



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος Συλλογής
Βιομηχανικών Δεδομένων σε Πραγματικό Χρόνο
για Ανάλυση και Προληπτική Συντήρηση

Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Επαμεινώνδα Ορέστη Μπάτση

Επιβλέπων: Πάυλος - Πέτρος Σωτηριάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος Συλλογής
Βιομηχανικών Δεδομένων σε Πραγματικό Χρόνο
για Ανάλυση και Προληπτική Συντήρηση

Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Επαμεινώνδα Ορέστη Μπάτση

Επιβλέπων: Παύλος - Πέτρος Σωτηριάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 14η Ιουνίου 2022.

.....
Παύλος Π. Σωτηριάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Παπανάνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2022

.....

Επαμεινώνδας Ορέστης Μπάτσης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © – All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Επαμεινώνδας Ορέστης Μπάτσης, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της εργασίας, εν όλω ή εν μέρει, για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η επανεκτύπωση, η αποθήκευση και η διανομή για μη κερδοσκοπικούς, εκπαιδευτικούς ή ερευνητικούς σκοπούς, με την προϋπόθεση ότι θα αναφέρεται η πηγή και διατηρείται αυτό το μήνυμα. Ερωτήσεις σχετικά με τη χρήση της εργασίας αυτής για κερδοσκοπικούς σκοπούς θα πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που παρέχονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, του Τμήματος, του Επιβλέποντα Καθηγητή, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Περίληψη

Είναι σαφές ότι η συλλογή **δεδομένων βιομηχανικής παραγωγής** είναι πολύ σημαντική, καθώς οι εταιρείες προσπαθούν να προβλέψουν και να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια παραγωγής τους. Έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη μοντέλων και εφαρμογών λογισμικού που επιτυγχάνουν τα προαναφερθέντα, αλλά χωρίς την συλλογή και επεξεργασία δεδομένων παραγωγής, είναι αδύνατο να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα σε πραγματικό χρόνο.

Η συλλογή αξιόπιστων δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο, από τις μηχανές παραγωγής είναι μια από τις πιο σημαντικές πηγές πληροφοριών στην διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με διάφορα σχέδια παραγωγής.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία περιγράφεται ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η χρήση ενός **Συστήματος Βιομηχανικής Συλλογής Δεδομένων σε Πραγματικό Χρόνο**. Το σύστημα θα μπορεί να συνδεθεί με διαφορετικούς βιομηχανικούς αισθητήρες με σκοπό τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση, απομακρυσμένη παρακολούθηση και βελτιστοποίηση και ρύθμιση της λειτουργίας της μηχανής, για προληπτική συντήρηση.

Το σύστημα προσφέρει πολλούς διαφορετικούς τρόπους συνδεσιμότητας και καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της βιομηχανίας. Επίσης έχει μια πλήρως διαμορφώσιμη αρχιτεκτονική που του δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής, χωρίς την ανάγκη επιπλέον τεχνικών δεξιοτήτων. Μπορεί να αναπτυχθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε βιομηχανικό περιβάλλον με ελάχιστη υποδομή, επιτρέποντας μια γρήγορη και αξιόπιστη εγκατάσταση απόκτησης δεδομένων. Ουσιαστικά πρόκειται για μια πλατφόρμα που μπορεί να φιλοξενήσει εφαρμογές, προσαρμοζόμενες σε κάθε λύση χάρη στον αρθρωτό σχεδιασμό του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο, «Εισαγωγή», περιέχει μια σύντομη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών και της αρθρωτής αρχιτεκτονικής του Συστήματος, καθώς και ορισμένες σχεδιαστικές αποφάσεις υψηλού επιπέδου. Στο δεύτερο κεφάλαιο, «Ανάλυση Συστήματος», περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος και η ανάλυση των κυκλωμάτων. Στο τρίτο κεφάλαιο: «Υλοποίηση», παρουσιάζονται η μεθοδολογία και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στη σχεδίαση της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος και στην ανάπτυξη του λογισμικού. Στο τέταρτο κεφάλαιο, «Αποτελέσματα», παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και αξιολογείται η συνολική απόδοση του συστήματος. Στο πέμπτο κεφάλαιο, «Συμπεράσματα», αξιολογείται το κατά πόσο το σύστημα αποτελεί λύση στο ζήτημα που τίθεται και κατά πόσο καλύπτει τους περιορισμούς και τις προϋποθέσεις που αναλύονται στα πρώτα κεφάλαια. Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο «Συζήτηση και Σύσταση για Μελλοντική Έρευνα», παρουσιάζονται όλα τα γνωστά προβλήματα και οι περιορισμοί που προέκυψαν κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση, καθώς και στοιχεία για περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος.

Λέξεις Κλειδιά

Μικροελεγκτής, Τεχνικές Σχεδίασης PCB, Altium Designer, Μετρήσεις, Ενσωματωμένα συστήματα, Συλλογή δεδομένων.

Abstract

It has become clear that **industrial production data** is becoming more and more important these days since companies try to predict and optimize production plans. Lots of progress has been made in the development of models that achieve the aforementioned, but without the actual raw information, it is impossible to make accurate real-time assumptions.

Precise, continuous, and robust machine data is one of the most important sources of information when trying to make decisions on a production plan.

This diploma thesis analyses the design decisions and the implementation methods of a **Real-Time Industrial Data Acquisition System**, that can connect to a variety of external industrial sensors and monitor key measurements for performance and reliability. Data collected by the system can be then utilized for analytics such as production remote monitoring, real-time optimization, and predictive maintenance.

The system offers many different ways of connectivity to cover a large part of the industry and a fully configurable architecture that allows customization, without the need for extra technical skills. It can be deployed to almost any Industrial environment with minimum infrastructure, allowing for a fast and reliable data acquisition plant. It is essentially a platform that can host custom applications, adapting to each solution thanks to the enhanced modularity with which it has been designed.

This thesis includes six chapters. The first chapter, "Introduction", contains a brief description of the System's key features and overall architecture, as well as some high-level design decisions. In the second chapter, "System Analysis", the overview of the system's architecture and the main circuit analysis are described. In chapter three: "Implementation", the methodology and techniques used in the design of the printed circuit board and the firmware development are presented. In chapter four, "Results", the outcome of the experiments is presented and the overall performance of the system is evaluated. In chapter five, "Conclusion", the Thesis outcome is discussed, and the key points of the System are pointed out. Lastly, in chapter six "Discussion and Recommendations for Future Research", all known issues, limitations, and improvements are presented, as well as elements for further development and upgrade of the system.

Keywords

Microcontroller, PCB Design Techniques, Altium Designer, Measurements, Embedded Systems, DAQ.

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παύλο Π. Σωστηριάδη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας, την ευκαιρία να είμαι μέρος του εργαστηρίου ηλεκτρονικής καθώς και την καθοδήγηση που μου παρείχε. Επίσης, ευχαριστώ όλα τα παιδιά του εργαστηρίου ηλεκτρονικής και ιδιαίτερα τον Κωνσταντίνο Παπαφώτη για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, καθώς με τις εύστοχες παρατηρήσεις, τη διάθεση και την φιλική ατμόσφαιρα που δημιούργησαν συντέλεσαν στην περάτωση αυτού του έργου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν στο πλάι μου όλο αυτό το διάστημα. Την οικογένειά μου που με στήριξε οικονομικά και ψυχολογικά, τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε κάθε βήμα και το εκπαιδευτικό και διοικητικό προσωπικό της σχολής για την απόκτηση υψηλού επιπέδου επιστημονικής γνώσης πάνω στον τομέα της ηλεκτρονικής.

Περιεχόμενα

Λίστα Πινάκων	12
Λίστα Εικόνων / Σχεδίων	13
Συνομεύσεις	14
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	15
1 Εισαγωγή	16
1.1 Προαπαιτούμενα για το Σχεδιασμό του Συστήματος	17
1.2 Υπάρχουσες Λύσεις	19
2 Ανάλυση Συστήματος	21
2.1 Επισκόπηση Συστήματος	22
2.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή	22
2.1.2 Σχεδιασμός Τροφοδοσίας	24
2.1.3 Επιλογή Περιφερειακών	26
2.2 Σχεδιασμός και Ανάλυση Κυκλωμάτων	29
2.2.1 Ιεραρχικό Σχηματικό	29
2.2.2 Σχηματικό Συνδέσμων	30
2.2.3 Σχηματικό Μικροελεγκτή	31
2.2.4 Σχηματικό Ethernet	34
2.2.5 Σχηματικό Διεπαφών	36
2.2.6 Σχηματικό Τροφοδοσίας	40
2.2.7 Σχηματικό ST-Link	43
3 Υλοποίηση	46
3.1 Υλικό	46
3.1.1 Σχεδίαση PCB	46
3.1.2 Παραγγελία και Συναρμολόγηση	56
3.1.3 Έλεγχος και επίλυση προβλημάτων	59
3.2 Υλικολογισμικό (Firmware)	59
3.2.1 Αρχικοποίηση	60
3.2.2 Προγράμματα οδήγησης και βοηθητικά προγράμματα	61
3.2.3 Εφαρμογή	62
4 Αποτελέσματα	63
4.1 Πλατφόρμα δοκιμών	63
4.2 Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων	64
5 Σύνοψη - Συμπεράσματα	66
5.1 Εφαρμογή στην πράξη	68
5.2 Κόστος παραγωγής	70
6 Σχόλια και Προτάσεις για Μελλοντική Επέκταση και Έρευνα	71
6.1 Περιορισμοί και Γνωστά Θέματα	71
6.2 Μελλοντική Επέκταση και Έρευνα	71
Βιβλιογραφία	73

Λίστα Πινάκων

- Πίνακας 1. Απαιτήσεις συστήματος και Προτεραιότητες
- Πίνακας 2. Επιλογή και προδιαγραφές MCU
- Πίνακας 3. Πηγές Τροφοδοσίας του Συστήματος
- Πίνακας 4. STM32F407xx εσωτερικά χαρακτηριστικά σφάλματος ADC
- Πίνακας 5. Επιλογή και προδιαγραφές εξωτερικού ADC
- Πίνακας 6. Προδιαγραφές/Δυνατότητες κατασκευαστή PCB
- Πίνακας 7. Ανάλυση Κόστους Συστήματος
- Πίνακας 8. Κόστος άλλων συσκευών

Λίστα Εικόνων / Σχεδίων

- Εικόνα 1.** Μοντέλο W
- Εικόνα 2.** Επισκόπηση συστήματος
- Εικόνα 3.** STM32F407xx εσωτερικά χαρακτηριστικά απόδοσης ADC
- Εικόνα 4.** Σχέδιο Ιεραρχικής δομής
- Εικόνα 5.** Σχηματικό Συνδέσμων
- Εικόνα 6.** Σχηματικό MCU
- Εικόνα 7.** Σχηματικό Ethernet
- Εικόνα 8.** Εσωτερικές συνδέσεις RJ45
- Εικόνα 9.** Σχηματικό Διεπαφών
- Εικόνα 10.** Προτεινόμενη διάταξη πλακέτας για το ADS8668
- Εικόνα 11.** Ρύθμιση παραμέτρων ακίδας για το ADS8668
- Εικόνα 12.** Σχηματικό Τροφοδοσίας
- Εικόνα 13.** Βασική Υλοποίηση TPS23753A
- Εικόνα 14.** Σχηματικό διάγραμμα TLV431
- Εικόνα 15.** Σχηματικό διάγραμμα ST-Link
- Εικόνα 16.** Σχεδιασμός συστήματος PCB
- Εικόνα 17.** Παράδειγμα στοίβαξης στρώσεων PCB
- Εικόνα 18.** Επιλογή PCB 4 στρώσεων κατασκευαστή - περίπτωση α
- Εικόνα 19.** Επιλογή PCB 4 στρώσεων κατασκευαστή - περίπτωση β
- Εικόνα 20.** Διαχείριση Στοιβάδων Στρώσης στο Altium
- Εικόνα 21.** Κανόνες σχεδίασης Altium
- Εικόνα 22.** Τμήματα PCB
- Εικόνα 23.** Ζεύγη Ethernet
- Εικόνα 24.** Εργαλείο PCB Saturn
- Εικόνα 25.** Σημεία δοκιμής Πλακέτας
- Εικόνα 26.** Πίνακας Υλικών
- Εικόνα 27.** Συναρμολόγηση PCB (μέρος 1)
- Εικόνα 28.** Συναρμολόγηση PCB (μέρος 2)
- Εικόνα 29.** Περιβάλλον STM32MXCube
- Εικόνα 30.** Περιβάλλον STM32CubeIDE
- Εικόνα 31.** Αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος
- Εικόνα 32.** Συνδεσιμότητα συστήματος
- Εικόνα 33.** Διάγραμμα NodeRed
- Εικόνα 34.** Grafana dashboard
- Εικόνα 35.** Αποδόσεις PCB
- Εικόνα 36.** Φωτογραφίες Συναρμολόγησης PCB
- Εικόνα 37.** Τυπική εφαρμογή συστήματος
- Εικόνα 38.** Επέκταση Δικτύου Συστήματος

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

- ADC: Analog-to-Digital Converter
- API: Application Programming Interface
- BOM: Bill of materials
- CAN: Controller Area Network
- COM: Communication Port
- CRC: Cyclic Redundancy Check
- DAQ: Data Acquisition
- DC: Direct Current
- DC-DC: DC to DC Converter
- DEV Board: Development Board
- DHCP: Dynamic Host Configuration Protocol
- DRC: Design Rule Check
- EDA: Electronic Design Automation Software
- ERC: Electrical Rule Check
- ESD: Electrostatic Discharge
- FW: Firmware
- GND: Ground
- GPIO: General Purpose Input Output
- HAL: Hardware Abstraction Layer
- HW: Hardware
- I2C: Inter-Integrated Circuit
- IC: Integrated circuit
- INL: Integral Nonlinearity
- LED: Light Emitting Diode
- LDO: Low Dropout Regulator
- LSB: Least Significant Bit
- LWIP: LightWeight IP
- MAC: Media Access Control
- MCU: Microcontroller Unit
- MSB: Most Significant Bit
- MSPS: Mega Samples Per Second
- PC: Personal Computer
- PCB: Printed Circuit Board
- PHY: Physical Layer
- PoE: Power over Ethernet
- PSRR: Power Supply Rejection Ratio
- RC: Resistor Capacitor Network
- RMII: Reduced Media Independent Interface
- RX: Receive, Receiver
- SAR: Successive Approximation Register
- SPI: Serial Parallel Interface
- SW: Software
- SWD: Serial Wire Debug
- TX: Transmit, Transmitter
- UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter
- USART: Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
- USB: Universal Serial Bus

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

Μετατροπéας Αναλογικού σε Ψηφιακό Σήμα
Προγραμματιστική Διεπαφή Εφαρμογής
Λίστα Κοστολόγησης Υλικών
Δίκτυο Αρτηρίας
Σειριακή Θύρα Επικοινωνίας
Κυκλικός Έλεγχος Απόρριψης
Μονάδα Συλλογής Δεδομένων
Συνεχές Ρεύμα
Μετατροπéας Συνεχούς σε Συνεχές Ρεύμα
Αποσφραλισματωτής
Πλακέτα Ανάπτυξης
Πρωτόκολλο Δυναμικής Διαμόρφωσης Υπολογιστή
Έλεγχος Κανόνων Σχεδίασης
Πρόγραμμα Ηλεκτρολογικής Σχεδίασης
Έλεγχος Κανόνων Κυκλώματος
Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση
Λογισμικό Ενσωματωμένου Συστήματος
Γείωση
Είσοδος/Έξοδος Γενικού Σκοπού
Στρώμα Αφαίρεσης Υλικού
Υλικό
Δια Ολοκληρωμένο κύκλωμα
Ολοκληρωμένο Κύκλωμα
Περιβάλλον Ανάπτυξης Κώδικα
Ολοκληρωτική Μη Γραμμικότητα
Δίοδος Εκπομπής Φωτός
Ρυθμιστής Χαμηλής Εγκατάλειψης
Ελάχιστα Σημαντικό Ψηφίο
Ελαφρύ IP
Έλεγχος Πρόσβασης Πολυμέσων
Μονάδα Μικροελεγκτή
Μέγιστα Σημαντικό Ψηφίο
Εκατομμύρια Δείγματα το Δευτερόλεπτο
Προσωπικός Υπολογιστής
Πλακέτα Τυπωμένου Κυκλώματος
Φυσικό Στρώμα
Τροφοδοσία Μέσω Ethernet
Αναλογία Απόρριψης Τροφοδοτικού
Δίκτυο Αντίστασης Πυκνωτή
Μειωμένη Ανεξάρτητη Διεπαφή Πολυμέσων
Λήψη, Παραλήπτης
Μητρώο Διαδοχικής Προσέγγισης
Σειριακή Παράλληλη Διεπαφή
Λογισμικό
Καλώδιο Σειριακού Εντοπισμού Σφαλμάτων
Μετάδοση, Πομπός
Καθολικός Ασύγχρονος Πομπός/Δέκτης
Καθολικός Σύγχρονος/Ασύγχρονος Πομπός/Δέκτης
Θύρα Ενιαιίου Σειριακού Διαύλου

Ξενόγλωσσος Όρος

ADC
API
BOM
CAN
COM
CRC
DAQ
DC
DC-DC
Debugger
DEV Board
DHCP
DRC
EDA
ERC
ESD
FW
GND
GPIO
HAL
HW
I2C
IC
IDE
INL
LED
LDO
LSB
LWIP
MAC
MCU
MSB
MSPS
PC
PCB
PHY
PoE
PSRR
RC
RMII
RX
SAR
SPI
SW
SWD
TX
UART
USART
USB

1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο **Εργαστήριο Κυκλωμάτων & Συστημάτων** του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο στόχος ήταν να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί ένα Σύστημα Συλλογής Δεδομένων που να μπορεί να τοποθετηθεί σχεδόν σε οποιοδήποτε βιομηχανικό περιβάλλον και να μεταδώσει δεδομένα παραγωγής μηχανών σε cloud εφαρμογές. Τα συλλεχθέντα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση βασικών δεδομένων που επηρεάζουν την παραγωγικότητα ενός τμήματος παραγωγής ή/και ολόκληρου του εργοστασίου. Επίσης συνδυάζοντας διάφορα από τα συλλεχθέντα δεδομένα να μπορεί να προβλεφθεί καλύτερα ο χρόνος συντήρησης μιας μηχανής πριν παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα, μειώνοντας έτσι τους νεκρούς χρόνους και αυξάνοντας την παραγωγικότητα ώστε η εταιρία να ανταποκρίνεται στη ζήτηση και τις απαιτήσεις της αγοράς.

Στόχος ήταν να σχεδιαστεί ένα σύστημα με τρόπο ώστε να είναι αρκετά αρθρωτό για χρήση σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα να είναι εύκολο στην εγκατάσταση, στη ρύθμιση και στην χρήση από κάποιον χωρίς προηγμένες τεχνικές δεξιότητες σύμφωνα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

Δεδομένου ότι το σύστημα δεν είναι ένα εξειδικευμένο μηχάνημα συλλογής δεδομένων αλλά μια **πλατφόρμα γενικής χρήσης και χαμηλού κόστους**, οι προδιαγραφές διαφόρων παραμέτρων όπως η συχνότητα δειγματοληψίας και το εύρος ζώνης, η γραμμικότητα, η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα, σκοπίμως δεν αναλύθηκαν σε βάθος προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω το κόστος και ο χρόνος ανάπτυξης. Το σύστημα προορίζεται για διασύνδεση με γενικούς βιομηχανικούς αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες και ο στόχος είναι να παρέχει αρκετά ακριβή δεδομένα ώστε να μπορούν να ληφθούν μακροπρόθεσμες αποφάσεις και να καταγράφει την απόδοση μιας μηχανής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία καλύπτει μόνο τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του υλικού και του λογισμικού του συστήματος. Δεν περιλαμβάνει την υλοποίηση κάποιας εφαρμογής πρόβλεψης και προληπτικής συντήρησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το αντικείμενο της εργασίας είναι ο σχεδιασμός μιας πλατφόρμας υλικού που μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε διαφορετικές εφαρμογές μέτρησης και να παρέχει σταθερά δεδομένα για μεταγενέστερη επεξεργασία.

Ωστόσο, για το λόγο της επίδειξης, αναπτύχθηκε μια αρχική εφαρμογή παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και την προβολή των ικανοτήτων του.

1.1 Προαπαιτούμενα για το Σχεδιασμό του Συστήματος

Το πρώτο βήμα της της μελέτης ήταν ο πλήρης καθορισμός των απαιτήσεων του συστήματος. Μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν, υπάρχουσες εμπορικές λύσεις και άλλες παρόμοιες λύσεις/προϊόντα ανοιχτού κώδικα προκειμένου να υπάρχει μία πλήρης επισκόπηση της αγοράς και των προϊόντων που κυκλοφορούν.

Προαπαιτούμενα:

1. Επεκτασιμότητα
2. Αξιοπιστία
3. Εξυπηρέτηση
4. Σταθερότητα
5. Συνδεσιμότητα
6. Κόστος

Επεκτασιμότητα: Η πρώτη και και πιο σημαντική απαίτηση του συστήματος. Δηλαδή η δυνατότητα επέκτασης του αριθμού των αισθητηρίων χωρίς την ανάγκη προσθήκης υπερβολικού υλικού καθώς επίσης και η εύκολη σύνδεση με τροφοδοσία και αισθητήρες. Επίσης μία από τις κύριες ανησυχίες ήταν η ελαχιστοποίηση των επιπλέον καλωδίων που διέρχονται από μια βιομηχανική μονάδα.

Αξιοπιστία: Η Αξιοπιστία των δεδομένων παίζει κρίσιμο ρόλο στις αποφάσεις που θα ληφθούν από την επεξεργασία των δεδομένων. Τα δεδομένα που παράγονται πρέπει να είναι ακριβή για να αποφευχθεί η λήψη λανθασμένων αποφάσεων που οδηγεί σε περιττές δαπάνες για μια εταιρεία.

Επισκευασιμότητα: Δυνατότητα εύκολης συντήρησης, και δυνατότητα το σύστημα να είναι σχεδόν plug-and-play, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων αποτελεί την αναδιαμόρφωση παραμέτρων ή την προσθήκη νέων.

Στιβαρότητα: Η στιβαρότητα σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι ζωτικής σημασίας και καθορίζει τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος που στοχεύει σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Για να εξασφαλιστεί η αντοχή και η συμμόρφωση, έπρεπε να εφαρμοστούν οι κατάλληλες βέλτιστες πρακτικές για να δοθεί στο σύστημα η ικανότητα να αντέχει σε σκληρά περιβάλλοντα και να λειτουργεί σωστά.

Συνδεσιμότητα: Η συνδεσιμότητα είναι μέρος της αρθρωτότητας που αναφέρθηκε προηγουμένως. Για να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος του κλάδου, το σύστημα έπρεπε να είναι συμβατό με TCP/IP πρωτόκολλο, προκειμένου να συνδεθεί απευθείας σε ένα δίκτυο και να μεταδώσει τα δεδομένα μέσω αυτού. Όσον αφορά τη συνδεσιμότητα των αισθητήρων, ο στόχος ήταν να είναι δυνατή η ανάγνωση μετρήσεων από όλους σχεδόν τους τύπους βιομηχανικών αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένων:

- Αναλογικοί αισθητήρες με έξοδο έως και 10 V, 12 bit ανάλυσης (τουλάχιστον 2)
- Αισθητήρες με ψηφιακή έξοδο RS232 και RS485 (τουλάχιστον 1 από το καθένα)
- Αισθητήρες με έξοδο 4-20 mA (τουλάχιστον 2)
- Αισθητήρες με έξοδο CAN-BUS 2.0 (τουλάχιστον 1)
- Αισθητήρες με ψηφιακά κανάλια I/O έως 24V. (τουλάχιστον 2)

Κόστος: Το κόστος είναι ένας από τους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την παραγωγή πολλαπλών συσκευών και όχι μόνο πρωτοτύπων. Ωστόσο, δεδομένου ότι όλες οι παραπάνω απαιτήσεις είναι πραγματικά κρίσιμες κατά το σχεδιασμό ενός προϊόντος για τη βιομηχανία, αποφασίστηκε ότι θα αξιολογηθεί, εφόσον πληρούνται όλες οι προηγούμενες απαιτήσεις. Παρόλα αυτά, για να μειωθεί το κόστος κατασκευής και ανταλλακτικών, τέθηκε το μέγιστο κόστος των 200 ευρώ.

Λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό δειγματοληψίας και το εύρος συχνοτήτων σήματος, αποφασίστηκε ότι οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το σύστημα θα συλλέγουν δεδομένα με μέγιστη συχνότητα 10Hz και η συχνότητα των σημάτων προς μέτρηση θα ήταν από **1 έως 5 Hz**.

Πίνακας 1 Σύνοψη των απαιτήσεων του Συστήματος και αντίστοιχες προτεραιότητές σύμφωνα με τους στόχους της μελέτης.

Προαπαιτούμενο	Προτεραιότητα
Επεκτασιμότητα	ΥΨΗΛΗ
Αξιοπιστία	ΥΨΗΛΗ
Επισκευασιμότητα	ΜΕΤΡΙΑ
Στιβαρότητα	ΥΨΗΛΗ
Συνδεσιμότητα	ΥΨΗΛΗ
Κόστος	ΜΕΤΡΙΑ

Πίνακας1.

Με καθορισμένες τις απαιτήσεις του Συστήματος, έπρεπε να γίνει έρευνα για τις υπάρχουσες λύσεις.

1.2 Υπάρχουσες Λύσεις

Έγινε αξιολόγηση των υφιστάμενων εμπορικών λύσεων και λύσεων ανοιχτού κώδικα, προκειμένου να διευρυνθεί το τι είναι διαθέσιμο στην αγορά, καθώς και το επίπεδο των δυνατοτήτων και του κόστους των προϊόντων. Παρακάτω είναι μια λίστα με τα πιο κοινά βιομηχανικά συστήματα DAQ στην αγορά με διάφορες δυνατότητες και διαφορετικές τιμές.



dataTaker DT821

2 Channel Universal Input Industrial Data Logger

- Up to 6 Analog ($\pm 50V$) Sensor Inputs
- 8 Flexible Digital Terminals
- 2 Serial 'Smart Sensor' Ports
- Programmable Analog Output
- Modbus for SCADA Connection
- Web & FTP Client / Server
- USB Memory for Easy Data and Program Transfer
- [Download Specification Sheet](#)

\$1,950.00



dataTaker DT85

16 Channel Universal Input Data Logger

- Up to 48 Analog ($\pm 50V$) sensor inputs
- Expandable to 960 analog inputs
- 12 flexible digital terminals
- 2 Serial 'Smart Sensor' ports
- SDI-12 (multiple networks)
- Modbus for SCADA connection
- Web & FTP client / server
- USB memory for easy data & program transfer
- Programmable Analog Output
- [Download Specification Sheet](#)

\$3,980.00



DIN rail data acquisition system ELOG DATA LOGGER | Enerdis

modular multi-channel multi-sensor

Sold by:

Chauvin Arnoux Macherio, Italy

★★★★★ Feedback on the quality of responses (from 1 buyers)

[Request price options](#)

[Request a personalized quote](#)

DESCRIPTION

ELOG DATA LOGGER from Enerdis®, a high-performance, stand-alone, economical data logger open to all your analytical tools.
Collect, record and export all your energy data
Essential for energy data monitoring

Open data logger - all equipment manufacturers
Remote retrieval of all energy data
Data file export for analytical applications
Local backup of data files covering several years
Simplified setup via web pages

COLLECT

Several communication ports for remote data retrieval from the multi-function, multi-manufacturer equipment on an installation (meters, PLCs, power monitors, transducers)

RECORD

Recording of up to 100 variables
Configurable recording periodicity (5 s to each variable)
History of last 3 months

CALCULATE

Integrated calculation functions for the variables so that you can view and record data which can be processed directly ($ax+b$, x/y)

EXPORT

Data file export (csv, xml) is fully configurable (choice of variables, file formats, transmission periodicity, FTP servers)
Specific formats can be developed on request



Portable data acquisition system BeanDevice® 2.4GHz AN-420

wireless rugged multi-channel

Sold by:

BeanAir GmbH Germany

★★★★★ Feedback on the quality of responses (from 2 buyers)

This seller generally responds in under 48 hours

Indicative price *

\$530

Request price options

Request a personalized quote

DESCRIPTION

BeanDevice® 2.4GHz AN-420 is a wireless data logger with 4-20 mA current loop inputs. Special attention is given in the analog signal conditioner design with an accuracy of $\pm 0.08\%$ (FS) and a dynamic range of 16-bit.

The device is directly powered by a high accuracy and adjustable DC/DC converter integrated inside the enclosure. The excitation voltage is remotely configurable through the BeanScope® 2.4GHz (4.5 to 20V).

Equipped with a waterproof (IP67/NEMA6) and rugged aluminum enclosure, an ultra-low power (30 μ A in standby mode), an integrated data logger that can store up to 1 million data logs, as well as a maximum wireless range of 650 meters (Line of Sight), this wireless device is well suited for all types of industrial applications.

The optional TimeSync® function allows to reach a time-synchronization of ± 2.5 ms over the wireless networks. It contributes to enhance user experience about data fusion and modal analysis.

Looking for a quick and easy integration with a third party software, have choice between ModBus RTU/JASCII protocol available on our BeanGateway® or OPC DA available on our BeanScope® (Premium+ & Multiview versions only).

The BeanDevice® AN-420 is suitable for the following applications:

- Remote monitoring
- Built-in test Equipment
- Condition monitoring
- Structural Health Monitoring (SHM)

SIRIUS XHS

HIGH-SPEED DATA ACQUISITION SYSTEM

7-YEAR WARRANTY

SIRIUS XHS is a high-speed data acquisition system (10 MS/s) with the new HybridADC signal conditioning technology capable of high-bandwidth transient recording and very high-dynamic, alias-free data acquisition.

Modern data interfaces such as USB 3.0, LAN, XCP, CAN, and OPC UA, with PTP synchronization allow for open and flexible connectivity. SIRIUS XHS is the ultimate high-speed DAQ.

Get a quote

Schedule 1:1 call



Αν και αυτή η λίστα DAQ είναι αρκετά μικρή, συνοψίζει τις διάφορες κατηγορίες συστημάτων που κυκλοφορούν στην αγορά. Ωστόσο, από τις προδιαγραφές και τις τιμές των προϊόντων φαίνεται ότι, αν και ορισμένα από αυτά καλύπτουν τις τεχνικές απαιτήσεις που ορίζονται στην προηγούμενη παράγραφο, οι τιμές τους είναι πολύ υψηλές (στα προϊόντα που δεν αναφέρουν τιμή, έχει γίνει μια εκτίμηση με βάση τις προδιαγραφές τους). Ως εκ τούτου, συνάγεται το συμπέρασμα ότι κανένα δεν πληροί τις απαιτήσεις που ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και ότι μια λογική λύση θα ήταν ο σχεδιασμός ενός προσαρμοσμένου συστήματος DAQ, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού της πλακέτας και της ανάπτυξης λογισμικού που να καλύπτει τις τεχνικές απαιτήσεις ενώ ταυτόχρονα να παραμένει εντός προϋπολογισμού.

