



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**Σχολή Αγροτικής Παραγωγής, Υποδομών και Περιβάλλοντος
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Τομέας Αγροτικών Κατασκευών και Γεωργικής Μηχανολογίας
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας**

Διδακτορική Διατριβή

**"Βελτιστοποίηση της Ευρωστίας του Υλικού των
Αρχιτεκτονικών Ανοικτής Πηγής για την Ανάπτυξη και την
Υλοποίηση Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στο
Πεδίο της Γεωργίας"**

Δημήτριος Δ. Πυρομάλης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Κωνσταντίνος Γ. Αρβανίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

2017



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**Σχολή Αγροτικής Παραγωγής, Υποδομών και Περιβάλλοντος
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Τομέας Αγροτικών Κατασκευών και Γεωργικής Μηχανολογίας
Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας**

Διδακτορική Διατριβή

**"Βελτιστοποίηση της Ευρωστίας του Υλικού των
Αρχιτεκτονικών Ανοικτής Πηγής για την Ανάπτυξη και την
Υλοποίηση Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στο
Πεδίο της Γεωργίας"**

Δημήτριος Δ. Πυρομάλης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Κωνσταντίνος Γ. Αρβανίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

2017

Διδακτορική Διατριβή

"Βελτιστοποίηση της Ευρωστίας του Υλικού των Αρχιτεκτονικών Ανοικτής Πηγής για την Ανάπτυξη και την Υλοποίηση Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στο Πεδίο της Γεωργίας"

Δημήτριος Δ. Πυρομάλης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. Κωνσταντίνος Γ. Αρβανίτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Τριμελής Επιτροπή Παρακολούθησης:

1. Κωνσταντίνος Αρβανίτης
2. Νικόλαος Συγριμής
3. Σπυρίδων Φουντάς

Επταμελής Επιτροπή:

1. Κωνσταντίνος Αρβανίτης
2. Νικόλαος Συγριμής
3. Σπυρίδων Φουντάς
4. Γεώργιος Παπαδάκης
5. Παναγιώτης Παπαγέωργας
6. Ευστάθιος Χατζηευθυμιάδης
7. Κίμων Κοντοβασίλης

«Βελτιστοποίηση της Ευρωστίας του Υλισμικού των Αρχιτεκτονικών Ανοικτής Πηγής για την Ανάπτυξη και την Υλοποίηση Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στο Πεδίο της Γεωργίας»

Περίληψη:

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στην μελέτη των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών σχεδιασμού υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων και στον εντοπισμό των περιορισμών και των δυσκολιών που αυτές επιβάλλουν και την πρόταση και την δημιουργία μιας νέας αρχιτεκτονικής η οποία θα ενσωματώνει όλα τα πλεονεκτήματα όλων των υπαρχουσών αρχιτεκτονικών και στην διευθέτηση όλων των αδυναμιών και των περιορισμών. Η μεθοδολογία για την επίτευξη των στόχων περιλαμβάνει την μελέτη του σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων βασισμένου σε: α) Τυπική Αρχιτεκτονική (Typical Architecture), β) Αρχιτεκτονικές Ειδικού Σκοπού (End-Systems Architectures), γ) Αρχιτεκτονικές Εμπορικά Διαθέσιμων Λύσεων Γενικής Χρήσης (Commercial-of-the-Shelf Architectures), και δ) στις Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής (Open-Source Hardware Architectures). Τα προβλήματα, οι περιορισμοί και οι αδυναμίες κάθε μιας από τις προαναφερόμενες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων δικτύων αισθητήρων ανιχνεύονται μέσω μελετών περιπτώσεων σχεδιασμού Design Case Studies). Στην συνέχεια προτείνεται μια νέα αρχιτεκτονική η οποία θα εξαλείφει τα προβλήματα που επιβάλλουν οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές και θα δίνει έμφαση στα πλεονεκτήματα των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής και ειδικού σκοπού. Τέλος, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική εξετάζεται σε βάθος μέσω αντιπροσωπευτικών μελετών περιπτώσεων σχεδιασμού υλικού. Στα αποτελέσματα της διδακτορικής διατριβής συγκαταλέγονται: α) η πλήρης τεκμηρίωση των αδυναμιών, των περιορισμών και των προβλημάτων που επιβάλλουν οι εξεταζόμενες υπάρχουσες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν περιορισμοί και αδυναμίες που σχετίζονται με την διαχείριση ηλεκτρικών σημάτων, την διαχείριση πόρων επικοινωνίας, την διαχείριση ενέργειας, καθώς και το κόστος, την ευελιξία, την κλιμάκωση, την ανοικτότητα, την επεκτασιμότητα, την αξιοπιστία και την ευρωστία του υλικού των κόμβων. Επίσης, εμφανίστηκε πως είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας νέας αρχιτεκτονικής η οποία θα συνδυάζει την αξιοπιστία και την ευρωστία του αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού με την ευελιξία και την επεκτασιμότητα και επαναχρησιμοποίηση των αρχιτεκτονικών ανοικτής πηγής. β) η πρόταση και η δημιουργία μιας νέας αρχιτεκτονικής σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων δικτύων αισθητήρων, της αρχιτεκτονικής SensoTube. Η εν λόγω αρχιτεκτονική, στηρίζεται σε μια εννιολογική αφαίρεση επτά διακριτών επιπέδων λειτουργιών μέσω των οποίων οποιοδήποτε υλικό ασύρματου κόμβου δύναται να περιγραφεί, να μελετηθεί και να σχεδιαστεί. Επί προσθέτως, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική SensoTube εισάγει την χρήση καινοτόμων μηχανισμών για την διαχείριση των σημάτων και των επικοινωνιών, τη διαχείριση του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης μικροελεγκτών, καθώς και της διαχείρισης της ενέργειας του ασύρματου κόμβου. Μέσω συγκεκριμένων μελετών περιπτώσεων σχεδιασμού αποδεικνύεται πως η προτεινόμενη αρχιτεκτονική SensoTube διασφαλίζει την κλιμάκωση, την ευελιξία, την επαναχρησιμοποίηση, τον επανακαθορισμό και την επεκτασιμότητα που απαιτούνται στον σχεδιασμό και στην υλοποίηση εύρωστου υλικού ασύρματων κόμβων για το απαιτητικό περιβάλλον της Γεωργίας.

Επιστημονικά Πεδία: Επιστήμες Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, Ηλεκτρονικού Μηχανικού & Μηχανικού Η/Υ, και Γεωπονία, Δασολογία, και Αλιεία

Λέξεις Κλειδιά: Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων; Υλικό Ανοικτής Πηγής; Γεωργία; Γεωργία της Ακριβείας; Σχεδιασμός Ενσωματωμένων Συστημάτων; Αρχιτεκτονική Υλικού

“Optimization of the Open-Source Hardware Architectures’ Robustness for the Implementation of Wireless Sensors Networks in the Domain of Agriculture”

Abstract:

This doctoral thesis aims firstly to study the existing architectures for wireless sensors networks nodes’ hardware design and to identify their limitations, constraints and difficulties, and secondly to propose and establish of a novel architecture that can combine the advantages of existing architectures and ensure the elimination of any limitation and constraints in order to design hardware for nodes deployed in real-world applications in the harsh environment of agriculture. The methodology to meet the aforementioned aims includes: first the implementation of specific nodes’ hardware design case studies based on: i) the Typical Architecture, ii) the End-Systems Architectures, iii) the Commercial-of-the-Shelf Architectures, and iv) the Open-Source Hardware Architectures in order to identify particular issues per existing architecture; and second, the establishment of a new architecture for hardware design that can ensure the elimination of any issue such as those imposed by the existing architectures and that it can provide the advantages of End-Systems architectures with the benefits of Open-Source Hardware architectures. The results of the doctoral thesis include firstly the identification and presentation of specific constraints and limitations associated with each of the existing architectures of nodes’ hardware design. In particular, the traditional typical architecture appears to be insufficient in integrating new challenging technologies; End-Systems architectures whereas ensure focused solutions with optimized hardware of nodes they impose significant issues regarding scalability, expandability, reusability and high cost and longevity; Commercial-of-the-Shelf (COTS) Architectures on the other hand they found to be highly improper for deployments in real-world agricultural wireless sensors networks’ applications; while the Open-Source Hardware (OSH) architectures whereas they provide extensive degree of freedom in expandability, scalability, and reusability, they suffer from poor reliability, low energy efficiency, anarchy in expansion, and low robustness for operating in the harsh agricultural environment. Secondly, results include the proposition of a new architecture, namely the SensoTube. This architecture is based on the establishment of a conceptual abstraction of seven distinct functional layers with which any wireless sensors networks nodes hardware can be studied, modeled, described, designed and implemented in a very comprehensive way. The SensoTube is described in detail. Specifically, its printed-circuit board reference model of implementation is given along with the introduction of novel mechanisms for signals and communications management, energy management, and management of the programming and debugging of microcontrollers of the nodes which allow for inter-layer services. Ultimately, the proposed architecture is evaluated and tested according particular design case studies.

