



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗ»**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ, ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ**

Διπλωματική Εργασία

ΚΑΡΥΟΦΥΛΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ (Α.Μ. 18503)

Αθήνα, 2021



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗ»**

**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ
ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δημητρακόπουλος Γεώργιος (Επιβλέπων)

**Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και τηλεματικής , Χαροκόπειο
πανεπιστήμιο**

Βαρλάμης Ηρακλής

**Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και τηλεματικής , Χαροκόπειο
πανεπιστήμιο**

Τσερπές Κωνσταντίνος

**Επίκουρος καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και τηλεματικής , Χαροκόπειο
πανεπιστήμιο**

Ο Καρυοφύλλης Κωνσταντίνος

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

“Οι μετρήσεις είναι το νευρικό σύστημα της τεχνικής ζωής.”

A.H. Cook

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής κ. Γ. Δημητρακόπουλο για την ανάθεση, την υποστήριξη και τη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, όλους τους καθηγητές μου και γενικότερα ολόκληρη την κοινότητα του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου για τη βοήθεια και τις παροχές που μου προσέφεραν, κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη στα Ελληνικά.....	Σ.1
Περίληψη στα Αγγλικά.....	Σ.2
Κατάλογος εικόνων.....	Σ.3
Κατάλογος πινάκων.....	Σ.4
Κατάλογος σχημάτων.....	Σ.5
Συντομογραφίες.....	Σ.6
Εισαγωγή.....	Σ.9

Κεφάλαιο 1: Μετρήσεις και ηλεκτρικά μεγέθη

1.1 Μετρήσεις.....	Σ.10
1.1.1 Μετρολογία.....	Σ.10
1.1.2 Η σημασία των μετρήσεων.....	Σ.11
1.2 Ηλεκτρικά μεγέθη.....	Σ.13
1.2.1 Εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα.....	Σ.13
1.2.2 Η ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα.....	Σ.18
1.2.3 Συντελεστής ισχύος (συνφ).....	Σ.21
1.2.4 Ηλεκτρική ενέργεια.....	Σ.23

Κεφάλαιο 2: Ενσωματωμένα συστήματα, μικροελεγκτές και ασύρματα πρότυπα για πλατφόρμες IoT

2.1 Ενσωματωμένα συστήματα.....	Σ.25
2.1.1 Περιγραφή ενσωματωμένων συστημάτων.....	Σ.25
2.1.2 Τυπικοί δίαυλοι ενσωματωμένων συστημάτων.....	Σ.28
2.2 Μικροελεγκτές.....	Σ.31
2.2.1 Εισαγωγή στους μικροελεγκτές.....	Σ.31
2.2.2 Δομή ενός μικροελεγκτή.....	Σ.34
2.2.3 Διαφορές μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών.....	Σ.37
2.3 Η πλατφόρμα Arduino Uno.....	Σ.38
2.3.1 Περιγραφή της πλατφόρμας Uno.....	Σ.38
2.3.2 Οι ακροδέκτες (pins) της πλατφόρμας Uno.....	Σ.40
2.3.3 Είδη μνημών στην πλατφόρμα Uno.....	Σ.42
2.3.4 Πλεονεκτήματα της πλατφόρμας Uno.....	Σ.43
2.3.5 Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE.....	Σ.44
2.4 Ασύρματα πρότυπα για πλατφόρμες IoT.....	Σ.49
2.4.1 Zigbee.....	Σ.49
2.4.2 Bluetooth (BLE).....	Σ.51
2.4.3 Z-wave.....	Σ.53
2.4.4 WiFi.....	Σ.54
2.4.5 LoRaWAN.....	Σ.57
2.4.6 NB-IoT.....	Σ.58

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός και κατασκευή της μετρητικής διάταξης

3.1 Σχεδιασμός της μετρητικής διάταξης.....	Σ.61
3.2 Επιμέρους υλικά - Πλακέτες επέκτασης (Shields).....	Σ.63
3.2.1 Αισθητήρας τάσης (ZMPT101B).....	Σ.63
3.2.2 Αισθητήρας ρεύματος (ACS712).....	Σ.64
3.2.3 Οθόνη LCD 20X4 (I2C-TWI-SPI).....	Σ.65
3.2.4 Μονάδα Bluetooth HC-05 (έκδοση ZS-040).....	Σ.66
3.3 Συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων.....	Σ.68
3.4 Τρόπος λειτουργίας του έξυπνου μετρητή.....	Σ.72
3.5 Βαθμονόμηση του έξυπνου μετρητή.....	Σ.73
3.5.1 Βαθμονόμηση του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).....	Σ.75
3.5.2 Βαθμονόμηση του αισθητήρα ρεύματος (ACS712).....	Σ.79
3.6 Προγραμματισμός του συστήματος (περιβάλλον IDE).....	Σ.82
3.7 Δημιουργία της Android εφαρμογής (MIT App Inventor).....	Σ.86

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος λειτουργίας μετρητή - Συμπεράσματα - Βελτιώσεις

4.1 Έλεγχος ορθής λειτουργίας του έξυπνου μετρητή.....	Σ.90
4.2 Συμπεράσματα.....	Σ.95
4.3 Μελλοντικές βελτιώσεις.....	Σ.96

Βιβλιογραφία.....	Σ.98
-------------------	------

Περίληψη

Η ανάγκη για ενεργειακή διαχείριση σε κτίρια κατοικιών είναι κορυφαία προτεραιότητα με προφανή οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η ακριβής παρακολούθηση των ηλεκτρικών φορτίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διευκόλυνση της ενεργειακής διαχείρισης, η οποία είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός έξυπνου οικιακού μετρητή ενέργειας. Ένα ηλεκτρονικό σύστημα σχεδιάστηκε για να λαμβάνει μετρήσεις τάσης, ρεύματος και ισχύος σε πραγματικό χρόνο. Ο σκοπός του συστήματος είναι να μετρήσει και να απεικονίσει τις παραμέτρους ενέργειας από τις μονάδες των αισθητήρων.

Ο μετρητής ενέργειας που σχεδιάστηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης οικιακών συσκευών έως 7 KW και του ηλεκτρικού κόστους ενέργειας ανά ώρα.

Το σύστημα βασίζεται στη χρήση του μικροελεγκτή Arduino Uno και θα δώσει την ευκαιρία και τη δυνατότητα στους χειριστές να λάβουν ενεργειακά δεδομένα και να πραγματοποιήσουν διορθωτικές ενέργειες. Η διάταξη αποτελείται από δύο αισθητήρες για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος.

Η αρχή του προγραμματιστικού κώδικα που χρησιμοποιείται είναι η εύρεση της μέγιστης τάσης και ρεύματος του μετρούμενου ημιτονοειδούς κύματος. Η μέγιστη τάση και το ρεύμα μπορούν να βρεθούν παρακολουθώντας συνεχώς τα ημιτονοειδή σήματα. Τα αντίστοιχα σήματα εισόδου έχουν γραμμική σχέση με τις τιμές εξόδου των αναλογικο-ψηφιακών μετατροπέων του συστήματος μέτρησης.

Η διασύνδεση της κύριας μονάδας πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνολογίας Bluetooth. Αναπτύχθηκε επίσης μια εφαρμογή Android για την παρακολούθηση των μετρήσεων ισχύος. Το σύστημα δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες για να μελετηθεί η αξιοπιστία και η ευρωστία του. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται μελλοντικές βελτιώσεις.

Λέξεις κλειδιά: διαδίκτυο των πραγμάτων, έξυπνοι μετρητές ενέργειας, ενσωματωμένα συστήματα, αισθητήρες.

Abstract

The need for energy management in residential buildings is a top priority with obvious economic and environmental benefits. Accurate electrical load monitoring is crucial to facilitate energy management, which is one of the most important factors that ensure sustainability in the electrical power systems.

The scope of this diploma thesis was the development of a home energy smart meter. An electronic system was designed in order to take voltage, current and power measurements real time. The purpose of the system is to measure and visualize energy parameters by the sensor units.

The designed power meter can be used to measure the energy consumption of household appliances up to 7 KW and the electricity cost per hour.

The system is based on the use of Arduino Uno microcontroller and will give the opportunity and the ability to the operators to get energy data and perform correction actions. The layout consists of two sensors for measuring voltage and current.

The principle of the programming script being used is to find the maximum voltage and current of the measured sine wave. Maximum voltage and current can be found by continuously observing the sinusoidal signals. Corresponding input signals are having a linear relationship with the Analog to Digital Converters (ADCs) output values of the measurement system.

The interconnection of the main unit was implemented through the Bluetooth technology. It was also developed an Android application for monitoring power measurements.

The system was tested in real conditions to study its reliability and robustness. Finally, the conclusions of the work are presented and future improvements are suggested.

Keywords: internet of things, smart energy meters, embedded systems, sensors.

Κατάλογος εικόνων

Εικ.1. Επιλογή θύρας επικοινωνίας.....	Σ.45
Εικ.2. Επιλογή του μικροελεγκτή Arduino Uno (μοντέλο).....	Σ.45
Εικ.3. Εισαγωγή βιβλιοθήκης.....	Σ.47
Εικ.4. Επιτήρηση της σειριακής επικοινωνίας.....	Σ.48
Εικ.5. Βασικά σημεία του περιβάλλοντος IDE.....	Σ.49
Εικ.6. Ο αισθητήρας τάσης (ZMPT101B).....	Σ.63
Εικ.7. Ο αισθητήρας ρεύματος (ACS712).....	Σ.64
Εικ.8. Η πρόσοψη της LCD οθόνης 20X4.....	Σ.65
Εικ.9. Οι ακροδέκτες του ελεγκτής I2C της LCD οθόνης.....	Σ.66
Εικ.10. Η μονάδα Bluetooth HC-05.....	Σ.67
Εικ.11. Κουτί ABS για την κατασκευή.....	Σ.68
Εικ.12. Άνοιγμα οπών στο κουτί της κατασκευής.....	Σ.69
Εικ.13. Εφαρμογή της οθόνης LCD και των καλωδίων παροχής και φορτίων.....	Σ.69
Εικ.14. Τοποθέτηση και διασύνδεση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.....	Σ.70
Εικ.15. Ρύθμιση του εύρους της τάσης εξόδου του αισθητήρα ZMPT101B.....	Σ.77
Εικ.16. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα τάσης, για 223V (rms) στην είσοδο.....	Σ.77
Εικ.17. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα τάσης, για 0V (rms) στην είσοδο.....	Σ.78
Εικ.18. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος, για 8.3 A (rms) στην είσοδο.....	Σ.80
Εικ.19. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος, για 0 A (rms) στην είσοδο.....	Σ.81
Εικ.20. Επιλογή χρώματος φόντου για την εφαρμογή Android.....	Σ.86
Εικ.21. Τοποθέτηση πλαισίου οριζόντιας διαρρύθμισης (Horizontal Arrangement1) και λίστας επιλογής (List picker1).....	Σ.87
Εικ.22. Προσθήκη ετικετών, πελάτη Bluetooth και στοιχείου ρολογιού στην εφαρμογή.....	Σ.88
Εικ.23. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος φορτίου 1000 Watt.....	Σ.91
Εικ.24. Ενδείξεις στον έξυπνο μετρητή για μέτρηση φορτίου 1000 Watt.....	Σ.91
Εικ.25. Απεικόνιση των μετρήσεων στη συσκευή Android για φορτίο 1000 Watt.....	Σ.92
Εικ.26. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος φορτίου 1600 Watt.....	Σ.93
Εικ.27. Ενδείξεις στον έξυπνο μετρητή για μέτρηση φορτίου 1600 Watt.....	Σ.93
Εικ.28. Απεικόνιση των μετρήσεων στη συσκευή Android για φορτίο 1600 Watt.....	Σ.94

Κατάλογος πινάκων

Πίν.1: Η ενεργή ισχύς σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου.....	Σ.19
Πίν.2: Η άεργη ισχύς σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου.....	Σ.20
Πίν.3: Δημοφιλείς δίαυλοι επικοινωνίας σε ενσωματωμένα συστήματα.....	Σ.31
Πίν.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικροελεγκτών-μικροεπεξεργαστών.....	Σ.38
Πίν.5: Σύγκριση των μετρούμενων τιμών με τις τιμές αναφοράς, για φορτίο 1000 Watt.....	Σ.91
Πίν.6: Σύγκριση των μετρούμενων τιμών με τις τιμές αναφοράς, για φορτίο 1600 Watt.....	Σ.94

Κατάλογος σχημάτων

Σχ.1: Η σημασία των μετρήσεων σε τρεις διαστάσεις.....	Σ.12
Σχ.2: Η στιγμιαία τάση και το στιγμιαίο ρεύμα ενός AC σήματος.....	Σ.15
Σχ.3: Προπορεία του ρεύματος και προπορεία της τάσης AC σημάτων.....	Σ.16
Σχ.4: Αναπαράσταση ενεργού τάσης, μέσης τάσης και τάσης κορυφής σε ημιτονικό σήμα (AC).....	Σ.17
Σχ.5: Η φαινόμενη ισχύς στο μιγαδικό επίπεδο.....	Σ.18
Σχ.6: Αναπαράσταση της φαινόμενης ισχύος σε AC σήμα.....	Σ.20
Σχ.7: Τυπική δομή ενός ενσωματωμένου συστήματος.....	Σ.26
Σχ.8: Η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή ATmega328P.....	Σ.35
Σχ.9: Οι ακροδέκτες και οι ενδείκτες του μικροελεγκτή Uno.....	Σ.42
Σχ.10: Σύνδεση του έξυπνου μετρητή με μονοφασικό ηλεκτρικό πίνακα κατοικίας.....	Σ.62
Σχ.11: Σύνδεση του έξυπνου μετρητή με απλή οικιακή πρίζα.....	Σ.63
Σχ.12: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).....	Σ.64
Σχ.13: Οι ακροδέκτες του IC ACS712 και μια τυπική εφαρμογή του.....	Σ.65
Σχ.14: Διάγραμμα συνδέσεων των επιμέρους κυκλωμάτων.....	Σ.71
Σχ.15: Μπλοκ διάγραμμα του έξυπνου μετρητή.....	Σ.73
Σχ.16: Τυπικές πρότυπες καμπύλες ενός αισθητήρα τάσης και ενός αισθητήρα ρεύματος.....	Σ.75
Σχ.17: Σύνδεση εικονικού φορτίου και μέτρηση της ενεργής τάσης (V _{εν}).....	Σ.76
Σχ.18: Εξίσωση ευθείας που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).....	Σ.78
Σχ.19: Σύνδεση εικονικού φορτίου και μέτρηση του ενεργού ρεύματος (I _{εν}).....	Σ.80
Σχ.20: Εξίσωση ευθείας που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα ρεύματος (ACS712).....	Σ.82

Συντομογραφίες

IoT	Internet of Things
KW	KiloWatt
Kg	Kilogram
SEG	Smart Energy Grids
kV	kiloVolt
SI	Système international
V	Volt
VA	Volt-Ampere
W	Watt
Wh	Watt-hour
kWh	kiloWatt-hour
ATM	Auto Transfer Money
PC	Personal Computer
ADC	Analog to Digital Converters
ROM	Read Only Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
KB	Kilo Byte
IC	Integrated Circuit
FPGA	Field-Programmable Gate Array
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
DSP	Digital Signal Processors
ISA	Industry Standard Association
EISA	Extended ISA
MCA	MicroChannel Architecture
PCI	Peripheral Component Interconnection
VESA	Video Electronics Standards Association
MHz	MegaHertz
PCIe	PCI express
SATA	Serial AT Attachment
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture
SoC	System on Chip
USB	Universal Serial Bus
mA	milliAmpere
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TX	Transmit
RX	Receive
SPI	Serial Peripheral Interface
SSI	Synchronous Serial Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
KHz	KiloHertz
RAM	Random Access Memory
I/O	Input/Output
SSR	Solid state Relays
SCR	Silicon Controlled Rectifiers

LED	Light Emitting Diode
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
CAN	Controller Area Network
DAC	Digital to Analog Converter
EMI	Electromagnetic Interference
PWM	Pulse-Width Modulation
CPU	Central Processing Unit
SRAM	Static Random-Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
TWI	Two-Wire Interface
ALU	Arithmetic Logic Unit
VDC	Volts of Direct Current
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter
IDE	Integrated Development Environment
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
SCK	Serial Clock
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
ICSP	In-Circuit Serial Programming
Aref	Analog reference
IOREF	Input/Output Reference
DIY	Do It Yourself
GHz	GigaHertz
WPAN	Wireless Personal Area Network
ISM	Industrial, Scientific and Medical
MAC	Media Access Control
Kbps	Kilobits per second
PAN	Personal Area Network
BLE	Bluetooth Low Energy
L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
mW	milliWatt
GATT	Generic ATtribute
GAP	Generic Access Profile
6LoWPAN	IPv6 over Low -Power Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CCK	Complementary Code Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
MU-MIMO	Multi-User, Multiple-Input Multiple-Output
VR/AR	Virtual Reality/Augmented Reality
M2M	Machine to Machine
MIMO-OFDM	Multiple-Input Multiple-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

UHD	Ultra High Definition
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LoRa	Long Range
ADR	Adaptive Data Rate
LPWA	Low Power Wide Area
LTE	Long Term Evolution
mMTC	massive Machine Type Communications
EPS	Evolved Packet System
HD-FDD	Half-Duplex Frequency Division Duplexing
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
SC-FDMA	Single Carrier-Frequency Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PSM	Power Saving Mode
eDRX	extended Discontinuous Reception
VAC	Volts of Alternating Current
A	Amperes
VDC	Volts of Direct Current
DC	Direct Current
LCD	Liquid Crystal Display
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
μ s	microsecond
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EDR	Enhanced Data Rate
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
bps	bits per second
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ms	millisecond
MIT	Massachusetts Institute of Technology
VCC	Voltage Common Collector
RMS	Root Mean Square
APK	Android Package Kit
Δ.Ε.Η.	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Ε.Ι.Μ.	Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας
Ν.Π.Ι.Δ.	Νομικό Πρόσωπο Ιδιωτικού Δικαίου
συνφ	συνημίτονο της γωνίας ϕ ή συντελεστής ισχύος
ημφ	ημίτονο της γωνίας ϕ
εφφ	εφαπτομένη της γωνίας ϕ
Ιεν	ενεργό ρεύμα
Υεν	ενεργή τάση

Εισαγωγή

Με την ανάπτυξη του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και των έξυπνων πόλεων (Smart Cities) τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα αντιμετωπίζει νέες προκλήσεις στον ολοένα αυξανόμενο αριθμό έξυπνων μετρητικών συστημάτων.

Οι έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν διεισδύσει σημαντικά στην καθημερινότητα μας και υπόσχονται καλύτερη διαχείριση των φυσικών πόρων, περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, πρόβλεψη της ενεργειακής ζήτησης και βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών από τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας. Οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας σε σύγκριση με τους κλασσικούς ηλεκτρο-μηχανικούς μετρητές ενέργειας, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως αυτό-επιτήρηση, απομακρυσμένη επιτήρηση, αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων και δυνατότητες τηλε-ελέγχου [1]. Οι έξυπνοι μετρητές βελτιστοποιούν τη διαχείριση των ενεργειακών αποθεμάτων μέσω των ευφυών ενεργειακών δικτύων (smart energy grids) και προσφέρουν παράλληλα σημαντικά οφέλη στους καταναλωτές και τις εταιρείες διανομής ενέργειας.

Με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών στα μετρητικά συστήματα πραγματικού χρόνου, η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται, οι υπηρεσίες γίνονται καλύτερες και ταυτόχρονα δημιουργούνται νέα επιχειρηματικά μοντέλα.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής, είναι η σχεδίαση και η κατασκευή ενός μετρητή ενέργειας πραγματικού χρόνου (real time energy meter), του οποίου το κόστος κατασκευής παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Ο μετρητής που κατασκευάστηκε προορίζεται για χώρους κατοικιών και δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να επιτηρούν τις τρέχουσες ενεργές τιμές τάσης και ρεύματος, τη στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων και το στιγμιαίο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (σε ευρώ/ώρα). Η διάταξη στηρίχθηκε στο μικροελεγκτή Arduino Uno και δύο ακόμα αισθητήρες. Οι μετρούμενες τιμές προκύπτουν από έναν αισθητήρα τάσης (μοντέλο ZMPT101B) και έναν αισθητήρα ρεύματος (μοντέλο ACS712).

Ο μετρητής είναι ικανός να μετρήσει φορτία ισχύος έως 7 KW (μέγιστη επιτρεπτή ισχύς). Τα μετρούμενα μεγέθη αναπαρίστανται στην ενσωματωμένη LCD οθόνη του μετρητή και ταυτόχρονα αποστέλλονται μέσω Bluetooth σε Android συσκευή.

Κεφάλαιο 1: Μετρήσεις και ηλεκτρικά μεγέθη

1.1 Μετρήσεις

1.1.1 Μετρολογία

Μετρολογία ονομάζεται η επιστήμη που ασχολείται με τις μετρήσεις, τα επιστημονικά μετρητικά όργανα, τις μονάδες μέτρησης και την αξιοπιστία των μετρητικών διαδικασιών. Η μετρολογία είναι αναγκαία για την επιστημονική έρευνα, αλλά ταυτόχρονα η επιστημονική έρευνα αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη της μετρολογίας. Αυτό το δίπτυχο παράγει καλύτερα μετρολογικά εργαλεία, τα οποία επιτρέπουν στους ερευνητές να συνεχίσουν την πορεία τους προς νέες ανακαλύψεις.

Η μετρολογία διακρίνεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής:

α) Επιστημονική μετρολογία (Scientific metrology): Σχετίζεται με την οργάνωση, την εξέλιξη, την καθιέρωση και τη διατήρηση των προτύπων (standards) των μετρήσεων.

β) Βιομηχανική μετρολογία (Industrial metrology): Στοχεύει στην ορθή λειτουργία των μετρητικών οργάνων, τα οποία χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αλλά και σε διαδικασίες παραγωγής προϊόντων και ελέγχου.

γ) Νομική μετρολογία (Legal metrology): Ασχολείται με τις μετρήσεις που επηρεάζουν τη διαφάνεια των οικονομικών συναλλαγών, το εμπόριο, τη δημόσια υγεία, την ασφάλεια, τη προστασία του περιβάλλοντος και τη λειτουργία ενός κράτους.

δ) Ιστορική μετρολογία (Historical metrology): Είναι η επιστήμη, η οποία μελετά τις αρχαίες μονάδες και τα μετρητικά συστήματα (θεωρείται υποσύνολο της ιστορίας).

Τα καίρια σημεία στην εξέλιξη της μετρολογίας, είναι δύσκολο να διατυπωθούν και να ερμηνευτούν από τον οποιοδήποτε. Σημαντικό ρόλο παίζει η "σκοπιά" από την οποία βλέπει κανείς τη θεματολογία της μετρολογίας. Κάθε ειδικότητα και επάγγελμα αντιλαμβάνεται τις διαδικασίες της μετρολογίας με διαφορετικό τρόπο. Αλλιώς τις αντιλαμβάνεται ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός, αλλιώς ένας αρχιτέκτονας και αλλιώς ένας δημοσιογράφος.

Η πλήρης καθιέρωση του μετρικού συστήματος στην Ελλάδα έγινε τον Απρίλιο του 1959, όταν αντικαταστάθηκε η οκά (μονάδα βάρους) από το χιλιόγραμμα (1 Kg). Η μετρολογία στην Ελλάδα ξεκίνησε επίσημα το 1993, με τη σύμπτυξη της ευρωπαϊκής αγοράς. Η ύψιστη αρχή μετρολογίας στην Ελλάδα, είναι το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (Ε.Ι.Μ.), το οποίο από το 1998 αποτελεί πλήρες μέλος του EUROMET.

Το Ε.Ι.Μ. είναι ένα νομικό πρόσωπο ιδιωτικού δικαίου (Ν.Π.Ι.Δ.), το οποίο λειτουργεί ως τεχνικός σύμβουλος του ελληνικού κράτους για θέματα μετρολογίας, εργαστηριακών μετρήσεων, διακριβώσεων και διατήρησης των εθνικών προτύπων.

Σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες, η μετρολογία αποτελεί αναπόσπαστο μοχλό ανάπτυξης της οικονομίας και της ποιότητας ζωής των πολιτών. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή της μετρολογίας σε κάθε κράτος γίνεται μεμονωμένα, για τη βελτίωση της κοινωνίας και της καθημερινότητας του μέσου πολίτη.

Χωρίς την ύπαρξη της μετρολογίας δεν μπορεί να ανταποκριθεί καμία επιστήμη, για αυτό το λόγο η μετρολογία ως επιστήμη των μετρήσεων βρίσκεται σε στενή επαφή με όλες τις άλλες επιστήμες. Επιγραμματικά, οι βασικότεροι στόχοι της μετρολογίας είναι:

- 1) Η δημιουργία γενικής θεωρίας μετρήσεων.
- 2) Η θέσπιση μονάδων φυσικών μεγεθών σε παγκόσμια κλίμακα.
- 3) Η επεξεργασία επιστημονικών μεθόδων και η δημιουργία ομοιογένειας στις μετρήσεις με κοινά σημεία αναφοράς.
- 4) Η δημιουργία προτύπων και μετρητικών μέσων.

1.1.2 Η σημασία των μετρήσεων

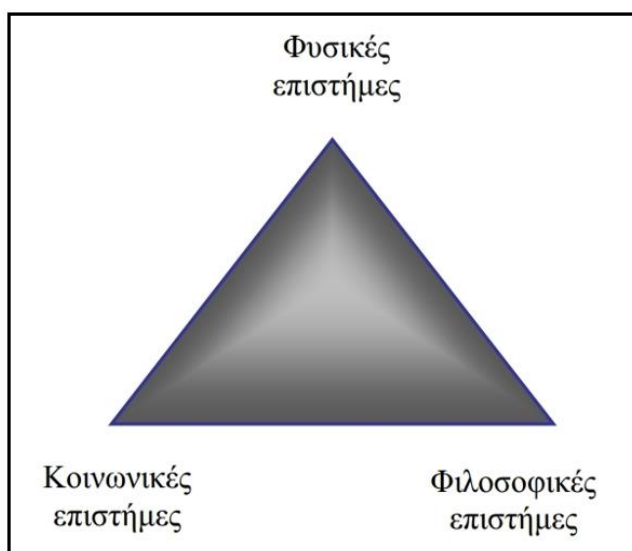
Οι μετρήσεις αποτελούν το βασικό μέσο για την κατάκτηση της γνώσης και την κατανόηση των φυσικών κανόνων από τον άνθρωπο. Η μέτρηση ως βασική έννοια της μετρολογίας, είναι εκείνη η διαδικασία που έχει ως αντικείμενο τον προσδιορισμό της τιμής της ποσότητας ενός φυσικού μεγέθους.

Η έννοια του φυσικού μεγέθους έχει να κάνει με μια από τις ιδιότητες ενός φυσικού αντικειμένου, η οποία είναι κοινή ποιοτικά για πολλά "φυσικά αντικείμενα" (π.χ. μάζα, μήκος, ηλεκτρική αντίσταση, θερμοκρασία κλπ.).

Βασικό αντικείμενο των μετρήσεων, είναι η εύρεση της τιμής του φυσικού μεγέθους με πειραματικό τρόπο και με τη βοήθεια ειδικών τεχνικών μέσων. Οι μετρήσεις υλοποιούνται για να μάθουμε κάτι για το αντικείμενο που υπόκειται σε μέτρηση (το λεγόμενο δοκίμιο). Το αποτέλεσμα της μέτρησης πρέπει να μας περιγράφει την κατάσταση ή το φαινόμενο το οποίο μετράμε και είναι υπό παρατήρηση. Μεταξύ αυτής της κατάστασης ή του φαινομένου και του αποτελέσματος της μέτρησης, θα πρέπει να υπάρχει κάποια αναλογία ή σχέση. Οι μετρήσεις

που πραγματοποιούνται στους διάφορους τομείς της κοινωνίας, κυριαρχούν πλέον στη ζωή του κάθε ανθρώπου και επηρεάζουν την καθημερινή του.

Πολλές φορές, οι μετρήσεις θεωρούνται ως δεδομένες. Για παράδειγμα όταν αγοράζουμε τρόφιμα, γεμίζουμε με καύσιμα τα οχήματά μας ή καταναλώνουμε ηλεκτρικό ρεύμα και φυσικό αέριο σε καθημερινή βάση, θεωρούμε ως δεδομένο ότι έχουν χρησιμοποιηθεί μηχανήματα ακριβείας και μετρητικές διατάξεις, ώστε να λάβουμε τη σωστή ποσότητα προϊόντος που μας αναλογεί για το αντίτιμο που δώσαμε. Η σημασία των μετρήσεων εκφράζεται σε τρεις διαστάσεις: την τεχνολογική, τη φιλοσοφική και την επιστημονική (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Η σημασία των μετρήσεων σε τρεις διαστάσεις

Οι μετρήσεις μας βοηθούν επίσης, να γνωρίσουμε τον υλικό κόσμο στον οποίο ζούμε και να κατανοήσουμε τους φυσικούς νόμους καλύτερα. Ενώνουν τη θεωρία με την πρακτική ζωή της κοινωνίας και χρησιμοποιούνται στις επιστήμες, στον έλεγχο της ποιότητας, στην αυτοματοποίηση και στην τελειοποίηση των τεχνολογικών διαδικασιών. Εφαρμόζονται ουσιαστικά μαθηματικές μέθοδοι, για την οργάνωσή της πληροφορίας σε επιμέρους λογικά συστήματα.

Πέραν της τεχνολογικής διάστασης, στις μετρήσεις υπάρχει επίσης η φιλοσοφική και η επιστημονική διάσταση. Η επιστημονική διάσταση των μετρήσεων προάγει την ανάπτυξη των επιστημών και των ερευνητικών υποθέσεων, ενώ σε φιλοσοφικό επίπεδο οι μετρήσεις αποτελούν τη βασική μέθοδο κατανόησης των φυσικών φαινομένων και διεργασιών. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η μετρολογία ως επιστήμη των μετρήσεων, βρίσκεται σε ιδιαίτερη θέση σε σχέση με τις υπόλοιπες επιστήμες.

Η εξέλιξη μιας μέτρησης δεν πρέπει να εξαρτάται από τον παρατηρητή και θα πρέπει να μας δίνει πληροφορίες μόνο για αυτό το οποίο μετράμε (μετρούμενη φυσική ποσότητα).

Δεν υπάρχει πεδίο της ανθρώπινης δραστηριότητας στο οποίο να μην χρησιμοποιούνται εντατικά οι μετρήσεις, οι έλεγχοι και οι δοκιμές. Γίνεται επομένως αντιληπτή, η τεράστια κοινωνική σημασία των μετρήσεων με μια ευρεία αποδοχή.

1.2 Ηλεκτρικά μεγέθη

1.2.1 Εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα

Η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, επιτρέπει στους μηχανικούς να έχουν μια απλοποιημένη εικόνα των ηλεκτρικών συστημάτων, ώστε να μπορούν να αντιληφθούν τον τρόπο λειτουργίας τους και να προβλέπουν ποσοτικά πώς συμπεριφέρονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Στις οικίες μας καθώς και σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, το ρεύμα που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των ηλεκτρικών διατάξεων είναι εναλλασσόμενο. Επικρατεί το εναλλασσόμενο, λόγω της ευκολίας μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον τόπο παραγωγής στον τόπο κατανάλωσης. Η ορθή διαχείριση της ενέργειας, είναι καθοριστικής σημασίας στις πολιτισμένες πόλεις. Τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα (Smart Energy Grids - SEGs) έρχονται να ισορροπήσουν το κενό ανάμεσα στην ενεργειακή κατανάλωση και τη ζήτηση, ώστε να περιοριστεί η απώλεια ενέργειας. Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποίησαν οι Ciuciu et al. (2012), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ευκαιριακή πώληση αποθεμάτων ηλεκτρικής ενέργειας εντός μιας κοινότητας χρηστών, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να καταναλώσουν αλλά και ταυτόχρονα να παράξουν ενέργεια (π.χ. μικρές εταιρείες). Η ιδέα στηρίχθηκε σε μια πλατφόρμα, η οποία συλλέγει δεδομένα από έξυπνους μετρητές και υπολογίζει πότε υπάρχει ενεργειακή περίσσεια από συγκεκριμένες ομάδες χρηστών, με σκοπό την πώληση των συγκεκριμένων αποθεμάτων [2].

Η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι οικονομικότερη όταν υλοποιείται με γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων, διότι το ρεύμα παραμένει σε χαμηλές τιμές όπως επίσης και οι ανεπιθύμητες απώλειες. Για αυτό το λόγο στις γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου (Δ.Ε.Η.) τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται τάσεις έως και 765 kV. Οι έξυπνοι μετρητές χρησιμοποιούνται συχνά από παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να ενημερώνονται σε

πραγματικό χρόνο για βλάβες στα συστήματα διανομής και να δρομολογείται άμεσα η επίλυση των προβλημάτων [3].

Εκτός από ανίχνευση βλαβών, ένας έξυπνος μετρητής παρέχει τη δυνατότητα να ανιχνευτούν μεταβολές στα φορτία και απόπειρες κλοπής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι Alalem et al. (2019), σχεδίασαν και υλοποίησαν μια πρωτότυπη διάταξη βασισμένη στην πλατφόρμα Arduino Uno, η οποία ανιχνεύει μέσω κατάλληλου αλγόριθμου απόπειρες κλοπής ηλεκτρικού ρεύματος σε κατοικίες. Αν ανιχνευτεί από το σύστημα κλοπή ηλεκτρικού ρεύματος ή μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση, τότε ειδοποιείται ο χρήστης και διακόπτεται η παροχή για προστασία [4].

Η τάση περιγράφεται ως μια συνάρτηση του χρόνου, η οποία ανάλογα με τη μορφή της μπορεί να έχει σταθερό ή μεταβαλλόμενο μέτρο. Όταν η πολικότητα της τάσης μεταβάλλεται περιοδικά με το χρόνο, η τάση ονομάζεται εναλλασσόμενη τάση και το αντίστοιχο ρεύμα που παράγεται εναλλασσόμενο, διότι η φορά του ρεύματος αλλάζει με περιοδικό τρόπο. Η στιγμιαία εναλλασσόμενη τάση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V = V_m * \eta \mu \omega t = V_m * \eta \mu \phi \quad (1.1)$$

όπου

V_m : η μέγιστη τιμή της τάσης.

$\omega = 2\pi f$: η κυκλική συχνότητα.

t : μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

$\phi = \omega t$: στιγμιαία φάση (η γωνία σε ορισμένη χρονική στιγμή t).

Η αντίστοιχη στιγμιαία εναλλασσόμενη ένταση του ρεύματος που δημιουργεί η εναλλασσόμενη τάση, ισούται με:

$$I = I_m * \eta \mu \omega t = I_m * \eta \mu \phi \quad (1.2)$$

όπου

I_m : η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος.

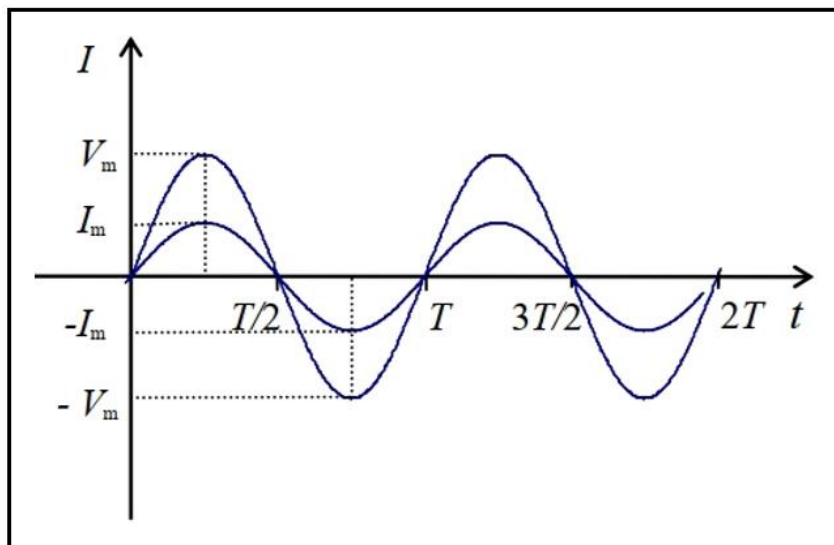
$\omega = 2\pi f$: η κυκλική συχνότητα.

t : μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

$\phi = \omega t$: στιγμιαία φάση (η γωνία σε ορισμένη χρονική στιγμή t).