Αυτό που αξίζει επίσης να σημειωθεί είναι ότι παρόλο που η ασύρματη τεχνολογία θεωρήθηκε ως πιθανή λύση, λόγω του ότι ελαχιστοποιεί τον αριθμό των καλωδίων για την εγκατάσταση, εντοπίστηκαν αρκετά μειονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα, αν σκεφτόμασταν μια λύση με μπαταρίες, η απαίτηση της Εξυπηρέτησης θα διακυβευόταν, καθώς θα χρειαζόταν συντήρηση για αλλαγή μπαταριών. Λόγω της συμβατότητας TCP/IP που αναφέρεται στις απαιτήσεις, ανεξάρτητα από το σχέδιο τροφοδοσίας της συσκευής, θα χρειαζόταν επιπλέον υλικό για την υποστήριξη της ασύρματης λύσης, καθώς τα δεδομένα θα πρέπει να μεταφερθούν ασύρματα και στη συνέχεια μέσω άλλης συσκευής που τα μεταφράζει σε TCP/IP, αυξάνοντας έτσι περαιτέρω το κόστος και τον χρόνο ανάπτυξης.

2 Ανάλυση Συστήματος

Έχοντας ήδη καταλήξει στο συμπέρασμα ότι θα χρειαζόταν μια προσαρμοσμένη λύση για την κάλυψη των απαιτήσεων του συστήματος, η επισκόπηση της λύσης έπρεπε να καθορισθεί πλήρως πριν ξεκινήσει η φάση σχεδιασμού.

Ως μεθοδολογία σχεδιασμού και υλοποίησης του Συστήματος επιλέχθηκε το W-model. Σε αντίθεση με το κλασικό μοντέλο Waterfall και V, το μοντέλο W προσανατολίζεται στον έλεγχο της επιτυχούς δοκιμής κάθε σταδίου ανάπτυξης. Το μοντέλο W αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τον τυπικό κύκλο ανάπτυξης όπου μετά από κάθε στάδιο ακολουθεί ένα στάδιο δοκιμής και αξιολόγησης, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τους προκαθορισμένους στόχους και απαιτήσεις.



Εικόνα 1.

Στην επόμενη ενότητα θα καθοριστούν η αρχιτεκτονική και οι προδιαγραφές του συστήματος.

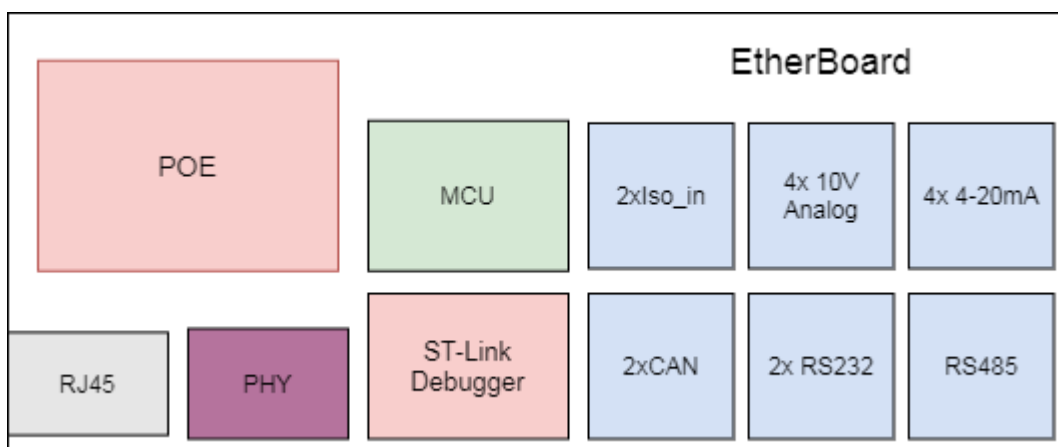
2.1 Επισκόπηση Συστήματος

Από τη στιγμή που το σύστημα στοχεύει σε βιομηχανικούς αισθητήρες γενικής χρήσης, μια αρχιτεκτονική με ένα μικροελεγκτή χαμηλού κόστους που θα περιβάλλεται από τα περιφερειακά για τις διάφορες συνδέσεις, εξασφαλίζει τον σύντομο χρόνο σχεδιασμού και αρκετές επιδόσεις, όσων αφορά τον χρόνο εκτέλεσης. Επιπροσθέτως, η ίδια στρατηγική απλοποιεί την ανάπτυξη του υλικολογισμικού.

Μια εναλλακτική λύση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας πολύ ισχυρότερος μικροελεγκτής με υψηλότερες επιδόσεις και αρκετά ενσωματωμένα περιφερειακά. Παρόλα αυτά, για να αποφευχθούν υψηλότερα κόστη και χρόνος σχεδιασμού, αυτή η λύση δεν ερευνήθηκε περαιτέρω.

Προτού ξεκινήσει ο σχεδιασμός του συστήματος, έπρεπε να παρθούν κάποιες αποφάσεις υψηλότερου επιπέδου. Για παράδειγμα, οι προδιαγραφές του κάθε εξαρτήματος έπρεπε να μελετηθούν για να εξασφαλιστεί η πλήρης συμμόρφωση με τις τεχνικές προδιαγραφές, αλλά και η συμβατότητα σε επίπεδο συστήματος-εξαρτήματος.

Η εικόνα 2 παρουσιάζει τα εξαρτήματα του συστήματος σε υψηλό επίπεδο.



Εικόνα 2.

2.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή

Πρωταρχικό βήμα για τη σχεδίαση του συστήματος, είναι η επιλογή του μικροελεγκτή, για να μπορέσουμε στη συνέχεια να επιλέξουμε τα κατάλληλα περιφερειακά.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται ορισμένοι από τους πιθανούς μικροελεγκτές προς επιλογή, καθώς και οι προδιαγραφές τους, ο αριθμός και η ποικιλία των περιφερειακών, τα εργαλεία ανάπτυξης FW και οι διαθέσιμες πλακέτες ανάπτυξης.

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι για να ακολουθήσουμε το μοντέλο W και να μπορούμε να κάνουμε δοκιμές σε κάθε βήμα, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση μιας πλακέτας DEV. Αυτός είναι και ο λόγος που αξιολογήθηκε η ύπαρξη και η ποικιλία των πλακετών DEV για κάθε μικροελεγκτή.

Αριθμός Ανταλλακτικού	Προμηθευτής	Αρχιτεκτονική	Συχνότητα Πυρήνα (MHz)	Αριθμός ακίδων	Περιφερειακά	Πλακέτες Ανάπτυξης	Εργαλεία Λογισμικού
ATMEGA328P	Microchip	8-bit	16	32	USART, SPI, I2C, 10bit ADC	Arduino Uno	Atmel Studio
STM32F103	STM	32-bit	72	100	3xUSART, 2xSPI, 1xCAN, 2xI2C, USB 2.0, 2x12bit ADC	Blue Pill	STM32 Ecosystem
TM4C129x	Texas Instruments	32-bit	120	128	8xUSART, 4xSSI, 2xCAN, 10xI2C, 10/100 Ethernet MAC, USB 2.0, 2x12bit ADC	TIDM-TM4C129 POE	Code Composer Studio
STM32F407	STM	32-bit	160	140	4xUSART, SDIO, 2xCAN, 3xSPI, 3xI2C, 10/100 Ethernet MAC, USB 2.0, 2x12bit ADC	NUCLEO-F429 ZI	STM32 Ecosystem
ESP32	Espressif	32-bit	240	48	Ultra-low-power co-processor, WiFi, Bluetooth, 3xUSART, SDIO, CAN, 4xSPI, 2xI2C, 2xI2S, 10/100 Ethernet MAC, 12bit ADC	ESP32 DevKit	ESP-IDF

Πίνακας 2.

Στον Πίνακα 2, μπορούμε να δούμε διαφορετικές λύσεις με φθηνότερα και μικρότερα ολοκληρωμένα που θα χρειάζονταν επιπλέον περιφερειακά για να πληρούν τις απαιτήσεις, καθώς και μεγαλύτερες πιο ακριβές λύσεις που ενσωματώνουν και τα περιφερειακά.

Η απόφαση να χρησιμοποιηθεί μικροελεγκτής που περιέχει τα επιπλέον περιφερειακά πάρθηκε, προκειμένου να εξοικονομηθεί χρόνος ανάπτυξης στο HW (δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν επιπλέον ολοκληρωμένα, πυκνωτές αποσύνδεσης και δρομολόγηση των συνδέσεων), καθώς και στο FW, δεδομένου ότι ο κίνδυνος για πιθανά προβλήματα με τα εξωτερικά περιφερειακά μπορεί να πάρει χρόνο από τη φάση σχεδιασμού και υλοποίησης, καθώς και από τη φάση εντοπισμού σφαλμάτων αργότερα. Επιπλέον, η συμβατότητα με το περιφερειακό θα έχει ήδη καθιερωθεί από τον προμηθευτή, καθιστώντας τη φάση ανάπτυξης του κώδικα πολύ πιο εύκολη.

Στην περίπτωση εξωτερικών περιφερειακών, η τυπική συνδεσιμότητα με τον μικροελεγκτή είναι SPI ή I2C. Και στις δύο περιπτώσεις, πρέπει να αναπτυχθούν βιβλιοθήκες χαμηλού επιπέδου προκειμένου να υπάρξει επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και των περιφερειακών. Αυτές οι βιβλιοθήκες, αυξάνουν τον χρόνο εκτέλεσης του μικροελεγκτή και όταν συνδέονται πολλαπλά περιφερειακά (όπως στην περίπτωση μας), η ταχύτητα εκτέλεσης του κώδικα μπορεί να αυξηθεί δραματικά.

Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι που αποκλείστηκαν από την επιλογή οι φθηνότεροι μικροελεγκτές γενικής χρήσης. Συγκρίνοντας τα μεγαλύτερα ολοκληρωμένα, μπορούμε να δούμε ότι έχουν σχεδόν τις ίδιες προδιαγραφές. Τα κριτήρια επιλογής σε αυτές τις περιπτώσεις έγκειται στην επιλογή του προμηθευτή και όχι του ίδιου του μικροελεγκτή. Ο λόγος είναι ότι διαφορετικοί προμηθευτές προσφέρουν διαφορετικές λύσεις ανάπτυξης. Μερικές φορές οι λύσεις είναι δωρεάν στη χρήση και άλλες όχι. Ορισμένοι προμηθευτές προσφέρουν βιβλιοθήκες χαμηλού επιπέδου για όλα τα περιφερειακά και τον πυρήνα του μικροελεγκτή, γεγονός που μειώνει δραστικά τον χρόνο ανάπτυξης του FW.

Εξετάζοντας την STMicroelectronics, όλα τα εργαλεία ανάπτυξης τους είναι δωρεάν, γεγονός που όχι μόνο δίνει την ευκαιρία για μια εύκολη στην εκκίνηση λύση, αλλά διασφαλίζει ότι η υποστήριξη λογισμικού και τα σεμινάρια διατίθενται στο διαδίκτυο είναι σημαντικά περισσότερα από αυτά των επί πληρωμή λογισμικού. Ακόμα, προσφέρεται το **STM32Cube**

IDE το οποίο είναι ένα πλήρες περιβάλλον ανάπτυξης FW που περιλαμβάνει την ενότητα επιλογής μικροελεγκτή, την προετοιμασία του HW μέσω ενός εργαλείου γραφικής διεπαφής που ονομάζεται STM32 MxCube, έναν ενσωματωμένο editor που βασίζεται στο Eclipse, και έναν Debugger όλα σε ένα πακέτο.

Έτσι, με το STM32Cube IDE μπορούμε να αρχικοποιήσουμε το HW. Το IDE με τη σειρά του δημιουργεί όλες τις βιβλιοθήκες χαμηλού επιπέδου για τα περιφερειακά και τον πυρήνα και τα μεταφέρει αυτόματα όλα στον editor όπου εκεί υλοποιείται η εφαρμογή.

Το να έχουμε όλον τον κώδικα χαμηλού επιπέδου γραμμένο και τεκμηριωμένο αποτελεσματικά από ένα εργαλείο που τον δημιουργεί αυτόματα πριν καν ξεκινήσουμε την ανάπτυξη, είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα, αποφεύγοντας τον κίνδυνο να γίνουν λάθη που με τη σειρά τους κοστίζουν σε χρόνο ανάπτυξης.

Τούτου λεχθέντος, η επιλογή του **STM32f407** ως τον μικροελεγκτή του συστήματος ήταν μια εύκολη επιλογή, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω πτυχές, συμπεριλαμβανομένων των επαρκών περιφερειακών, της ταχύτητας ρολογιού, του αριθμού εισόδων/εξόδων και των διαθέσιμων εργαλείων ανάπτυξης.

Για να προγραμματιστεί ο μικροελεγκτής, απαιτείται μια εξωτερική συσκευή η οποία είναι υπεύθυνη για τον προγραμματισμό της μνήμης του μικροελεγκτή, αλλά και για την διαδικασία αποσφαλμάτωσης και σταδιακής εκτέλεσης. Δεδομένου ότι η πρώτη συσκευή που σχεδιάστηκε θα ήταν το πρωτότυπο και θα δοκιμάζονταν πολλές διαφορετικές λύσεις FW, αποφασίστηκε **να ενσωματωθεί ο debugger στο σύστημα**, προκειμένου να έχουμε εύκολη και γρήγορη πρόσβαση κατά το ανέβασμα του κώδικα και τον εντοπισμό σφαλμάτων.

2.1.2 Σχεδιασμός Τροφοδοσίας

Ο όρος Σχεδιασμός Τροφοδοσίας αναφέρεται στα εξαρτήματα του Συστήματος που είναι υπεύθυνα για την παροχή ενέργειας. Αυτά είναι οι ρυθμιστές τάσης, μετατροπείς DC-DC που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές ή πηγές ισχύος ειδικού σκοπού.

Εξετάζοντας τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του Συστήματος, αποφασίστηκε να αναπτυχθεί, αντί μιας απλής θύρας Ethernet, μία θύρα PoE (Power over Ethernet), μέσω της οποίας θα τροφοδοτείται η πλακέτα. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται πραγματική ελαχιστοποίηση των καλωδίων εγκατάστασης, καθώς η συσκευή χρειάζεται μόνο το καλώδιο ethernet για τα δεδομένα και τη σύνδεση ρεύματος (εκτός της καλωδίωσης των αισθητήρων οι οποίες θα υπάρχουν και στις δύο περιπτώσεις).

Ωστόσο στο Σύστημα, εκτός της τροφοδοσίας μέσω PoE, έχει τοποθετηθεί και ένας μετατροπέας DC-DC, ο οποίος εξυπηρέτησε τις δοκιμές στα αρχικά στάδια, αλλά και, δίνει τη δυνατότητα τροφοδοσίας με μια σειρά τάσεων χωρίς την ανάγκη της χρήσης PoE.

Δεδομένου ότι το ενσωματωμένο πρόγραμμα εντοπισμού σφαλμάτων που αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα πρέπει να συνδεθεί μέσω USB 2.0 για τη μεταφορά των πληροφοριών από και προς το Σύστημα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η σύνδεση και να παραδοθούν τα +5 Volt του USB απευθείας στο σύστημα, αυξάνοντας περαιτέρω τις επιλογές παροχής ενέργειας.

Για τη θύρα PoE, χρησιμοποιήθηκε το **TPS23753Aa**. Είναι μια διεπαφή PoE και ένας μετατροπέας DC-DC με βελτιωμένη προστασία ESD, που επιτρέπει τη διόρθωση της συζευγμένης ισχύος στα ζεύγη Ethernet και τη μετατροπή σε χρήσιμες τάσεις χαμηλού επιπέδου. Επιλέχθηκε αυτός ο τύπος θύρας γιατί συνδυάζει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά με προσιτή τιμή καθώς και διαθεσιμότητα στην αγορά.

Ο επιπλέον μετατροπέας DC-DC που επιλέχθηκε ήταν ο **ACT4065ASH-T** επειδή συνδυάζει ένα ευρύ φάσμα εισόδου από 6 έως 30 V με υψηλή απόδοση 95% και ισχύ εξόδου 2A, που είναι υπεραρκετή για το Σύστημα.

Όλα τα παραπάνω έχουν σταθερή τάση εξόδου +5V ως προς τη γείωση του Συστήματος. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα εξωτερικά περιφερειακά και ο μικροελεγκτής απαιτούν +3,3V για να λειτουργήσουν. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένας ρυθμιστής χαμηλής τάσης (LDO) για να μετατρέψει τα +5V των διαφόρων εισόδων σε +3,3V. Το εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **NCP187** επειδή μπορεί να παρέχει αρκετή ισχύ στον μικροελεγκτή και στα περιφερειακά με **χαμηλό θόρυβο εξόδου** και **πολύ καλό PSRR**, ενσωματώνοντας πολλά **χαρακτηριστικά προστασίας** όπως Θερμικό Τερματισμό Λειτουργίας, Ήπια Εκκίνηση, Περιορισμό Ρεύματος και επίσης σήμα Ορθής Εξόδου Ισχύος για εύκολη διασύνδεση με μικροελεγκτές .

Δεδομένου ότι ο ενσωματωμένος debugger χρειάζεται επίσης +3,3V για να λειτουργήσει, επιλέχθηκε ένας ξεχωριστός LDO (**MCP1812B**), καθώς θέλουμε ο δεύτερος μικροελεγκτής να τροφοδοτείται μόνο όταν είναι συνδεδεμένο το USB και όχι όταν υπάρχουν άλλες πηγές ισχύος +5V.

Ο Πίνακας 3 περιέχει όλες τις πηγές ισχύος του Συστήματος, καθώς και το εύρος τάσης εισόδου και εξόδου τους και την κατάσταση στην οποία λειτουργούν.

Αριθμός Ανταλλακτικού	Τύπος Συσκευής	Τάση Εισόδου	Τάση Εξόδου	Συνθήκη Λειτουργίας
TPS23753Aa	PoE DC-DC	36-58V	5V	Όταν το ethernet είναι συνδεδεμένο σε PoE Switch
ACT4065ASH-T	DC-DC	6-30V	5V	Όταν εξωτερική τροφοδοσία είναι συνδεδεμένη
-	USB	-	5V	Όταν ο Debugger είναι συνδεδεμένος
NCP187	LDO	3.6 - 5.5V	3.3V	Οποτεδήποτε υπάρχουν +5 βολτ στην πλακέτα
MCP1812B	LDO	4.0 - 5.5V	3.3V	Όταν ο Debugger είναι συνδεδεμένος

Πίνακας 3.

Σημειώνεται ότι η κύρια είσοδος 3,3V LDO είναι συνδεδεμένη σε ράγα +5V που συνδέεται με όλα τα εξαρτήματα των 5V. Με αυτόν τον τρόπο, εάν τροφοδοτείται κάποια ή πολλές συσκευές με έξοδο +5V, τροφοδοτείται και το κύριο LDO.

2.1.3 Επιλογή Περιφερειακών

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε στην παράγραφο 2.1.1 περιέχει τα περισσότερα από τα περιφερειακά που αναφέρονται στις απαιτήσεις του συστήματος. Μερικά από αυτά είναι ο ελεγκτής CAN, το 10/100 MAC ethernet RMII και τα GPIO. Το MCU περιέχει επίσης αρκετές διεπαφές UART. Μία από αυτές χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία με τον debugger, προκειμένου να μεταφερθούν δεδομένα μέσω μιας εικονικής θύρας COM.

Ethernet

Ο μικροελεγκτής περιέχει τη διεπαφή για το ethernet που ονομάζεται ελεγκτής MAC, αλλά όπως συμβαίνει με τις περισσότερες διεπαφές, απαιτείται ένα ακόμα ολοκληρωμένο που ονομάζεται φυσικό στρώμα (PHY) ώστε να γίνει η σύνδεση του περιφερειακού με τον έξω κόσμο. Το PHY είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση με τον κόσμο έξω και περιέχει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά προστασίας για την ασφάλεια σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή λανθασμένου χειρισμού της συσκευής.

Το **DP83848** της Texas Instruments και το **LAN8720** της Microchip ήταν τα δύο PHY που αξιολογήθηκαν και ανταποκρίθηκαν στις απαιτήσεις. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης ολοκληρωμένων κατά την περίοδο 2020-2022, μόνο το **DP83848** ήταν διαθέσιμο στην αγορά εκείνη την εποχή, επομένως ήταν αυτό που επιλέχθηκε για το σύστημα. Τα δύο IC έχουν πολύ παρόμοια απόδοση και μερικές από τις διαφορές είναι ότι το LAN8720 έχει περισσότερες θύρες I/O για LED κατάστασης και άλλες λειτουργίες, ενώ το DP83848 διατίθεται σε μικρότερη μορφή με λιγότερες λειτουργίες. Και τα δύο PHY ενσωματώνουν προστασία ESD, αυτόματη επικοινωνία, αυτόματη ανίχνευση πολικότητας και διόρθωσης και είναι συμβατά με τα πρότυπα IEEE 802.3/802.3u (Fast Ethernet) και ISO 802.3/IEEE 802.3 (10BASE-T).

CAN-BUS

Παρόμοια με το Ethernet, ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει δύο ελεγκτές CAN που χειρίζονται όλη τη λειτουργικότητα του διαύλου, αλλά χρειάζονται εξωτερικοί πομποδέκτες για τη διασύνδεση με τον φυσικό κόσμο. Οι πομποδέκτες προστατεύουν το περιφερειακό από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και συμβάντα ESD και μεταφράζουν επίσης τη διαφορική τάση διαύλου σε σήματα 3,3V TX και RX. Το **SN65HVD230D** επιλέχθηκε αφού ήταν συμβατό με τη λογική των 3.3V του μικροελεγκτή, συνδυάζει σχετικά μικρή διάσταση σε λογική τιμή και κυκλοφορούσε εκείνη την περίοδο στην αγορά.

RS232

Δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής διαθέτει πολλά χρησιμοποιήσιμα περιφερειακά UART και το σύστημα χρειαζόταν τουλάχιστον έναν πομπό και έναν δέκτη στην ίδια συσκευασία, το **MAX232E** επιλέχθηκε ως IC διασύνδεσης RS232. Περιέχει 2 σετ πομπούς/δέκτες με προστασία ESD και διατίθεται με χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος.

RS485

Ομοίως, για το RS485, χρειαζόταν ένας πομποδέκτης προκειμένου να συνδεθεί με άλλες συμβατές συσκευές με το πρωτόκολλο RS485. Επιλέχθηκε το **SN65HVD12D** καθώς περιέχει έναν πομπό και έναν δέκτη που προστατεύονται από ESD σε χαμηλή τιμή.

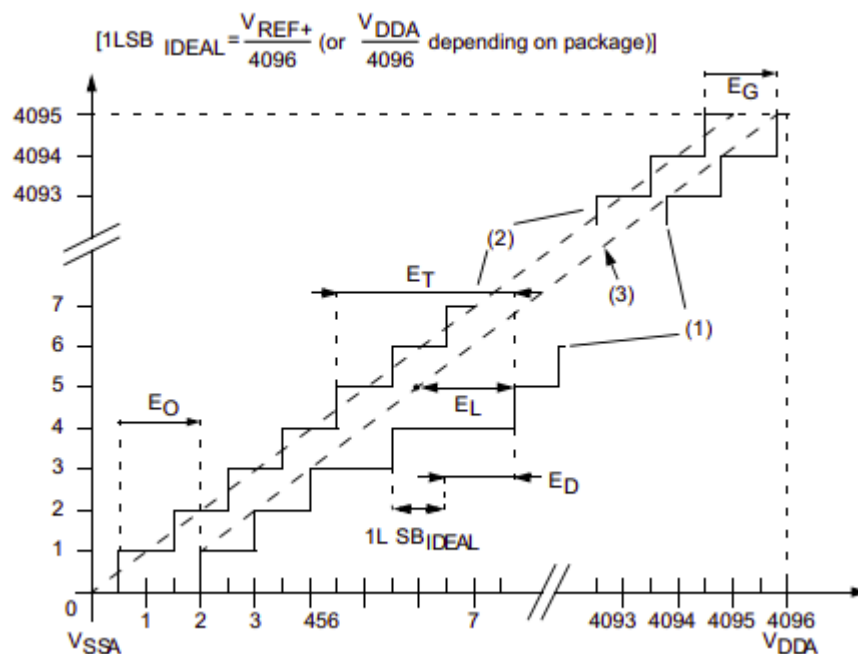
ADC

Αν και ο μικροελεγκτής περιέχει τρεις μονάδες ADC, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα εξωτερικό ADC προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια του συστήματος και να είναι δυνατή η μέτρηση υψηλότερων τάσεων.

Οι ενσωματωμένες μονάδες ADC του μικροελεγκτή είναι τρεις ADC SAR 12 bit που λειτουργούν σε 2,4 εκατομμύρια δείγματα το δευτερόλεπτο, που είναι μια υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας για ένα ενσωματωμένο ADC. Ωστόσο, το εύρος μέτρησής τους περιορίζεται στα 0-3,3V. Το συνολικό σφάλμα των εσωτερικών ADC φαίνεται στον Πίνακα 4 και στην Εικόνα 3 παρακάτω.

Symbol	Parameter	Test conditions	Typ	Max ⁽¹⁾	Unit
ET	Total unadjusted error	$f_{PCLK2} = 60 \text{ MHz}$, $f_{ADC} = 30 \text{ MHz}$, $R_{AIN} < 10 \text{ k}\Omega$, $V_{DDA} = 1.8^{(2)} \text{ to } 3.6 \text{ V}$	±2	±5	LSB
EO	Offset error		±1.5	±2.5	
EG	Gain error		±1.5	±3	
ED	Differential linearity error		±1	±2	
EL	Integral linearity error		±1.5	±3	

Πίνακας 4.



Εικόνα 3.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4 και την Εικόνα 3 παραπάνω, και όπως επαληθεύτηκε από ένα γρήγορο πείραμα, το συνολικό σφάλμα των ενσωματωμένων ADC είναι κοντά στα ±5 LSB.

Δεδομένου ότι τα ενσωματωμένα ADC περιφερειακά του μικροελεγκτή δεν μπορούσαν να φτάσουν στο επιθυμητό εύρος τάσης, και επίσης η απόδοσή τους δεν είναι η καλύτερη, αποφασίστηκε να αξιολογηθεί η λύση τοποθέτησης ενός εξωτερικού ADC που θα μπορούσε να επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή μέσω SPI.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση του εσωτερικού ADC μπορεί να αυξηθεί εάν εισάγουμε φιλτράρισμα στο HW με τη μορφή κυκλώματος RC και στο FW εφαρμόζοντας κάποιο ψηφιακό φίλτρο ή μέσω μιας σειράς συνεχών δειγμάτων. Ωστόσο, οι παραπάνω λύσεις, αν και εφικτές, δεν μπορούν να υποκαταστήσουν την απόδοση ενός καλύτερου ADC. Μια λύση για τη μέτρηση 10 V με έναν ADC που μπορεί να μετρήσει μόνο 3,3 V είναι να τοποθετήσουμε έναν διαιρέτη τάσης στην κάθε είσοδο. Αυτό ωστόσο, για να λειτουργήσει, θα απαιτούσε

αντιστάσεις ακριβείας και θα περιορίζε την εμβέλεια κάθε καναλιού στην επιλεγμένη αναλογία αντίστασης που τοποθετείται στο PCB.

Ήταν προφανές ότι τα εσωτερικά ADC δεν μπορούσαν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις και οι προτεινόμενες επιδιορθώσεις μπορούσαν να λειτουργήσουν ως προς μόνο ένα μέρος.

Έτσι, προκειμένου να ληφθούν ακριβέστερα δείγματα και να μετρηθεί το επιθυμητό εύρος τάσης, αξιολογήθηκαν αρκετές εξωτερικές μονάδες ADC. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις προδιαγραφές των ADC που ταιριάζουν καλύτερα στις απαιτήσεις και διατίθενται σε λογική τιμή.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι παρόλο που το εύρος μέτρησης του επιθυμητού ADC είναι 10 V, η τάση τροφοδοσίας θα μπορούσε να είναι μόνο +5 V, καθώς αυτή είναι η υψηλότερη ρυθμιζόμενη τάση του συστήματος.

Αριθμός ανταλλακτικού	Ανάλυση (bits)	Εύρος Μέτρησης	Ρυθμός Δειγματοληψίας	Αριθμός καναλιών	Τάση τροφοδοσίας	Μη γραμμικότητα	Προμηθευτής
ADS8668	12	±10 0-10	500 ksps	8	+5V	±0.5LSB	Texas Instruments
LTC185X	12	±10 0-10	100 ksps	8	+5V	±1LSB	Linear Technologies
MAX1032	14	±12 0-12	115 ksps	8	+5V	±0.25LSB	Maxim Integrated

Πίνακας 5.

Μπορούμε να δούμε ότι οι προδιαγραφές των τριών ADC είναι πολύ κοντά. Το MAX1032 έχει υψηλότερη ανάλυση και χαμηλότερη μη γραμμικότητα, αλλά έχει επίσης χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας. Δεδομένου ότι 12 bit ανάλυσης είναι αρκετά για τη μέτρηση βιομηχανικών αισθητήρων γενικής χρήσης, πάρθηκε η απόφαση να χρησιμοποιηθεί το ASD8668, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο υψηλότερος ρυθμός δειγματοληψίας προκειμένου να επιτευχθεί ο μέσος όρος για ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

Ηλεκτρικά Απομονωμένα ψηφιακά I/Os

Προκειμένου το σύστημα να μπορεί να διασυνδέει ψηφιακά σήματα I/O με ασφάλεια, απαιτείται η ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ του μικροελεγκτή και οποιασδήποτε άλλης εξωτερικής συσκευής. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε ένας απομονωμένος δέκτης δύο ψηφιακών εισόδων 24-60 V ([ISO1212DBQR](#)) με προστασία αντίστροφης πολικότητας για την πλήρη απομόνωση του μικροελεγκτή από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και συμβάντα ESD. Αυτή η λύση ελαχιστοποιεί τα εξαρτήματα που απαιτούνται σε σύγκριση με έναν παραδοσιακό οπτοζεύκτη και δίκτυο αντιστάσεων περιορισμού ρεύματος που θα χρειαζόταν επίσης συμπληρωματικά εξαρτήματα για την προστασία ESD.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφέρουμε ότι όλα τα παραπάνω περιφερειακά επιλέχθηκαν προσεκτικά προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το σύστημα θα παραμείνει προστατευμένο και θα συμμορφώνεται με τα βιομηχανικά πρότυπα. Μέσω των χαρακτηριστικών προστασίας ESD και υπερτάσεων, όλα τα περιφερειακά προστατεύουν τον μικροελεγκτή από ανεπιθύμητες υπερτάσεις και επικίνδυνα μεταβατικά φαινόμενα, γεγονός το οποίο εξασφαλίζει την ήπια λειτουργία του συστήματος και την αποφυγή δυσλειτουργίας.

2.2 Σχεδιασμός και Ανάλυση Κυκλωμάτων

Έχοντας επιλέξει όλα τα κύρια μέρη του συστήματος, παρακάτω, παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά σχέδια που περιγράφουν πλήρως τη συνδεσιμότητα μεταξύ κάθε στοιχείου και μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τον πραγματικό σχεδιασμό HW.