Scientific Area: Electrical, Electronics and Mechanical Engineering,
Agriculture, Forestry and Fishing

Κεузορδσ” Wireless Sensors Networks; Open-Source Hardware; Agriculture;
Precision Agriculture; Embedded Systems Design; Hardware
Architecture

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Εργασιών	I
Κεφάλαιο 1 <i>Εισαγωγή - Στόχοι της Διατριβής</i>	1
1.1. Εφαρμογές των Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στην Γεωργία	2
1.2. Απαιτήσεις και Ιδιαιτερότητες στον Σχεδιασμό Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στις Γεωργικές Εφαρμογές	3
0,3, Αδυναμίες και Περιορισμοί στις Τρέχουσες Προσεγγίσεις Σχεδιασμού Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων	5
1.4. Στόχοι της Διατριβής	14
Βιβλιογραφία	16
Κεφάλαιο 2 <i>Τρέχουσες Προσεγγίσεις στον Σχεδιασμό και στην Ανάπτυξη Ασυρμάτων Κόμβων Αισθητήρων στο Πεδίο της Γεωργίας</i>	23
2.1. Αρχιτεκτονικές Ειδικού Σκοπού (End Systems Architectures)	24
2.2. Εμπορικά Διαθέσιμες Αρχιτεκτονικές Γενικής Χρήσης (COTS Architectures)	27
2.3. Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής (Open-Source Hardware Architectures)..	31
2.4. Σχεδιάζοντας Ασύρματους Κόμβους Αρχιτεκτονικής Ειδικού Σκοπού για τις Εφαρμογές Τεχνητού Φωτισμού στην Γεωργία	35
2.4.1. Ο Τεχνητός Φωτισμός στην Γεωργία	35
2.4.2. Συστήματα Φωτισμού	39
2.4.3. Η Αρχιτεκτονική LEDWIRE	49
2.4.4. Σχεδιασμός και Υλοποίηση της Αρχιτεκτονικής LEDWIRE	56
2.4.5. Συμπεράσματα μετά τον Σχεδιασμό για τις Αρχιτεκτονικές Ειδικού Σκοπού	65
Βιβλιογραφία	66
Κεφάλαιο 3 <i>Χαρακτηριστικά και Περιορισμοί των Αρχιτεκτονικών Υλικού Ανοικτής Πηγής</i>	73
3.1. Διαθέσιμες Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής	74
3.1.1. Αρχιτεκτονικές Επεκτάσιμων Πλακετών Μικροελεγκτών	75
3.1.2. Αρχιτεκτονικές Η/Υ Πλακέτας (Single-Board Computers)	79
3.1.3. Μηχανισμοί Επέκτασης Πλακετών	81
3.2. Προβλήματα και Περιορισμοί	95
3.2.1. Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση Σημάτων	96

3.2.2.	Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση Επικοινωνιών	98
3.2.3.	Προβλήματα και Περιορισμοί στον Προγραμματισμό και την Εκσφαλμάτωση Μικροελεγκτών	99
3.2.4.	Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση της Ενέργειας	100
3.2.5.	Προβλήματα και Περιορισμοί στη Φυσική Μορφή και στο Περιβάλημα Στέγασης	102
3.3.	Κριτήρια Αξιολόγησης για τις Πλατφόρμες Ανοικτής Πηγής	103
3.4.	Σχεδιάζοντας ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων Εικόνας για την Παρακολούθηση Εντόμων με Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής	103
	Βιβλιογραφία	121

Κεφάλαιο 4 *Βελτιστοποίηση Ασυρμάτων Κόμβων Αισθητήρων Υλικού Ανοικτής Πηγής*

4.1.	Το Πολυ-επίπεδο Μοντέλο των Λειτουργιών του Ιδανικού Κόμβου: Η Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική <i>SenzoTube</i>	128
4.1.1.	Επίπεδο Λειτουργίας Απόκτησης και Ελέγχου Δεδομένων	135
4.1.2.	Επίπεδο Λειτουργίας Ασύρματης Δικτύωσης	138
4.1.3.	Επίπεδο Λειτουργίας Πύλης Δεδομένων	140
4.1.4.	Επίπεδο Λειτουργίας Ιδιαιτέρων Εφαρμογών	141
4.1.5.	Επίπεδο Λειτουργίας Διαχείρισης Ενέργειας	142
4.1.6.	Επίπεδο Λειτουργίας Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης	143
4.1.7.	Επίπεδο Λειτουργίας Αποτίμησης και Δοκιμών	145
4.2.	Δι-επίπεδες Υπηρεσίες Διαχείρισης και Ελέγχου	146
4.3.	Το Μοντέλο Αναφοράς Σχεδιασμού και Ανάπτυξης	148
4.3.1.	Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Σημάτων	152
4.3.2.	Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Επικοινωνιών	160
4.3.3.	Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης	161
4.3.4.	Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Ενέργειας	166
	Βιβλιογραφία	173

Κεφάλαιο 5 *Περιβάλημα Στέγασης και Εγκατάσταση Κόμβων Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων*

5.1.	Παραδοσιακές Προσεγγίσεις	184
5.2.	Το Μοντέλο του Πλαστικού Σωλήνα ως Περιβάλημα Στέγασης και Φορέας Στήριξης	188
5.2.1.	Επιλογή Πλαστικού Σωλήνα	192

5.2.2.	Ένθεση Κόμβων σε Πλαστικό Σωλήνα	193
5.3.	Παραδείγματα Χρήσης	195
	Βιβλιογραφία	198
Κεφάλαιο 6	<i>Σχεδιασμός Κόμβων Βάσει του Υποδείγματος Υλοποίησης της Αρχιτεκτονικής SensoTube</i>	199
6.1.	Το Υπόδειγμα Σχεδιασμού της Αρχιτεκτονικής SensoTube	200
6.2.	Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης για τη Μέτρηση Περιβαλλοντικών και Εδαφικών Παραμέτρων	207
6.3.	Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Ασύρματης Δικτύωσης Βασισμένης στο Πρωτόκολλο LoRa	214
6.4.	Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Τροφοδοσίας +3.3 Vdc και +5 Vdc	222
6.5.	Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Ασύρματης Δικτύωσης Βασισμένης στο Πρωτόκολλο DASH7	227
	Βιβλιογραφία	239
Κεφάλαιο 7	<i>Αποσύνδεση των Λειτουργιών Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης από τους Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων.....</i>	241
7.1.	Τυπικές Προσεγγίσεις στο Σχεδιασμό Κυκλωμάτων Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης Κώδικα Μικροελεγκτών Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων	242
	7.1.1. Προγραμματισμός επί του Κυκλώματος (In-Circuit Programming)	242
	7.1.2. Το Πρότυπο Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης JTAG	244
7.1.3.	Περιορισμοί και Δυσκολίες στην Ανάπτυξη Κόμβων με Πολλούς Μικροελεγκτές	245
7.2.	Αποσύνδεση των Κυκλωμάτων Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης από τον Ασύρματο Κόμβο	245
7.3.	Πλεονεκτήματα από την Προτεινόμενη Αποσύνδεση	247
	7.3.1. Πλεονεκτήματα στο Ενεργειακό Ισοζύγιο του Κόμβου	248
	7.3.2. Πλεονεκτήματα στην Πολυπλοκότητα και το Κόστος του Κόμβου	252
	7.3.3. Υποστήριξη Ταυτόχρονης Ανάπτυξης Πολλών και Διαφορετικών Μικροελεγκτών στον Ίδιο Κόμβο	258
7.4.	Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης	261

Βιβλιογραφία	268
Κεφάλαιο 8 <i>Διαχείριση και Έλεγχος Ενέργειας σε Πραγματικό Τόπο και Χρόνο</i>	269
8.1. Διαθέσιμες Πρακτικές για τη Μέτρηση και τον Έλεγχο Ενέργειας ενός Ασύρματου Κόμβου	270
8.2. Οι Δυνατότητες της Αρχιτεκτονικής SensoTube στη Διαχείριση και στον Έλεγχο Ενέργειας των Λειτουργιών ενός Κόμβου	271
8.3. Αξιολόγηση και Δοκιμή Νέων Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας	272
8.3.1. Επιλογή Κατάλληλου Υβριδικού Υπερπυκνωτή για Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	281
8.3.2. Σχεδιασμός Συσκευής Υλικού Ανοικτής Πηγής για τη Μέτρηση και τον Έλεγχο Λειτουργιών Συστοιχιών Υβριδικών Υπερπυκνωτών	282
8.3.3. Μετρήσεις και Έλεγχος βάσει της Αρχιτεκτονικής SensoTube	294
Βιβλιογραφία	303
Κεφάλαιο 9 <i>Συμπεράσματα - Προοπτικές για Περαιτέρω Έρευνα</i>	307
9.1. Συμπεράσματα	308
9.2. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	319

Λίστα Εργασιών

Κατάλογος Α. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά

- [J-1]. P.Papageorgas, D.Piromalis, K.Antonakoglou, G.Vokas, D.Tseles and K.G.Arvanitis, «*Smart Solar Panels: In-Situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks*», **Energy Procedia** (ISSN: 1876-6102), Vol. 36, pp. 535-345, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.062 (Covered by Scopus).