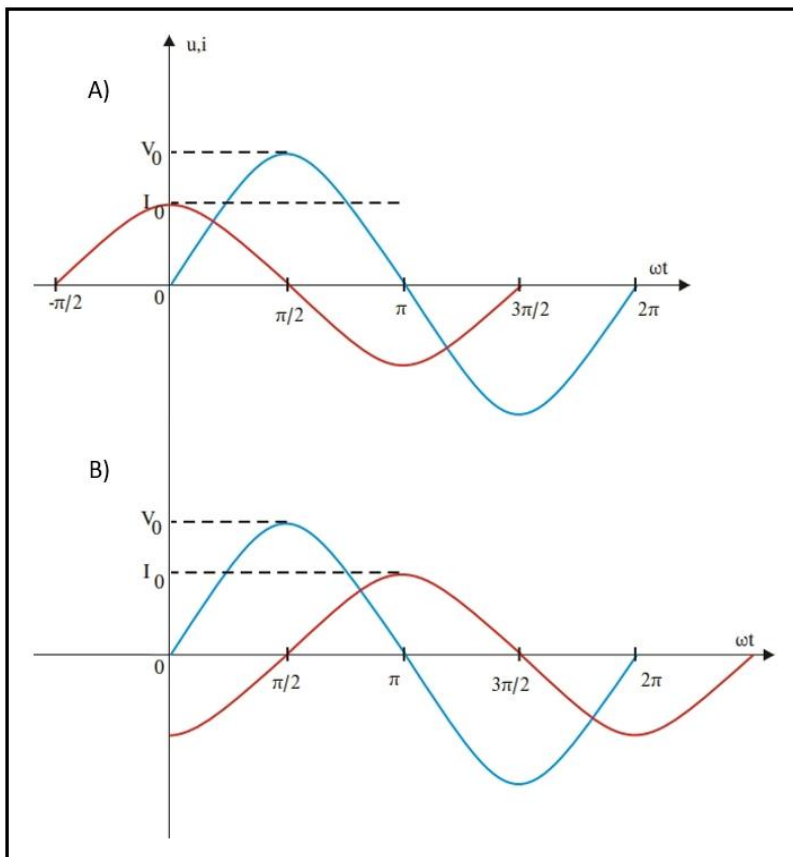
Η φάση του σήματος δηλώνει το βαθμό προήγησης (phase shift) του σήματος, ως προς κάποιο άλλο σήμα ή μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή αναφοράς (π.χ. $t=0$ sec).

Τα ωμικά φορτία δεν προκαλούν διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων της τάσης και της έντασης του ρεύματος. Στο σχήμα 2, αναπαρίστανται η στιγμιαία τάση και το στιγμιαίο ρεύμα ενός ημιτονικού σήματος σε ωμικό φορτίο, όπου η τάση και το ρεύμα βρίσκονται σε φάση (συμφασικά σήματα) και παίρνουν ταυτόχρονα τις μέγιστες, ελάχιστες και μηδενικές τιμές τους. Οι ποσότητες I και V είναι ανάλογες του $\eta\mu\omega t$.



Σχήμα 2. Η στιγμιαία τάση και το στιγμιαίο ρεύμα ενός AC σήματος

Θετικές γωνίες φάσης δηλώνουν προπορεία (leading), ενώ αρνητικές γωνίες δηλώνουν καθυστέρηση (lagging). Όταν υπάρχει επαγωγική επίδραση, η τάση προηγείται του ρεύματος. Ενώ, όταν υπάρχει χωρητική επίδραση, το ρεύμα προηγείται της τάσης. Στο σχήμα 3.A, αναπαρίσταται η προπορεία του ρεύματος (σε σχέση με την τάση) όπου επικρατούν χωρητικά φαινόμενα και στο σχήμα 3.B, αναπαρίσταται η προπορεία της τάσης (σε σχέση με το ρεύμα) όπου επικρατούν επαγωγικά φαινόμενα.



Σχήμα 3. Προπορεία του ρεύματος και προπορεία της τάσης AC σημάτων

Η τιμή της κυκλική συχνότητα του σήματος (σε rad/s) δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (1.3)$$

Ενώ, η συχνότητα f (ο αριθμός των εναλλαγών) της τάσης V, δίνεται αντίστοιχα από τη σχέση:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.4)$$

όπου

T: η περίοδος (σε s)

και $\omega = 2\pi f$

Η τιμή της έντασης του συνεχούς ρεύματος που παράγει την ίδια ισχύ με το εναλλασσόμενο, πάνω στην ίδια αντίσταση ονομάζεται ενεργός ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος και συμβολίζεται με I_{en} . Η ενεργή τιμή ρεύματος ενός ημιτονοειδούς σήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{εν} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \Rightarrow I_{εν} = 0.707 * I_o \quad (1.5)$$

όπου

I_o : το πλάτος της έντασης του ρεύματος.

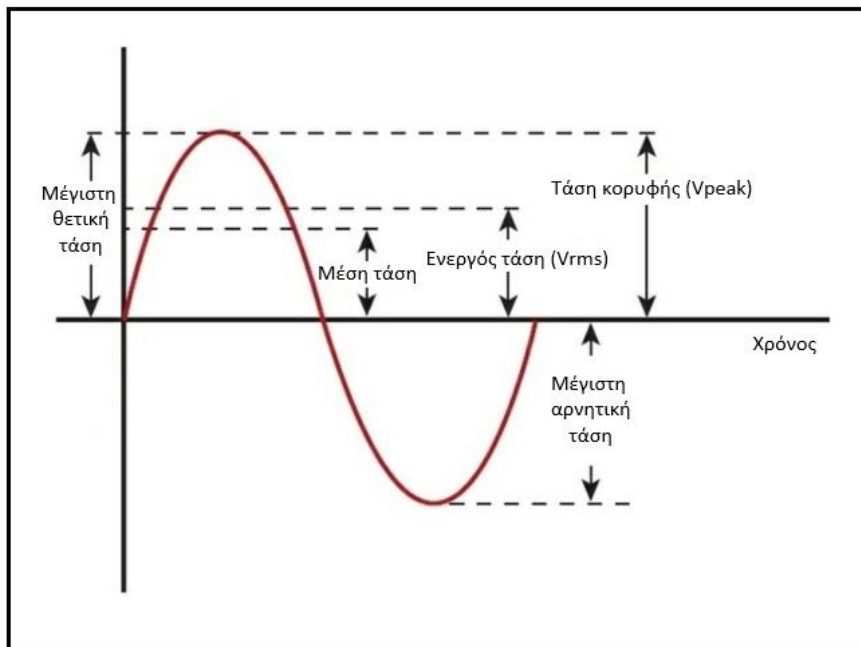
Αντίστοιχα, μπορούμε να ορίσουμε και την ενεργό τιμή τάσης ($V_{εν}$), η οποία ισούται με:

$$V_{εν} = I_{εν} * R \Rightarrow V_{εν} = 0.707 * I_o * R \Rightarrow V_{εν} = 0.707 * V_o \quad (1.6)$$

όπου

V_o : το πλάτος της τάσης.

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τις ενεργές τιμές τάσης και ρεύματος ($V_{εν}$ και $I_{εν}$), είναι επειδή υπάρχει μια αναλογία με τα συνεχή ρεύματα και τις συνεχείς τάσεις και επίσης τα μετρητικά όργανα (βολτόμετρα, αμπερόμετρα κλπ) είναι προσαρμοσμένα να μετρούν τις ενεργές αυτές τιμές. Στο σχήμα 4, αναπαριστώνται η ενεργός τάση, η μέση τάση και η τάση κορυφής (πλάτος) σε ένα ημιτονικό σήμα (AC).

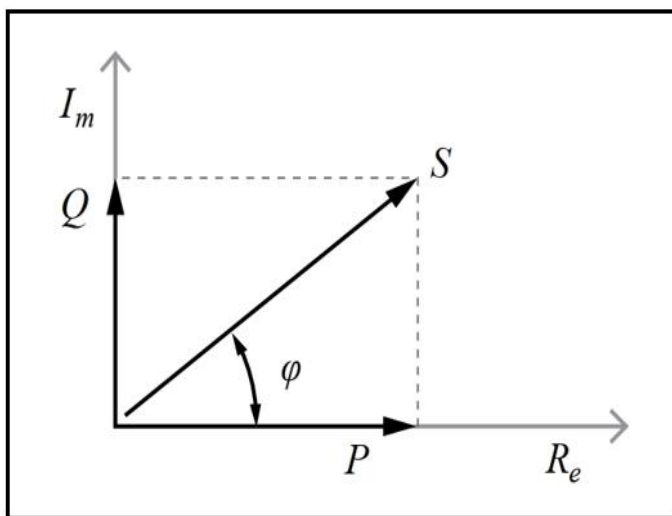


Σχήμα 4. Αναπαράσταση ενεργού τάσης, μέσης τάσης και τάσης κορυφής σε ημιτονικό σήμα (AC).

1.2.2 Η ισχύς στο εναλλασσόμενο ρεύμα

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα υπάρχουν τρία είδη ισχύος: Η φαινόμενη ισχύς, η πραγματική ισχύς και η άεργη ισχύς. Το σύνολο της ισχύος που απορροφά ένα εναλλασσόμενο φορτίο ονομάζεται φαινόμενη ισχύς (apparent power). Συμβολίζεται με το γράμμα S και έχει ως μονάδα μέτρησης το 1 VA (Volt-Ampere). Συνίσταται από την πραγματική ισχύ P (active power) και τη φανταστική ή αλλιώς άεργη ισχύ Q (reactive power). Τα μεγέθη των ισχύων είναι πάντα διανυσματικά.

Στο σχήμα 5, αναπαρίσταται η φαινόμενη ισχύς S πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Η φαινόμενη ισχύς είναι ίση η μεγαλύτερη από την πραγματική ισχύ (λόγω των άεργων επαγωγικών ηλεκτρικών στοιχείων στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος).



Σχήμα 5. Η φαινόμενη ισχύς στο μιγαδικό επίπεδο

Η φαινόμενη ισχύς αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό κάθε ηλεκτρικής συσκευής, για τον προσδιορισμό της ισχύος. Αποτελείται από το γινόμενο της ενεργού έντασης με την ενεργό τάση και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S = V_{\text{εν}} * I_{\text{εν}} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.7)$$

όπου

$V_{\text{εν}}$: η ενεργή τιμή της τάσης στα άκρα του καταναλωτή.

$I_{\text{εν}}$: η ενεργή τιμή του ρεύματος στα άκρα του καταναλωτή.

Πραγματική ισχύς ή ενεργός ισχύς (συμβολίζεται με P), ονομάζεται η ισχύς που καταναλώνεται στο ωμικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ενός κυκλώματος, υπό μορφή θερμότητας. Μονάδα μέτρησης της πραγματικής ισχύος είναι το 1 Watt (W). Η πραγματική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P = V_{εν} * I_{εν} * \cos\phi \quad (1.8)$$

όπου

$V_{εν}$: η ενεργή τιμή της τάσης στα άκρα του καταναλωτή.

$I_{εν}$: η ενεργή τιμή του ρεύματος στα άκρα του καταναλωτή.

$\cos\phi$: συνημίτονο της γωνίας ϕ (συντελεστής ισχύος).

Η σχέση 1.8, μας δείχνει ότι η ενεργή ισχύς που απορροφά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος είναι σταθερή και εξαρτάται από τη φύση των στοιχείων του φορτίου (εάν περιέχονται χωρητικά ή επαγωγικά στοιχεία). Η ισχύς προκύπτει από το είδος του φορτίου, σύμφωνα με τον πίνακα 1.

Είδος φορτίου	γωνία ϕ	συνημίτονο γωνίας ϕ	Ισχύς
Ωμικό	$\phi = 0$	$\cos\phi = 1$	$P = V * I$
Επαγωγικό	$\phi = +90$	$\cos\phi = 0$	$P = 0$
Χωρητικό	$\phi = -90$	$\cos\phi = 0$	$P = 0$

Πίνακας 1. Η ενεργή ισχύς σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου

Άεργος ισχύς (συμβολίζεται με Q), ονομάζεται η ισχύς που παρουσιάζεται στο επαγωγικό ή στο χωρητικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ενός κυκλώματος. Μονάδα μέτρησης της άεργης ισχύος είναι το 1 VAr (Volt-Amps reactance). Η άεργη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$Q = V_{εν} * I_{εν} * \sin\phi \quad (1.9)$$

όπου

$V_{εν}$: η ενεργή τιμή της τάσης στα άκρα του καταναλωτή.

$I_{εν}$: η ενεργή τιμή του ρεύματος στα άκρα του καταναλωτή.

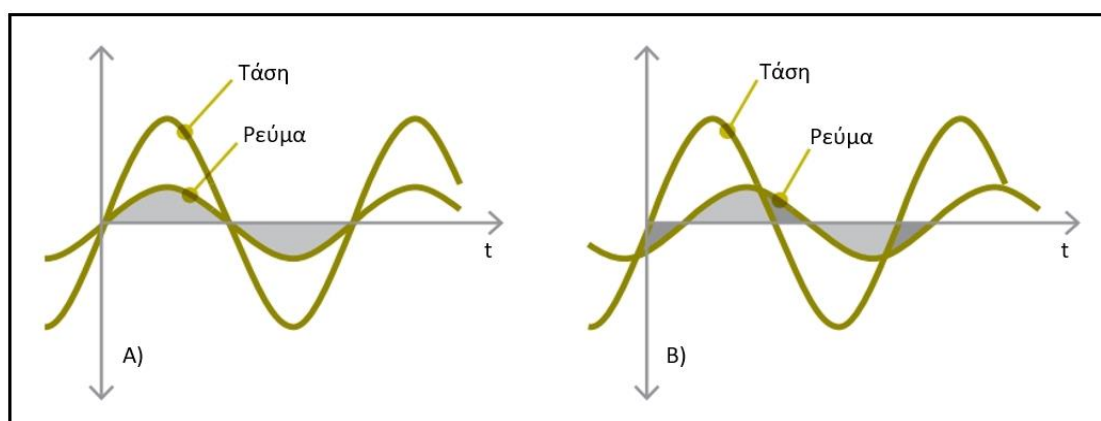
$\sin\phi$: ημίτονο της γωνίας ϕ .

Η αντίστοιχη ανάλυση για τη μεταβολή της άεργης ισχύος, σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου δίνεται στον πίνακα 2.

Είδος φορτίου	γωνία ϕ	συνημίτονο γωνίας ϕ	Ισχύς
Ωμικό	$\phi = 0$	$\eta\mu\phi = 0$	$Q = 0$
Επαγωγικό	$\phi = +90$	$\eta\mu\phi = 1$	$Q = V \cdot I$
Χωρητικό	$\phi = -90$	$\eta\mu\phi = -1$	$Q = -V \cdot I$

Πίνακας 2. Η άεργη ισχύς σαν συνάρτηση της μορφής του φορτίου

Η φαινόμενη ισχύς (S), είναι το γεωμετρικό διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής και άεργης ισχύος. Αναπαριστώντας οπτικά τη φαινόμενη ισχύ, είναι ουσιαστικά το άθροισμα των ανοιχτόχρωμων και των σκουρόχρωμων περιοχών (σχήμα 6.B).



Σχήμα 6. Αναπαράσταση της φαινόμενης ισχύος σε AC σήμα

Η πραγματική ωμική ισχύς (ή αλλιώς μέση ενεργή συνιστώσα της ισχύος P), η οποία είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του ωφέλιμου έργου, μπορεί να θεωρηθεί η ανοιχτόχρωμα σκιασμένη περιοχή του σχήματος 6.A και 6.B. Η πραγματική ισχύς είναι η ικανότητα ενός κυκλώματος να παράγει έργο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Η φανταστική συνιστώσα της ισχύος που ονομάζεται άεργη (ή επαγωγική ισχύς), μπορεί να θεωρηθεί ως η σκουρόχρωμα σκιασμένη περιοχή του σχήματος 6.B. Η άεργη ισχύς είναι το μέτρο της αποθηκευμένης ενέργειας που επιστρέφει στην ηλεκτρική πηγή κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ένα ωμικό φορτίο δεν απορροφά αλλά ούτε και παράγει άεργη ισχύ. Αντίθετα, το καθαρά επαγωγικό φορτίο απορροφά μόνο άεργη ισχύ, ενώ το καθαρά χωρητικό φορτίο παράγει άεργη ισχύ.

Η ελαχιστοποίηση της άεργου ισχύος είναι πολύ σημαντική για την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών αλλά και για το δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει η τιμή $\cos\phi$ να είναι κοντά στη μονάδα (δηλαδή κοντά στην τιμή 1).

1.2.3 Συντελεστής ισχύος (συνφ)

Μια ηλεκτρική εγκατάσταση αποτελείται από πολλούς καταναλωτές. Κάποιοι από αυτούς είναι ωμικοί και κάποιοι επαγωγικοί. Στους ωμικούς καταναλωτές έχουμε πλήρη μετατροπή της φαινόμενης ισχύος σε πραγματική. Οι επαγωγικοί καταναλωτές χρησιμοποιούν και αυτοί πραγματική ισχύ αλλά και άεργη για το σχηματισμό των μαγνητικών τους πεδίων.

Επειδή η πραγματική ισχύς και η άεργη ισχύς αποτελούν αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της φαινόμενης ισχύος, από τις σχέσεις 1.7 και 1.8 προκύπτει ότι:

$$P = S * \cos\phi \Rightarrow \cos\phi = \frac{P}{S} \quad (1.10)$$

Επίσης, από τις σχέσεις 1.7 και 1.9, προκύπτει ότι:

$$Q = S * \eta\mu\phi \Rightarrow \eta\mu\phi = \frac{Q}{S} \quad (1.11)$$

Ακολούθως, ισχύει ότι:

$$\varepsilon\phi\phi = \frac{Q}{P} \quad (1.12)$$

Από τις σχέσεις 1.7 και 1.10, προκύπτει ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi$) μιας εγκατάστασης. Δηλαδή:

$$\cos\phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{V_{εν} * I_{εν} * \cos\phi}{V_{εν} * I_{εν}} \quad (1.13)$$

όπου

P: η πραγματική ισχύς.

Q: η άεργος ισχύς.

V_{εν}: η ενεργή τιμή της τάσης στα άκρα του καταναλωτή.

I_{εν}: η ενεργή τιμή του ρεύματος στα άκρα του καταναλωτή.

συνφ: συνημίτονο της γωνίας φ (συντελεστής ισχύος).

Ο βαθμός κατανάλωσης έργου ισχύος από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα εκφράζεται με το μέγεθος του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ (power factor), ως αναλογία μεταξύ της πραγματικής προς τη φαινόμενη ισχύ του κυκλώματος (ο λόγος των τιμών Watt και VA δηλαδή). Το ϕ εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης. Εξ' ορισμού είναι ένας αδιάστατος αριθμός και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Μια τιμή μεταξύ 0,85 και 1,0 θεωρείται καλός συντελεστής ισχύος. Όσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής ισχύος, τόσο πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ενέργεια.

Έχοντας μεγάλη έργο ισχύ (μικρή τιμή για το $\cos\phi$), έχουμε και μεγαλύτερα ρεύματα, τα οποία προκαλούν περισσότερες απώλειες ισχύος και απαιτούν ταυτόχρονα μεγαλύτερης διατομής καλώδια. Είναι φανερό ότι η πραγματική ισχύς εξαρτάται ιδιαίτερα από την τιμή του $\sin\phi$.

Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος, δηλαδή η μεταβολή της τιμής του $\sin\phi$, επιτυγχάνεται με την προσθήκη παράλληλα στον καταναλωτή κατάλληλων πυκνωτών, οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη έργο ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο η χωρητική αντίσταση ελαττώνει την γωνία ϕ . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πραγματική ισχύς να παραμένει ίδια, ενώ ελαττώνεται η έργο και η φαινόμενη ισχύς.

Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούνται βατόμετρα (μονοφασικά και τριφασικά), τα οποία είναι σε θέση να προσδιορίσουν το συντελεστή ισχύος με μεγάλη ακρίβεια. Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε μια εγκατάσταση, είναι οι παρακάτω:

α) Ατομική αντιστάθμιση: Εφαρμόζεται σε κάθε καταναλωτή ξεχωριστά (ατομικά) και μπορεί να εφαρμοστεί σε μονοφασική ή τριφασική εγκατάσταση.

β) Ομαδική αντιστάθμιση: Εφαρμόζεται σε πολλούς καταναλωτές ταυτόχρονα, όταν είναι της ίδιας ισχύος και λειτουργούν για τον ίδιο αριθμό ωρών ταυτόχρονα.

γ) Κεντρική αντιστάθμιση: Εφαρμόζεται σε πολλούς καταναλωτές ανόμοιους μεταξύ τους, από πλευράς ισχύος και ωρών λειτουργίας.

1.2.4 Ηλεκτρική ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από μια ηλεκτρική συσκευή ή παρέχεται από μια ηλεκτρική πηγή υπολογίζεται από τον τύπο της ισχύος. Δηλαδή:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow W = P * t \quad (1.14)$$

όπου

P: η ισχύς σε Watt.

t: ο χρόνος σε Sec.

W: η ενέργεια σε Joule.

Η ηλεκτρική ενέργεια, είναι ουσιαστικά το γινόμενο της ηλεκτρικής ισχύος επί τον αντίστοιχο χρόνο. Αν στη σχέση 1.14, αντικαταστήσουμε την ηλεκτρική ισχύ P με το ισοδύναμο της ($P = V_{εν} * I_{εν}$), προκύπτει ότι:

$$W = V_{εν} * I_{εν} * t \quad (1.15)$$

όπου

W: η ηλεκτρική ενέργεια (σε Joules).

V_{εν}: η ενεργός τιμή της τάση (σε Volts).

I_{εν}: η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος (σε Amperes).

t: ο χρόνος (σε s).

Επειδή η μονάδα Joule είναι πολύ μικρή, συνήθως χρησιμοποιείται η 1 Wh (βατώρα) για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισοδυναμία Wh και Joule προκύπτει ως εξής:

$$3.600 \text{ Joule} = 1 \text{ Wh και } 3.600.000 \text{ Joule} = 1 \text{ KWh}$$

Η Wh είναι πιο κοντά στα ανθρώπινα μέτρα και αποτελεί το γινόμενο του Watt (ισχύς που είναι εγκατεστημένη σε μια οικία) και του χρονικού διαστήματος h (hour). Η Wh προσεγγίζει περισσότερο τα ανθρώπινα χρονικά μέτρα και σταθμά. Η μέτρηση της ενεργειακής κατανάλωσης είναι σημαντικό ζήτημα και η εδραίωση των έξυπνων μετρητών στα ευφυή δίκτυα ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας [5].

Η Δ.Ε.Η. μετράει την ενέργεια που έχουμε καταναλώσει στις οικίες μας σε KWh (κιλοβατώρες) και οι λογαριασμοί προκύπτουν ανάλογα με την ποσότητα ενέργειας που έχει καταναλωθεί. Με την έλευση των έξυπνων μετρητών ενέργειας, οι πάροχοι ηλεκτρικής ενέργειας επιτηρούν και ελέγχουν καλύτερα το δίκτυο τους [\[6\]](#).

Κεφάλαιο 2: Ενσωματωμένα συστήματα, μικροελεγκτές και ασύρματα πρότυπα για πλατφόρμες IoT

2.1 Ενσωματωμένα συστήματα

2.1.1 Περιγραφή ενσωματωμένων συστημάτων

Ενσωματωμένο σύστημα καλείται το υπολογιστικό σύστημα, το οποίο εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες, αποτελείται από κομμάτια υλικού υψηλών επιδόσεων και εξατομικευμένο λογισμικό. Το λογισμικό μέρος, είναι αυτό που κατευθύνει και ελέγχει το υλικό μέρος για την ορθή λειτουργία του συστήματος.

Το ενσωματωμένο σύστημα είναι "ενσωματωμένο" τυπικά σε κάποια άλλη διάταξη και η λειτουργία του δεν προορίζεται να αλλάξει μελλοντικά. Περιέχει συνήθως, πολλά επιμέρους κυκλώματα στο ίδιο υπόστρωμα πυριτίου μαζί με τον επεξεργαστή. Τα ενσωματωμένα συστήματα πρέπει να λειτουργούν αδιάλειπτα για χρόνια χωρίς σφάλματα και σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να ανακάμπτουν μόνα τους από δυσλειτουργίες.

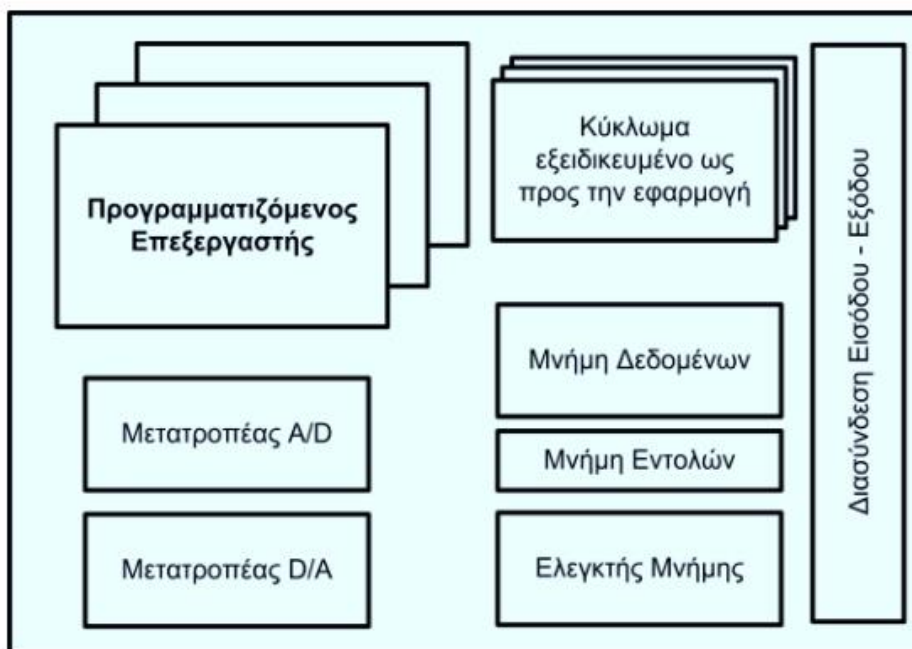
Τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο πολλών σύγχρονων συσκευών. Έχουν γίνει μέρος της σύγχρονης καθημερινότητας μας, καθώς τα συναντάμε σε οικιακές συσκευές, κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές κάμερες, δέκτες GPS, εκτυπωτές, τηλεοράσεις, κονσόλες παιχνιδιών, φούρνους μικροκυμάτων, αυτοματισμούς σπιτιών, συστήματα επιτήρησης και ασφάλειας, συσκευές πολυμέσων, ATM, ταμειακές μηχανές κλπ. Οι προσωπικοί υπολογιστές (PC) και τα ενσωματωμένα συστήματα με την πάροδο του χρόνου, τείνουν όλο και περισσότερο να συγχωνευτούν μεταξύ τους.

Τα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα βασίζονται σε μικροελεγκτές και μικροεπεξεργαστές και πλεονεκτούν ως προς το μικρό τους μέγεθος, τη μικρή κατανάλωση ενέργειας, την ευελιξία, και την εύκολη διασύνδεση τους.

Ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται από πολλά επιμέρους τμήματα. Συνήθως, ένα ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται από έναν ή περισσότερους επεξεργαστές (που δεν είναι γενικού σκοπού), τους μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος (ADC – Analog to Digital Converters), τη μνήμη εντολών, τη μνήμη δεδομένων, τον ελεγκτή της μνήμης δεδομένων και τις διασυνδέσεις εισόδου-εξόδου. Οι μονάδες εισόδου-εξόδου συγκροτούν την επικοινωνία του ενσωματωμένου συστήματος με τον πραγματικό κόσμο. Η τυπική δομή ενός ενσωματωμένου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 7.

Ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρογραφία ενός τυπικού υπολογιστικού συστήματος. Τα ενσωματωμένα λειτουργικά συστήματα μπορούν να ξεκινήσουν από μια μνήμη ROM ή Flash/EEPROM, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης αποθηκευτικής μονάδας (π.χ. ενός σκληρού δίσκου).

Το λειτουργικό σύστημα των ενσωματωμένων συστημάτων έχει συνήθως πολύ μικρό μέγεθος (μερικά KB), για αυτό και δεν είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη. Οι εντολές του προγράμματος που αναφέρονται στα ενσωματωμένα συστήματα, είναι γνωστές ως firmware. Οι πρώτες εκδόσεις των ενσωματωμένων συστημάτων είχαν μικρά προγράμματα, τα οποία εκτελούσαν απλές λειτουργίες. Μετέπειτα προέκυψε η απαίτηση για περισσότερες λειτουργίες, πιο απαιτητικές εφαρμογές και προγράμματα πιο φιλικά προς το χρήστη.



Σχήμα 7. Τυπική δομή ενός ενσωματωμένου συστήματος

Τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να υλοποιηθούν διεξοδικά με πολλούς τρόπους. Κάθε λύση έχει μεμονωμένα χαρακτηριστικά και ταυτίζεται με συγκεκριμένες ανάγκες. Το κόστος σχεδιασμού πρέπει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα και υπάρχει πάντα μια αλληλοεξάρτηση ανάμεσα στον επεξεργαστή και τα υπόλοιπα στοιχεία της μονάδας κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

Η επεξεργασία των σημάτων σε ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε μη προγραμματιζόμενο υλικό (IC εξειδικευμένης εφαρμογής), είτε σε προγραμματιζόμενο υλικό δηλαδή FPGAs (συστοιχίες προγραμματιζόμενων πυλών).

Στα ενσωματωμένα συστήματα υφίσταται πάντα ο συ-σχεδιασμός του υλικού και του λογισμικού. Στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού επιλέγεται ο εξειδικευμένος επεξεργαστής που καλύπτει συγκεκριμένες απαιτήσεις, μαζί με τις αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες που τον συνοδεύουν όπως οι κρυφές μνήμες, δυνατότητα πολλαπλής επεξεργασίας κλπ.

Ο συ-σχεδιασμός υλικού και λογισμικού σημαίνει σχεδιασμό από κοινού αρχιτεκτονικών υλικού και λογισμικού, ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι που αφορούν το συνολικό κόστος και να αυξηθεί η απόδοση. Με την ευρεία εξάπλωση των νέων τεχνολογιών επικοινωνίας, τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης στα συστήματα και τη φορητότητα των συσκευών βελτιώνεται ολόένα και περισσότερο η ποιότητα ζωής των πολιτών και των επιχειρήσεων [7].

Στην υλοποίηση τους υπάρχει μεγάλη ποικιλία επιλογών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα ένας επεξεργαστής γενικής χρήσης (π.χ. Intel Atom), μικροεπεξεργαστές των 8 bit (π.χ. ATmega 328P), σύνθετοι επεξεργαστές των 32 bit (π.χ. Arm Cortex A15) ή ακόμα και εξειδικευμένα κυκλώματα υλικού (ASIC).

Στα ενσωματωμένα η πιο διαδεδομένη μορφή επεξεργασίας είναι η ετερογενής, στην οποία πολλοί διαφορετικοί επεξεργαστές βρίσκονται στο ίδιο σύστημα. Ένα λειτουργικό σύστημα ελέγχει ατομικά κάθε μικροεπεξεργαστή, ο καθένας από τους οποίους τρέχει μεμονωμένα ένα σύνολο διεργασιών.

Μια άλλη κατηγορία ενσωματωμένων συστημάτων, είναι αυτά που ενσωματώνουν επεξεργαστές ψηφιακού σήματος DSP (Digital Signal Processors). Οι DSP επεξεργαστές ανήκουν στη κατηγορία των συστημάτων επεξεργασίας σήματος και πολυμέσων. Οι DSP επεξεργαστές διαθέτουν κατάλληλη αρχιτεκτονική και αριθμητικές μονάδες, ώστε να επεξεργάζονται με μεγάλη ταχύτητα σήματα ήχου, εικόνες και όχι μόνο. Η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι υψηλότερη λόγω των λιγότερων κύκλων ρολογιού, των απλούστερων λειτουργικών μονάδων και της απλούστερης λογικής ελέγχου και σχεδιασμού.

Με την ανάπτυξη των ενσωματωμένων συστημάτων υπήρξε παράλληλα και ανάπτυξη στην πολυπλοκότητα των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται. Πλέον, η επεξεργαστική πολυπλοκότητα των εφαρμογών είναι αρκετά σύνθετη.

Ο σχεδιασμός ενός ενσωματωμένου συστήματος δεν είναι μια τυποποιημένη διαδικασία που καταλήγει πάντα στην ίδια υλοποίηση. Ο σχεδιαστής βελτιστοποιεί την κάθε λύση, ανάλογα τα χαρακτηριστικά του συστήματος και σύμφωνα πάντα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Η διασυνδεσιμότητα του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), στηρίζεται σε ενσωματωμένα συστήματα, φυσικές συσκευές, αισθητήρες, ενεργοποιητές, λογισμικό και προηγμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας [8].

Όσον αφορά τον όγκο πωλήσεων, οι ενσωματωμένοι επεξεργαστές έχουν ξεπεράσει κατά πολύ τους κοινούς επεξεργαστές Η/Υ. Ειδικά στον τομέα των ασύρματων και φορητών συσκευών, υπάρχει μια τεράστια απαίτηση για ενσωματωμένους επεξεργαστές και ιδιαίτερα επεξεργαστές επεξεργασίας πραγματικού χρόνου (real time processing). Σύμφωνα με προβλέψεις της Ericsson, ο αριθμός των διασυνδεδεμένων IoT συσκευών αναμένεται το 2022 να αγγίξει τα 1.5 δισεκατομμύρια [9].

Το οικοσύστημα των ενσωματωμένων συστημάτων, παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Εκτελούν ένα συγκεκριμένο αριθμό διεργασιών.
- 2) Έχουν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα (Η/Υ).
- 3) Έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος.
- 4) Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (π.χ. μετρήσεις).
- 5) Λειτουργούν δίχως την παρέμβαση κάποιου ανθρώπινου χειριστή και είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα στο να λειτουργούν αδιάκοπα.
- 6) Έχουν ιδιαίτερα χαμηλό κόστος κατασκευής ώστε να κατασκευάζονται μαζικά.
- 7) Έχουν μικρό μέγεθος και βάρος, ώστε να είναι ευέλικτα.
- 8) Έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν ασταμάτητα για μεγάλα διαστήματα (έως και 15 χρόνια συνεχόμενα).
- 9) Δεν είναι εύκολη η διαδικασία ενημέρωσης του λογισμικού τους.
- 10) Η ασφάλεια σε ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι συνήθως περιορισμένη.
- 11) Προορίζονται κυρίως για καταναλωτικές συσκευές.

2.1.2 Τυπικοί δίαυλοι ενσωματωμένων συστημάτων

Η πρώτη επίσημη πρόταση προήλθε από την IBM το 1980, με τον πρωτότυπο δίαυλο της ISA (Industry Standard Association) των 8 bit. Χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους προσωπικούς υπολογιστές (Personal Computers) της IBM και στη συνέχεια από τους υπόλοιπους κατασκευαστές συμβατών υπολογιστών (IBM PC compatible). Ο δίαυλος αυτός επεκτάθηκε γρήγορα στα 16 bit και το 1988 έγινε 32 bit και ονομάστηκε extended ISA (EISA).

Στη συνέχεια η IBM προσπάθησε να καθιερώσει ένα δικό της δίαυλο, τον MCA (MicroChannel Architecture), χωρίς όμως να δίνει δικαιώματα χρήσης στους υπόλοιπους κατασκευαστές. Οι υπόλοιποι κατασκευαστές έμειναν στο δίαυλο EISA και πρότειναν δύο νέες εκδοχές. Το δίαυλο PCI (Peripheral Component Interconnection) και το δίαυλο VESA local bus.

Ο δίαυλος PCI (Peripheral Component Interconnect) προτάθηκε το 1990 και υποστήριζε αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων επικοινωνίας (σε αντίθεση με τους ISA και EISA διαύλους). Αποτελεί τον πιο κλασσικό δίαυλο επικοινωνίας, ο οποίος χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και σήμερα (αν και τείνει να εξαλειφθεί). Σε αντίθεση με τον ISA που λειτουργούσε στα 8 MHz, ο δίαυλος PCI είναι 32 bit και λειτουργεί στα 33 και 66 MHz αντίστοιχα. Στη συνέχεια, ο δίαυλος PCI εξελίχθηκε σε ένα σειριακό υβριδικό δίαυλο με δυνατότητα παραλληλίας και ονομάστηκε PCIe (PCI express). Ο δίαυλος αυτός αποτελείται από κανάλια επικοινωνίας (ονομάζονται lanes) και είναι τύπου “σημείο προς σημείο”. Με αυτό το τρόπο επικοινωνίας μια συσκευή, συνδέεται κατά αποκλειστικότητα σε μια άλλη συσκευή. Το κάθε κανάλι επιτρέπει την αμφίδρομη αποστολή και λήψη δεδομένων μέσω δύο γραμμών με κατάλληλη σειριακή κωδικοποίηση.

Στους διαύλους PCIe, ένα περιφερειακό μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να χρησιμοποιεί πολλαπλά κανάλια (4 έως 32). Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται παράλληλα. Οι δίαυλοι PCIe είναι αρκετά διαδεδομένοι στα υπολογιστικά συστήματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα ενσωματωμένα συστήματα, όταν απαιτείται μεγάλο εύρος ζώνης.

Με την πάροδο των ετών αποσύρθηκαν σταδιακά οι παράλληλοι δίαυλοι επικοινωνίας και άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι σειριακοί δίαυλοι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η αντικατάσταση των παράλληλων διαύλων IDE (Integrated Drive Electronics) από τους σειριακούς διαύλους SATA (Serial AT Attachment).

Το 1990 η εταιρεία ARM εισήγαγε το δίαυλο AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture), για τη διασύνδεση διαφόρων δομοστοιχείων πάνω σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα ενός ARM επεξεργαστή. Θεωρείται de facto λύση για τη σχεδίαση ενσωματωμένων συστημάτων SoC (System on Chip). Ο δίαυλος AMBA χωρίζεται σε υποκατηγορίες ανάλογα με το είδος των συσκευών που συνδέονται στο σύστημα.

