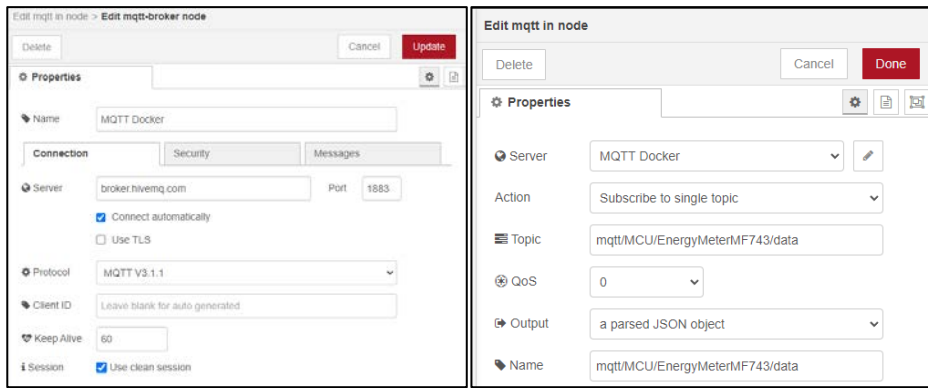
καθαρισμού επικοινωνίας (clean session), keepalive, και γ) το ωφέλιμο φορτίο (payload), το οποίο περιλαμβάνει τα δεδομένα που αποστέλλονται (μετρήσεις) ή λαμβάνονται (εντολές) από και προς τον έξυπνο μετρητή. Το payload μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε μορφή με τις πιο συνήθεις μορφές να είναι οι χαρακτηριστικές ASCII, JSON, XML ή απλό κείμενο. Το συνολικό μέγεθος του πακέτου δεν ξεπερνά τα 256 MB.

6.8.4 Αναπτυξιακό λογισμικό Node-RED

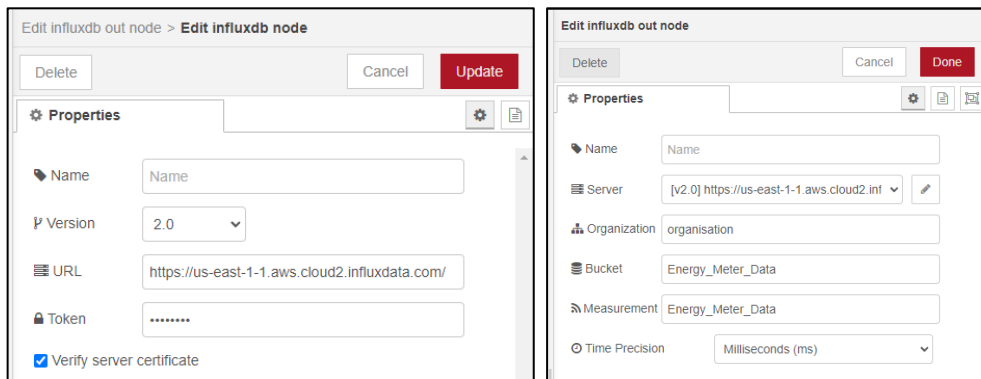
Το Node-RED είναι ένα αναπτυξιακό λογισμικό ανοιχτού κώδικα το οποίο διαθέτει ένα γραφικό περιβάλλον και ένα πλήθος προγραμματιστικών εργαλείων μέσω των οποίων μπορεί να αναπτυχθεί λογισμικό για τη διαχείριση δεδομένων. Μέσω των βιβλιοθηκών που διαθέτει μπορεί να συνεργαστεί με τα περισσότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας με σκοπό την επεξεργασία των δεδομένων που μεταφέρονται. Στην ουσία πρόκειται για ένα πρόγραμμα αρκετά ελαφρύ το οποίο εκτελείται εντός του docker και δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης, επεξεργασίας και μετατροπής των δεδομένων (από μία δομή σε μία άλλη) από μία ή πολλαπλές συσκευές ταυτόχρονα, την ενεργοποίηση συμβάντων βάσει προκαθορισμένων συνθηκών, τη συνεργασία με εξωτερικές (τύπου νέφους) ή τοπικές βάσεις δεδομένων (εντός του docker) καθώς και την ενκιαθάρηση σφαλμάτων της ροής των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (on-line debugging). Στην παρούσα υλοποίηση το Node-RED χρησιμοποιείται ως διαμεσολαβητής για την αποστολή των δεδομένων από τον έξυπνο μετρητή προς την βάση δεδομένων InfluxDB. Για το λόγο αυτό εντός του Node-RED δημιουργείται ένας MQTT client ο οποίος εγγράφεται στο topic `“mqtt/MCU/EnergyMeterMF743/data”`. Από το μήνυμα που λαμβάνεται κάθε φορά απομονώνεται το payload (στο οποίο εσωκλείονται οι μετρήσεις του έξυπνου μετρητή) το οποίο στη συνέχεια αποστέλλεται στην βάση δεδομένων χρονικής σειράς InfluxDB (cloud-based timeseries database) μέσω εντολής HTTP Post. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η αποστολή δεδομένων μη συμβατών με τη δομή που έχει οριστεί από τον έξυπνο μετρητή και άρα η επιπλέον επιβάρυνση της InfluxDB με περιττά δεδομένα.



Σχήμα 6.20: Γραφικό περιβάλλον Node-RED για την αποστολή δεδομένων από τον έξυπνο μετρητή προς τη βάση δεδομένων InfluxDB.



Σχήμα 6.21: Ρυθμίσεις MQTT client εντός του Node-RED.



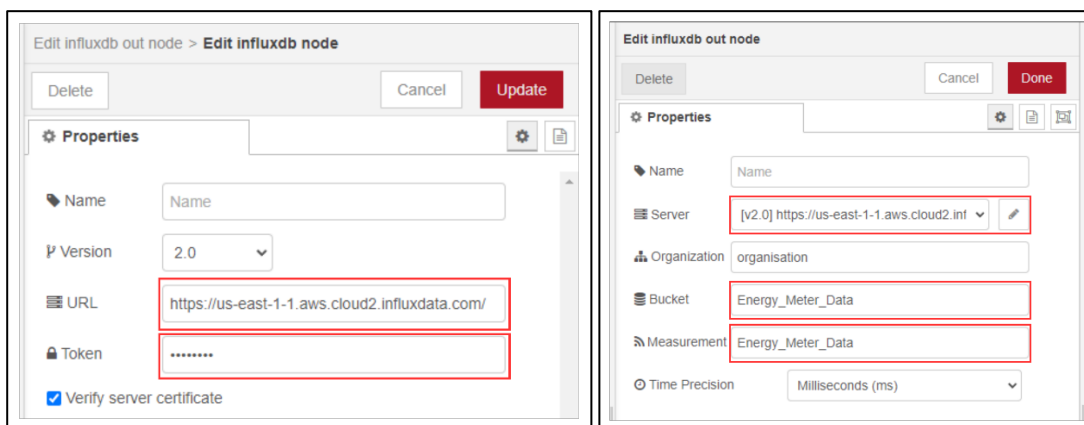
Σχήμα 6.22: Ρυθμίσεις κόμβου εξόδου για την επικοινωνία με την InfluxDB.

6.8.5 Βάση δεδομένων InfluxDB

Η InfluxDB αποτελεί μία βάση δεδομένων ανοιχτού κώδικα χρονολογικής σειράς (Timeseries Database), έχει δομηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Go και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων χρονοσειρών σε πεδία, όπως παρακολούθηση (monitoring), μετρήσεις εφαρμογών (metrics), δεδομένα έξυπνων αισθητήρων (IoT applications), καθώς και στην αναλυτική επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Η InfluxDB παρέχει μία γλώσσα παρόμοια με την SQL για τη δημιουργία ερωτημάτων βάσης (query), ενώ ενσωματώνει λειτουργίες που επικεντρώνονται στον χρόνο εκτέλεσης ενός ερωτήματος βάσεως που αποτελείται από μετρήσεις (measurements), σειρές τιμών και σημεία (points). Κάθε σημείο απαρτίζεται από ζεύγος κλειδιών-τιμών το οποίο ονομάζεται fieldset και όταν συγκεντρωθεί ένα σύνολο τιμών τότε δημιουργείται μία χρονοσειρά η οποία ονομάζεται tagset. Στη συνέχεια, οι σειρές ομαδοποιούνται από μία αναγνωριστική συμβολοσειρά η οποία αποτελεί και τη μέτρηση. Οι τιμές μπορούν να αποτελούν 64-bit ακέραιους, 64-bit δείκτες κινητής αποστολής, συμβολοσειρές ή λογικούς τελεστές. Επίσης προσφέρει αποθήκευση, ανάκτηση και συγχρονισμό δεδομένων από χιλιάδες χρονοσειρές με πολύ γρήγορο και ασφαλές τρόπο, με αποτέλεσμα να αποτελεί αξιόπιστη λύση για την παρακολούθηση σημαντικών μετρήσεων από πολλούς αισθητήρες. Ακόμα, μπορεί να δεχθεί δεδομένα με χρήση των πρωτοκόλλων HTTP, TCP και UDP, ανάλογα με την ανάγκη του χρήστη, δεν εξαρτάται από άλλα προγράμματα και προσφέρει μεγάλο εύρος βιβλιοθηκών για ποικίλες γλώσσες, όπως η Go, PHP, Perl, .Net, Lisp, Java, JavaScript και Node.js .

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η InfluxDB cloud v2, δηλαδή δεν χρησιμοποιήθηκε η InfluxDB ως τοπική βάση δεδομένων εγκατεστημένη στον τοπικό client-server (docker) αλλά η υπηρεσία τύπου νέφους (έκδοση 2) για μεγαλύτερη ασφάλεια αλλά και μεγαλύτερο χώρο αποθήκευσης.

Έχοντας δημιουργήσει λογαριασμό στην υπηρεσία μέσω του συνδέσμου <https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com/>, στη συνέχεια δημιουργούμε τον χώρο δεδομένων (bucket) με την ονομασία Energy_Meter_Data στον οποίο θα αποστέλλονται τα δεδομένα. Ο συγκεκριμένος χώρος μπορεί να φιλοξενεί πολλές διαφορετικές ομάδες μετρήσεων (measurements), παρόλα αυτά κατά τον σχεδιασμό διατηρήθηκε μόνο μία ομάδα με την ίδια ονομασία (Energy_Meter_Data). Κάθε δικτυακός χώρος που δημιουργείται αντιστοιχίζεται και από ένα μοναδικό κλειδί API token μέσω του οποίου γίνεται αναγνώριση της δικτυακής βάσης δεδομένων από άλλες εφαρμογές (node-RED, Grafana). Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το Node-RED στέλνει τα δεδομένα που λαμβάνει ως MQTT client από τον έξυπνο μετρητή στην InfluxDB μέσω εντολής HTTP Post. Συνεπώς, το Node-RED ως παραμέτρους δέχεται την url (<https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.com/>) της InfluxDB cloud, την ονομασία της βάσης δεδομένων (Energy_Meter_Data), την ονομασία της ομάδας μέτρησης (Energy_Meter_Data) και το API token.



Σχήμα 6.23: Ρυθμίσεις παραμέτρων στον κόμβο εξόδου του Node-RED για την επικοινωνία με την διαδικτυακή βάση δεδομένων της InfluxDB cloud v2.

Μέσα από το περιβάλλον που προσφέρει η υπηρεσία τύπου νέφους της InfluxDB μπορούμε να εκτελέσουμε πολύ γρήγορα ερωτήματα (queries) και να ανακτήσουμε δεδομένα σε δομή πίνακα ή γραφήματος. Στο σχήμα 6.24 παρουσιάζεται ένα τέτοιο παράδειγμα στο οποίο ανακτώνται οι τιμές της συχνότητας του δικτύου σε μορφή πίνακα.

The screenshot shows the InfluxDB Data Explorer interface. On the left, the 'Schema Browser' shows the 'Energy_Meter_Data' bucket and measurement. The main area displays a Flux query:

```

1 from(bucket: "Energy_Meter_Data")
2   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
3   |> filter(fn: (r) =>
4     r._measurement == "Energy_Meter_Data" and
5     r._field == "freq"
6   )
7

```

The query is executed, and the results are shown in a table with 1325 rows. The table has the following columns: table, _measurement, _field, _value, and _time. The results are as follows:

table	_measurement	_field	_value	_time
0	Energy_Meter_Data	freq	50.02	2024-07-21T08:31:02.422Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50.02	2024-07-21T08:31:07.369Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50.02	2024-07-21T08:31:12.557Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50	2024-07-21T08:31:17.375Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50.02	2024-07-21T08:31:22.379Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50	2024-07-21T08:31:27.366Z
0	Energy_Meter_Data	freq	50	2024-07-21T08:31:32.470Z

Σχήμα 6.24: Παράδειγμα αναζήτησης ιστορικού της μετρούμενης συχνότητας μέσα από την διαδικτυακή βάση δεδομένων Energy_Meter_Data που έχει δημιουργηθεί στην InfluxDB cloud.

6.8.6 Πλατφόρμα οπτικοποίησης, παρακολούθησης και ελέγχου Grafana

Το εργαλείο Grafana αποτελεί μία δημοφιλή πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα για την ανάλυση δεδομένων και δημιουργία γραφικών παραστάσεων. Είναι γραμμένη στις γλώσσες Go, JavaScript και υποστηρίζει πολλές βάσεις δεδομένων, όπως τις Graphite, Elasticsearch, CloudWatch, InfluxDB, OpenTSDB, Prometheus, MySQL και την Postgres. Προσφέρει πολλά είδη γραφικής απεικόνισης στον χρήστη, δυνατότητα μεγέθυνσης σε συγκεκριμένη περιοχή καθώς και δυνατότητα απεικόνισης πολλών μετρήσεων σε μία γραφική παράσταση. Στην παρούσα υλοποίηση το Grafana εκτελείται στον docker (δηλαδή ανήκει στον τοπικό client-server ως container). Έχει ρυθμιστεί να συνεργάζεται με δύο πηγές, την InfluxDB cloud, απ' όπου αντλεί τα δεδομένα των μετρήσεων από τον έξυπνο μετρητή μέσω εντολής HTTP Get, και τον MQTT broker HiveMQ, στον οποίο δημοσιεύει τις εντολές όπλισης/αφόπλισης των ηλεκτρονόμων εξόδου του έξυπνου μετρητή και της χειροκίνητης βαθμονόμησης των αισθητηρίων. Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται οι σχετικές παραμετροποιήσεις του Grafana για την επικοινωνία με τις δύο προηγούμενες πηγές.