Η εργασία έχει λάβει 25 (είκοσι πέντε) αναφορές.

- [J-2]. G.Kyriakarakos, D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis, A.I.Dounis and G.Papadakis, «*On Battery-Less Autonomous Polygeneration Microgrids: Investigation on the Combined Hybrid Capacitors / Hydrogen Alternative*», **Energy Conversion and Management** (ISSN: 0196-8904), Vol. 91, pp. 405-415, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.027. (Covered by the Science Citation Index and by Scopus, Impact Factor: 4.801, 5-Year Impact Factor: 4.631).

Η εργασία έχει λάβει 4 (τέσσερις) αναφορές.

- [J-3]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*Radio Frequency Identification and Wireless Sensor Networks Application Domains Integration using DASH7 Mode 2 Standard in Agriculture*», **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics**, Vol. 1, No. 2, pp. 178-189, 2015. DOI: 10.1504/IJSAMI.2015.070753

Η εργασία έχει λάβει 3 (τρεις) αναφορές.

- [J-4]. D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis, P.G.Papageorgas, D.I.Tseles and C.S.Psomopoulos, «*LEDWIRE: A Versatile Networking Platform for Smart LED Lighting Applications using LIN-Bus and WSNs*», **Sensors and Transducers Journal** (ISSN: 2306-8515, e-ISSN: 1726-5479), Vol. 200, No. 5, pp. 50-59, 2016. Full text available on: http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_2824.htm.

Η εργασία έχει λάβει 1 (μία) αναφορά.

- [J-5]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. **(Covered by the Science Citation Index and by Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437)**. Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.

Η εργασία έχει λάβει 1 (μία) αναφορά.

Κατάλογος Β. Ανακοινώσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια

- [C-1]. D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis and N.A.Sigrimis, «*A DASH7-based WSN Node with IEEE 1451 Compatibility for Precision Farming Applications*», **Proceedings of the 2013 EFITA/WCCA/CIGR Conference on Sustainable Agriculture Through ICT Innovation**, Torino, Italy, June 23-27, 2013. Paper C0276.
- [C-2]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*RFID and WSN Applications Integration using DASH7 Mode 2 Standard in Agriculture*», **Proceedings of the XXXV CIOSTA & CIGR V Conference 2013: From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry**, Billund, Denmark, July 3-5, 2013. Presented at the Conference and included in the CD-ROM Proceedings.

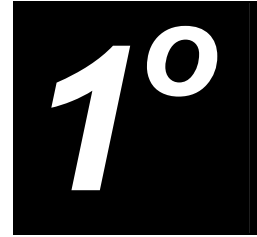
Η εργασία έχει λάβει 1 (μία) αναφορά.

- [C-3]. D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis and N.A.Sigrimis, «*DASH7 Mode 2: A Promising Perspective for Wireless Agriculture*», **Proceedings of the 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry**, Espoo, Finland, August 28-29, 2013, pp. 127-132. DOI: 10.3182/20130828-2-SF-3019.00028. **(Covered by Scopus)**.

Η εργασία έχει λάβει 2 (δύο) αναφορές.

- [C-4]. **D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*Precision Lighting for Controlled Closed Urban Horticultural Environments with Emphasis on the Use of LED Technology*», **6th International Conference on Landscape and Urban Horticulture (LUH 2016)**, Athens, Greece, June 20-24, 2016. Presented at the Conference. To appear in **Acta Horticulturae (Covered by Scopus, Print ISSN: 0567-7572, e-ISSN: 2406-6168)**.
- [C-5]. **D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*Landscape Virtualization for Remote Sensing and Actuation in Urban Horticulture based on Open-Source Design Tools*», **6th International Conference on Landscape and Urban Horticulture (LUH 2016)**, Athens, Greece, June 20-24, 2016. Presented at the Conference. To appear in **Acta Horticulturae (Covered by Scopus, Print ISSN: 0567-7572, e-ISSN: 2406-6168)**.

Κεφάλαιο



Εισαγωγή - Στόχοι της Διατριβής

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. D. D. Piromalis and K. G. Arvanitis, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», *Sensors* (ISSN: 1424-8220), Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.

1.1. Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων στην Γεωργία

Κατά την διάρκεια των τελευταίων είκοσι πέντε ετών, η γεωργία από ένας τομέας παραδοσιακά βασισμένος στην ένταση εργασίας μετατράπηκε σε έναν τομέα υψηλής τεχνολογικής έντασης. Ενδεικτικό αυτής της μεταβολής αποτελεί η εμφάνιση νέων πεδίων έρευνας και εφαρμογών υπό τις ονομασίες *γεωργία της ακριβείας* (precision agriculture), *καλλιέργεια της ακριβείας* (precision farming), *μεταβλητής αναλογίας διαχείριση* (variable-rate management), κλπ. Επί πλέον, το ανθρώπινο δυναμικό το οποίο ασχολείται με την γεωργία σήμερα επιδεικνύει σε μεγάλο βαθμό εξοικείωση με τις τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής. Αναμφίβολα, μια εξήγηση για το γεγονός αυτό αποτελεί η γενικευμένη χρήση των συσκευών κινητής τηλεφωνίας (smart phones) αλλά και των φορητών υπολογιστικών συσκευών (tablets).

Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN: Wireless Sensors Networks) εμφανίστηκε πριν από περίπου δύο δεκαετίες ως ερευνητικό αντικείμενο και μόλις τα τελευταία χρόνια έδειξε πως μπορεί, με τις δυνατότητες και τις εφαρμογές της, να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, οι επικοινωνίες και ο έλεγχος στην μεταβιομηχανική κοινωνία. Σύμφωνα με τους διεθνείς αναλυτές, η παγκόσμια αγορά των ασύρματων κόμβων αισθητήρων θα είναι της τάξης των τρισεκατομμυρίων δολαρίων στα προσεχή χρόνια [1,2].

Μέχρι σήμερα οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην γεωργία ποικίλλουν. Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων συναντώνται στην παρακολούθηση του μικροκλίματος των καλλιεργειών, την διαχείριση συστημάτων άρδευσης, την μέτρηση ιδιοτήτων του εδάφους, κλπ. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ένα μεγάλο πλήθος εργασιών σχετικά με τις εφαρμογές της τεχνολογίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας [3-6]. Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον των ειδικών της γεωργίας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών εφαρμογών που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα αποτελούν υλοποιήσεις μικρής κλίμακας με πολύ στενό χρονικό ορίζοντα, συνήθως ως μέρος ερευνητικών πειραμάτων κι όχι ως επαγγελματικές εμπορικά διαθέσιμες λύσεις.

Αν και από τεχνολογικής άποψης τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων γνωρίζουν στις μέρες μας μια μεγάλη έκρηξη από πλευράς δυνατοτήτων και εφαρμογών, η

ουσιαστική και σε μεγάλη κλίμακα χρήση τους στο πεδίο της γεωργίας δείχνει πως υστερεί σημαντικά παρά τις μεγάλες προσδοκίες των ειδικών του χώρου. Πολλοί ερευνητές, στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν τη μη ουσιαστική διείσδυση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων στην γεωργία, εντοπίζουν τις αιτίες στον σχεδιασμό του υλικού των ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, οι αιτίες σχετίζονται με την έλλειψη συμβατότητας στα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, στις ασυμβατότητες στα διάφορα διαθέσιμα εργαλεία ανάπτυξης, στην έλλειψη δυνατότητας αναδιαμόρφωσης του υλικού (reconfigurability), στην έλλειψη επεκτασιμότητας (expandability), στην δυνατότητα για κλιμακούμενο υλικό (scalable hardware) σχετικά με την επεξεργαστική ισχύ και την χωρητικότητα της μνήμης προγράμματος και της μνήμης δεδομένων, κλπ [4,7-10].