Το 1994, δημιουργήθηκε μέσα από μια κοινοπραξία επτά εταιρειών ο δίαυλος USB (Universal Serial Bus). Η τελευταία έκδοση του είναι η USB 3.2. Η σημαντικότερη καινοτομία αυτού του διαύλου ήταν ότι εκτός από τα δεδομένα, μεταφέρει και ενέργεια από τον υπολογιστή στα περιφερειακά (συγκεκριμένα $5 \text{ VDC} \times 900 \text{ mA} = 4.5 \text{ Watt}$ για την έκδοση USB 3.0).

Επίσης είναι Plug and play, οπότε δεν απαιτείται η ρύθμιση παραμέτρων επικοινωνίας από την πλευρά του χρήστη. Άλλο ένα πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να υποστηρίξει συσκευές χαμηλού εύρους ζώνης (π.χ. πληκτρολόγιο) αλλά και συσκευές υψηλού εύρους ζώνης (π.χ. σκληρούς δίσκους). Ο δίαυλος USB είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στα ενσωματωμένα συστήματα, καθώς δίνει τη δυνατότητα να διασυνδεθούν πολλών ειδών περιφερειακά.

Η Apple ανέπτυξε στις αρχές του 1990 το πρωτόκολλο Firewire, το οποίο προτυποποιήθηκε κατά IEEE 1394. Στο Firewire, οι συσκευές συνδέονται αλυσιδωτά (Ring τοπολογία), ώστε να μεταφερθούν τα δεδομένα από τη μια συσκευή στην άλλη. Κάθε έκδοση Firewire έχει και διαφορετικό βύσμα σύνδεσης και παρέχει ενέργεια έως και 45 Watt (30V στα 1.5 A). Με την έλευση του USB 3.1 και 3.2, το μέλλον για το Firewire φαίνεται απειλητικό.

Άλλη μια ενδιαφέρουσα διεπαφή που συναντάμε είναι η σειριακή επικοινωνία RS232, η οποία στηρίζει ταχύτητες έως και 115200 bit/sec. Η διασύνδεση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων επειδή επιτυγχάνεται αποστολή και λήψη δεδομένων με δύο μόνο καλώδια (Rx και Tx).

Υπάρχουν και άλλα σειριακά πρωτόκολλα όπως το RS422, το οποίο χρησιμοποιείται για αποστάσεις έως και 1.5 km (για βιομηχανικές εφαρμογές). Ακολούθως υπάρχει και το πρωτόκολλο RS485, το οποίο είναι παρόμοιο με το RS422 και επιτρέπει την ύπαρξη πολλαπλών κύριων διαύλων.

Στα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται και πιο απλοί δίαυλοι επικοινωνίας, οι οποίοι φέρουν τις ονομασίες 4-wire, 3-wire, 2-wire και 1-wire. Οι ονομασίες αυτές προέκυψαν από τον αριθμό των καλωδίων που χρησιμοποιούν οι περιφερειακές συσκευές και οι αισθητήρες, για να επικοινωνήσουν με μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας.

Τυπικός δίαυλος 4-wire, είναι ο SPI (Serial Peripheral Interface), ο οποίος χρησιμοποιεί τέσσερα καλώδια (για ρολόι, εγγραφή, ανάγνωση, επιλογή περιφερειακού). Άλλος ένας δίαυλος επικοινωνίας τεσσάρων καλωδίων είναι ο SSI (Synchronous Serial Interface), ο οποίος βασίζεται στο πρότυπο RS232, καθώς χρησιμοποιεί τέσσερα καλώδια για την επικοινωνία (δύο αγωγούς για το ρολόι και δύο αγωγούς για τα δεδομένα).

Ο δίαυλος I2C αναπτύχθηκε από τη Philips και υποστηρίζει πολλαπλούς κύριους διαύλους και πολλαπλά περιφερειακά. Υποστηρίζει συχνότητες λειτουργίας από 100 KHz έως και 5 MHz. Το I2C πρωτόκολλο είναι αρκετά διαδεδομένο στα ενσωματωμένα συστήματα επειδή χρησιμοποιεί ελάχιστα καλώδια, έχει πολύ μικρό κόστος και διαβάζει εύκολα δεδομένα από περιφερειακά και αισθητήρες.

Ο δίαυλος επικοινωνίας με ένα καλώδιο (1-Wire), προτάθηκε από την εταιρεία Dallas Semiconductor και χρησιμοποιεί ένα κοινό καλώδιο για μετάδοσης δεδομένων, σηματοδότηση και ρολόι (Clock). Η απόσταση που υποστηρίζεται με το 1-Wire είναι πολύ μεγαλύτερη από το I2C. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι πιο δημοφιλείς δίαυλοι που έχουν χρησιμοποιηθεί από το 1980 μέχρι σήμερα.

Δίαυλος	Bits	Mhz	Ταχύτητα (Mb/s)
8 bit ISA	8	8	4
16 bit ISA	16	8	8
EISA	32	8.33	33.3
32 bit PCI	32	33	133
64 bit PCI	64	33	266
1x AGP	64	66	266
8x AGP	64	533	2100
VL BUS	33	50	132
SCSI I/II	8	5	40
FAST SCSI	8	10	80
Wide SCSI	16	10	60
Ultra SCSI	16	20	320
PCIe x1	1	2500	>500
RAMBUS	32	1066	4200
IDE/PATA	16	66	133
SATA 1.0	1	1500	150
SATA 2.0	1	-	300
SATA 3.0	1	-	600
SATA 3.2	1	-	1969

Πίνακας 3. Δημοφιλείς δίαυλοι επικοινωνίας σε ενσωματωμένα συστήματα

2.2 Μικροελεγκτές

2.2.1 Εισαγωγή στους μικροελεγκτές

Η επιθυμία πολλών κατασκευαστών να δημιουργήσουν συστήματα με περισσότερες δυνατότητες, αυτόνομα και ταυτόχρονα μικρά σε μέγεθος, οδήγησε στην ανάγκη για ενσωμάτωση όλων των λειτουργιών ενός υπολογιστή σε ένα ή μερικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs).

Ο μικροελεγκτής είναι ένα αυτόνομο υπολογιστικό σύστημα μικρών διαστάσεων, σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) υψηλής κλίμακας ολοκλήρωσης, τεχνολογίας SoC (System on Chip). Αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα εμπεριέχει όχι μόνο τον επεξεργαστή αλλά και μνήμη RAM, ROM ή EEPROM, αριθμητική και λογική μονάδα, εσωτερικούς χρονιστές, μονάδες εισόδου-εξόδου (I/O), κανάλια επικοινωνίας και άλλες περιφερειακές λειτουργικές μονάδες. Ο μικροελεγκτής είναι ένα πλήρες υπολογιστικό σύστημα βελτιστοποιημένο για τον έλεγχο όλων των επιμέρους κυκλωμάτων (hardware).

Η συνύπαρξη όλων των παραπάνω σε ένα και μόνο waffer πυριτίου σημαίνει ότι η ταχύτητα επεξεργασίας αυτομάτως ενισχύεται, καθώς οι περιφερειακές μονάδες χρειάζονται λιγότερο χρόνο για να στείλουν ή να λάβουν δεδομένα. Ένας μικροελεγκτής είναι βελτιστοποιημένος, ώστε να συντονίζει τη ροή των δεδομένων μεταξύ των μονάδων μνήμης και των περιφερειακών συσκευών. Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) χαμηλού και μεσαίου κόστους και αποτελούν παραλλαγή ενός μικροεπεξεργαστή.

Βασικό χαρακτηριστικό των μικροελεγκτών είναι ότι μπορούν να αλληλοεπιδρούν με το φυσικό κόσμο. Παίρνουν πληροφορίες και ερεθίσματα από τις αναλογικές τους εισόδους, ψηφιοποιούν τα δεδομένα, τα επεξεργάζονται και στη συνέχεια προβάλλουν τα αποτελέσματα μέσω κάποιου οπτικού μέσου ή οδηγούν κατάλληλες εξόδους και επιμέρους κυκλώματα.

Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής και τη λειτουργία τους. Στη σημερινή εποχή χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως: βιομηχανικό έλεγχο/συστήματα αυτοματισμών, οικιακές συσκευές, δίκτυα αισθητήρων για περιβαντολογικούς ελέγχους, συστήματα αυτόματων συναλλαγών, συστήματα μετρήσεων, έξυπνα σπίτια, κυκλώματα τηλεπικοινωνιών, συστήματα τηλεματικής, συστήματα συλλογής δεδομένων (data acquisition), εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος κλπ.

Είναι σε θέση να οδηγούν κυκλώματα όπως ηλεκτρονόμους, SSR (Solid state Relays), SCR (Silicon Controlled Rectifiers), διόδους LED και κινητήρες (servo/step motor). Η βασική αρχιτεκτονική των μικροελεγκτών δε διαφέρει πολύ από αυτή των κοινών μικροεπεξεργαστών.

Λόγω του ισχυρού ανταγωνισμού αλλά και της τάσης ενσωμάτωσης των μικροελεγκτών σε κάθε ηλεκτρονική συσκευή, η βιομηχανία των μικροελεγκτών έχει καταλήξει στην παραγωγή πολύ ανταγωνιστικών μοντέλων για απλές αλλά και πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Διακρίνονται οι ακόλουθες βασικές κατηγορίες μικροελεγκτών:

- 1) Μικροελεγκτές 8-bit: είναι γενικής χρήσης, ιδιαίτερα χαμηλού κόστους και με πολύ μικρό αριθμό ακροδεκτών (λιγότερους από 8). Σχεδιάζονται με έμφαση τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την αυτονομία. Λειτουργούν με λίγα εξωτερικά εξαρτήματα και δεν υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της μνήμης τους.
- 2) Μικροελεγκτές 8-bit και 16/32-bit: είναι γενικής χρήσης και χαμηλού κόστους μικροελεγκτές, με μέτριο έως σχετικά μεγάλο αριθμό ακροδεκτών. Διαθέτουν μεγάλο αριθμό θυρών επικοινωνίας όπως UART, I2C, SPI ή CAN, μετατροπείς αναλογικών

σημάτων σε ψηφιακά (ADCs) και μετατροπείς ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά (DACs). Ορισμένες φορές υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης της εξωτερικής τους μνήμης.

- 3) Μικροελεγκτές 32-bit: είναι μεσαίου κόστους και γενικής χρήσης, με μεγάλο αριθμό ακροδεκτών. Στην κατηγορία αυτή δίνεται έμφαση στην ταχύτητα εκτέλεσης των εντολών, υπάρχουν πολλές επιλογές σε περιφερειακές μονάδες και υποστηρίζονται πολλαπλοί τρόποι αποθήκευσης των δεδομένων (Flash μνήμες, SSD μέσα αποθήκευσης κλπ.).
- 4) Μικροελεγκτές εξειδικευμένων εφαρμογών: ενσωματώνουν εξειδικευμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Αυτή η κατηγορία μικροελεγκτών χρησιμοποιείται σε τηλεπικοινωνιακές συσκευές (π.χ. modems).

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι μικροελεγκτές, είναι τα ακόλουθα:

- 1) Επιτυγχάνουν αυτονομία μέσω της ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών και υποσυστημάτων (όπως μνήμες, αισθητήρες κλπ.).
- 2) Υπάρχει ευκολία στην υλοποίηση εφαρμογών λόγω απλουστευμένων διασυνδέσεων.
- 3) Η κατανάλωση ισχύος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, μεγιστοποιώντας παράλληλα τη φορητότητα.
- 4) Το κόστος κατασκευής τους είναι πολύ μικρό.
- 5) Υπάρχει μεγάλη αξιοπιστία.
- 6) Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.
- 7) Υποστηρίζονται πολλοί ακροδεκτές ψηφιακών/αναλογικών εισόδων και εξόδων.
- 8) Το μέγεθος του συνολικού υπολογιστικού συστήματος είναι ιδιαίτερα μικρό.

2.2.2 Δομή ενός μικροελεγκτή

Όπως κάθε υπολογιστικό σύστημα, έτσι και ένας μικροελεγκτής περιέχει κεντρική μονάδα επεξεργασίας, καταχωρητές, κυκλώματα μνήμης, κυκλώματα ελέγχου περιφερειακών συσκευών, θύρες επικοινωνίας εισόδου-εξόδου(I/O) και τοπικό ταλαντωτή για την παροχή παλμών χρονισμού (clock). Ένας μικροελεγκτής είναι σε θέση να αντιληφθεί το εξωτερικό του περιβάλλον, να πραγματοποιήσει με ακρίβεια υπολογισμούς και να καταχωρήσει αποτελέσματα πράξεων στη μνήμη RAM που διαθέτει.

Οι σύγχρονοι μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένα αρκετά περιφερειακά κυκλώματα, που τους δίνουν αυξημένες δυνατότητες. Παραδείγματα τέτοιων κυκλωμάτων είναι οι αναλογικο-ψηφιακοί μετατροπείς (ADC), οι ψηφιακο-αναλογικοί μετατροπείς (DAC), γεννήτριες διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM), σύγχρονα/ασύγχρονα κανάλια επικοινωνίας κλπ.

Τα περιφερειακά κυκλώματα είναι αυτά που διαχωρίζουν ένα μικροελεγκτή από ένα επεξεργαστή. Όλες οι περιφερειακές μονάδες στεγάζονται στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC), στην περίπτωση ενός μικροελεγκτή. Οι περιφερειακές μονάδες διασυνδέονται με την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) και τη μνήμη δεδομένων με τρόπο άμεσο, ώστε οι χρόνοι απόκρισης να είναι αμελητέοι.

Οι μικροελεγκτές της σειράς ATmega (π.χ. μοντέλο Arduino Uno) ακολουθώντας την αρχιτεκτονική Harvard, διαθέτουν ξεχωριστούς διαύλους διευθύνσεων για το κυρίως πρόγραμμα και για τα δεδομένα. Ενώ η μνήμη προγράμματος προσπελαύνεται, η μνήμη δεδομένων βρίσκεται σε ανεξάρτητο δίαυλο και μπορεί να διαβαστεί και να γραφτεί.

Ο χώρος της μνήμης προγράμματος αντιστοιχεί στη μνήμη Flash. Ο προγραμματιστής έχει πρόσβαση στην μνήμη του προγράμματος και μπορεί να διαβάσει ή να γράψει σε αυτή.

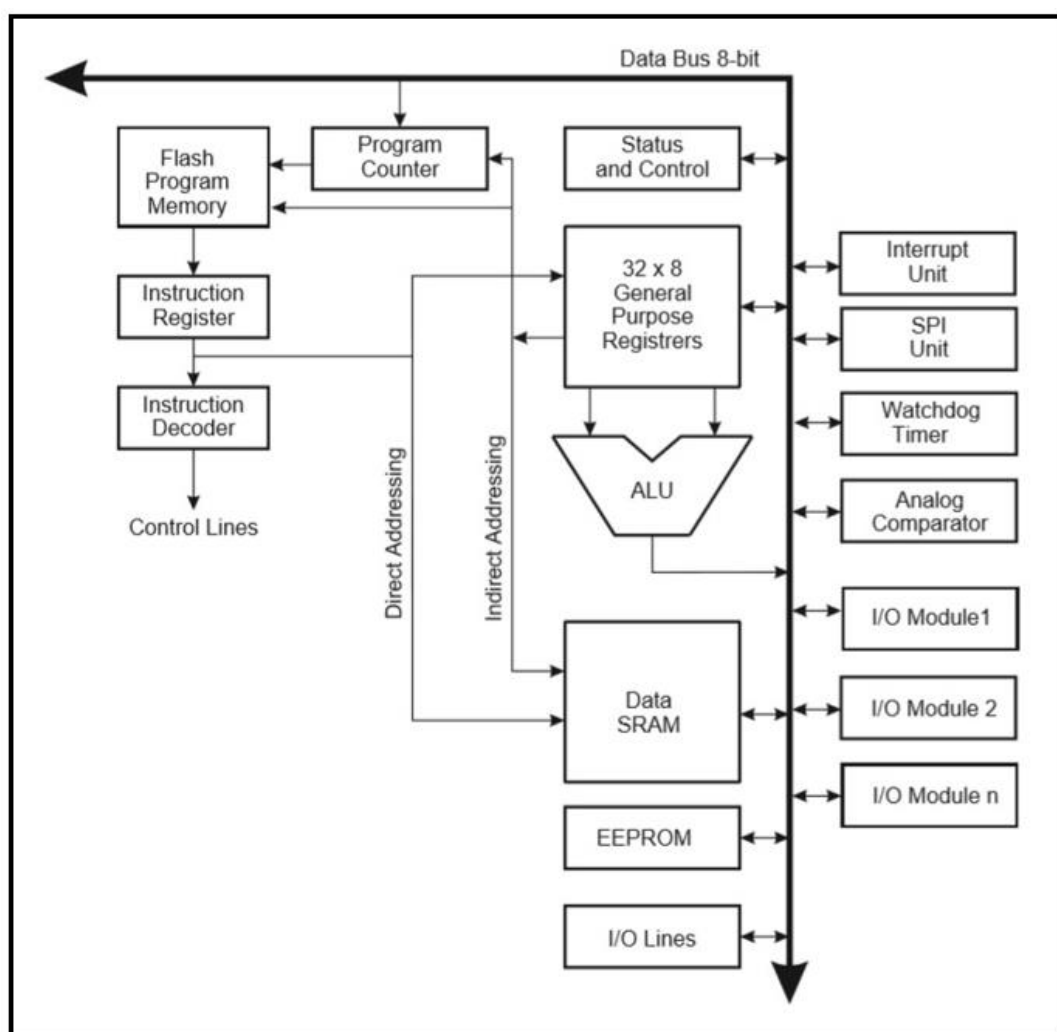
Η μνήμη Flash, προγραμματίζεται με κάποια από τις διαθέσιμες μεθόδους προγραμματισμού και τα περιεχόμενά της δεν τροποποιούνται αν δεν επαναπρογραμματιστεί ο μικροελεγκτής.

Εάν η χωρητικότητα της μνήμης Flash δεν επαρκεί για την αποθήκευση του προγράμματος, μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί μια μνήμη EEPROM. Η μνήμη EEPROM μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (π.χ. καταγραφή τάσεων, ρευμάτων, θερμοκρασιών κ.α.).

Μια μνήμη SRAM χρησιμοποιείται για τη προσωρινή αποθήκευση δεδομένων (κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης) και τα δεδομένα της δεν είναι διαθέσιμα μετά τη διακοπή της τροφοδοσίας της.

Η Flash, η EEPROM και η SRAM είναι όλες ενσωματωμένες σε ένα και μοναδικό IC (Integrated Circuit), καταργώντας την ανάγκη για εξωτερική μνήμη. Σχεδόν όλοι οι μικροελεγκτές διαθέτουν εσωτερική EEPROM και Flash μνήμη, για μόνιμη αποθήκευση των δεδομένων ακόμη και με απουσία τάσης.

Η εσωτερική μνήμη EEPROM δεν διευθυνσιοδοτείται στο χώρο μνήμης του μικροελεγκτή. Η EEPROM προσπελάζεται όπως μια κοινή εξωτερική περιφερειακή συσκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών καταχωρητών δείκτη (pointer registers) και ανάλογες εντολές ανάγνωσης/εγγραφής της EEPROM. Η προσπέλαση της εσωτερικής μνήμης RAM ενός μικροελεγκτή γίνεται σαφώς πιο γρήγορα, από την προσπέλαση μιας μνήμης EEPROM. Στο σχήμα 8 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή ATmega328P της εταιρείας Atmel.



Σχήμα 8. Η αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή ATmega328P

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των αρχιτεκτονικών μειωμένου συνόλου εντολών (RISC), είναι η χρονικά επικαλυπτόμενη εκτέλεση εντολών με τη χρήση της τεχνικής διασωλήνωσης (pipelining). Οι μικροελεγκτές της Atmel βασιζόμενοι στην αρχιτεκτονική RISC υποστηρίζουν

πλήρως μια τέτοια επικάλυψη, με αποτέλεσμα ο ρυθμός εκτέλεσης των εντολών να είναι μια εντολή ανά κύκλο ρολογιού.

Ένας μικροελεγκτής, περιλαμβάνει ένα περιορισμένο set εντολών που μπορεί να εκτελέσει σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του. Στα βασικά κυκλώματα ενός μικροελεγκτή, περιλαμβάνεται επίσης και ένα ρολόι συστήματος το οποίο δημιουργεί τους απαραίτητους παλμούς χρονισμού για να λειτουργήσει ο μικροεπεξεργαστής. Οι χρόνοι εκτέλεσης των εντολών του προγράμματος και ο συγχρονισμός των περιφερειακών μονάδων με τον επεξεργαστή καθορίζονται από τους παραγόμενους παλμούς χρονισμού του ρολογιού. Ο μικροελεγκτής ATmega16 για παράδειγμα, εκτελεί μία εντολή για κάθε ένα παλμό χρονισμού, χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική διασωλήνωσης (pipeline).

Ο προγραμματισμός ενός μικροελεγκτή περιλαμβάνει δύο στάδια. Το πρώτο είναι η συγγραφή του προγράμματος που θα εκτελεί ο μικροελεγκτής και το δεύτερο είναι η φόρτωση του προγράμματος σε μια μνήμη Flash ή EEPROM. Η γλώσσα προγραμματισμού και τα εργαλεία ανάπτυξης στηρίζονται σε γλώσσες υψηλού επιπέδου, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο αυξημένες δυνατότητες. Επιγραμματικά, ένας μικροελεγκτής, μπορεί να περιέχει τα ακόλουθα στοιχεία:

- 1) Αριθμητική και λογική μονάδα εντολών.
- 2) Εσωτερικούς χρονιστές-απαριθμητές.
- 3) Μονάδα αποκωδικοποίησης εντολών.
- 4) Μνήμη προγράμματος.
- 5) Μνήμη δεδομένων.
- 6) Κυκλώματα χρονισμού και ελέγχου.
- 7) Θύρες εισόδου-εξόδου (I/O).
- 8) Μία ή περισσότερες ασύγχρονες σειριακές θύρες επικοινωνίας UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter).
- 9) Σύγχρονες σειριακές θύρες επικοινωνίας (π.χ. I2C, SPI, TWI).

2.2.3 Διαφορές μικροελεγκτών και μικροεπεξεργαστών

Ο μικροελεγκτής είναι ένα αυτόνομο υπολογιστικό σύστημα μικρών διαστάσεων με ενσωματωμένες μνήμες, αριθμητική και λογική μονάδα, χρονιστές και μονάδες εισόδου-εξόδου (I/O). Η λειτουργία του στηρίζεται σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα, το οποίο εκτελεί συγκεκριμένες διεργασίες σύμφωνα με το πρόγραμμα που έχει φορτωθεί στη μνήμη του.

Ένας μικροελεγκτής δεν εξαρτάται από άλλες μονάδες υλικού και ενσωματώνει όλα εκείνα τα βασικά στοιχεία για την ομαλή του λειτουργία. Η ενσωμάτωση περιφερειακών μονάδων, σημαίνει ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών λόγω απλούστερων διασυνδέσεων. Τα λιγοστά εξαρτήματα και ο μειωμένος αριθμός διασυνδέσεων σε ένα μικροελεγκτή οδηγούν στην ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, στη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και στη μεγιστοποίηση της φορητότητας. Υπάρχει επίσης μεγαλύτερη αυτονομία και ευελιξία σε σχέση με ένα μικροεπεξεργαστή.

Αντίθετα σε έναν κλασσικό μικροεπεξεργαστή οι μνήμες (RAM/ROM), οι δίαυλοι επικοινωνίας και τα αποθηκευτικά μέσα αποτελούν ανεξάρτητες μονάδες, οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο chip του μικροεπεξεργαστή. Η λειτουργικότητα του τελικού συστήματος καθορίζεται από τα εξωτερικά περιφερειακά, τα οποία διασυνδέονται με την κεντρική μονάδα του μικροεπεξεργαστή.

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ενός μικροεπεξεργαστή εμπεριέχει τη λογική και αριθμητική μονάδα (ALU), στοιχειώδεις καταχωρητές (registers), προσωρινή μνήμη cache πολύ υψηλής ταχύτητας και σε ορισμένες περιπτώσεις τον ελεγκτή μνήμης (memory controller).

Κάθε φορά που πραγματοποιείται επανεκκίνηση σε ένα μικροελεγκτή, ανακαλούνται οι ίδιες επαναλαμβανόμενες ρουτίνες από τη μνήμη του, επεξεργάζεται τις τρέχουσες τιμές των εισόδων και βάσει των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας παίρνει συγκεκριμένες αποφάσεις. Είναι ουσιαστικά ένα σύστημα ειδικού σκοπού αφιερωμένο σε συγκεκριμένες λειτουργίες.

Οι μικροελεγκτές είναι σχεδιασμένοι κατά κύριο λόγο για εκτέλεση διεργασιών σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με τους μικροεπεξεργαστές. Σε ένα μικροεπεξεργαστή (για μη ενσωματωμένα συστήματα) υπάρχει μεγάλη ευελιξία για ελεύθερη ανάπτυξη διαφορετικών εφαρμογών καθώς η λειτουργικότητα του τελικού συστήματος καθορίζεται από τα εξωτερικά περιφερειακά τα οποία συνδέονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Οι μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού έχουν συνήθως μεγάλη υπολογιστική ισχύ και δίνουν έμφαση στην απόδοση.

Απ' την άλλη πλευρά, οι μικροεπεξεργαστές για ενσωματωμένα συστήματα, έχουν αυξημένη δυνατότητα συνεργασίας με εξωτερικά κυκλώματα, αλλά η υπολογιστική ισχύς τους παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα.

Τόσο οι μικροελεγκτές όσο και οι μικροεπεξεργαστές γενικού σκοπού σχεδιάζονται για να ανακαλούν δεδομένα, να κάνουν υπολογισμούς και στη συνέχεια βάσει της επεξεργασίας που έχει γίνει να λαμβάνουν κατάλληλες αποφάσεις. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μικροελεγκτών και των μικροεπεξεργαστών.

Μικροελεγκτές	Μικροεπεξεργαστές
Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας	Υψηλή κατανάλωση ενέργειας
Ενσωματώνει μνήμη και θύρες εισόδου-εξόδου	Δεν ενσωματώνει μνήμη και θύρες εισόδου-εξόδου
Γενικός σκοπός σχεδιασμού	Ειδικός σκοπός σχεδιασμού
Χαμηλό κόστος κατασκευής	Υψηλό κόστος κατασκευής
Μικρές διαστάσεις ως σύστημα	Μεγάλες διαστάσεις ως σύστημα
Εύκολη υλοποίηση εφαρμογών	Δύσκολη υλοποίηση εφαρμογών
Εύκολη φορητότητα	Δυσκολία στη φορητότητα
Έμφαση σε ευελιξία, διαστάσεις και μικρό κόστος	Έμφαση στην απόδοση του συστήματος
Αυξημένη δυνατότητα συνεργασίας με εξωτερικά κυκλώματα	Περιορισμένη δυνατότητα συνεργασίας με εξωτερικά κυκλώματα

Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικροελεγκτών-μικροεπεξεργαστών

2.3 Η πλατφόρμα Arduino Uno

2.3.1 Περιγραφή της πλατφόρμας Uno

Η πλατφόρμα Arduino Uno είναι μια πλακέτα προτυποποίησης ανοικτού κώδικα, η οποία βασίζεται στη δημοφιλή σειρά ολοκληρωμένων ATmega της εταιρείας Atmel. Είναι ένας ελεγκτής 8 bit, ο οποίος λειτουργεί με τάση 5VDC. Βασίζεται στην αρχιτεκτονική RISC και χρονίζει στα 8 MHz (με εξωτερικό κρύσταλλο/ταλαντωτή στα 16 Mhz, ο οποίος συγχρονίζει τις λειτουργίες).

Η πλατφόρμα Arduino, αρχικά δημιουργήθηκε στο Ivrea Interaction Design Institute της Ιταλίας το 2005, ως ένα εύκολο και γρήγορο εργαλείο για την ανάπτυξη πρωτότυπων εφαρμογών (prototyping). Αντικειμενικός σκοπός της πλατφόρμας ήταν οι φοιτητές που δεν είχαν υψηλό

υπόβαθρο σε ηλεκτρονικά και προγραμματισμό Η/Υ, να καταφέρουν να υλοποιήσουν εύκολα μια εφαρμογή που συνδυάζει υλικό και λογισμικό.

Η πλατφόρμα Arduino Uno που βασίζεται στο chip 328P, διαθέτει 32KB ISP Flash μνήμη (με δυνατότητα ανάγνωσης-εγγραφής), 1KB μνήμη EEPROM, 2KB μνήμη SRAM, 23 εισόδους/εξόδους γενικού σκοπού, 32 καταχωρητές γενικού σκοπού, ευέλικτους μετρητές (έναν 16-bit και δύο 8-bit), εσωτερικές και εξωτερικές διακοπές (interrupts), ασύγχρονη σειριακή μετάδοση USART, SPI σειριακή θύρα, έξι κανάλια αναλογικο-ψηφιακών μετατροπών των 10 bit (A/D converters), προγραμματιζόμενο watchdog timer και πέντε λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας (powersaving).

Πιο γενικευμένα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πλατφόρμα Arduino είναι ένα υπολογιστικό σύστημα ικανό να επεξεργαστεί δεδομένα από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο, να λάβει αποφάσεις και να πραγματοποιήσει λειτουργίες ελέγχου σε κυκλώματα. Η διάταξη εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς καθώς μπορεί να δεχθεί πολλαπλά ερεθίσματα από το περιβάλλον και να πάρει κατάλληλες αποφάσεις σύμφωνα με τον προγραμματισμό που έχει προηγηθεί.

Οι ακροδέκτες της πλατφόρμας Arduino Uno χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τους αναλογικούς ακροδέκτες (έξι συνολικά) και τους ψηφιακούς ακροδέκτες (δεκατέσσερις συνολικά). Μέσω αυτών των είκοσι ακροδεκτών, πραγματοποιούνται οι διασυνδέσεις των εξωτερικών κυκλωμάτων (Led, αισθητήρες, κινητήρες, ενδείκτες κλπ).

Ο μικροελεγκτής προγραμματίζεται μέσα από το περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα IDE (Integrated Development Environment), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού wiring. Η γλώσσα Wiring βασίζεται στη C/C++ και περιλαμβάνει επίσης βιβλιοθήκες υλοποιημένες στη C++.

Η εξωτερική τροφοδοσία της πλακέτας πρέπει να είναι μεταξύ 7 και 12 VDC (μέσω μιας υποδοχής τύπου barrel jack 2.1 mm) και μπορεί να προέρχεται από ένα κοινό DC τροφοδοτικό ή μπαταρίες. Αν ωστόσο τροφοδοτηθεί η πλατφόρμα με λιγότερα από 7 VDC, οι ακροδέκτες εξόδου των 5 Volts δε θα έχουν το απαραίτητο δυναμικό ώστε να τροφοδοτήσουν άλλα περιφερειακά κυκλώματα (π.χ. πρόσθετους αισθητήρες). Αν η πλακέτα τροφοδοτηθεί με παραπάνω από 12 VDC, θα υπερθερμανθεί ο σταθεροποιητής τάσης και πιθανότατα θα προκληθεί ζημιά. Μια ιδανική τάση για ομαλή λειτουργία των κυκλωμάτων είναι τα 9 VDC.

Οι πλατφόρμες Arduino απευθύνονται σε επαγγελματίες και μηχανικούς που θέλουν να υλοποιήσουν κάποιο απαιτητικό έργο αλλά και σε αρχάριους χρήστες που δεν έχουν ιδιαίτερες γνώσεις σε ηλεκτρονικά και προγραμματισμό. Οι πλατφόρμες μπορούν να αγοραστούν είτε

προ-συναρμολογημένες, είτε σε επιμέρους κομμάτια (kit εξαρτημάτων) και να συναρμολογηθούν στη συνέχεια από τον χρήστη.

Οι μικροελεγκτές είναι προγραμματισμένοι από το εργοστάσιο μέσω ενός bootloader, ώστε να μη χρειάζονται εξωτερικό προγραμματισμό κατά τη διάρκεια σύνδεσης του νέου υλικό σε ένα Η/Υ.

Ο προγραμματισμός της πλατφόρμας Arduino πραγματοποιείται μέσω USB θύρας, εφαρμόζοντας έναν προσαρμογέα USB to Serial. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η μεταφορά των προγραμμάτων (Sketches) από ένα Η/Υ στον μικροεπεξεργαστή και αντίστροφα.

2.3.2 Οι ακροδέκτες (pins) της πλατφόρμας Uno

Οι δύο βασικές ομάδες ακροδεκτών (pins) της πλατφόρμας Arduino Uno, είναι οι αναλογικοί ακροδέκτες (A0-A5) και οι ψηφιακοί ακροδέκτες γενικού σκοπού (D0-D13). Είναι δυνατό να συνδεθούν σε αυτούς τους ακροδέκτες πλακέτες επέκτασης που ονομάζονται "shields". Οι πλακέτες αυτές προσδίδουν επιπλέον δυνατότητες και ευελιξία στη βασική πλακέτα. Οι αναλογικοί ακροδέκτες είναι συνολικά έξι στον αριθμό και οι ψηφιακοί ακροδέκτες δεκατέσσερις.

Οι αναλογικές είσοδοι (A0-A5) διαβάζουν αναλογικές τιμές/τάσεις, κυρίως από αισθητήρες. Η μέτρηση της τάσης γίνεται για προκαθορισμένα επίπεδα τάσης τα οποία κυμαίνονται από 0 έως 5 VDC.

Οι δεκατέσσερις ψηφιακοί ακροδέκτες (D0-D13), μπορούν να προγραμματιστούν είτε ως είσοδοι είτε ως έξοδοι. Κάθε μια από τις ψηφιακές εξόδους, μπορεί να τεθεί σε κατάσταση High ή Low με ανάλογη εντολή. Έξι από τους δεκατέσσερις ψηφιακούς ακροδέκτες (pins 3, 5, 6, 9, 10, 11), έχουν τη δυνατότητα να προγραμματιστούν ώστε να λειτουργούν ως έξοδοι με δυνατότητα διαμόρφωσης πλάτους παλμών (PWM), που ισοδυναμούν με ελεγχόμενες εξόδους αναλογικής τάσης.