InfluxDB Details	
Organization	organisation
Token	configured
Default Bucket	Energy_Meter_Data
Min time interval	2
Max series	1000
HTTP	
URL	https://us-east-1-1.aws.cloud2.influxdata.c...
Allowed cookies	New tag (enter key to add)
Timeout	Timeout in seconds

Σχήμα 6.25: Παραμετροποίηση του Grafana για την επικοινωνία με την βάση δεδομένων Energy_Meter_Data της InfluxDB cloud v2.

MQTT broker
Type: MQTT

Settings

Alerting not supported

Name: MQTT broker

Connection

URI: broker.hivemq.com:1883

Authentication

Username:

Password:

Buttons: Delete, Save & test

Σχήμα 6.26: Παραμετροποίηση Grafana για την επικοινωνία με τον εξυπηρετητή HiveMQ.

Το Grafana πρακτικά είναι το τελικό στάδιο αμφίδρομης επικοινωνίας του τελικού χρήστη με τον έξυπνο μετρητή (βλ. σχήμα 6.16). Χρησιμοποιώντας τα εργαλεία του Grafana μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα δεδομένα γραφικά με τη μορφή πινάκων, των οποίων οι τιμές ενημερώνονται ανάλογα με τον επιθυμητό χρόνο ανανέωσης, με τη μορφή χρονογραφημάτων μεταβλητού χρονικού παραθύρου, έχοντας τη δυνατότητα να ανατρέξουμε πίσω στο χρόνο αναζητώντας ιστορικό τιμών, με τη μορφή ραβδογραφημάτων συγκεντρώνοντας για παράδειγμα τις καταναλώσεις σε ημερήσια, εβδομαδιαία ή μηνιαία βάση, και άλλων πολλών οι οποίες παρέχονται ανάμεσα από ένα πλήθος πρόσθετων αντικειμένων (plugins).

Στα στιγμιότυπα που ακολουθούν φαίνονται κάποιες από τις λειτουργίες που έχουν υλοποιηθεί στην πλατφόρμα Grafana.



Σχήμα 6.27: Grafana dashboard – Ένδειξη RMS τιμής φασικών τάσεων σε πραγματικό χρόνο.



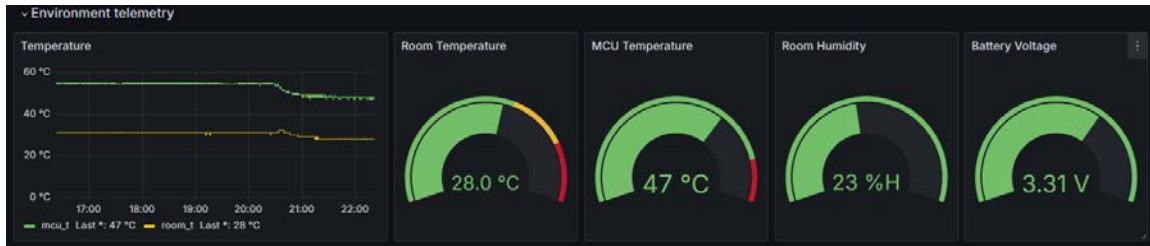
Σχήμα 6.28: Grafana dashboard – Ένδειξη και καταγραφή RMS τιμής φασικής τάσης σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6.29: Grafana dashboard – Ένδειξη και καταγραφή RMS τιμής φασικών τάσεων σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6.30: Grafana dashboard – Ένδειξη και καταγραφή συχνότητας του δικτύου σε πραγματικό χρόνο.



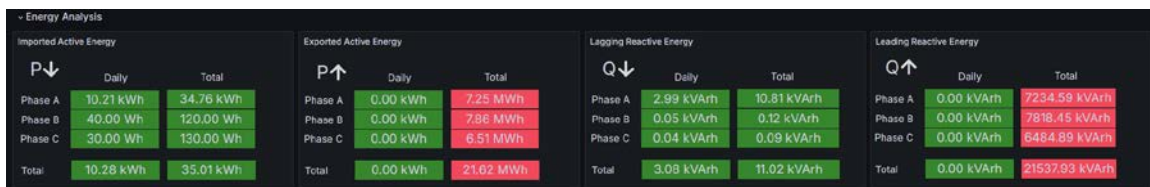
Σχήμα 6.31: Grafana dashboard– Μετρήσεις θερμοκρασίας μικροελεγκτή, θερμοκρασίας και υγρασίας χώρου, τάσης συσσωρευτή RTC σε πραγματικό χρόνο.



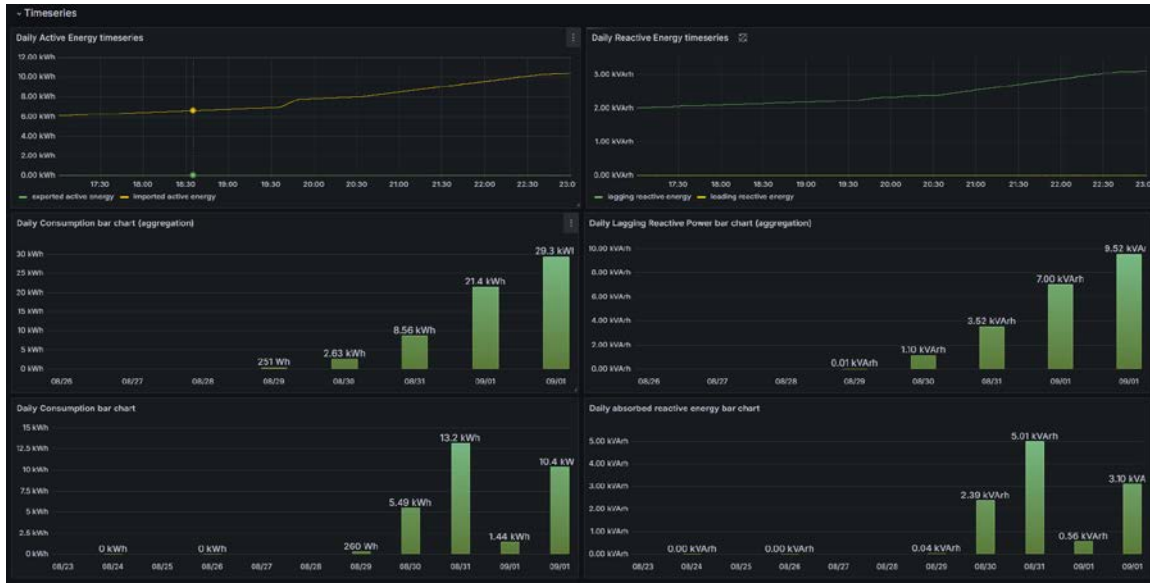
Σχήμα 6.32: Grafana dashboard – Ένδειξη και καταγραφή RMS τιμές ρενιμάτων σε πραγματικό χρόνο.



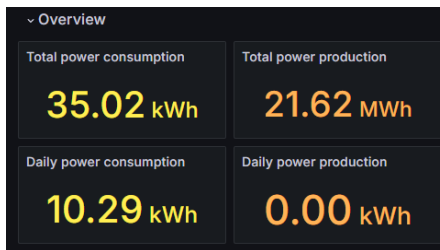
Σχήμα 6.33: Grafana dashboard – Ένδειξη και καταγραφή ανά φάση φαινόμενης, ενεργού, άεργου και συντελεστή ισχύος.



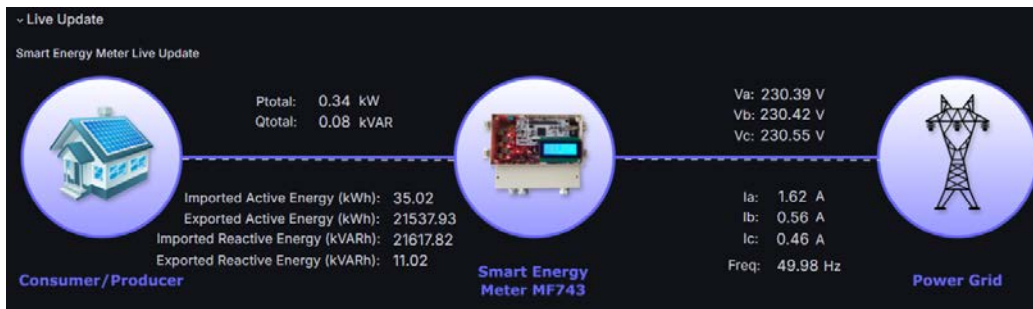
Σχήμα 6.34: Grafana dashboard – Ένδειξη ανά φάση ημερήσιας και συνολικής ενεργού και άεργου ενέργειας (εισερχόμενης και εξερχόμενης).



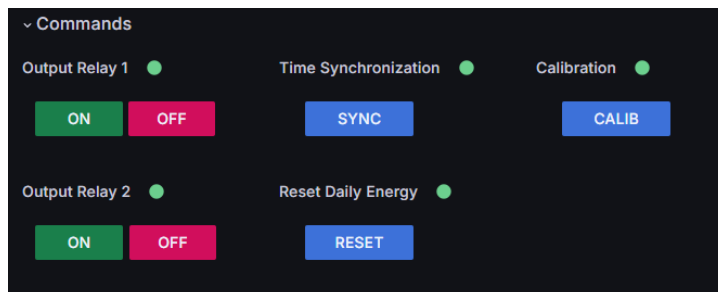
Σχήμα 6.35: Grafana dashboard – Καταγραφή χρονοσειρών ημερήσιας εισερχόμενης ή εξερχόμενης ενεργού και άεργης ενέργειας, ραβδογραφήματα ενέργειας σε ημερήσια και μηνιαία βάση.



Σχήμα 6.36: Grafana dashboard – Ένδειξη ημερήσιας και συνολικής καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενεργού ενέργειας.



Σχήμα 6.37: Grafana dashboard – Ένδειξη ροής ισχύος σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6.38: Grafana dashboard – Εντολές όπλισης ηλεκτρονόμων, χειροκίνητης βαθμονόμησης αισθητηρίων τάσης και ρεύματος, χειροκίνητος συγχρονισμός ημερομηνίας και ώρας και χειροκίνητος μηδενισμός καταχωρητών ημερήσιας ενέργειας έξυπνου μετρητή.

Ενότητα 7^η: Αποτελέσματα, Συμπεράσματα, Μελλοντική έρευνα

7.1 Αποτελέσματα

Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές του έξυπνου μετρητή που κατασκευάστηκε καθώς και το συγκεντρωτικό κόστος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίησή του.

Πίνακας 7.1: Τεχνικές Προδιαγραφές τριφασικού έξυπνου μετρητή MF743

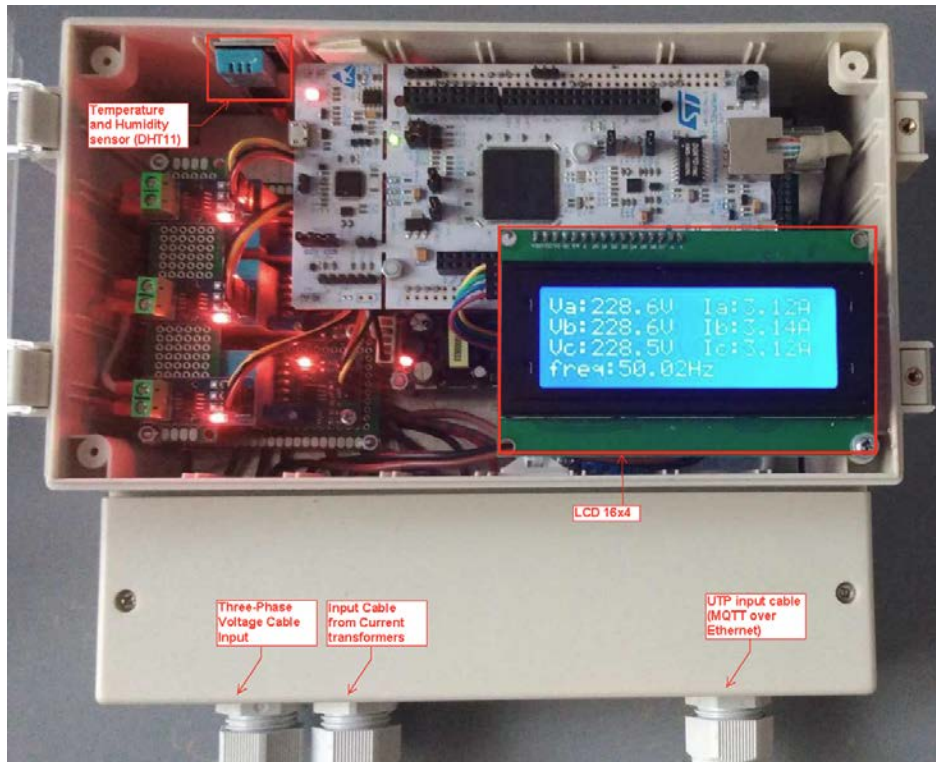
Χαρακτηριστικό ή Συνθήκη	Περιγραφή ή Παράμετρος
Όνομασία μοντέλου	MF743
Έκδοση λογισμικού	V3.1
Τύπος μετρητή	Παράλληλης μέτρησης
Τύπος μέτρησης	Τεσσάρων τεταρτημορίων
Ακρίβεια <ul style="list-style-type: none"> ▪ Τάσης ▪ Ρεύματος ▪ Συχνότητας ▪ Ισχύος ▪ Ενέργειας 	<ul style="list-style-type: none"> ±0,15V ±0,11A ±10mHz ±30W (30VA, 30VAr) 0,01kWh (0,01kVARh)
Εύρος τάσης	90 ~ 250V _{RMS} (φασική)
Εύρος ρεύματος	0 ~ 40A (για CT 40:5A)
Εύρος συχνότητας	47 ~ 53Hz
Σταθερά παραγόμενου παλμού ενέργειας (imp/kWh)	1000
Λειτουργία	V, A, kW, kVAr, kVA, kWh (import/export), kVARh (lead/lag), Hz, ώρα, ημερομηνία
Αισθητήρας τάσης	ZMPT101B
Αισθητήρας ρεύματος	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ACS712-005B ▪ CT 40:5A
Αισθητήρας θερμοκρασίας - υγρασίας	DHT11
Ηλεκτρονόμοι εξόδου	G3MB-202P
Διεπαφή παραγόμενου παλμού ενέργειας	Μπλέ LED
Συχνότητα παραγόμενου παλμού	80ms
Διεπαφές χρήστη	LCD, reset button, τρία LEDs (πράσινο, μπλέ, κόκκινο)
Πρωτόκολλα επικοινωνίας	TCP/IP, MQTT, USART
Εσωτερικός συσσωρευτής	CR2032 3V 200mAh Lithium
Κατανάλωση ενέργειας @ 25°C	1,1W max.
Κλάση μόνωσης ερμαρίου	IP65