1.2. Απαιτήσεις και Ιδιαιτερότητες στον Σχεδιασμό Κόμβων Ασυρμάτων Δικτύων Αισθητήρων στις Γεωργικές Εφαρμογές

Η σύγχρονη γεωργία θεωρείται ως ένας τομέας της βιομηχανίας, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως ευάλωτος, ασταθής, πολύπλοκος, δυναμικός και εξαιρετικά ανταγωνιστικός. Η χρήση της τεχνολογίας αλλάζει ολοένα και πιο πολύ τον τρόπο με τον οποίο οι γεωργοί διαχειρίζονται τις καλλιέργειές τους. Από την άλλη πλευρά, οι γεωργοί είναι αναγκασμένοι να λαμβάνουν αποφάσεις τόσο με βραχυπρόθεσμο όσο και με μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Σε εβδομαδιαία, μηνιαία, αλλά και σε ετήσια βάση, πρέπει να λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τους συνδυασμούς στις σπορές, τις καλλιεργητικές περιόδους, τη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, τη χρήση γεωργικών μηχανημάτων, τη συλλογή, την αποθήκευση και την διάθεση των προϊόντων στα κανάλια της εφοδιαστικής αλυσίδας, κλπ. Εντός αυτού του πλαισίου, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη διαχείριση πολλών από τις λειτουργίες στο πεδίο της γεωργίας.

Εξετάζοντας την ιδιοσυγκρασία του ιδανικού ασύρματου κόμβου αισθητήρων για πραγματικές εφαρμογές (real-world applications), τα πλέον κοινά χαρακτηριστικά, όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία [11], είναι:

- η δυνατότητα για λειτουργία στο πραγματικό περιβάλλον της εφαρμογής, μακριά από το προστατευόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου,

- τα συστήματα των κόμβων βρίσκονται στα χέρια μη εκπαιδευμένων τελικών χρηστών,
- αυτονομία και επάρκεια ενέργειας,
- ανάγκη για μακρόχρονη συντήρηση και διαχείριση,
- δυνατότητα επεκτασιμότητας,
- δυνατότητα για επαναδιαμόρφωση και τροποποίηση στο υλικό αλλά και στο ενσωματωμένο λογισμικό (firmware),
- δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του υλικού,
- ευρωστία και ανθεκτικότητα,
- διαρκής, απροβλημάτιστη και αξιόπιστη λειτουργία, και
- χαμηλό κόστος.

Οποιοσδήποτε συμβιβασμός σε ένα ή σε περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα, ή ακόμα και να οδηγήσει στην πλήρη αποτυχία όλης της εφαρμογής.

Εκτός από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα οποία αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχία και τη διάρκεια γενικά σε όλες τις πραγματικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, για την περίπτωση της γεωργίας ισχύουν τα ακόλουθα [12]:

- απαιτούνται κλιμακούμενα σε μέγεθος ασύρματα δίκτυα αισθητήρων,
- τα δίκτυα περιλαμβάνουν μεγάλο πλήθος ασύρματων κόμβων,
- απαιτείται η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων,
- στο μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας τους οι ασύρματοι κόμβοι είναι ανεπιτήρητοι, και
- απαιτείται η δυνατότητα από πλευράς των ασύρματων κόμβων για διασύνδεση με τους πάσης φύσεως αισθητήρες που περιστασιακά χρησιμοποιούνται στις γεωργικές εφαρμογές,

Επί πλέον, πολύ κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία των ασύρματων δικτύων στο πεδίο της γεωργίας, αποτελεί το εξωτερικό περιβάλλον. Η λειτουργία των

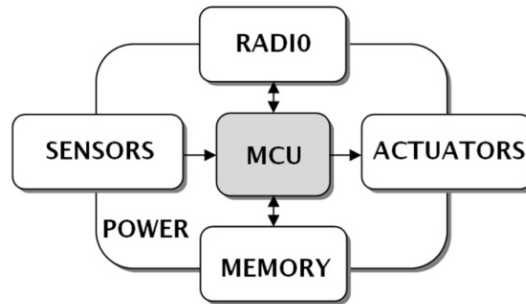
ασύρματων κόμβων αισθητήρων κάτω από αντίξοες και ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως ακραίες θερμοκρασίες, χιόνι, βροχόπτωση, υγρασία, άνεμοι, ηλιακή ακτινοβολία, κ.α., πολύ συχνά έχει ως αποτέλεσμα την αποτυχία των εγκατεστημένων εφαρμογών [13,14]. Δυστυχώς οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων, στην συντριπτική τους πλειοψηφία, δεν έχουν σχεδιαστεί για το ακραίο περιβάλλον της γεωργίας, αλλά για το εσωτερικό προστατευόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου και του γραφείου [7,10,15-17].

Από την άλλη πλευρά, είναι πολύ δύσκολη η μοντελοποίηση, η εξομοίωση (simulation), και η προσομοίωση (emulation) του εξωτερικού περιβάλλοντος. [18]). Ως εκ τούτου, ούτε τα διάφορα κυκλώματα, υποσυστήματα και συστήματα που λειτουργούν σε πραγματικές συνθήκες στο εξωτερικό περιβάλλον, μπορούν να μοντελοποιηθούν και να μελετηθούν με ακρίβεια. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν οι συσσωρευτές ενέργειας αλλά και οι ασύρματοι πομποδέκτες των οποίων η συμπεριφορά είναι πολλές φορές απρόβλεπτη και προβληματική στο πραγματικό πεδίο [19-22].

Προφανώς, γίνεται αντιληπτό πως ο σχεδιασμός ασύρματων κόμβων για τις πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας, αποτελεί ένα εξαιρετικά απαιτητικό και δύσκολο έργο.

1.3. Αδυναμίες και Περιορισμοί στις Τρέχουσες Προσεγγίσεις Σχεδιασμού Κόμβων Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Από την εμφάνισή τους, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ασύρματους κόμβους το υλικό των οποίων στηρίζεται αποκλειστικά στην αρχιτεκτονική που απεικονίζεται στην Εικόνα 1.1 [23,24]. Σύμφωνα με αυτήν την τυπική αρχιτεκτονική, η λειτουργία του ασύρματου κόμβου στηρίζεται σε έναν μικροελεγκτή (MCU: Microcontroller Unit) ο οποίος ελέγχει όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για την διασύνδεση με αισθητήρες (sensors) και ενεργοποιητές (actuators), καθώς και για την ασύρματη δικτύωση. Παρά το γεγονός πως η έρευνα για το σχεδιασμό των ασύρματων κόμβων αισθητήρων εξελίσσεται διαρκώς [25,26], η προσκόλληση στην τυπική αρχιτεκτονική είναι έντονα εμφανής.



Εικόνα 1.1. Η τυπική αρχιτεκτονική του υλικού του ασύρματου κόμβου αισθητήρων.

Το υλικό ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων μπορεί να τροποποιηθεί καταλλήλως έτσι ώστε να λειτουργεί είτε ως απλός κόμβος (end-device), είτε ως κόμβος με δυνατότητες δρομολογητή πακέτων δεδομένων των γειτονικών του κόμβων (router node), είτε ως κόμβος διαχείρισης του ασύρματου δικτύου (network coordinator). Επίσης, συνηθίζεται και η προσέγγιση της προσθήκης κυκλωμάτων επικοινωνίας με άλλα ευρύτερα δίκτυα (π.χ. διαδίκτυο, δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, κλπ) στους κόμβους διαχείρισης των τοπικών ασύρματων δικτύων αισθητήρων (gateway nodes). Σε κάθε περίπτωση, το εκάστοτε πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης πρέπει να παρέχεται σε μορφή ενσωματωμένου λογισμικού (network protocol stack firmware) έτσι ώστε να εκτελείται στο εσωτερικό του μικροελεγκτή του κόμβου.

Σχετικά με την τροφοδοσία του, ένας ασύρματος κόμβος που βασίζεται στην τυπική αρχιτεκτονική δέχεται συνήθως μόνο μια τάση τροφοδοσίας, αυτήν που χρειάζεται ο μικροελεγκτής για να λειτουργήσει. Στην πλακέτα του ασύρματου κόμβου δεν υπάρχουν κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας, π.χ. για την μετατροπή και σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας. Αυτές οι λειτουργίες, σύμφωνα με την τυπική αρχιτεκτονική, αποτελούν ευθύνες του χρήστη του κόμβου.

Τέλος, η φυσική μορφή (form factor) των ασύρματων κόμβων που έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα φαίνεται να έχει επηρεαστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό από το δόγμα του *Smart Dust*, ενός έργου για την δημιουργία κόμβων μικροσκοπικών διαστάσεων [7,27]. Η επιδίωξη για σμίκρυνση των φυσικών διαστάσεων των κόμβων μπορεί για τους φορέσιμους κόμβους (wearable nodes) να έχει νόημα, αλλά για τις εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας σίγουρα δεν αποτελεί προτεραιότητα.