Οι ψηφιακοί ακροδέκτες παράγουν δυναμικό 5 Volt (λειτουργώντας σας έξοδοι) και παρέχουν μέγιστο ρεύμα 40mA σε επόμενες βαθμίδες. Σε κάθε ακροδέκτη υπάρχει εσωτερικά μια pull-up αντίστασης (20-50KΩ) για τον περιορισμό των ρευμάτων. Εκτός από τους αναλογικούς και τους ψηφιακούς ακροδέκτες, στη πλατφόρμα Arduino Uno, έχουμε επίσης τους ακόλουθους ακροδέκτες:

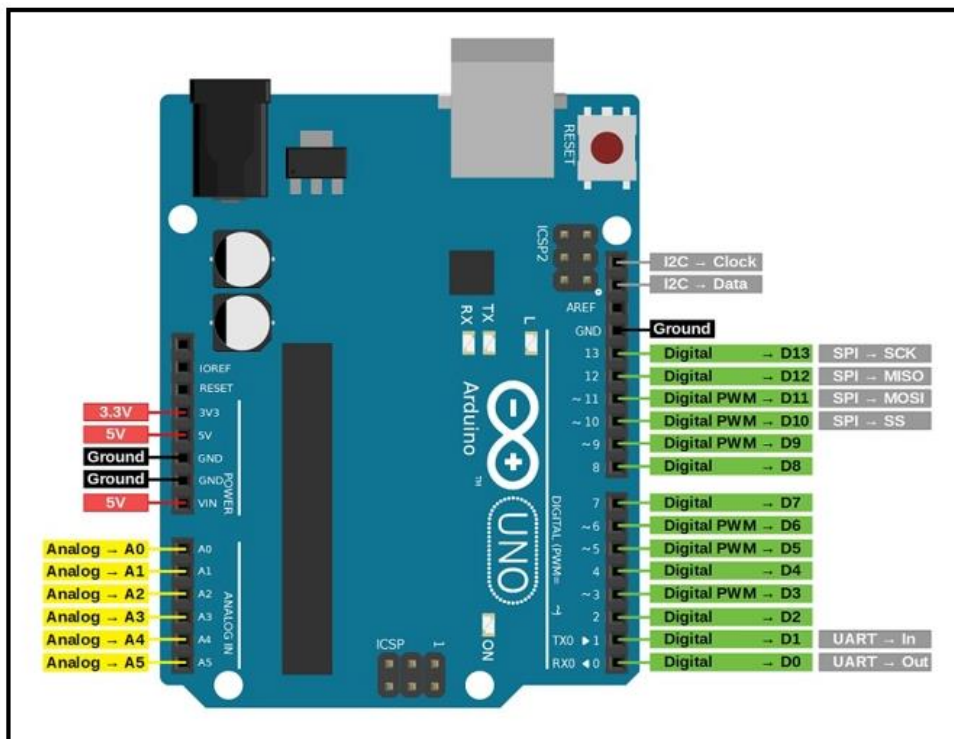
- 1) Ακροδέκτες επικοινωνίας SPI (Serial Peripheral Interface): Χρησιμοποιούνται οι ψηφιακοί ακροδέκτες D10 (SS), D11 (MOSI), D12 (MISO) και D13 (SCK) για τη σειριακή σύγχρονη επικοινωνία της πλατφόρμας με περιφερειακές συσκευές όπως μνήμες και καταχωρητές (Master/Slave σχέση).
- 2) Ακροδέκτες για σειριακή ασύγχρονη επικοινωνία (USART): Τα ψηφιακά pins D0 και D1, λειτουργούν ως RX (Receive / λήψη) και TX (Transmit / εκπομπή) αντίστοιχα, εφόσον γίνει ο ανάλογος προγραμματισμός. Όταν το πρόγραμμά στείλει δεδομένα σειριακά, αυτά προωθούνται στη USB θύρα αλλά και στο pin D1 για να τα διαβάσει ενδεχομένως μια άλλη συσκευή (π.χ. μια διάταξη Bluetooth).
- 3) Ακροδέκτες TWI/I2C επικοινωνίας (Two Wire Interface / Inter-Integrated Circuit): Υποστηρίζουν I2C και TWI σειριακή επικοινωνία για τη σύνδεση περιφερειακών μικρής ταχύτητας (ακροδέκτες A4/SDA και A5/SCL), χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Wire. Χρησιμοποιεί μόνο δύο καλώδια (ημιαμφίδρομης κατεύθυνσης). Ο ακροδέκτης SCL αποτελεί τη γραμμή ρολογιού ο ακροδέκτης SDA τη γραμμή δεδομένων.
- 4) ICSP ακροδέκτες (In-Circuit Serial Programming): Μέσω αυτών των ακροδεκτών προγραμματίζεται απευθείας ο μικροελεγκτής της πλατφόρμας (εξωτερικός προγραμματισμός) μέσω ενός καλωδίου, χωρίς την ύπαρξη bootloader.
- 5) Εξωτερικά interrupts: Οι ακροδέκτες D2 και D3 λειτουργούν ως είσοδοι για εξωτερικά interrupts (για συγκεκριμένες αλλαγές στους ακροδέκτες 2 και 3, η κανονική ροή του προγράμματος μπορεί να σταματήσει άμεσα).
- 6) Ακροδέκτης Reset: Επιτρέπει την επανεκκίνηση του μικροελεγκτή, όταν τεθεί σε κατάσταση Low (δυναμικό μηδέν).
- 7) Ακροδέκτες τάσεων: Η πλακέτα διαθέτει ακροδέκτες τάσης των 3.3 VDC, 5 VDC και ένα ακροδέκτη με την ονομασία Vin, στον οποίο μπορεί να συνδεθεί μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας (τάση).
- 8) Ακροδέκτες GND: αποτελούν τις απαραίτητες γειώσεις (δυναμικό ίσο με 0 Volt).
- 9) Ακροδέκτης Aref: σε αυτόν τον ακροδέκτη μπορεί να τοποθετηθεί μια εξωτερική τάση αναφοράς (π.χ. από σταθεροποιημένο τροφοδοτικό).
- 10) Ακροδέκτης IOREF (Input/Output Reference): είναι σημείο αναφοράς της τάσης που λειτουργεί ο μικροελεγκτής (για το μοντέλο Uno ισούται με 5VDC).

11) Led On: το Led On (πράσινου χρωματισμού), δηλώνει ότι η πλακέτα Arduino Uno τροφοδοτείται κανονικά με τάση και βρίσκεται σε λειτουργία.

12) Led “L”: το Led με τη σήμανση L (κίτρινου χρωματισμού), συνδέεται εσωτερικά με το pin 13. Όταν το pin 13 διεγερθεί (κατάσταση High), τότε το Led με τη σήμανση “L” αναβοσβήνει. Χρησιμοποιείται κατά κόρον για τη λειτουργική δοκιμή της πλακέτας Uno. Το pin 13 δεν χρησιμοποιείται μεμονωμένα για τη λειτουργία Led αλλά έχει πολλαπλές χρήσεις.

13) LEDs RX και TX: Αναβοσβήνουν οι αντίστοιχες λυχνίες στην πλακέτα, όταν πραγματοποιείται μετάδοση δεδομένων σειριακά μέσω του USB καλωδίου.

Στην σχήμα 9, αναπαρίστανται οι ακροδέκτες και οι ενδείκτες (LEDs) της πλατφόρμας Uno.



Σχήμα 9. Οι ακροδέκτες και οι ενδείκτες του μικροελεγκτή Uno

2.3.3 Είδη μνημών στην πλατφόρμα Uno

Ο μικροεπεξεργαστής ATmega328P του Arduino Uno, διαθέτει τρεις ομάδες μνήμης (Flash, SRAM και EEPROM). Η Flash και η EEPROM μνήμη είναι μη πτητικές μνήμες (Non-Volatile), ενώ η SRAM είναι πτητική μνήμη (Volatile).

1) Flash μνήμη: η χωρητικότητά της είναι 32 KB και τοποθετείται κάθε φορά το κυρίως πρόγραμμα που πρόκειται να εκτελεστεί. Οι μνήμες Flash σβήνουν και επανεγγράφονται

πολύ γρήγορα (εξίσου και το όνομα τους "Flash"). Είναι κατάλληλες για την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και τεχνολογικά είναι μια μνήμη τύπου EEPROM. Αποτελούνται από λογικές πύλες NAND και NOR. Τα 0.5 KB (από τα 32 KB συνολικά) της Flash μνήμης του Arduino, χρησιμοποιούνται από τον bootloader (ένα μικρό κομμάτι κώδικα το οποίο δίνει τη δυνατότητα ανεβάσματος προγραμμάτων (Sketches) στη πλατφόρμα, δίχως την ανάγκη ύπαρξης εξωτερικού προγραμματιστή).

- 2) SRAM μνήμη (Static Random-Access Memory): είναι χωρητικότητας 2 KB και χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση των μεταβλητών του προγράμματος που εκτελείται. Η SRAM είναι μνήμη τυχαίας προσπέλαση, στην οποία μπορεί να γίνει ανάγνωση/εγγραφή δεδομένων. Τα στοιχεία μνήμης αποτελούνται από κυκλώματα που λειτουργούν σαν μανδαλωτές flip/flop (δισταθή κυκλώματα μνήμης). Με τη διακοπή της τροφοδοσίας (τάσης), τα δεδομένα της SRAM χάνονται.
- 3) EEPROM μνήμη (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory): η χωρητικότητα της είναι 1 KB και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ρυθμίσεων και άλλων παραμέτρων (μακροχρόνιες πληροφορίες). Οι μνήμες EEPROM διατηρούν τα περιεχόμενά τους και μετά την διακοπή της τροφοδοσίας τους. Η διαγραφή και η εγγραφή των δεδομένων γίνεται ανά byte. Αποτελούν την εξέλιξη της μνήμης ROM και τα περιεχόμενά τους σβήνονται ηλεκτρικά.

2.3.4 Πλεονεκτήματα της πλατφόρμας Uno

Η πλατφόρμα Uno χαρακτηρίζεται για την απλότητα και την ευελιξία της, στο σχεδιασμό νέων έργων. Παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων που την καθιστούν πρώτη επιλογή στις DIY (Do It Yourself) εφαρμογές. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της πλατφόρμας είναι τα εξής:

- 1) Χαμηλό κόστος αγοράς: Η γνήσια μητρική πλακέτα κοστίζει προσεγγιστικά δεκαπέντε ευρώ. Υπάρχουν βέβαια και απομιμήσεις αυτής (από εργοστάσια τρίτων κατασκευαστών) και οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ τρία και έξι ευρώ.
- 2) Συμβατότητα με διάφορα λειτουργικά συστήματα: Το λογισμικό της πλατφόρμας Arduino είναι διαθέσιμο για τρία λειτουργικά συστήματα: Windows, Macintosh και Linux.
- 3) Απλότητα σχεδίασης: απευθύνεται τόσο σε έμπειρους, όσο και σε αρχάριους χρήστες. Δεν απαιτείται ιδιαίτερη εμπειρία στο σχεδιασμό για την υλοποίηση σύνθετων έργων.

- 4) Επεκτάσιμο λογισμικό ανοικτού κώδικα: Ο πηγαίος κώδικας είναι διαθέσιμος για τον οποιονδήποτε, να τον μελετήσει και να τον τροποποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του. Με τη βοήθεια των βιβλιοθηκών Arduino και της C++, οι πιο πεπειραμένοι χρήστες μπορούν να αναπτύξουν το δικό τους κώδικα και τις δικές τους βιβλιοθήκες χωρίς περιορισμούς.

2.3.5 Το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE

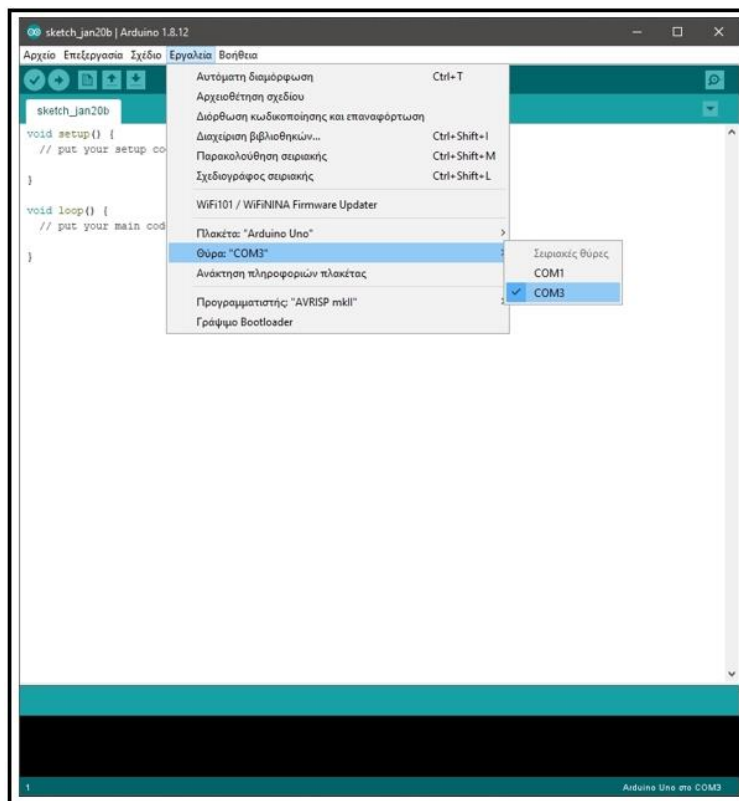
Το βασικότερο στοιχείο της πλατφόρμας Arduino, είναι το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE (Integrated Development Environment). Το περιβάλλον IDE είναι μια εφαρμογή γραμμένη σε γλώσσα Java, η οποία γεφυρώνει τις πλατφόρμες Arduino με έναν Η/Υ. Είναι ένα πρακτικό περιβάλλον για την συγγραφή των προγραμμάτων, με συντακτική χρωματική σήμανση. Ο προγραμματισμός στηρίζεται στη γλώσσα Wiring, που κατά βάση είναι γλώσσα προγραμματισμού C/ C ++.

Τα προγράμματα που συντάσσονται στο περιβάλλον IDE ονομάζονται σχέδια ή αλλιώς σκίτσα (sketches) και αποθηκεύονται με την κατάληξη αρχείου .ino σε εξατομικευμένο φάκελο με την ονομασία Sketchbook. Τα σχέδια τα οποία βρίσκονται στο φάκελο Sketchbook, μπορεί να τα ανοίξει ο χρήστης από το μενού Αρχείο->Βιβλίο σχεδίων (File->Sketchbook) ή από το κουμπί Άνοιγμα (Open) της γραμμή εργαλείων. Εκτός από τα αρχεία με επέκταση .ino, υποστηρίζονται και αρχεία γραμμένα σε γλώσσα C (με επέκταση .c), αρχεία γραμμένα σε C ++ (.cpp) και αρχεία κεφαλίδας (.h).

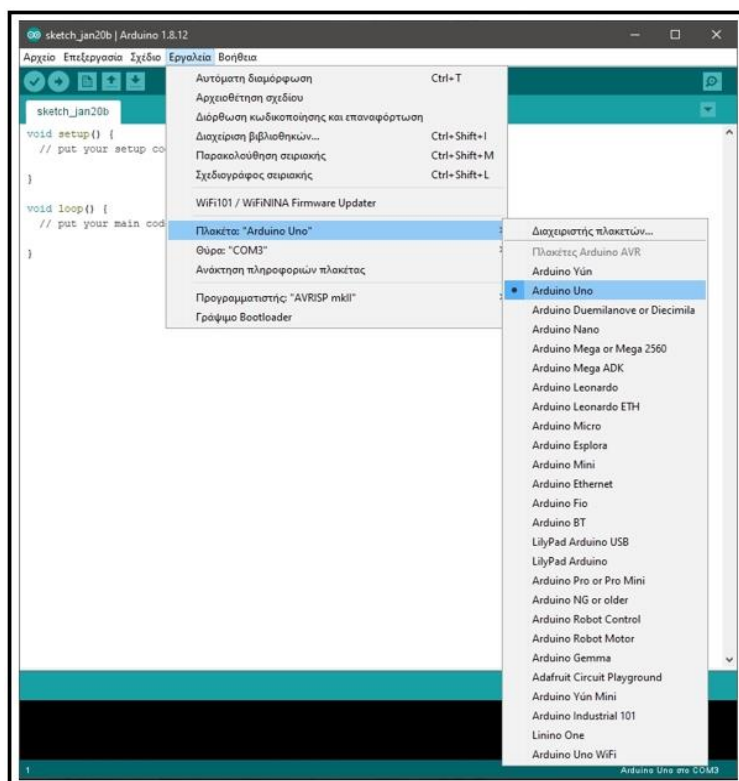
Το περιβάλλον Arduino IDE, περιλαμβάνει ένα χώρο επεξεργασίας κειμένου για τη σύνταξη του κώδικα (editor), μια περιοχή εμφάνισης μηνυμάτων (πορεία αποσφαλμάτωσης και μεταφόρτωσης, διαθέσιμο χώρο στη μνήμη κλπ.), μενού με όλες τις εντολές και τα επιμέρους εργαλεία καθώς επίσης και κουμπιά με τις πιο κοινές εντολές.

Πριν γίνει η φόρτωση του κώδικα στο μικροελεγκτή, πρέπει να επιλεγθεί η σωστή θύρα επικοινωνίας π.χ. COM 3 (εικόνα 1), στην οποία είναι συνδεδεμένη η πλατφόρμα Arduino. Θα πρέπει επίσης να επιλεγθεί το μοντέλο του μικροελεγκτή που πρόκειται να λειτουργήσει π.χ. Arduino Uno (εικόνα 2).

Η σωστή σειριακή θύρα επικοινωνίας επιλέγεται από το μενού Εργαλεία->Σειριακή Θύρα (Tools->Serial Port). Ενώ, η ανάλογη πλακέτα που θα χρησιμοποιήσουμε, επιλέγεται από το μενού Εργαλεία-> Πλακέτα (Tools->Board).



Εικόνα 1. Επιλογή θύρας επικοινωνίας



Εικόνα 2. Επιλογή του μικροελεγκτή Arduino Uno (μοντέλο)

Ο προγραμματιστής αφού αναπτύξει τον κώδικα του, στη συνέχεια κάνει τη μεταγλώττιση του προγράμματος (compile) για έλεγχο συντακτικών λαθών και το πρόγραμμα ακολούθως μεταφορτώνεται στον μικροελεγκτή. Στις περισσότερες πλατφόρμες, κατά τη φόρτωση του προγράμματος στην πλακέτα, τα LED RX και TX αναβοσβήνουν καθώς φορτώνεται το σκίτσο.

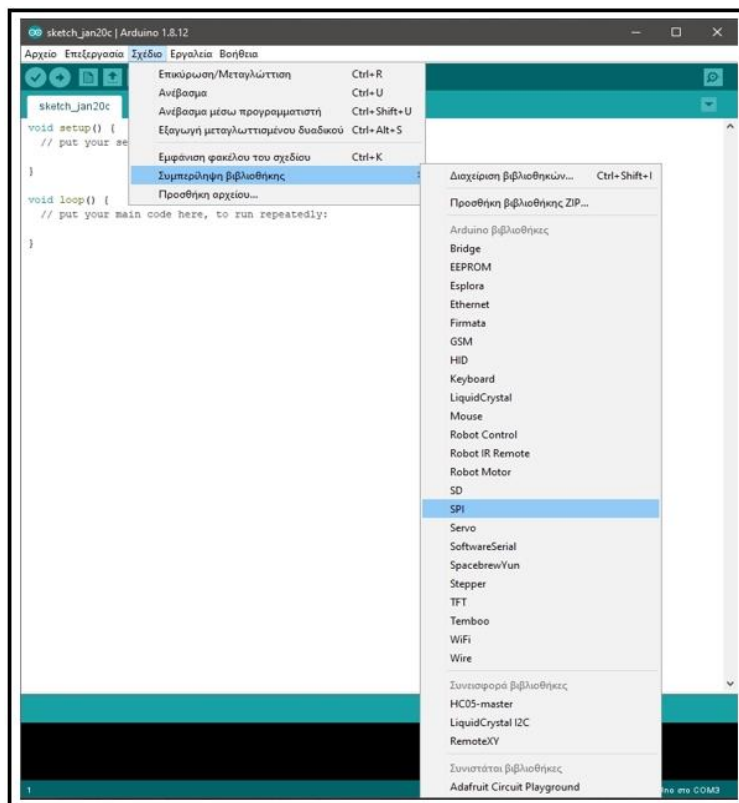
Όταν ολοκληρωθεί η φόρτωση του κώδικα, το περιβάλλον Arduino IDE θα εμφανίσει ένα μήνυμα ότι το ανέβασμα του προγράμματος ολοκληρώθηκε. Σε αντίθετη περίπτωση εάν κάτι δεν πάει καλά, θα εμφανιστεί κάποιο σφάλμα.

Όταν φορτώνεται ένα σχέδιο στην πλακέτα Arduino χρησιμοποιείται ένας bootloader, δηλαδή ένα μικρό πρόγραμμα που έχει φορτωθεί στο μικροελεγκτή της πλατφόρμας. Το πρόγραμμα αυτό επιτρέπει το φόρτωμα του κώδικα, χωρίς τη χρήση κάποιου εξωτερικού προγραμματιστή.

Οι βιβλιοθήκες (Libraries) είναι έτοιμα κομμάτια κώδικα (διαφορετικά από τα σκίτσα) και χρησιμοποιούνται για να δώσουν περαιτέρω δυνατότητες στο υπάρχον πρόγραμμα. Παραδείγματα βιβλιοθηκών μπορεί να είναι μια συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης σημάτων, στατιστικές συναρτήσεις επεξεργασίας/ανάλυσης δεδομένων ή πρόσθετες εντολές για την επικοινωνία της πλατφόρμας Arduino με άλλες εξωτερικές συσκευές (π.χ. αισθητήρες και νέο υλικό).

Υπάρχουν έτοιμες βιβλιοθήκες στον φάκελο με την ονομασία Libraries και δηλώνονται στην αρχή του προγράμματος. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια έτοιμη βιβλιοθήκη σε ένα σκίτσο, επιλέγοντας από το μενού Σχέδιο-> Συμπερίληψη βιβλιοθήκης (Sketch->Import Library) όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Μπορεί επίσης, να κατεβάσει έτοιμες βιβλιοθήκες από το διαδίκτυο ή ακόμα και να δημιουργήσει τις δικές του από την αρχή με εξατομικευμένο τρόπο.

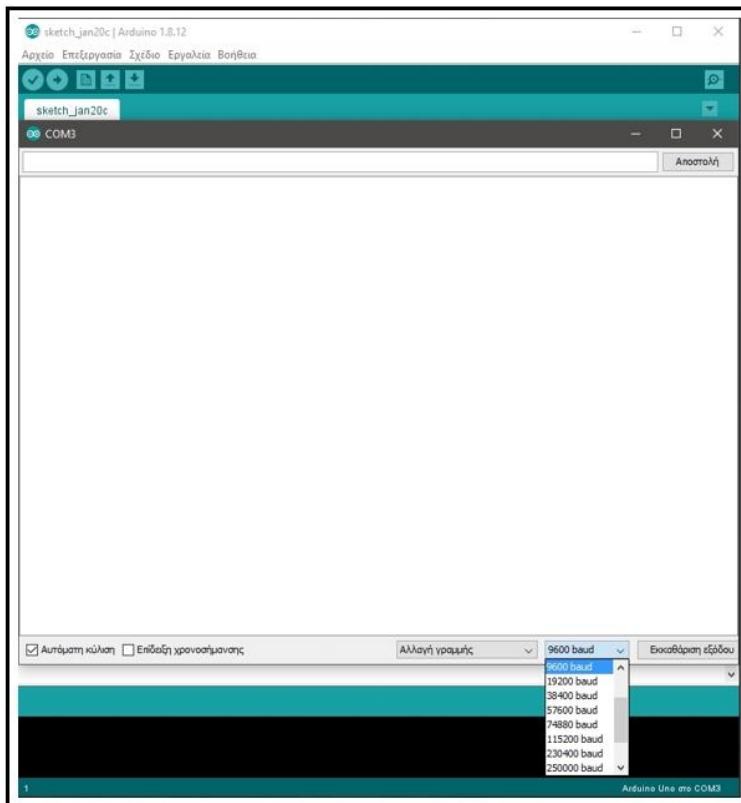
Επειδή οι βιβλιοθήκες φορτώνονται και αυτές μαζί με το σκίτσο στην πλατφόρμα, αυξάνουν τη ποσότητα του χώρου που καταλαμβάνει το πρόγραμμα στη μνήμη της πλατφόρμας Arduino.



Εικόνα 3. Εισαγωγή βιβλιοθήκης

Υπάρχει επίσης και η δυνατότητα επιτήρησης της σειριακής επικοινωνίας μέσω της επιλογής "Serial monitor", όπου ο προγραμματιστής έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που στέλνονται/λαμβάνονται στην πλατφόρμα Arduino μέσω της σειριακής θύρας (USB επικοινωνία) όπως φαίνεται στην εικόνα 4.

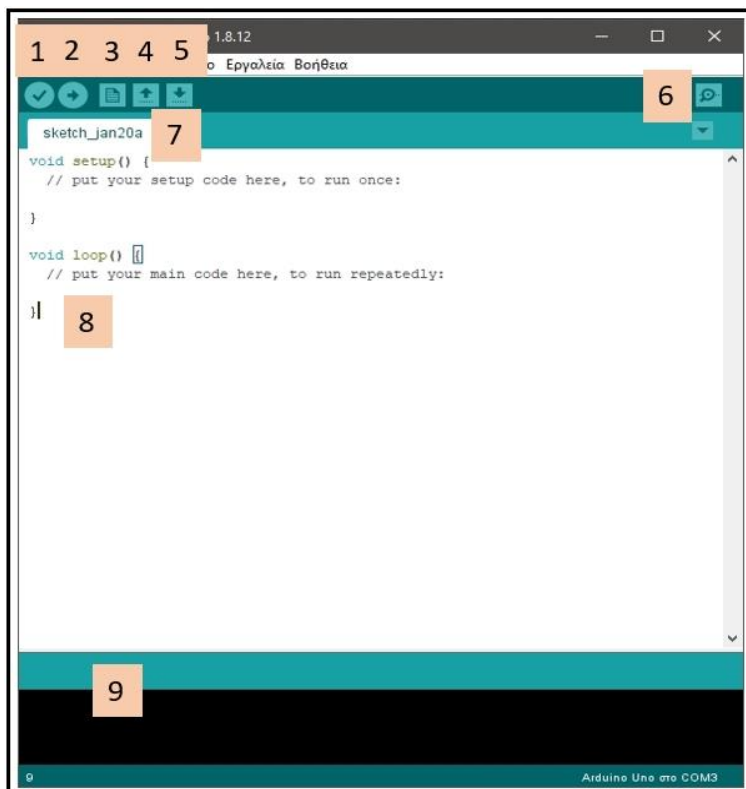
Όταν χρησιμοποιείται η εντολή `Serial.begin()` σε ένα σκίτσο (για την έναρξη της σειριακής επικοινωνίας), θα πρέπει να της αποδοθεί ο ίδιος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (baud rate) με αυτόν που έχει επιλεχθεί από το μενού Εργαλεία->Παρακολούθηση σειριακής->Baud (Tools->Serial monitor->Baud).



Εικόνα 4. Επιτήρηση της σειριακής επικοινωνίας

Τα βασικότερα (κεντρικά) σημεία του περιβάλλοντος IDE, φαίνονται στην εικόνα 5 και είναι τα ακόλουθα:

1. Επαλήθευση: Γίνεται μεταγλώττιση του κώδικα και έλεγχος για σφάλματα.
2. Φόρτωση: Φορτώνεται ο κώδικας στη πλατφόρμα Arduino.
3. Νέο: Δημιουργείται ένα νέο σκίτσο.
4. Άνοιγμα: Εμφανίζεται ένα νέο μενού, με όλα τα διαθέσιμα σκίτσα στον προεπιλεγμένο φάκελο αποθήκευσης.
5. Σώσιμο: Αποθηκεύεται ένα σκίτσο.
6. Σειριακή επιτήρηση: Ανοίγει τη σειριακή οθόνη επιτήρησης.
7. Όνομα σκίτσου: Εμφανίζεται το όνομα του τρέχοντος σκίτσου.
8. Περιοχή κώδικα: Η περιοχή όπου γράφεται ο κώδικας από τον προγραμματιστή.
9. Περιοχή μηνυμάτων: Εμφανίζονται τα μηνύματα λάθους.



Εικόνα 5. Βασικά σημεία του περιβάλλοντος IDE

2.4 Ασύρματα πρότυπα για πλατφόρμες IoT

2.4.1 Zigbee

Το Zigbee δημιουργήθηκε από τον οργανισμό Zigbee Alliance και αποτελεί μια προδιαγραφή για ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (WPAN). Στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στις ζώνες των 868 MHz, 902-928 MHz και 2.4 GHz. Το πρότυπο καθορίζει πώς οι συσκευές Zigbee επικοινωνούν με ασφάλεια και αξιοπιστία, μέσω των δικτύων LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network).

Υπάρχουν δύο εκδοχές του Zigbee. Η κλασική έκδοση Zigbee και το Zigbee Pro. Ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε ένα δίκτυο Zigbee είναι 65.000. Οι τοπολογίες που επικρατούν στα δίκτυα Zigbee μπορεί να είναι αστέρα (star topology), συστάδας δέντρου (cluster tree) και κατανεμημένη (mesh topology). Ανταποκρίνεται στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για δικτύωση αισθητήρων με χαμηλό κόστος υλοποίησης, κρατώντας παράλληλα σε χαμηλά επίπεδα την ενεργειακή κατανάλωση με αποδοτικό τρόπο.

Το πρότυπο αυτό διαθέτει λειτουργία "κατάστασης ύπνου" με σκοπό την παράταση του χρόνου λειτουργίας των δικτυωμένων αισθητήρων. Οι δρομολογητές και οι συντονιστές μένουν πάντα

"ξύπνιοι", ενώ οι τερματικές συσκευές μπορούν να "κοιμούνται" για μεγάλο χρονικό διάστημα και να στέλνουν δεδομένα περιοδικά. Σε ένα δίκτυο Zigbee, χρησιμοποιείται συνήθως η τοπολογία πλέγματος με συχνότητα λειτουργίας τα 2,4 GHz (ISM μπάντα).

Ενώ το IEEE 802.15.4 ορίζει μόνο το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) και το φυσικό επίπεδο, το Zigbee καθορίζει επιπλέον τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής. Το πρωτόκολλο ZigBee έχει παγκόσμια αποδοχή σε όλες σχεδόν τις χώρες, δεδομένου ότι υιοθετεί το φυσικό στρώμα του IEEE 802.15.4 με 16 κανάλια (εύρους 2 MHz). Χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνικές κατανομής φάσματος, με σκοπό την προστασία του από παρεμβολές και οι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων κυμαίνονται από 20 έως 250 kbps.

Οι Burunkaya και Pars (2017), κατασκεύασαν έναν έξυπνο μετρητή για εφαρμογή σε έξυπνα δίκτυα ενέργειας, ο οποίος στηρίζεται στην ασύρματη τεχνολογία Zigbee. Στη διάταξη που σχεδίασαν, μετريέται η ενεργός τάση και το ενεργό ρεύμα μέσω ενός μετασχηματιστή τάσης και ενός μετασχηματιστή ρεύματος αντίστοιχα. Υπολογίζεται η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς μέσω ενός μικροελεγκτή (STM32 Nucleo) και στη συνέχεια τα δεδομένα αποστέλλονται ασύρματα σε έναν Η/Υ. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα τα υπό μέτρηση φορτία να ελεγχθούν εξ'αποστάσεως [10].

Η τεχνολογία Zigbee καλύπτει αποστάσεις της τάξεως των 75-100 μέτρων σε κλειστούς χώρους και έως 300 μέτρα σε ανοικτούς χώρους. Η απόσταση αυτή μπορεί να επεκταθεί με χρήση κατάλληλων επαναληπτών (Zigbee repeaters). Οι συσκευές Zigbee ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την λειτουργία που επιτελούν:

- 1) Συντονιστής (Coordinator): Ο συντονιστής διαχειρίζεται τους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Αρχικοποιεί την επικοινωνία, αναθέτει τα κανάλια ραδιοσυχνοτήτων, συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους κόμβους και αναθέτει επίσης το αναγνωριστικό δικτύου προσωπικής περιοχής PAN (Personal Area Network). Κάθε ZigBee δίκτυο περιλαμβάνει μόνο ένα συντονιστή.
- 2) Δρομολογητής (Router): Ο δρομολογητής επικοινωνεί διαρκώς με το συντονιστή και την τελική συσκευή, για τη βέλτιστη δρομολόγηση των μηνυμάτων. Μεταβιβάζει τα δεδομένα από τους κόμβους και είναι σε θέση ταυτόχρονα να ενισχύσει τις στάθμες των σημάτων που δέχεται για πιθανές απώλειες σήματος. Αποδέχεται επίσης αιτήματα ένταξης στο δίκτυο.
- 3) Τελική συσκευή (End device): Η τελική συσκευή μεταδίδει την πληροφορία στο δρομολογητή και αυτός με τη σειρά του, την προωθεί στο συντονιστή ή σε κάποιο άλλο δρομολογητή. Μια τελική συσκευή δεν επικοινωνεί απευθείας με άλλες τελικές συσκευές.

Οι δρομολογητές και οι συντονιστές καθορίζουν ποιες συσκευές συμμετέχουν στο δίκτυο PAN. Όταν ένας δρομολογητής ή συντονιστής επιτρέψει σε μια τελική συσκευή να ενταχθεί στο δίκτυο, η τελική αυτή συσκευή γίνεται αυτομάτως “σκλάβος” (slave) του αντίστοιχου δρομολογητή/συντονιστή. Ο “αφέντης” (Master) δρομολογητής ή συντονιστής δρομολογεί τα δεδομένα για λογαριασμό μιας τελικής συσκευής "σκλάβου", διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ότι τα δεδομένα θα φτάσουν με ασφάλεια στον προορισμό τους.

2.4.2 Bluetooth (BLE)

Η ασύρματη τεχνολογία Bluetooth, βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.1 για την ανταλλαγή δεδομένων σε μικρές αποστάσεις. Πρόκειται για μια τεχνολογία επικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης, η οποία χρησιμοποιεί ραδιοκύματα μικρού μήκους κύματος για την επικοινωνία των συσκευών.

Το Bluetooth υλοποιήθηκε αρχικά από τη Nokia το 2006 με την ονομασία Wibree. Το Bluetooth χαμηλής κατανάλωσης (BLE), ενσωματώθηκε στην έκδοση Bluetooth 4.0 το 2009. Το 2016 ανακοινώθηκε η έκδοση Bluetooth 5.0 (BLE). Η συγκεκριμένη έκδοση, αποτελεί μια έξυπνη προτυποποίηση χαμηλού κόστους, που έχει σχεδιαστεί για επικοινωνία μικρής εμβέλειας (έως 80 μέτρα). Είναι κατάλληλη για έλεγχο και παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Υποστηρίζει κατανεμημένη τοπολογία (mesh) και λειτουργεί στις συχνότητες των 2.402 - 2.481 GHz. Χρησιμοποιεί 40 κανάλια, με απόσταση 2MHz μεταξύ των καναλιών. Χρησιμοποιεί τρία μόνο από αυτά τα κανάλια για σάρωση νέων συσκευών και μετάδοση δεδομένων μέσα από αυτά. Τα υπόλοιπα τριάντα επτά κανάλια δεδομένων είναι αφιερωμένα στην αμφίδρομη ανταλλαγή μικρών ριπών δεδομένων μεταξύ συνδεδεμένων συσκευών.

Το πρωτόκολλο ελέγχου και προσαρμογής λογικής σύνδεσης L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) παρέχει πολυπλεξία για τα κανάλια δεδομένων, κατακερματισμό και επανασυναρμολόγηση των μεγαλύτερων πακέτων.

Το BLE χρησιμοποιείται ευρέως σε οικιακές συσκευές, φορητές συσκευές παρακολούθησης βιομετρικών δεδομένων (fitness activity trackers), έξυπνους μετρητές, tablets, smartphones κλπ. Χρησιμοποιεί ραδιοκύματα μικρής εμβέλειας με ελάχιστη ισχύ, ώστε να είναι σε θέση οι συσκευές να λειτουργούν αδιάκοπα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (έως και αρκετά έτη), υπερτερώντας ως προς τις παλαιότερες εκδόσεις (Bluetooth 1.0, Bluetooth 1.1, Bluetooth 1.2, Bluetooth 2.0 + EDR, Bluetooth 2.1 + EDR, Bluetooth 3.0 + HS). Η ισχύς εκπομπής του Bluetooth

Low Energy (BLE) κυμαίνεται από 0,01mW έως 10mW. Ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος εναλλαγής συχνότητας χρησιμοποιείται για να μειωθεί η ευαισθησία σε πιθανές παρεμβολές.

Στο χαμηλότερο επίπεδο της στοίβας του BLE υπάρχει το φυσικό επίπεδο, το οποίο στέλνει και λαμβάνει τα bits των δεδομένων. Πάνω από το φυσικό επίπεδο παρέχονται οι υπηρεσίες επιπέδου ζεύξης/σύνδεσης.

Στα ανώτερα επίπεδα ανήκει το πρωτόκολλο GATT (Generic ATtribute) και το πρωτόκολλο γενικών χαρακτηριστικών πρόσβασης GAP (Generic Access Profile). Το πρωτόκολλο GATT παρέχει αποτελεσματική συλλογή δεδομένων από τους διασυνδεδεμένους αισθητήρες, ενώ το πρωτόκολλο GAP επιτρέπει στις εφαρμογές να διαχειρίζονται τις συνδέσεις, τον τρόπο που στέλνονται τα δεδομένα και τον τρόπο που αλληλεπιδρούν οι συσκευές μεταξύ τους.

Η τεχνολογία BLE, προέκυψε παράλληλα με άλλες ασύρματες λύσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας όπως το Zigbee, 6LoWPAN και Z-Wave. Σε σύγκριση με το Zigbee, το BLE είναι πιο αποδοτικό όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Το BLE προορίζεται να αποτελέσει βασική τεχνολογία για εφαρμογές IoT μικρής εμβέλειας (υγειονομική περίθαλψη, έξυπνα ενεργειακά συστήματα και έξυπνες οικιακές συσκευές), λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και του χαμηλού κόστους κατασκευής των τελικών κυκλωμάτων. Λόγω της εμπορικής αποδοχής της τεχνολογίας Bluetooth, οι συσκευές/αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι ευρέως διαδεδομένοι και αναμένεται να επικρατήσουν παντού μελλοντικά.

Οι Irfan et al. (2019), υλοποίησαν την κατασκευή ενός έξυπνου μετρητή ο οποίος βασίζεται σε υποδομή Cloud και χρησιμοποιεί WiFi δίκτυα για να στείλει ενεργειακά δεδομένα από οικίες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Συγκεκριμένα, αισθητήρες που βασίζονται στην τεχνολογία Bluetooth λαμβάνουν μετρήσεις για την τάση, το ρεύμα, την πραγματική και τη φαινόμενη ισχύ μιας εγκατάστασης και στη συνέχεια τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω WiFi σε υποδομή Cloud [11].

2.4.3 Z-wave

Το Z-Wave είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία Zensys το 1999 και βρίσκει εφαρμογή σε οικιακούς αυτοματισμούς. Οι συσκευές που στηρίζονται στη τεχνολογία Z-Wave βγήκαν αρχικά στην αγορά της Αμερικής το 2003.

Πολλοί κατασκευαστές ηλεκτρολογικού υλικού (π.χ. εταιρείες που κατασκευάζουν αυτόματα ρολά κατοικιών, φωτιστικά, θερμοστάτες, συστήματα ασφαλείας κλπ.), προσάρμοσαν τα προϊόντα τους στην τεχνολογία Z-Wave για να γίνουν πιο εμπορικά.

Το Z-Wave βασίζεται σε ένα δίκτυο πλέγματος (mesh topology) όπως και το Zigbee. Λειτουργεί στις μη-αδειοδοτούμενες ζώνες των 908.42 MHz (για τις ΗΠΑ) και στα 868.42MHz (για την Ευρώπη). Μπορεί να συμπεριλάβει μέχρι και 232 κόμβους (nodes).