Πίνακας 7.2: Συνολικό κόστος υλικού τριφασικού έξυπνου μετρητή MF743

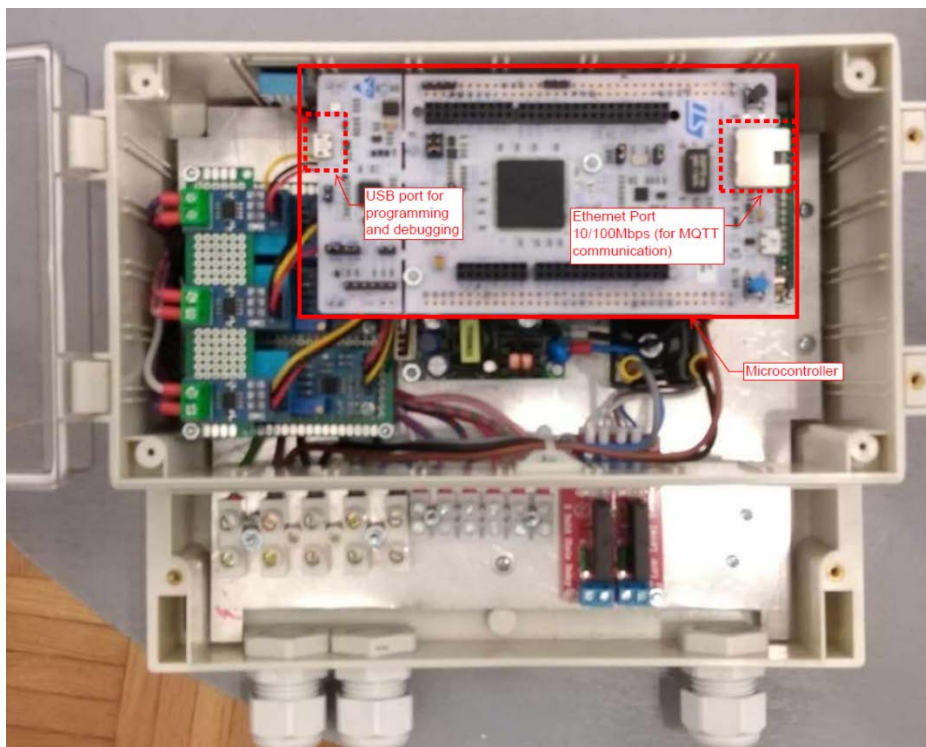
A/A	Περιγραφή υλικού	Κατασκευαστής	Μοντέλο	Ποσότητα	Αξία μονάδας (σε €)	Συνολική αξία (σε €)
1	Αναπτυξιακή πλακέτα με μικροελεγκτή	ST Microelectronics	Nucleo-H743ZI	1	28,00	28,00
2	Αισθητήριο τάσης	Qingxian Zeming Langxi Electronic Co. Ltd	ZMPT101 B	3	8,39	25,17
3	Αισθητήριο ρεύματος 5A	Allegro	ACS712-ELECTR-05B-T	3	2,20	6,60
4	Τροφοδοτικό AC/DC 5V, 1A (4W)	Eshion	YS-U5S5	1	6,50	6,50
5	Αισθητήριο θερμοκρασίας/υγρασίας	Aosong Electronics Co., Ltd	DHT11	1	3,91	3,91
6	Οθόνη υγρών κρυστάλλων LCD με ελεγκτή επικοινωνίας I2C	Shenzhen Eone electronics Co., Ltd	LCD2004A	1	8,00	8,00
7	Ηλεκτρονόμοι τύπου Solid State 5Vdc, 250AC/2A, δύο καναλιών	Omron	G3MP-202P	1	4,43	4,43
8	Πλαστικό ερμάριο 222x128x106mm IP 65	Combiplast	CP-11-24T	1	19,84	19,84
9	Συσσωρευτής CR2032 (3V) με βάση	-	-	1	2,00	2,00
10	Μικροϋλικά (καλώδια, pins, βίδες, ορθοστάτες, ασφάλεια ταχείας κτλ.)	-	-	1	10,00	10,00
					Σύνολο	114,45

Σημειώνεται ότι οι αξίες που περιγράφονται στον πίνακα 7.2 αντιστοιχούν σε αξίες λιανικής πώλησης του υλικού.

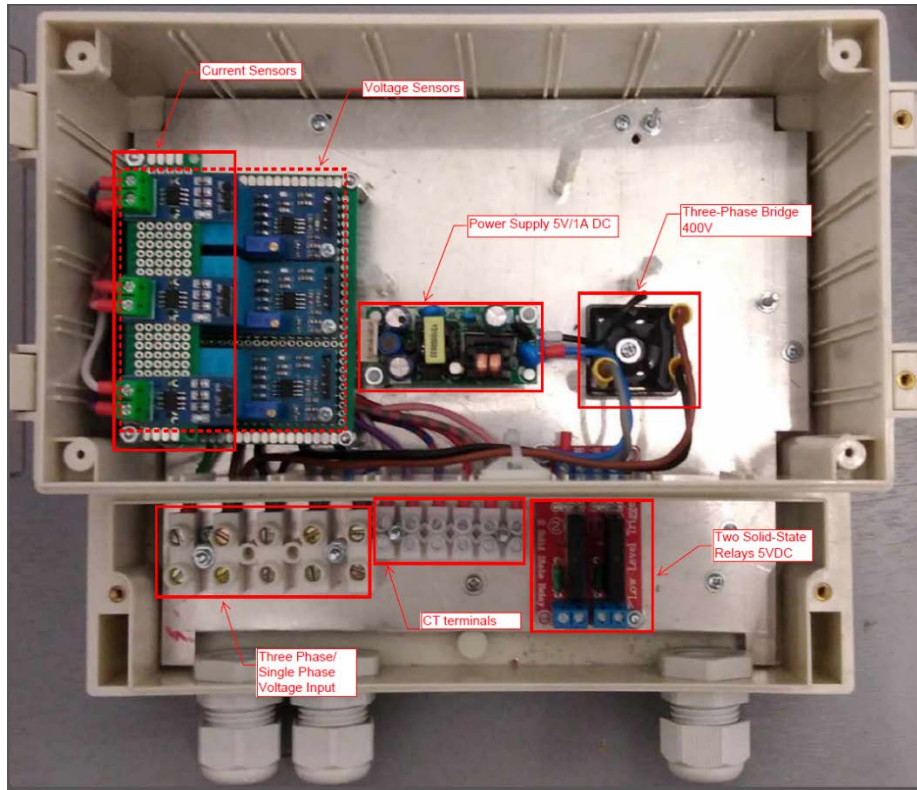
Στις ακόλουθες φωτογραφίες παρουσιάζεται ο τελικός τριφασικός έξυπνος μετρητής που κατασκευάστηκε καθώς και τα στάδια υλοποίησης.



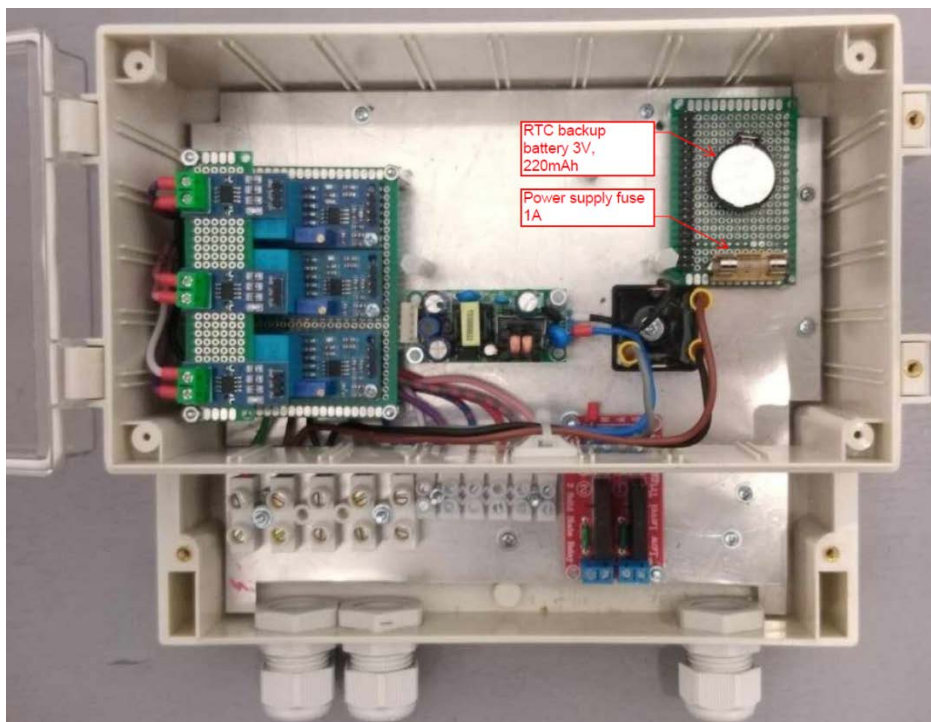
Σχήμα 7.1: Τελική όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας.



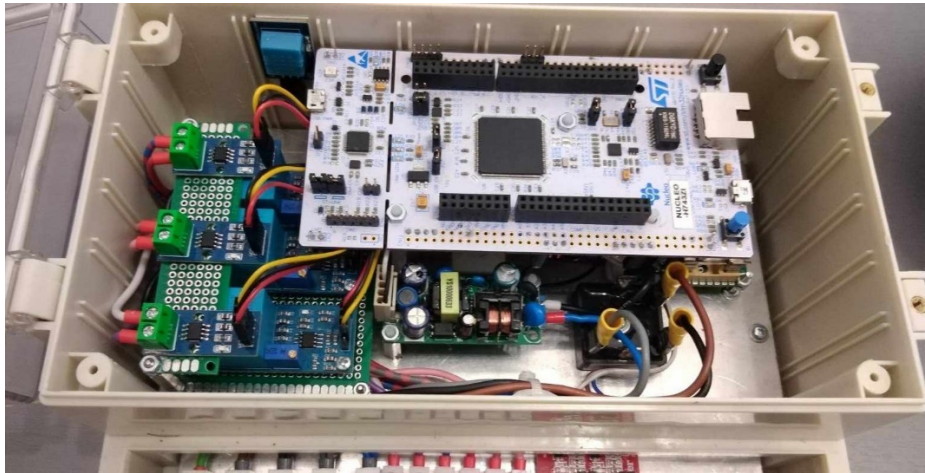
Σχήμα 7.2: Τελική όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας χωρίς την οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD).



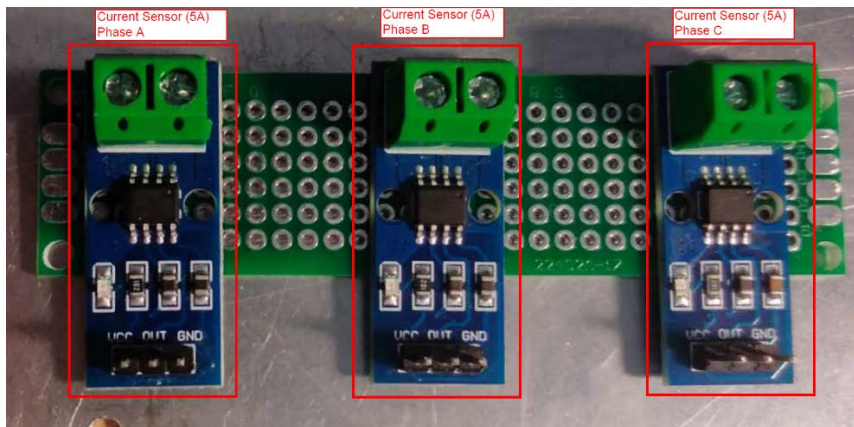
Σχήμα 7.3: Όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας κατά τη διάρκεια κατασκευής.



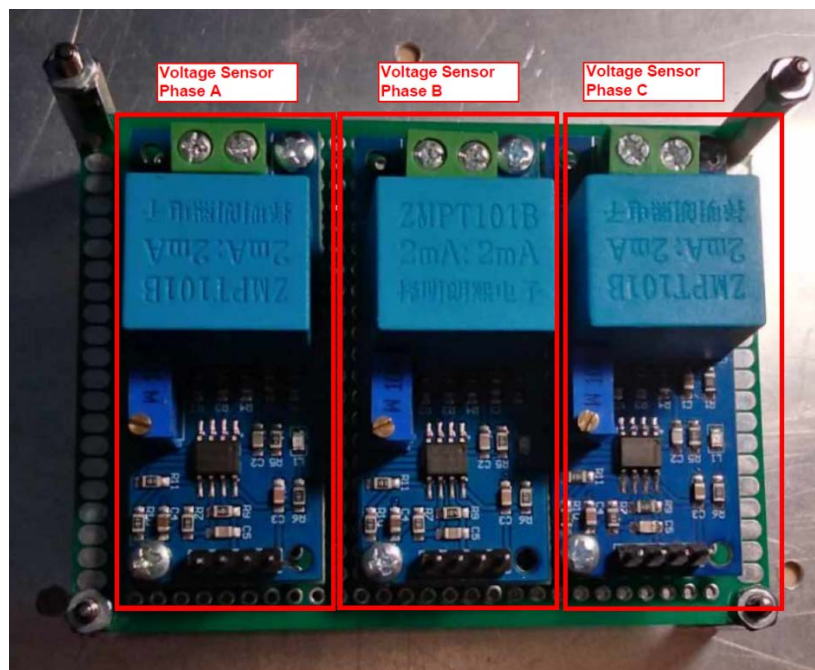
Σχήμα 7.4: Όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας κατά τη διάρκεια κατασκευής (συνέχεια).



Σχήμα 7.5: Όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας κατά τη διάρκεια κατασκευής (συνέχεια).



Σχήμα 7.6: Αισθητήρια ρεύματος ACS712 τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας.



Σχήμα 7.7: Αισθητήρια τάσης ZMPT101B τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας.



Σχήμα 7.8: Όψη τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας κατά τη διάρκεια κατασκευής (συνέχεια).



Σχήμα 7.9: Σταγμιότυπα οθόνης τριφασικού έξυπνου μετρητή.