Οι περισσότεροι σχεδόν από τους πρώτους κόμβους που σχεδιάστηκαν ακολουθώντας την τοπική αρχιτεκτονική, μπορεί να μην βρήκαν το δρόμο για το ράφι ως έτοιμα και αξιόπιστα προϊόντα, αλλά σίγουρα χρησιμοποιήθηκαν ως εργαλεία ανάπτυξης (development tolls) για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Με αυτά τα εργαλεία ανάπτυξης, πολλές ετερογενείς εργασίες πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία περίπου δεκαπέντε χρόνια. Όσον αφορά στις πραγματικές εφαρμογές, π.χ. στο πεδίο της γεωργίας, οι ασύρματοι κόμβοι της τοπικής, παραδοσιακής, αρχιτεκτονικής είναι υπό αμφισβήτηση σχετικά με τις δυνατότητές τους αλλά και για την διάρκεια λειτουργίας τους στο εχθρικό εξωτερικό περιβάλλον.

Από την άλλη πλευρά, ένα κόμα νέων εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων θέτουν απαιτήσεις από πλευράς του υλικού των κόμβων, τις οποίες σίγουρα η τοπική αρχιτεκτονική δεν μπορεί να ικανοποιήσει σε μεγάλο βαθμό [28]. Ενδεικτικά μερικές από αυτές τις νέες εφαρμογές είναι:

- ασύρματα δίκτυα πολυμέσων (WMNs: Wireless Multimedia Networks) [29-31],
- νέφη αισθητήρων (sensors cloud) [8],
- ενοποίηση των συστημάτων ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) και των συστημάτων αναγνώρισης και ταυτοποίησης μέσω ραδιο-συχνοτήτων (integration of WSN and radio frequency identification (RFID: Radio-Frequency Identification) [32],
- συνεργασία ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με δορυφορικά συστήματα [33], και
- διαδίκτυο των αντικειμένων (IoT: Internet of Things) [34].

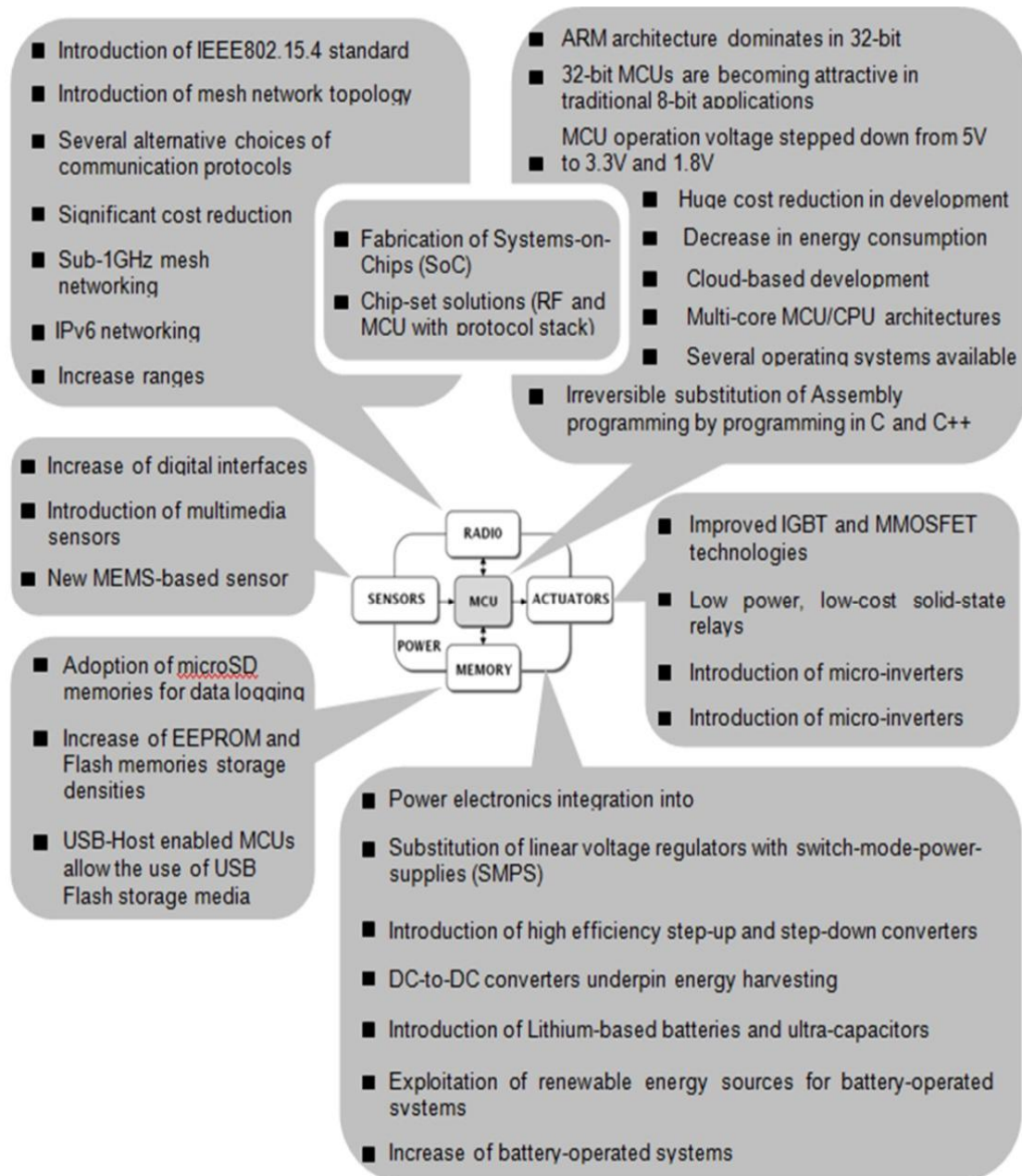
Επί πλέον, συγκεκριμένα για την τεχνολογία του υλικού των κόμβων, παρατηρείται μια πραγματική έκρηξη νέων λύσεων και σχεδιαστικών επιλογών. Καταλύτης στην πρόοδο αυτή, αποτέλεσε η γενικευμένη χρήση των συσκευών κινητής τηλεφωνίας. Οι συνεχείς πιέσεις της αγοράς για έξυπνες συσκευές κινητής τηλεφωνίας (smart phones), ανάγκασαν την παγκόσμια βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών να δημιουργήσουν νέες λύσεις όπως νέους ταχύτατους μικροελεγκτές χαμηλής κατανάλωσης, νέα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την αποδοτικότερη διαχείριση συσσωρευτών ενέργειας, νέα υποσυστήματα ασύρματης δικτύωσης

(wireless networking modules), νέους μικρο-αισθητήρες (MEMS: Micro-Electromechanical Sensors), νέους τύπους συσσωρευτών ενέργειας, κλπ. Η ένταση στην προσπάθεια για την εξέλιξη των φορητών συσκευών (κινητών τηλεφώνων) σε συνδυασμό με τις οικονομίες κλίμακος, συνέβαλλαν στην αλματώδη πρόοδο και εξέλιξη των φορητών υπολογιστικών συσκευών, όπως είναι τα tablets. Όλες οι προαναφερόμενες εξελίξεις είχαν ως αποτέλεσμα ο τομέας των ενσωματωμένων συστημάτων (embedded systems) να ωφεληθεί από διαθέσιμες λύσεις με πολύ υψηλό λόγο απόδοσης προς κόστος. Αυτές οι αλλαγές είχαν ασφαλώς μεγάλη επίδραση στο υλικό των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογικές αλλαγές οι οποίες μπορούν να έχουν θετική επίδραση στο υλικό των ασύρματων κόμβων αισθητήρων είναι:

- ανάκτηση ενέργειας από το περιβάλλον και μέθοδοι αποδοτικής διαχείρισης ενέργειας [35],
- νέα πρωτόκολλα ασύρματης δικτύωσης και επικοινωνίας δεδομένων, όπως IEEE802.15.4x, LoRa, 6LoWPAN [36,37], DASH7 [38], κλπ,
- μεγάλα δεδομένα (big data) και σύντηξη δεδομένων (data fusion) [14],
- νέες μέθοδοι αλληλεπίδρασης, ή αλλιώς διεπαφής, ανθρώπου-μηχανής (HMI: Human-Machine Interface) [10],
- νέοι ολοκληρωμένοι μικρο-αισθητήρες, όπως π.χ. οι αισθητήρες τύπου Lab-on-Chip (LoC) [39],
- νέοι μικροελεγκτές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής κατανάλωσης, όπως π.χ. οι μικροελεγκτές 32-βιτ αρχιτεκτονικής ARM [40,41], και
- νέα μέσα αποθήκευσης ενέργειας, όπως π.χ. οι συσσωρευτές ενέργειας τύπου ιόντων και πολυμερών λιθίου, υβριδικοί υπερπυκνωτές [42,43].