Για τη λειτουργία ενός δικτύου συσκευών Z-Wave, απαιτούνται αρχικά ένας ελεγκτής (controller) και τουλάχιστον μια ελεγχόμενη συσκευή (slave). Ένας ελεγκτής δεν μπορεί να ελέγξει μια συσκευή μέχρις ότου αυτή προστεθεί στο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή γίνεται μία φορά και πραγματοποιείται μεμονωμένα για κάθε νέα συσκευή (slave). Επειδή ο ελεγκτής αναγνωρίζει την ισχύ του σήματος των διασυνδεδεμένων συσκευών, οι συσκευές πριν προστεθούν στο δίκτυο είναι σημαντικό να βρίσκονται εγκατεστημένες στις τελικές τους θέσεις. Το Z-Wave δεν είναι ένα IP-συμβατό πρωτόκολλο. Οι συσκευές Z-Wave δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο διαδίκτυο ή με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές (όπως smartphones και υπολογιστές). Εναλλακτικά, παρέχεται σαν λύση μια πύλη δικτύου (gateway), η οποία προωθεί τα μηνύματα από έναν Z-Wave ελεγκτή προς τα IP δίκτυα και αντίστροφα (Z-Wave over IP – Z/IP). Η πύλη δικτύου (Z/IP), είναι μια τεχνολογία υλικο-λογισμικού (firmware), η οποία αναλαμβάνει να συνδέσει οποιαδήποτε συσκευή Z-Wave με το διαδίκτυο, ώστε να είναι άμεσα προσβάσιμη από παντού.

Το Z-Wave δίκτυο προσδιορίζεται από μια Network ID (μεγέθους 4 bytes) και μια Node ID (μεγέθους 1 byte) για κάθε κόμβο. Εντός του δικτύου Z-Wave, μια περιφερειακή συσκευή μπορεί να στείλει εντολή σε κάποια άλλη συσκευή και να λάβει αναγνωριστική απάντηση σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 50ms. Οι περισσότεροι κόμβοι σε ένα σύστημα Z-Wave, είναι ταυτόχρονα και επαναλήπτες (repeaters).

2.4.4 WiFi

Το IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), που έχει σαν στόχο να επεκτείνει το πρότυπο 802.3 (Ethernet). Τα πρότυπα 802.11 είναι ευρύτερα γνωστά και ως WiFi. Το Wi-Fi αποτελεί μία από τις κυριότερες επικοινωνίες στα δίκτυα προσωπικής περιοχής. Παρέχει ασύρματη πρόσβαση στο Internet και διασύνδεση μεταξύ Η/Υ και ηλεκτρονικών φορητών συσκευών.

Σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με ελάχιστες καθυστερήσεις. Έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, αλλάζοντας πολλά από τα χαρακτηριστικά του και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιεί.

Οι Islam et al. (2019), σχεδίασαν έναν έξυπνο μετρητή ενέργειας, η λειτουργία του οποίου βασίζεται σε ασύρματα WiFi δίκτυα. Η διάταξη που υλοποίησαν καταγράφει τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ και το συνολικό ενεργειακό κόστος και στη συνέχεια στέλνει τα δεδομένα σε μια βάση δεδομένων (Cloud), μέσω του οικιακού WiFi δικτύου. Οι χρήστες στη συνέχεια μέσω μιας Android εφαρμογής, είναι σε θέση να ελέγξουν την ενεργειακή τους κατανάλωση. Παράλληλα, μπορούν να αναγνωριστούν συγκεκριμένα μοτίβα ενεργειακής κατανάλωσης, σύμφωνα με τις συνήθειες του χρήστη [12]. Οι βασικότερες εκδόσεις του WiFi, είναι οι ακόλουθες:

- Το IEEE 802.11a επικυρώθηκε το 1999. Χρησιμοποιεί την μπάντα των 5GHz (UNII-band) και έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 54 Mbit/s (από τα οποία τα ωφέλιμα είναι περίπου 25 Mbps). Το πρότυπο 802.11a χρησιμοποιεί την τεχνική πολυπλεξίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Καλύπτει αποστάσεις σε εσωτερικούς χώρους έως και 35 μέτρα. Παρέχει επίσης καλή προστασία από γειτονικές παρεμβολές.
- Το 1999 κυκλοφόρησε ακολούθως, η έκδοση 802.11b. Έχει πρόσθετη κωδικοποίηση CCK (Complementary Code Keying) και παρέχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 11 Mbit/s στη ζώνη των 2.4 GHz (ISM band). Χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση απλωμένου φάσματος DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) και υποστηρίζει 3 κανάλια εύρους 22Mhz. Είναι το πιο διαδεδομένο πρότυπο, παρότι το 802.11a παρείχε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η εμβέλεια του σε εσωτερικούς χώρους είναι 35 μέτρα.
- Η ομάδα εργασίας IEEE εξέδωσε το πρότυπο 802.11g (WiFi 3^{ης} γενιάς) το 2002, το οποίο διορθώνει το πρόβλημα συμβατότητας μεταξύ των προτύπων 802.11a και 802.11b. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση OFDM/DSSS και προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης έως και 54

Mbit/s. Χρησιμοποιεί την ISM μπάντα των 2,4 GHz και έχει εμβέλεια σε εσωτερικούς χώρους έως και 38 μέτρα. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του 802.11g είναι η συμβατότητα του με το 802.11b.

- Η ανάπτυξη του 802.11n (WiFi 4^{ης} γενιάς) ξεκίνησε το 2004 και δημοσιεύτηκε τον Οκτώβριο του 2009. Βασικός σκοπός αυτού του προτύπου ήταν η βελτίωση του μεταφερόμενου όγκου δεδομένων και η επέκταση του εύρους κάλυψης. Οι υψηλές απαιτήσεις για video streaming δεν μπορούσαν να υλοποιηθούν εύκολα με το πρότυπο 802.11g. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα αυτό, σχεδιάστηκε το πρότυπο 802.11n, το οποίο καλύπτει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 217 Mbit/s, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων MIMO 4x4 (Multiple-Input Multiple-Output) και τεχνική πολυπλεξίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Λειτουργεί στη μπάντα των 2.4 GHz και 5 GHz και η εμβέλεια εκπομπής του επεκτάθηκε στα 70 μέτρα για εσωτερικούς χώρους. Είναι πλήρως συμβατό με τα πρότυπα 802.11a, 802.11b και 802.11g.
- Το πρότυπο 802.11ac (WiFi 5^{ης} γενιάς) προτάθηκε το 2013 προσφέροντας ταχύτητες έως και 1733 Mbit/s χρησιμοποιώντας διαμόρφωση 256-QAM. Χρησιμοποιεί την τεχνική MU-MIMO 8x8 (Multi-User, Multiple-Input, Multiple-Output) και το εύρος ζώνης είναι 160 MHz (σε αντίθεση με τα 40MHz που προσφέρει το 802.11n). Λειτουργεί στην μπάντα των 5 GHz και χαρακτηρίζεται από υψηλό throughput (μέγιστο 1.1 Gbit/s), σε σχέση με τα προηγούμενα πρότυπα. Η εμβέλεια του σε εσωτερικούς χώρους αγγίζει τα 35m. Παρέχει οκτώ χωρικές δέσμες δεδομένων (έως οκτώ κεραίες στον πομπό-δέκτη), σε σχέση με τις τέσσερις που υποστήριζε το πρότυπο 802.11n. Το βασικότερο πλεονεκτήματα αυτού του προτύπου είναι ότι εξασφαλίζει αδιάκοπη μετάδοση HD Video χωρίς προβλήματα.
- Το 2016 υιοθετήθηκε το πρότυπο IEEE 802.11ad (ή αλλιώς WiGig), το οποίο είχε σαν στόχο να παρέχει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων μέχρι και 7 Gbit/s. Λειτουργεί στα 57-66 GHz (V band) και περιλαμβάνει τέσσερα ή έξι κανάλια εύρους 2.16 GHz. Χρησιμοποιεί την τεχνική πολυπλεξίας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και υποστηρίζει μέχρι 32 κεραίες στους σταθμούς-βάσεις. Προσφέρεται για μετάδοση ασυμπίεστου video, 4K video, VR/AR εφαρμογές και interactive παιχνίδια υψηλών απαιτήσεων. Η εμβέλεια περιορίζεται για εσωτερικούς χώρους στα 10m.
- Το IEEE εισήγαγε ένα νέο πρωτόκολλο το 2016. Η ονομασία αυτού είναι Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah). Το νέο αυτό πρότυπο μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 8.191 συσκευές με

έμφαση στη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση των διασυνδεδεμένων συσκευών. Λειτουργεί στη συχνότητα των 900 MHz (κάτω από 1 GHz) και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 7.67 Mbit/s, χρησιμοποιώντας 1 έως 16 κανάλια. Το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να διεισδύσει εύκολα σε διάφορα εμπόδια και καλύπτει αποστάσεις έως και 1 χιλιόμετρο σε ανοικτό χώρο. Σε σχέση με το πρότυπο IEEE 802.11ac, έχουν εισαχθεί πολλά νέα χαρακτηριστικά για να ικανοποιηθεί η εκπομπή σε αυτή την απόσταση. Σκοπός του Wi-Fi HaLow, είναι να παρέχει συνδεσιμότητα σε χιλιάδες συσκευές ταυτόχρονα χωρίς καθυστερήσεις, μέσα από ένα σημείο πρόσβασης (access point) υψηλών προδιαγραφών. Σηματοδοτεί μια νέα εποχή για το IoT, παρέχοντας υψηλού επιπέδου υπηρεσίες στον τομέα των μεταφορών, της υγείας και των επικοινωνιών M2M (Machine to Machine).

- Το πρότυπο IEEE 802.11ax είναι γνωστό ως Wi-Fi 6 (6^{ης} γενιάς ή High Efficiency) και αποτελεί εξέλιξη του 802.11ac. Υποστηρίζει τις συχνότητες των 2.4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Έρχεται να λύσει το πρόβλημα της ταυτόχρονης εξυπηρέτησης χιλιάδων συσκευών ανά σημείο. Συνοπτικά δίνει βαρύτητα στη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα ενός δικτύου, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του. Χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες MIMO-OFDM (Multiple-Input, Multiple-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) και MU-MIMO (Multi-User, Multiple Input, Multiple Output). Οι ταχύτητες μετάδοσης που υποστηρίζει είναι τέσσερις φορές υψηλότερες από το πρότυπο 802.11ac.
- Το πρότυπο 802.11ay αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του προτύπου 802.11ad. Ανακοινώθηκε το 2017 και λειτουργεί στα 60 GHz. Υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 100 Gbit/s. Το εύρος ζώνης του 802.11ay είναι 8.64 GHz, υποστηρίζοντας τέσσερα κανάλια επικοινωνίας. Βασίζεται στις τεχνολογίες MIMO-OFDM (Multiple-Input, Multiple-Output Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) και MU-MIMO (Multiple User - Multiple Input Multiple Output). Η απόσταση κάλυψης του αγγίζει τα 300–500 μέτρα. Υποστηρίζει 8K UHD video, AR/VR εφαρμογές, ενδοεπικοινωνία σε data centers υψηλών απαιτήσεων και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων υψηλών ταχυτήτων.
- Το πρότυπο 802.11be αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2023. Στηρίζεται στο πρότυπο 802.11ax και θα παρέχει εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες που φτάνουν τα 30 Gbit/s. Θα λειτουργεί στις συχνότητες των 2.4 GHz, 5 GHz, και 6 GHz και θα έχει μηδενικές καθυστερήσεις μετάδοσης. Θεωρείται ιδανικό για εφαρμογές όπως AR/VR, 4K και 8K video, απομακρυσμένη πρόσβαση στο χώρο εργασίας, επεξεργασία δεδομένων σε Cloud υποδομές, και τηλε-διασκέψεις υψηλών απαιτήσεων.

2.4.5 LoRaWAN

Η τεχνολογία LoRaWAN αποτελεί μια υλοποίηση LPWAN (Low Power Wide Area Network), η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε εφαρμογές IoT μεγάλης εμβέλειας. Ο εξατομικευμένος τρόπος δικτύωσης του LoRaWAN, το καθιστούν ιδιαίτερα ευέλικτη και αποδοτική λύση για IoT εφαρμογές. Χρησιμοποιείται τόσο για επιτήρηση όσο και για έλεγχο συσκευών.

Η τεχνολογία LoRaWAN βασίζεται στην τεχνική διασποράς φάσματος (Spread Spectrum Technique). Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (περίπου 5 mW), οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης της πληροφορίας και η χαμηλή πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου Lora, το διαφοροποιούν από τους υπόλοιπους ασύρματους τρόπους δικτύωσης.

Το LoRaWAN λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων των 868 MHz (για την Ευρώπη) και 915 MHz (για Αυστραλία και Αμερική). Λειτουργεί εναλλακτικά και στις συχνότητες των 169 Mhz και 433.92 Mhz.

Σε αστικές περιοχές έχει εμβέλεια έως και 5 χιλιόμετρα, ενώ σε αγροτικές περιοχές η εμβέλεια του φτάνει ακόμα και τα 15 χιλιόμετρα. Οι ρυθμοί μετάδοσης της πληροφορίας κυμαίνονται στα 0.3-50 Kbit/s για την Ευρώπη και 0.9-100 Kbit/s για την Αμερική. Σε ένα δίκτυο LoRaWAN μπορούν να ενταχθούν εκατοντάδες αισθητήρες χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και απαιτείται ελάχιστη συντήρηση μετά την εγκατάσταση τους καθώς οι μπαταρίες τους διαρκούν αρκετά χρόνια.

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί τοπολογία αστέρα (star topology). Μια πύλη δικτύου (gateway) αναλαμβάνει να στείλει τα δεδομένα από τις συσκευές Lora (π.χ. έναν αισθητήρα) σε ένα κεντρικό εξυπηρετητή δικτύου (network server) και αντίστροφα. Ο εξυπηρετητής δικτύου εκτός από τα εισερχόμενα δεδομένα που λαμβάνει, είναι υπεύθυνος για την προώθηση των μηνυμάτων στον αντίστοιχο εξυπηρετητή εφαρμογών (application server). Έχει υπό την επίβλεψη του επίσης τη λειτουργία της πύλης δικτύου και των τελικών συσκευών.

Σε ένα δίκτυο LoRaWAN, εντάσσονται τόσο κινητές όσο και σταθερές συσκευές. Αν μια συσκευή βρίσκεται εν κινήσει, μεταδίδει δεδομένα και αν κάποια πύλη δικτύου είναι διαθέσιμη και ταυτόχρονα εντός εμβέλειας, θα προωθήσει τα δεδομένα στον εξυπηρετητή δικτύου.

Ως εξυπηρετητής εφαρμογών, θεωρείται οποιαδήποτε εφαρμογή είναι σε θέση να αναπαραστήσει τα δεδομένα των αισθητήρων ή να τα επεξεργαστεί. Τόσο ο εξυπηρετητής εφαρμογών όσο και οι τελικές συσκευές, μπορούν να ζητήσουν επιβεβαίωση για την παράδοση των μηνυμάτων τους.

Αν μια τελική συσκευή ζητήσει επιβεβαίωση για το μήνυμα που έχει σταλεί και δεν τη λάβει, τότε το μήνυμα επαναμεταδίδεται. Το μέγιστο μέγεθος μηνύματος που αποστέλλεται σε έναν εξυπηρετητή κάθε φορά, δεν ξεπερνάει τα 242 bytes.

Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων από τις τελικές συσκευές προς τον εξυπηρετητή δικτύου βελτιστοποιείται βάσει του μηχανισμού ADR (Adaptive Data Rate). Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων προσαρμόζεται σύμφωνα με τη γεωγραφική θέση της συσκευής και τη ποιότητα του εκπεμπόμενου σήματος. Μέσω του μηχανισμού ADR, η διάρκεια ζωής των μπαταριών στις τελικές συσκευές μπορεί να αυξηθεί σημαντικά [13].

Μεγάλη έμφαση δίνεται επίσης, στην ασφάλεια της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Οι τελικές συσκευές και ο εξυπηρετητής δικτύου μοιράζονται από κοινού ένα κλειδί κρυπτογράφησης AES 128-bit (κλειδί συνόδου δικτύου) για την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων απ' άκρη σε άκρη.

Οι Fortes και Fialho (2019), σχεδίασαν και κατασκεύασαν μια πρωτότυπη διάταξη βασισμένη στη τεχνολογία Lora, η οποία μεταδίδει σε μεγάλη απόσταση τη συνολική ισχύ, την ενεργό τάση, το ενεργό ρεύμα και το συντελεστή ισχύος μιας ομάδας εγκατεστημένων φορτίων. Η διάταξη που υλοποίησαν έχει επίσης τη δυνατότητα αναγνώρισης ενεργειακών μοτίβων για καλύτερη διαχείριση της ενέργειας [14].

Το LoRaWAN αποτελεί ιδανική λύση για εφαρμογές IoT σε γεωργικές καλλιέργειες καθώς οι αποστάσεις είναι συνήθως μεγάλες. Η αποστολή των μετρητικών δεδομένων σε αντίστοιχες εφαρμογές υψηλού επιπέδου, πραγματοποιείται σποραδικά και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μικρή κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων. Ένας εύκολος τρόπος προσπέλασης των δεδομένων από τον χρήστη είναι μέσα από μια υποδομή Cloud (π.χ. Azure Cloud).

2.4.6 NB-IoT

Το NB-IoT είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο IoT που στηρίζεται στις τεχνολογίες LPWA (Low Power Wide Area) και χρησιμοποιεί την υπάρχουσα αρχιτεκτονική του δικτύου LTE (Long Term Evolution). Στο NB-IoT έχουν γίνει ορισμένες βελτιστοποιήσεις ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για ταυτόχρονη επικοινωνία χιλιάδων διασυνδεδεμένων IoT συσκευών. Συνυπάρχει με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G/3G και έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη σποραδική αποστολή δεδομένων. Το NB-IoT είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία IoT, που μπορεί να υποστηρίξει τη μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής mMTC (massive Machine Type Communications).

Κύρια γνωρίσματα του NB-IoT είναι η υψηλή πυκνότητα συνδέσεων, το χαμηλό κόστος συντήρησης, οι μικρές καθυστερήσεις και οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων από τις τελικές συσκευές.

Η αρχιτεκτονική NB-IoT βασίζεται στο σύστημα εξελιγμένου πακέτου EPS (Evolved Packet System). Ενσωματώνει απλουστευμένες λειτουργίες, όπως μειωμένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και διαφοροποιημένη διαδικασία αναζήτησης κυψελών. Χρησιμοποιεί ημι-αμφίδρομη πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας HD-FDD (Half-Duplex Frequency Division Duplexing) και εύρος ζώνης 180 KHz στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Κάνοντας χρήση ημι-αμφίδρομης επικοινωνίας, αυτομάτως μειώνεται σημαντικά και το κατασκευαστικό κόστος της συσκευής.

Το NB-IoT υποστηρίζει σχήματα διαμόρφωσης QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) και BPSK (Binary Phase-Shift Keying), ώστε να διατηρηθεί η πολυπλοκότητα των τερματικών συσκευών σε χαμηλά επίπεδα. Χρησιμοποιεί πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας μονού φέροντος (SC-FDMA - Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) στην ανερχόμενη ζεύξη και ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA - Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) στην κατερχόμενη ζεύξη.

Η δομή πλαισίου του NB-IoT στην κατερχόμενη ζεύξη είναι ίδια με αυτή του δικτύου LTE. Ο ρυθμός δεδομένων περιορίζεται στα 250 Kbit/s για την πολυτονική κατερχόμενη ζεύξη και στα 20 Kbit/s για τη μονοτονική ανερχόμενη ζεύξη. Βασικός στόχος του NB-IoT είναι η παγκόσμια δικτύωση IoT συσκευών χαμηλού κόστους [15].

Στους σχεδιαστικούς στόχους του NB-IoT, συγκαταλέγεται και η παρατεταμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών των διασυνδεδεμένων συσκευών (έως 10 έτη). Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας (PSM – Power Saving Mode), οι τερματικές συσκευές μπαίνουν σε κατάσταση ύπνου αλλά εξακολουθούν να είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Οι συσκευές παραμένουν σε κατάσταση λήψης, αλλά ταυτόχρονα βελτιστοποιείται η εξοικονόμηση ενέργειας. Κάνοντας παράλληλα χρήση των λειτουργιών εκτεταμένης ασυνεχούς λήψης eDRX (extended Discontinuous Reception), η μεταδιδόμενη πληροφορία περιορίζεται και τα κανάλια επικοινωνίας δεν επιβαρύνονται.

Η τεχνολογία NB-IoT δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ιδιαίτερα απομακρυσμένες περιοχές, καθώς εξαρτάται άμεσα από τα κυψελωτά δίκτυα και τις προδιαγραφές του LTE. Όταν υπάρχει έντονη κίνηση δεδομένων/φωνής στο δίκτυο, η δυναμική ανακατανομή του φάσματος αλλάζει και επηρεάζει άμεσα την απόδοση των εφαρμογών NB-IoT. Μπορούν να εξυπηρετηθούν έως και 50 χιλιάδες συσκευές ανά κυψέλη, με δυνατότητα κλιμάκωσης της χωρητικότητας.

Το NB-IoT είναι ιδανικό για εφαρμογές όπως συστήματα έξυπνων μετρήσεων, έξυπνους χώρους στάθμευσης, έξυπνη γεωργία, έξυπνη υγεία και συσκευές γεωγραφικού εντοπισμού (tracking systems). Η αγορά του NB-IoT, έχει αναδυόμενη αξία και αναμένεται να φθάσει τα 25 δισεκατομμύρια δολάρια εντός του 2021.

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός και κατασκευή της μετρητικής διάταξης

3.1 Σχεδιασμός της μετρητικής διάταξης

Σκοπός της εργασίας όπως προαναφέρθηκε, ήταν η κατασκευή ενός έξυπνου μετρητή ενέργειας (smart energy meter), ο οποίος θα είναι σε θέση να μετρήσει με ακρίβεια τη στιγμιαία ενεργό τάση (V_{εν}) που τροφοδοτείται μια ηλεκτρική συσκευή ή γραμμή, το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα (I_{εν}), τη στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύ και το στιγμιαίο κόστος ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο (real time).

Ιδιαίτερη μνεία δόθηκε στο συνολικό κόστος της κατασκευής, το οποίο δεν ξεπέρασε τα 30 ευρώ. Βαρύτητα δόθηκε επίσης στη συμβατότητα των εξαρτημάτων, τη μετρητική ακρίβεια και την ευκολία διασύνδεσης των επιμέρους τμημάτων.

Η τελική διάταξη βασίστηκε σε δύο αισθητήρες. Έναν αισθητήρα για τη μέτρηση της τάσης και έναν αισθητήρα για τη μέτρηση του ρεύματος. Η λειτουργία του αισθητήρα ρεύματος, βασίζεται στο φαινόμενο Hall. Σύμφωνα με το φαινόμενο Hall, όταν ένας αγωγός υποβάλλεται σε μαγνητικό πεδίο, δημιουργείται μια τάση στα άκρα του ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Εφόσον η ενεργή τάση (V_{εν}) και το ενεργό ρεύμα (I_{εν}) γίνουν μετρήσιμα μεγέθη, με τη χρήση κάποιων απλών αλγόριθμων (μαθηματικών πράξεων) μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς (σε Watt) και το στιγμιαίο κόστος ενεργειακής κατανάλωσης (σε ευρώ/ώρα) για μια μεμονωμένη γραμμή μεταφοράς ενέργειας, μια ηλεκτρική συσκευή ή ένα κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα κατοικίας (ή μικρής εταιρείας).

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ενεργού τάσης είναι το μοντέλο ZMPT101B της εταιρείας LC technology. Για τη μέτρηση του ενεργού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχα, ο αισθητήρας ACS712 (με τον ομώνυμο αισθητήρα φαινομένου Hall της Allegro Microsystems). Για τον αισθητήρα τάσης, η μέγιστη επιτρεπτή μετρούμενη τάση είναι τα 1000VAC (peak-to-peak), ενώ για τον αισθητήρα ρεύματος το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα διέλευσης είναι τα 30 A (peak-to-peak).

Οι Rashid, και Handhal (2017), κατασκεύασαν ένα πρωτότυπο μετρητή, χρησιμοποιώντας τρεις αισθητήρες ρεύματος (ACS712) και τρεις αισθητήρες τάσεις (ZMPT101B), ώστε να καταγράψουν με ακρίβεια τα ρεύματα, τις τάσεις, την ισχύ, το συντελεστή ισχύος και τις αντίστοιχες κιλοβατώρες σε μια τριφασική εγκατάσταση [16].

Σε ανάλογη έρευνα που διεξήγαγαν οι Mnati et al. (2017), χρησιμοποίησαν αντίστοιχα τρεις αισθητήρες τάσεις (ZMPT101B) και τρεις αισθητήρες ρεύματος (ACS712) ώστε να μεταδώσουν



Σχήμα 11. Σύνδεση του έξυπνου μετρητή με απλή οικιακή πρίζα

3.2 Επιμέρους υλικά - Πλακέτες επέκτασης (Shields)

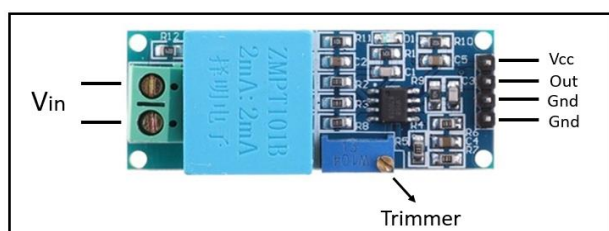
Η πλατφόρμα Arduino Uno R3, χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αποτελεί το κομβικό μέρος της κατασκευής. Για την ορθή υλοποίηση του έργου, αγοράστηκαν και εγκαταστάθηκαν οι πλακέτες επέκταση (Shields) που αναλύονται στη συνέχεια.

3.2.1 Αισθητήρας τάσης (ZMPT101B)

Ο αισθητήρας ZMPT101B (εικόνα 6) είναι ένας γραμμικός μετασχηματιστής τάσης, ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρεία Interplus Industry Co Ltd. Στην είσοδο του δέχεται τάσεις 0 έως 1000 VAC (2 mA μέγιστο ρεύμα), τα οποία μετατρέπονται σε αναλογική τάση 0 έως 5 VDC στην έξοδο του (ιδανικό σήμα για πλατφόρμες όπως ο Arduino Uno). Όταν η τάση στην είσοδο του αισθητήρα είναι 0 VAC, τότε στην έξοδο εμφανίζεται συνεχής τάση ίση με $V_{cc} / 2 = 2.5 \text{ VDC}$.

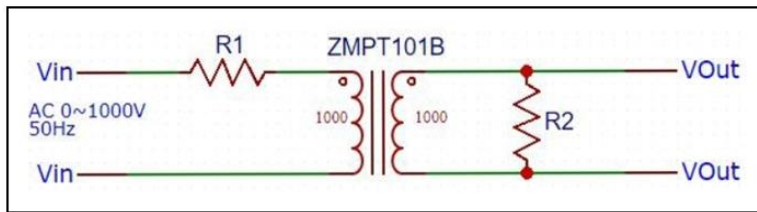
Η διάταξη τροφοδοτείται με 5 VDC και περιλαμβάνει επίσης ένα trimmer (μεταβλητή αντίσταση), για τη βαθμονόμηση της εξόδου.

Στους δύο ακροδέκτες (V_{in}) στο αριστερό μέρος του αισθητήρα, εισάγεται η εναλλασσόμενη τάση που θέλουμε να μετρήσουμε και μεταξύ των ακροδεκτών Out και Gnd (στο δεξί μέρος του αισθητήρα) παίρνουμε την αντίστοιχη συνεχή τάση (DC) που οδηγεί κάποια άλλη βαθμίδα (π.χ. την αναλογική είσοδο ενός Arduino Uno).



Εικόνα 6. Ο αισθητήρας τάσης (ZMPT101B).

Ο λόγος των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή είναι 1000:1000. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα ZMPT101B, φαίνεται στο σχήμα 12.



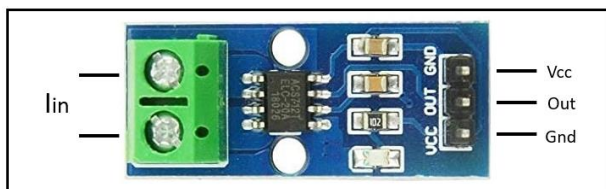
Σχήμα 12. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).

Στην είσοδο της μονάδας υπάρχει μια αντίσταση για τον περιορισμό του ρεύματος εισόδου, η αντίσταση R1 (limiting resistor). Ενώ στη έξοδο της μονάδας υπάρχει μια αντίσταση για τη δειγματοληψία του σήματος, η αντίσταση R2 (sampling resistor). Η τάση εξόδου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_1} * R_2 \quad (3.1)$$

3.2.2 Αισθητήρας ρεύματος (ACS712)

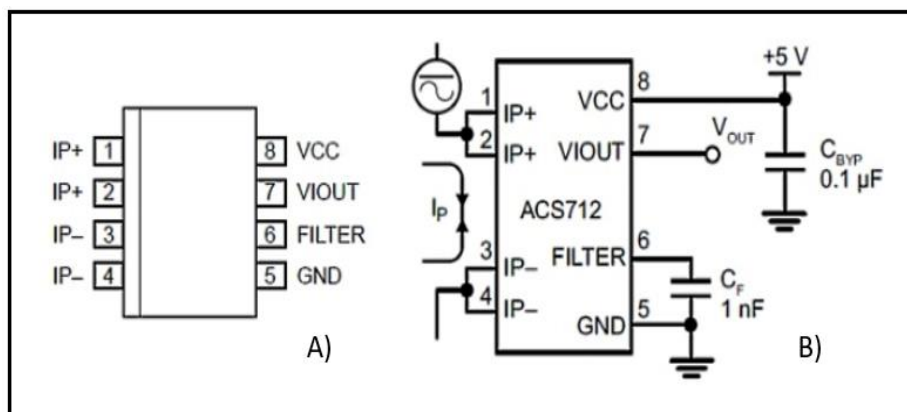
Η λειτουργία του αισθητήρα ACS712 (εικόνα 7), όπως προαναφέραμε βασίζεται στο φαινόμενο Hall και δέχεται στην είσοδο του τόσο συνεχή ρεύματα (DC current), όσο και εναλλασσόμενα ρεύματα (AC current). Ο χρόνος απόκρισης του αισθητήρα είναι 5 μ s και δεν επηρεάζεται εύκολα από εξωτερικούς θορύβους και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.



Εικόνα 7. Ο αισθητήρας ρεύματος (ACS712)

Ο αισθητήρας λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων 0-80 KHz και το συνολικό σφάλμα στην έξοδο του αισθητήρα δεν ξεπερνάει το 1.5 % του μετρούμενου μεγέθους (κατά τη μετατροπή του σήματος). Για να λειτουργήσει σωστά ο αισθητήρας, απαιτούνται 5 VDC και το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαχειριστεί στην είσοδο του είναι 30 A. Όταν το ρεύμα στην είσοδο του αισθητήρα είναι 0 A, τότε στην έξοδο εμφανίζεται συνεχής τάση (DC) ίση με $V_{cc} / 2 = 2.5$ VDC.

Στο σχήμα 13.A, φαίνονται αναλυτικά οι ακροδέκτες του ολοκληρωμένου κυκλώματος ACS712 της εταιρείας Allegro Microsystems και στο σχήμα 13.B μια τυπική εφαρμογή-συνδεσμολογία του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

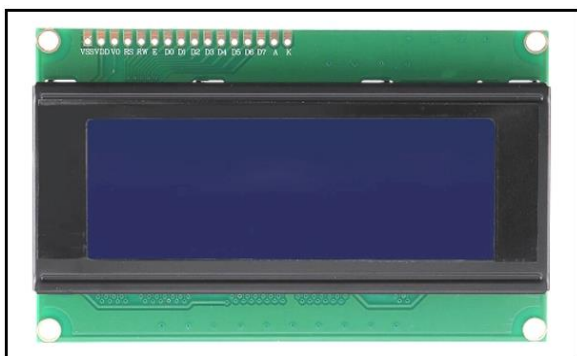


Σχήμα 13. Οι ακροδέκτες του IC ACS712 και μια τυπική εφαρμογή του.

3.2.3 Οθόνη LCD 20X4 (I2C-TWI-SPI)

Η συγκεκριμένη οθόνη είναι τεχνολογίας LCD (Liquid Crystal Display) και χρησιμοποιεί οπίσθιο φωτισμό (backlight) για να είναι ορατά τα εικονιζόμενα σύμβολα. Η πρόσοψη της LCD οθόνης (εικόνα 8), αποτελείται από τέσσερις σειρές χαρακτήρων, όπου κάθε σειρά μπορεί να απεικονίσει είκοσι χαρακτήρες. Κάθε χαρακτήρας αναπαρίσταται από μια μήτρα 5X8 εικονοστοιχείων (pixels).

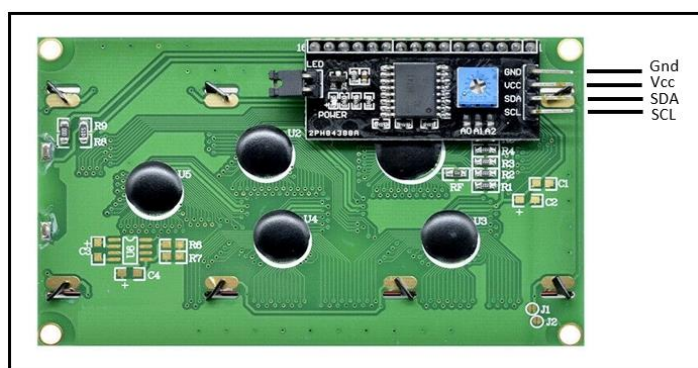
Ο ενσωματωμένος ελεγκτής SPLC780 στο πίσω μέρος της οθόνης, είναι υπεύθυνος για τη σωστή αναπαράσταση των αριθμών, συμβόλων και χαρακτήρων. Η τάση τροφοδοσίας του ελεγκτή είναι 5 VDC.



Εικόνα 8. Η πρόσοψη της LCD οθόνης 20X4

Η συγκεκριμένη οθόνη υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς διαύλους επικοινωνίας για τη διασύνδεση της. Το δίαυλο I2C (Inter-Integrated Circuit), το δίαυλο TWI (Two-wire interface) και το δίαυλο SPI (Serial Peripheral Interface). Στους μικροελεγκτές έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια η χρήση του σειριακού διαύλου επικοινωνίας I2C, λόγω της απλής διασύνδεσης που υποστηρίζει.

Για τη μετάδοση των συμβόλων στην οθόνη, χρησιμοποιείται μια μόνο γραμμή δεδομένων η SDA (Serial Data Line). Για το σωστό συγχρονισμό κατά τη μετάδοση, υπάρχει άλλη μια γραμμή που ονομάζεται SCL (Serial Clock Line). Επιπροσθέτως, χρησιμοποιούνται άλλες δύο γραμμές για την τροφοδοσία της οθόνης (οι ακροδέκτες Vcc και Gnd). Οι τέσσερις αυτοί ακροδέκτες αναπαρίστανται στην εικόνα 9. Μέσω της διασύνδεσης I2C, ελαχιστοποιείται η χρήση καλωδίων και η αλληλεπίδραση θορύβου από τη γειτνίαση καλωδίων.



Εικόνα 9. Οι ακροδέκτες του ελεγκτή I2C της LCD οθόνης

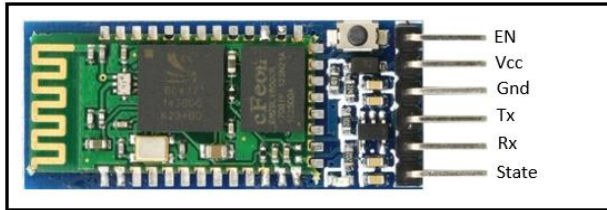
Για την επικοινωνία της οθόνης με την πλατφόρμα Arduino Uno, χρησιμοποιείται κατά κόρον η βιβλιοθήκη Wire. Η γραμμές SDA και SCL, συνδέονται αντίστοιχα στους αναλογικούς ακροδέκτες A4 και A5 της πλατφόρμας Uno (χρησιμοποιούνται μόνο δύο είσοδοι/έξοδοι).

3.2.4 Μονάδα Bluetooth HC-05 (έκδοση ZS-040)

Η συγκεκριμένη διάταξη λειτουργεί σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.1 και βασίζεται στο κύκλωμα EGBT-045MS. Βασίζεται στην έκδοση Bluetooth V2.0 + EDR (Enhanced Data Rate) και χρησιμοποιεί την τεχνική διασποράς φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) για την εκπομπή ραδιοκυμάτων με ρυθμούς μετάδοσης έως και 3 Mbit/s.

Η μονάδα τροφοδοτηθεί από εξωτερική τάση 3.6-6 VDC, μέσω των ακροδεκτών Vcc και Gnd. Στον ακροδέκτη Vcc συνδέονται τα +5 VDC και στον ακροδέκτη Gnd καταλήγει η γείωση. Η

μέγιστη κατανάλωση ρεύματος στη διάταξη είναι 30 mA. Εσωτερικά στην πλακέτα, υπάρχει ένας ρυθμιστής τάσης, ο οποίος υποβιβάζει την τάση τροφοδοσίας στα 3.3 VDC, ώστε οι στάθμες των σημάτων Tx και Rx να βρίσκονται σε αποδεκτά επίπεδα. Η μονάδα HC-05, απεικονίζεται στην εικόνα 10.