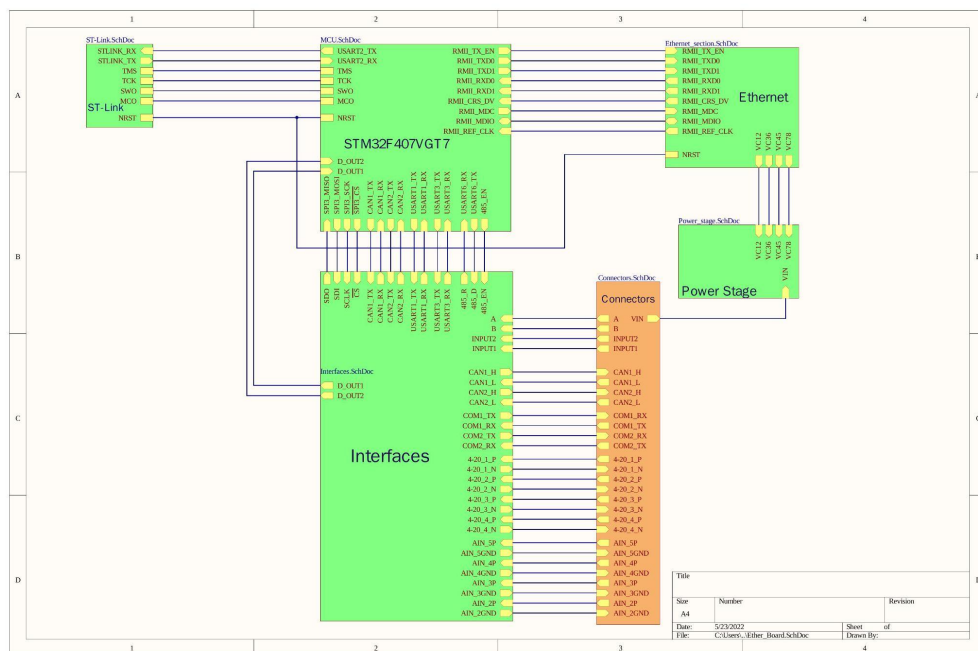
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τα σχέδια και το σχεδιασμό HW ήταν το Altium Designer. Είναι ένα από τα πιο προηγμένα και αναγνωρισμένα λογισμικά EDA στην αγορά, προσφέροντας μεγάλη ευελιξία και πολυάριθμα χαρακτηριστικά που κάνουν τη διαδικασία σχεδιασμού ευκολότερη και πιο αποτελεσματική.

Μετά την έναρξη ενός νέου έργου, δημιουργήθηκαν ξεχωριστά σχηματικά αρχεία με ιεραρχικό τρόπο, το καθένα για κάθε τμήμα του συστήματος. Αυτά είναι

- Συνδέσεις
- Μικροελεγκτής
- Ενότητα Ethernet
- Διεπαφές
- Τροφοδοσία
- ST-Link

2.2.1 Ιεραρχικό Σχηματικό

Στην Εικόνα 4 φαίνεται το ιεραρχικό σχέδιο που περιγράφει τη σύνδεση μεταξύ καθενός από τα παραπάνω τμήματα. Κάθε ενότητα (πράσινα/καφέ μέρη), περιέχει έναν αριθμό θυρών (κίτρινα μέρη) που περιγράφουν τα πραγματικά σήματα στο αντίστοιχο σχεδιασμό. Οι θύρες έχουν το ίδιο όνομα με το σήμα και μια κατεύθυνση (είσοδος, έξοδος, αμφίδρομη ή καμία). Αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των σημάτων και την αποτροπή του σχεδιαστή από το να κάνει πιθανά λάθη, όπως η χρήση μιας εισόδου ως εξόδου.

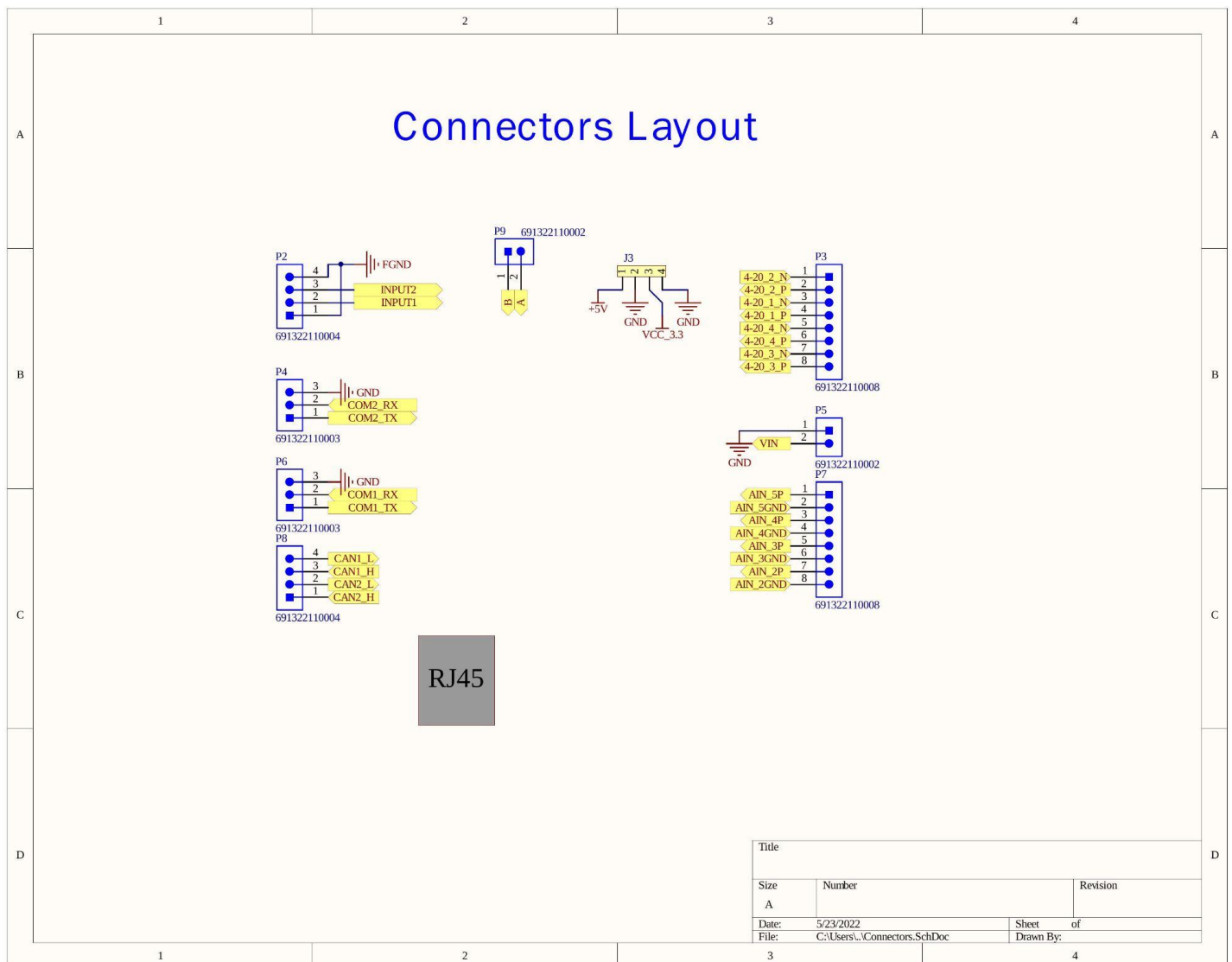


Εικόνα 4.

Παρόλο που σε αυτό το στάδιο ο σχεδιασμός απλώς περιγράφει τη συνδεσιμότητα του συστήματος, τα χαρακτηριστικά κάθε σήματος, όταν κάποιος δημιουργείται, μεταφέρονται μέσω των σχηματικών σχεδίων και τελικά φτάνουν στο μοντέλο ενός πραγματικού τμήματος που έχει καθορισμένες εισόδους, εξόδους και ακροδέκτες ισχύος σύμφωνα με κατασκευαστή του. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό να ορίσουμε πλήρως και σωστά κάθε δίκτυο (net: όπως ονομάζονται τα σήματα στο Altium) και τις παραμέτρους του, ώστε να μπορούμε να τρέξουμε το ERC το οποίο με τη σειρά του αναφέρει όλα τα σφάλματα σχεδιασμού και αποτρέπει πιθανή σχεδιαστικά λάθη.

2.2.2 Σχηματικό Συνδέσμων

Το πρώτο σχέδιο, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 5, συμπληρώνει τους διάφορους συνδέσμους που υπάρχουν στη φυσική πλακέτα, οι οποίοι θα δώσουν στο σύστημα τη δυνατότητα να αλληλεπιδρά με πραγματικά ηλεκτρικά σήματα. Όπως φαίνεται, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί μικρότεροι σύνδεσμοι αντί για έναν ή δύο μεγάλους. Αυτό έγινε για να διαχωριστούν φυσικά οι διαφορετικές ομάδες σημάτων όπως αναλογικό, CAN, RS232. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης των βυσμάτων μιας ομάδας χωρίς παρεμβολές με άλλες ομάδες ενώ το σύστημα είναι τροφοδοτημένο.

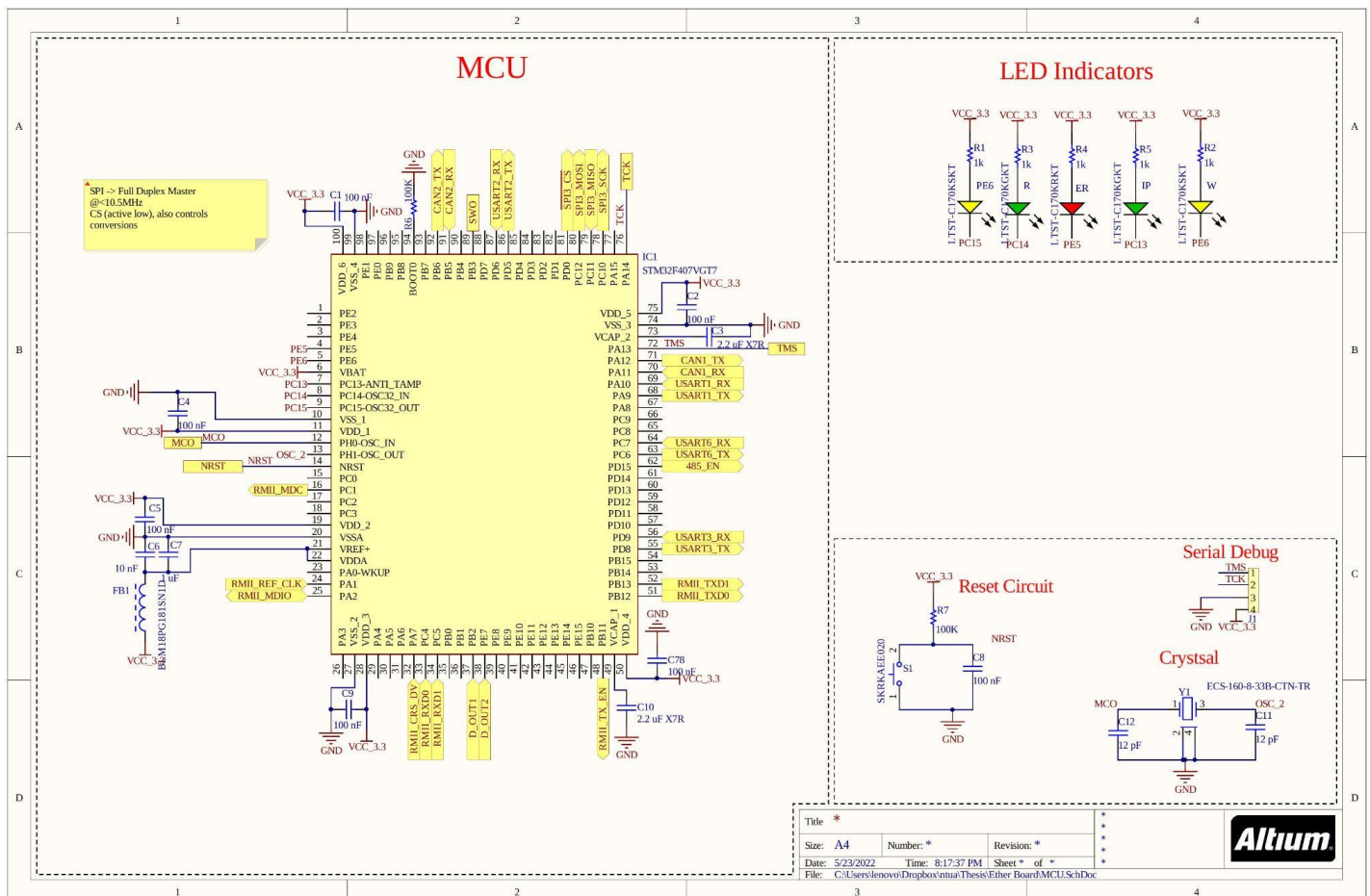


Εικόνα 5.

Ο τύπος των συνδέσεων που επιλέχθηκαν είναι το τυπικό πράσινο βιομηχανικό στυλ με μια βίδα ρύθμισης για κάθε ακίδα, που δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών καλωδίων με χρήση ενός συνηθισμένου κατασαβιδιού philips ή επίπεδης κεφαλής.

2.2.3 Σχηματικό Μικροελεγκτή

Το επόμενο σχέδιο στην Εικόνα 6 περιέχει τον μικροελεγκτή και όλα τα παθητικά στοιχεία, που συνιστώνται στο φύλλο δεδομένων του εξαρτήματος για την ορθή χρήση του, καθώς και ορισμένα συμπληρωματικά στοιχεία.



Εικόνα 6.

Ένα από τα πιο σημαντικά παθητικά εξαρτήματα των ψηφιακών ηλεκτρονικών όταν ασχολούμαστε με IC είναι οι πυκνωτές αποσύνδεσης. Ο κύριος σκοπός τους είναι να φιλτράρουν την τροφοδοσία από σήματα υψηλής συχνότητας και να παρέχουν άμεση φόρτιση όταν το IC απαιτεί ελαφρώς μεγαλύτερη ισχύ. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται πολύ κοντά στις ακίδες τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου και η χωρητικότητά του επιλέγεται ώστε να παρέχουν αρκετή φόρτιση σε σύντομο χρονικό διάστημα, χωρίς να άγουν μεγάλες ποσότητες ρεύματος κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση. Μερικές από τις πιο κοινές τιμές χωρητικότητας που χρησιμοποιούνται ως στοιχεία αποσύνδεσης για εμπορικά IC είναι 100nF, 1uF και 4,7uf, καθώς και παράλληλοι συνδυασμοί αυτών.

Έχει τοποθετηθεί ένας πυκνωτής αποσύνδεσης 100nF σε κάθε ακροδέκτη τροφοδοσίας του μικροελεγκτή, καθώς και άλλοι συμπληρωματικοί πυκνωτές που χρειάζονται για τη σωστή χρήση του ολοκληρωμένου.

Η αναλογική τροφοδοσία φιλτράρεται περαιτέρω από το συνδυασμό ενός πυκνωτή 10nF και ενός φερρίτη που μειώνει τον θόρυβο υψηλής συχνότητας, παρέχοντας μια πιο καθαρή και σταθερή τάση τροφοδοσίας.

Όπως προτείνεται στο σχέδιο, ο ακροδέκτης επανεκκίνησης του μικροελεγκτή συνδέεται με έναν πυκνωτή 100nF και μια αντίσταση 100K, προκειμένου να αποφευχθούν τυχαίες επανεκκινήσεις που προκαλούνται από θόρυβο ή κυματισμό τροφοδοσίας. Επιπροσθέτως, τα παραπάνω παθητικά στοιχεία, εξασφαλίζουν ότι το κουμπί επανεκκίνησης, όταν πατηθεί, συνδέει την ακίδα του μικροελεγκτή με το GND παρέχοντας έναν ομαλό παλμό. Ο πυκνωτής, συνεισφέρει στο να απορροφηθούν οι μηχανικές ταλαντώσεις του διακόπτη ώστε να αποφευχθεί η επανεκκίνηση του MCU πολλαπλές φορές.

Η αντίσταση R6 (100k) υπάρχει για να ρυθμίζει τη λειτουργία εκκίνησης του μικροελεγκτή. Το ολοκληρωμένο προσφέρει τις επιλογές εκκίνησης (έναρξη εκτέλεσης εντολών) από την ενσωματωμένη μνήμη flash ή τον ενσωματωμένο bootloader που μπορεί κυρίως να εκτελέσει οδηγίες από το UART, το CAN ή το ethernet.

Με την αντίσταση R6 συνδέουμε την ακίδα στο GND, διασφαλίζοντας ότι κατά την εκκίνηση ο μικροελεγκτής θα ξεκινήσει να εκτελεί εντολές από τη μνήμη FLASH όπου αποθηκεύονται οι οδηγίες που έχουν προγραμματιστεί από το STM32Cube IDE.

Οι πυκνωτές C3 και C10 (2.2uf X7R) τοποθετούνται στις αποκλειστικές ακίδες VCAP σύμφωνα με το εγχειρίδιο του ολοκληρωμένου. Ο ρόλος τους είναι να αποσυνδέουν τον εσωτερικό ρυθμιστή τάσης του πυρήνα και να παρέχουν μια ομαλή τάση.

Ένας κρυσταλλικός κεραμικός ταλαντωτής 16 MHz συνδέεται με ένα ζεύγος καθορισμένων ακίδων του τσιπ (PH0, PH1) προκειμένου να παρέχει ένα ημιτονοειδές σήμα με σταθερή συχνότητα που χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του εσωτερικού ρολογιού του μικροελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο, η πηγή του ρολογιού που τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή, τους χρονοδιακόπτες και τα υπόλοιπα περιφερειακά προσαρμόζεται συνεχώς, επιτρέποντάς την μέτρηση και καταγραφή συμβάντων με μεγαλύτερη ακρίβεια χρόνου. Για τη σωστή χρήση του χρειάζονται δύο πυκνωτές φορτίου (μεταξύ κάθε ακίδας και GND) οι τιμές των οποίων υπολογίζονται με τον ακόλουθο τύπο:

$$C_{Load} = 2 * (C_L - C_{stray})$$

Όπου,

C_{Load} είναι η χωρητικότητα του κάθε πυκνωτή φορτίου,

C_L είναι η χωρητικότητα φορτίου του ταλαντωτή κεραμικών κρυστάλλων και

C_{stray} είναι η χωρητικότητα της άρθρωσης μεταξύ κρυστάλλου και PCB.

Εξετάζοντας το [φύλλο δεδομένων](#) του κρυστάλλου μπορούμε να δούμε ότι το C_L είναι 8pF.

Υποθέτοντας ότι το C_{stray} είναι μεταξύ 2 και 5 pF (τυπικές τιμές), συμπεραίνουμε ότι ένας τυπικός πυκνωτής 12pF είναι μια καλή επιλογή για κάθε πυκνωτή φορτίου. [1]

Τοποθετήθηκε ένα σετ πέντε μικρών LED που ελέγχονται από τον μικροελεγκτή για να παρέχουν μια οπτική ένδειξη της κατάστασης, διαφόρων συμβάντων και βλαβών. Για να λειτουργήσουν σωστά τα LED και να μην καταστραφούν, τοποθετήθηκε σε σειρά μια αντίσταση περιορισμού ρεύματος. Η τιμή κάθε αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας έναν απλό νόμο τάσης Kirchhoff στον βρόχο LED και μικροελεγκτή.

Έχουμε:

$$3.3V = I_{LED} * R + V_f$$

Όπου:

Η τροφοδοσία είναι 3.3V,

I_{LED} είναι το ρεύμα βρόχου,

R είναι η τιμή της αντίστασης σε Ohm, και

V_f είναι η πρόσθια τάση του LED που καθορίζεται στο φύλλο δεδομένων.

Κάθε διαφορετικό χρώμα LED έχει διαφορετική πρόσθια τάση. Στα 20 mA έχουμε συνήθως:

Πράσινο: 2.1 V

Κόκκινο: 2.0 V

Κίτρινο: 2.4 V

Πρέπει να αποφασίσουμε το ρεύμα που θέλουμε να περάσει από το LED. Δεδομένου ότι χρειαζόμαστε μόνο μια οπτική ένδειξη όταν κοιτάμε προσεκτικά το PCB, η ένταση του φωτός θα πρέπει να μειωθεί για να μειωθεί η κατανάλωση ρεύματος. Επιλέχθηκε μια τιμή από 1 έως 2 mA, η οποία στη συνέχεια μπορούσε να ρυθμιστεί αλλάζοντας την αντίσταση περιορισμού ρεύματος για να ρυθμίσει την επιθυμητή ένταση. Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να δούμε ότι μια καλή τιμή αντίστασης είναι το 1kOhm.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι κατά το σχεδιασμό ενός PCB, είναι πολύ χρήσιμο να γίνει προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν τα ίδια εξαρτήματα όπου είναι δυνατόν, όταν δεν χρειάζεται να τηρούνται αυστηροί κανόνες. Αυτή είναι μια από αυτές τις περιπτώσεις, όπου δεν έχουμε ακριβή προδιαγραφή έντασης για τα LED, αλλά θέλουμε απλώς να έχουμε ένα οπτικό σημάδι κατά την ανάπτυξη του υλικολογισμικού και όταν θέλουμε να υποδείξουμε σφάλματα ή/και συμβάντα. Κάνοντας τα παραπάνω, απλοποιούμε τον πίνακα υλικών (BOM), ο οποίος με τη σειρά του εξοικονομεί χρόνο κατά την αναζήτηση και προμήθεια νέων ανταλλακτικών καθώς και επιπλέον κόστος προσθήκης νέου εξαρτήματος στο BOM (η τιμή μονάδας ειδικά στα παθητικά εξαρτήματα είναι πολύ μικρή και η σχέση ποσότητας προς τιμή δεν είναι γραμμική).

Επομένως, η επιλογή της αντίστασης περιορισμού ρεύματος για όλα τα LED κατάστασης να είναι 1k είναι μια κίνηση προς τη σωστή κατεύθυνση.

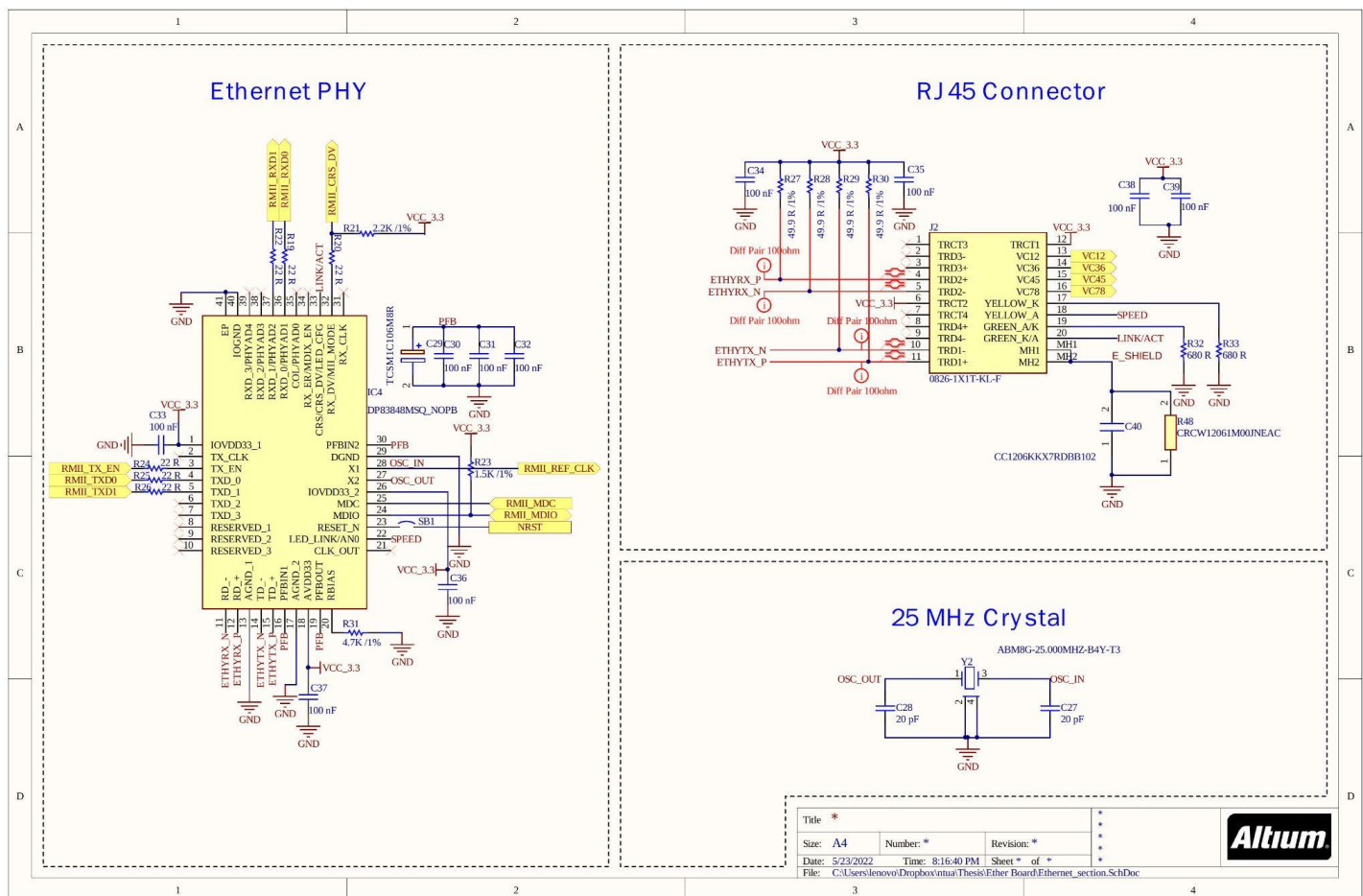
Εκτός από τα παθητικά και συμπληρωματικά στοιχεία, ένα άλλο είδος χαρακτηριστικού που φαίνεται στο σχέδιο είναι οι θύρες. Συνδέονται με τους ακροδέκτες του μικροελεγκτή και συνήθως ονοματίζονται ανάλογα με το σήμα με το οποίο συνδέονται. Οι θύρες επιτρέπουν σε αυτά τα σήματα να συνδέονται με άλλες θύρες σε διαφορετικά κυκλώματα, καθιστώντας έτσι τη διαδικασία σχεδιασμού πιο καθαρή και αρθρωτή. Η συνδεσιμότητα μεταξύ των κυκλωμάτων έχει ήδη εξηγηθεί στην παράγραφο 2.2.1 και φαίνεται στην Εικόνα 3.

Για αυτήν την περίπτωση, οι περισσότερες θύρες περιγράφουν συνδέσεις μεταξύ του MCU και των διαφόρων περιφερειακών, καθώς και με το ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού σφαλμάτων. Και τα δύο δίνονται σε διαφορετικά σχέδια.

2.2.4 Σχηματικό Ethernet

Μερικοί από τους λόγους για τους οποίους υπάρχουν ξεχωριστά σχέδια κυκλωμάτων, είναι η σπονδυλωτότητα, η οποία επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση ορισμένων εξαρτημάτων σε νέα σχέδια, η ποσότητα των πληροφοριών που λαμβάνει ένα άτομο όταν προσπαθεί να διορθώσει ή να κατανοήσει το σχέδιο καθώς και η προοπτική του ομαδικού σχεδιασμού που συμβαίνει στις περισσότερες βιομηχανίες.

Στην εικόνα 7 έχουμε το κύκλωμα Ethernet του σχεδίου. Περιλαμβάνει το PHY και τα συμπληρωματικά εξαρτήματά του, καθώς και τον σύνδεσμο RJ45. Ο λόγος που αυτός ο σύνδεσμος δεν συμπεριλήφθηκε στο σχέδιο των αποκλειστικών συνδέσεων είναι ότι η σύνδεση με το PHY έπρεπε να έχει ορισμένες συγκεκριμένες δυνατότητες για να λειτουργεί σωστά το Ethernet. [2]



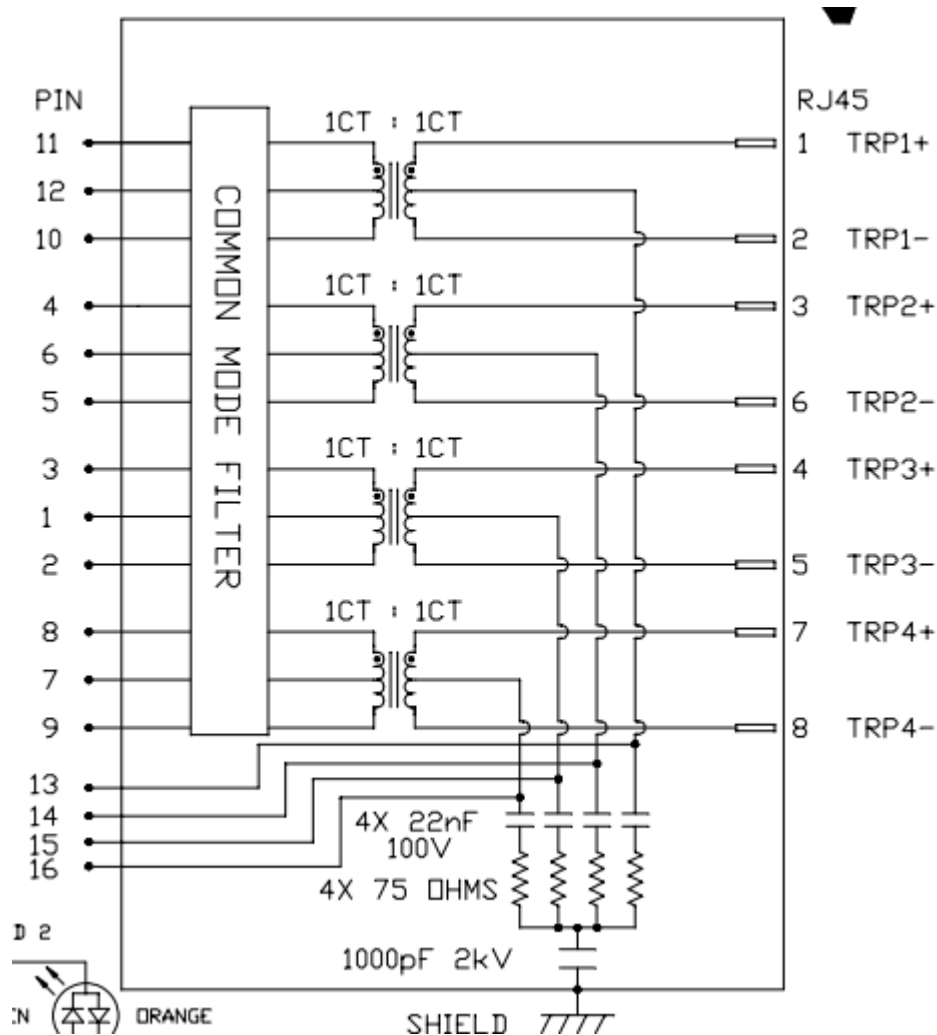
Εικόνα 7.

Οι θύρες που συνδέονται με το PHY δρομολογούνται στο RMI του μικροελεγκτή και στη συνέχεια συνδέονται εσωτερικά με το περιφερειακό MAC. Αυτό το σύνολο των 9 σημάτων είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ του μικροελεγκτή και του PHY. Ο τύπος των πληροφοριών που μεταφέρονται είναι: buffers μετάδοσης και λήψης, καταχωρητές κατάσταση και πιθανά σφάλματα διαύλου και πακέτων.

Για να λειτουργήσει σωστά το PHY και να είναι σε θέση να παράγει τα διαφορικά διαμορφωμένα σήματα ethernet με μέγιστο 100 Mbps ή 100BASE-T, όπως αποκαλείται συχνά, χρειάζεται ένα ρολόι 50 MHz. Αυτό φαίνεται στην κάτω δεξιά γωνία του σχεδίου, με τους κατάλληλους πυκνωτές φορτίου, των οποίων οι τιμές υπολογίζονται ακριβώς όπως αυτές που παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.2.3.

Για άλλη μια φορά μπορούμε να δούμε όλους τους πυκνωτές αποσύνδεσης που θα τοποθετηθούν αργότερα κοντά στο PHY, καθώς και ορισμένα συμπληρωματικά παθητικά εξαρτήματα που χρειάζονται και περιγράφονται στην ενότητα σχεδίασης αναφοράς του PHY του φύλλου δεδομένων. Για παράδειγμα, η R31 είναι μια αντίσταση 4,87k που τοποθετείται έξω από το PHY αλλά χρησιμεύει ως αντίσταση πόλωσης για τον εσωτερικό ρυθμιστή τάσης.