Στην Εικόνα 1.2 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα της τυπικής αρχιτεκτονικής του υλικού ενός ασύρματου κόμβου επισημαίνοντας για κάθε ένα από τα υποσυστήματά του τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις/προκλήσεις. Είναι προφανές πως οι απαιτήσεις για την ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στο υλικό των ασύρματων κόμβων αισθητήρων δημιουργούν ένα εξαιρετικά μεταβαλλόμενο τεχνολογικό περιβάλλον. Σ' αυτό το ταχύτατα μεταβαλλόμενο τεχνολογικό περιβάλλον, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για εργαλεία ανάπτυξης, εκπαιδευτικό υλικό,

και ερευνητικές πλατφόρμες πειραμάτων. Δυστυχώς η τοπική αρχιτεκτονική δεν μπορεί να ανταποκριθεί, σ' αυτές τις προκλήσεις, λόγω εγγενών περιορισμών στην επεκτασιμότητα, στην ανοικτότητα (openness), στην ευελιξία, στην επαναδιαμόρφωση (reconfigurability), κλπ.



Εικόνα 1.2. Οι τεχνολογικές τάσεις και αλλαγές που μπορούν να επηρεάσουν το υλικό ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων βασισμένου στην τυπική αρχιτεκτονική σχεδιασμού.

Σχετικά με τις αρχές που πρέπει να διέπουν τον σχεδιασμό ενός νέου ασύρματου κόμβου αισθητήρων, δεν αναφέρεται τίποτα ουσιαστικό στην βιβλιογραφία. Απεναντίας, παρατηρείται η κατάχρηση του όρου *αρχιτεκτονική*. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα τεράστιο πλήθος εργασιών στις οποίες η χρήση κάποιου συγκεκριμένου ολοκληρωμένου κυκλώματος, ή η χρήση κάποιου ολοκληρωμένου συστήματος (SoC: System-on-Chip), ή η χρήση ενός νέου πρωτοκόλλου ασύρματης επικοινωνίας προτείνεται ως "νέα αρχιτεκτονική" για το σχεδιασμό υλικού ασύρματων κόμβων. Στην πράξη, τέτοιες προτάσεις, αποτελούν απλή εφαρμογή σύγχρονων μεν λύσεων, αλλά έτοιμων δε, τεχνολογικών λύσεων της αγοράς. Αυτές οι "αρχιτεκτονικές" στην πράξη αποτελούν υλοποιήσεις με πολύ στενό εύρος εφαρμογής, οι οποίες σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να διασφαλίσουν την γενίκευση και την ανοικτότητα μιας πραγματικής αρχιτεκτονικής.

Στην αξιόλογη εργασία [7], αναφέρεται πως όλοι οι υπάρχοντες ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων από πλευράς υλικού κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- οι πλήρως ειδικές λύσεις (end-to-end solutions),
- οι γενικές λύσεις (generic solutions, και
- οι λύσεις για την έρευνα (research solutions).

Επί πλέον, σύμφωνα με την ίδια έρευνα, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί χώροι σχεδιασμού (design spaces) υλικού κόμβων:

- ο χώρος του δικτύου (the network space),
- ο χώρος της συσκευής (the device space), και
- ο χώρος της εφαρμογής (the application space).

Στην πράξη, εξετάζοντας τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων από την εμφάνισή τους έως τις μέρες μας, οι τρεις χώροι σχεδίασης θα μπορούσαν ίσως να θεωρηθούν και ως τρεις διαφορετικοί κόσμοι. Ενδεικτικά, ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων, πολύ συχνά, αντιμετωπίζεται με εντελώς διαφορετικό τρόπο [7]. Συγκεκριμένα στο πεδίο της γεωργίας, ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων μπορεί να έχει τις διαφορετικές θεωρήσεις που αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Διαφορετικές θεωρήσεις για τον ασύρματο κόμβο αισθητήρων.

Area of Interest	What a WSN node means
Embedded Electronics	A fast, miniaturized, MCU-based board
Communications	A protocol-powered machine
Information Technology (IT)	A client
Electronics Industry	A development tool
Agriculture original equipment manufacturing (OEM)	A proprietary, closed, turn-key solution
Agricultural Science	A remote sensor/actuator
Farmers	An expensive telemetry equipment

Όλα τα παραπάνω δημιουργούν προσκόμματα στο σχεδιασμό, στην ανάπτυξη, στην εγκατάσταση, και στη διαχείριση πραγματικών εφαρμογών ασυρμάτων δικτύων στο πεδίο της γεωργίας. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η έμφαση αντί να δίνεται στην ικανοποίηση των πραγματικών και πρακτικών απαιτήσεων της εφαρμογής στην γεωργία, δίνεται σε μεμονωμένες τεχνολογικές διαστάσεις του συστήματος του κόμβου ή της ασύρματης δικτύωσης. Ενδεχομένως, η εξήγηση γι' αυτή την προσέγγιση να είναι το γεγονός πως μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν παγιωμένες τεχνολογικές λύσεις, όπως, π.χ. αρχιτεκτονικές σχεδιασμού, εργαλεία ανάπτυξης, κλπ. Ως εκ τούτου, είναι φυσικό να απαιτούνται πολύ μεγάλοι χρόνοι εκμάθησης (learning curves) στις φάσεις του σχεδιασμού και της ανάπτυξης νέων ασυρμάτων κόμβων [4,7]. Για τον λόγο αυτό, συχνά οι ερευνητικές ομάδες με αντικείμενο την γεωργία απαρτίζονται από μέλη με διαφορετικό γνωστικό αντικείμενο και εμπειρία. Σχετικά με το επίπονο καθήκον του σχεδιασμού του υλικού ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων απαιτούνται γνώσεις, προσόντα και ικανότητες σε αντικείμενα όπως:

- αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά (digital and analog electronics),
- ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems),
- ανάπτυξη ενσωματωμένου λογισμικού μικροελεγκτών (MCUs' firmware development),
- ηλεκτρονικά ισχύος (power electronics),
- αισθητήρες (sensors),

- κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων (RF circuits),
- ασύρματες επικοινωνίες (wireless communications),
- ασύρματα δίκτυα (wireless networks),
- σχεδιασμός τυπωμένων κυκλωμάτων (printed-circuits boards (PCBs) design), και
- ανάπτυξη πρωτοτύπων (prototype development), και
- διαδικασίες δοκιμών και αξιολόγησης συστημάτων (evaluation and testing).

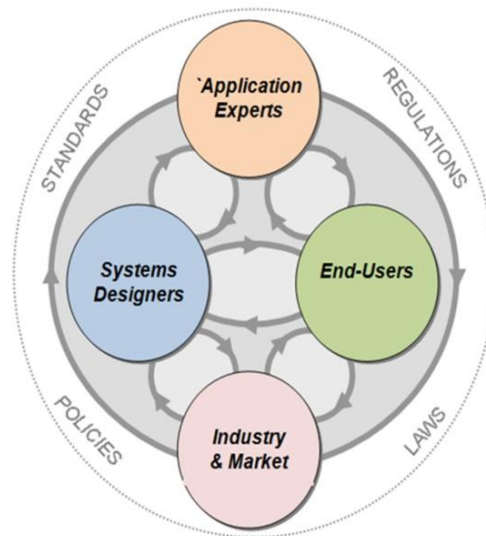
Παραδόξως, τα αντικείμενα αυτά, πάνω στα οποία μπορεί να βασιστεί ο σχεδιασμός αξιόπιστων και αποτελεσματικών ασύρματων κόμβων αισθητήρων, δεν περιλαμβάνονται στα προγράμματα εκπαίδευσης για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τις εφαρμογές του [44].

Ιδανικά, η δημιουργία επιτυχημένων πραγματικών εφαρμογών ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων στην γεωργία επιτάσσει τη συνεργασία όλων όσοι έχουν κάποιο κεκτημένο δικαίωμα σε αυτές τις εφαρμογές. Πρέπει να μπορούν όλοι να συμβάλλουν με τον δικό τους τρόπο ο καθένας έτσι ώστε στο τέλος να ικανοποιούνται όλοι όσοι έχουν ιδιον όφελος (stakeholders) από τις εφαρμογές. Οι σημαντικότεροι από αυτούς που έχουν ιδιον όφελος είναι:

- οι ειδικοί των εφαρμογών (οι γεωπόνοι και οι γεωργικοί μηχανικοί στην περίπτωση των εφαρμογών στο πεδίο της γεωργίας) (application experts), οι σχεδιαστές συστημάτων (systems designers),
- η βιομηχανία και η αγορά (industry and market),
- οι τελικοί χρήστες (end-users), και
- οι αρχές και οι φορείς (authorities).