Εικόνα 10. Η μονάδα Bluetooth HC-05

Χρησιμοποιεί τη σειριακή μετάδοση δεδομένων (UART), για να επικοινωνήσει με άλλες συσκευές με βασική ταχύτητα μετάδοσης τα 9600 Kbit/s. Σε μια τυπική εφαρμογή, η μονάδα Bluetooth λειτουργεί ως σκλάβος (Slave), ενώ η Android εφαρμογή που επικοινωνεί μαζί της λειτουργεί ως αφέντης (Master). Για τη σειριακή μετάδοση των δεδομένων (για παράδειγμα από την πλατφόρμα Arduino Uno στη μονάδα Bluetooth HC-05), θα πρέπει οι ψηφιακοί ακροδέκτες Rx (ακροδέκτης D0) και Tx (ακροδέκτης D1) της πλατφόρμας Uno να συνδεθούν με τους ακροδέκτες Tx και Rx της πλακέτας HC-05. Οι ακροδέκτες Tx και Rx της μονάδας Bluetooth, μπορούν εναλλακτικά να συνδεθούν σε διαφορετικούς ψηφιακούς ακροδέκτες της πλατφόρμας Uno (π.χ. D2 και D3). Για την ασφάλεια της μεταδιδόμενης πληροφορίας χρησιμοποιείται κρυπτογραφικός αλγόριθμος AES (Advanced Encryption Data) 128 bit.

Υπάρχουν επίσης άλλοι δύο ακροδέκτες πάνω στην πλακέτα HC-05. Ο ακροδέκτης EN (Enable) και ο ακροδέκτης State. Όταν ο ακροδέκτης EN τεθεί σε υψηλή κατάσταση (High = +5VDC), η μονάδα μπαίνει σε κατάσταση προγραμματισμού μέσω εντολών AT (AT commands) για περαιτέρω παραμετροποίηση.

Ο ακροδέκτης State βρίσκεται σε χαμηλή κατάσταση (Low = 0VDC) όταν η μονάδα Bluetooth δεν βρίσκεται σε ζεύξη με άλλη συσκευή και σε υψηλή κατάσταση (High = +5VDC) όταν υπάρχει ζεύξη με κάποια άλλη συσκευή Bluetooth.

Υπάρχει επίσης μια ενδεικτική λυχνία (LED) πάνω στην μονάδα HC-05. Ανάλογα με το ρυθμό που αναβοσβήνει η συγκεκριμένη λυχνία, διακρίνουμε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα:

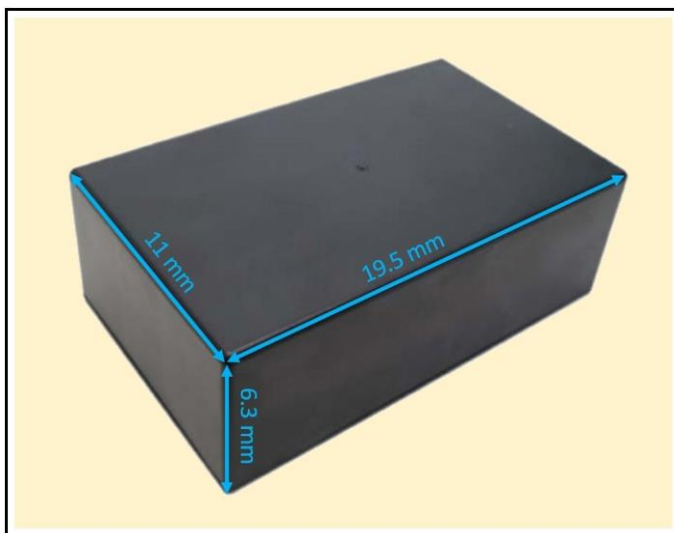
- 1) Όταν η λυχνία αναβοσβήνει πέντε φορές εντός χρονικού διαστήματος 1s, αυτό συνεπάγεται πως η μονάδα Bluetooth βρίσκεται σε αναμονή και είναι έτοιμη για δημιουργία ζεύξης με άλλη συσκευή.
- 2) Όταν η λυχνία αναβοσβήνει μια φορά κάθε 2s, συνεπάγεται πως η μονάδα Bluetooth έχει μόλις συνδεθεί με κάποια άλλη συσκευή.
- 3) Όταν η λυχνία αναβοσβήνει δύο φορές κάθε 2s, συνεπάγεται πως η μονάδα Bluetooth έχει πλέον σταθερή σύνδεση με κάποια άλλη συσκευή.

Αν μια συσκευή πραγματοποιήσει μια και μόνο φορά ζεύξη με τη μονάδα HC-05, η ζεύξη αυτή απομνημονεύεται και δεν χρειάζεται να επαναληφθεί μελλοντικά.

Το προεπιλεγμένο συνθηματικό (password) που ζητείται από τη μονάδα HC-05 κατά τη διάρκεια μιας ζεύξης είναι "1234". Αυτό βέβαια μπορεί να αλλάξει για λόγους ασφάλειας. Ο προεπιλεγμένος ρυθμός μετάδοσης της μονάδας Bluetooth είναι 9600 bps (bits per second) και η μέγιστη απόσταση κάλυψης αγγίζει τα 12-15 μέτρα.

3.3 Συνδεσμολογία των επιμέρους τμημάτων

Για τη συνολική κατασκευή και τη στέγαση των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων επιλέχθηκε ένα κουτί κατασκευών (εικόνα 11) γενικής χρήσης από ABS υλικό. Οι διαστάσεις του είναι 11x19.5x6.3 mm και παρέχει άριστη ηλεκτροστατική προστασία στα κυκλώματα.

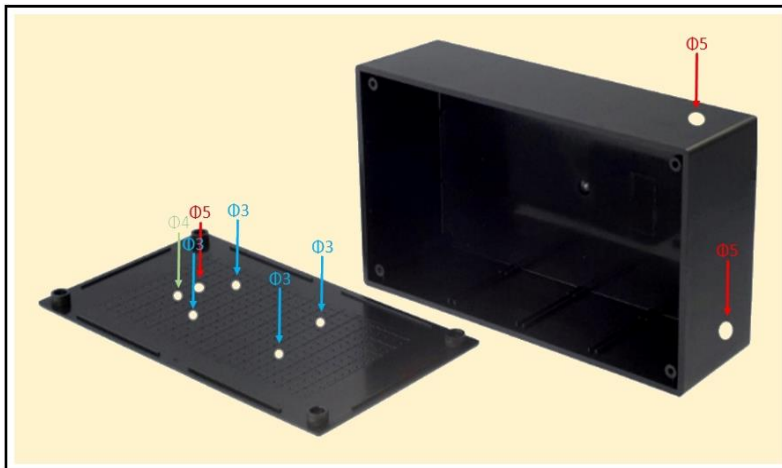


Εικόνα 11. Κουτί ABS για την κατασκευή

Αρχικά, ανοίχτηκαν οκτώ οπές με τρυπάνι μεταβλητών στροφών στα σημεία που φαίνονται στην εικόνα 12. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν τέσσερις οπές διαμέτρου 3 mm για τη στήριξη της

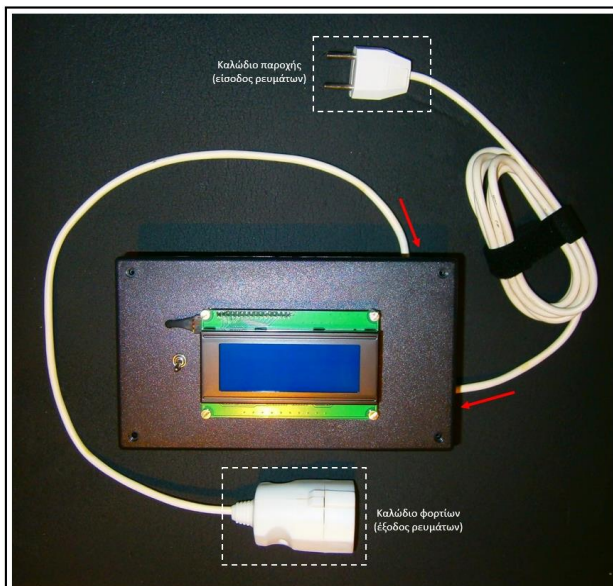
οθόνης LCD 20X4 γραμμών, μια οπή διαμέτρου 4 mm για το πέρασμα της καλωδίωσης της οθόνης και μια οπή διαμέτρου 5 mm για την τοποθέτηση ενός κεντρικού διακόπτη On/Off.

Στις δύο κάθετες-πλαϊνές πλευρές του κυτίου ανοίχτηκαν αντίστοιχα δύο οπές διαμέτρου 5 mm, για την είσοδο του καλωδίου παροχής ρεύματος και του καλωδίου που οδηγεί τους καταναλωτές (ηλεκτρικές συσκευές).



Εικόνα 12. Άνοιγμα οπών στο κυτί της κατασκευής

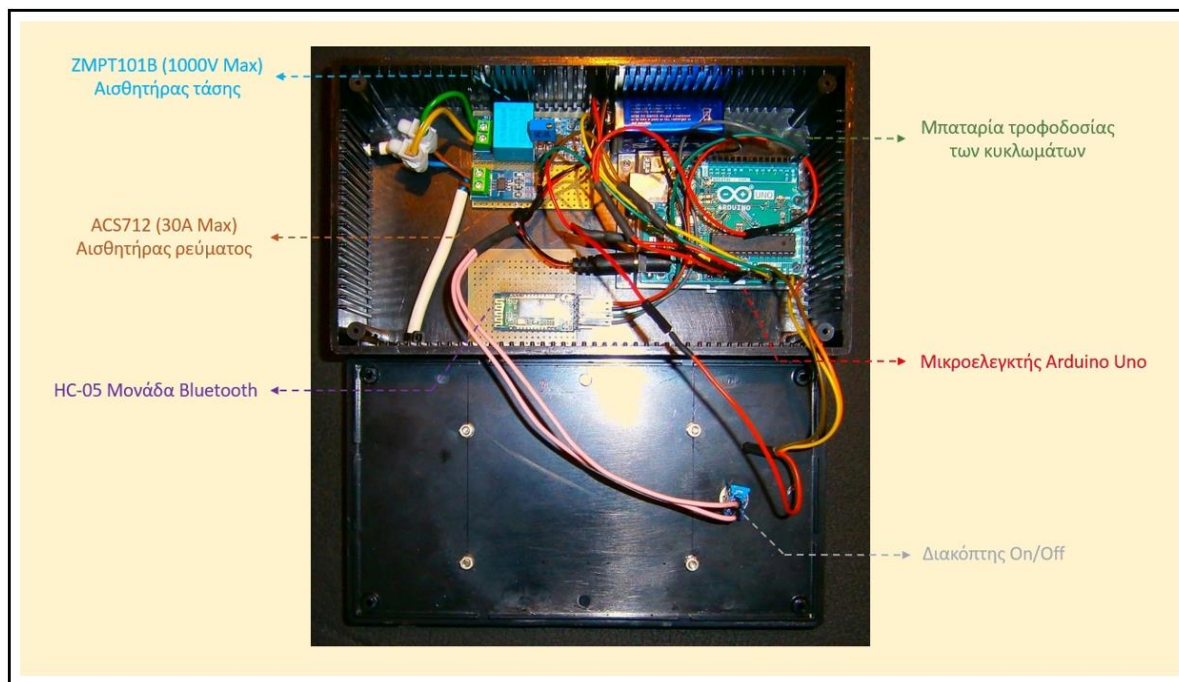
Αφού ολοκληρώθηκε η διάνοιξη των οπών, τοποθετήθηκε ο κεντρικός διακόπτης, η οθόνη LCD 20X4 γραμμών μαζί με την καλωδίωση της (αγωγοί Vcc, Gnd, SDA και SCL) και ακολούθως δοκιμάστηκε η εφαρμογή του καλωδίου παροχής και οδήγησης των φορτίων (εικόνα 13).



Εικόνα 13. Εφαρμογή της οθόνης LCD και των καλωδίων παροχής και φορτίων.

Στη συνέχεια, στερεώθηκαν όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα στο εσωτερικό της κατασκευής και πραγματοποιήθηκαν όλες οι συνδέσεις των επιμέρους υλικών (εικόνα 14), με όσο το δυνατόν λιγότερα καλώδια ακολουθώντας ένα βέλτιστο πλάνο διασύνδεσης.

Δεν χρησιμοποιήθηκε μεγάλο μήκος καλωδίων, ώστε να περιοριστούν οι ενεργειακές απώλειες. Στην σχήμα 14, αναπαρίσταται το διάγραμμα συνδέσεων των επιμέρους κυκλωμάτων.

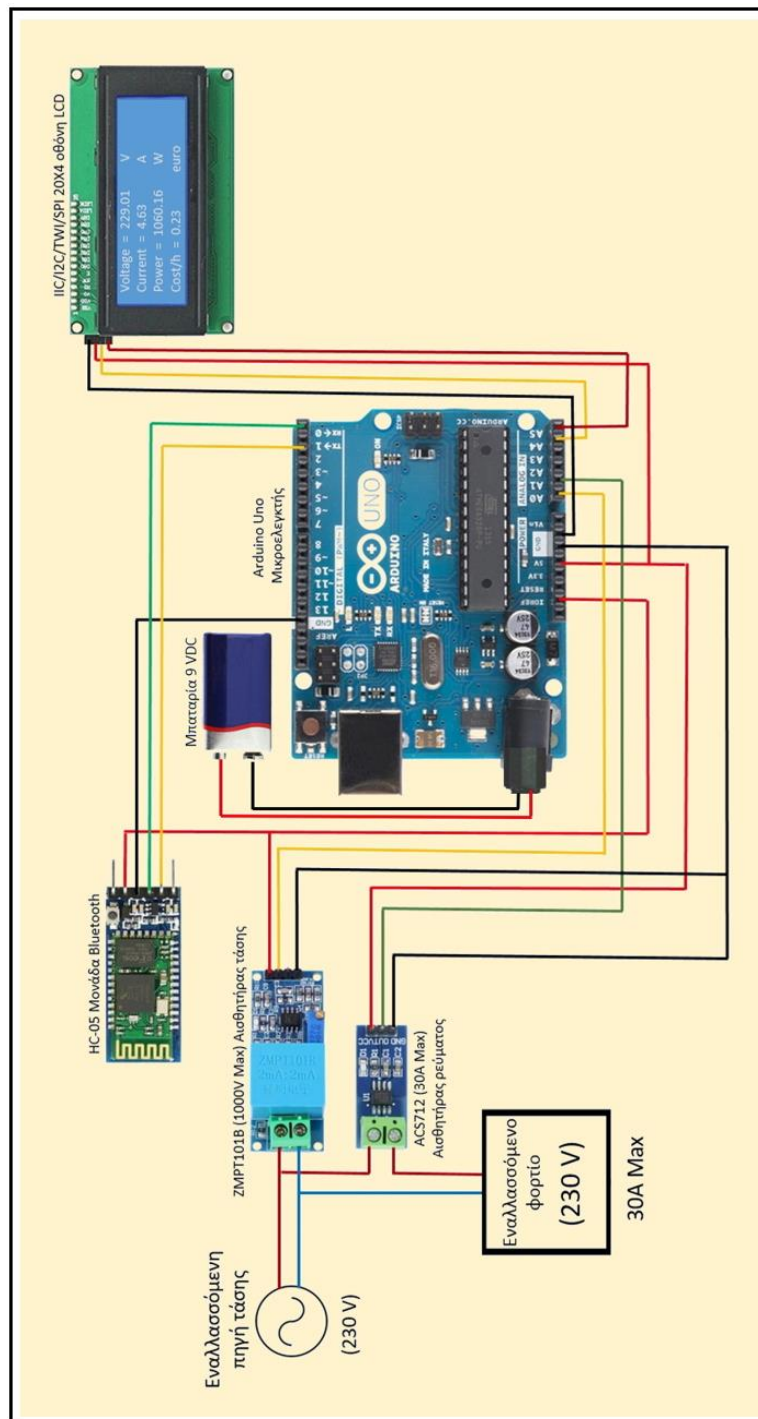


Εικόνα 14. Τοποθέτηση και διασύνδεση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Ακολουθώντας της τεχνικές προδιαγραφές των κατασκευαστών και τα αντίστοιχα εγχειρίδια χρήσης, οι πλακέτες επέκτασης (Shields) συνδέθηκαν με τον ακόλουθο τρόπο:

- Ελεγκτής I2C (οθόνη LCD): Τροφοδοτήθηκε με +5VDC (μέσω των ακροδεκτών Vcc και Gnd), ενώ οι ακροδέκτες SDA και SCL του ελεγκτή συνδέθηκαν αντίστοιχα στους ακροδέκτες A4 και A5 της πλατφόρμας Uno.
- Αισθητήρας τάσης (ZMPT101B): Τροφοδοτήθηκε με +5VDC (μέσω των ακροδεκτών Vcc και Gnd), ενώ ο ακροδέκτης Out (σήμα εξόδου) συνδέθηκε στην αναλογική είσοδο A0 της πλατφόρμας Uno. Η είσοδος του αισθητήρα (κλέμα 2 επαφών) συνδέεται απευθείας με το δίκτυο παροχής (230 VAC).
- Αισθητήρας ρεύματος (ACS712): Τροφοδοτήθηκε με +5VDC (μέσω των ακροδεκτών Vcc και Gnd), ενώ ο ακροδέκτης Out (σήμα εξόδου) συνδέθηκε στην αναλογική είσοδο A1 της πλατφόρμας Uno. Η είσοδος του αισθητήρα (κλέμα 2 επαφών) συνδέεται σε σειρά με το εναλλασσόμενο φορτίο (καταναλωτές / ηλεκτρικές συσκευές).

- Μονάδα Bluetooth HC-05: Τροφοδοτήθηκε με +5VDC (μέσω των ακροδεκτών IOREF και Gnd), ενώ οι ακροδέκτες Tx και Rx της μονάδας Bluetooth συνδέθηκαν αντίστοιχα στους ακροδέκτες D0 (Rx) και D1 (Tx) της πλατφόρμας Uno.
- Οθόνη LCD 20X4 γραμμές: Τροφοδοτήθηκε με +5VDC (μέσω των ακροδεκτών Vcc και Gnd), ενώ οι ακροδέκτες SDA και SCL της LCD οθόνης συνδέθηκαν αντίστοιχα στους ακροδέκτες A4 και A5 της πλατφόρμας Uno.



Σχήμα 14. Διάγραμμα συνδέσεων των επιμέρους κυκλωμάτων.

3.4 Τρόπος λειτουργίας του έξυπνου μετρητή

Ο μετρητής προγραμματίστηκε έτσι ώστε να υπολογίζει τη στιγμιαία ενεργό τάση ($V_{εν}$) και το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα ($I_{εν}$) για μικρά χρονικά διαστήματα (της τάξεως των ms). Βασική προϋπόθεση για να μετρηθεί το ενεργό ρεύμα ($I_{εν}$), είναι να υπάρχει κάποιο φορτίο συνδεδεμένο στον έξυπνο μετρητή και κατά κύριο λόγο ωμικό. Η ενεργός τάση ($V_{εν}$) μετριέται απευθείας από το δίκτυο παροχής και ισοδυναμεί με την ενεργό τάση ($V_{εν}$) στα άκρα μιας ηλεκτρικής συσκευής ή ενός συνόλου συσκευών.

Οι δύο αισθητήρες (ρεύματος και τάσης), έχουν γραμμική συμπεριφορά. Οπότε, η λειτουργία τους καθορίζεται από μια εξίσωση της μορφής $y = ax + b$ (όπου $b=0$). Εφόσον δύο σημεία της ευθείας είναι γνωστά (π.χ. δύο DC τάσεις στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος, που εκφράζουν δύο “ρεαλιστικές” ενεργές τιμές ρεύματος στην είσοδο), τότε μπορούν εύκολα να υπολογιστούν όλα τα υπόλοιπα σημεία της ευθείας (οι άγνωστες τιμές του ρεύματος). Εφόσον δύο μεγέθη είναι ανάλογα, τότε μια άγνωστη τιμή μπορεί να βρεθεί εύκολα εφαρμόζοντας το “νόμο των τριών”.

Γνωρίζοντας την ενεργό τάση ($V_{εν}$) και το ενεργό ρεύμα ($I_{εν}$) μιας δεδομένης χρονικής στιγμής, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς από τη σχέση $P = V_{εν} * I_{εν}$ (για ωμικά φορτία, ισχύει ότι $\cos\phi=1$). Για να υπολογιστεί σωστά η καταναλισκόμενη ισχύς, θα πρέπει να μετρηθούν με ακρίβεια οι μέγιστες τιμές της ενεργής τάσης ($V_{εν}$) και του ενεργού ρεύματος ($I_{εν}$), επειδή τα σήματα μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Αν το φορτίο δεν είναι απολύτως ωμικό, τότε στους υπολογισμούς θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος.

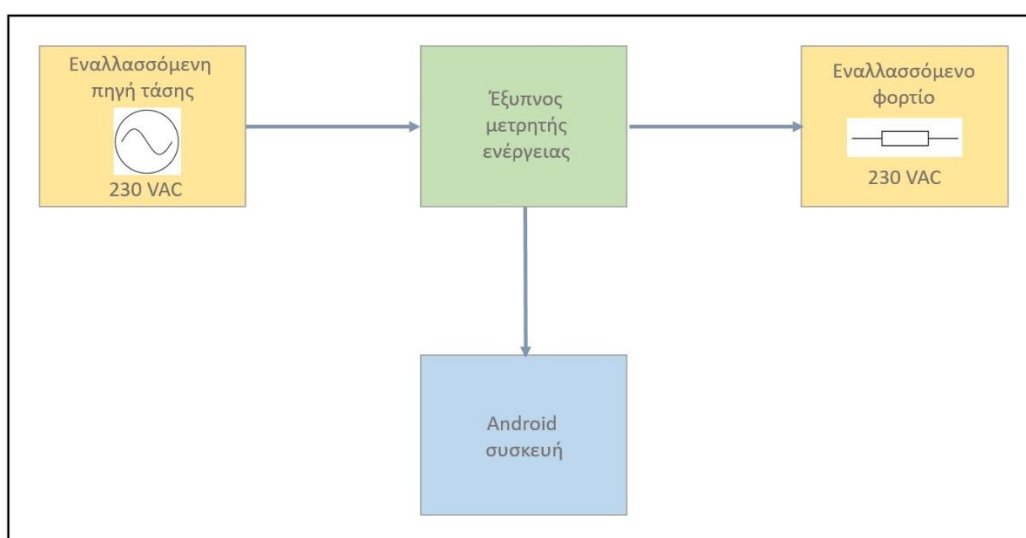
Για να υπολογιστεί το στιγμιαίο κόστος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την καταναλισκόμενη ισχύ (δηλαδή το γινόμενο $V_{εν} * I_{εν}$) με την τρέχουσα τιμή της κιλοβατώρας. Για λόγους πρακτικότητας, η ενεργειακή κατανάλωση μετριέται για χρονικό διάστημα μιας ώρας και η μονάδα που προκύπτει ονομάζεται βατώρα (Wh).

Οι καταναλωτές – χρήστες της διάταξης, παρατηρώντας τις επικείμενες ενεργειακές τιμές στην LCD οθόνη της μετρητικής διάταξης, είναι σε θέση να γνωρίζουν τι ενέργεια καταναλώνουν ανά πάσα στιγμή και ποιο είναι το χρηματικό ποσό που ξοδεύουν τη δεδομένη χρονική στιγμή. Οπότε, μπορούν να προβούν σε ανάλογες ενέργειες, ώστε να περιορίσουν την άσκοπη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τους Wang et al. (2019), η ηλεκτρική

κατανάλωση ενέργειας βασίζεται σε κοινωνικο-δημογραφικά χαρακτηριστικά των πολιτών και μπορεί να προβλεφθεί [21].

Η ανάγνωση των μετρούμενων τιμών μπορεί να γίνει επίσης από την αντίστοιχη Android εφαρμογή που δημιουργήθηκε (περιγράφεται σε επόμενη ενότητα), μέσω της online πλατφόρμας MIT App Inventor. Στο σχήμα 15 αναπαρίσταται το λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του έξυπνου μετρητή.

Μέσω του μετρητή μπορεί να ανιχνευτεί έγκαιρα η υπερβολική κατανάλωση ρεύματος (υπέρβαση ρευμάτων και τυχόν αυξομειώσεις) σε κάποια ηλεκτρική συσκευή ή γραμμή μεταφοράς, που με τη σειρά της μπορεί να προκαλέσει κάποιο ανεπιθύμητο βραχυκύκλωμα ή ακόμα και πυρκαγιά.



Σχήμα 15. Μπλοκ διάγραμμα του έξυπνου μετρητή

3.5 Βαθμονόμηση του έξυπνου μετρητή

Κάθε επιστημονικό όργανο ή μετρητική διάταξη, πριν τεθεί σε κανονική λειτουργία πρέπει να ελεγχθεί για την ορθή του λειτουργία. Η βαθμονόμηση των αισθητήρων είναι μια σημαντική διαδικασία, κατά την οποία ρυθμίζεται η κλίμακα μέτρησης των ηλεκτρικών μεγεθών, ώστε να πετύχουμε υψηλή ακρίβεια στα μετρητικά συστήματα [22].

Όταν ένας αισθητήρας έχει γραμμική συμπεριφορά, ως επί το πλείστον επικρατεί η αναλογικότητα στα αντίστοιχα μετρούμενα μεγέθη. Η αναλογικότητα αυτή σημαίνει ότι: όταν ένα μέγεθος αυξάνεται ή μειώνεται, ένα άλλο μέγεθος ακολουθεί με ανάλογο τρόπο και υπάρχει ταυτόχρονα εξάρτηση.

Η έξοδος των αισθητήρων ZMPT101B και ACS712, είναι επίσης γραμμική. Δηλαδή, όταν η ενεργή τάση (V_{εν}) στην είσοδο του αισθητήρα ZMPT101B αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η αντίστοιχη DC τάση στην έξοδο του.

Για τον αισθητήρα ACS712 ισχύει η ίδια λογική. Όταν δηλαδή το ενεργό ρεύμα (I_{εν}) στην είσοδο του αισθητήρα ACS712 αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η αντίστοιχη DC τάση στην έξοδο του. Επειδή και οι δύο αισθητήρες χαρακτηρίζονται από μια ευθεία της μορφής $y=ax+b$ (όπου $b=0$), αν δύο σημεία (ή τιμές) της ευθείας είναι γνωστά τότε μπορούν εύκολα να βρεθούν και τα υπόλοιπα σημεία-τιμές.

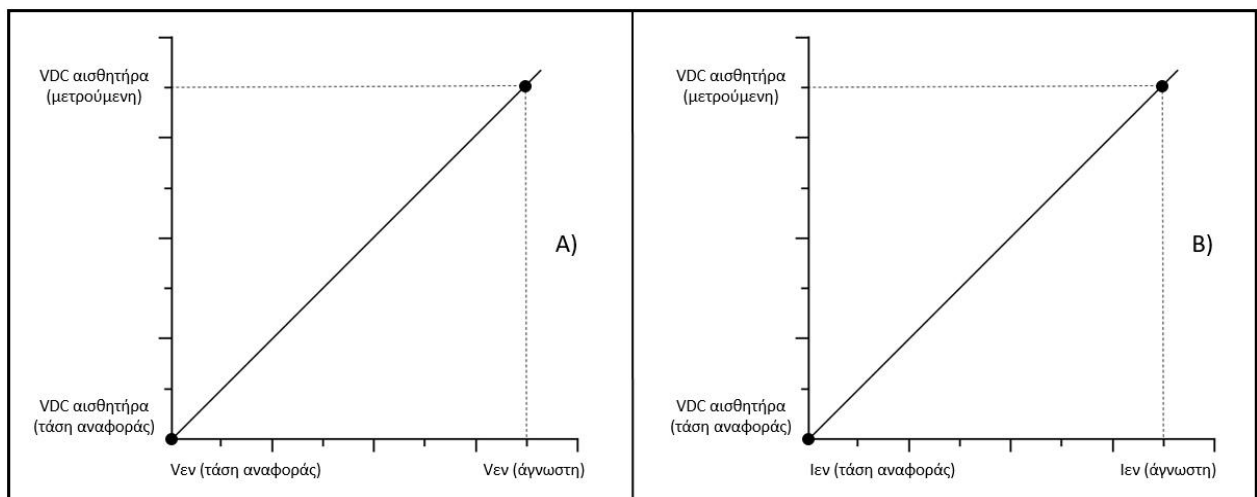
Και οι δύο αισθητήρες δίχως κάποια τάση ή ρεύμα στην είσοδο τους βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας και στην έξοδο τους επικρατεί μια συνεχής τάση (DC) ίση με 2.5 V (=2500 mV).

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων του έξυπνου μετρητή, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός μόνο εξωτερικού προτύπου (single external standard method). Με αυτή τη μέθοδο, η μετρητική διάταξη βαθμονομείται βάσει ενός μόνο πειραματικού σημείου αντί πολλών (σε αντίθεση με τη μέθοδο της καμπύλης αναφοράς). Η καμπύλη βαθμονόμησης διέρχεται υποχρεωτικά από την αρχή των αξόνων με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία.

Οι Abubakar et al. (2017), πραγματοποίησαν πολλά πειράματα ώστε να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του αισθητήρα τάσης ZMPT101B και τη συνολική εικόνα της βαθμονόμησης του. Συμπέραναν ότι, χρησιμοποιώντας πολυωνυμικές εξισώσεις 3^{ου} βαθμού για τη διαδικασία της βαθμονόμησης, το συνολικό μετρούμενο σφάλμα δεν ξεπερνάει το 0.9% (2.4% συνολικό σφάλμα για μέτρηση peak-to-peak του σήματος εξόδου) [22].

Η βαθμονόμηση με χρήση ενός μόνο εξωτερικού προτύπου προϋποθέτει την ύπαρξη γραμμικότητας αλλά και αναλογικότητας μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου των αισθητήρων.

Αν για παράδειγμα γνωρίζουμε ότι για μια δεδομένη ενεργή τάση (τάση αναφοράς) στην είσοδο του αισθητήρα παράγεται στην έξοδο του μια πρότυπη συνεχής τάση (VDC τάση αναφοράς), τότε γνωρίζοντας τη τρέχουσα (άγνωστη) συνεχή τάση (VDC μετρούμενη) στην έξοδο του αισθητήρα μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε μια άγνωστη ενεργό τάση στην είσοδο του. Με αυτό το τρόπο προκύπτουν οι τυπικές πρότυπες καμπύλες ενός αισθητήρα τάσης και ενός αισθητήρα ρεύματος όπως φαίνονται στο σχήμα 16.A και 16.B αντίστοιχα. Σε γραφικές παραστάσεις που εκφράζονται από ευθείες γραμμές, είναι εύκολο να βρεθεί η προέκταση των τιμών (οι άγνωστες τιμές).



Σχήμα 16. Τυπικές πρότυπες καμπύλες ενός αισθητήρα τάσης και ενός αισθητήρα ρεύματος.

Η συνάρτηση βαθμονόμησης του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B), προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$V_{εν} (\acute{\alpha}\gamma\nu\omega\sigma\tau\eta) = \frac{VDC \text{ αισθητήρα (μετρούμενη)}}{VDC \text{ αισθητήρα (τάση αναφοράς)}} * V_{εν} (\acute{\alpha}\gamma\nu\omega\sigma\tau\eta) \quad (3.2)$$

Αντίστοιχα, η συνάρτηση βαθμονόμησης του αισθητήρα ρεύματος (ACS712), θα είναι η εξής:

$$I_{εν} (\acute{\alpha}\gamma\nu\omega\sigma\tau\eta) = \frac{VDC \text{ αισθητήρα (μετρούμενη)}}{VDC \text{ αισθητήρα (τάση αναφοράς)}} * I_{εν} (\acute{\alpha}\gamma\nu\omega\sigma\tau\eta) \quad (3.3)$$

Η βαθμονόμηση του μετρητή χωρίστηκε σε 2 σκέλη. Αρχικά έγινε βαθμονόμηση του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B) και στη συνέχεια ακολούθησε η βαθμονόμηση του αισθητήρα ρεύματος (ACS712).

3.5.1 Βαθμονόμηση του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B)

Για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B), μετρήθηκε για μια δεδομένη ενεργή τάση ($V_{εν}$) εισόδου, η αντίστοιχη συνεχής τάση (DC) που επικρατεί στην έξοδο του. Για να γίνει αυτό, δημιουργήθηκε το παρακάτω τμήμα κώδικα στο περιβάλλον IDE, το οποίο υπολογίζει τη μέγιστη θετική τιμή της AC κυμάτωσης της τάσης. Η μέγιστη αυτή τιμή μεταφράζεται σε συνεχή τάση (DC) στην έξοδο του αισθητήρα (με/χωρίς την τάση αναφοράς των 2.5 VDC του αισθητήρα), δημιουργώντας με αυτό το τρόπο μια αναφορά για τον υπολογισμό της ενεργού τάσης ($V_{εν}$).

```

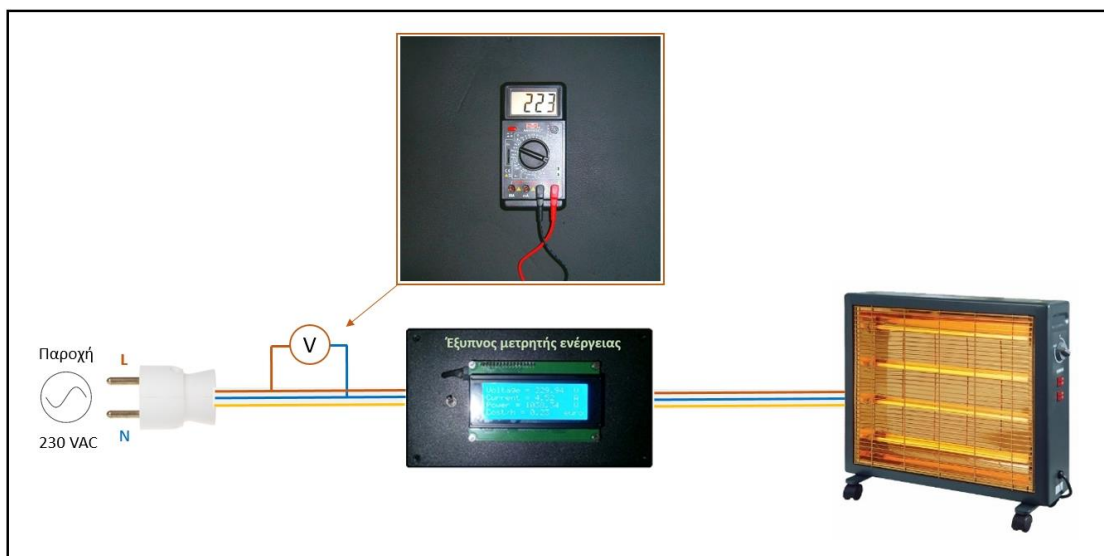
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int sensorVoltageRead = analogRead(A0);
  float voltageMeasure = sensorVoltageRead * (5.0 / 1023.0);
  float MaxVoltage = voltageMeasure;
  for (int i=0; i<100;i++)
  {
    sensorVoltageRead = analogRead(A0);
    voltageMeasure = sensorVoltageRead * (5.0 / 1023.0);
    if (voltageMeasure > MaxVoltage) {
      MaxVoltage = voltageMeasure;
    }
    delayMicroseconds(100);
  }
  Serial.print(MaxVoltage);
  Serial.println(" // Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ZMPT101B (τάση Vcc/2 + σήμα διέγερσης)");
  Serial.print(abs(MaxVoltage-2.5));
  Serial.println(" // Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα (σήμα διέγερσης) που αντιπροσωπεύει 223 Vrms");
  delay(1000);
}

```

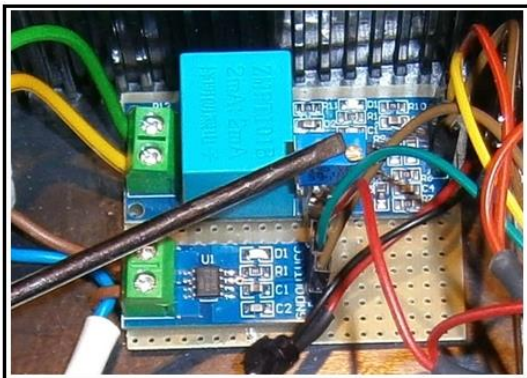
Για τη βαθμονόμηση της ενεργού τάσης συνδέθηκε στην έξοδο του μετρητή ένα εικονικό φορτίο (Dummy load / ηλεκτρική συσκευή μεγάλης ισχύος) ως καταναλωτής.

Στην είσοδο του μετρητή συνδέθηκε παράλληλα ένα φορητό βολτόμετρο τύπου Mastech M890C (σχήμα 17), ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια η ενεργή τάση που επικρατεί στα άκρα του φορτίου. Η τάση αυτή αποτελεί μια τάση αναφοράς, η οποία θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα στο κυρίως πρόγραμμα για τους υπολογισμούς της καταναλισκόμενης ισχύος και του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.