Η υποδοχή ethernet, γνωστή και ως RJ45, είναι υπεύθυνη για τη συνδεσιμότητα του PHY με τον έξω κόσμο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει συμβάντα ESD ενώ ταυτόχρονα να απομονώνει το σύστημα από άλλους ανεπιθύμητους ηλεκτρικούς κινδύνους. Για το λόγο αυτό, ο σύνδεσμος ενσωματώνει ένα σετ μετασχηματιστών αναλογίας ένα προς ένα που απομονώνουν τα διαφορικά σήματα ethernet χωρίς να τα παραμορφώνουν. Αυτοί οι μετασχηματιστές είναι επίσης υπεύθυνοι για το διαχωρισμό των σημάτων δεδομένων υψηλής συχνότητας από τα πολωμένα σήματα DC υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται για το PoE.



Εικόνα 8.

Τα καλώδια δικτύου, όπως τα Cat5e και Cat6, περιλαμβάνουν οκτώ καλώδια διατεταγμένα ως τέσσερα συνεστραμμένα ζεύγη. Στο Ethernet 10 και 100BASE-T, δύο από αυτά τα ζεύγη χρησιμοποιούνται για την αποστολή πληροφοριών (ζεύγη 1-2 και 3-6) και αυτά είναι γνωστά ως ζεύγη δεδομένων. Τα άλλα δύο ζεύγη (4-5, 7-8) είναι αχρησιμοποίητα και αναφέρονται ως εφεδρικά ζεύγη (το Gigabit Ethernet χρησιμοποιεί και τα τέσσερα ζεύγη). [3]

Επειδή τα ηλεκτρικά ρεύματα ρέουν σε έναν βρόχο, απαιτούνται δύο αγωγοί για την παροχή ισχύος σε ένα καλώδιο. Το PoE αντιμετωπίζει κάθε ζεύγος ως έναν μόνο αγωγό και μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε τα δύο ζεύγη δεδομένων είτε τα δύο εφεδρικά ζεύγη για τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος.

Η τροφοδοσία μέσω Ethernet εγχέεται στο καλώδιο με τάση μεταξύ 44 και 57 βολτ DC. Αυτή η σχετικά υψηλή τάση επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά ισχύος κατά μήκος του καλωδίου, ενώ εξακολουθεί να είναι αρκετά χαμηλή ώστε να θεωρείται ασφαλής.

Στην Εικόνα 8 φαίνονται τα εσωτερικά ενός τέτοιου βύσματος ικανού να μεταφέρει τα δεδομένα ethernet, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χειριστεί τις τάσεις με πόλωση DC που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ισχύος. Αυτό το εσωτερικό κύκλωμα αναφέρεται συχνά ως Μαγνητικό. [4]

Το πιο ενδιαφέρον μέρος της σχηματικής ενότητας Ethernet, ωστόσο, είναι η περιγραφή των γραμμών ethernet από το PHY στον σύνδεσμο RJ45. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι γραμμές ethernet είναι διαφορικές και επομένως πρέπει να έχουν ελεγχόμενη σύνθετη αντίσταση 100 Ohm μεταξύ κάθε τερματικού σημείου στην πλακέτα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ζεύγος (TX και RX) πρέπει να έχει τους δύο αγωγούς του προσεκτικά διαμορφωμένους και σε τέτοια απόσταση μεταξύ τους, προκειμένου να επιτευχθεί η ακριβής σύνθετη αντίσταση ενώ βρίσκεται στην περιοχή MHz.

Το Altium προσφέρει τη δυνατότητα επισήμανσης ορισμένων σχεδίων ως διαφορικών (και με συγκεκριμένη αντίσταση) και δημιουργίας μιας κατηγορίας δικτύων που θα φέρουν αυτά τα χαρακτηριστικά αργότερα στη διαδικασία σχεδιασμού. Αυτό ακριβώς δείχνουν αυτές οι κόκκινες γραμμές μεταφοράς. Προσθέτοντας τα χαρακτηριστικά των διαφορικών γραμμών και της ελεγχόμενης σύνθετης αντίστασης, η Altium προσθέτει αυτά τα δίκτυα στην προαναφερθείσα κατηγορία, διασφαλίζοντας ότι θα τηρούνται αυτά τα χαρακτηριστικά.

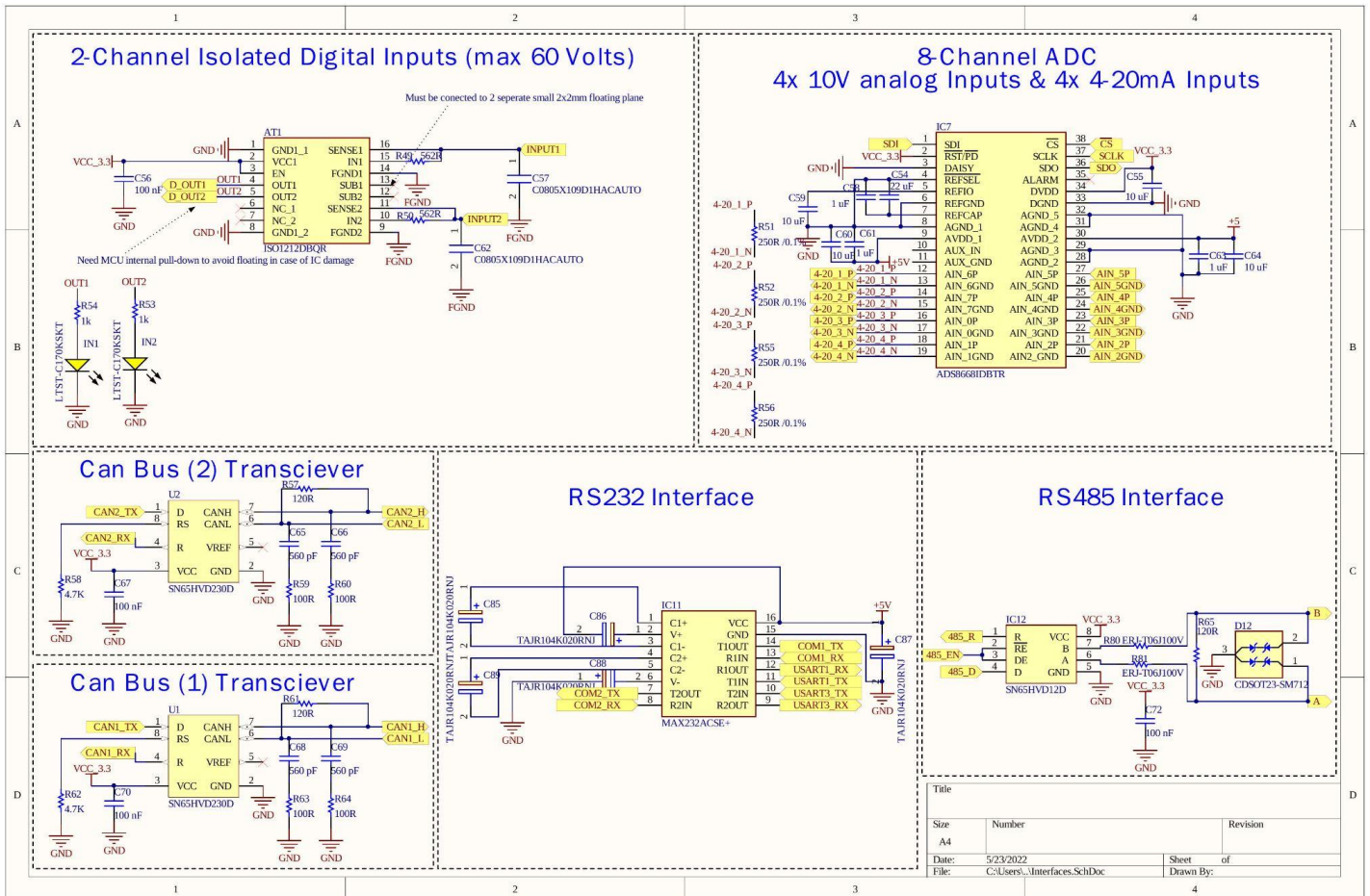
2.2.5 Σχηματικό Διεπαφών

Στην Εικόνα 9 μπορούμε να δούμε τα διάφορα περιφερειακά που θα χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της τάσης των αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, το απομονωμένο ψηφιακό τσιπ εισόδου βρίσκεται στην πάνω αριστερή γωνία και το εξωτερικό ADC στην πάνω δεξιά γωνία. Κάτω από αυτά μπορούμε να δούμε τους 2 πομποδέκτες CAN καθώς και τις διεπαφές RS232 και RS485.

Για τα περισσότερα περιφερειακά, κρίσιμες πληροφορίες περιλαμβάνονται στο φύλλο δεδομένων. Συμπληρωματικά εξαρτήματα, πυκνωτές αποσύνδεσης και συχνά μια προτεινόμενη χωρική διάταξη παρέχονται από τον κατασκευαστή. Στην περίπτωση των προαναφερθέντων, η τήρηση των συστάσεων του κατασκευαστή είναι τις περισσότερες φορές η καλύτερη απόφαση για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργικότητας του ολοκληρωμένου.

Σε αυτό το σχέδιο, μπορούμε να δούμε τις θύρες ζευγαρώματος αυτών που υπάρχουν στον μικροελεγκτή και στα σχέδια των βυσμάτων, που περιγράφουν τη συνδεσιμότητα μεταξύ του μικροελεγκτή και των περιφερειακών, καθώς και την αντιστοίχιση των διεπαφών με τους διάφορους συνδέσμους.

Όλα τα αναλώσιμα IC είναι σωστά αποσυνδεδεμένα με έναν κεραμικό πυκνωτή 100nf και όπου χρειάζεται (όπως στην περίπτωση του RS232) τοποθετούνται ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων. Στην περίπτωση του RS485, έχει ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για την προστασία από ηλεκτρικούς κινδύνους, τοποθετώντας ένα IC προστασίας ESD στην πλευρά εισόδου.



Εικόνα 9.

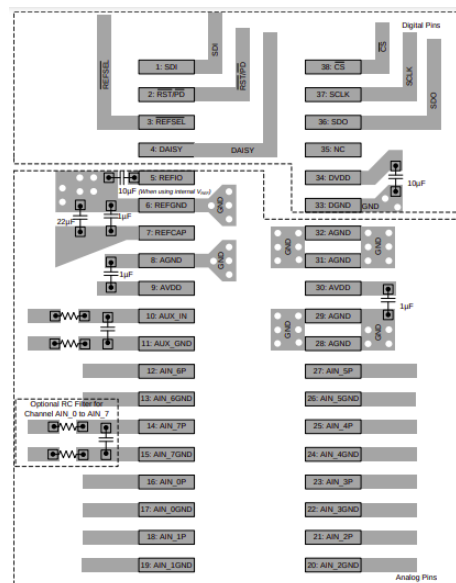
Οι δύο πομποδέκτες CAN συνδέονται με τα εσωτερικά περιφερειακά του μικροελεγκτή με τη βοήθεια αποκλειστικών γραμμών TX και RX. Αυτές οι γραμμές μεταφέρουν πληροφορίες μετάδοσης και λήψης από το κανάλι CAN μέσα στα περιφερειακά όπου λαμβάνει χώρα η υλοποίηση του πρωτοκόλλου. Ο έλεγχος, το φιλτράρισμα μηνυμάτων, η ανίχνευση κεφαλίδων και το CRC εκτελούνται από αποκλειστικό HW που επικοινωνεί εσωτερικά με τον πυρήνα του μικροελεγκτή. Τέλος, τα γραμματοκιβώτια TX και RX που είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή διαχειρίζονται τα bytes που λαμβάνονται και μεταδίδονται.

Κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης, ένα σήμα διαδίδεται μέσω των αγωγών και φτάνει σε όλες τις συσκευές που είναι τοποθετημένες σε στελέχη (αγωγοί που διακλαδίζονται από την κύρια γραμμή), αλλά φτάνει και στο τέλος των γραμμών διαύλου. Εάν τα άκρα δεν τερματιστούν, το σήμα μπορεί να αντανακλάται και να παρεμποδίσει το επόμενο σήμα δεδομένων που κατεβαίνει στη γραμμή. Δεδομένου ότι το CAN είναι ένας δίαυλος δεδομένων υψηλής ταχύτητας, αυτές οι συνεχείς συγκρούσεις θα ήταν καταστροφικές. Για το λόγο αυτό, τοποθετούνται δύο αντιστάσεις 120 ohm στα απομακρυσμένα άκρα του κύριου αγωγού διαύλου σύμφωνα με το πρότυπο [5], προκειμένου να ταιριάζουν με την αντίσταση των (συχνά) μακρινών καλωδίων.

Όμοια, έχουν τοποθετηθεί αντιστάσεις τερματισμού στο PCB και για τους δύο πομποδέκτες CAN, ώστε να επιτρέπουν στο σύστημα να λειτουργεί ως τερματικός κόμβος, σε δίαυλο 2 συσκευών, κάτι που είναι αρκετά κοινό σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς επιτρέπει την επικοινωνία υψηλής ταχύτητας έως και 40 μέτρα.

Τα περιφερειακά RS232 και RS485 συνδέονται με τα γενικά εσωτερικά περιφερειακά UART των MCU, επιτρέποντας τη δυνατότητα ρύθμισης του ρυθμού μετάδοσης των χαρακτήρων και της υλοποίησης πρωτοκόλλου.

Το εξωτερικό ADC έχει αρκετούς πυκνωτές συνδεδεμένους στις αναλογικές και ψηφιακές ακίδες τροφοδοσίας, όπως προτείνει το φύλλο δεδομένων. Στην Εικόνα 10 φαίνεται η συνιστώμενη διάταξη του ADS8668, καθώς και οι κατάλληλες τιμές πυκνωτών και η τοποθέτησή στην πλακέτα.

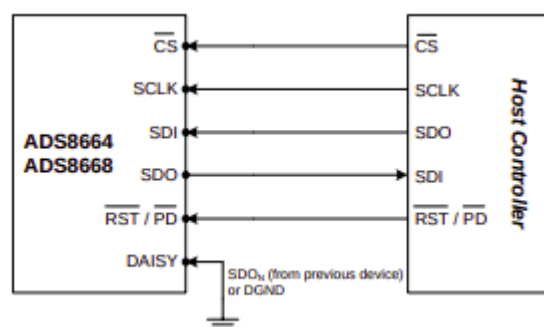


Εικόνα 10.

Η επικοινωνία του εξωτερικού ADC και του μικροελεγκτή γίνεται μέσω του καναλιού SPI. Ο μικροελεγκτής είναι ο κύριος (master) του καναλιού, το οποίο αφήνει το ADS8668 ως σκλάβο (slave). Ουσιαστικά, ο μικροελεγκτής στέλνει εντολές μέσω του SPI και το ADC ανταποκρίνεται. Σε αυτή την επικοινωνία συμμετέχουν 4 καλώδια και μια σύνδεση GND. Δεδομένου ότι το SPI μπορεί να έχει μία κύρια αλλά πολλές εξαρτημένες συσκευές, ένα σήμα επιλογής chip (CS) είναι αφιερωμένο έτσι ώστε η κύρια συσκευή να μπορεί να ενεργοποιεί μία συσκευή τη φορά, χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών συνδέσεων. Η κεντρική μονάδα είναι υπεύθυνη για το συγχρονισμό της ροής των δεδομένων σε συγκεκριμένη συχνότητα παράγοντας ένα σήμα που ονομάζεται SCLK (σειριακό ρολόι).

Τέλος, τα δεδομένα επικοινωνίας μεταφέρονται μέσω δύο σημάτων που ονομάζονται MISO (master in slave out) και MOSI (master out slave in). Ο λόγος που το SPI έχει 2 γραμμές δεδομένων είναι για να επιτρέπει μια πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία (όπως το ethernet). Αυτό σημαίνει ότι το master και το slave μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας το SCLK ως χρονική αναφορά για το πότε θα μεταδοθεί ή πότε θα ληφθεί ένα bit. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, το SPI είναι μία από τις πιο κοινές μεθόδους επικοινωνίας μεταξύ IC, επειδή επιτρέπει γρήγορες ταχύτητες μεταφοράς με μόλις 4 καλώδια και μπορεί εύκολα να επεκταθεί με τη χρήση ενός επιπλέον σήματος ανά συσκευή.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα καλωδίωσης του ADS8668 με τον μικροελεγκτή.

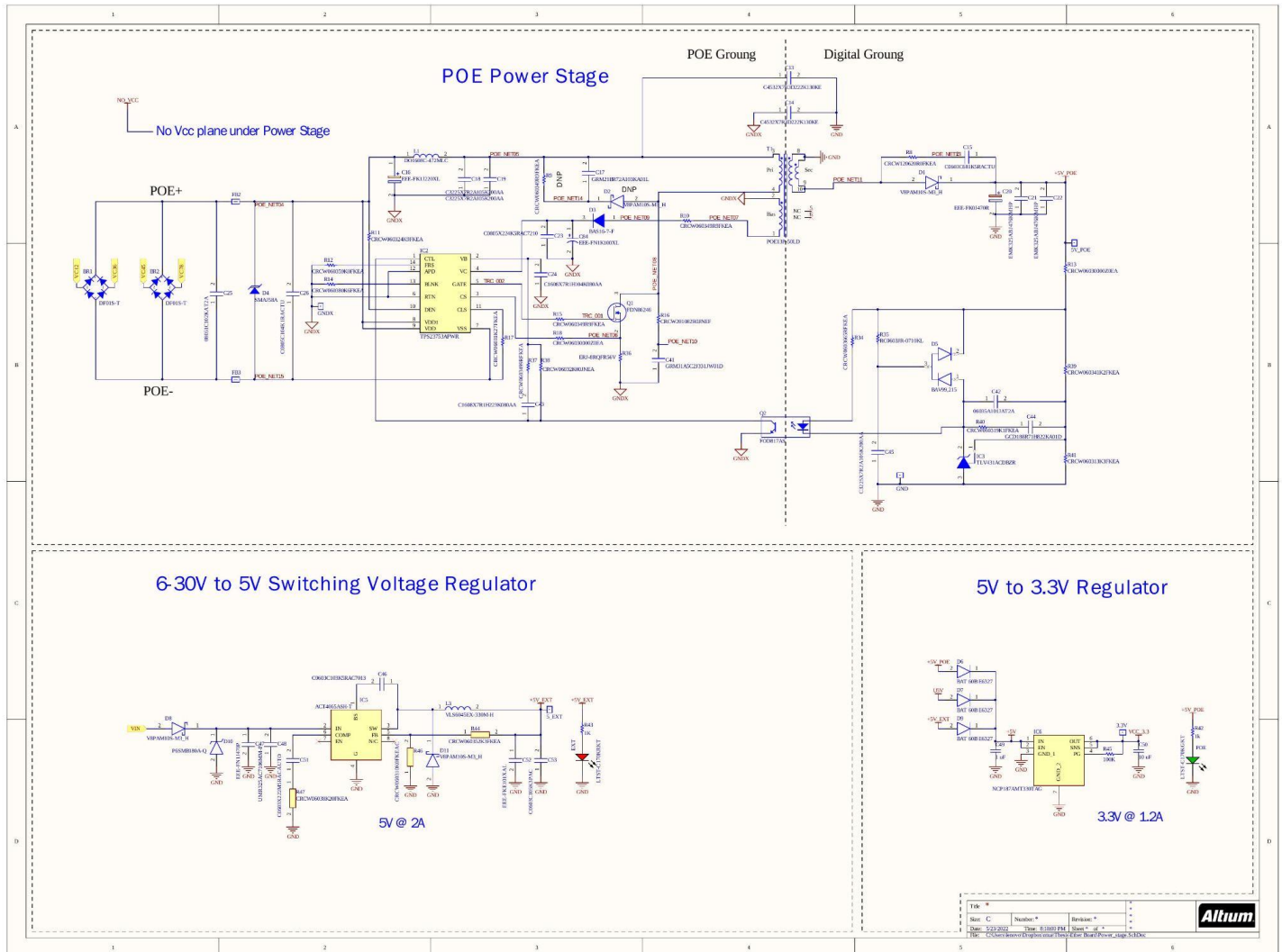


Εικόνα 11.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα μέρη αυτού του σχεδίου, είναι το μέρος όπου μετράμε τα σήματα 4-20mA. Παραδοσιακά, θα μπορούσε κανείς να βρει έναν αποκλειστικό πομποδέκτη 4-20mA στην αγορά και απλώς να συνδέσει τον βρόχο ρεύματος απευθείας στις εισόδους του. Ωστόσο, υπάρχει μια απλή και οικονομικά αποδοτική λύση που μας επιτρέπει να επιτύχουμε το ίδιο, διατηρώντας ταυτόχρονα το μεγαλύτερο μέρος της ακρίβειας που απαιτείται για αυτού του είδους τις μετρήσεις.

Η ιδέα [6] είναι να τοποθετηθεί μια εξωτερική αντίσταση, μέσω της οποίας θα ρέει το ρεύμα του βρόχου 4-20mA. Η σύνδεση των άκρων της αντίστασης σε μια είσοδο του ADC θα έχει ως αποτέλεσμα την άμεση μέτρηση της πτώσης τάσης στην αντίσταση. Για να επιτευχθεί μια αρκετά ακριβής μέτρηση, χρησιμοποιείται μια αντίσταση ακριβείας, η οποία διασφαλίζει ότι η σχέση μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής αντίστασης είναι όσο το δυνατόν πιο στενή, ελαχιστοποιώντας έτσι το σφάλμα μετατροπής. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο, δεν χρειαζόμαστε επιπλέον IC για τη μέτρηση των συμβατών αισθητήρων 4-20mA, αλλά με λίγες αντιστάσεις ακριβείας και το εξωτερικό ADC που είναι ήδη τοποθετημένο στην πλακέτα, επιτυγχάνουμε μια αρκετά ακριβή μέτρηση. Αυτό είναι ένα ακόμη βήμα για περαιτέρω μείωση του κόστους στον πίνακα των υλικών (BOM).

2.2.6 Σχηματικό Τροφοδοσίας



Εικόνα 12.

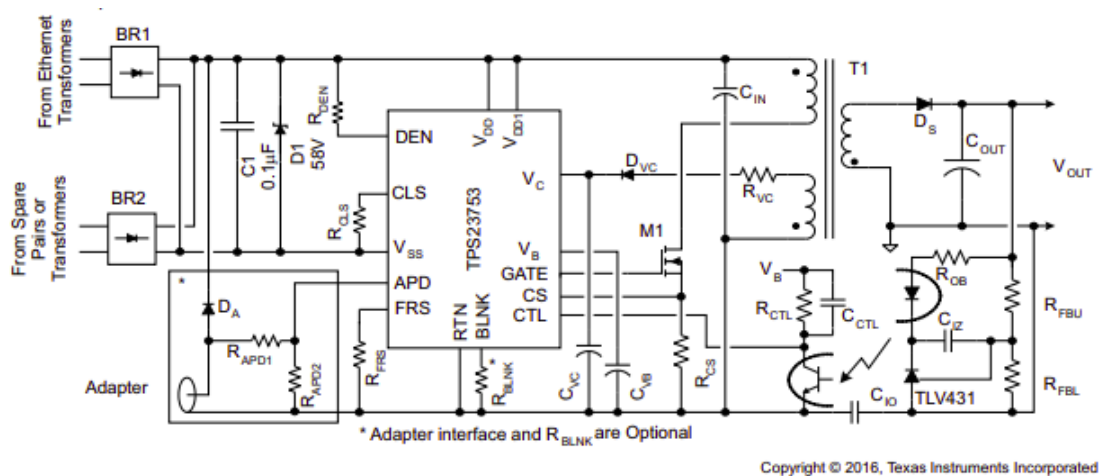
Στην εικόνα 12 φαίνεται το σχέδιο τροφοδοσίας του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.2, το σύστημα περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές μεθόδους τροφοδοσίας της πλακέτας, με κυριότερη τη θύρα PoE. Από το σχέδιο του τμήματος Ethernet, είδαμε ότι τα μαγνητικά στοιχεία της διεπαφής RJ45 είναι υπεύθυνα για το διαχωρισμό των δεδομένων υψηλής συχνότητας και των σημάτων με πόλωση DC, παρέχοντας περίπου 48V μεταξύ 2 από τα 4 ζεύγη. Αυτά τα 48V ωστόσο δεν είναι αμιγώς DC, καθώς περιέχουν παραμόρφωση από τις γραμμές μεταφοράς του ethernet.

Ο στόχος είναι η απόκτηση τροφοδοσίας 5V, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία των διαφόρων ολοκληρωμένων και εξαρτημάτων. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε ένας αποκλειστικός μετατροπέας PoE DC-DC, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της μετατροπής, διατηρώντας παράλληλα την πλήρη απομόνωση μεταξύ του συστήματος και του έξω κόσμου. Το [TPS23753A](#) είναι ένας ελεγκτής διεπαφής και μετατροπέα PoE IEEE 802.3 με ενισχυμένη προστασία ESD που υποστηρίζει έναν αριθμό επιλογών ORing τάσης εισόδου, όπως η υψηλότερη τάση, η προτίμηση εξωτερικού προσαρμογέα και η προτίμηση PoE.

Το σχέδιο και η σχεδίαση του HW του σταδίου DC-DC PoE επηρεάστηκαν σε μεγάλο βαθμό από το [TIMD-TM4C129POE](#), το οποίο είναι ένα σχέδιο αναφοράς ανοιχτού υλικού γύρω από τον μικροελεγκτή TM4C129 NCPDT με δυνατότητα PoE της Texas Instruments.

Ως πρώτο βήμα, τα 4 σήματα υψηλής ισχύος περνούν μέσα από δύο ανορθωτές πλήρους γέφυρας, εξαλείφοντας όλες τις AC συνιστώσες. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το πρώτο στάδιο του πυκνωτή εξομάλυνσης για να διασφαλιστούν οι ελάχιστοι κυματισμοί τάσης σε συνδυασμό με δύο φερρίτες και μια δίοδο Zener που χρησιμοποιείται για την αποφυγή υπερτάσεων. Επίσης χρησιμοποιείται ένας άλλος πυκνωτής εξομάλυνσης και, στη συνέχεια, η εξομαλυσμένη τάση συνεχούς ρεύματος εισέρχεται στο TPS23753A.

Ακολουθώντας τις βασικές οδηγίες υλοποίησης του φύλλου δεδομένων που φαίνονται στην Εικόνα 13, μπορούμε να δούμε έναν αριθμό παθητικών στοιχείων, διόδων, στοιχείων μεταγωγής και συμπληρωματικών στοιχείων.



Basic TPS23753A Implementation

Εικόνα 13.

Δεδομένου ότι το κύκλωμα είναι πολύ κοντά σε αυτό ενός κανονικού μετατροπέα DC-DC, δεν θα εξηγήσουμε λεπτομερώς τη θεωρία λειτουργίας, καθώς αυτό θα ήταν εκτός του αντικειμένου αυτής της εργασίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία, θα τονίσουμε τον σκοπό και τη λειτουργία τους.

Η υψηλότερη πλάτος DC τάση εισέρχεται στο IC, το οποίο υπολογίζει τον σωστό κύκλο λειτουργίας PWM που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη του στοιχείου μεταγωγής (στην περίπτωση αυτή ενός MOSFET). Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι ανάγκες τροφοδοσίας, οι πτώσεις τάσης και τα συμβάντα βραχυκυκλώματος, ο μετατροπέας, λαμβάνει πάντα ανατροφοδότηση από την έξοδο για να προσαρμόσει τον κύκλο λειτουργίας του παλμικού σήματος.

Η διαφορά σε σχέση με έναν κανονικό μετατροπέα DC-DC είναι ότι σε αυτόν τον σχεδιασμό, παρέχεται απομόνωση μεταξύ της υψηλότερης τάσης και των 5V με τη χρήση μετασχηματιστή. Μπορεί να φανεί τόσο στη βασική υλοποίηση όσο και στη σχηματική. Επιπλέον, η ανάδραση δεν συνδέεται απευθείας με τον μετατροπέα, αλλά μέσω ενός its cathode pin, that is then connected to the cathode side of the feedback optocoupler. This is

οπτικού συζεύκτη, εξασφαλίζοντας πλήρη απομόνωση και προστασία από ηλεκτρικούς κινδύνους.

Ένα άλλο ενδιαφέρον στοιχείο είναι ο προσαρμοζόμενος ρυθμιστής διακλάδωσης ακριβείας (TLV431) που υπάρχει στο υπο-κύκλωμα ανάδρασης του μετατροπέα. Ο κύριος σκοπός του είναι να δημιουργήσει μια σταθερή τάση στην ακίδα της καθόδου, η οποία στη συνέχεια συνδέεται με την πλευρά της καθόδου του οπτικού συζεύκτη ανάδρασης. Αυτό επιτυγχάνεται από τις δύο αντιστάσεις R39 (41,2k) και R41 (13,3k) που σχηματίζουν έναν διαιρέτη τάσης της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου του DC-DC και της εξόδου του διαιρέτη τάσης είναι:

$$V_{divider} = \frac{R41}{R41 + R39} * V_{DCDC}$$

Το οποίο δίνει ως έξοδο το $V_{divider} = 0.244036697 * V_{DCDC}$

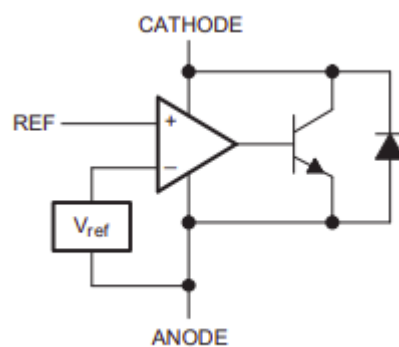
Δεδομένου ότι η αναμενόμενη έξοδος του DC-DC είναι κοντά στα 5V και η εσωτερική τάση V_{ref} του TLV431 έχει ρυθμιστεί στα 1,24V, μπορούμε να δούμε ότι οι ελάχιστες διακυμάνσεις πάνω από την τάση που έχει οριστεί από το δίκτυο αντιστάσεων, θα επηρεάσουν τη συμπεριφορά του εξαρτήματος. Αναλυτικά, η τάση καθόδου θα είναι:

Ίση με V_{DCDC} όταν:

$$V_{DCDC} * 0.244036697 < 1.24V$$

Και 0V όταν $V_{DCDC} * 0.244036697 \geq 1.24V$

Όταν η τάση εξόδου του DC-DC υπερβαίνει τα 5,081203013V, η κάθοδος του TLV431 και επίσης η κάθοδος του οπτικού συζεύκτη θα είναι 0V. Αυτό σημαίνει ότι ο οπτικός συζευκτήρας θα τραβήξει ρεύμα και έτσι θα ενεργοποιήσει την ακίδα ανάδρασης στο DC-DC, υποδεικνύοντας ότι η τάση στην έξοδο έχει φτάσει στο ανώτερο καθορισμένο όριο. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η τάση εξόδου του DC-DC πέσει κάτω από τα 5,08V. Σε αυτήν την περίπτωση, η κάθοδος τόσο του TLV431 όσο και του οπτικού συζεύκτη παραμένουν ψηλά στο V_{DCDC} , με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται στον οπτικό συζευκτήρα να τραβήξει ρεύμα.



Εικόνα 14.

Στο σχηματικό διάγραμμα της Εικόνας 14 βλέπουμε ότι το λειτουργεί ως ρυθμιζόμενος συγκριτής, δημιουργώντας έναν παλμό που είναι υψηλός όταν η τάση είναι πάνω από το επιθυμητό όριο και χαμηλός όταν είναι κάτω από το επιθυμητό όριο. Αυτό το εξάρτημα είναι η κύρια πηγή ανάδρασης του DC-DC, διασφαλίζοντας ότι η τάση εξόδου είναι σταθερή ανεξάρτητα από τις ατέλειες των αντιστάσεων ή τις αλλαγές θερμοκρασίας, καθώς διαθέτει μια πολύ μικρή απόκλιση θερμοκρασίας, καθιστώντας το TLV431 το τέλειο εξάρτημα για βρόχο ανάδρασης του μετατροπέα DC-DC.