Στην Εικόνα 1.3 απεικονίζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των σημαντικών μερών. Οι αρχές και οι φορείς αναπαρίστανται με τον εξωτερικό κύκλο σηματοδοτώντας έτσι το πλαίσιο κανονισμών, προτύπων, και νόμων μέσα στο οποίο οφείλουν να λειτουργούν οι εφαρμογές των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Τα βέλη στην Εικόνα 1.3 υποδηλώνουν τις επιδράσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Πρακτικά, αυτές σχετίζονται με την ροή υλικών (π.χ. τεχνολογικές λύσεις,

συστήματα, κυκλώματα, τεκμηριώσεις, προδιαγραφές, κλπ), και άυλων (π.χ. ικανοτήτων, ιδεών, γνώσεων, προσδοκιών, αναγκών, κλπ).



Εικόνα 1.3. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών στην ανάπτυξη μιας πραγματικής εφαρμογής ασυρμάτων δικτύων κόμβων αισθητήρων.

Σε αυτό το απαιτητικό περιβάλλον, οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων ειδικού σκοπού και γενικής χρήσης φαίνεται πως λόγω των περιορισμών τους δεν είναι επαρκείς για την ικανοποίηση των σύγχρονων απαιτήσεων. Ενδεικτικό αυτής της αδυναμίας αποτελεί η εμφάνιση και προώθηση της ιδέας του σχεδιασμού με υλικό ανοικτής πηγής (OSH: Open-Source Hardware). Στην ιδέα αυτή στηρίζονται αρκετές νέες αρχιτεκτονικές και προσεγγίσεις. Η εξήγηση για την εμφάνιση και την δημοφιλία των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής οφείλεται κατά κύριο λόγο:

- στην δυνατότητα γρήγορης ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών,
- στην ανοικτότητα (openness),
- στην δυνατότητα εύκολης και γρήγορης επέκτασης,
- στην ελεύθερη διακίνηση και χρήση έτοιμων σχεδιαστικών πόρων,

Η προσδοκώμενη συνέργεια μεταξύ διαφορετικών πεδίων έρευνας στον σχεδιασμό υλικού κόμβων, στον χώρο του υλικού ανοικτής πηγής πραγματώνεται επιτυχώς και με πολύ χαμηλό κόστος. Από πλευράς αποτελεσματικότητας και

αξιοπιστίας, οι λύσεις που στηρίζονται σε υλικό ανοικτής πηγής δεν μπορούν να ξεπεράσουν το επίπεδο των πιλοτικών πρωτοτύπων.

1.4. Στόχοι της Διατριβής

Υπό τις συνθήκες του διαρκώς εξελισσόμενου τεχνολογικού περιβάλλοντος, οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων φαίνεται να μην μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να διασφαλίζεται η προσδοκώμενη αποτελεσματικότητα, η ευρωστία, και η αξιοπιστία στις πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο. Από την πλευρά τους, οι τελικοί χρήστες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, οι οποίοι επιθυμούν λύσεις σε πραγματικά προβλήματα της καθημερινότητάς τους στις καλλιέργειες, είναι αρκετά σκεπτικοί σχετικά με τον λόγο οφέλους προς κόστος [9]. Η έλλειψη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου (development framework) ανάπτυξης το οποίο θα επέτρεπε την δημιουργία εφαρμογών από την συλλογή δεδομένων μετρήσεων έως τα συστήματα αυτόματης λήψης αποφάσεων είναι κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας [4].

Λαμβάνοντας υπ' όψη όλα τα παραπάνω, οι στόχοι της παρούσης διατριβής είναι:

- (Σ_1) ο εντοπισμός των περιορισμών και των αδυναμιών των διαθέσιμων υπαρχουσών αρχιτεκτονικών σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων, και
- (Σ_2) η πρόταση μιας νέας αρχιτεκτονικής σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων η οποία θα συνδυάζει τις ευκολίες και τα πλεονεκτήματα των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής με την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού.

Οι επιμέρους στόχοι για την νέα αρχιτεκτονική σχεδιασμού είναι:

- (Σ2.1) η αποσύζευξη από την μέριμνα όλων των λειτουργιών του ασύρματου κόμβου αισθητήρων κατά τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την χρήση του,
- (Σ_2.2) η ευκολία στην ενσωμάτωση στο υλικό του κόμβου κάθε νέας τεχνολογίας η οποία θα μπορούσε να βελτιώσει τον κόμβο,
- (Σ_2.3) η τυποποιημένη και ευέλικτη επεκτασιμότητα.

(Σ_2.4) η ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας, και

(Σ_2.5) η ικανοποίηση, όσο το δυνατόν περισσότερο, όλων των εμπλεκόμενων μερών στις εφαρμογές ασύρματων δικτύων κόμβων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας.

Η μεθοδολογία για την επίτευξη των παραπάνω στόχων περιλαμβάνει:

- τη μελέτη των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών και προσεγγίσεων σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων,
- το σχεδιασμό υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων για εφαρμογές στην γεωργία, ακολουθώντας τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με εγγενείς αδυναμίες και περιορισμούς,
- την προδιαγραφή της ιδανικής αρχιτεκτονικής για το σχεδιασμό υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων,
- τη δημιουργία της νέας αρχιτεκτονικής,
- την αξιολόγηση της νέας αρχιτεκτονικής μέσα από περιπτώσεις σχεδιασμού με έμφαση στην ευρωστία και στην βελτιστοποίηση των ασύρματων κόμβων αισθητήρων.

Βιβλιογραφία

1. Harrop, P., R. Das. *Wireless sensor networks (wsn) 2014-2024: Forecasts, technologies, players the new market for ubiquitous sensor networks (usn)*; IDTechEX: 2009; p 282.
2. Herrera-Quintero, L.F.; Macia-Perez, F.; Ramos-Morillo, H.; Lago-Gonzalez, C. In *Wireless smart sensors networks, systems, trends and its impact in environmental monitoring*, 2009 IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM '09, Medellin, 2009; Medellin.
3. Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L.; Barreiro, P.; Robla, J.I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors* **2009**, *9*, 4728-4750.
4. Aqeel Ur, R.; Abbasi, A.Z.; Islam, N.; Shaikh, Z.A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Comput Stand Interfaces* **2014**, *36*, 263-270.
5. Wang, N.; Zhang, N.; Wang, M. Wireless sensors in agriculture and food industry –recent development and future perspective. *Comput. Electron. Agric.* **2006**, *50*, 1-14.
6. Lee, W.S.; Alchanatis, V.; Yang, C.; Hirafuji, M.; Moshou, D.; Li, C. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, *74*, 2-33.
7. Gaura, E.; Girod, L.; Brusey, J.; Allen, M.; Challen, G. Learning from deployment experience. In *Wireless sensor networks: Deployments and design frameworks*, Springer US: 2010; pp 15-50.
8. Alamri, A.; Ansari, W.S.; Hassan, M.M.; Hossain, M.S.; Alelaiwi, A.; Hossain, M.A. A survey on sensor-cloud: Architecture, applications, and approaches. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2013**, 2013.
9. Panchard, J.; Papadimitratos, P.; Hubaux, J.P.; Rao, P.R.S.; Sheshshayee, M.S.; Kumar, S. In *Wireless sensor networking for rain-fed farming decision support*, ACM SIGCOMM 2008 Conference on Computer Communications - 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Networked Systems for Developing Regions, NSDR'08, Seattle, WA, 2008; Seattle, WA, pp 31-36.