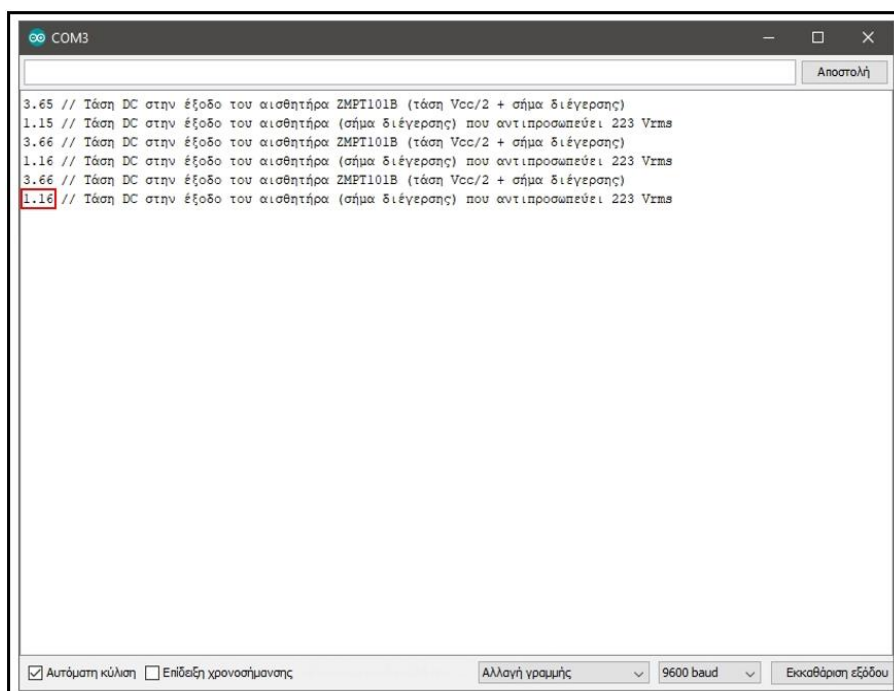
Σχήμα 17. Σύνδεση εικονικού φορτίου και μέτρηση της ενεργής τάσης (V_{εν})

Πριν τη λήψη των μετρήσεων, ρυθμίστηκε επίσης το εύρος της τάσης εξόδου του αισθητήρα μέσω της μεταβλητής αντίστασης που βρίσκεται πάνω στη μονάδα, για αποδεκτά όρια τιμών στην έξοδο (εικόνα 15).



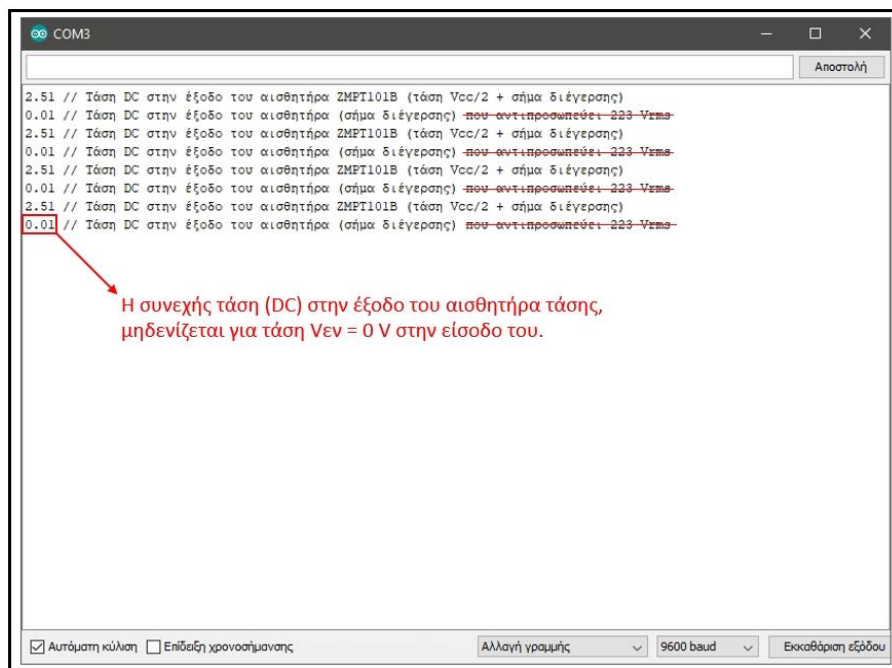
Εικόνα 15. Ρύθμιση του εύρους της τάσης εξόδου του αισθητήρα ZMPT101B.

Παρακολουθώντας τα δεδομένα της σειριακής θύρας (εικόνα 16), συμπεραίνουμε ότι ο αισθητήρας τάσης (ZMPT101B) για 223 V (rms) στην είσοδο του, παράγει μια μέγιστη θετική τάση (DC) στην έξοδο του ίση με 1.16 V. Το σημείο (1.16,223) αποτελεί το δεύτερο σημείο της ευθείας $y=ax+b$ (όπου $b=0$), το οποίο χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα. Το πρώτο σημείο είναι το (0,0), το οποίο δίνεται ουσιαστικά από τον κατασκευαστή.



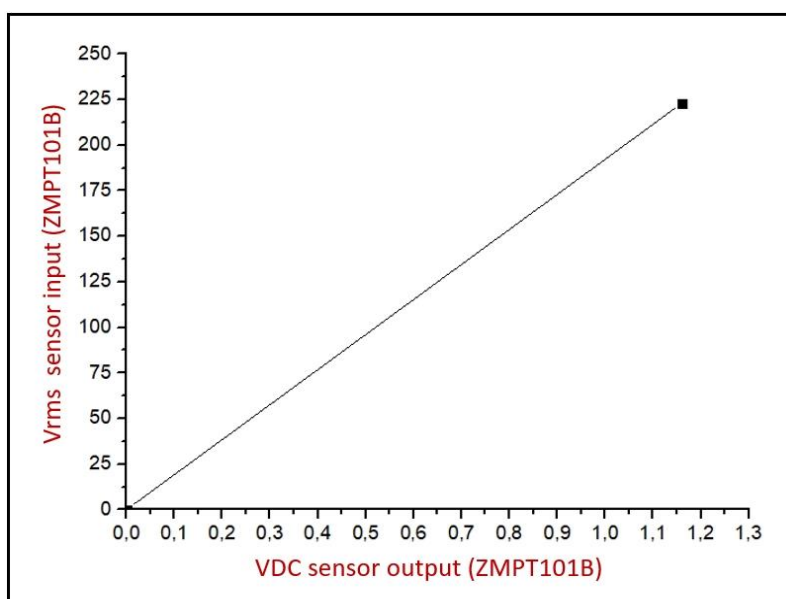
Εικόνα 16. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα τάσης, για 223V (rms) στην είσοδο

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε η τάση εισόδου (V_{en}) που οδηγεί το φορτίο και επιβεβαιώθηκε ότι η τάση (DC) στην έξοδο του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B) ισούται με 0 VDC για μηδενική τιμή εναλλασσόμενης τάσης στη είσοδο (όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα). Η τιμή αυτή αποτυπώνεται στη εικόνα 17 και ισούται με 0.01 VDC (σχεδόν 0 VDC).



Εικόνα 17. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα τάσης, για 0V (rms) στην είσοδο.

Έχοντας πλέον καταγεγραμμένα δύο σημεία της ευθείας $y=ax+b$ (όπου $b=0$), μπορεί να γίνει η αντίστοιχη απεικόνιση της εξίσωσης που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του αισθητήρα τάσης. Για την απεικόνιση της εξίσωσης, χρησιμοποιήθηκε το επιστημονικό πρόγραμμα Origin Lab V9.0, το οποίο αποτελεί ιδανική λύση για εφαρμογές απεικόνισης και ανάλυσης δεδομένων. Αφού καταχωρήθηκαν τα δύο σημεία της ευθείας σε ένα πίνακα, πραγματοποιήθηκε απεικόνιση της αντίστοιχης ευθείας βαθμονόμησης. Το γράφημα που προέκυψε, αντικατοπτρίζεται στο σχήμα 18 και αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).



Σχήμα 18. Εξίσωση ευθείας που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα τάσης (ZMPT101B).

3.5.2 Βαθμονόμηση του αισθητήρα ρεύματος (ACS712)

Για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα ρεύματος ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως περιγράφηκε πιο πάνω για τον αισθητήρα τάσης.

Συγκεκριμένα για μια δεδομένη ενεργή τιμή ρεύματος ($I_{\text{εν}}$) στην είσοδο του αισθητήρα ρεύματος, μετρήθηκε η αντίστοιχη συνεχής τάση (DC) που επικρατεί στην έξοδο του.

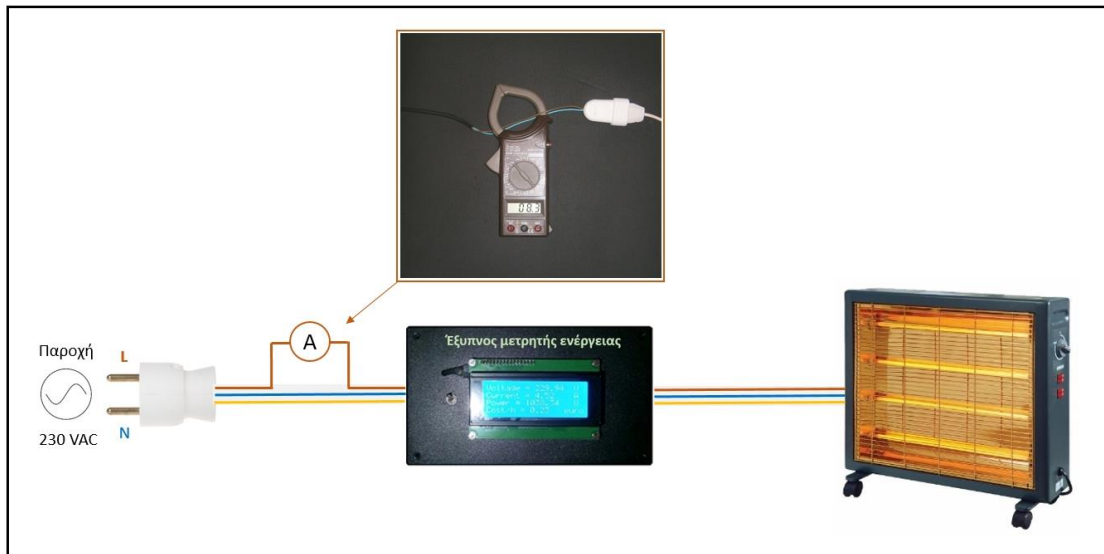
Για να γίνει αυτό, δημιουργήθηκε το παρακάτω τμήμα κώδικα στο περιβάλλον IDE, το οποίο υπολογίζει τη μέγιστη θετική τιμή της κυμάτωσης του ρεύματος. Η μέγιστη αυτή τιμή μεταφράζεται σε μια συνεχή τάση (DC) στην έξοδο του αισθητήρα (με/χωρίς την τάση αναφοράς των 2.5 VDC του αισθητήρα), δημιουργώντας με αυτό το τρόπο μια αναφορά για τον υπολογισμό του ενεργού ρεύματος ($I_{\text{εν}}$).

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  int sensorCurrentRead=analogRead(A1);  
  float currentMeasure=sensorCurrentRead* (5.0/1023.0);  
  float MaxAmperes=currentMeasure;  
  for (int i=0; i<100;i++)  
  {  
    sensorCurrentRead=analogRead(A1);  
    currentMeasure=sensorCurrentRead* (5.0/1023.0);  
    if (currentMeasure>MaxAmperes) {  
      MaxAmperes=currentMeasure;  
    }  
    delayMicroseconds(100);  
  }  
  Serial.print(MaxAmperes);  
  Serial.println(" // Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ACS712 (τάση Vcc/2 + σήμα διέγερσης)");  
  Serial.print(abs(MaxAmperes-2.5));  
  Serial.println(" // Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα (σήμα διέγερσης) που αντιπροσωπεύει 8.3 Arms");  
  delay(1000);  
}
```

Για τη διαδικασία της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε ρεύμα αναφοράς 8.3 A, το οποίο προήλθε από ένα εικονικό φορτίο (Dummy load / ηλεκτρική συσκευή μεγάλης ισχύος). Το ίδιο εικονικό φορτίο χρησιμοποιήθηκε και για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα τάσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Σε αντίστοιχη έρευνα που πραγματοποίησαν οι Hallur et al. (2018), βαθμονόμησαν με ανάλογο τρόπο τον αισθητήρα τάσης και ρεύματος ενός έξυπνου μετρητή, συγκρίνοντας τις μετρούμενες τιμές τάσης και ρεύματος της διάταξης που κατασκεύασαν, με τις αντίστοιχες τιμές ρεύματος ενός ψηφιακού πολύμετρου ώστε να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση [23].

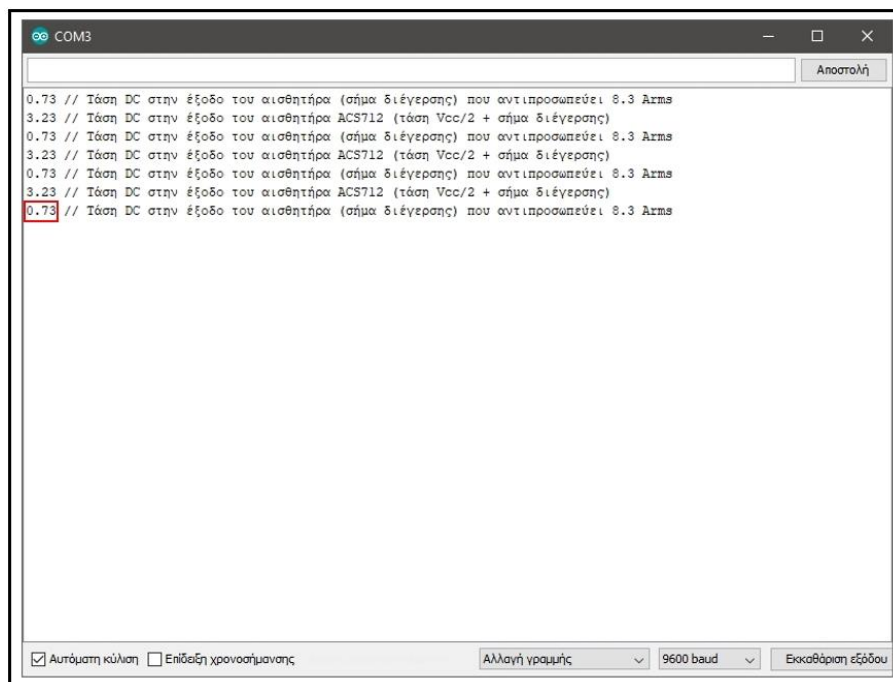
Στην είσοδο του μετρητή εφαρμόστηκε μια αμπεροτσιμπίδα τύπου Mastech M266 Clamp meter, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το ενεργό ρεύμα που διαρρέει τον έξυπνο μετρητή. Το ρεύμα που μετρήθηκε θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα στο κυρίως πρόγραμμα για τους υπολογισμούς της

καταναλισκόμενης ισχύος (ως ρεύμα αναφοράς). Η σύνδεση του εικονικού φορτίου για τη μέτρηση του ρεύματος στη είσοδο του μετρητή, αναπαρίσταται στο σχήμα 19.



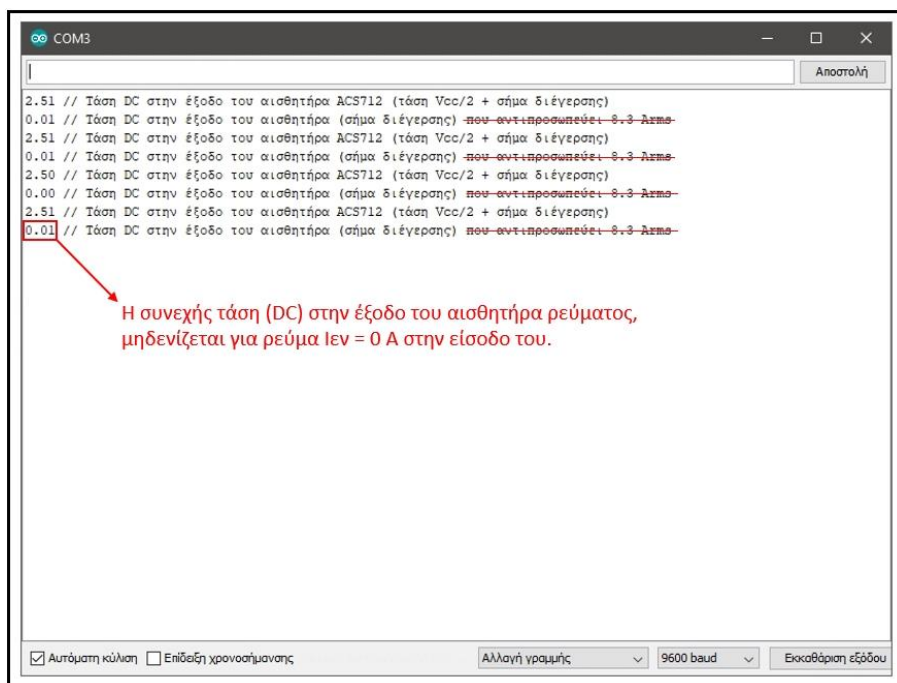
Σχήμα 19. Σύνδεση εικονικού φορτίου και μέτρηση του ενεργού ρεύματος (I_{εν}).

Παρακολουθώντας τα δεδομένα της σειριακής θύρας, συμπεραίνουμε ότι ο αισθητήρας ρεύματος (ACS712) για 8.3 A (rms) στην είσοδο του, παράγει μια μέγιστη θετική τάση (DC) στην έξοδο του ίση με 0.73 V (εικόνα 18). Το σημείο (0.73,8.3) αποτελεί το δεύτερο σημείο της ευθείας $y=ax+b$ (όπου $b=0$), το οποίο χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα. Το πρώτο σημείο είναι το (0,0), το οποίο δίνεται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 18. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος, για 8.3 A (rms) στην είσοδο

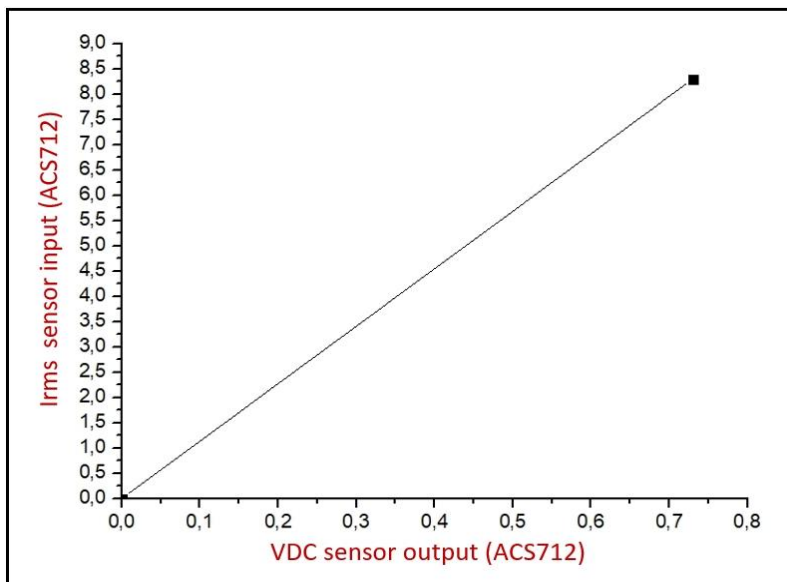
Στη συνέχεια αφαιρέθηκε το ρεύμα εισόδου (I_{in}) που οδηγεί το φορτίο και επιβεβαιώθηκε ότι η τάση (DC) στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος (ACS712) ισούται με 0 VDC για μηδενική τιμή εναλλασσόμενου ρεύματος στην είσοδο (όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή). Η τιμή αυτή αποτυπώνεται στη εικόνα 19 και ισούται με 0.01 VDC (σχεδόν 0 VDC).



Εικόνα 19. Τάση DC στην έξοδο του αισθητήρα ρεύματος, για 0 A (rms) στην είσοδο

Έχοντας καταγράψει τα δύο σημεία της ευθείας $y=ax+b$ (όπου $b=0$), μπορεί να γίνει η αντίστοιχη απεικόνιση της εξίσωσης που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του αισθητήρα ρεύματος.

Για την απεικόνιση της εξίσωσης, χρησιμοποιήθηκε και πάλι το επιστημονικό πρόγραμμα Origin Lab V9.0. Αφού καταχωρήθηκαν τα δύο σημεία της ευθείας σε ένα πίνακα, πραγματοποιήθηκε απεικόνιση της αντίστοιχης ευθείας βαθμονόμησης. Το γράφημα που προέκυψε, αντικατοπτρίζεται στο σχήμα 20 και αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του αισθητήρα ρεύματος (ACS712).



Σχήμα 20. Εξίσωση ευθείας που χαρακτηρίζει τη λειτουργία του αισθητήρα ρεύματος (ACS712)

3.6 Προγραμματισμός του συστήματος (περιβάλλον IDE)

Σε αυτή την υποενότητα, παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την ορθή λειτουργία του έξυπνου μετρητή. Το πρόγραμμα συγχρονίζει τις επιμέρους λειτουργίες όλων των περιφερειακών μονάδων που είναι συνδεδεμένες στη πλατφόρμα Arduino Uno.

Η παρουσίαση του κώδικα γίνεται τμηματικά (σε τρία μέρη). Παρατίθεται επίσης αναλυτική επεξήγηση για κάθε γραμμή του κώδικα που εκτελέστηκε.

Αρχικά στο πρώτο μέρος, δηλώθηκαν οι βιβλιοθήκες Wire.h και LiquidCrystal_I2C.h για τη λειτουργία της LCD οθόνης 20X4 γραμμών μέσω του δίαυλου επικοινωνίας I2C. Καθορίστηκε επίσης η σωστή διεύθυνση για την επικοινωνία της οθόνης LCD. Ακολούθως, δηλώθηκαν οι ακέραιες μεταβλητές sensorVoltageRead/sensorCurrentRead και οι πραγματικές μεταβλητές voltageMeasure, currentMeasure, VoltsRMS και AmpsRMS.

```
// Συμπερίληψη της βιβλιοθήκης Wire, για την επικοινωνία με συσκευές που χρησιμοποιούν τη διεπαφή I2C
#include <Wire.h>
// Συμπερίληψη της βιβλιοθήκης LiquidCrystal_I2C για τη λειτουργία της LCD οθόνης 20X4 μέσω του δίαυλου I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Καθορισμός της διεύθυνσης 0x27 για την LCD οθόνη 20 χαρακτήρων/4 γραμμών
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

// Δήλωση της ακέραιας μεταβλητής "ανάγνωση τάσης αισθητήρα", που θα ισούται με τη τιμή της αναλογικής εισόδου A0
int sensorVoltageRead=analogRead(A0);
// Δήλωση της ακέραιας μεταβλητής "ανάγνωση ρεύματος αισθητήρα", που θα ισούται με τη τιμή της αναλογικής εισόδου A1
int sensorCurrentRead=analogRead(A1);
// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής "Μετρούμενη τάση", για τη μετατροπή των αναλ. τιμών της εισόδου A0 σε πραγματικές τιμές τάσης (0-5 VDC)
float voltageMeasure=sensorVoltageRead*(5.0/1023.0);
// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής "Μετρούμενο ρεύμα", για τη μετατροπή των αναλ. τιμών της εισόδου A1 σε πραγματικές τιμές τάσης (0-5 VDC)
float currentMeasure=sensorCurrentRead*(5.0/1023.0);
// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής Volts, που αντιπροσωπεύει την Ενεργό τάση (Vεν)
float VoltsRMS;
// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής Amps, που αντιπροσωπεύει το Ενεργό ρεύμα (Iεν)
float AmpsRMS;
```

Στο δεύτερο μέρος (συνάρτηση `setup`), αρχικοποιήθηκαν οι ρυθμίσεις που εκτελούνται μόνο μια φορά κατά την εκκίνηση του μικροελεγκτή. Συγκεκριμένα ορίστηκε ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων (baud rate) και αρχικοποιήθηκε επίσης η λειτουργία της LCD οθόνης και του φωτισμού της. Επιπροσθέτως, δηλώθηκαν οι θέσεις των στηλών/γραμμών που θα εμφανίζονται οι ονομασίες των μετρούμενων μεγεθών και οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησης, μέσω της εντολής `lcd.setCursor`.

```
// Η συνάρτηση setup αρχικοποιεί τις ρυθμίσεις που εκτελούνται μια φορά μόνο κατά την εκκίνηση
void setup() {

  // Εκκίνηση της σειριακής επικοινωνίας με ταχύτητα 9600 Bit/s
  Serial.begin(9600);
  // Αρχικοποίηση της λειτουργίας της οθόνης LCD
  lcd.init();
  // Αρχικοποίηση του οπίσθιου φωτισμού της οθόνης LCD
  lcd.backlight();
  // Μετακίνηση του δείκτη στην 1η στήλη/1η γραμμή της οθόνης LCD
  lcd.setCursor(0,0);
  // Τύπωμα στην οθόνη LCD του μεγέθους "Τάση" και της αντίστοιχης μονάδας μέτρησης
  lcd.print("Voltage =      V");
  // Μετακίνηση του δείκτη στην 1η στήλη/2η γραμμή της οθόνης LCD
  lcd.setCursor(0,1);
  // Τύπωμα στην οθόνη LCD του μεγέθους "Ρεύμα" και της αντίστοιχης μονάδας μέτρησης
  lcd.print("Current =      A");
  // Μετακίνηση του δείκτη στην 1η στήλη/3η γραμμή της οθόνης LCD
  lcd.setCursor(0,2);
  // Τύπωμα στην οθόνη LCD του μεγέθους "Ισχύς" και της αντίστοιχης μονάδας μέτρησης
  lcd.print("Power =      W");
  // Μετακίνηση του δείκτη στην 1η στήλη/4η γραμμή της οθόνης LCD
  lcd.setCursor(0,3);
  // Τύπωμα στην οθόνη LCD του μεγέθους "Κόστος ανά ώρα" και της αντίστοιχης μονάδας μέτρησης
  lcd.print("Cost/h =      euro");
}
```

Το τρίτο μέρος (συνάρτηση `loop`), αποτελεί το κύριο μέρος του προγράμματος όπου πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί και καθορίζονται οι τελικές τιμές των ενδείξεων της μετρητικής διάταξης.

Αρχικά, τα αναλογικά σήματα των εισόδων A1, A2 μετατρέπονται σε στάθμες τάσης (όπως προκύπτουν από τις εξόδους των αισθητήρων ZMPT101B και ACS712 αντίστοιχα). Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των μετρούμενων τάσεων (DC), ώστε να βρεθούν οι μέγιστες τιμές της τάσης και του ρεύματος που αναλογούν στην ενεργό τάση ($V_{\text{εν}}$) και το ενεργό ρεύμα ($I_{\text{εν}}$) που διαρρέει το μετρητή μια δεδομένη χρονική στιγμή. Από τις μέγιστες αυτές τιμές της τάσης και του ρεύματος προκύπτει στη συνέχεια η στιγμιαία ισχύς που καταναλώνεται στο φορτίο.

```

// Η συνάρτηση loop καλείται συνεχώς, ώστε να ανταποκρίνεται το πρόγραμμα σε εξωτερικά ερεθίσματα
void loop() {

// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής "Μέγιστη τάση", που θα ισούται με τη μεταβλητή "μέτρηση τάσης"
float MaxVoltage = voltageMeasure;
// Δήλωση της πραγματικής μεταβλητής "Μέγιστο ρεύμα", που θα ισούται με τη μεταβλητή "μέτρηση ρεύματος"
float MaxAmperes = currentMeasure;

// Κάθε φορά που το i είναι μικρότερο του 100 εκτελούνται τα παρακάτω
for (int i=0; i<100;i++) {

// Η μεταβλητή "ανάγνωση τάσης αισθητήρα" θα ισούται με την τιμή της αναλογικής εισόδου A0
sensorVoltageRead = analogRead(A0);
// Η μεταβλητή "ανάγνωση ρεύματος αισθητήρα" θα ισούται με την τιμή της αναλογικής εισόδου A1
sensorCurrentRead = analogRead(A1);
// Μετατροπή των αναλογικών τιμών της εισόδου A0 σε πραγματικές τιμές τάσης
voltageMeasure=sensorVoltageRead*(5.0/1023.0);
// Μετατροπή των αναλογικών τιμών της εισόδου A1 σε πραγματικές τιμές τάσης
currentMeasure = sensorCurrentRead*(5.0/1023.0);

// Αν η "Μετρούμενη τάση" είναι μεγαλύτερη από τη "Μέγιστη τάση"
if (voltageMeasure>MaxVoltage) {
// Η "Μέγιστη τάση" ισούται με τη "Μετρούμενη τάση"
MaxVoltage = voltageMeasure;
// Υπολογισμός της Ενεργού τάσης (Vεν) σύμφωνα με τη σχέση 3.2
VoltsRMS=((MaxVoltage-2.5)/1.16)*223;
}

// Αν το "Μετρούμενο ρεύμα" είναι μεγαλύτερο από το "Μέγιστο ρεύμα"
if (currentMeasure>MaxAmperes) {
// Το "Μέγιστο ρεύμα" ισούται με το "Μετρούμενο ρεύμα"
MaxAmperes = currentMeasure;
// Υπολογισμός του Ενεργού ρεύματος (Iεν) σύμφωνα με τη σχέση 3.3
AmpsRMS=((MaxAmperes-2.5)/0.73)*8.3;
}

//Εισαγωγή καθυστέρηση χρόνου 1 ms
delay(1);
}
}

```

Κατόπιν, δηλώθηκαν οι στήλες/γραμμές της οθόνης που θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων (στιγμιαία ενεργός τάση (V_{εν}), στιγμιαίο ενεργό ρεύμα (I_{εν}), στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς, στιγμιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας) μέσω της εντολής lcd.setCursor. Στο κομμάτι αυτό του κώδικα, υλοποιούνται και οι υπολογισμοί της στιγμιαίας καταναλισκόμενης ισχύος και του στιγμιαίου κόστους της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς προκύπτει από το γινόμενο της ενεργής τάσης (V_{εν}) και του ενεργού ρεύματος (I_{εν}), ενώ το στιγμιαίο κόστος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (σε ευρώ/ώρα) προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τη συνολική καταναλισκόμενη ισχύ με το κόστος της μιας κιλοβατώρας και διαιρέσουμε στη συνέχεια το αποτέλεσμα δια του 1000. Σαν κόστος κατανάλωσης ανά ώρα ορίσθηκαν τα 0.1681 ευρώ στο μετρητή, που ήταν το μέσο κόστος της κιλοβατώρας (KWh) στην Ελλάδα το πρώτο τρίμηνο του 2020 σύμφωνα με τη Eurostat.

```

// Μετακινεί το δείκτη στην 11η στήλη/1η γραμμή της οθόνης LCD
lcd.setCursor(10,0);
// Τύπωμα στην LCD οθόνη του αποτελέσματος της "Ενεργού τάσης (Vεν)"
lcd.print(VoltsRMS);
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 100 ms
delay(100);
// Μετακινεί το δείκτη στην 11η στήλη/2η γραμμή της οθόνης LCD
lcd.setCursor(10,1);
// Τύπωμα στην LCD οθόνη του αποτελέσματος του "Ενεργού ρεύματος (Iεν)"
lcd.print(AmpsRMS);
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 100 ms
delay(100);
// Μετακινεί το δείκτη στην 9η στήλη/3η γραμμή της οθόνης LCD
lcd.setCursor(8,2);
// Τύπωμα στην LCD οθόνη του αποτελέσματος της "Καταναλισκόμενη ισχύς"
lcd.print(VoltsRMS*AmpsRMS);
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 100 ms
delay(100);
// Μετακινεί το δείκτη στην 10η στήλη/4η γραμμή της οθόνης LCD
lcd.setCursor(9,3);
// Τύπωμα στην LCD οθόνη του αποτελέσματος "Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας" (έχει τεθεί τιμή για 1 kWh = 0.1681 ευρώ)
lcd.print((VoltsRMS*AmpsRMS)/1000*0.1681);
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 100 ms
delay(100);

```

Τα αποτελέσματα που αποτυπώθηκαν στην LCD οθόνη, στη συνέχεια τυπώθηκαν και στη σειριακή θύρα του μικροελεγκτή ώστε να είναι απευθείας διαθέσιμα στη μονάδα Bluetooth HC-05 μέσω των ακροδεκτών D0 και D1. Οι υπολογισμοί των τιμών γίνονται όπως και πιο πάνω, με τη μόνη διαφορά ότι η ισχύς στην Android εφαρμογή εκφράζεται σε KW (αντί για Watt που εμφανίζονται στην LCD οθόνη).