Εκτός από την τροφοδοσία μέσω PoE, στη σχεδίαση, τοποθετήθηκε και ένας ξεχωριστός μετατροπέας DC-DC, προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα στο σύστημα να λειτουργεί με κανονική συνδεσιμότητα ethernet (χωρίς PoE) και η πλακέτα να τροφοδοτείται από εξωτερικό τροφοδοτικό. Το εξάρτημα επιλέχθηκε προσεκτικά αφού ελήφθησαν υπόψη το φυσικό μέγεθος, η τιμή και το εύρος της τάσης εισόδου. Δεδομένου ότι το σύστημα αφορά βιομηχανικά περιβάλλοντα, στα οποία υπάρχουν πολλές και διαφορετικές τάσεις, το εύρος των 6-30V καλύπτει τα περισσότερα από αυτά με τα 12V και 24V να είναι τα πιο κοινά. Όσον αφορά το ρεύμα εξόδου, ο μετατροπέας μπορεί να δώσει έξοδο έως και 2A στα 5V, κάτι που είναι υπεραρκετό λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του συστήματος. Η τοπολογία των συμπληρωματικών στοιχείων είναι το πρότυπο που έχει κάθε μετατροπέας DC-DC γενικής χρήσης. Οι 2 δίοδοι στην πλευρά εισόδου χρησιμεύουν ως προστασία ανάστροφης πολικότητας και υπέρτασης (voltage clamping), ενώ οι πυκνωτές εισόδου εξασφαλίζουν ομαλή τάση εισόδου στον μετατροπέα. Η έξοδος τροφοδοτείται μέσω ενός επαγωγέα 330uH για να εξαλειφθεί ο κυματισμός της τάσης και να δημιουργηθεί μια σταθερή τάση εξόδου σε συνδυασμό με τη δίοδο εξόδου που χρησιμεύει ως μηχανισμός περιορισμού της υπέρβασης της ονομαστικής στάθμης της τάσης εξόδου. Τέλος, οι πυκνωτές εξόδου χρησιμεύουν ως στοιχεία φιλτραρίσματος για την εξάλειψη όσο το δυνατόν περισσότερων στοιχείων υψηλής συχνότητας που προκαλούνται στην τάση εξόδου από το στοιχείο μεταγωγής. Ταυτόχρονα, παρέχουν άμεση φόρτιση σε περίπτωση υψηλότερης ζήτησης ρεύματος που προκαλεί πτώση τάσης.

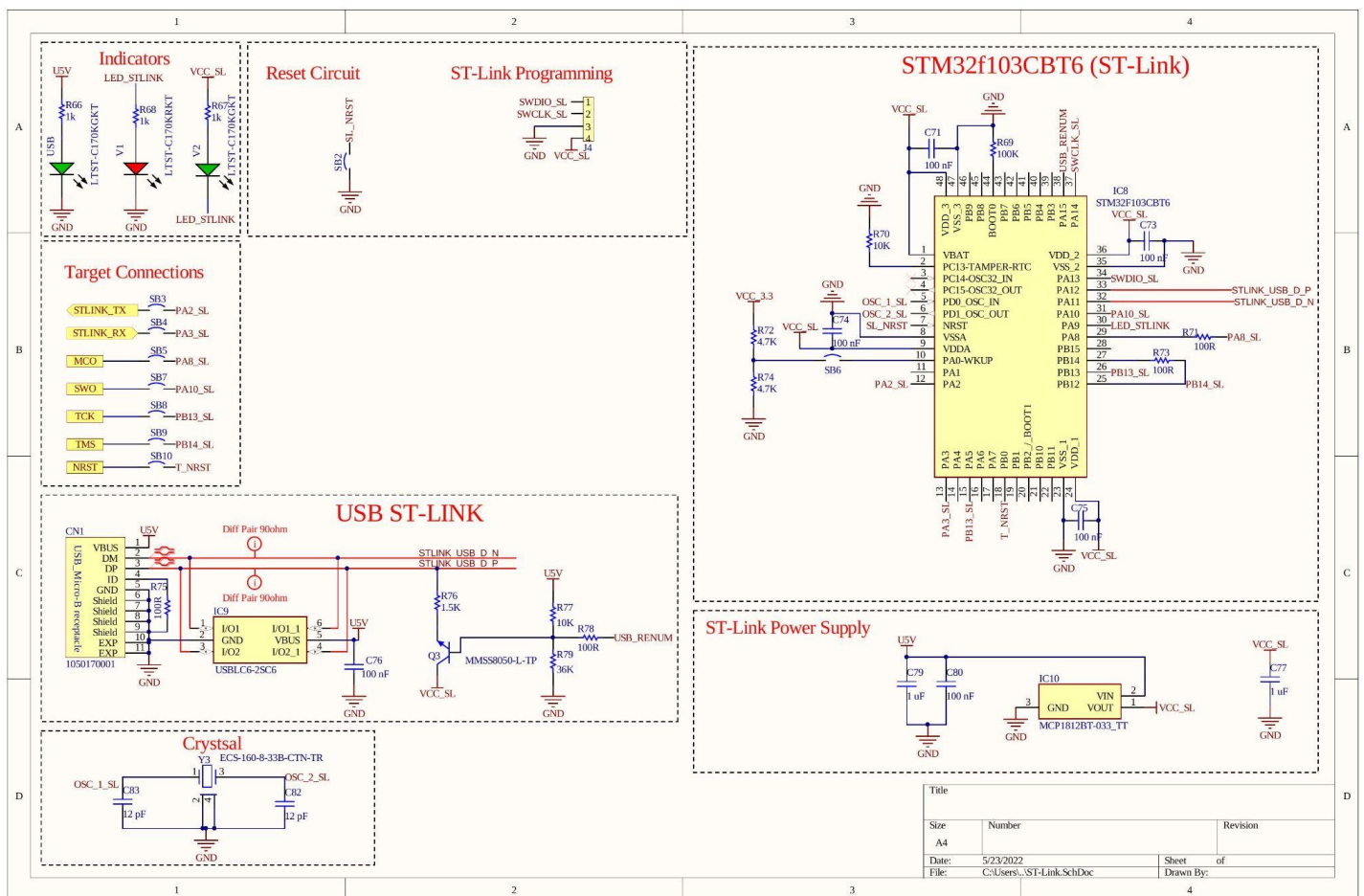
Επίσης, δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα ολοκληρωμένα χρειάζονται τροφοδοσία 3,3V που να είναι πολύ σταθερή και με ελάχιστη διακύμανση τάσης, τοποθετήθηκε ένας επιπλέον LDO ρυθμιστής τάσης στη σχεδίαση για να διασφαλιστεί ότι πληρούνται αυτές οι απαιτήσεις και ότι όλα τα εξαρτήματα του συστήματος τροφοδοτούνται σταθερά με 3,3V και όχι από την θορυβώδη έξοδο ενός μετατροπέα DC-DC. Η είσοδος του LDO συνδέεται και με τις 3 διαφορετικές πηγές 5V του συστήματος με τη βοήθεια διόδων που εμποδίζουν το ρεύμα να ρέει από μια πηγή τάσης 5V στην άλλη, λειτουργώντας σαν πύλη 3 κατευθύνσεων OR. Με αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο από τις πηγές 5V στην είσοδο του LDO, διασφαλίζοντας ότι ανεξάρτητα από την πηγή τροφοδοσίας του συστήματος, ο ρυθμιστής 3,3V θα τροφοδοτείται πάντα σωστά. Στο σχέδιο, φαίνονται οι πυκνωτές εξομάλυνσης συνδεδεμένοι στην είσοδο και την έξοδο του LDO, διασφαλίζοντας ότι ο θόρυβος υψηλής συχνότητας φιλτράρεται και η παροχή είναι καθαρή και σταθερή.

2.2.7 Σχηματικό ST-Link

Στην εικόνα 15 έχουμε το σχέδιο ST-Link του ενσωματωμένου debugger. Στην ουσία πρόκειται για ένα άλλο μικροελεγκτή (STM32F103CBT6) που είναι φορτωμένος με ειδικό firmware, ικανό να διασυνδέεται με τη διεπαφή SWD (Serial Wire Debug) του κυρίως μικροελεγκτή. Επιτρέπει στο STM32Cube IDE να εκτελέσει το επιθυμητό πρόγραμμα στο κύριο MCU (ή MCU-στόχος) με λειτουργία πλήρους εντοπισμού σφαλμάτων, δίνοντας επιλογές για εκτέλεση βημάτων, ρύθμιση σημείου διακοπής, επιθεώρηση σε βάθος μνήμης

και πολλές άλλες δυνατότητες. Επιπλέον, δημιουργεί μια θύρα Virtual COM μέσω της οποίας το MCU-στόχος μπορεί να περάσει συμβολοσειρές στον κεντρικό υπολογιστή χρησιμοποιώντας ένα από τα περιφερειακά UART του στόχου. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να εκτυπώσουμε μηνύματα κατάστασης στον κεντρικό υπολογιστή και να τα διαβάσουμε χρησιμοποιώντας ένα κοινό πρόγραμμα σειριακού τερματικού (όπως το Putty), το οποίο κάνει τη φάση ανάπτυξης του FW πολύ πιο γρήγορη.

Προκειμένου το ST-Link MCU να μπορεί να διασυνδέεται με τον κεντρικό υπολογιστή, τοποθετείται στη σχεδίαση μια ειδική υποδοχή micro USB. Συνδέεται απευθείας με τις ακίδες του MCU που δρομολογούνται εσωτερικά στην περιφερειακή USB 2.0 του ολοκληρωμένου. Σύμφωνα με το πρότυπο USB, η θετική και η αρνητική γραμμή πρέπει να έχουν ειδική αντίσταση 90 Ohm και αντίστοιχο μήκος, επομένως τοποθετήθηκαν τα κατάλληλα χαρακτηριστικά Altium. Στη θετική γραμμή του USB συνδέεται επίσης ένα τρανζίστορ NPN του οποίου η βάση ελέγχεται από τον μικροελεγκτή ST-Link. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιείται από το ειδικό FW για να ξεκινήσει η φάση ανίχνευσης του πρωτοκόλλου USB και να αναγνωριστεί από τον κεντρικό υπολογιστή. Εκτός από αυτό, ένα αποκλειστικό σιπ προστασίας ESD τοποθετείται κοντά στην υποδοχή micro USB για να βεβαιωθούμε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος στατικού ηλεκτρισμού από άτομα που αγγίζουν την υποδοχή ενώ η σύνδεση/αποσύνδεση μπορεί να βλάψει το υπόλοιπο σύστημα.



Εικόνα 15.

Ακριβώς όπως το MCU-στόχος που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.3, οι πυκνωτές αποσύνδεσης τοποθετούνται κοντά σε κάθε έναν από τους ακροδέκτες τροφοδοσίας, εξασφαλίζοντας σταθερότητα με ελάχιστη τάση θορύβου. Για άλλη μια φορά, ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής τοποθετείται και συνδέεται με τον μικροελεγκτή μαζί με τους πυκνωτές φορτίου του, για να συγχρονίσει τις εσωτερικές δομές ρολογιού του τσιπ.

Και πάλι, τοποθετούνται λυχνίες κατάστασης LED για να υποδεικνύουν τις διάφορες λειτουργίες του προγράμματος εντοπισμού σφαλμάτων και να ειδοποιούν τον χρήστη/προγραμματιστή για την κατάσταση του ST-Link.

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή είναι ότι τα σήματα που συνδέουν τον μικροελεγκτή ST-Link και τον κυρίως μικροελεγκτή διακόπτονται από αντιστάσεις 0 Ohm (πρακτικά βραχυκύκλωμα). Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται συχνά όταν θέλουμε να απομονώσουμε τα δύο άκρα ενός σήματος, χωρίς να χρειάζεται να παρεμβαίνουμε πολύ στο PCB ή να τοποθετούμε ογκώδεις διακόπτες ή ακροδέκτες (άλλες τεχνικές για την επίτευξη του ίδιου στόχου). Με αυτόν τον τρόπο, εάν έχουμε κάποιο πρόβλημα, ή θέλουμε να απομονώσουμε ή να διερευνήσουμε ορισμένα σήματα, πετυχαίνουμε το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα αφαιρώντας μια μόνο αντίσταση. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι το σημαντικά χαμηλότερο κόστος των αντιστάσεων από αυτό των διακοπών ή των ακίδων κεφαλίδας.

Τέλος, μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα ξεχωριστό LDO με τους συμπληρωματικούς πυκνωτές του, το οποίο είναι υπεύθυνο για την τροφοδοσία μόνο του ST-Link MCU. Αυτό γίνεται για να μπορούμε να τροφοδοτούμε το ST-Link μόνο όταν είναι συνδεδεμένο το micro USB, αφού μόνο τότε χρειαζόμαστε πραγματικά την τροφοδοσία του, για τον εντοπισμό σφαλμάτων και τη λειτουργία Virtual COM port. Όταν το σύστημα τροφοδοτείται από PoE ή τον εξωτερικό μετατροπέα DC-DC, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.2.6, το ST-Link MCU δεν τροφοδοτείται, επιτυγχάνοντας μείωση της κατανάλωσης. Ωστόσο, η σύνδεση του micro USB επιτρέπει σε όλο το σύστημα να τροφοδοτείται κανονικά, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο κατά την ανάπτυξη νέου FW και κατά τον εντοπισμό σφαλμάτων χωρίς να χρειάζεται άλλη εξωτερική τροφοδοσία.

3 Υλοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι σχεδιασμού HW και FW. Θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις σχεδιαστικές αποφάσεις που επηρέασαν το τελικό αποτέλεσμα. Θα παρουσιαστεί ο πλήρης κύκλος της διαδικασίας σχεδιασμού, παραγγελίας και συναρμολόγησης, καθώς και ορισμένες από τις αρχικές δοκιμές του HW και οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του FW.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μέθοδοι και οι τεχνικές που παρουσιάζονται παρακάτω δεν ακολουθούν τα βιομηχανικά πρότυπα, αλλά μια νοοτροπία RnD. Ο λόγος είναι ότι το παρόν σύστημα αποτελεί πρωτότυπο με μικρό αριθμό συσκευών σε σύγκριση με ένα εμπορικό προϊόν. Επίσης ο σχεδιασμός δεν έχει ακόμη δοκιμαστεί, γεγονός που καθιστά αυτόματα το σύστημα μη έτοιμο για την αγορά. Ως εκ τούτου, επειδή το κόστος παραγωγής θα αυξανόταν δραματικά δεν ελήφθησαν υπόψη ορισμένες γνωστές μέθοδοι, υπηρεσίες και διαδικασίες που στοχεύουν σε πολύ μεγαλύτερο αριθμό συσκευών.

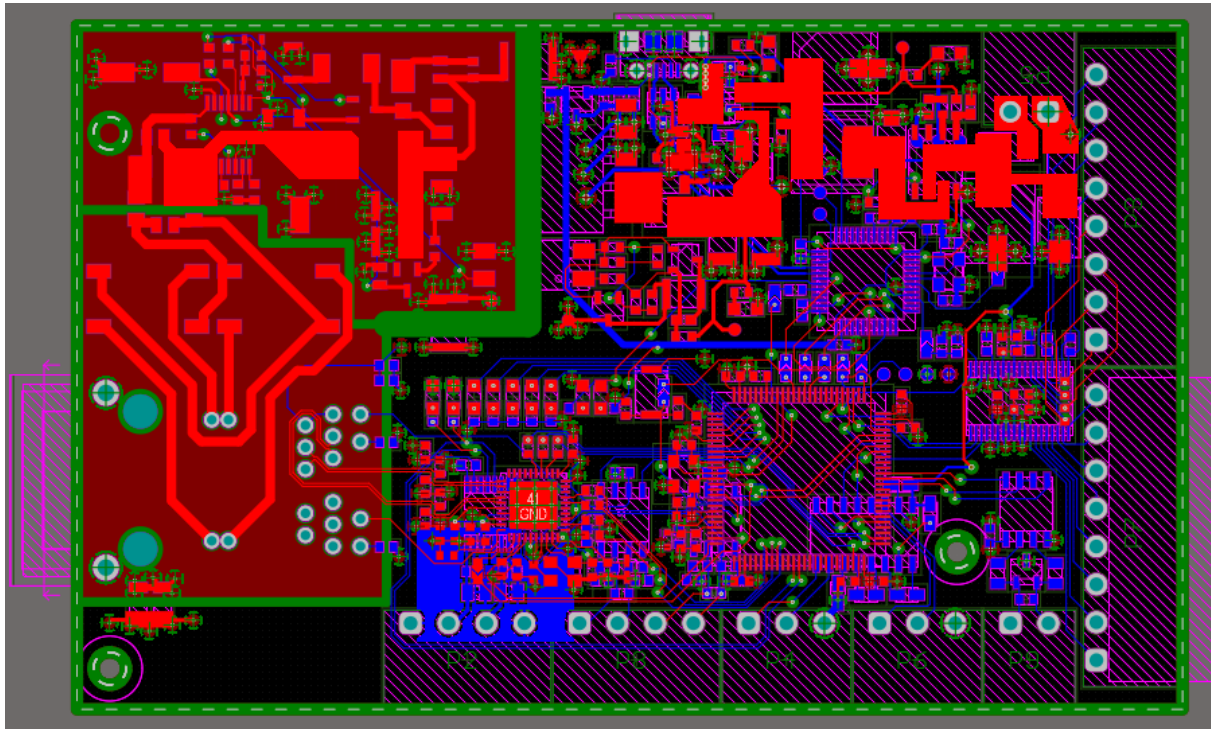
3.1 Υλικό

Με όλα τα σχηματικά του συστήματος ολοκληρωμένα, το πραγματικό HW ξεκίνησε να σχεδιάζεται. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε μέσα στο Altium, ένα ξεχωριστό αρχείο, που ονομάζεται PcbDoc. Ωστόσο, πριν υλοποιηθεί το σχέδιο σε φυσική μορφή, εκτελέστηκε ένα τελευταίο ERC για να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν λάθη στα σχέδια.

3.1.1 Σχεδίαση PCB

Μετά τον τελικό έλεγχο, μεταφέρθηκαν στο έγγραφο PCB όλα τα εξαρτήματα και η σχέση μεταξύ τους. Κάθε εξάρτημα στο σχέδιο συνδέθηκε με ένα αποτύπωμα, ένα σχέδιο από χαλκό και μη αγώγιμο υλικό, έτσι ώστε να είναι εφικτή η συγκόλληση του εξαρτήματος στην πλακέτα. Δεδομένου ότι κάθε εξάρτημα μπορεί να έχει περισσότερα από ένα αποτυπώματα διαθέσιμα από τον κατασκευαστή, η επιλογή βασίστηκε στον διαθέσιμο χώρο στην πλακέτα, στην τιμή μονάδας καθώς και στη διαθεσιμότητα στην αγορά (υπήρξε έλλειψη chip την περίοδο του σχεδιασμού). Στη συνέχεια, τα εξαρτήματα τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι συνδέσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο σύντομες και οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών συνδέσεων όσο το δυνατόν λιγότερες. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν οι πραγματικοί χάλκινοι αγωγοί και προστέθηκαν επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως κείμενο και οπές στερέωσης.

Το σχήμα 16 φαίνεται η ολοκληρωμένη σχεδίαση της πλακέτας με όλα τα χαρακτηριστικά και της λεπτομέρειες προκειμένου το σύστημα να λειτουργεί σωστά και ο χρήστης να μπορεί να αναγνωρίσει τα διάφορα εξαρτήματα. Το κείμενο και οι βοηθητικές γραμμές παρόλα αυτά δεν είναι ορατά στην παρακάτω εικόνα, με σκοπό να μην επισκιάσουν τις άλλες λεπτομέρειες του σχεδιασμού.

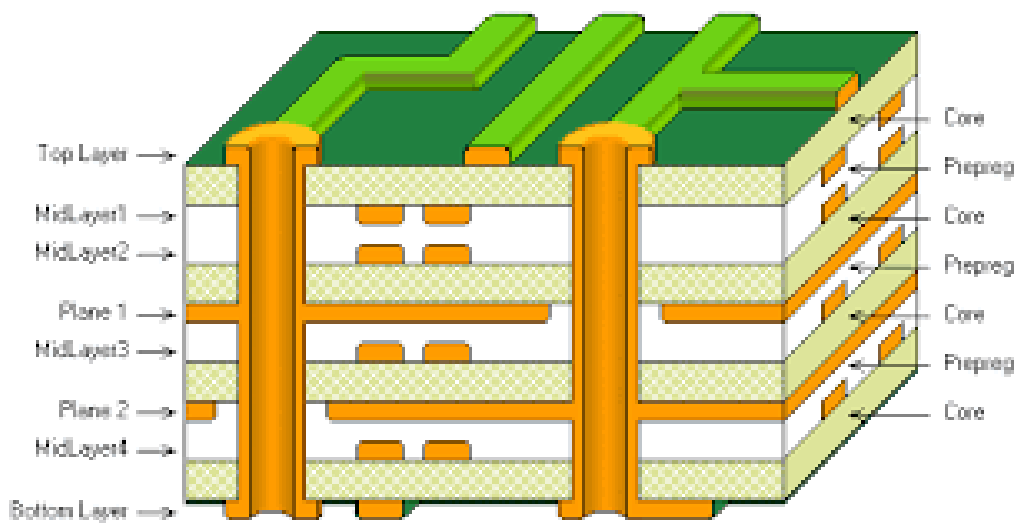


Εικόνα 16.

Παρακάτω αναλύονται τα στάδια σχεδιασμού με σκοπό να γίνουν καλύτερα κατανοητές οι αποφάσεις που οδήγησαν στο σχέδιο του Σχήματος 16:

- Στοίβαξη Στρώσεων
- Κανόνες Σχεδίασης
- Αποφάσεις Διάταξης
- Ειδικοί Αγωγοί και Τεχνικές
- Επιπλέον Χαρακτηριστικά Σχεδίασης

Στοίβαξη Στρώσεων



Εικόνα 17.

Η στοιβαξη στρώσεων είναι η αλληλουχία υλικών (και ιδιοτήτων τους) που τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο για να σχηματίσουν την τελική πλακέτα. Το βασικό υλικό, ο πυρήνας, κατασκευάζεται συνήθως από ένα ειδικό γυάλινο ύφασμα που ονομάζεται FR4. Για τη σύνδεση των δύο πλευρών της στρώσης του χαλκού των πυρήνων υπάρχει στρώση προεμποτισμένου εποξειδικού υλικού. Στην περίπτωση ενός απλού PCB δύο στρώσεων τοποθετείται και στις δύο πλευρές των στρωμάτων χαλκού ένα ειδικό υλικό, που ονομάζεται μάσκα συγκόλλησης, και προστατεύει τον γυμνό χαλκό από την οξειδωση και τις μηχανικές βλάβες. Τέλος, πάνω από τη μάσκα συγκόλλησης τοποθετείται ένα στρώμα μελανιού, που ονομάζεται μεταξοτυπία, και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση εξαρτημάτων, την ένδειξη ειδικών χαρακτηριστικών και γενικά τη σήμανση της πλακέτας. Σε πλακέτες υψηλότερου αριθμού στρώσεων, όπως αυτό του Σχήματος 16, υπάρχουν περισσότεροι από ένας πυρήνες που τοποθετούνται μεταξύ των στρωμάτων χαλκού.

Η πρώτη απόφαση που πρέπει να παρθεί κατά το σχεδιασμό μιας πλακέτας, είναι ο επιθυμητός αριθμός στρώσεων. Αυτό μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες. Συνήθως, το μέγεθος της πλακέτας εξαρτάται από τον αριθμό των εξαρτημάτων. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το PCB πρέπει να είναι μικρό, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το βάρος, οι διαστάσεις ή ακόμα και το κόστος κατασκευής. Ένας άλλος παράγοντας είναι ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των σημάτων που πρέπει να δρομολογηθούν μεταξύ των εξαρτημάτων, κάτι που μερικές φορές επηρεάζει την κατανομή ισχύος ή/και τον αριθμό εξαρτημάτων που τοποθετούνται στην άνω και κάτω πλευρά της πλακέτας. Για το λόγο αυτό, η χρήση PCB με περισσότερες στρώσεις, βοηθάει στη δρομολόγηση συνδέσεων σε περισσότερα από ένα στρώματα με τη χρήση μικρών επιμεταλλωμένων οπών που ονομάζονται vias. Τα Vias συνδέουν τα σήματα μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων, δίνοντας μεγάλη ελευθερία στην τοποθέτηση και τη διαδρομή των χάλκινων αγωγών και εξαρτημάτων.

Μια άλλη πτυχή είναι τα χαρακτηριστικά των υλικών. Όπως οι ηλεκτρικές ιδιότητες του πυρήνα, του προεμποτισμένου υλικού που τοποθετείται μεταξύ των στρώσεων χαλκού, καθώς και οι διαστάσεις τους. Η ενέργεια ενός σήματος που μεταδίδεται μέσα σε μια πλακέτα δεν μεταφέρεται μέσω των αγωγών, αλλά μέσω του διηλεκτρικού υλικού με τη μορφή ηλεκτρικού πεδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο με τη σειρά του βοηθά τα ηλεκτρόνια του υλικού του αγωγού να κινηθούν, το οποίο στη συνέχεια δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα και ως αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό. Οι ιδιότητες αυτών των υλικών επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης δεδομένων σε ένα μια πλακέτα, κάτι που είναι κρίσιμο για τη σωστή λειτουργία όλων των κυκλωμάτων, ειδικά σε υψηλότερες συχνότητες.

Στο εν λόγω σύστημα, δεδομένου ότι θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος παραγωγής, και να ικανοποιήσουμε ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά, επιλέγεται η χρήση τεσσάρων στρώσεων ως ο καλύτερος συνδυασμός κόστους παραγωγής και ευκολίας σχεδιασμού.

Σε έρευνα που έγινε στους γνωστότερους και οικονομικότερους κατασκευαστές PCB (στην Κίνα), συμπεραίνουμε ότι τα υλικά και οι υπηρεσίες που προσφέρονται είναι τυποποιημένα και πανομοιότυπα στις περισσότερες περιπτώσεις. Έτσι η απόφαση επιλογής προμηθευτή εξαρτάται από το κόστος παραγωγής, τον χρόνο αποστολής και τη συνολική ποιότητα.

Η άντληση πληροφοριών σχετικά με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των υλικών κάθε κατασκευαστή γίνεται συνήθως από τον εκάστοτε ιστότοπο, ή απευθείας μέσω κάποιας προσφοράς. Στην περίπτωσή μας, οι πληροφορίες του κατασκευαστή αναφέρονταν

ξεκάθαρα στον ιστότοπο, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις ανοχές, τα υλικά, τις τεχνικές παραγωγής και τις συνολικές προδιαγραφές.

Στην περίπτωση του PCB τεσσάρων επιπέδων, οι διαθέσιμες επιλογές ήταν:

α)

Layer	Material Type	Thickness	
Top Layer1	Copper	0.035 mm	
Prepreg	7628*1	0.2 mm	
Inner Layer2	Copper	0.0175 mm	1.1mm (with copper core)
Core	Core	1.065 mm	
Inner Layer3	Copper	0.0175 mm	
Prepreg	7628*1	0.2 mm	
Bottom Layer4	Copper	0.035 mm	

0.2mm (7.87 mil) is nominal thickness of 7628 prepreg. Use 7.1 mil as the thickness when the controlled impedance tracks are on top/bottom, use 8.1 mil when tracks are inside.

Εικόνα 18.

β)

Layer	Material Type	Thickness	
Top Layer1	Copper	0.035 mm	
Prepreg	2313*1	0.1 mm	
Inner Layer2	Copper	0.0175 mm	1.3 mm (with copper core)
Core	Core	1.265 mm	
Inner Layer3	Copper	0.0175 mm	
Prepreg	2313*1	0.1 mm	
Bottom Layer4	Copper	0.035 mm	

0.1mm (3.94 mil) is nominal thickness of 7628 prepreg. Use 3.5 mil as the thickness when the controlled impedance tracks are on top/bottom, use 4.5 mil when tracks are inside.

Εικόνα 19.

Με κύρια διαφορά τον τύπο και το πάχος του προεμποτισμένου υλικού (prepreg). Επιλέχθηκε η επιλογή β, καθώς ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ του στρώματος χαλκού 1 και 2, η οποία είναι η πιο κρίσιμη απόσταση για τις ειδικές διαδρομές στο σχέδιό μας (περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται στην υποπαράγραφο Ειδικοί Αγωγοί και Τεχνικές).

Στο Altium Designer, υιοθετούμε όμοια στοίβαξη στρώσεων με αυτή του κατασκευαστή, προκειμένου να αναπαραστήσουμε την πλακέτα όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα.

#	Name	Material	Type	Thickness	Dk	Df	Weight
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	SM-001	Solder Mask	1mil	4	0.03	
1	Top Layer	CF-004	Signal	1.378mil			1oz
	Dielectric 1	PP-017	Prepreg	7.874mil	4.6	0.02	
2	GND	CF-004	Plane	0.689mil			1/2oz
	Core	Core-039	Core	41.929mil	4.8	0.02	
3	PWR	CF-004	Plane	0.689mil			1/2oz
	Dielectric 2	PP-017	Prepreg	7.874mil	4.6	0.02	
4	Bottom Layer	CF-004	Signal	1.378mil			1oz
	Bottom Solder	SM-001	Solder Mask	1mil	4	0.03	
	Bottom Overlay		Overlay				

Εικόνα 20.

Κανόνες Σχεδίασης

Όπως προαναφέρθηκε, οι κατασκευαστές πλακετών έχουν συγκεκριμένους περιορισμούς όσον αφορά τις ανοχές, τις αποστάσεις και άλλες μετρήσεις σχεδιασμού. Στην περίπτωση μας, όλες οι σημαντικές τιμές αναφέρονται ξεκάθαρα στον ιστότοπο του κατασκευαστή, χωρίς να αφήνουν περιθώρια αβεβαιότητας κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Το Altium, όπως τα περισσότερα λογισμικά EDA, δίνει τη δυνατότητα σύγχρονου ή/και ασύγχρονου ελέγχου κανόνων. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χαρακτηριστικό που έχει σχεδιαστεί, καθώς και ο συνδυασμός διαφορετικών χαρακτηριστικών, συγκρίνεται με ένα σύνολο κανόνων σχεδίασης που υποδεικνύονται συγκεκριμένα από τον σχεδιαστή. Είναι σαφές ότι για να παραχθεί μια κατασκευάσιμη πλακέτα, όλα τα χαρακτηριστικά πρέπει να είναι εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή, διαφορετικά, το πρόγραμμα, μπορεί να απορρίψει το σχέδιο και να ζητήσει διορθώσεις ή ακόμα χειρότερα να το παράξει αλλά με ελαττώματα.

Πρέπει να καθοριστεί ένα αυστηρό σύνολο κανόνων σχεδιασμού για την αποφυγή λαθών και βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγγελίας. Όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται συλλέγονται από τον ιστότοπο του κατασκευαστή.