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μετρητικού συστήματος και της λειτουργίας του έξυπνου μετρητή που υλοποιήθηκε, πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε μονοφασική οικιακή κατανάλωση για διάστημα ενός μήνα. Παράλληλα με τον έξυπνο μετρητή εγκαταστάθηκε στην ίδια κατανάλωση (με ξεχωριστό ΜΕ για τη μέτρηση ρεύματος όμοιων χαρακτηριστικών) πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος και ενέργειας εμπορικού τύπου, ώστε να μπορεί να γίνει κατ' εκτίμηση ποιοτική σύγκριση των μετρήσεων και να εξαχθούν τα σχετικά συμπεράσματα ως προς την καταλληλότητα του έξυπνου μετρητή. Συγκεκριμένα, εγκαταστάθηκε τριφασικός μορφοτροπέας τύπου MT44 του κατασκευαστή Iskra, και ο οποίος χορηγήθηκε στο πλαίσιο δοκιμών από τον υποτομέα Ψηφιακών Συστημάτων Υ/Σ-ΚΥΤ του ΑΔΜΗΕ.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του μορφοτροπέα που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές.

Πίνακας 7.3: Βασικές Τεχνικές Προδιαγραφές τριφασικού μορφοτροπέα Iskra MT440

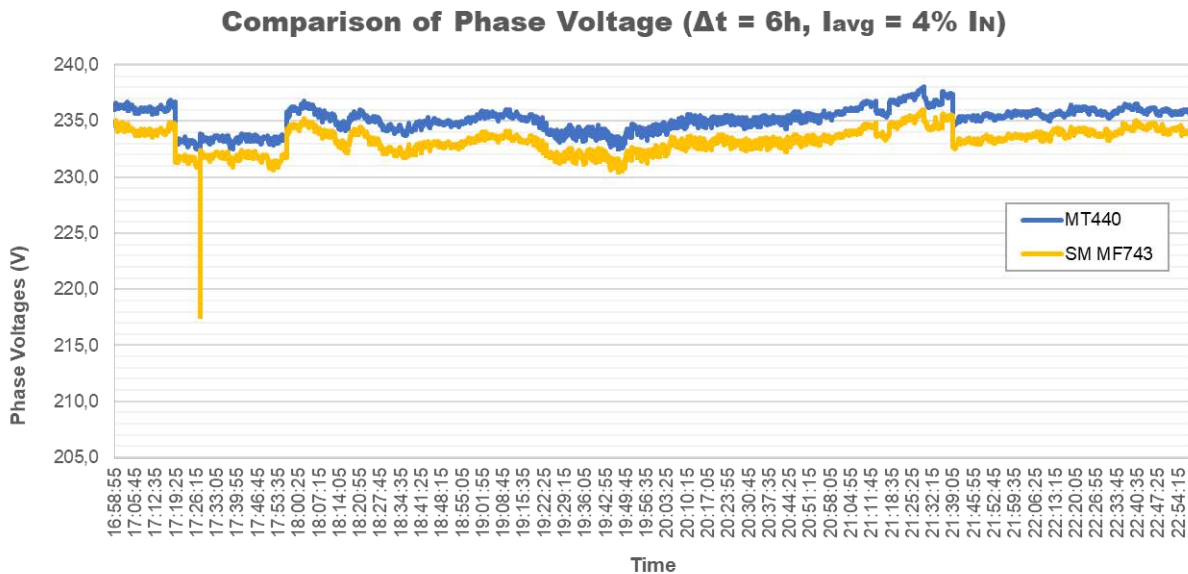
Χαρακτηριστικό ή Συνθήκη	Περιγραφή ή Παράμετρος
Εύρος τάσης	62.5, 125, 250, 500 V _{L-N}
Ονομαστική τάση (U _n)	500 V _{L-N}
Μέγιστη επιτρεπόμενη ονομαστική τάση (συμφ. Με EN 60688)	2 x U _n , 10s
Ονομαστικές τιμές ρεύματος	1, 5, 10A
Ονομαστικό ρεύμα (I _n)	5A
Μέγιστο μετρούμενο ρεύμα	12,5A (ημιτονοειδές)
Μέγιστο θερμικό ρεύμα	15 A συνεχόμενη φόρτιση
Εύρος συχνότητας	16...400Hz
Ακρίβεια <ul style="list-style-type: none"> ▪ Τάσης ▪ Ρεύματος ▪ Συχνότητας ▪ Ισχύος ▪ Συντελεστή ισχύος ▪ Διαφοράς φάσης ▪ Ολικού δείκτη αρμονικών (THD_v, THD_i) ▪ Ενεργής Ενέργειας ▪ Άεργης Ενέργειας 	0,5 0,5 ±10mHz 0,5 0,5 0,5° 0,5 Κλάση 1 Κλάση 2
Διεπαφές χρήστη	USB, RS232, RS485
Πρωτόκολλα επικοινωνίας	Modbus RTU
Κλάση μόνωσης προστατευτικού καλύμματος	IP20
Κλάση προστασίας	II
Εσωτερική κατανάλωση	< 10VA



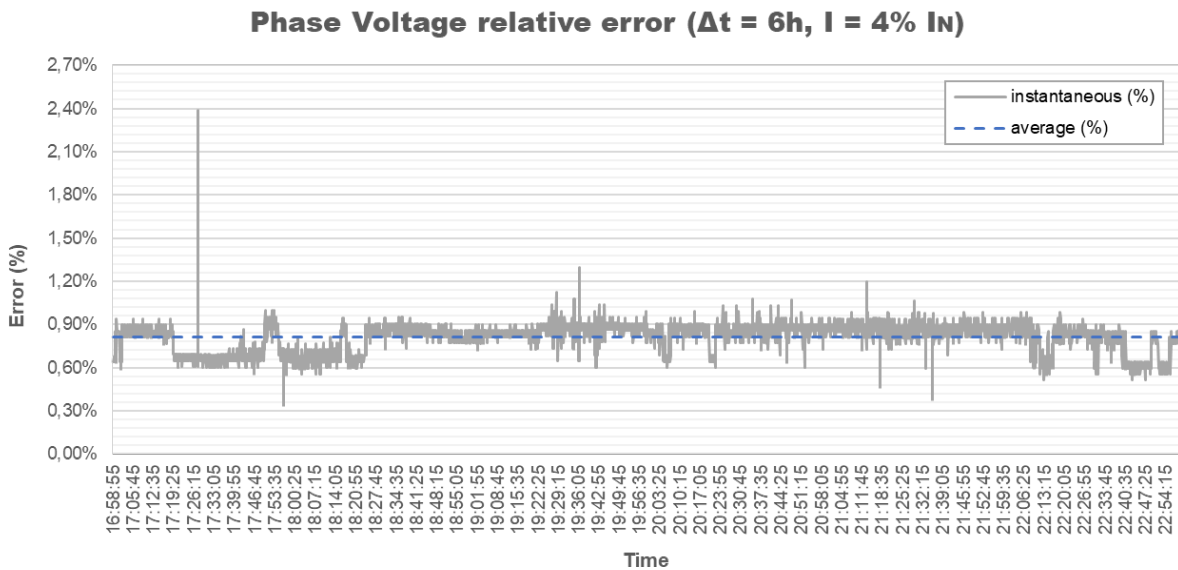
Σχήμα 7.10: Τριφασικός μορφοτροπέας ισχύος Iskra MT440 (πηγή: www.iskra.eu).

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι συγκριτικές καμπύλες των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών των δύο μετρητών καθώς και το σχετικό σφάλμα του έξυπνου μετρητή (συγκριτικά με τον πιστοποιημένο ΜΤ440) σε διαφορετικά επίπεδα φορτίου και χρονικών διαστημάτων.

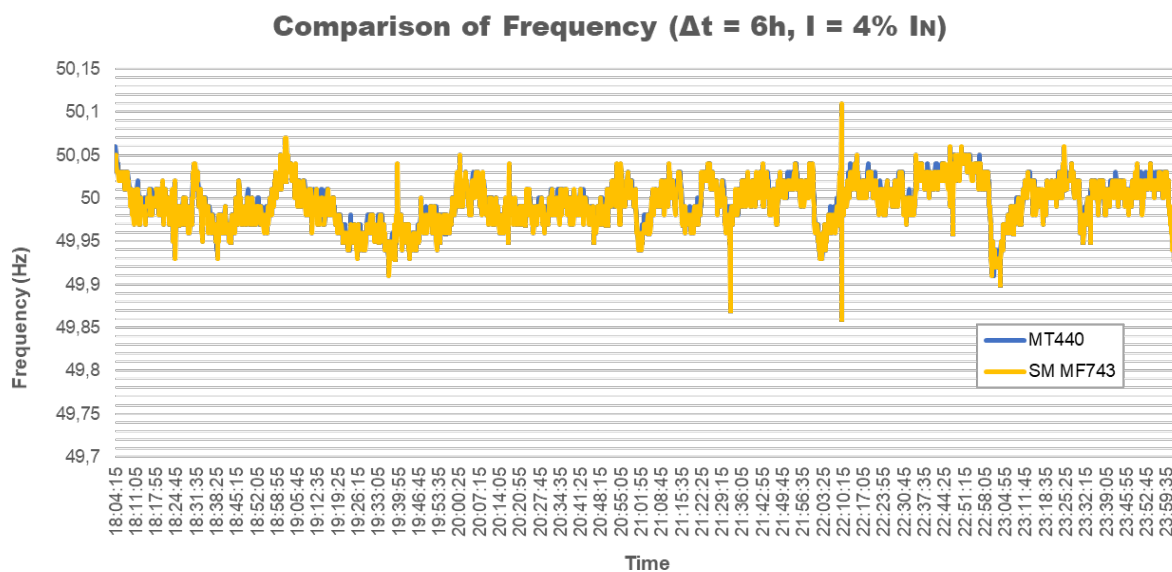
Χρονικό διάστημα: 6 ώρες
Μέσο φορτίο: 4% I_N ωμικό-επαγωγικό ($I_N = 40A$)
Μέση θερμοκρασία χώρου: 30°C



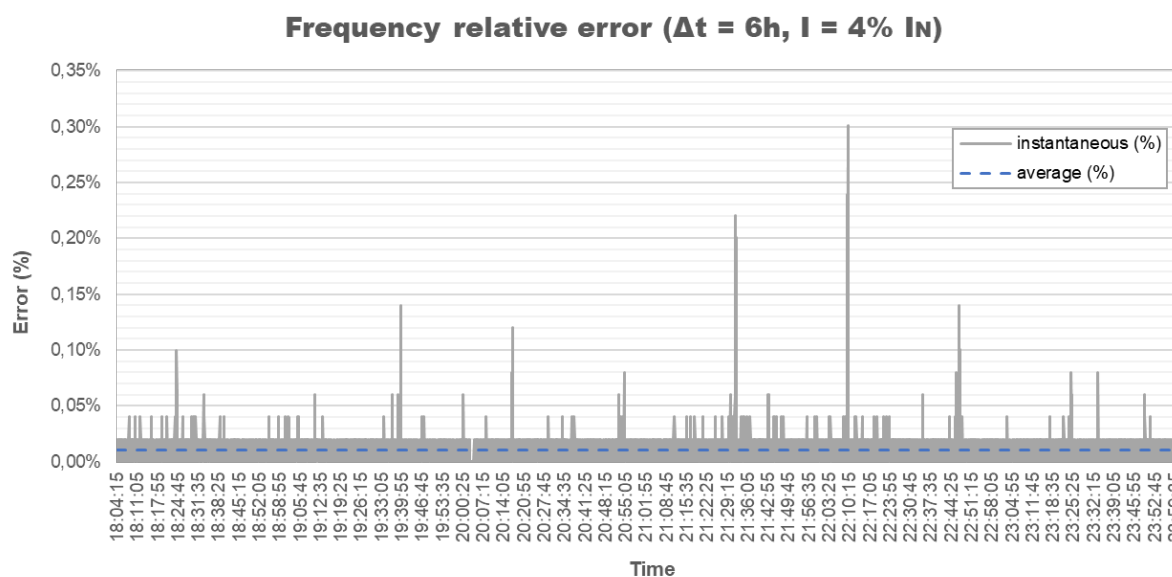
Σχήμα 7.11: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης ενεργού τιμή της φασικής τάσης από τους δύο μετρητές σε χρονικό ορίζοντα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος ΜΤ440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



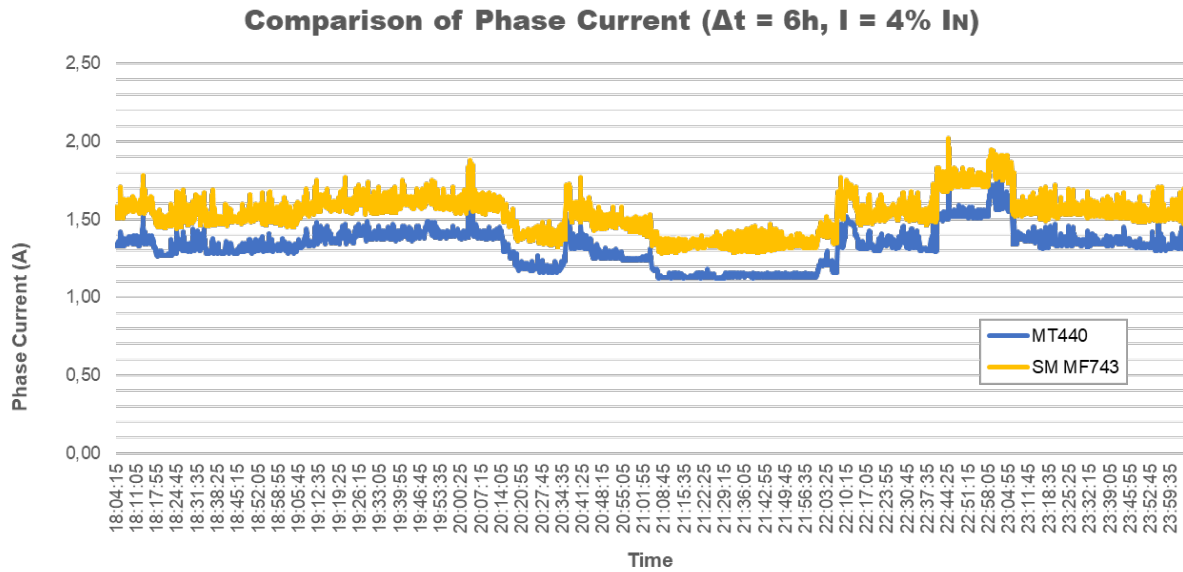
Σχήμα 7.12: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα της ενεργού τιμή της φασικής τάσης που μετρά ο έξυπνος μετρητής σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα ΜΤ440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού (ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος ΜΕ).