```

// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα το αποτέλεσμα των υπολογισμών της "Ενεργού τάσης (Vεν)", με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου
Serial.print(VoltsRMS, 1);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα η μονάδα μέτρησης της "Ενεργού τάσης (Vεν)"
Serial.print(" Volts");
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 1000 ms
delay(1000);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα το αποτέλεσμα των υπολογισμών του "Ενεργού ρεύματος (Iεν)", με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου
Serial.print(AmpsRMS, 1);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα η μονάδα μέτρησης του "Ενεργού ρεύματος (Iεν)"
Serial.print(" Amperes");
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 1000 ms
delay(1000);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα το αποτέλεσμα της "Καταναλισκόμενη ισχύς", με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου
Serial.print(VoltsRMS*AmpsRMS/1000, 1);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα η μονάδα μέτρησης της "Καταναλισκόμενη ισχύς"
Serial.print(" KW");
//Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 1000 ms
delay(1000);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα το αποτέλεσμα του "Κόστους ηλεκτρικής ενέργειας", με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων
Serial.print((VoltsRMS*AmpsRMS)/1000*0.1681, 2);
// Τυπώνεται στη σειριακή θύρα η μονάδα μέτρησης του "Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας"
Serial.print(" euro/h");
// Εισαγωγή καθυστέρησης χρόνου 1000 ms
delay(1000);
}

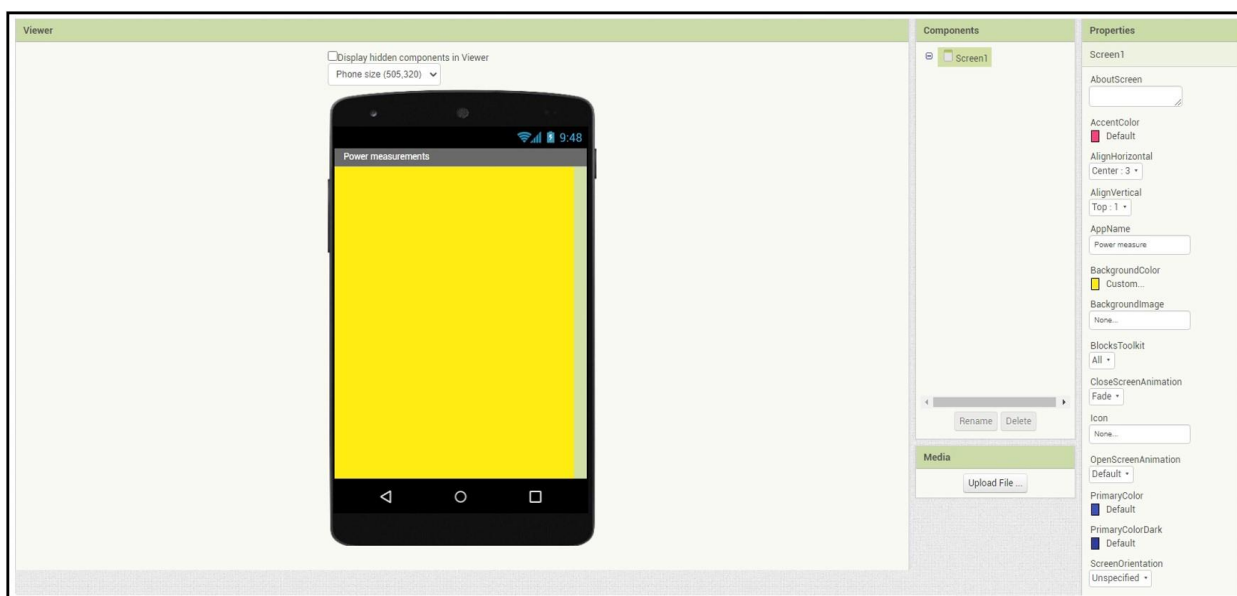
```

3.7 Δημιουργία της Android εφαρμογής (MIT App Inventor)

Στην παρούσα υποενότητα, περιγράφεται η Android εφαρμογή που σχεδιάστηκε για την απεικόνιση των μετρούμενων μεγεθών (στιγμιαία ενεργή τάση, στιγμιαίο ενεργό ρεύμα, στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς και στιγμιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας) σε πραγματικό χρόνο. Η πλατφόρμα MIT App Inventor 2, παρέχει ευελιξία στην ανάπτυξη εφαρμογών για κινητά τηλέφωνα και δεν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις προγραμματισμού.

Το σχεδιαστικό περιβάλλον χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Το πρώτο είναι το περιβάλλον όπου επιλέγονται τα συστατικά στοιχεία της εφαρμογής (components) και ονομάζεται σχεδιαστής (Designer). Ενώ το δεύτερο, είναι ο συντάκτης πλακιδίων (Block editor), μέσα από τον οποίο χτίζονται οι προγραμματιστικές δομές σε μεμονωμένα πλαίσια.

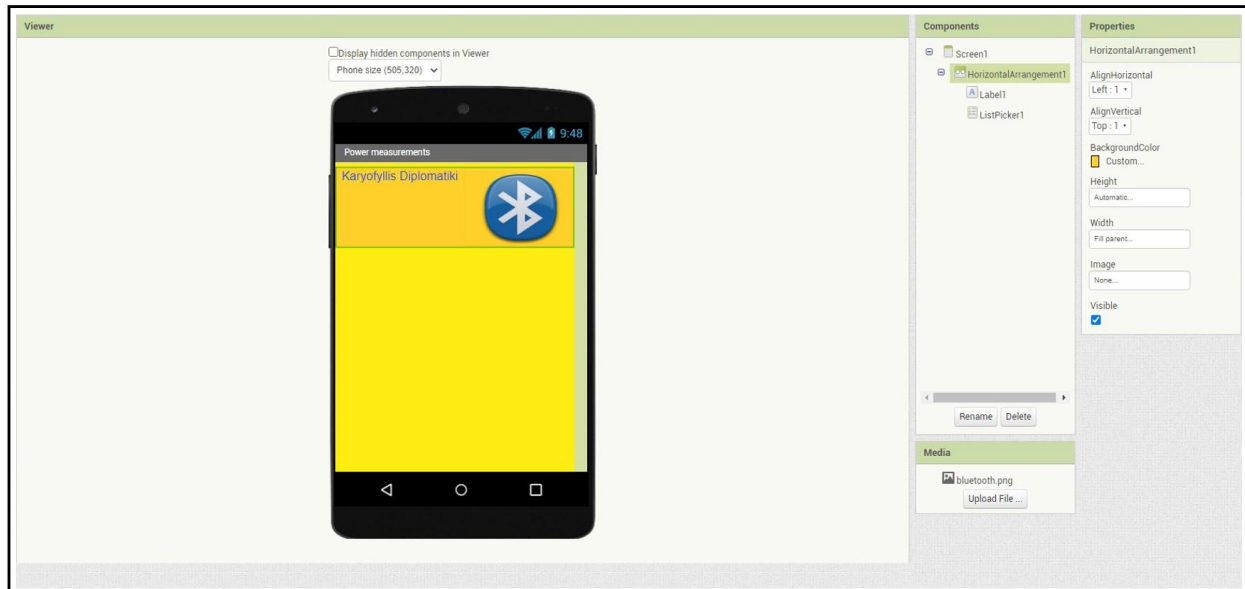
Μέσω του σχεδιαστή (Designer) δημιουργήθηκε ένα νέο έργο, με ονομασία “Power measurements”. Επιλέχθηκε στη συνέχεια το βασικό χρώμα φόντου της οθόνης (Background Color) όπως φαίνεται στην εικόνα 20.



Εικόνα 20. Επιλογή χρώματος φόντου για την εφαρμογή Android

Εν συνεχεία, τοποθετήθηκε ένα πλαίσιο οριζόντιας διαρρύθμισης (Horizontal Arrangement1), μέσα στο οποίο τοποθετήθηκαν μια ετικέτα (Label1) με την ένδειξη “επώνυμο φοιτητή-διπλωματική” και μια λίστα επιλογής (List picker1), όπως φαίνεται στην εικόνα 21. Η λίστα επιλογής δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη, να επιλέξει μια συγκεκριμένη ενέργεια μέσα από ένα μενού πολλαπλών επιλογών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσα από τη λίστα επιλογής επιλέγεται από το χρήστη η διεύθυνση της συσκευής (MAC Address, 48 bit) που πρόκειται να

συνδεθεί η εφαρμογή Android. Στη λίστα επιλογής (List picker1) ορίσθηκε επίσης νέο χρώμα φόντου και επιλέχθηκε μια νέα εικόνα (το Bluetooth σήμα), που θα πατάει πάνω του ο χρήστης της εφαρμογής για να επιλέξει τη διεύθυνση και το όνομα της συσκευής που επιθυμεί να συνδεθεί.



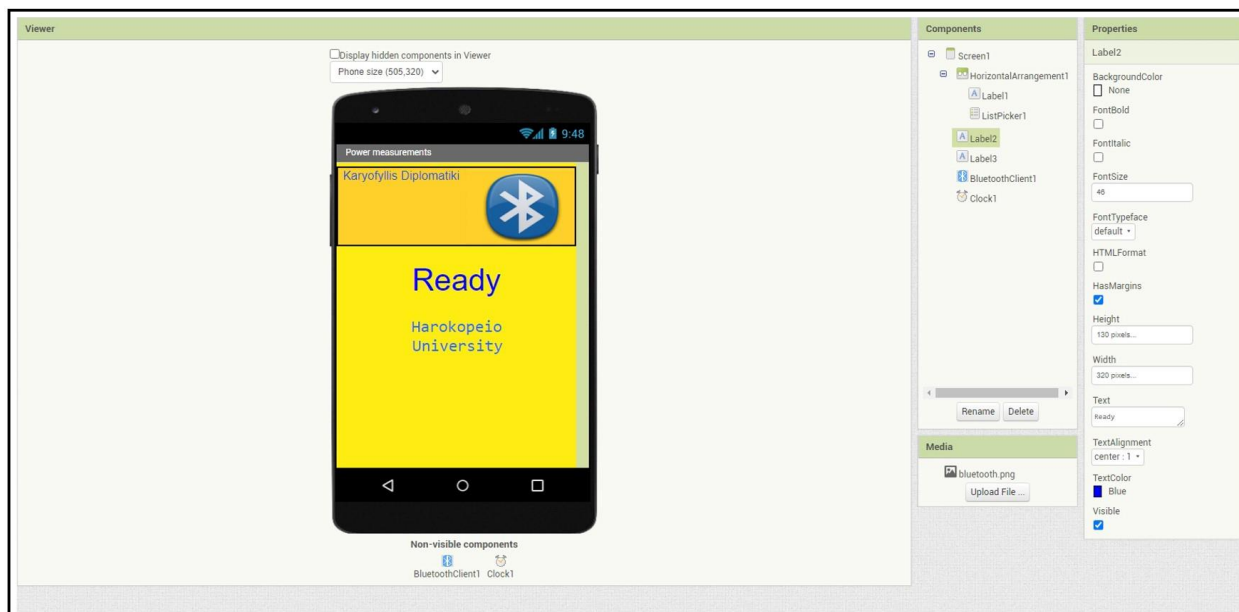
Εικόνα 21. Τοποθέτηση πλαισίου οριζόντιας διαρρύθμισης (Horizontal Arrangement1) και λίστας επιλογής (List picker1)

Ακολούθως μέσω της παλέτας εργαλείων, τοποθετήθηκε μια δεύτερη ετικέτα (Label2), η οποία προγραμματίστηκε στη συνέχεια μέσω του συντάκτη ώστε να εμφανίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το προκαθορισμένο κείμενο που φαίνεται στην ετικέτα Label2 είναι “Ready”. Προστέθηκε επίσης και μια τρίτη ετικέτα (Label3) που αναγράφει “Harokorpeio University”.

Αμέσως μετά προστέθηκε ο πελάτης Bluetooth (Bluetooth Client1) και ένα στοιχείο ρολογιού (Clock1), για το συγχρονισμό των λειτουργιών της εφαρμογής (εικόνα 22). Τα δύο αυτά στοιχεία λειτουργούν στο παρασκήνιο και δεν είναι ορατά στο χρήστη. Ο πελάτης Bluetooth αναλαμβάνει την εγκαθίδρυση της σύνδεσης (ζεύξη) με το διακομιστή (server) και τη μετάδοση των δεδομένων. Ο διακομιστής (server) θα πρέπει να είναι διαθέσιμος, προτού προβεί ο πελάτης (Bluetooth Client1) σε αίτημα για διασύνδεση.

Το ρολόι της εφαρμογής (Clock1) συγχρονίζει όλες τις διεργασίες και τα συμβάντα της εφαρμογής. Καθορίζει δηλαδή, κάθε πότε θα γίνει λήψη δεδομένων από άλλες συσκευές ή πότε θα σταλεί μια εντολή για να τρέξει μια νέα διαδικασία. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας, το ρολόι ελέγχει εάν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μέσω της Bluetooth ζεύξης.

Το στοιχείο Clock1 έχει προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (time interval) 1000 ms. Ο χρόνος αυτός είναι παραμετροποιήσιμος και τροποποιείται από τον προγραμματιστή.



Εικόνα 22. Προσθήκη ετικετών, πελάτη Bluetooth και στοιχείου ρολογιού στην εφαρμογή

Ο πελάτης (Bluetooth Client1), είναι σε θέση να διαβάσει δεδομένα τα οποία είναι είτε αριθμοί είτε απλό κείμενο. Ένας χαρακτήρας κειμένου ισοδυναμεί σε ένα byte πληροφορίας.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο κώδικας που δημιουργήθηκε μέσω του συντάκτη πλακιδίων (Block editor) και δίνεται ανάλογη επεξήγηση για κάθε βήμα.

Αρχικά στο πρόγραμμα, αρχικοποιείται η καθολική μεταβλητή "Received_data", λαμβάνοντας αρχική τιμή 0.0. Στη μεταβλητή αυτή καταχωρούνται οι τιμές των μετρήσεων και απεικονίζονται διαδοχικά ή μια μετά την άλλη με τη σειρά που στέλνονται.

`initialize global Received_data to 0.0`

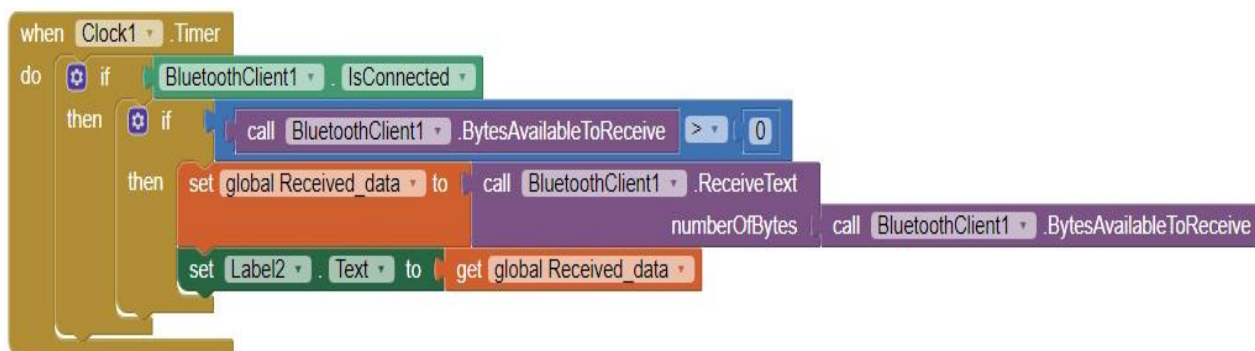
Εφόσον ο χρήστης πατήσει το κουμπί για τη δημιουργία νέας σύνδεσης (εικόνα 22), η εφαρμογή σε αυτό το στάδιο εμφανίζει τις διαθέσιμες διευθύνσεις (MAC addresses) και τα ονόματα των συσκευών που είναι διαθέσιμες για να πραγματοποιηθεί η ζεύξη.

`when ListPicker1 . BeforePicking
do set ListPicker1 . Elements to BluetoothClient1 . AddressesAndNames`

Αφού γίνει η επιλογή της διεύθυνσης (MAC addresses), ο πελάτης (Bluetooth Client1) συνδέεται στην επιλογή που έχει προηγηθεί.



Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος εάν ο πελάτης (Bluetooth Client1) είναι συνδεδεμένος. Εφόσον είναι συνδεδεμένος, τότε πραγματοποιείται ένας νέος έλεγχος εάν τα λαμβανόμενα δεδομένα έχουν τιμή μεγαλύτερη του μηδένος (>0). Εφόσον είναι μεγαλύτερα του μηδενός (>0), τα δεδομένα διαβάζονται/μετατρέπονται σε κείμενο και επιστρέφεται ο αριθμός των διαθέσιμων bytes. Στην ετικέτα (Label2) τυπώνεται το περιεχόμενο της μεταβλητής “Received_data”, δηλαδή οι ζητούμενες μετρήσεις.



Αφού ολοκληρώθηκαν όλα τα βήματα του προγραμματισμού, αποθηκεύτηκε η εφαρμογή σε αρχείο μορφής .APK (Android Package Kit) τοπικά σε σκληρό δίσκο. Έπειτα, η εφαρμογή φορτώθηκε μέσω USB καλωδίου σε κινητό τηλέφωνο με λογισμικό Android και εγκαταστάθηκε ώστε να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος λειτουργίας μετρητή - Συμπεράσματα - Βελτιώσεις

4.1 Έλεγχος ορθής λειτουργίας του έξυπνου μετρητή

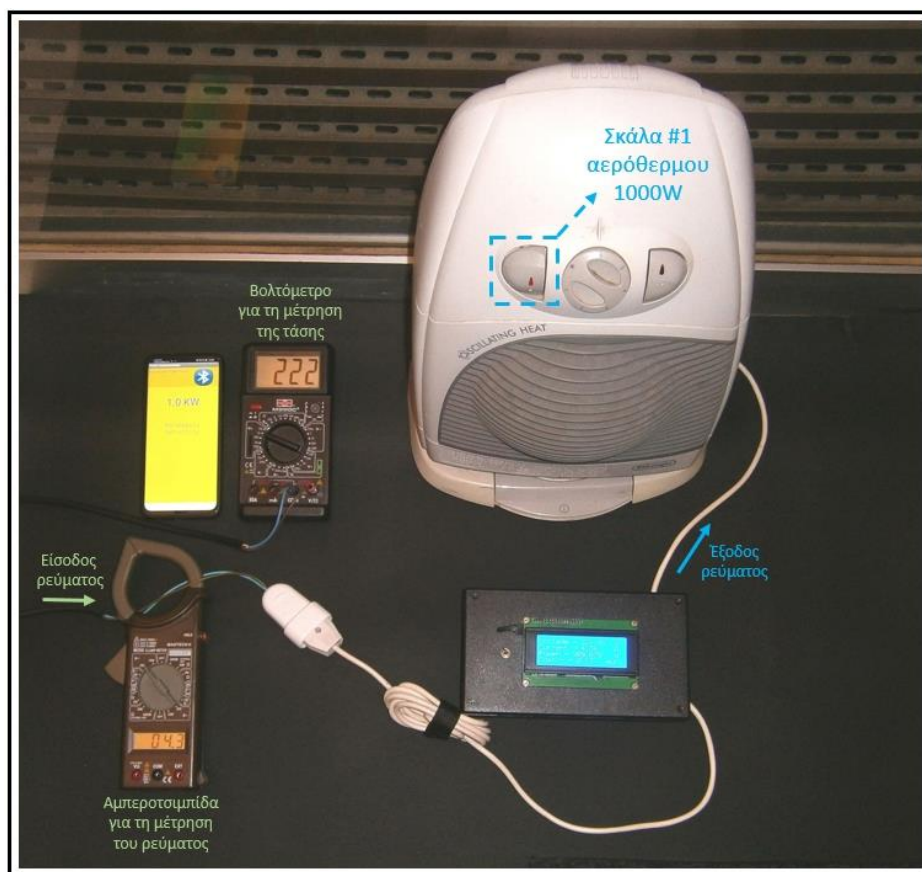
Για να εξακριβωθεί η ορθή λειτουργία του έξυπνου μετρητή, δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με κανονικά φορτία. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με ένα αερόθερμο (δύο κλιμάκων 1000W/2000W) και ένα πιστολάκι μαλλιών (1600W).

Παράλληλα στην τάση τροφοδοσίας (παροχή) του έξυπνου μετρητή συνδέθηκε ένα βολτόμετρο (Mastech M890C) και σε σειρά με το φορτίο μια αμπεροτσιμπίδα (Mastech M266 Clamp meter). Βασικός σκοπός της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας (εικόνα 23) ήταν να επιτηρηθούν η ενεργή τάση και το ενεργό ρεύμα παράλληλα με τη λειτουργία του έξυπνου μετρητή, ώστε να συγκριθούν οι μεταξύ τους τιμές. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να προσδιοριστούν τα σφάλματα και οι όποιες αποκλίσεις στη μετρητική διάταξη που κατασκευάστηκε.

Στον πειραματικό προσδιορισμό μετρούμενων μεγεθών υπάρχουν πάντα πηγές αβεβαιότητας, οι οποίες είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν. Στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης, συμπεριλήφθηκε και το κινητό τηλέφωνο (smartphone) με την εφαρμογή Bluetooth που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια των απεικονιζόμενων μετρήσεων.

Αρχικά συνδέθηκε στην έξοδο του μετρητή το αερόθερμο (ως φορτίο) και λειτούργησε στη σκάλα των 1000 Watt. Με το εξωτερικό βολτόμετρο (Mastech M890C) μετρήθηκε τάση 222 V (rms), ενώ με το αμπερόμετρο (Mastech M266 Clamp meter) μετρήθηκε ρεύμα της τάξεως των 4,3 A (rms).

Ο έξυπνος μετρητής κατέγραψε αντίστοιχα τάση 222,84 V (rms), ρεύμα 4,31 A (rms) και συνολική καταναλισκόμενη ισχύ 959,73 Watts (εικόνα 24) για το φορτίο των 1000 Watt. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που προέκυψε ήταν 0,16 ευρώ ανά ώρα. Στον πίνακα 5, απεικονίζονται όλες οι πειραματικές τιμές (αναφοράς και μετρούμενες), έχοντας υπολογίσει και την καταναλισκόμενη ισχύ που προκύπτει από τις μετρήσεις του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου.



Εικόνα 23. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος φορτίου 1000 Watt

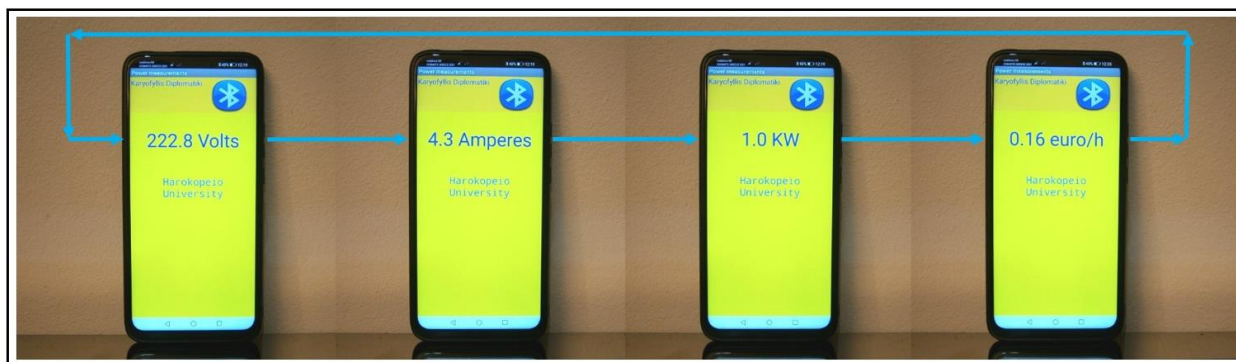


Εικόνα 24. Ενδείξεις στον έξυπνο μετρητή για μέτρηση φορτίου 1000 Watt

Μετρούμενο μέγεθος	Πραγματικές τιμές (αναφοράς)	Μετρούμενες τιμές (smart meter)
Τάση (Vεν)	222 V	222,84 V
Ρεύμα (Iεν)	4,3 A	4,31 A
Ισχύς	954,6 W	959,73 W

Πίνακας 5. Σύγκριση των μετρούμενων τιμών με τις τιμές αναφοράς, για φορτίο 1000 Watt

Οι αντίστοιχες μετρούμενες τιμές εμφανίζονταν ταυτόχρονα στην οθόνη της Android συσκευής (εικόνα 25), διαδοχικά η μια μετά την άλλη κάθε 1000 ms (1 s), όπως ορίστηκε στην εφαρμογή MIT App Inventor κατά το στάδιο του προγραμματισμού. Στην οθόνη της Android συσκευής εκτός από τη στιγμιαία ενεργή τάση, το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα και τη στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύ, απεικονίστηκε επίσης το στιγμιαίο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (σε ευρώ/ώρα), όπως υπολογίστηκε από το κυρίως πρόγραμμα.



Εικόνα 25. Απεικόνιση των μετρήσεων στη συσκευή Android για φορτίο 1000 Watt

Αν θεωρήσουμε ότι οι μετρούμενες τιμές του βολτόμετρου (Mastech M890C) και του αμπερόμετρο (Mastech M266) αποτελούν σημείο αναφοράς και εκφράζουν τις πραγματικές (αληθινές) τιμές, το απόλυτο σφάλμα και το ποσοστιαίο σφάλμα για την καταναλισκόμενη ισχύ θα είναι:

Απόλυτο σφάλμα ισχύος (ΔP) = μετρούμενη ισχύς – πραγματική ισχύς =

$$= 959,73 - 954,6 = 5,13$$

Ποσοστιαίο σφάλμα ισχύος (rP%) = $\frac{\text{μετρούμενη ισχύς} - \text{πραγματική ισχύς}}{\text{πραγματική ισχύς}} 100$

$$= \frac{959,73 - 954,6}{954,6} 100 = 0,537\%$$

Στη συνέχεια συνδέθηκε στην έξοδο του μετρητή το πιστολάκι μαλλιών ως φορτίο (εικόνα 26) το οποίο καταναλώνει 1600W σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή (με το θερμαντικό στοιχείο σε πλήρη λειτουργία και χρήση του εσωτερικού ανεμιστήρα).

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε πιο πάνω, με το εξωτερικό βολτόμετρο (Mastech M890C) μετρήθηκε τάση ίση με 223 V (rms), ενώ με το αμπερόμετρο (Mastech M266) μετρήθηκε ρεύμα 6.7 A (rms).

Ο έξυπνος μετρητής κατέγραψε αντίστοιχα τάση 222,84 V (rms), ρεύμα 6,81 A (rms) και συνολική καταναλισκόμενη ισχύ 1516,99 Watts (εικόνα 27) για το φορτίο των 1600 Watt. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που προέκυψε ήταν 0.26 ευρώ ανά ώρα. Στον πίνακα 6, απεικονίζονται όλες οι πειραματικές τιμές (αναφοράς και μετρούμενες), έχοντας υπολογίσει και την καταναλισκόμενη ισχύ που προκύπτει από τις μετρήσεις του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου.



Εικόνα 26. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος φορτίου 1600 W

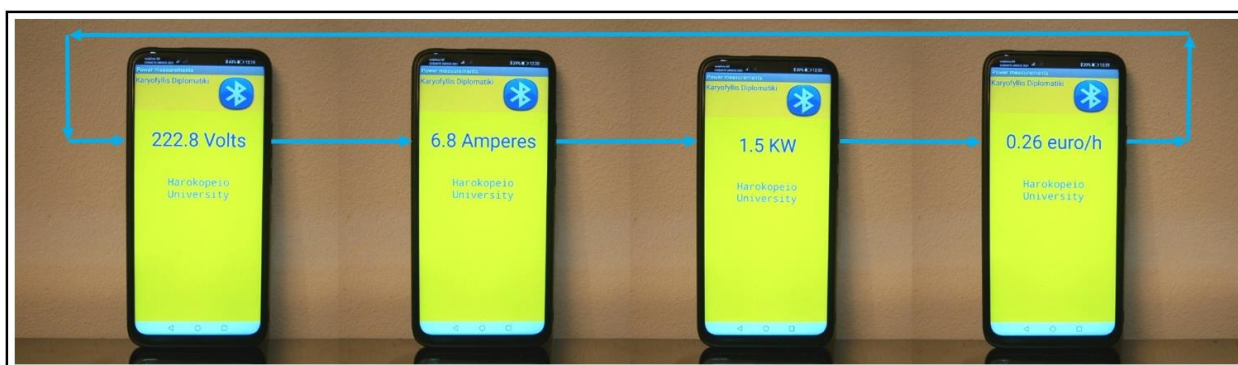


Εικόνα 27. Ενδείξεις στον έξυπνο μετρητή για μέτρηση φορτίου 1600 Watt

Μετρούμενο μέγεθος	Πραγματικές τιμές (αναφοράς)	Μετρούμενες τιμές (smart meter)
Τάση (Vεν)	223 V	222,84 V
Ρεύμα (Iεν)	6,7 A	6,81 A
Ισχύς	1494,1 W	1516,99 W

Πίνακας 6. Σύγκριση των μετρούμενων τιμών με τις τιμές αναφοράς, για φορτίο 1600 Watt

Οι αντίστοιχες μετρούμενες τιμές εμφανίζονταν ταυτόχρονα στην οθόνη της Android συσκευής (εικόνα 28), διαδοχικά η μια μετά την άλλη κάθε 1000 ms (1 s). Στην οθόνη της συσκευής απεικονίστηκε η στιγμιαία ενεργή τάση, το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα, η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς και το στιγμιαίο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (όπως παραπάνω).



Εικόνα 28. Απεικόνιση των μετρήσεων στη συσκευή Android για φορτίο 1600 Watt

Θεωρώντας ότι οι μετρούμενες τιμές του βολτόμετρου (Mastech M890C) και του αμπερόμετρο (Mastech M266) αποτελούν σημείο αναφοράς και εκφράζουν τις πραγματικές (αληθινές) τιμές, το απόλυτο σφάλμα και το ποσοστιαίο σφάλμα για την καταναλισκόμενη ισχύς θα είναι:

Απόλυτο σφάλμα ισχύος (ΔP) = μετρούμενη ισχύς – πραγματική ισχύς =

$$= 1516,99 - 1494,1 = 22,89$$

Ποσοστιαίο σφάλμα ισχύος (rP%) = $\frac{\text{μετρούμενη ισχύς} - \text{πραγματική ισχύς}}{\text{πραγματική ισχύς}} \cdot 100$

$$= \frac{1516,99 - 1494,1}{1494,1} \cdot 100 = 1,53\%$$

4.2 Συμπεράσματα

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτηρεί σε πραγματικό χρόνο την ενεργό τάση, το ενεργό ρεύμα και την καταναλισκόμενη ισχύ των φορτίων μιας οικίας ή μιας μεμονωμένης γραμμής/συσκευής.

Το σύστημα παρέχει επίσης τη δυνατότητα στο χρήστη να παρακολουθεί το κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται, ώστε να περιορίσει την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά η ενεργειακή διαχείριση σε οικίες ή μικρές επιχειρήσεις και να υπάρξουν πολλά οφέλη και εξοικονόμηση χρημάτων.

Ο στόχος της εργασίας ολοκληρώθηκε επιτυχώς, καθώς πραγματοποιήθηκε δίχως προβλήματα η διασύνδεση όλων των εξαρτημάτων της κατασκευής και έγινε παράλληλα ορθή απεικόνιση όλων των παραμέτρων τόσο στην LCD οθόνη του συστήματος όσο και στην εφαρμογή Android που σχεδιάστηκε μέσω της πλατφόρμας MIT App Inventor.

Προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές και τροποποιήσεις ώστε να βελτιστοποιηθεί η όλη συμπεριφορά της διάταξης και να λειτουργήσουν εναρμονισμένα το υλικό με το λογισμικό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, το μέγιστο σφάλμα που προέκυψε από τις καταγεγραμμένες μετρήσεις της καταναλισκόμενης ισχύος στα δύο φορτία αναφοράς, παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα, δηλαδή κάτω από 1.53%.

Το μετρητικό σύστημα που αναπτύχθηκε αποδείχθηκε ιδιαίτερα αξιόπιστο, αποδοτικό, ευέλικτο στην εγκατάσταση και αρκετά οικονομικό. Σαφώς όμως, υπάρχουν επιπλέον προοπτικές για περαιτέρω εξέλιξη. Όλη η υλοποίηση του λογισμικού πραγματοποιήθηκε με εργαλεία ανοικτού κώδικα διαθέσιμα για το ευρύ κοινό, διατηρώντας παράλληλα άριστη μελλοντική επεκτασιμότητα.

Η επιλογή του σωστού πρωτοκόλλου δικτύωσης είναι καθοριστικής σημασίας σε μια εφαρμογή έξυπνης διαχείρισης ενέργειας. Η χρήση της τεχνολογίας Bluetooth, επιτρέπει στο χρήστη να επιτηρεί τα ενεργειακά δεδομένα μιας εγκατάστασης από το κινητό του, με εξαρτήματα χαμηλού κόστους και παράλληλα χαμηλής ισχύος.

Τα θέματα ασφάλειας και αξιοπιστίας είναι ταυτόχρονα ζωτικής σημασίας και πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός IoT μετρητικού συστήματος.

Μέσα από την κατασκευή, έγινε αντιληπτό πως η αιχμή της τεχνολογίας βρίσκεται στις «ενσωματωμένες» λύσεις. Εν κατακλείδι, με την διάταξη που κατασκευάστηκε εκπληρώθηκαν οι ακόλουθοι στόχοι:

- 1) Μετριέται με ακρίβεια η στιγμιαία ενεργός τάση, το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα και η στιγμιαία καταναλισκόμενη ισχύς των συνδεδεμένων φορτίων και γίνεται ταυτόχρονα αποτίμηση κόστους.
- 2) Πραγματοποιείται καλύτερη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης.
- 3) Ο έξυπνος μετρητής είναι δυνατό να εντοπίσει αυξημένες καταναλώσεις.
- 4) Αναδεικνύονται οι καταναλωτικές συνήθειες των χρηστών.
- 5) Υπερβάσεις ρευμάτων που ενδεχομένως δύναται να προκαλέσουν πυρκαγιά ή βραχυκυκλώματα, είναι εύκολο να εντοπιστούν.

4.3 Μελλοντικές βελτιώσεις

Το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) υπόσχεται να δημιουργήσει έναν πλήρως διασυνδεδεμένο ψηφιακό κόσμο όπου το περιβάλλον, τα πράγματα και οι άνθρωποι αλληλεπιδρούν και είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους, βάσει λογικών συστημάτων και κανόνων.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγιναν άμεσα αντιληπτές οι δυνατότητες που θα μπορούσε να έχει ένας έξυπνος μετρητής, βασισμένος στα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμα Arduino Uno. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα προσφέρει ακρίβεια στις μετρήσεις, ευελιξία, αποτελεσματικότητα και αυξημένη απόδοση σε σχέση με το κόστος της. Η κατασκευή που υλοποιήθηκε θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω σε ορισμένα σημεία. Συγκεκριμένα θα μπορούσαν να γίνουν οι ακόλουθες αλλαγές:

- 1) Υπάρχει η δυνατότητα να προστεθεί αποθηκευτική SD κάρτα στο σύστημα, ώστε να αποθηκεύεται μεγάλος όγκος δεδομένων μετρήσεων. Ταυτόχρονα τα δεδομένα θα μπορούσαν να εξαχθούν απευθείας στη μνήμη της διάταξης σε αρχείο της μορφής .CSV, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση τους.
- 2) Η μονοχρωματική LCD οθόνη θα μπορούσε να αντικατασταθεί με μια έγχρωμη οθόνη τεχνολογίας TFT. Με την αλλαγή αυτή, η διεπαφή θα γινόταν πιο φιλική προς το χρήστη και θα υπήρχε επιπλέον η δυνατότητα αποτύπωσης διαγραμμάτων σε πραγματικό χρόνο.
- 3) Επιπλέον παράμετροι θα μπορούσαν να απεικονιστούν, όπως για παράδειγμα ο συντελεστής ισχύος της εγκατάστασης και η ολική (αθροιστική) κατανάλωση.
- 4) Τα δεδομένα των μετρήσεων εναλλακτικά, θα μπορούσαν να αποθηκεύονται απευθείας σε μια υποδομή Cloud μέσω Ethernet επικοινωνίας ή/και να στέλνονται στο χρήστη μέσω GSM

υποδομής (για απομακρυσμένη επιτήρηση), με χρήση κατάλληλων πλακετών επέκτασης (shields).

5) Μπορεί εύκολα να προστεθεί ένα ρελέ στην έξοδο των φορτίων, το οποίο θα είναι σε θέση να διακόψει την παροχή ενέργειας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ή υπέρβασης ορίων ρεύματος.

6) Το όλο εγχείρημα ακολούθησε μινιμαλιστικά σχεδιαστικά πρότυπα. Πρόσθετες αισθητικές παρεμβάσεις θα μπορούσαν να γίνουν τόσο στην εφαρμογή Android που δημιουργήθηκε όσο και στο υπόλοιπο κατασκευαστικό μέρος, τελειοποιώντας την τελική εικόνα προς το χρήστη.

Οι προτεινόμενες βελτιώσεις της διάταξης αφορούν κατά κύριο λόγο δευτερεύουσες λειτουργίες του βασικού συστήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, βασικός στόχος μιας τέτοιας κατασκευής θα πρέπει να είναι η ανάδειξη βιώσιμων και παράλληλα οικονομικών λύσεων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα από όλους και σε παγκόσμια κλίμακα.

Επιπροσθέτως, θα πρέπει να γίνει μελλοντικά πρόσθετη και εμπειριστατωμένη έρευνα ώστε να αναδειχθούν νέες τεχνολογίες και καινούργια πρωτόκολλα που θα προσφέρουν πιο αποδοτικές λύσεις επικοινωνίας με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Zheng, D. Gao, L. Lin (2013). Smart meters in smart grid: an overview. IEEE Green Technologies Conference (GreenTech).
- [2] I. Ciuciu, R. Meersman, T. Dillon (2012). Social network of smart-metered homes and SMEs for grid-based renewable energy exchange. 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST).
- [3] P. Jarventausta, S. Repo, A. Rautiainen, J. Partanen (2010). Smart grid power system control in distributed generation environment. Elsevier Annual Reviews in Control, Vol. 34, Issue 2, pp. 177-286.
- [4] H. Alalem, A. Fadel, M. Shlibek, M. Shlibek (2019). The Automatic detection of power theft and excessive power usage in Libyan electricity network. European Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 49-58.
- [5] D. Alahakoon, X. Yu (2016). Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, Issue 1, pp. 425-436.
- [6] G. Dudek, A. Gawlak, M. Kornatka, J. Szkutnik (2018). Analysis of Smart Meter Data for Electricity Consumers. 15th International Conference on the European Energy Market (EEM).
- [7] J. Jin, J. Gubbi, S. Marusic, M. Palaniswami (2014). An Information Framework for Creating a Smart City Through Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal, Vol. 1, Issue. 2, pp. 112-121.
- [8] C. Srinivasan, B. Rajesh, P. Saikalyan, K. Premasagar, E. Yadav (2019). A review on the different types of Internet of Things (IoT). Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, Vol. 11, Issue 1, pp. 154-158.
- [9] S. Goudos, M. Deruyck, D. Plets (2019). A novel design approach for 5G massive MIMO and NB-IoT green networks using a hybrid Jaya-differential evolution algorithm. IEEE Access 7, Vol. 12, pp. 105687-105700.
- [10] M. Burunkaya, T. Pars (2017). A Smart Meter Design and Implementation Using ZigBee Based Wireless Sensor Network in Smart Grid. 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE).
- [11] A. Irfan, S. Hassan, R. Ahmed, I. Ishaq, A. Zahoor, T. Murtaza (2019). IoT Based Smart Meter. International Conference on Innovative Computing (ICIC), pp. 1-6.
- [12] R. Islam, S. Sarker, S. Mazumder, M. Ranim (2019). An IoT based Real-time Low Cost Smart Energy Meter Monitoring System using Android Application. International Journal of Engineering and Techniques, Vol. 5, Issue 3, pp. 1-6.

- [13] E. Sisinni, P. Bellagente, A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, S. Marella, M. Pasetti, S. Rinaldi, A. Cagiano (2020). A new LoRaWAN adaptive strategy for smart metering applications. IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT.
- [14] F. Fortes, V. Fialho (2019). Smart Energy Meter For Iot Applications. International Journal of Innovative Technology and Exploring, Vol 8, Issue 11, pp. 2708-2712.
- [15] Y. Zhang, F. Ren, A. Wu (2019). Certificateless multi-party authenticated encryption for NB-IoT terminals in 5G networks. IEEE Access, Vol. 7, pp. 114721-114730.
- [16] A. Rashid, F. Handhal (2017). A prototype Design for Three Phase Smart Energy Meter. AL-Sadiq International Science Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Technologies-2nd-AIC-MITC-Baghdad-IRAQ, pp. 262-267.
- [17] M. Mnati, A. Bossche, F. Chisab (2017). A Smart Voltage and Current Monitoring System for Three Phase Inverters Using an Android Smartphone Application. Sensors 2017, Vol. 17, Issue 4.
- [18] F. Albalas, W. Mardini, Y. Khamayseh, D. Bani-Salameh (2016). Improved Appliance Coordination Scheme with Waiting Time in Smart Grids. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 7, Issue 4, pp. 16-30.
- [19] A. Hiwale, D. Gaikwad, A. Dongare, P. Mhatre (2018). IoT based smart energy monitoring. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 5, No. 3.
- [20] D. Scholz, F. Müsgens (2017). How to improve standard load profiles: Updating, regionalization and smart meter data. 14th International Conference on the European Energy Market (EEM).
- [21] Y. Wang, Q. Chen, T. Hong, C. Kang (2019). Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol 10, Issue 3, pp. 3125-3148.
- [22] I. Abubakar, S. Khalid, M. Mustafa, H. Shareef (2017). Calibration of ZMPT101B voltage sensor module using polynomial regression for accurate load monitoring. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 12, No. 4, pp. 1076-1084.
- [23] S. Hallur, R. Kulkarni, P. Patavardhan (2018). Cloud Based Smart Energy Meter. International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vol 3, Issue 2, pp. 668-677.