Οι πιο σημαντικές πληροφορίες που συλλέχθηκαν είναι:

Προδιαγραφές PCB	
Πλήθος στρώσεων	1,2,4,6 στρώσεις
Ελεγχόμενη επαγωγική αντίσταση	4/6 στρώσεις
Υλικό	FR4
Διηλεκτρική σταθερά	4.5 (PCB διπλής όψης)
Μέγιστες διαστάσεις	400x500mm
Ανοχές διαστάσεων	±0.2mm
Ανοχές πάχους	± 10%
Εξωτερικό στρώμα χαλκού	1 oz/2 oz (35um/70um)
Εσωτερικό στρώμα χαλκού	0.5 oz (17.5um)
Μέγεθος Τρυπανιού/Οπής	

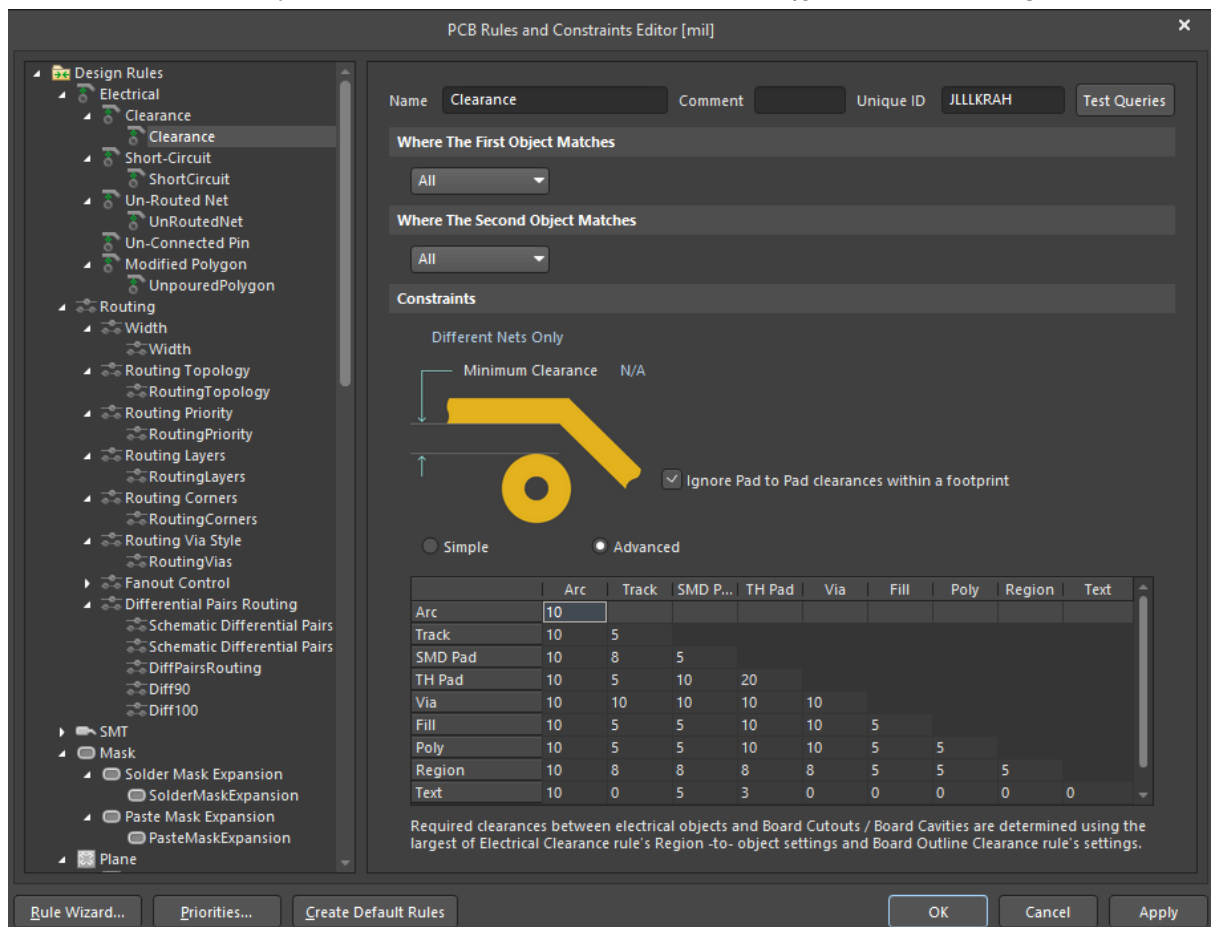
Μέγεθος οπής	0.20mm- 6.30mm
Ανοχή μεγέθους οπής	+0.13/-0.08mm
Τυφλά/Θαμμένα Vias	Δεν υποστηρίζεται
Ελάχιστη διάσταση οπής Via	0.2mm
Ελάχιστη διάμετρος οπής Via	0.4mm
Διάσταση οπής PTH	0.20mm - 6.35mm
Μέγεθος χάλκινων pads	0.70mm- 6.35mm
Ελάχιστη διάσταση μη επιμεταλλωμένων οπών	0.50mm
Ελάχιστη διάσταση επιμεταλλωμένων αυλακώσεων	0.65mm
Ελάχιστη διάσταση οδοντωτών οπών	0.60mm
Ανοχή μεγέθους οπής (Επιμεταλλωμένης)	+0.13mm/-0.08mm
Ελάχιστη απόσταση	
Μεταξύ οπών (Διαφορετικά δίκτυα)	0.5mm
Μεταξύ οπών Via (Ίδιο δίκτυο)	0.254mm
Μεταξύ pads χωρίς οπή	0.127mm
Μεταξύ pads με οπή	0.5mm
Μεταξύ οπής Via και αγωγού	0.254mm
Μεταξύ PTH και αγωγού	0.33mm
Μεταξύ NPTH και αγωγού	0.254mm
Μεταξύ pad και αγωγού	0.2mm
Ελάχιστο πλάτος και απόσταση αγωγών	
1-2 στρώσεις: Πλάτος αγωγών	5mil (0.127mm)
1-2 στρώσεις: Ελάχιστη απόσταση στρώσεων	5mil (0.127mm)
4-6 στρώσεις: Πλάτος αγωγού	3.5mil (0.09mm)
4-6 στρώσεις: Ελάχιστη απόσταση στρώσεων	3.5mil (0.09mm)
2oz χαλκού: Πλάτος αγωγού	8mil (0.2mm)
2oz χαλκού: Ελάχιστη απόσταση	8mil (0.2mm)
Μάσκα συγκόλλησης	
Άνοιγμα/επέκταση μάσκας συγκόλλησης	0.05mm
Γέφυρα συγκόλλησης	0.2mm(green)
Διηλεκτρική Σταθερά Μάσκα συγκόλλησης	3.8
Πάχος μάσκας συγκόλλησης	10-15um

Μεταξοτυπία	
Ελάχιστο πλάτος γραμμής	6 mil (0.153mm)
Ελάχιστο ύψος κειμένου	40 mil (1.0mm)
Αναλογία πλάτους προς ύψος χαρακτήρων	1:6
Απόσταση pad και μεταξοτυπίας	0.15mm
Περίγραμμα πλακέτας	
Περίγραμμα αγωγού	0.2mm

Πίνακας 6.

Στη συνέχεια, εισάγουμε αυτές τις προδιαγραφές στο Altium, για να διασφαλίσουμε τη συμμόρφωση και τη συνεχή παρακολούθηση για πιθανά λάθη σχεδιασμού. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για τις προδιαγραφές που ορίζονται από τον κατασκευαστή, στις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχει σημαντική διαφορά τιμής όταν πρόκειται για αυστηρότερες προδιαγραφές ή ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό, έγινε αξιολόγηση των πραγματικών αναγκών του σχεδιασμού προκειμένου να είμαστε εντός συγκεκριμένου επιπέδου των δυνατοτήτων του κατασκευαστή για να μειωθεί περαιτέρω κόστος της πλακέτας.

Η εικόνα 21 απεικονίζει το παράθυρο των Κανόνων Σχεδίασης στο Altium Designer.



Εικόνα 21.

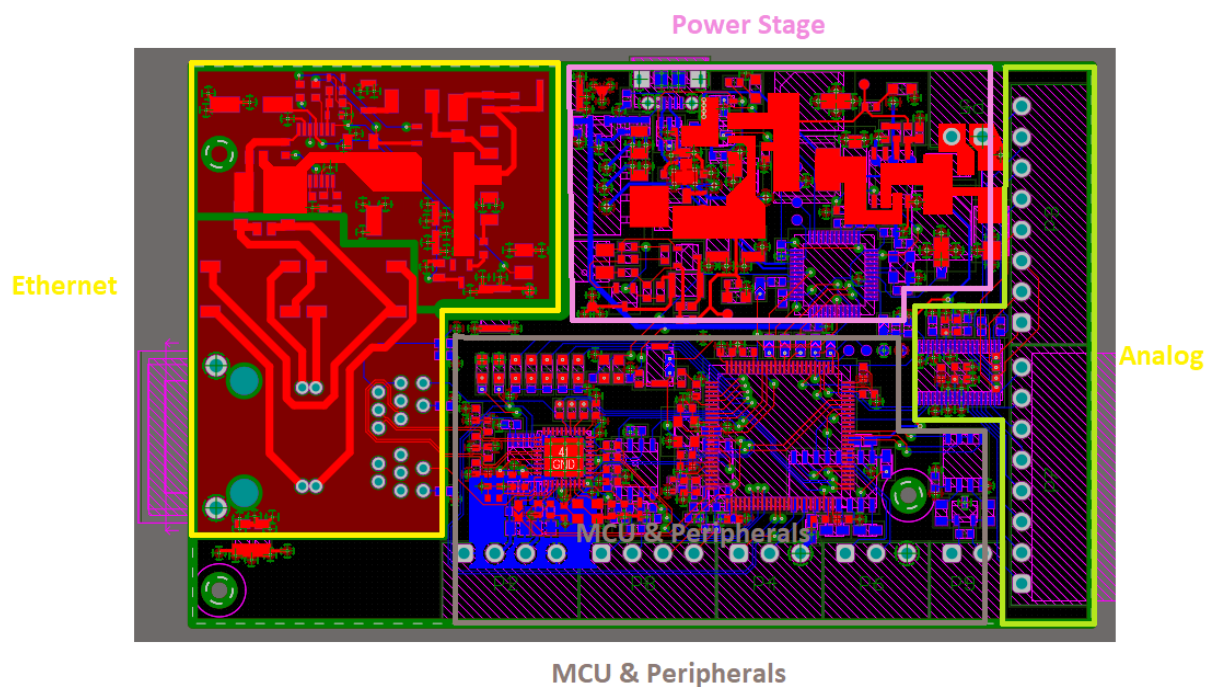
Αφού ορίσουμε σωστά τους κανόνες σχεδίασης, και σχεδιάσουμε την πλακέτα, μπορούμε να εκτελέσουμε το DRC, που είναι ένα ενσωματωμένο εργαλείο εντοπισμού των στοιχείων του σχεδίου που είναι εκτός προδιαγραφών. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζουμε ότι τα αρχεία του σχεδίου που αποστέλλονται στον κατασκευαστή είναι σωστά και κατασκευάσιμα.

Αποφάσεις Διάταξης

Δεδομένου ότι σχεδιάζουμε ένα PCB μικτών σήματων που περιέχει αναλογικά και ψηφιακά σήματα υψηλής συχνότητας, πρέπει να λάβουμε υπόψη την ύπαρξη ενός χωρικού διαχωρισμός μεταξύ των διαφορετικών σταδίων. Αυτό σημαίνει ότι τα αναλογικά σήματα πρέπει να απέχουν αρκετά από τις ψηφιακές γραμμές υψηλών συχνοτήτων, για να αποφευχθούν προβλήματα σύζευξης και ακεραιότητας σημάτων.

Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε το τμήμα ethernet (και ο σύνδεσμος) να τοποθετηθούν στη μία πλευρά της πλακέτας και η αναλογική διεπαφή στην άλλη, επιτυγχάνοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή φυσική απόσταση μεταξύ των δύο. Το ίδιο ισχύει για το κύκλωμα PoE DC-DC και τις υπόλοιπες διεπαφές υψηλής συχνότητας, όπως το CAN.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 22, οι διαφορετικές περιοχές είναι καλά διαχωρισμένες και τοποθετημένες στο PCB με τρόπο που ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σύζευξης σήματος από το ένα στο άλλο.



Εικόνα 22.

Για την εξάλειψη του επαγόμενου θορύβου σε ευαίσθητες περιοχές της πλακέτας, τα επίπεδα γείωσης διαχωρίστηκαν σε αυτά της περιοχής PoE DC-DC, της υποδοχής RJ45 και των υπόλοιπων κυκλωμάτων. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί ο θόρυβος υψηλής συχνότητας από το DC-DC καθώς και να εμποδιστούν συμβάντα ESD στην υποδοχή RJ45 από το να περάσουν στο κύριο σύστημα γείωσης της πλακέτας. Τα δύο απομονωμένα επίπεδα GND συνδέθηκαν με το κύριο επίπεδο GND με τη βοήθεια πολυστρωματικών κεραμικών πυκνωτών υψηλής τάσης. Δεδομένου ότι οι εισοδοί του ADC ήταν απομονωμένες και διπολικές, δεν υπήρχε καμία ανάγκη να διαχωριστεί το ADC GND από το υπόλοιπο κύριο GND του συστήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε είσοδος έχει ως τάση αναφοράς μια άλλη ακίδα του ADC (ζεύγος εισόδων) και δεν υπάρχει σύνδεση με το κύριο GND.

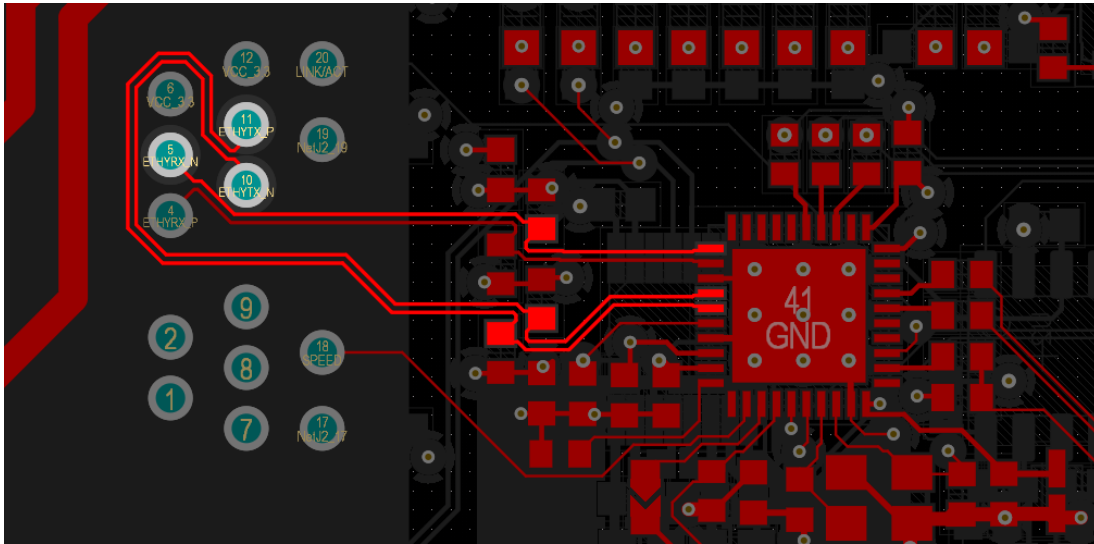
Επιπλέον, για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του τμήματος Ethernet, λήφθηκε ιδιαίτερη μέριμνα ώστε να τοποθετηθεί ο σύνδεσμος PHY και RJ45 όσο το δυνατόν πιο κοντά, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μήκος των διαφορικών ζευγών και να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του σήματος. Δεδομένου ότι ο μικροελεγκτής επικοινωνεί με το PHY μέσω του RMII, που είναι μια ψηφιακή διεπαφή σχετικά χαμηλής ταχύτητας με ανίχνευση σφαλμάτων, η δρομολόγηση δεν ήταν πολύ κρίσιμη, και έτσι έγινε τελικά, για να επιτραπεί η πιο κρίσιμη τοποθέτηση του PHY και των συμπληρωματικών στοιχείων του.

Ο μικροελεγκτής τοποθετήθηκε στην επάνω πλευρά του PCB μαζί με το ethernet PHY, τους ρυθμιστές ισχύος και τους μετατροπείς DC-DC. Αυτά τα εξαρτήματα, όταν τοποθετούνται στην επάνω πλευρά, καθορίζουν τις συνολικές διαστάσεις της πλακέτας. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η τοποθέτηση στοιχείων όπως το PoE DC-DC και το ethernet PHY κάτω ή πάνω από άλλα τσιπ, όπως διεπαφές, ή ακόμα και το MCU. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζουμε ότι με την επαρκή απόσταση που αναφέρεται παραπάνω, δεν θα υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ σημάτων υψηλής συχνότητας άλλων εξαρτημάτων του συστήματος. Τα «θορυβώδη» εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στην επάνω πλευρά ενώ στην κάτω πλευρά της πλακέτας τοποθετήθηκαν οι υπόλοιπες διεπαφές και το ADC, κυρίως κάτω από τον μικροελεγκτή και τους συνδέσμους.

Ειδικό Αγωγοί και Τεχνικές

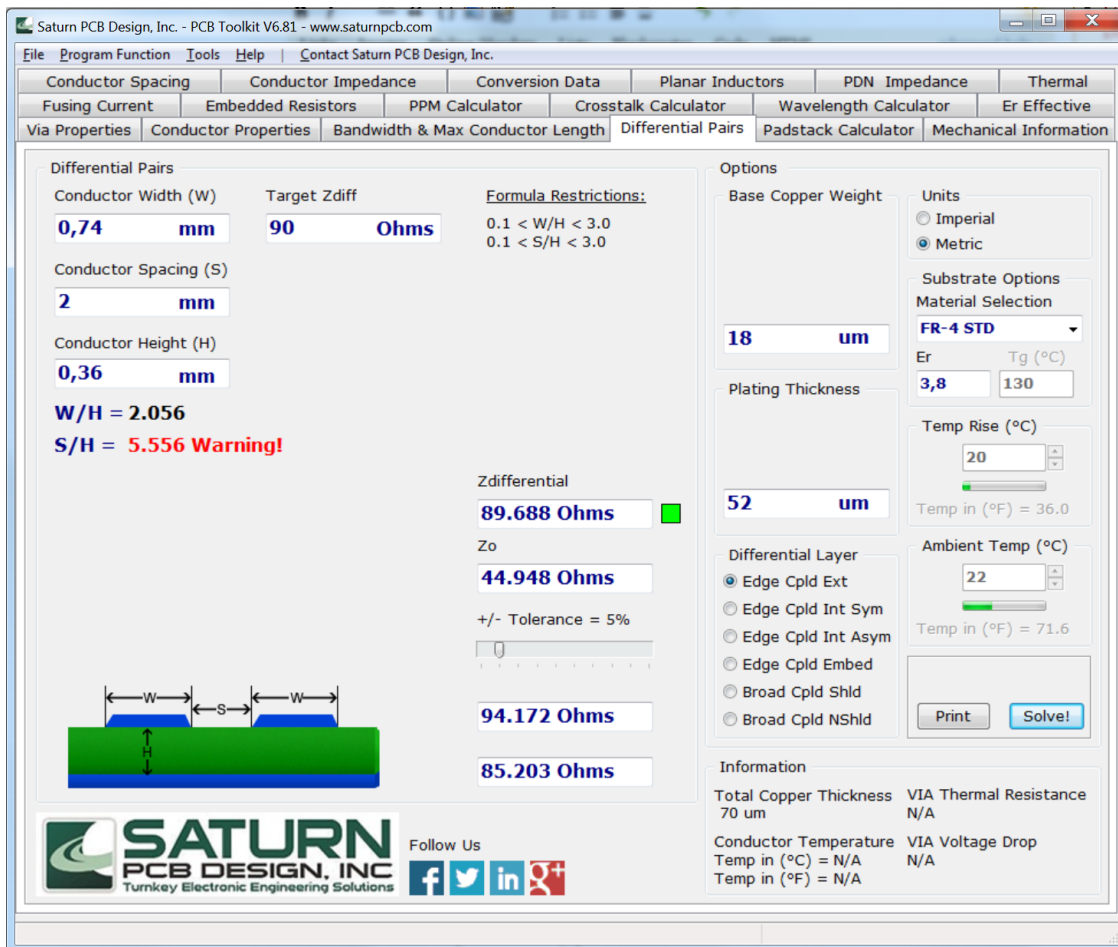
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πιο κρίσιμη απόσταση στις στρώσεις της πλακέτας είναι αυτή μεταξύ του άνω χαλκού και της πρώτης εσωτερικής χάλκινης στρώσης. Το ethernet PHY τοποθετήθηκε στην πάνω μεριά της πλακέτας, οπότε οι επαφές του και τα σήματα θα συνδεθούν στο πάνω στρώμα χαλκού. Για να επιτύχουμε την ελεγχόμενη επαγωγική αντίσταση που αναφέρεται στο πρότυπο, πρέπει να σχεδιάσουμε προσεκτικά τα διαφορικά ζεύγη, τόσο σε μέγεθος όσο και σε απόσταση, καθώς και να λάβουμε υπόψη την απόσταση του άνω στρώματος χαλκού και του πλησιέστερου επιπέδου GND στο οποίο θα έχουν αναφορά τα σήματα. Το πρώτο εσωτερικό στρώμα πρέπει να συνδεθεί με το GND για να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση από το ανώτερο στρώμα, όπου δρομολογούνται τα διαφορικά σήματα ethernet και να μειωθεί η επαγωγική αντίσταση στο σημείο όπου μικρές προσαρμογές στις γραμμές ethernet μπορούν να μας οδηγήσουν στο διαφορικό των 100 ohm και 50 ohm ως προς το GND το καθένα. Ένας άλλος λόγος για να συνδέσουμε το πρώτο εσωτερικό στρώμα με το GND και όχι, για παράδειγμα, με ένα άλλο επίπεδο σήματος, είναι ότι, σε περίπτωση που κάνουμε το αντίθετο και δρομολογήσουμε άλλα σήματα χαμηλότερης ή/και υψηλότερης συχνότητας κάτω από τις γραμμές ethernet, αφού και τα δύο αναφέρονται σε GND, το οποίο στη συνέχεια θα είναι ένα άλλο επίπεδο πιο κάτω, τα 2 σήματα θα συζευχθούν αυξάνοντας σημαντικά τον κίνδυνο σοβαρών προβλημάτων ακεραιότητας σήματος. Για το λόγο αυτό, το πρώτο εσωτερικό στρώμα χαλκού επιλέχθηκε ως GND, το δεύτερο εσωτερικό ως η τροφοδοσία, και τέλος, το κάτω στρώμα χαλκού επιλέχθηκε ως το δεύτερο στρώμα σημάτων. Με αυτή τη στοίβαξη διασφαλίζουμε ότι κανένα σήμα δεν παρεμβάλλεται με κάποιο άλλο στον κατακόρυφο άξονα (μέσω των στρωμάτων) και το μόνο που χρειάζεται είναι να δώσουμε προσοχή στην απόσταση των σημάτων στο ίδιο επίπεδο.

Όπως αναφέρθηκε στη φάση του σχεδιασμού του κυκλώματος, οι δύο γραμμές κάθε ζεύγους πρέπει να είναι ίσες σε μήκος, ώστε κάθε τμήμα του διαφορικού σήματος να φθάνει και να αναχωρεί ταυτόχρονα από και προς το PHY. Αυτό προέκυψε και στο altium, αφού τοποθετήσαμε το σύμβολο διαφορικού ζεύγους στο σχέδιο. Ωστόσο, εξακολουθεί να χρειάζεται να καθοριστεί το πλάτος του αγωγού και η απόσταση για τους δύο αγωγούς σε κάθε ζεύγος.



Εικόνα 23.

Για τον υπολογισμό των δύο αυτών αριθμών, χρησιμοποιήθηκε το δωρεάν λογισμικό Saturn PCB toolkit. Ενσωματώνει διάφορα εργαλεία υπολογισμού για υπολογισμούς θερμότητας, ρεύματος και διαστασιοποίησης αγωγών. Χρησιμοποιήσαμε τον υπολογισμό επαγωγικής αντίστασης αγωγού, εισάγοντας την επιθυμητή σύνθετη αντίσταση, την απόσταση μεταξύ του πλησιέστερου επιπέδου GND και πήραμε ως αποτέλεσμα το πλάτος του αγωγού στόχου και την απόσταση του ζεύγους.



Εικόνα 24.

Επιπλέον Χαρακτηριστικά Σχεδίασης

Ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά που αξίζει να αναφερθούν είναι τα σημεία ελέγχου που τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις στην πλακέτα (πάνω και κάτω) για το γρήγορο και ασφαλή τρόπο ανίχνευσης σημάτων κατά τις δοκιμές. Τα σημεία ελέγχου είναι πολύ κοινά και χρήσιμα κατά το σχεδιασμό ενός πρωτότυπου PCB όπως αυτό που παρουσιάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Στο Σχήμα 25 φαίνονται δύο είδη σημείων δοκιμής, αυτά με τον προσαρτημένο δακτύλιο και τα SMD που λειτουργούν ως σημείο επαφής με ένα πολύμετρο ή παλμογράφο. Χρησιμοποιήθηκαν SMD σημεία ελέγχου για εξοικονόμηση χώρου και μείωση του πλήθους εξαρτημάτων στο BOM, αφού χρειαζόμασταν μόνο να εξετάσουμε τα διάφορα σήματα τροφοδοσίας.



Εικόνα 25.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του σχεδιασμού είναι η τοποθέτηση οπών στερέωσης για την προσάρτηση της πλακέτας σε κάποιο ηλεκτρολογικό κουτί. Δεδομένου ότι το συνολικό μέγεθος μιας πλακέτας εξαρτάται κυρίως από τους συνδέσμους διασύνδεσης και τα κύρια κυκλώματα, υπήρξαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την τοποθέτηση των οπών στερέωσης. Είτε να τοποθετήσουμε τις οπές στερέωσης στην περίμετρο, που σημαίνει ότι χρειαζόμαστε επιπλέον υλικό για να τοποθετήσουμε τις βίδες και τις τρύπες. Είτε να βρούμε κενά σημεία μεταξύ των κυκλωμάτων, κατά προτίμηση κοντά στις γωνίες, και να ενσωματώσουμε τις οπές γύρω από τα εξαρτήματα. Επιλέχθηκε η δεύτερη μέθοδος, προκειμένου να διατηρηθεί ίδιο το συνολικό μέγεθος του PCB και να είναι εφικτή, μελλοντικά, η τοποθέτησή του σε ένα περίβλημα.

3.1.2 Παραγγελία και Συναρμολόγηση

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, έγινε η παραγγελία της πλακέτας και των διαφόρων εξαρτημάτων για τη συναρμολόγηση. Μέσω του Altium, δημιουργήθηκαν αρχεία Gerber, τα οποία ανέβηκαν στον ιστότοπο του κατασκευαστή και ζητήθηκε η παραγωγή τους. Στα αρχεία Gerber υπάρχει η διάταξη κάθε στρώσης της πλακέτας σε φυσικές διαστάσεις, στρώματα χαλκού, μάσκα συγκόλλησης, μεταξοτυπία. Αυτά τα αρχεία εισάγονται σε μηχανή CNC για την παραγωγή της πλακέτας.

Εκτός από τις πλακέτες, παραγγέλθηκαν όλα τα αναγκαία εξαρτήματα για την υλοποίηση του συστήματος. Μέσω του Altium έγινε η εξαγωγή ενός excel αρχείου που περιέχει τον πίνακα υλικών όλων των εξαρτημάτων, με ποσότητες, σειριακό αριθμό ανταλλακτικού, κατασκευαστή, χαρακτηριστικά, περιγραφή και αποτύπωμα. Στην παρούσα υλοποίηση, η προμήθεια έγινε από εμάς, οπότε δε χρειαζόταν να ακολουθήσουμε κάποια συγκεκριμένη μορφή. Ωστόσο, για καλή πρακτική, επιλέχθηκε μια γενική μορφή, αποτελούμενη από τις ελάχιστες στήλες για την εκτέλεση της παραγγελίας και συναρμολόγησης. Στο Σχήμα 26 δίδονται μερικά από τα εξαρτήματα και οι αντίστοιχες στήλες που αναφέρονται παραπάνω.

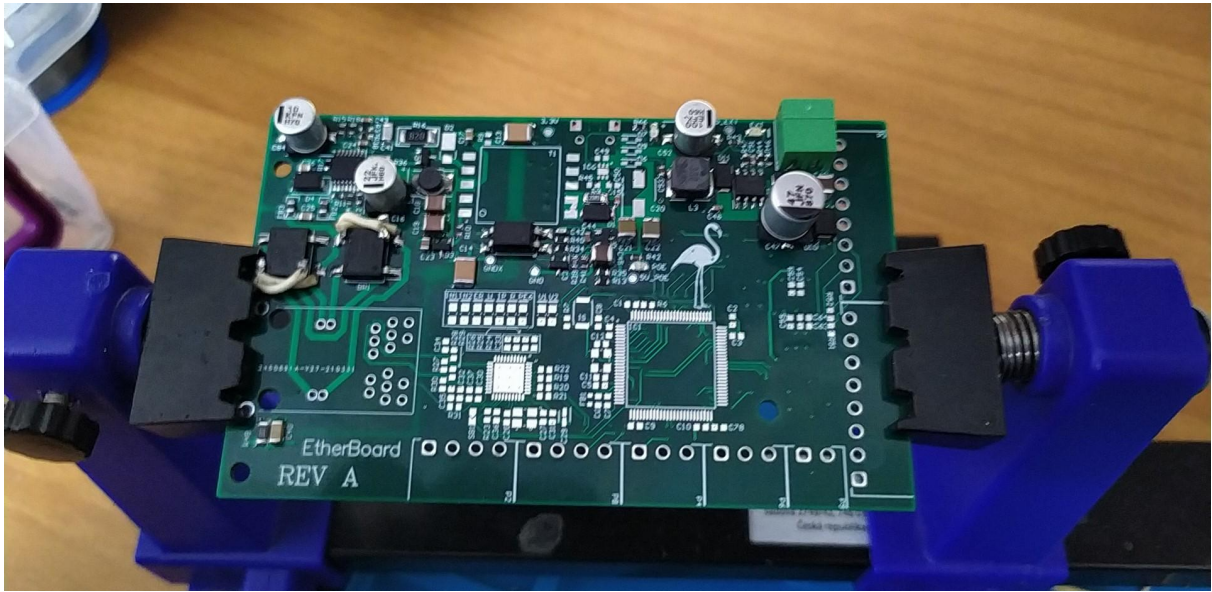
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	Added	Quantity	Availability	Comment	Quantity	Part Number	Designator	Mouseer link	Description
2	ok	100	yes	1 pF 100V 50% (0805) X8R	2	C0805X109D1HA	C57, C62	https://gr.mouseer.co	Capacitor
3	ok	100	yes	12 pF 6.3V 10% (0603) X7R	4	C0603C120K9RA4	C11, C12, C82, C8	https://gr.mouseer.co	Chip Capacitor, 2.2 nF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric), RoHS, Tape and Reel
4	ok	100	yes	20 pF 16V 2% (0603) X8R	2	C0603C200G4HA	C27, C28	https://gr.mouseer.co	Chip Capacitor, 2.2 nF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric), RoHS, Tape and Reel
5	ok	100	yes	100 pF 50V 5% (0603)	1	06035A101AT2A	C42	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 100 pF, 50 V, +/- 5%, COG/NPO, 0603
6	ok	10	yes	330 pF 630V 5% (1206) COG (N)	1	GRM31A5C2J33J	C41	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 330 pF, 630 V, +/- 5%, COG/NPO, 1206
7	ok	100	yes	560 pF 50V 5% (0603) COG (N)	4	C0603C561J56A4	C65, C66, C68, C6	https://gr.mouseer.co	Chip Capacitor, 2.2 nF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric), RoHS, Tape and Reel
8	ok	100	yes	680 pF 50V 10% (0603) X7R	1	C0603C681K5RA4	C15	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 680 pF, 50 V, +/- 10%, X7R, 0603
9	ok	10	yes	1 nF 2KV 10% (1206) X7R	1	CC1206K10X7RDB	C38	https://gr.mouseer.co	Capacitor
10	ok	100	yes	1 nF 100V 10% (0805) X7R	1	08051C102KAT2A	C25	https://gr.mouseer.co	1nF Capacitor
11	ok	100	yes	2.2 nF 20V 20% (0603) X7R	1	C0603C222K4RE4	C51	https://gr.mouseer.co	SMD/SMT 50V 2200pF X7R AUTO 20% Flex 0603
12	ok	10	yes	2.2 nF 2.2KV 10% (1812) X7R	2	C4532K7R3D222J	C13, C14	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 2200 pF, 2000 V, +/- 10%, X7R, 1812
13	ok	20	yes	8.2 nF 50V 10% (0603) X7R	1	GD0188R71H82J	C44	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 8200 pF, 50 V, +/- 10%, X7R, 0603
14	ok	100	yes	10 nF 50V 10% (0603) X7R	3	C0603C103K5RA4	C46, C6	https://gr.mouseer.co	SMD/SMT 50V .01uF X7R 0603 10%
15	ok	100	yes	22 nF 50V 10% (0603) X7R	1	C1608X7R1H223	C43	https://gr.mouseer.co	22nF Capacitor
16	ok	150	yes	100 nF 50V 10% (0603) X7R	29	C1608X7R1H104	C24, C1, C2, C4, C	https://gr.mouseer.co	100 nF 10% X7R Capacitor
17	ok	50	yes	10 nF 100V 10% (0805) X7R	2	GRM21BR72A10J	C17, C26	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 0.01 uF, 100 V, +/- 10%, X7R, 0805
18	ok	30	yes	220 nF 50V 10% (0805) X7R	1	C0805C224K1RE4	C23	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 0.22 uF, 25 V, +/- 10%, X7R, 0805
19	ok	20	yes	1 uF 100V 10% (1210) X7R	3	C3225X7R2A105J	C18, C19, C45	https://gr.mouseer.co	1uF 100V X7R 10% 1210 Capacitor
20	ok	100	yes	1 uF 25V 10% (0603) X5R	8	C0603C105K3RA4	C53, C7, C49, C58	https://gr.mouseer.co	SMD/SMT 1uF 25V X5R 10%
21	ok	50	yes	2.2 uF 10V 10% (0603) X7R	3	C0603C225K8RA4	C3, C10, C54	https://gr.mouseer.co	Chip Capacitor, 2.2 nF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric), RoHS, Tape and Reel
22	ok	10	yes	10 uF 50V 20% (1210) X7S	1	UMR325AC7106F	C48	https://gr.mouseer.co	SMD/SMT 1210 50VDC 10uF 20% X7S AEC-Q200
23	ok	150	yes	1 uF 16V 10% (0603) X7R	5	C0603C105K4RA4	C50, C55, C59, C6	https://gr.mouseer.co	Chip Capacitor, 2.2 nF, +/- 10%, 50 V, -55 to 125 degC, 0603 (1608 Metric), RoHS, Tape and Reel
24	ok	10	yes	47 uF 16V 10% (1210) X5R	2	EMK325ABJ476K	C21, C22	https://gr.mouseer.co	CAP. CERM, 47 uF, 10 V, +/- 10%, X5R, 1210

Εικόνα 26.