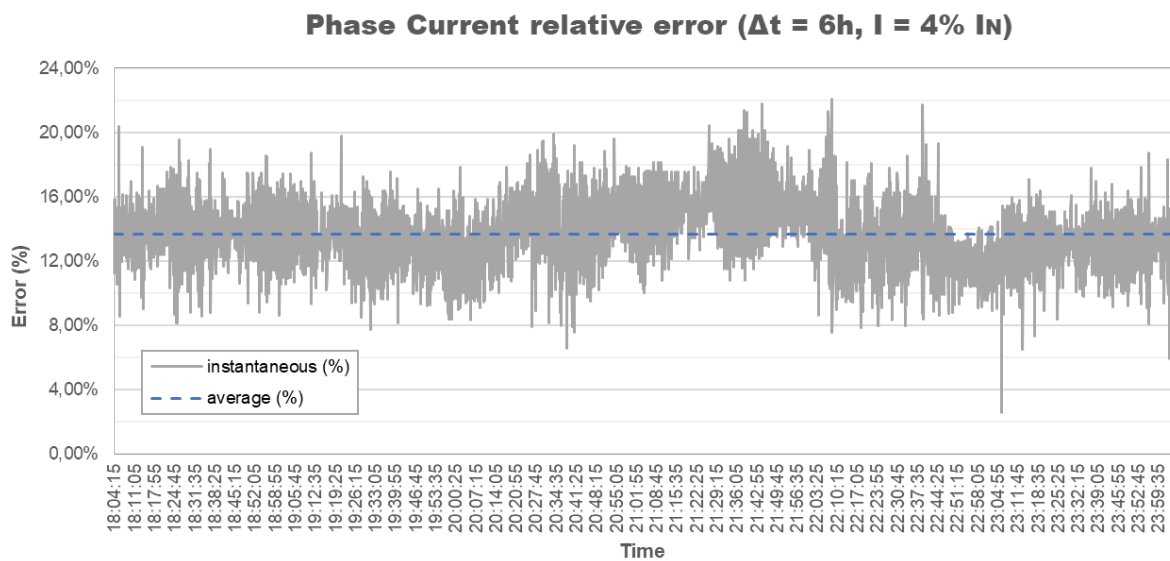
Σχήμα 7.13: Συγκριτικές κωματομορφές της μετρούμενης συχνότητας από τους δύο μετρητές σε χρονικό ορίζοντα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



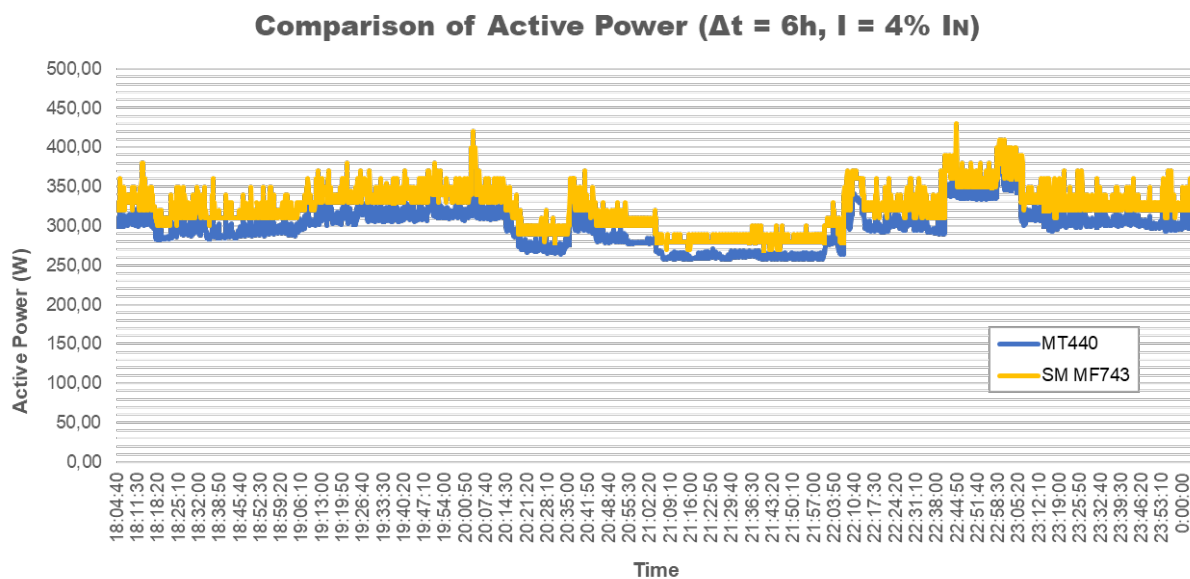
Σχήμα 7.14: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης της συχνότητας του δικτύου από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού.



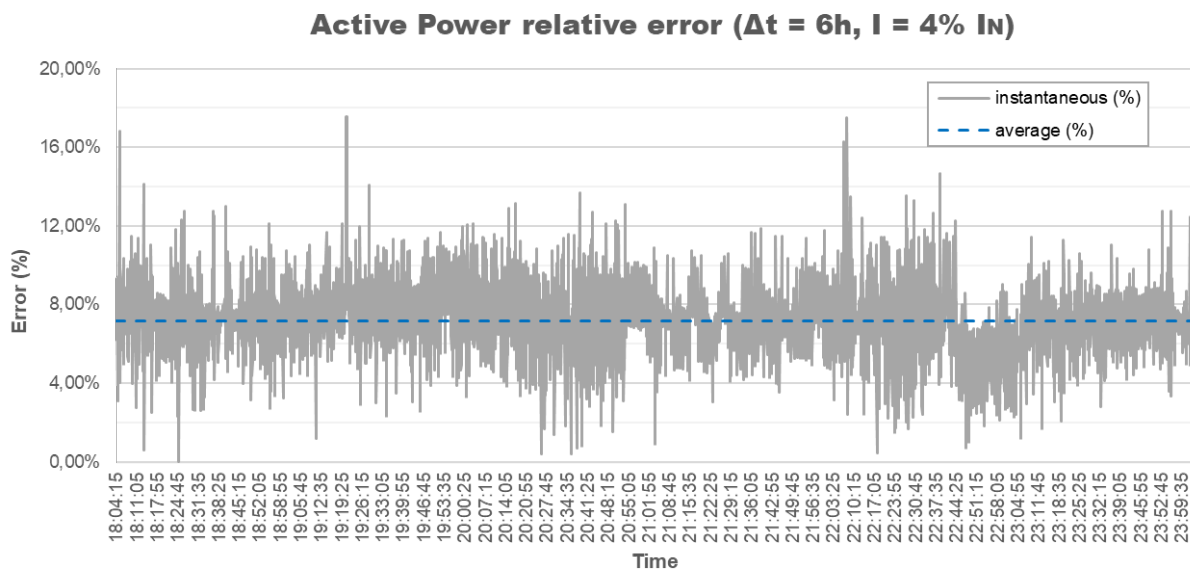
Σχήμα 7.15: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης ενεργού τιμής του φασικού ρεύματος από τους δύο μετρητές σε χρονικό οριζόντιο έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



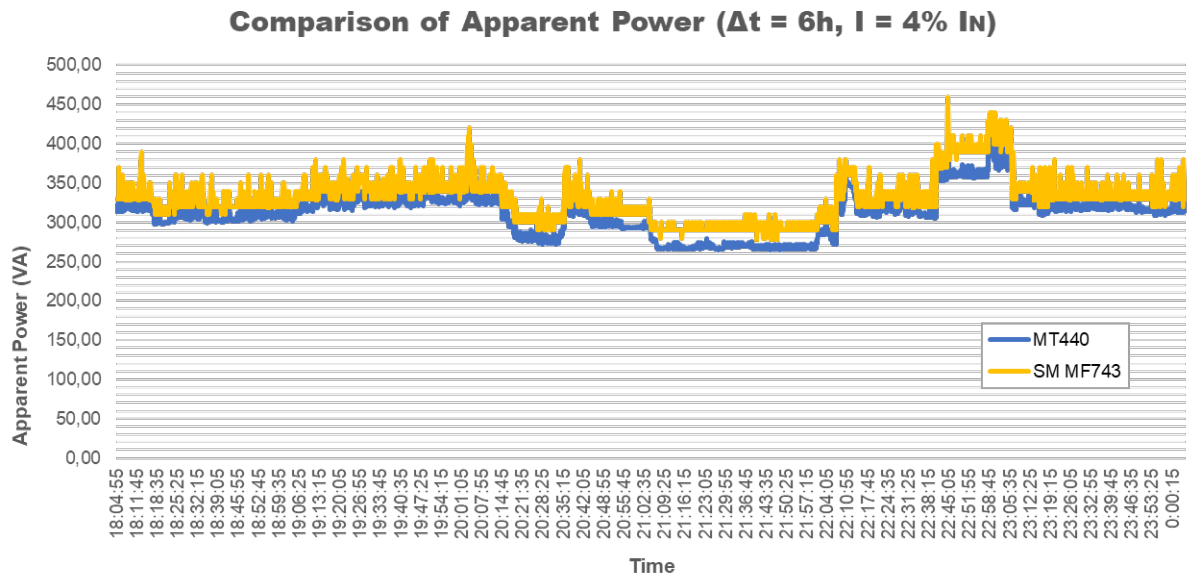
Σχήμα 7.16: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σχετικό μέτρησης ενεργού τιμή του φασικού ρεύματος του έξυπνου μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού.



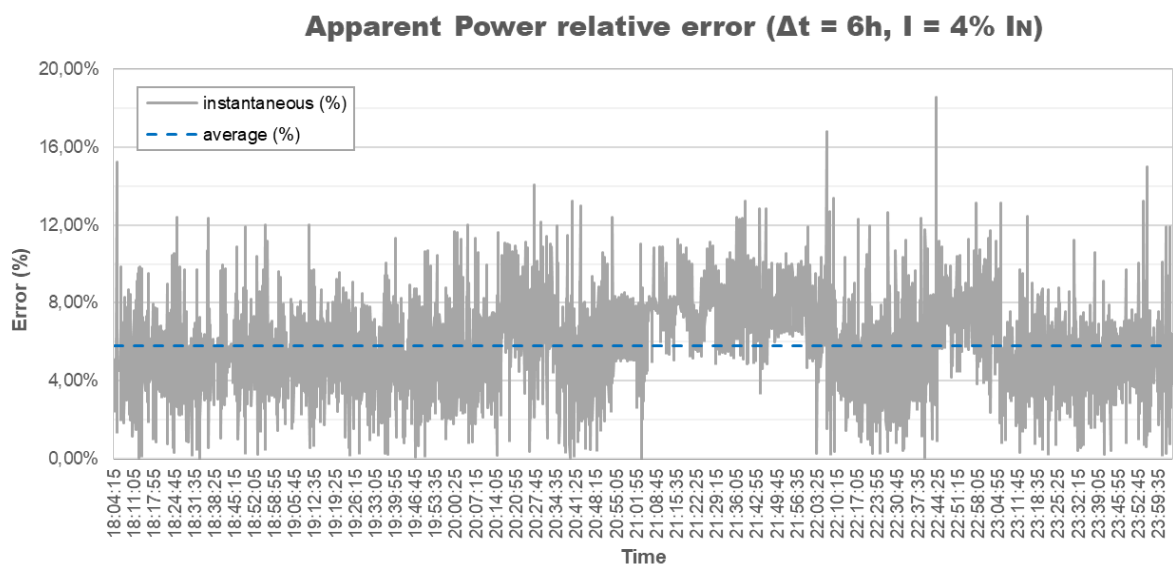
Σχήμα 7.17: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης πραγματικής ισχύος από τους δύο μετρητές σε χρονικό οριζόντιο έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



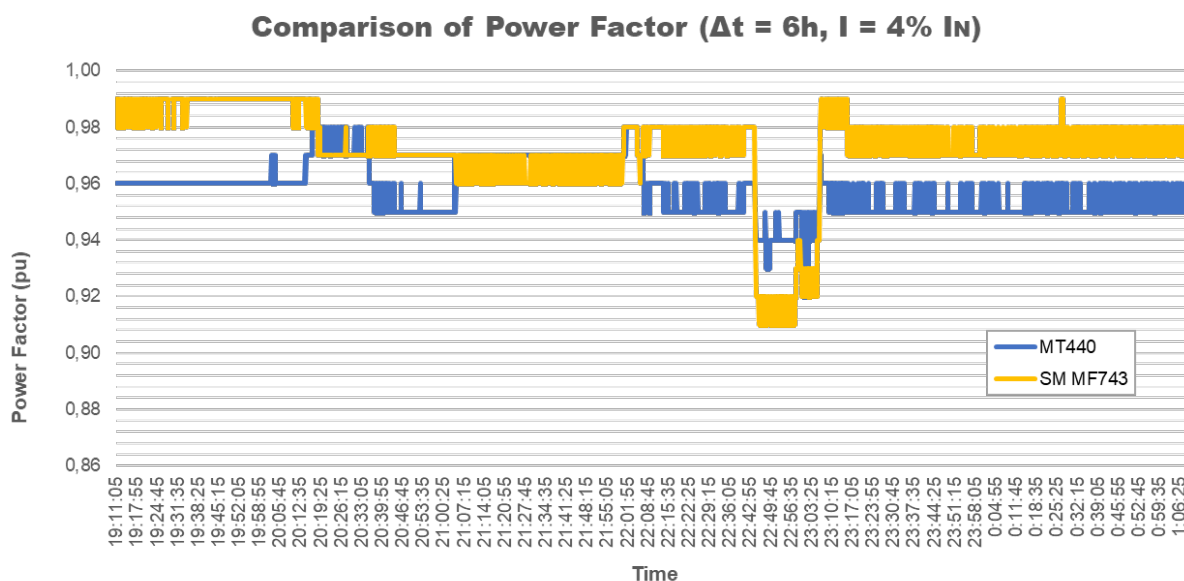
Σχήμα 7.18: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης πραγματικής ισχύος από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού.



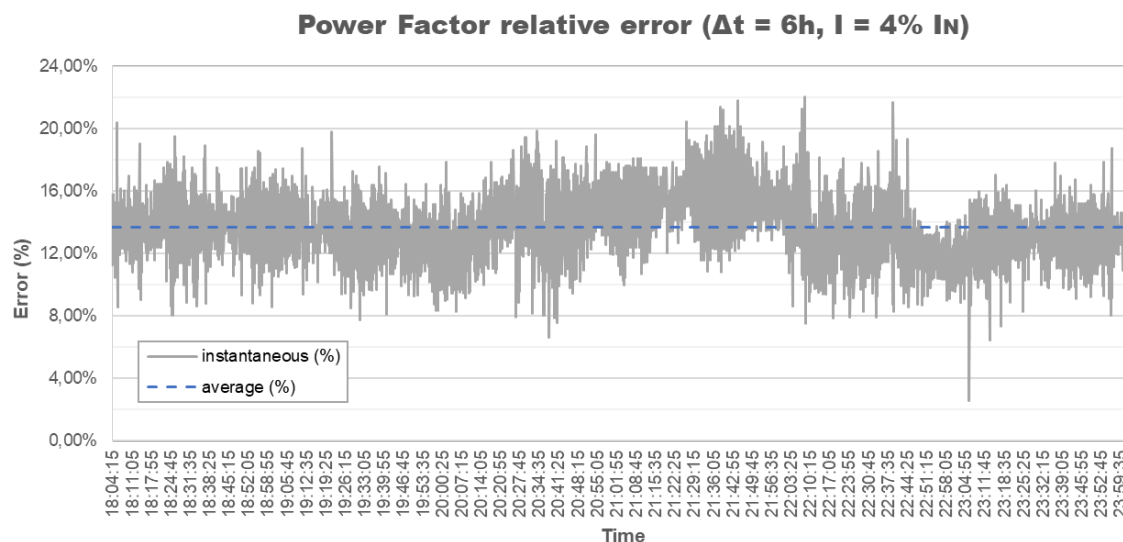
Σχήμα 7.19: Συγκριτικές κωματομορφές μετρούμενης φαινομένης ισχύος από τους δύο μετρητές σε χρονικό ορίζοντα έξι ωρών (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος εξύπνος μετρητής).



Σχήμα 7.20: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης φαινομένης ισχύος από τον εξύπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού.

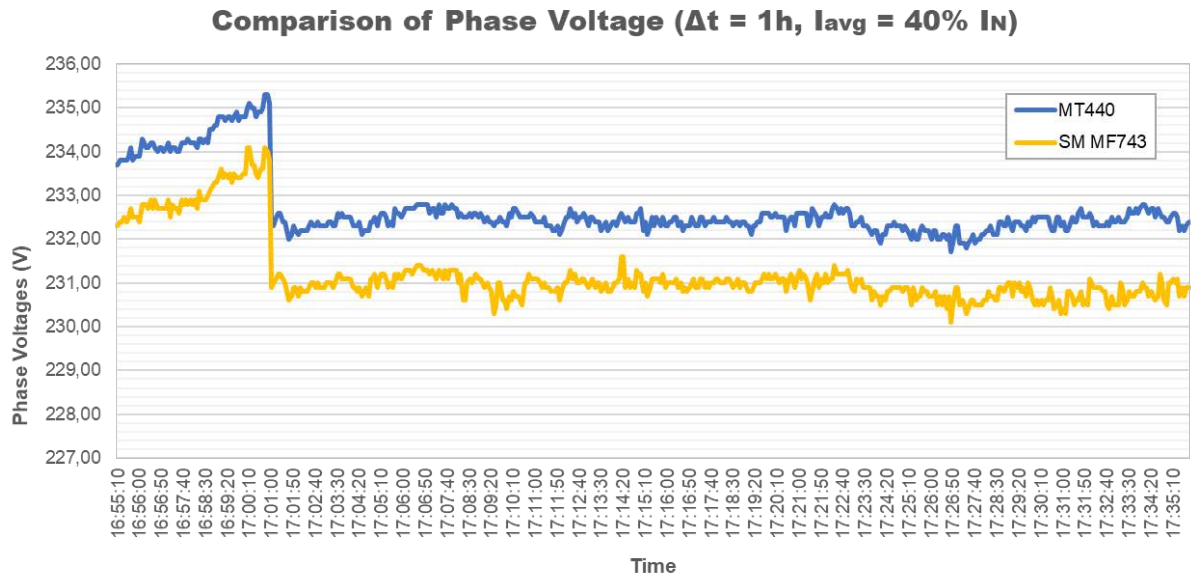


Σχήμα 7.21: Συγκριτικές κυματομορφές του μετρούμενου συντελεστή ισχύος των δύο μετρητών σε χρονικό ορίζοντα έξι ωρών (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής.

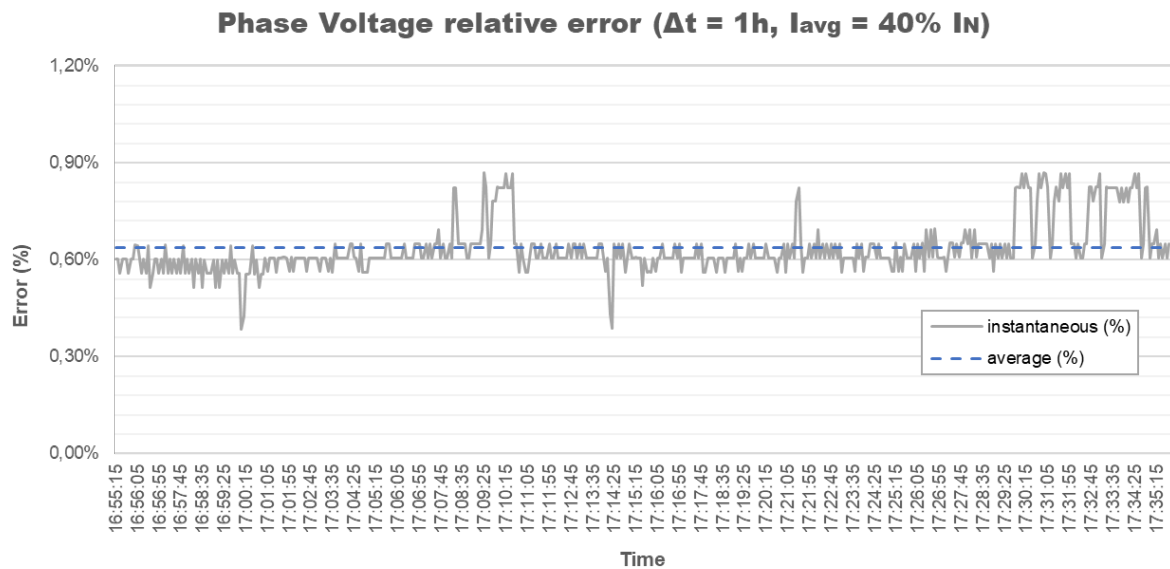


Σχήμα 7.22: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης συντελεστή ισχύος από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα έξι ωρών και φορτίο 4% του ονομαστικού.

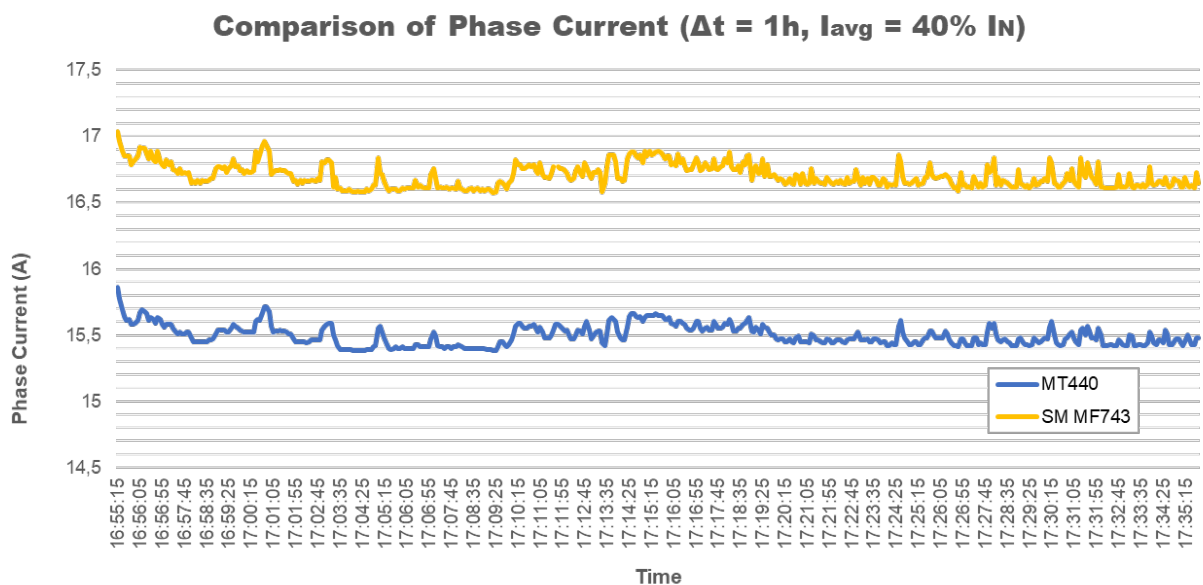
Χρονικό διάστημα: 1 ώρα
 Μέσο φορτίο: 40% I_N ωμικό-επαγωγικό ($I_N = 40A$)
 Μέση θερμοκρασία χώρου: 30°C



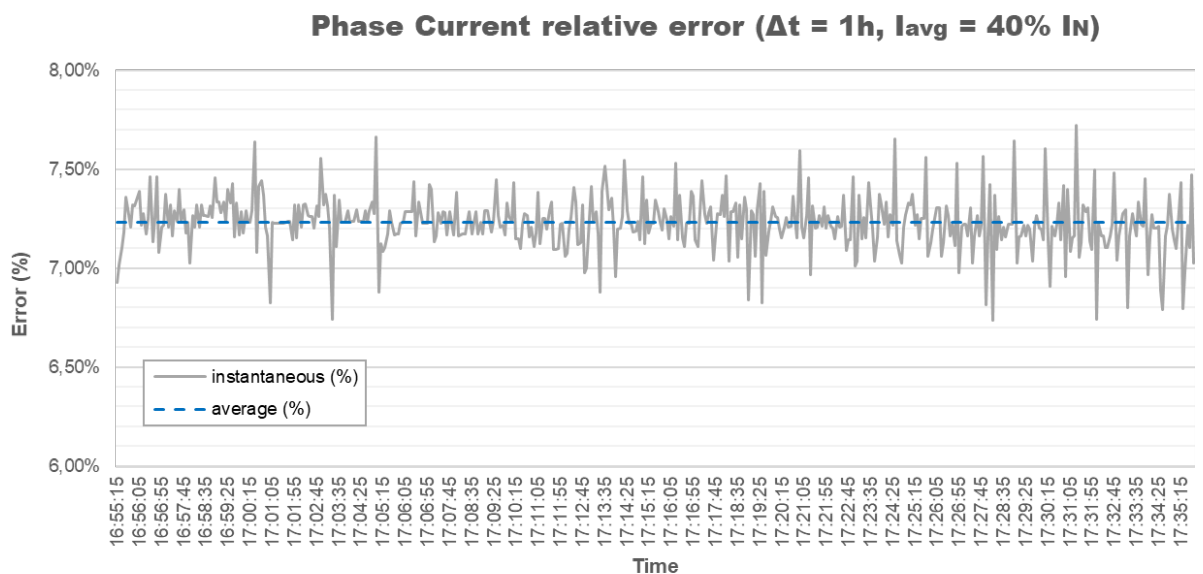
Σχήμα 7.23: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης ενεργού τιμή της φασικής τάσης από τους δύο μετρητές σε χρονικό ορίζοντα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



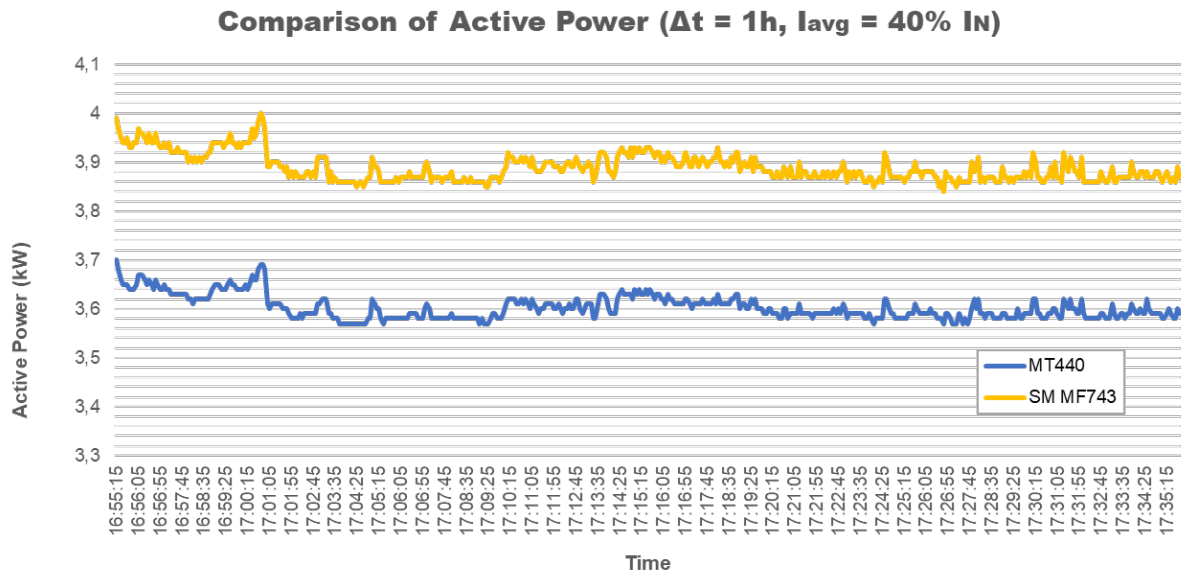
Σχήμα 7.24: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα της ενεργού τιμή της φασικής τάσης που μετρά ο έξυπνος μετρητής σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού (ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος ΜΕ).