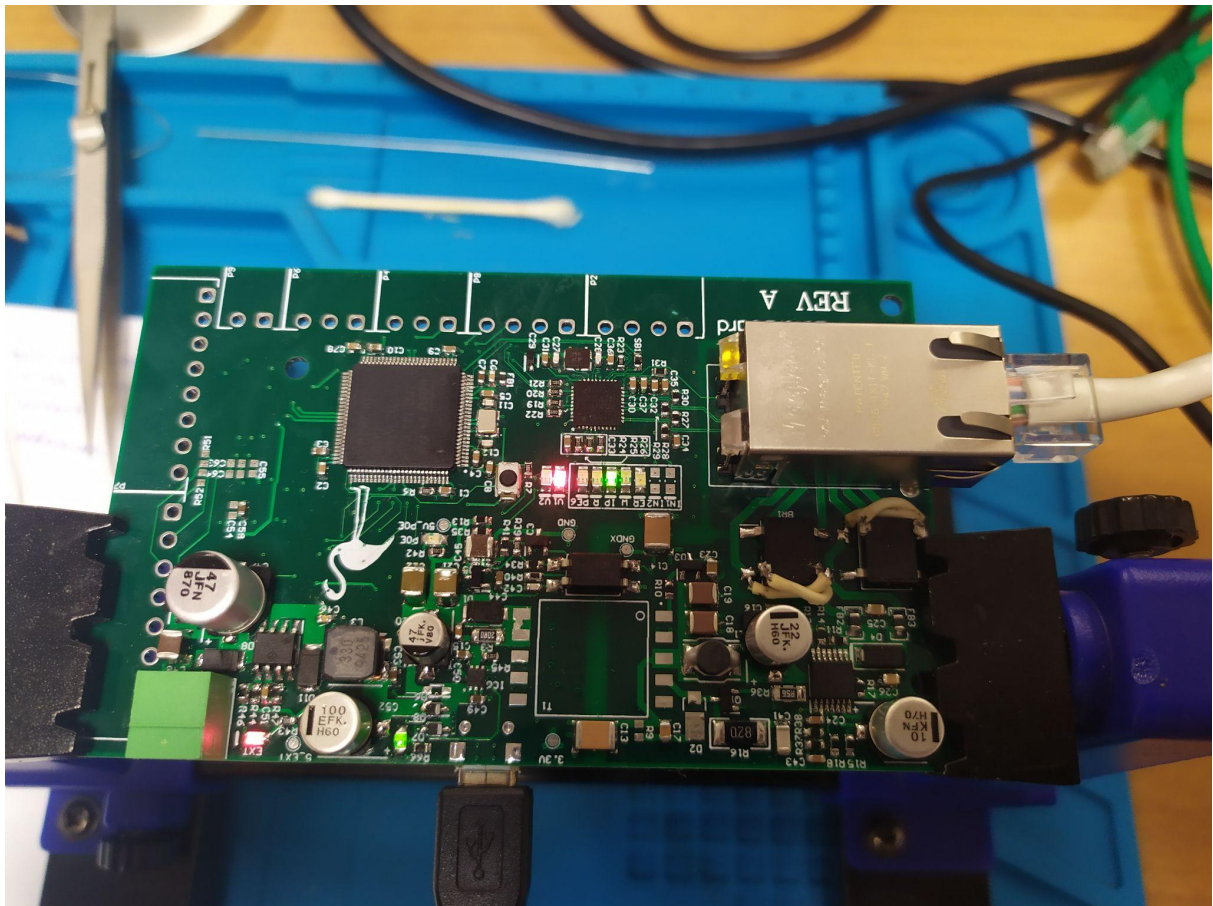
Για την παραγγελία επιλέχθηκε ένας από τους 3 γνωστούς διανομείς εξαρτημάτων κάνοντας πολύ απλή τη διαδικασία όπως: αναζήτηση αριθμού ανταλλακτικού, ορισμού ποσότητας και προσθήκη του ανταλλακτικού στο καλάθι.

Με την παραλαβή των εξαρτημάτων ξεκίνησε η συναρμολόγηση. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένας χειροκίνητος σταθμός συγκόλλησης εξοπλισμένος με λεπτό ρύγχος και σταθμό θερμού αέρα. Τα πρώτα εξαρτήματα που έπρεπε να συναρμολογηθούν ήταν η βαθμίδα ισχύος PoE καθώς και ο εξωτερικός μετατροπέας DC-DC. Ο λόγος είναι ότι κατά τη συγκόλληση, πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές για να διασφαλιστεί ότι τα διάφορα τμήματα της πλακέτας λειτουργούσαν όπως έπρεπε. Πιο συγκεκριμένα, πρώτα δοκιμάστηκε το στάδιο PoE, χωρίς καν να συγκολληθούν το PHY και ο μικροελεγκτής. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να διορθωθούν πιθανά λάθη προτού συμπεριληφθούν άλλα εξαρτήματα στο σύστημα, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο καταστροφής των τσιπ. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και με τον εξωτερικό μετατροπέα DC-DC. Και στις δύο περιπτώσεις, συνδέθηκε ένας παλμογράφος στην έξοδο κάθε τμήματος και παρακολουθούνταν η τάση, προκειμένου να αξιολογηθεί αν συμπεριφέρονται όπως έπρεπε. Η λογική αυτή αποδείχθηκε σωστή αφού όλα πήγαν καλά. Στη συνέχεια, συναρμολογήθηκαν το τμήμα ethernet, το ST-Link και ο μικροελεγκτής και ανέβηκε το βασικό FW για τη δοκιμή της λειτουργικότητας του ethernet (βασική λειτουργία ring). Οι διεπαφές (κάτω πλευρά του PCB) συγκολλήθηκαν και δοκιμάστηκαν τελευταίες, όταν διαπιστώθηκε ότι όλα τα άλλα μέρη λειτουργούν σωστά. Οι πράσινοι σύνδεσμοι συγκολλήθηκαν στο τέλος, για να αφήσουν χώρο στα διάφορα εργαλεία για την τοποθέτηση και τη συγκόλληση των εξαρτημάτων.

Στις παρακάτω φωτογραφίες (εικόνες 27 και 28) φαίνονται δύο στάδια συναρμολόγησης της πρώτης PCB.



Εικόνα 27.



Εικόνα 28.

3.1.3 Έλεγχος και επίλυση προβλημάτων

Κατά τη συναρμολόγηση και τη δοκιμή των διαφόρων τμημάτων του συστήματος, υπήρξαν ορισμένα σφάλματα σχεδιασμού που εμπόδισαν το σύστημα να συμπεριφέρεται όπως έπρεπε. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία ethernet δεν λειτουργούσε λόγω βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο ακίδων του μικροελεγκτή που εντοπίστηκαν αφού φάνηκε η κίνηση της διεπαφής RMI και η γραμμή TX και RX να κινούνται μαζί. Δεδομένου ότι το RMI είναι ένας διάυλος πλήρους διπλής όψης, αυτή η συμπεριφορά οδήγησε σε περαιτέρω έλεγχο οπτικών δοκιμών στο PCB και δοκιμής συνέχειας, που αποκάλυψε το βραχυκύκλωμα μεταξύ των ακίδων. Μετά την εκ νέου ροή της συγκόλλησης, το σφάλμα επιλύθηκε.

Ένα παρόμοιο πρόβλημα υπήρξε κατά την προσπάθεια διασύνδεσης του εξωτερικού ADC μέσω της γραμμής SPI. Με τη χρήση ενός λογικού αναλυτή, διαπιστώθηκε ότι το τσιπ δεν ανταποκρινόταν στην σε εντολές και μηνύματα. Μετά από ανίχνευση ορισμένων από τις ακίδες τροφοδοσίας του τσιπ, παρατηρήθηκε ότι ένας βοηθητικός ακροδέκτης δεν είχε σωστή τροφοδοσία με 5 βολτ, κάτι που ήταν ο λόγος που το τσιπ δεν ανταποκρινόταν στην κίνηση SPI. Με τη χρήση ενός καλωδίου ταχείας σύνδεσης, η ακίδα συνδέθηκε στα 5 βολτ και το ADC άρχισε να στέλνει όλα τα αναμενόμενα μηνύματα.

Συνολικά, η συναρμολόγηση του πρωτότυπου PCB χρειάστηκε μια ολόκληρη μέρα εργασίας, ενώ μια μηχανή επιλογής και τοποθέτησης θα μπορούσε να κάνει το ίδιο σε λίγα λεπτά. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, ο στόχος ήταν να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και να σχεδιαστεί ένα πρωτότυπο σύστημα το οποίο, αναμενόταν να έχει ελαττώματα και λάθη. Η συγκόλληση με το χέρι, ωστόσο, εισάγει περισσότερα σφάλματα στο HW, αντίθετα με τις αυτοματοποιημένες μηχανές pick and place που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία.

3.2 Υλικολογισμικό (Firmware)

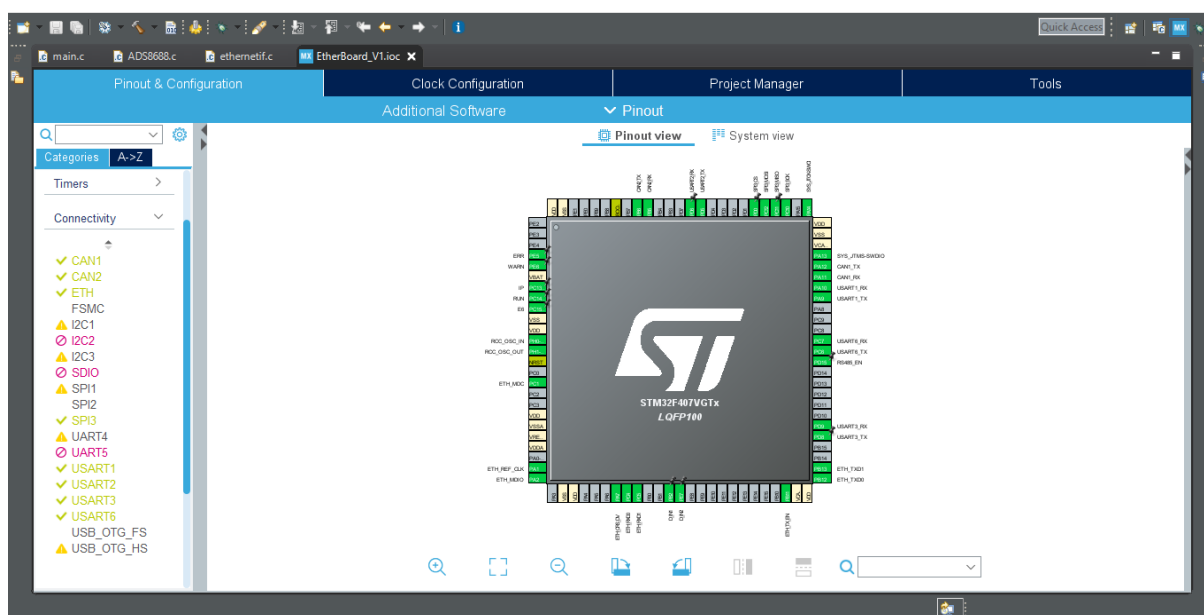
Η ανάπτυξη του FW, ξεκίνησε κατά την αρχική ανάλυση και σχεδιασμό του συστήματος. Πολύ πριν σχεδιαστεί η πλακέτα. Αυτό έγινε για να φανούν τυχόν περιορισμοί και εμπόδια στον επιλεγμένο μικροελεγκτή και περιφερειακών πριν ξεκινήσει ο σχεδιασμός του HW. Με αυτόν τον τρόπο, οι διορθώσεις και οι αλλαγές στο σχέδιο θα ήταν πολύ εύκολες, αφού η διαδικασία σχεδιασμού ήταν ακόμα στα αρχικά της στάδια.

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα αρχικό FW χωρίς την ανάγκη σχεδιασμού του HW, αγοράστηκε μια πλακέτα ανάπτυξης και χρησιμοποιήθηκε ως η πλατφόρμα για τα αρχικά στάδια του κώδικα εφαρμογής του συστήματος και των διαφόρων στοιχείων του. Χρησιμοποιώντας μια προκατασκευασμένη πλακέτα ανάπτυξης ([NUCLEO-F429ZI](#)) εστίασαμε εξ ολοκλήρου στην ανάπτυξη FW χωρίς να ανησυχούμε για λάθη HW ή λάθη σχεδιασμού. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση είναι σύμφωνη με το μοντέλο W, αφού ουσιαστικά αναπτύσσουμε και δοκιμάζουμε κάθε μέρος του συστήματος πριν προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο.

3.2.1 Αρχικοποίηση

Το πρώτο βήμα πριν την ανάπτυξη του FW ήταν η προετοιμασία των περιφερειακών, των ρολογιών του μικροελεγκτή και η δημιουργία της ραχοκοκαλιάς του κώδικα εφαρμογής. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η ST προσφέρει ένα εργαλείο λογισμικού που επιτυγχάνει τα παραπάνω μέσα από ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον.

Με τη βοήθεια του STM32CubeMX, ενεργοποιήθηκαν και ρυθμίστηκαν κατάλληλα τα επιθυμητά περιφερειακά. Τα περιφερειακά χρονοδιακόπτη ήταν επίσης ενεργοποιημένα για να βοηθήσουν με διάφορες μετρήσεις χρόνου και έλεγχο ροής. Η διεπαφή εντοπισμού σφαλμάτων ενεργοποιήθηκε για να μας επιτρέπει να ανεβάσουμε και να διορθώσουμε κώδικα στην πλακέτα ανάπτυξης με τη βοήθεια του ενσωματωμένου εντοπισμού σφαλμάτων ST-Link. Η δομή του ρολογιού διαμορφώθηκε ώστε να επιτυγχάνει τη μέγιστη συχνότητα, ώστε να επιτρέπει το περιθώριο εκτέλεσης κώδικα κατά την ανάπτυξη, χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερων βελτιστοποιήσεων.



Εικόνα 29.

Σε αυτό το στάδιο διαμορφώθηκαν όλα τα περιφερειακά του μικροελεγκτή και με τη βοήθεια του MXCube δημιουργήθηκε ο αρχικός κώδικας. Το εργαλείο δημιούργησε το δέντρο καταλόγου που περιελάμβανε προγράμματα οδήγησης χαμηλού επιπέδου HW, κωδικό αρχικοποίησης περιφερειακών, ορισμούς μητρώου και άλλα κομμάτια κώδικα για τη λειτουργία του μικροελεγκτή. Το επόμενο βήμα ήταν να ξεκινήσει η ανάπτυξη κώδικα χρήστη για τις διάφορες λειτουργίες του συστήματος.

3.2.2 Προγράμματα οδήγησης και βοηθητικά προγράμματα

Προκειμένου να γίνει πιο γρήγορη και αποτελεσματική η ανάπτυξη του FW, αναπτύχθηκε μεμονωμένος περιφερειακός κώδικας που ήταν υπεύθυνος για την αλληλεπίδραση με το ήδη υπάρχον HAL API. Αυτός ο κώδικας εξακολουθούσε να θεωρείται μέρος ενός προγράμματος οδήγησης επειδή ήταν γενικός και έτοιμος να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές. Ο αρθρωτός σχεδιασμός κώδικα καθιστά το FW φορητό και εύκολο στην επαναχρησιμοποίηση σε άλλα έργα ή ακόμα και στην κοινότητα ανοιχτού κώδικα.

Ως πρώτο βήμα, μελετήθηκε η μονάδα ethernet και χρησιμοποιήθηκαν οι κύριες λειτουργίες HAL για την προετοιμασία της περιφερειακής συσκευής και εκκίνησης της μονάδας DHCP προκειμένου να αποκτηθεί μια διεύθυνση IP από το δίκτυο. Η λειτουργία ping δοκιμάστηκε με επιτυχία, καθώς η πλακέτα ανταποκρίθηκε στα εισερχόμενα πακέτα ICMP. Το επόμενο βήμα ήταν να μπορεί να “ακούει” συγκεκριμένες θύρες, να αποδέχεται τις εισερχόμενες συνδέσεις και να περνάει δεδομένα μέσω αυτών. Αυτός είναι ο πυρήνας της λειτουργικότητας του συστήματος, γι αυτό και αναπτύχθηκε ως το πρώτο πρόγραμμα οδήγησης.

Το επόμενο βήμα ήταν η επικοινωνία με το εξωτερικό περιφερειακό ADC και η λήψη μετατροπών της τάσης του. Για το λόγο αυτό, χρειαζόταν ένα πρόγραμμα οδήγησης SPI. Επειδή δεν βρέθηκε ένα πρόγραμμα οδήγησης στην κοινότητα ανοιχτού κώδικα αποφασίστηκε να αναπτυχθεί ένα απλό πρόγραμμα οδήγησης που αρχικοποιεί το ADS8668 και αποκτά τις 8 τιμές των εισόδων του μετρώντας τη γραμμή SPI. Το πρόγραμμα οδήγησης σχεδιάστηκε με γνώμονα τη φορητότητα και την ευκολία χρήσης και ενσωματώθηκε ομαλά στον κώδικα της εφαρμογής. Το πρόγραμμα οδήγησης είναι διαθέσιμο στην κοινότητα ανοιχτού κώδικα με άδεια MIT. [\[7\]](#)

Οι αρχικοποιήσεις των CAN, RS232 και RS485 και οι λειτουργίες λήψης αποστολής δημιουργήθηκαν σε μια μορφή που είναι εύκολη στη χρήση από κώδικα υψηλότερου επιπέδου, προσφέροντας ένα στρώμα αφαίρεσης μεταξύ των συναρτήσεων HW και της εφαρμογής.

Για τον εντοπισμό των σφαλμάτων και έλεγχο απόδοσης, αναπτύχθηκαν συναρτήσεις που αλληλεπιδρούν με το σειριακό περιφερειακό που είναι συνδεδεμένο στο ST-Link. Χρησιμοποιώντας αυτές τις συναρτήσεις, ο κώδικας της εφαρμογής θα μπορούσε να στείλει μηνύματα εντοπισμού σφαλμάτων στον υπολογιστή μέσω της εικονικής θύρας COM που δημιουργήθηκε από το ST-Link. Το ίδιο έγινε σε μία από τις διαθέσιμες θύρες TCP στην πλευρά του ethernet, δίνοντας την επιλογή αναφοράς μηνυμάτων εντοπισμού σφαλμάτων και μέσω ethernet.

Για την αποθήκευση δεδομένων ρύθμισης της εφαρμογής, όπως η στατική διεύθυνση IP, οι προκαθορισμένες πόρτες και άλλες πληροφορίες ακόμα και όταν η συσκευή είναι απενεργοποιημένη, χωρίς την ανάγκη να ανεβαίνει κάθε φορά ο κώδικας, αναπτύχθηκε ένα ειδικό πρόγραμμα οδήγησης μνήμης Flash. Αυτό το πρόγραμμα οδήγησης είναι σε θέση να διαβάζει και να γράφει μπλοκ δεδομένων από και προς τη μνήμη Flash του MCU, επιτρέποντας την αποθήκευση και την επαναφορά πληροφοριών σε περίπτωση απενεργοποίησης της συσκευής.

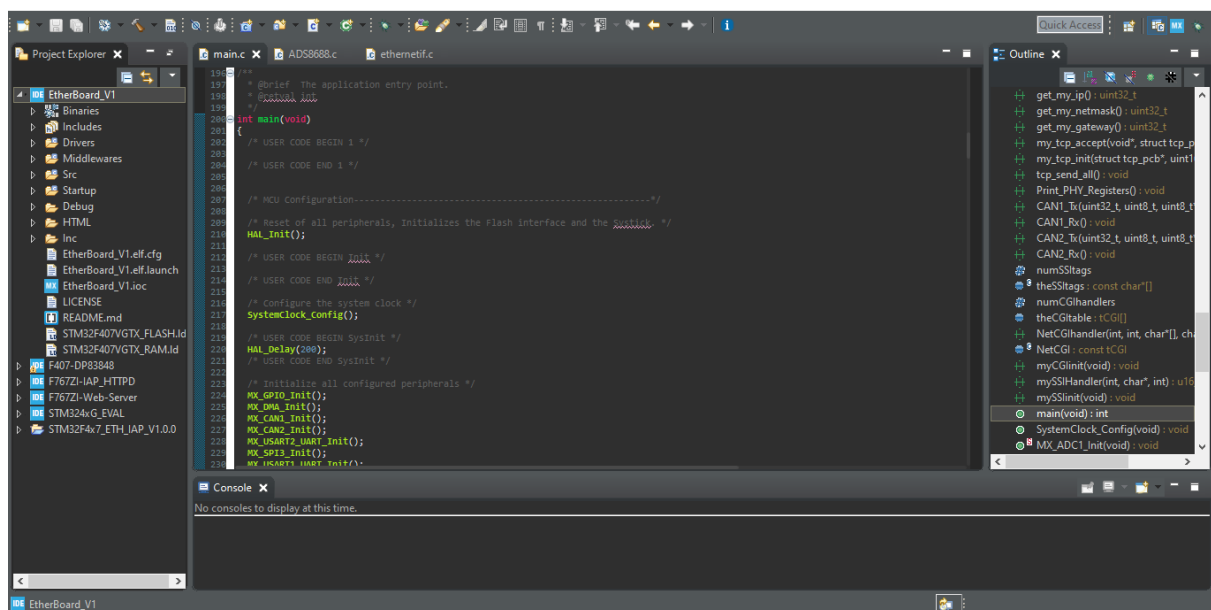
Τα παραπάνω προγράμματα οδήγησης αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν ξεχωριστά προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία σχεδιασμού και να αποφευχθούν λάθη που αυξάνουν το χρόνο ανάπτυξης. Κάθε στοιχείο δοκιμάστηκε και ενσωματώθηκε στο κύριο FW.

Ο κώδικας δοκιμάστηκε ξανά για να διασφαλιστεί ότι το νέο στοιχείο αλληλεπιδρά σωστά με το σύστημα, χωρίς να προκαλεί σφάλματα.

3.2.3 Εφαρμογή

Αφού ολοκληρώθηκαν όλες οι λειτουργίες του κατώτερου επιπέδου, αναπτύχθηκε ο κώδικας της εφαρμογής. Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε ένας απλός scheduler. Τα καθήκοντά του ήταν να σαρώσει τις εισόδους του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των 8 αναλογικών θυρών, του CAN, των 3 σειριακών εισόδων, των ψηφιακών εισόδων, την εγγραφή των δεδομένων σε όλες τις ενεργές συνδέσεις TCP και την αναφορά τυχόν σφαλμάτων ή συμβάντων που συνέβησαν κατά την τρέχουσα εκτέλεση του κώδικα.

Για να επιτραπεί στον χρήστη να αλλάξει τις ρυθμίσεις του συστήματος, προστέθηκε ή εφαρμογή μιας προσαρμοσμένης σελίδα HTML που εξυπηρετείται από το πρόγραμμα οδήγησης LWIP που είναι μια στοίβα TCP/IP ανοιχτού κώδικα σχεδιασμένη για ενσωματωμένα συστήματα. Η σελίδα είναι διαδραστική. Εμφανίζει τις τρέχουσες ρυθμίσεις που υπάρχουν στον μικροελεγκτή, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει μεταβλητές του συστήματος. Έτσι δεν χρειάζεται να ανεβαίνει νέος κώδικας κάθε φορά που χρειάζεται μια μικρή τροποποίηση στις παραμέτρους του συστήματος.



Εικόνα 30.

Ο πλήρης κώδικας είναι διαθέσιμος στο github με άδεια MIT. [8]

4 Αποτελέσματα

4.1 Πλατφόρμα δοκιμών

Μετά την υλοποίηση και δοκιμή των HW και FW, δοκιμάστηκε το πλήρες σύστημα σε πραγματικές συνθήκες. Το σχεδιασμένο και συναρμολογημένο HW και το FW που δοκιμάστηκαν στην πλακέτα NUCLEO, συνδυάστηκαν με διάφορους αισθητήρες γενικής χρήσης προκειμένου να αξιολογηθούν οι λειτουργίες του συστήματος. Οι αισθητήρες συνδέθηκαν στην πλακέτα και οι μετρήσεις τους προωθήθηκαν σε μια εφαρμογή που τις οπτικοποιεί. Η πλακέτα συνδέθηκε σε ένα απλό δίκτυο ethernet που περιλάμβανε έναν υπολογιστή που εκτελούσε την εφαρμογή οπτικοποίησης.

Οι προαναφερθείς αισθητήρες επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος και προκειμένου να παράξουν δεδομένα που μπορούν στη συνέχεια να οπτικοποιηθούν. Δεδομένου ότι ο στόχος ήταν η γρήγορη αξιολόγηση της λειτουργικότητας του συστήματος, οι επιλεγμένοι αισθητήρες ήταν χαμηλού κόστους, γενικής χρήσης και με μια απλή αναλογική έξοδο. Επιλέχθηκαν με στόχο την απλοποίηση του κώδικα της εφαρμογής και την αποφυγή ανάπτυξης πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Για κάθε αισθητήρα, πάρθηκε περιοδικά μια απλή μέτρηση τάσης που στη συνέχεια μεταφράζεται σε φυσικό μέγεθος. Οι μετρήσεις, έπειτα, στέλνονται μέσω του ethernet (μία μέτρηση ανά θύρα ethernet) στον υπολογιστή.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται παρακάτω.

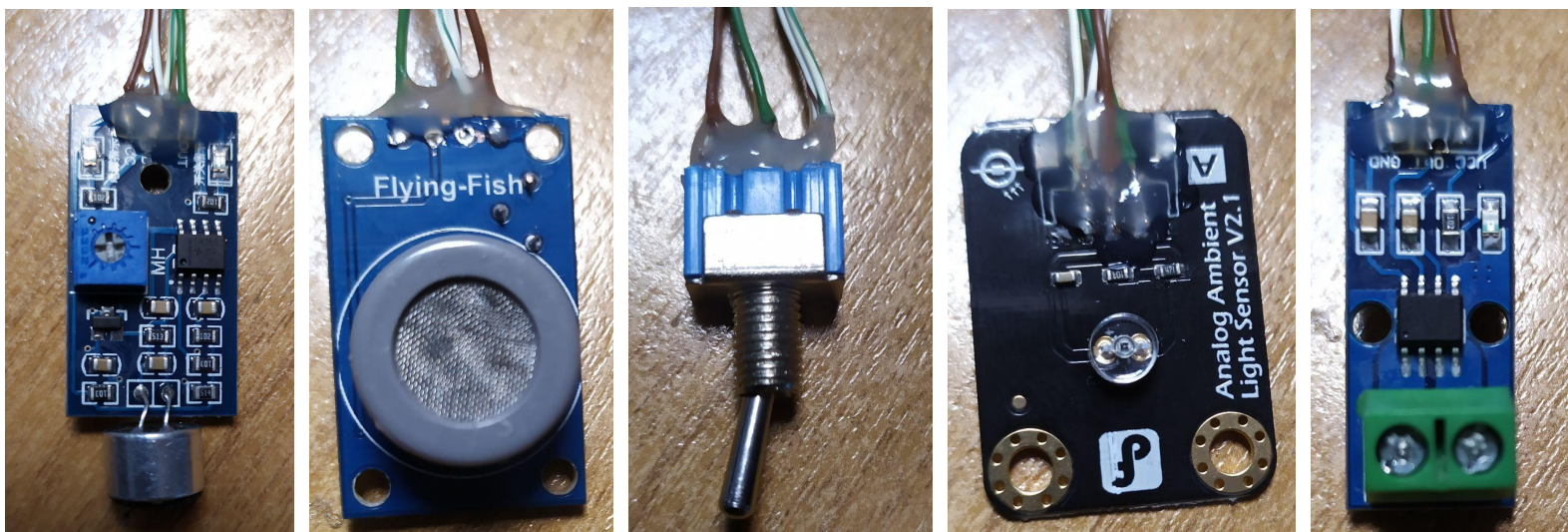
Αισθητήρας ήχου

Αισθητήρας CO

Απλός διακόπτης

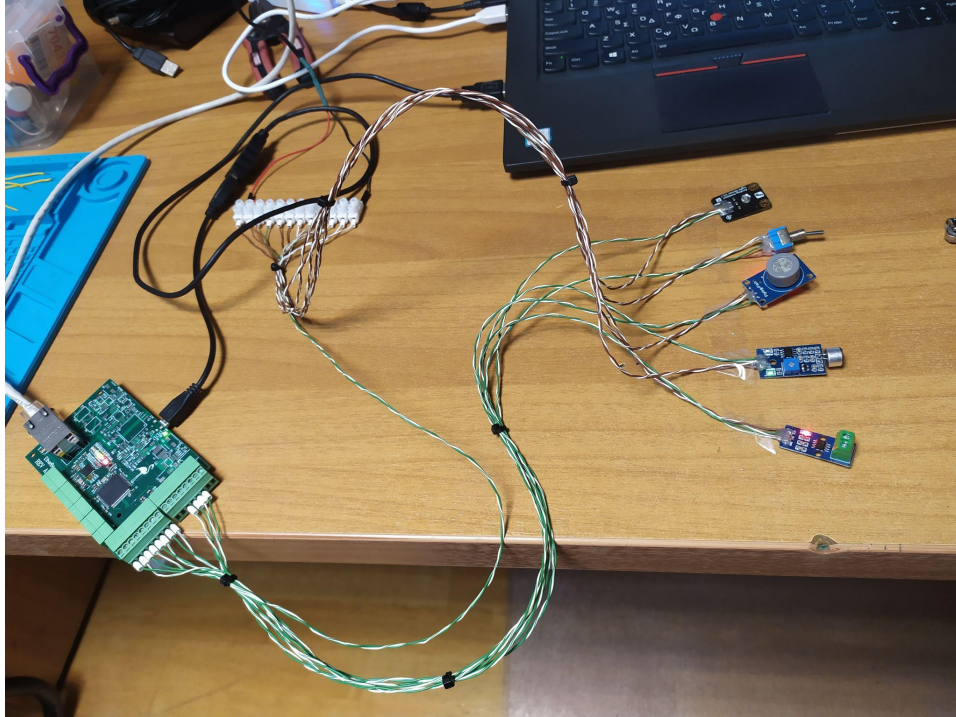
Αισθητήρας φωτός

Αισθητήρας ρεύματος



Εικόνα 31.