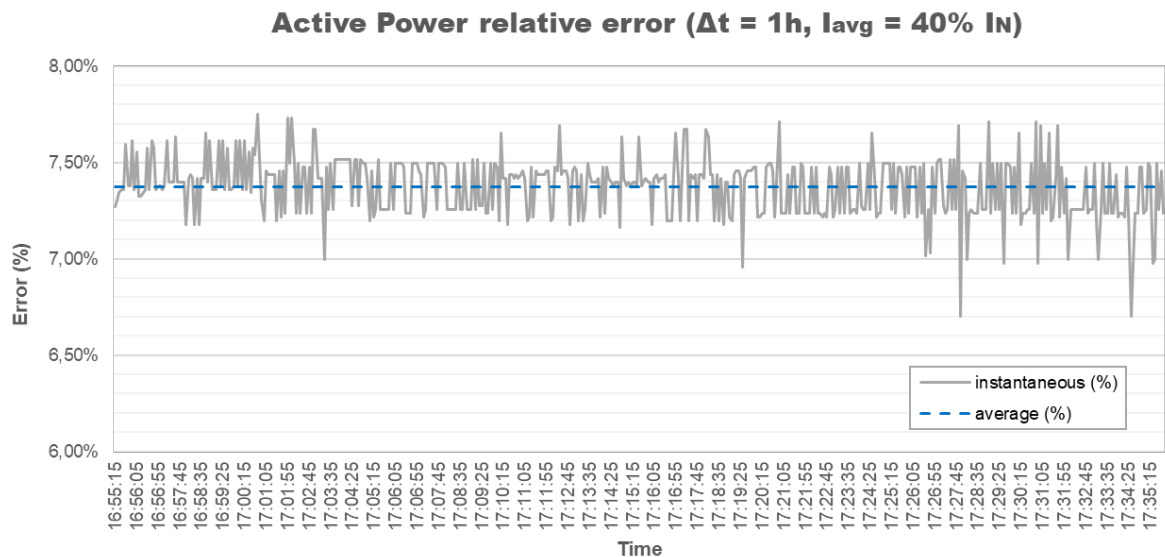
Σχήμα 7.25: Συγκριτικές κωματομορφές της μετρούμενης ενεργού τιμής του φασικού ρεύματος από τους δύο μετρητές σε χρονικό οριζόντιο μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



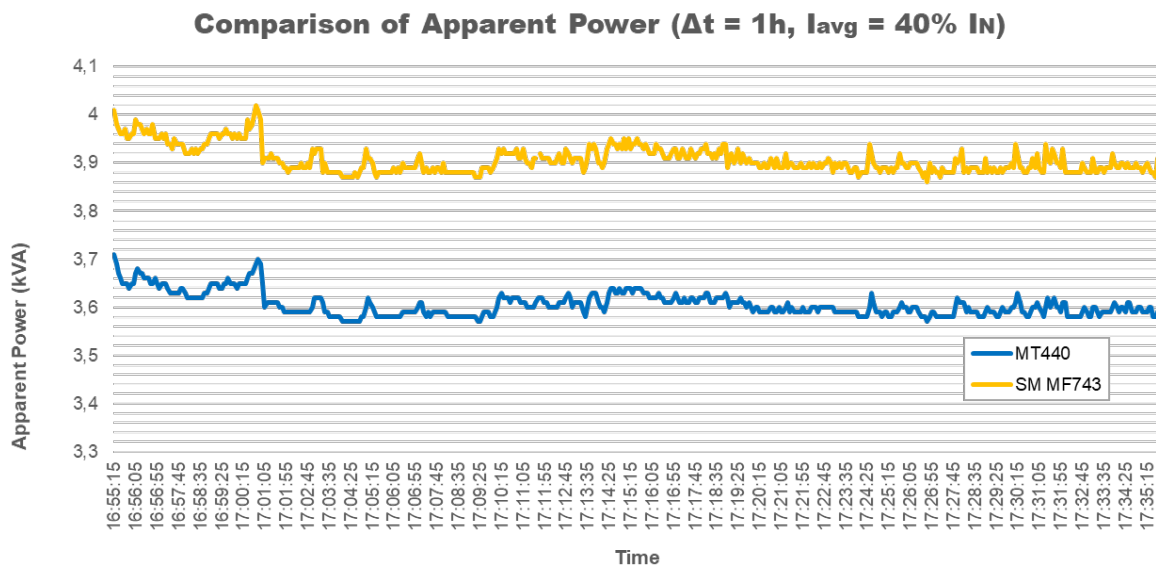
Σχήμα 7.26: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης ενεργού τιμή του φασικού ρεύματος του έξυπνου μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού.



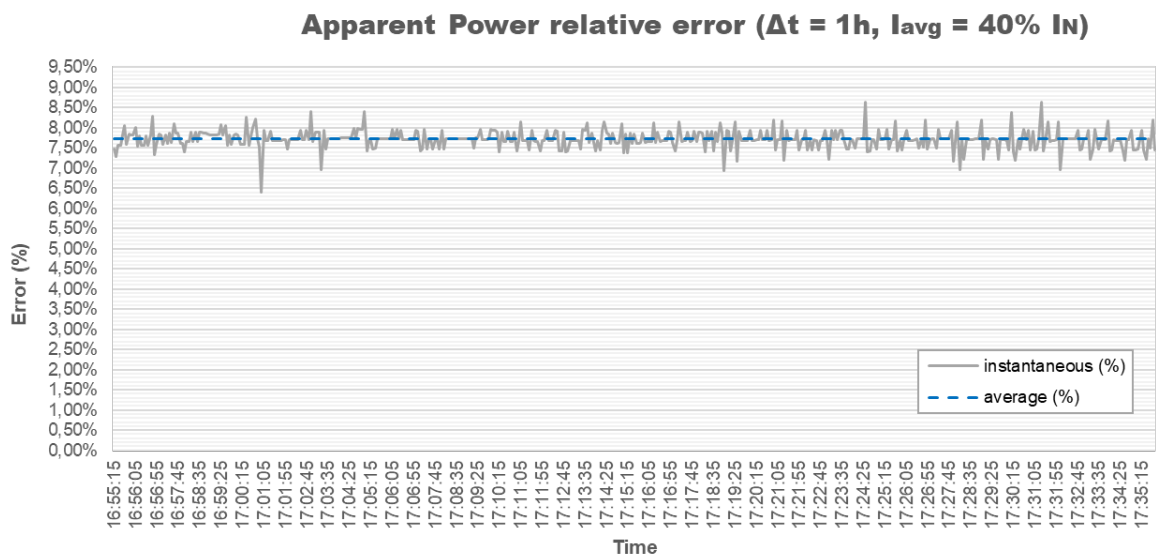
Σχήμα 7.27: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης πραγματικής ισχύος από τους δύο μετρητές σε χρονικό ορίζοντα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος ΜΤ440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



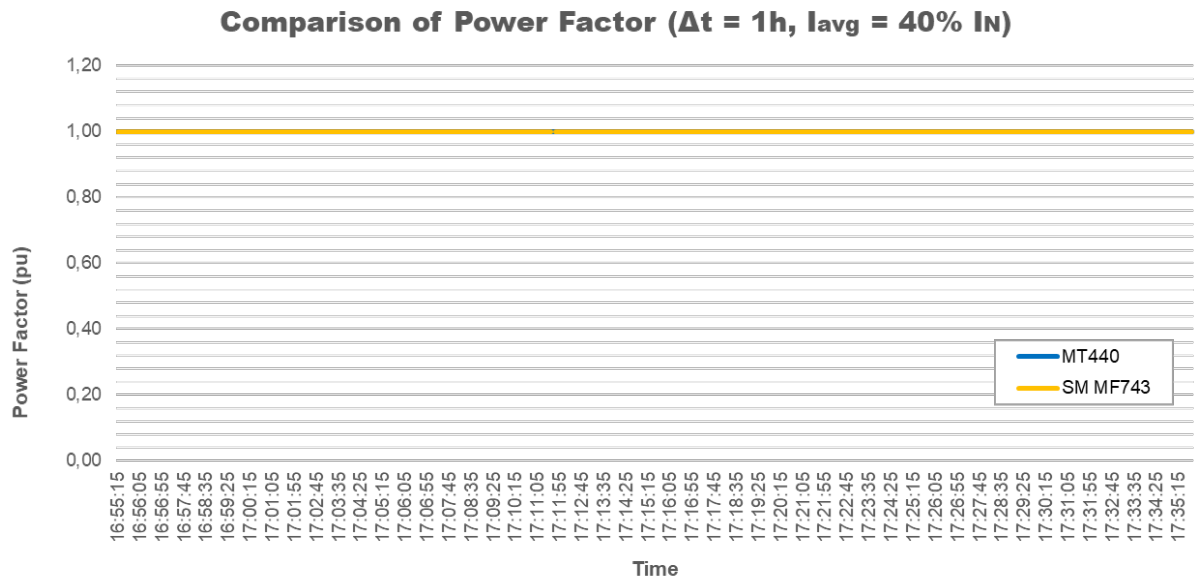
Σχήμα 7.28: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης πραγματικής ισχύος από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα ΜΤ440, για χρονικό διάστημα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού.



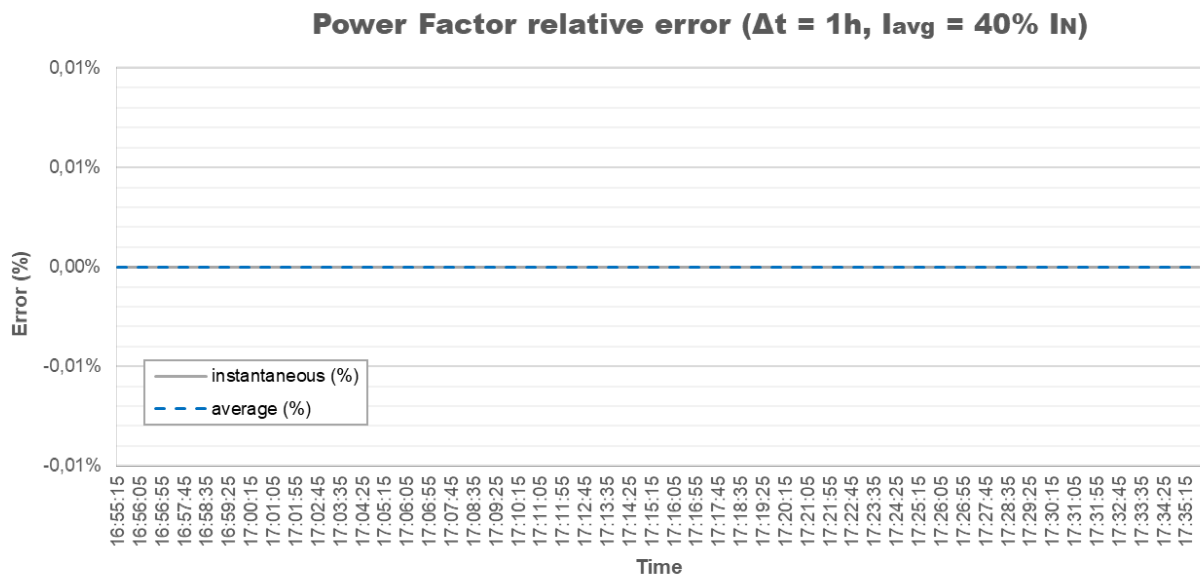
Σχήμα 7.29: Συγκριτικές κυματομορφές της μετρούμενης φαινομένης ισχύος από τους δύο μετρητές σε χρονικό οριζόντιο μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής).



Σχήμα 7.30: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης φαινομένης ισχύος από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού.



Σχήμα 7.31: Συγκριτικές κυματομορφές του μετρούμενου συντελεστή ισχύος των δύο μετρητών σε χρονικό ορίζοντα έξι ωρών (μπλέ χρώμα: πιστοποιημένος μορφοτροπέας ισχύος MT440, κίτρινο χρώμα: υλοποιημένος έξυπνος μετρητής.



Σχήμα 7.32: Σχετικό στιγμιαίο και μέσο σφάλμα μέτρησης συντελεστή ισχύος από τον έξυπνο μετρητή σε σχέση με τον πιστοποιημένο μορφοτροπέα MT440, για χρονικό διάστημα μίας ώρας και φορτίο 40% του ονομαστικού.

Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται συγκεντρωτικά τα εκτιμώμενα σφάλματα του έξυπνου μετρητή SM MF743 (συγκριτικά με τον MT440) για τις δύο προηγούμενες περιόδους καθώς και οι εκτιμώμενες διακυμάνσεις των στιγμιαίων μετρήσεων των δύο μετρητών.

Πίνακας 7.4: Εκτιμώμενα σφάλματα έξυπνου μετρητή SM MF743 συγκριτικά με τον MT440

A/A	Μέτρηση	Φορτίο: $I_{avg} = 4\% I_N$ Μέση θερμοκρασία = 31°C		Φορτίο: $I_{avg} = 40\% I_N$ Μέση θερμοκρασία = 30°C	
		Διάρκεια καταγραφής (Ωρες)	Μέσο σχετικό σφάλμα	Διάρκεια καταγραφής (Ωρες)	Μέσο σχετικό σφάλμα
1	Τάση	6	0,81%	1	0,64%
2	Ρεύμα	6	13,67%	1	7,52%
3	Συχνότητα	6	0,01%	1	0,01%
4	Πραγματική Ισχύς	6	7,18%	1	7,44%
5	Φαινομένη Ισχύς	6	5,80%	1	7,98%
6	Συντελεστής Ισχύος	6	2,03%	1	0,05%
7	Κατανάλωση	6	4,80%	1	6,56%

Πίνακας 7.5: Εκτιμώμενες διακυμάνσεις στιγμιαίων μετρήσεων μεταξύ των δύο μετρητών

A/A	Μέτρηση	Φορτίο: $I_{avg} = 4\% I_N$ Μέση θερμοκρασία = 31°C		Φορτίο: $I_{avg} = 40\% I_N$ Μέση θερμοκρασία = 30°C	
		MT440	SM MF743	MT440	SM MF743
1	Τάση	±0,19V	±0,15V	±0,10V	±0,14V
2	Ρεύμα	±0,01A	±0,11A	±0,03A	±0,04A
3	Συχνότητα	±0,01Hz	±0,01Hz	±0,01Hz	±0,01Hz
4	Πραγματική Ισχύς	±4,33W	±6,61W	±0,01kW	±0,03kW
5	Άεργος Ισχύς	-	±3,51VAR	-	±1,38VAR
6	Φαινομένη Ισχύς	±3,28VA	±6,39VA	±0,02kVA	±0,03kVA
7	Συντελεστής Ισχύος	±0,001	±0,003	0	0

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στα σχήματα 7.11 έως 7.32 αντλήθηκαν από την ψηφιακή πλατφόρμα Grafana που έχει υλοποιηθεί και στην οποία έχει προστεθεί ο μετρητής Iskra MT440 για τις ανάγκες σύγκρισης των μετρήσεων με τον έξυπνο μετρητή που υλοποιήθηκε (SM MF743). Ο μετρητής Iskra MT440 στέλνει τα δεδομένα των μετρήσεων μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας Modbus RTU (Modbus TCP). Σημειώνεται ότι δεν εξετάζεται η συμπεριφορά της αέργου ισχύος καθώς ο μετρητής Iskra MT440 δεν στέλνει σωστά τα συγκεκριμένα δεδομένα μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που χρησιμοποιεί (Modbus RTU), συνεπώς δεν κατέστη δυνατή η σύγκριση.

Τονίζεται ότι τα αποτελέσματα που έχουν συγκεντρωθεί στους πίνακες 7.4 και 7.5 αποτελούν μία απλή εκτίμηση της συμπεριφοράς του έξυπνου μετρητή ως προς τα μετρούμενα μεγέθη σε σχέση με

έναν εμπορικό μετρητή ενέργειας. Σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς ούτε ο μετρητής Iskra MT440 είναι πρότυπος (πρόσφατα βαθμονομημένος από πιστοποιημένο φορέα) αλλά ούτε και η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε (συχνότητα λήψης δεδομένων ανά 5 δευτερόλεπτα, θερμοκρασία εντός του έξυπνου μετρητή $>25^{\circ}\text{C}$ κτλ.) ευθυγραμμίζεται με τις διαδικασίες δοκιμών που ορίζονται στα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα.