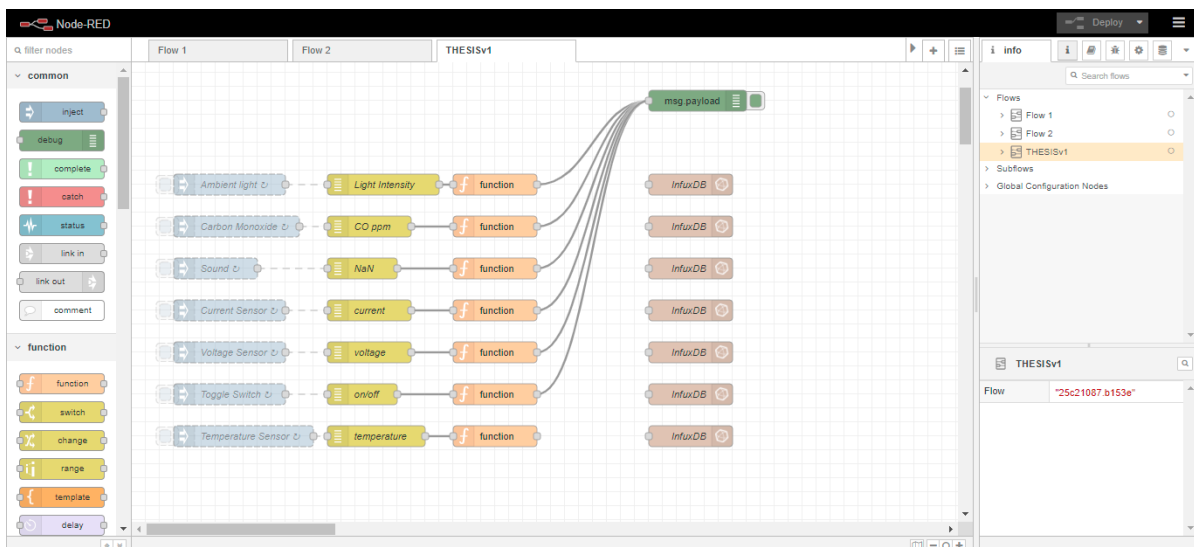
Όλοι οι αισθητήρες έχουν εύρος εξόδου 0-5V και συνδέονται στις εισόδους του εξωτερικού ADC της πλακέτας. Επίσης λαμβάνεται και η μέτρηση τάσης από την τροφοδοσία του συστήματος και τους αισθητήρες. Το Σχήμα 32 απεικονίζει τη συνδεσιμότητα του συστήματος, των αισθητήρων και του Η/Υ.



Εικόνα 32.

4.2 Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων

Οι μετρήσεις τάσης συλλέγονται από το σύστημα και αποστέλλονται μέσω ethernet στον συνδεδεμένο υπολογιστή. Κάθε μέτρηση αποστέλλεται με συχνότητα 1 Hz σε διαφορετικές πόρτες, ξεκινώντας από τη πόρτα 5000. Ο συνδεδεμένος υπολογιστής στο δίκτυο συλλέγει τις τιμές μέσω της εφαρμογής ανοικτού κώδικα [NodeRed](#), που κάνει πολύ εύκολες τις εργασίες που σχετίζονται με το δίκτυο και τη συνδεσιμότητα. Δημιουργήθηκε ένα μπλοκ σύνδεσης TCP για κάθε θύρα του συστήματος που τροφοδοτούσε τα δεδομένα μέτρησης κάθε αισθητήρα. Τα δεδομένα μέτρησης ήταν η τάση εξόδου κάθε αισθητήρα. Αυτή η τάση στη συνέχεια περνάει μέσω ενός κανόνα μετατροπής που μεταφράζει τη μέτρηση στην πραγματική φυσική τιμή του κάθε αισθητήρα.



Εικόνα 33.

Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων για να μπορέσουν στη συνέχεια να οπτικοποιηθούν. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η βάση δεδομένων [InfluxDB](#), καθώς είναι πολύ εύκολο να ρυθμιστεί και να διασυνδεθεί με το NodeRed. Οι μετρήσεις κάθε αισθητήρα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων με τη μορφή χρονοσειρών, προκειμένου να έχουμε πρόσβαση σε ιστορικές μετρήσεις, καθώς και τροφοδοσία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Για την οπτικοποίηση, επιλέχθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα [Grafana](#). Το Grafana συνδέεται με την βάση δεδομένων InfluxDB και έχει πρόσβαση σε όλα τα αποθηκευμένα δεδομένα κάθε χρονική στιγμή. Η οπτικοποίηση των δεδομένων γίνεται με τη χρήση dashboards, γραφημάτων και άλλων γραφικών στοιχείων (widgets). Έτσι είναι εφικτή η προβολή ιστορικών μετρήσεων, η δημιουργία παράγωγων συνδυαστικών διαγραμμάτων και ειδοποιήσεων.

Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιήθηκε ένα widget για τις μετρήσεις κάθε αισθητήρα και ανάλογα με τον τύπο της μέτρησης, είναι ορατά και προηγούμενα δεδομένα. Το Σχήμα 34 παρουσιάζει τον πίνακα με τα διάφορα widget.



Εικόνα 34.

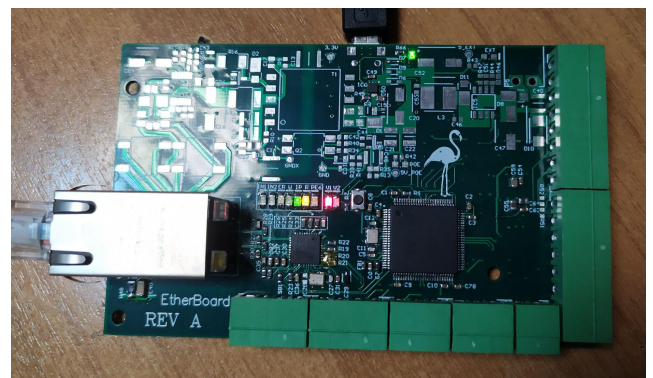
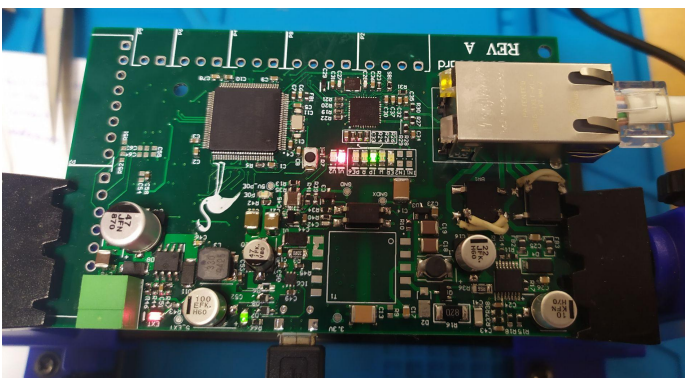
5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Οι προδιαγραφές σχεδιασμού και οι απαιτήσεις του συστήματος έχουν ικανοποιηθεί σε μεγάλο ποσοστό. Όλες οι απαιτούμενες είσοδοι συστήματος έχουν υλοποιηθεί και λειτουργούν με την ορισμένη απόδοση και συμπεριφορά.

Το σύστημα συνδέεται με γενικούς βιομηχανικούς αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες και παρέχει ακριβή και συνεχή δεδομένα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εφαρμογές προληπτικής συντήρησης και πρόβλεψης, καθώς και να αποθηκευτούν ως ιστορικά δεδομένα σε βάση δεδομένων.

Το σύστημα σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αρθρωτό για χρήση σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκολο για κάποιον χωρίς προηγμένες τεχνικές δεξιότητες να το εγκαταστήσει και να το ρυθμίσει σύμφωνα με την περίπτωση και τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Παρά την έλλειψη επιλογών στο web interface, η εγκατάστασή του είναι γρήγορη και εύκολη, ενώ είναι ορατές όλες οι κρίσιμες πληροφορίες και παράμετροι στο χρήστη.

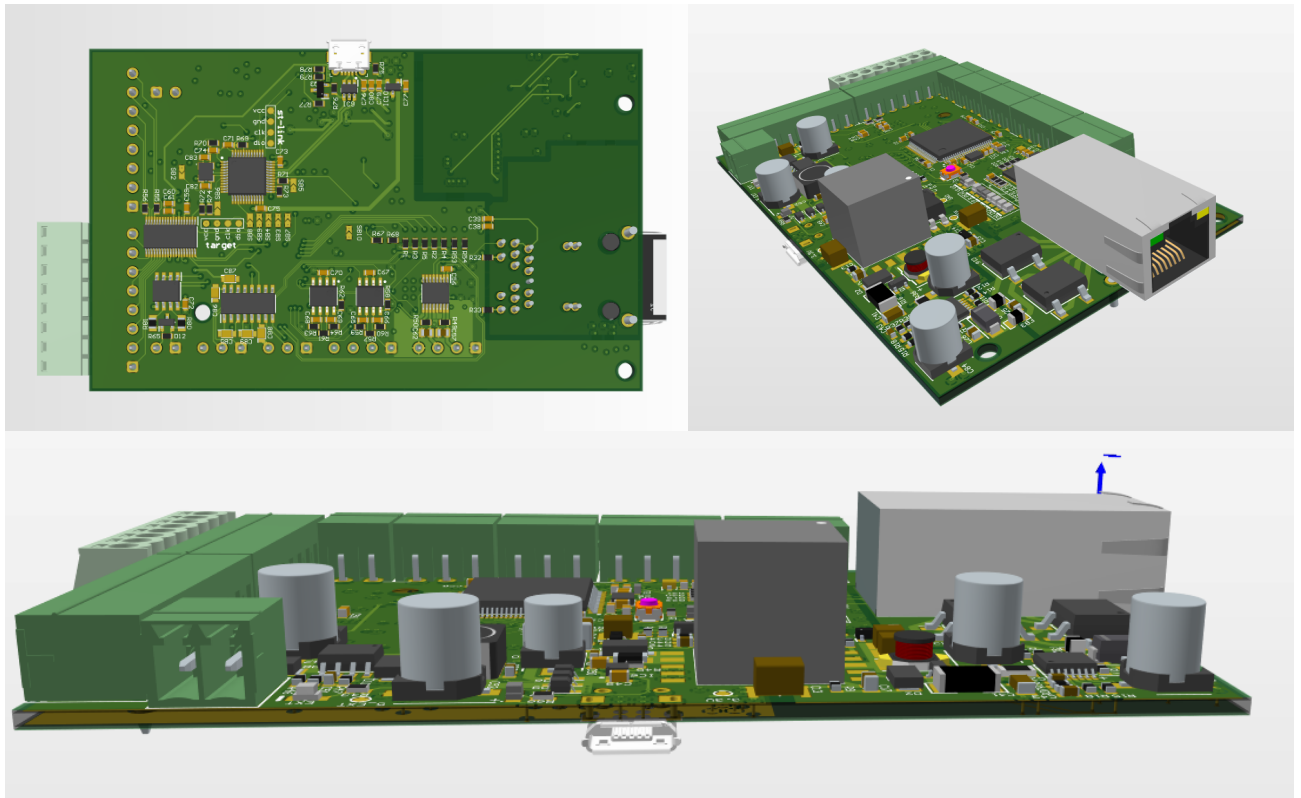
Στα προηγούμενα κεφάλαια, καλύφθηκε η διαδικασία σχεδιασμού, από το υψηλότερο επίπεδο, μέχρι το κύκλωμα και τη σχεδίαση του HW. Επίσης, αναφέρθηκαν μερικές ιδέες για την ανάπτυξη του FW. Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν κάλυψε την υλοποίηση ενός συστήματος που χειρίζεται δεδομένα, όπως θα συνέβαινε σε μια πραγματική βιομηχανική εφαρμογή. Ωστόσο, για λόγους επίδειξης, αναπτύχθηκε μία εφαρμογή παρακολούθησης για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης και την προβολή των ικανοτήτων του συστήματος. Προσαρτώντας κάποιους αισθητήρες χαμηλού κόστους στο σύστημα και συνδέοντάς το σε ένα απλό δίκτυο, και μέσω λογισμικού ανοιχτού κώδικα μπορέσαμε να δημιουργήσουμε μια εφαρμογή παρακολούθησης με αρκετές δυνατότητες για μια μικρή επιχείρηση. Οι επιθυμητές μετρήσεις τροφοδοτούνται με 1Hz στον υπολογιστή που εκτελεί την εφαρμογή και οπτικοποιούνται με απλό τρόπο. Διατίθενται επίσης ιστορικά στοιχεία, προκειμένου να γίνουν γρήγορες συγκρίσεις.



Εικόνα 35.

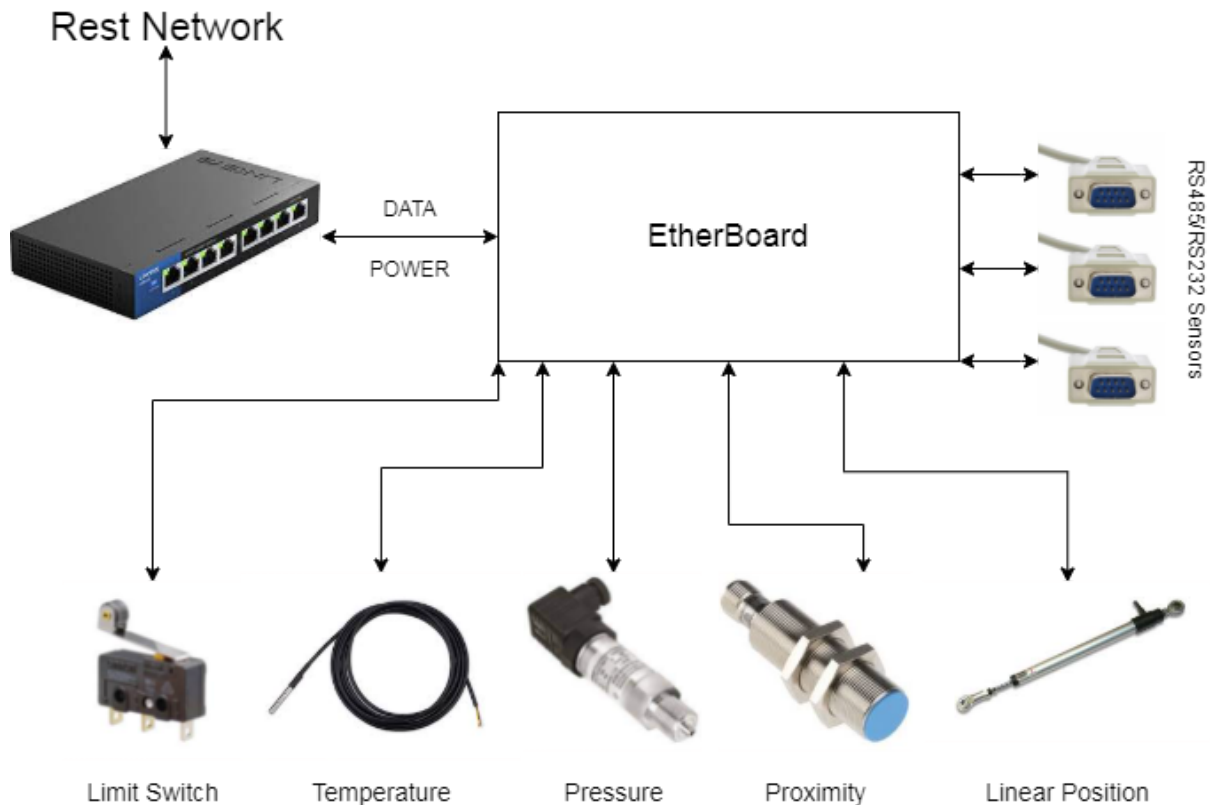
Συνολικά, η παρούσα εργασία κάλυψε την πλειοψηφία των σχεδιαστικών αποφάσεων καθώς και τις τεχνικές που απαιτούνται για να σχεδιαστεί και να εφαρμοστεί ένα απλό PCB με συνδεσιμότητα ethernet και πολλαπλών αισθητήρων. Επιπλέον, επιδείχθηκαν και εφαρμόστηκαν διάφορες επιλογές τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένων κυκλωμάτων PoE

και DC-DC, καθιστώντας τη συσκευή μια πλατφόρμα HW και FW, με αρθρωτές δυνατότητες προσθήκης και τροποποιήσεων ώστε να καλύπτει ανάγκες αρκετών εφαρμογών.



Εικόνα 36.

5.1 Εφαρμογή στην πράξη

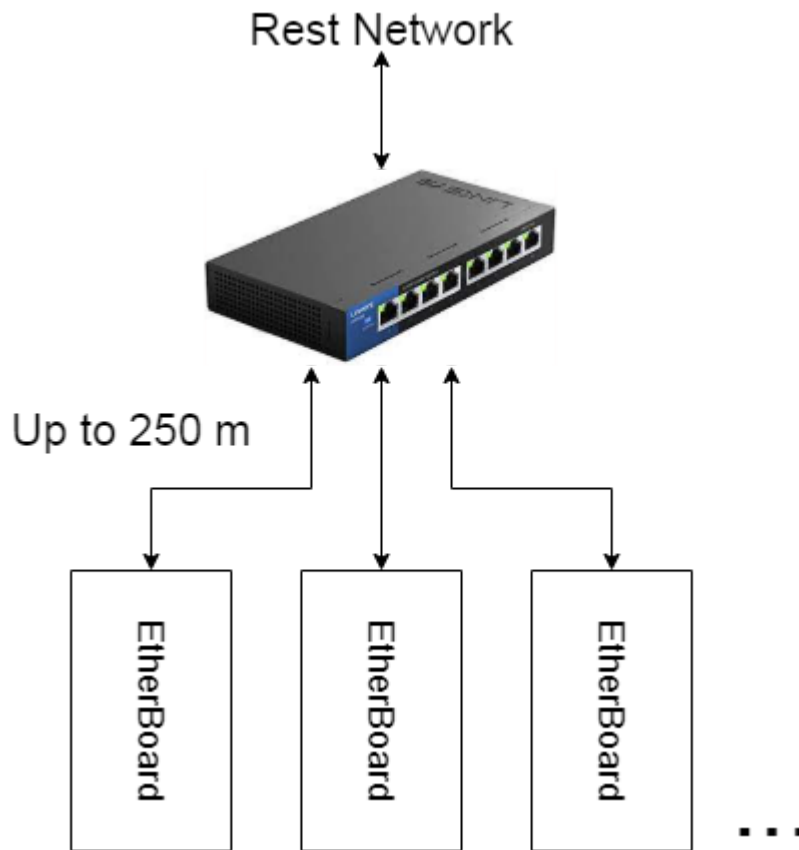


Εικόνα 37.

Η εικόνα 37 απεικονίζει ένα παράδειγμα πιθανών αισθητήρων που μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα. Παρακάτω δίδονται τυπικές βιομηχανικές εφαρμογές της οποίες μπορεί να ικανοποιήσει το σύστημα της εργασίας:

- Πόρτα/καταπακτή με απλό διακόπτη
- Στροφές άξονα με αισθητήρα εγγύτητας (proximity sensor)
- Μέτρηση πλάτους με οπτικό λέιζερ
- Πολλαπλή μέτρηση θερμοκρασίας σημείου για χαρτογράφηση θερμοκρασίας
- Μετατόπιση μηχανής με χρήση γραμμικών ποτενσιόμετρων
- Δόνηση μηχανής με χρήση αναλογικών επιταχυνσιομέτρων (δείκτης προληπτικής συντήρησης)
- Υδραυλική/Πίεση και θερμοκρασία αέρα με βιομηχανικούς αισθητήρες 10V
- Φως περιβάλλοντος, Ποιότητα αέρα, συγκέντρωση CO/CO₂, Ηχοστάθμη

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, η συσκευή χρειάζεται μια γραμμή PoE που παρέχει την τροφοδοσία και μεταφέρει τα δεδομένα από τη συσκευή στο δίκτυο και αντίστροφα. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει ανάγκη πρόσθετης παρακολούθησης με εξωτερικούς αισθητήρες ή ακόμη να λειτουργήσει ως πηγή δεδομένων αισθητήρα μηχανής για παλιά μηχανήματα που δεν διαθέτουν συνδεσιμότητα δικτύου.



Εικόνα 38.

Εφόσον το σύστημα χρησιμοποιεί κοινές συνδέσεις TCP μέσω IP, η επέκταση του συστήματος είναι εύκολη και αντιμετωπίζεται όπως οποιαδήποτε άλλη συσκευή δικτύου, περνώντας από switches ή/και διαφορετικά δίκτυα. Το Σχήμα 38 απεικονίζει τη χρήση πολλαπλών συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε έναν μόνο διακόπτη PoE. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές μπορούν, χωρικά να βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία στο εταιρικό δίκτυο ή ακόμα και σε αυτόνομο εσωτερικό δίκτυο.

5.2 Κόστος παραγωγής

Στον πίνακα 7 φαίνεται το συνολικό κόστος παραγωγής για πέντε συσκευών, καθώς και το κόστος μονάδας.

Περιγραφή	Κόστος Project 5 συσκευές	Κόστος μονάδος
Εξαρτήματα	637,56 €	127,512 €
PCBs	28,37 €	5,674 €
Συνολικό κόστος	665,93 €	133,159 €

Πίνακας 7.

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το κόστος μιας συσκευής δεν υπερβαίνει το προκαθορισμένο ποσό των 200 ευρώ που ορίστηκε στο κεφάλαιο με τις απαιτήσεις του συστήματος. Αναφέρθηκε σε πολλά σημεία αυτής της εργασίας ότι το συνολικό κόστος προκύπτει από το σχεδιασμό ενός πρωτότυπου. Αυτό σημαίνει ότι για παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας συσκευών, η τιμή μονάδος θα είναι χαμηλότερη. Το κόστος μπορεί να μειωθεί ακόμη περισσότερο αφαιρώντας κομμάτια της συσκευής που δεν είναι απαραίτητα.

Στον πίνακα 8, δίδονται τιμές μονάδος διαφόρων συσκευών με παρόμοιες δυνατότητες προς σύγκριση με το παρόν σύστημα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση μας το υπολογιζόμενο κόστος δεν περιέχει προστατευτικό κουτί και πιθανά έξοδα αποστολής, όπως τα υπόλοιπα προϊόντα. Αυτά τα προϊόντα ήταν τα πιο προσιτά DAQ με παρόμοιες προδιαγραφές.

Συσκευή	Τιμή Μονάδας
Digilent 6069-410-011	1022 €
Allen-Bradley 2080-IQ4OB4	305 €
Digilent 6069-410-015	419 €
DATAQ DI-4000	370 €

Πίνακας 8.

Είναι προφανές ότι ακόμα κι αν προσθέσουμε άλλα 100 ευρώ για τη σχεδίαση και την κατασκευή κατάλληλου προστατευτικού κουτιού, η συσκευή μας εξακολουθεί να είναι πιο οικονομική από άλλες παρόμοιες συσκευές της αγοράς.

6 Σχόλια και Προτάσεις για Μελλοντική Επέκταση και Έρευνα

Παρακάτω αναφέρονται οι περιορισμοί και τα θέματα που εντοπίστηκαν κατά την ανάπτυξη του συστήματος καθώς και προτάσεις και συστάσεις για τη μελλοντική έρευνα του συστήματος.

6.1 Περιορισμοί και Γνωστά Θέματα

Ο πρώτος περιορισμός του συστήματος, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, είναι η συνολική απόδοση και τα χαρακτηριστικά των αναλογικών εισόδων. Αυτά ορίζονται από τις προδιαγραφές του εξωτερικού ADC και επιλέχθηκαν με κριτήριο τον καλύτερο συνδυασμό ταχύτητας, κόστους και ακρίβειας μέτρησης.

Δεν έγινε πλήρης ανάπτυξη του περιβάλλοντος web. Η παρούσα υλοποίηση παρέχει μόνο τη δυνατότητα αλλαγής IP διεύθυνσης ή τη δυνατότητα απόκτηση IP μέσω DHCP. Αυτό έγινε σκόπιμα αφού δεν ήταν η κύρια λειτουργία του συστήματος και δόθηκε προτεραιότητα στην ανάπτυξη του κώδικα οδήγησης των περιφερειακών (peripheral drivers) και στην ανάπτυξη της εφαρμογής.

Η πρώτη έκδοση του PCB είχε μερικά λάθη που, σε συνδυασμό με τη συγκόλληση με το χέρι, οδήγησαν σε απροσδιόριστες συμπεριφορές του FW και της περιφερειακής επικοινωνίας. Σε μία δεύτερη έκδοση θα μπορούσαν να διορθωθούν αυτά τα λάθη και επίσης να αφαιρεθεί το κύκλωμα εντοπισμού σφαλμάτων για να μειωθεί το συνολικό κόστος.

6.2 Μελλοντική Επέκταση και Έρευνα

Το πρώτο βήμα επέκτασης του συστήματος θα ήταν η ουσιαστική βελτίωση των μετρήσεων του αισθητήρα. Θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένα ψηφιακό φίλτρο, για την εξομάλυνση των τιμών που προέρχονται από το εξωτερικό ADC. Δεδομένου ότι αυτό χρησιμοποιεί το SPI για τη μεταφορά των μετατρεπόμενων τάσεων, η υλοποίηση της επικοινωνίας μέσω DMA θα εξοικονομούσε χρόνο στην εκτέλεση του κώδικα και θα αύξανε την απόδοση της εφαρμογής. Το φίλτρο και το DMA θα μπορούσαν να υλοποιηθούν όλα σε περιβάλλον διακοπών με έναν κυκλικό buffer, όπου ο μισός χρησιμοποιείται για την αποδοχή νέων μετρήσεων και ο άλλος μισός χρησιμοποιείται για την εκτέλεση μιας μεθόδου υπολογισμού μέσου όρου ή άλλου τύπου φίλτρου. Το μέγεθος αυτού του buffer θα καθοριστεί από τη στρατηγική φιλτραρίσματος.

Το δεύτερο βήμα επέκτασης, θα ήταν η βελτίωση του web Interface του συστήματος. Θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με χαρακτηριστικά που το καθιστούν πιο παραμετρικό καθιστώντας την εγκατάσταση του συστήματος ευκολότερη και ταχύτερη. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσαν να προστεθούν:

- Αφηρημένα κανάλια αισθητήρων που μπορούν αργότερα να αντιστοιχιστούν σε ένα περιφερειακό.
- Δυνατότητα αλλαγής παραμέτρων των αισθητήρων από το χρήστη όπως:
 - συχνότητα καταγραφής
 - πόρτα ethernet

- εύρος τάσης
- μαθηματικές πράξεις (κέρδος και μετατόπιση)
- λοιπές λειτουργίες
- Δυνατότητα μεταφόρτωσης νεότερων εκδόσεων του FW μέσω ethernet, χωρίς την ανάγκη φυσικής πρόσβασης στη συσκευή.

Ως τρίτο βήμα επέκτασης θα ήταν ο σχεδιασμός ενός ξεχωριστού PCB που να επεκτείνει τις δυνατότητες εισόδου του συστήματος και επίσης να εισάγει νέους τύπους εισόδων. Αυτή η επέκταση θα μπορούσε να συνδεθεί στο σύστημα μέσω ενός από τους δύο διαθέσιμους διαύλους CAN για την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών ελέγχου με το κύριο PCB του συστήματος. Στη συνέχεια, αυτές οι πληροφορίες θα ανακατευθύνονται στην κύρια ροή δεδομένων μέσω της σύνδεσης TCP ethernet. Αυτή η λύση είναι πολύ οικονομική, καθώς το πιο ακριβό εξάρτημα στο σύστημα είναι η κυρίως πλακέτα. Αντίθετα οι επεκτάσεις είναι λιγότερο δαπανηρές στη σχεδίαση και την κατασκευή, και συμβάλλουν πολύ στην αρθρωτή δομή του συστήματος.

Για περαιτέρω επέκταση των δυνατοτήτων της συνδεσιμότητας της συσκευής, θα μπορούσε να προστεθεί μια επιπλέον μονάδα ή μια άλλη έκδοση που υλοποιεί μια απλή μονάδα GPRS (δεδομένα κινητής τηλεφωνίας). Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα θα μπορούσε να στείλει τις μετρήσεις των αισθητήρων ασύρματα μέσω ενός δικτύου 4g/5g σε έναν αποκλειστικό διακομιστή δεδομένων. Η συσκευή θα χρειαζόταν τότε εξωτερική τροφοδοσία, αφού το καλώδιο δικτύου δεν θα χρειαζόταν πλέον. Αυτή η λύση είναι ιδανική για μικρές και απομακρυσμένες επιχειρήσεις που είτε δεν διαθέτουν, είτε δεν έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης τοπικού δικτύου, όπως μία γεωργική εγκατάσταση.

Το ίδιο θα μπορούσε να εφαρμοστεί με δίκτυα WiFi ή ακόμα και LoRa, καθιστώντας τη συσκευή έναν κόμβο στο δίκτυο internet of things (IoT).

Βιβλιογραφία

- [1] Oscillator design guide for STM8/STM32 MCUs and MPUs
https://www.st.com/resource/en/application_note/an2867-oscillator-design-guide-for-stm8afals-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
- [2] NXP Application note for Automotive Ethernet
<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN12088.pdf>
- [3] PoE Explained
<https://www.veracityglobal.com/resources/articles-and-white-papers/poe-explained-part-2.aspx>
- [4] Ethernet Connector Datasheet
<https://eu.mouser.com/datasheet/2/643/dr-MAG-0826-1X1-TKL-F-1670779.pdf>
- [5] TI Controller Area Network Physical Layer Requirements
<https://www.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf>
- [6] 4-20mA Current Loop Cost effective design
<https://resources.altium.com/p/how-to-design-a-4-20ma-current-loop-receiver-with-minimal-components>
- [7] ADS8668 SPI Driver
<https://github.com/obatsis/ADS8688-STM32>
- [8] Application Code
<https://github.com/obatsis/EtherBoard>
- [9] Data Acquisition Handbook
<https://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/data-acquisition-handbook.pdf>
- [10] The resistor Guide
http://www.resistorguide.com/pictures/The_Resistor_Guide.pdf
Some STM32 tutorials and seminars
- [11] TIDM-TM4C129POE Reference design
<https://www.ti.com/tool/TIDM-TM4C129POE#tech-docs>
- [12] Design Considerations for Mixed-Signal, How to Design a PCB Layout
https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/mixed_signal_design.pdf
- [13] Partitioning and Layout of a Mixed-Signal PCB
<http://ee.mweda.com/imgqa/smqh/circuit/circuit-1012qaf1lhzomy.pdf>