7.2 Συμπεράσματα

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην προηγούμενη παράγραφο, παρατηρείται ότι το μετρητικό σύστημα του έξυπνου μετρητή που υλοποιήθηκε (SM MF743) ανταποκρίνεται στις αρχικές απαιτήσεις υλοποίησης, ενώ παρότι εμφανίζει αποκλίσεις από μία μετρητική συσκευή εμπορικού τύπου (Iskra MT440), ωστόσο το συνολικό αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό. Πιο συγκεκριμένα, το σφάλμα στην μέτρηση της φασικής τάσης κυμαίνεται από 0,64% έως 0,81% ανάλογα με το φορτίο, ενώ το σφάλμα στη μέτρηση της συχνότητας κρίνεται αμελητέο (βλ. σχήμα 7.13 και 7.14) για οποιοδήποτε φορτίο. Γενικά τα σφάλματα στα χαμηλότερα φορτία είναι εν γέννη μικρότερα απ' ότι στα υψηλότερα φορτία. Για παράδειγμα το σφάλμα στην μέτρηση της ενεργού τιμής της έντασης του ρεύματος σε χαμηλό φορτίο είναι περίπου 14% (για φορτίο ίσο με το 4% περίπου του ονομαστικού) ενώ σε υψηλότερο εκτιμάται περίπου 7,52% (για φορτίο ίσο με το 40% περίπου του ονομαστικού). Η διαφορά που παρουσιάζεται στην μέτρηση του ρεύματος μπορεί να οφείλεται στην μείωση της ακρίβειας του ΜΕ δεδομένου ότι το πρωτεύον τύλιγμα φορτίζεται με ρεύμα αρκετά μικρότερο του ονομαστικού (4%), στο σφάλμα του ίδιου του ΜΕ (βλ. παράγραφο 5.10) αλλά και στην ύπαρξη πιθανού θορύβου ο οποίος μπορεί να συνυπάρχει με το σήμα του ρεύματος που μεταφέρεται από το αισθητήριο προς τον μικροελεγκτή και παρόλο που έχουν ληφθεί μέτρα εξάλειψής του (φίλτρα στην έξοδο του αισθητηρίου ρεύματος, υλοποίηση αλγορίθμου υπερδειγματοληψίας κατά την διαδικασία Α/Δ μετατροπής) να παραμένει ένα ποσοστό το οποίο να εμφανίζει πλάτος συγκρίσιμο με αυτό του ρεύματος. Από την άλλη πλευρά οι μετρήσεις ισχύος και ενέργειας εμφανίζουν μία σταθερότητα.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη και υλοποίηση ενός τριφασικού έξυπνου μετρητή ενέργειας, με έμφαση στην ακρίβεια μέτρησης, το κόστος και τη λειτουργικότητά του. Μέσω της κατασκευής και της δοκιμής του μετρητή, διαπιστώθηκε ότι η συσκευή πληροί τις αναμενόμενες προδιαγραφές, επιτυγχάνοντας αξιόπιστες μετρήσεις ενεργού και άεργου ενέργειας σε πραγματικές συνθήκες. Η ψηφιακή πλατφόρμα, από την άλλη πλευρά, παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση για τη συλλογή, αποθήκευση και οπτικοποίηση των δεδομένων, ενσωματώνοντας σύγχρονα εργαλεία όπως το Grafana για την παρακολούθηση και ανάλυση των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα της αρχιτεκτονικής και των επιλεγμένων εξαρτημάτων, ενώ παράλληλα υποδεικνύουν δυνατότητες για περαιτέρω βελτιώσεις, ειδικά στον τομέα της βελτίωσης της ακρίβειας και της επέκτασης των δυνατοτήτων παρακολούθησης. Γενικά, θα λέγαμε ότι η εργασία επιτυγχάνει το συνδυασμό υλικού και λογισμικού για την ανάπτυξη αποδοτικών και καινοτόμων λύσεων στον τομέα της ενεργειακής διαχείρισης.

7.3 Προτεινόμενες βελτιώσεις

Παρακάτω ακολουθούν κάποιες προτάσεις βελτίωσης της συνολικής υλοποίησης (έξυπνου μετρητή και ψηφιακής πλατφόρμας) κατόπιν των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Ακρίβεια Μετρήσεων και Δοκιμές Αξιοπιστίας: Η εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί σε πιο λεπτομερείς αναλύσεις σχετικά με την ακρίβεια των μετρήσεων και τις πιθανές αποκλίσεις που μπορεί να προκύψουν υπό διάφορες συνθήκες (π.χ. θόρυβος γραμμής, αλλαγές θερμοκρασίας). Η αξιοπιστία των μετρήσεων θα μπορούσε να επαληθευτεί μέσω περισσότερων δοκιμών σε διαφορετικά περιβάλλοντα (διαφορετικά φορτία, περιβαλλοντικές συνθήκες κλπ.).

Ασφάλεια Δεδομένων και Προστασία Προσωπικών Δεδομένων: Μια σημαντική βελτίωση θα ήταν η ανάλυση των κινδύνων που αφορούν την ασφάλεια δεδομένων και την προστασία προσωπικών δεδομένων κατά τη μετάδοση πληροφοριών μέσω του ΙοΤ (μέσω των πρωτοκόλλων επικοινωνίας MQTT και HTTP). Κατά τον σχεδιασμό θα μπορούσαν να εξετασθούν στρατηγικές για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων, όπως η κρυπτογράφηση δεδομένων και η εφαρμογή πρωτοκόλλων ασφαλείας (SSL/TLS, HTTPS).

Ευελξία και Επεκτασιμότητα του Συστήματος: Η δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος για την υποστήριξη πρόσθετων λειτουργιών ή τη χρήση του σε διαφορετικά είδη παροχών (π.χ. διαφορετικά επίπεδα τάσης) θα μπορούσε να αναπτυχθεί περισσότερο. Επίσης, η εργασία θα μπορούσε να εξετάσει τη δυνατότητα επεκτασιμότητας του συστήματος για χρήση σε μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ. σε ένα ευρύτερο δίκτυο).

Αλληλεπίδραση με άλλα Συστήματα: Θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθεί περαιτέρω πώς ο έξυπνος μετρητής μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλα συστήματα και εφαρμογές έξυπνων δικτύων, πέρα από την απλή αποστολή δεδομένων. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων με άλλα ΙοΤ συστήματα ή τη συμβατότητα με διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας.

7.4 Μελλοντική έρευνα

Βάσει της μεταπτυχιακής εργασίας που αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός έξυπνου μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας, προτείνονται τα ακόλουθα θέματα για μελλοντική έρευνα:

Βελτίωση Ακρίβειας Μετρήσεων: Εξερεύνηση αλγορίθμων και τεχνικών για την αύξηση της ακρίβειας στις μετρήσεις τάσης, ρεύματος, και ισχύος, ιδιαίτερα σε μη ιδανικές συνθήκες (π.χ. παραμορφωμένες κυματομορφές). Για παράδειγμα, θα μπορούσε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις αν ενδεχομένως εφαρμόζονταν αποδοτικότεροι αλγόριθμοι βαθμονόμησης καθώς και αντιστάθμισης της μέτρησης με βάση τις διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας (voltage compensation) αλλά και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (temperature compensation).

Ασφάλεια και Απόρρητο σε Έξυπνα Δίκτυα: Ανάπτυξη και ανάλυση πρωτοκόλλων ασφαλείας για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της εμπιστευτικότητας των δεδομένων που συλλέγονται και μεταδίδονται από τον έξυπνο μετρητή. Πρακτικά, θα μπορούσαμε να υλοποιήσουμε το MQTT πρωτόκολλο επικοινωνίας πάνω σε πρωτόκολλο τύπου SSL (Secure Socket Layer)/TLS (Transport Layer Security) και όχι σε TCP (χρήση διαπιστευτηρίων κατά τη μεταφορά των δεδομένων).

Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στον Έξυπνο Μετρητή: Ανάπτυξη μοντέλων μηχανικής μάθησης για πρόβλεψη ενεργειακής ζήτησης, ανίχνευση ανωμαλιών ή και αποδοτική διαχείριση φορτίου σε πραγματικό χρόνο.

Διαλειτουργικότητα με Άλλα Συστήματα ΙοΤ: Έρευνα για την ενσωμάτωση του έξυπνου μετρητή με άλλες συσκευές και πλατφόρμες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΙοΤ) με στόχο την δημιουργία ολοκληρωμένων λύσεων έξυπνου σπιτιού ή έξυπνων πόλεων.

Ανάλυση Ενεργειακής Αποδοτικότητας: Διερεύνηση μεθόδων για τη μέτρηση και βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης τόσο του έξυπνου μετρητή όσο και των δικτύων που υποστηρίζει.

Διερεύνηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας: Ενσωμάτωση και αξιολόγηση των έξυπνων μετρητών σε συστήματα που περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή και αιολική ενέργεια, με σκοπό την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Hakeem, A. Hady, HyungWon Kim, “RPL Routing Protocol Performance in Smart Grid Applications Based Wireless Sensors: Experimental and Simulated Analysis” , Electronics 2019, 8, 186, <https://doi.org/10.3390/electronics8020186>.
- [2] E. Espe, V. Potdar, E. Chang, “Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A literature Review, Evolution and Future Directions” , Energies 2018, 11, 2528, <https://doi.org/10.3390/en11102528>.
- [3] A. Gillis (2021), “What is internet of things (IoT)?” , IOT Agenda, retrieved 7 August 2024.
- [4] Ashton, K. (2009) That “Internet of Things” Thing. RFID Journal, 22, pp 97-114.
- [5] Μ. Κόνιαρης, “Βάσεις Δεδομένων” , Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος Ψηφιοποίησης Ενεργειακών Συστημάτων 2022-2023, ΔΠΜΣ Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, pp. 120-135.
- [6] STM32H743ZI documentation, ST Microelectronics, retrieved 7 August 2024 from: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h743zi.html>
- [7] ZMPT100B specifications, Qingxian Zeming Langxi Electronics, retrieved 7 August 2024 from: micro-transformer.com
- [8] ACS712_Datasheet-3178682, Allegro MicroSystems, retrieved 7 August 2024 from: <https://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/zero-to-fifty-amp-integrated-conductor-sensor-ics/acs712>
- [9] Temperature and Humidity Module DHT11 Product Manual, Aosong Electronics, retrieved 7 August 2024 from: aosong.com
- [10] Specification for LCD Module 2004A, Ver1.0, Shenzhen Eont Electronics Co., LTD, retrieved 7 August 2024 from: uk.beta-layout.com
- [11] NUCLEO-H743ZI documentation, ST Microelectronics, retrieved 7 August 2024 from: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-h743zi.html>
- [12] STM32H743xI production datasheet, DS12110 Rev. 10, ST microelectronics, March 2023, retrieved 7 August 2024 from: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743zi.pdf>
- [13] Ε. Χριστοφόρου, Σημειώσεις στο μάθημα Τεχνολογία Αισθητήρων, ΕΜΠ, Αθήνα 2011.

- [14] Solid State Relay G3MB datasheet, OMRON Industrial Automations, retrieved 7 August 2024 from: ja.omron.com
- [15] IEC, IEC 61000-4-30:Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, edition 3.1, 2021-03, pp. 29-30.
- [16] Γ. Π. Σύρκος, «Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος: Εισαγωγή Θεωρία Εφαρμογές». 4^η έκδοση, Αθήνα 2005.
- [17] Ludek Holoubek, ST Microelectronics, "Watt-hour meter based on the STM32F101 microcontroller", application report AN332, May 2013, DocID18304 Rev.1, pp. 17-27.
- [18] Texas Instruments Incorporated, “ADS7x28 True Root-Mean-Square module”, Application brief SBAA399, February 2023, retrieved 7 August 2024 from: ti.com
- [19] Mekre Mesganaw and Bart Basile, Texas Instruments Incorporated, “Implementation of One or Two Phase Electronic Watt-Hour Meter Using MSP430i20xx” ,application report SLAA637A, August 2014, Revised September 2014, pp. 12-21
- [20] M. Gasior, J. L. Gonzalez, “Improving FFT Frequency Measurement Resolution by Parabolic and Gaussian Spectrum Interpolation” , European Organization for Nuclear Research - CERN, Nov. 2004, pp. 2-3.
- [21] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator” , 24th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Jun. 2006, pp. 1-6.
- [22] Vasilis N. Giotopoulos and Georgios N. Korres, “A Laboratory PMU Based on Third-Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 73, 2024, pp. 2-5.
- [23] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, “Instantaneous power theory and applications to power conditioning”, Wiley-IEEE Press, New Jersey, 2007.
- [24] Sandip Chattopadhyay, Microchip Technology Inc., “Designing Energy Meters with the PIC16F873A”, application note AN939, 2005, DS00939A, pp. 1-2.
- [25] A. Silberschatz, P. B. Galvin, G. Gagne, «Λειτουργικά Συστήματα», Εκδόσεις Ίων, 2^η έκδοση, 2009.
- [26] FreeRTOS Real-time operating system for microcontrollers and small microprocessors, retrieved 11 August 2024 from: freertos.org
- [27] LwIP – A Lightweight TCP/IP stack, retrieved 11 August 2024 from: <https://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>
- [28] HiveMQ MQTT broker, retrieved 12 August 2024 from: <https://www.hivemq.com/products/mqtt-broker/>
- [29] Qbee documentation, “Using Docker to Deploy Node-RED, InfluxDB and Grafana”, retrieved 12 August 2024 from: <https://qbee.io/docs/tutorial-docker-nodered-influx-grafana.html>
- [30] Raspberry Pi 2 documentation, retrieved 12 August 2024 from: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-2-model-b/>

- [31] Yukin Gu, Ke Jin and Chen Yang, “An Improved Research on Frequency-Fixed Cascaded SOGI Single-Phase PLL”, ISPECE 2020, Journal of Physics Conference Series, 2021, pp. 1-3.
- [32] Manish Bhardwaj, Texas Instruments Incorporated, "Software phase locked loop design using C2000 microcontrollers for single phase grid connected inverter", application report SPRABT3A, July 2013, Revised July 2017.
- [33] Προδιαγραφή ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., ΔΔ/373/Αναθ. 03.02.2021, «Τριφασικοί έξυπνοι ηλεκτρονικοί μετρητές Χ.Τ.»
- [34] M. Faria Pinto, T. Mendonca, C.A. Duque and H. A. C. Braga, “Power quality measurements embedded in smart lighting systems” in Proc. 37th IEEE Power Electron. Spec. Conf., June 2015.
- [35] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), March 2010.