10. Barcelo-Ordinas, J.M.; Chanet, J.P.; Hou, K.M.; Garcia-Vidal, J. In *A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture*, 9th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2013, Lleida, Catalonia, 2013; Lleida, Catalonia, pp 801-808.
11. De, D.; Song, W.Z.; Xu, M.; Shi, L.; Tan, S. Advances in real-world sensor network system. In *Advances in Computers*, 2013; Vol. 90, pp 1-90.
12. Rault, T.; Bouabdallah, A.; Challal, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Comput. Networks* **2014**, *67*, 104-122.
13. Mampentzidou, I.; Karapistoli, E.; Economides, A.A. In *Basic guidelines for deploying wireless sensor networks in agriculture*, 2012 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, ICUMT 2012, St. Petersburg, 2012; St. Petersburg, pp 864-869.
14. Abdelgawad, A.; Bayoumi, M. Data fusion in wsn. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012; Vol. 118 LNEE, pp 17-35.
15. Kanda, K.; Ishii, T.; Kameoka, T.; Saitoh, K.; Sugano, R. In *Field monitoring system using agri-server*, 50th Annual Conference on Society of Instrument and Control Engineers, SICE 2011, Tokyo, 2011; Tokyo, pp 2069-2072.
16. Dapper, M.; Wells, J.S.; Schwallie, T.; Huon, L. In *Rf propagation in short range sensor communications*, PROCEEDINGS OF SPIE SPIE - The International Society for Optical Engineering: Unattended Ground Sensor Tehnologies and Applications V, Orlando, FL, 2003; Carapezza, E.M., Ed. Orlando, FL, pp 330-340.
17. Vougioukas, S.; Anastassiou, H.T.; Regen, C.; Zude, M. Influence of foliage on radio path losses (pls) for wireless sensor network (wsn) planning in orchards. *Biosyst. Eng.* **2013**, *114*, 454-465.
18. Malavolta, I.; Muccini, H. In *A survey on the specification of the physical environment of wireless sensor networks*, 40th Euromicro Conference Series on Software Engineering and Advanced Applications, SEAA 2014, 2014; Rabiser, R.; Torkar, R.; Torkar, R., Eds. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: pp 245-253.

19. Nguyen, H.A.; Förster, A.; Puccinelli, D.; Giordano, S. In *Sensor node lifetime: An experimental study*, 2011 9th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PERCOM Workshops 2011, Seattle, WA, 2011; Seattle, WA, pp 202-207.
20. Lee, S.; Kang, B.G.; Kim, T.G.; Cho, J.; Park, D. Interoperation of distributed mcu emulator/simulator for operating power simulation of large-scale internet of event-driven control things. In *4th International Conference on Ubiquitous Computing Application and Wireless Sensor Network, UCAWSN 2015*, Shen, H.; Jeong, Y.S.; Yi, G.; Park, J.J., Eds. Springer Verlag: 2016; Vol. 368, pp 75-82.
21. Corke, P.; Wark, T.; Jurdak, R.; Hu, W.; Valencia, P.; Moore, D. Environmental wireless sensor networks. *Proc. IEEE* **2010**, *98*, 1903-1917.
22. Djenouri, D.; Bagaa, M. Synchronization protocols and implementation issues in wireless sensor networks: A review. *IEEE Syst. J.* **2014**.
23. Farooq, M.O.; Kunz, T. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. *Sensors* **2011**, *11*, 5900-5930.
24. Cheour, R.; Lahmar, K.; Abid, M. In *Evolution of wireless sensor networks and necessity of power management technique*, 2011 Faible Tension Faible Consommation, FTFC 2011, Marrakech, 2011; Marrakech, pp 75-78.
25. Karray, F.; Jmal, M.W.; Abid, M.; Bensaleh, M.S.; Obeid, A.M. In *A review on wireless sensor node architectures*, 2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC 2014, Montpellier, 2014; IEEE Computer Society: Montpellier.
26. Bag, J.; Roy, S.; Sarkar, S.K. In *Realization of a low power sensor node processor for wireless sensor network and its vlsi implementation*, 2014 4th IEEE International Advance Computing Conference, IACC 2014, Gurgaon, 2014; IEEE Computer Society: Gurgaon, pp 101-105.
27. Gajjar, S.; Choksi, N.; Sarkar, M.; Dasgupta, K. In *Comparative analysis of wireless sensor network motes*, 1st International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2014, Noida, 2014; IEEE Computer Society: Noida, pp 426-431.

28. Rawat, P.; Singh, K.D.; Chaouchi, H.; Bonnin, J.M. Wireless sensor networks: A survey on recent developments and potential synergies. *J Supercomput* **2014**, *68*, 1-48.
29. Tavli, B.; Bicakci, K.; Zilan, R.; Barcelo-Ordinas, J.M. A survey of visual sensor network platforms. *Multimedia Tools Appl* **2011**, 1-38.
30. Farooq, M.O.; Kunz, T. Wireless multimedia sensor networks testbeds and state-of-the-art hardware: A survey. In *2011 International Conference on Future Generation Communication and Networking, FGCN 2011, Held as Part of the 3rd International Mega-Conference on Future-Generation Information Technology, FGIT 2011, in Conjunction with GDC 2011, Jeju Island, 2011*; Vol. 265 CCIS, pp 1-14.
31. Seema, A.; Reisslein, M. Towards efficient wireless video sensor networks: A survey of existing node architectures and proposal for a flexi-wvsnp design. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2011**, *13*, 462-486.
32. De Donno, D.; Catarinucci, L.; Tarricone, L. A battery-assisted sensor-enhanced rfid tag enabling heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Sensors J.* **2014**, *14*, 1048-1055.
33. Celandroni, N.; Ferro, E.; Gotta, A.; Oligeri, G.; Roseti, C.; Luglio, M.; Bisio, I.; Cello, M.; Davoli, F.; Panagopoulos, A.D., *et al.* A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless sensor networks: System design aspects. *Int. J. Satell. Commun. Networking* **2013**, *31*, 1-38.
34. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The internet of things: A survey. *Comput. Networks* **2010**, *54*, 2787-2805.
35. Wan, Z.G.; Tan, Y.K.; Yuen, C. In *Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks*, 2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology, ICCT 2011, Jinan, 2011; Jinan, pp 362-367.
36. Mainetti, L.; Patrono, L.; Vilei, A. In *Evolution of wireless sensor networks towards the internet of things: A survey*, 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2011, Split, Hvar, Dubrovnik, 2011; Split, Hvar, Dubrovnik, pp 16-21.

37. Chen, Y.; Hou, K.M.; Zhou, H.; Shi, H.L.; Liu, X.; Diao, X.; Ding, H.; Li, J.J.; De Vault, C. In *6lowpan stacks: A survey*, 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2011, Wuhan, 2011; Wuhan.
38. Abdulla, R.; Ismail, W. In *Survey of wsn technology based reliable and efficient active rfid*, 2013 IEEE 11th Malaysia International Conference on Communications, MICC 2013, Kuala Lumpur, 2013; IEEE Computer Society: Kuala Lumpur, pp 116-121.
39. Tsopele, A.; Laborde, A.; Salvagnac, L.; Ventalon, V.; Bedel-Pereira, E.; Séguy, I.; Temple-Boyer, P.; Juneau, P.; Izquierdo, R.; Launay, J. Development of a lab-on-chip electrochemical biosensor for water quality analysis based on microalgal photosynthesis. *Biosens. Bioelectron.* **2016**, *79*, 568-573.
40. Alea, M.D.D.; Azurin, L.A.I.; Bamba, P.V.F.; Maramba, M.C.; Santos, E.D.; Alarcon, L.P.; Hizon, J.R.E.; Roque, C.R.K. In *Developing an arm-based sensor platform*, 2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10, IEEE TENCON 2013, Xi'an, Shaanxi, 2013; Xi'an, Shaanxi.
41. Tsekoura, I.; Rebel, G.; Glosekotter, P.; Berekovic, M. In *An evaluation of energy efficient microcontrollers*, 2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC 2014, Montpellier, 2014; IEEE Computer Society: Montpellier.
42. Zia, H.; Harris, N.R.; Merrett, G.V.; Rivers, M.; Coles, N. The impact of agricultural activities on water quality: A case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *96*, 126-138.
43. Kyriakarakos, G.; Piromalis, D.D.; Arvanitis, K.G.; Dounis, A.I.; Papadakis, G. On battery-less autonomous polygeneration microgrids: Investigation of the combined hybrid capacitors/hydrogen alternative. *Energy Convers. Manage.* **2015**, *91*, 405-415.

44. Taslidere, E.; Cohen, F.S.; Reisman, F.K. Wireless sensor networks-a hands-on modular experiments platform for enhanced pedagogical learning. *IEEE Trans Educ* **2011**, *54*, 24-33.

Κεφάλαιο



Τρέχουσες Προσεγγίσεις στον Σχεδιασμό και στην Ανάπτυξη Ασυρμάτων Κόμβων Αισθητήρων στο Πεδίο της Γεωργίας

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.
- [J-4]. **D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis, P.G.Papageorgas, D.I.Tseles and C.S.Psomopoulos**, “*LEDWIRE: A Versatile Networking Platform for Smart LED Lighting Applications using LIN-Bus and WSNs*”, **Sensors and Transducers Journal (ISSN: 2306-8515, e-ISSN: 1726-5479)**, Vol. 200, No. 5, pp. 50-59, 2016. Full text available on: http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_2824.htm.
- [C-4]. **D.Piromalis and K.G.Arvanitis**, «*Precision Lighting for Controlled Closed Urban Horticultural Environments with Emphasis on the Use of LED Technology*”, **6th International Conference on Landscape and Urban Horticulture (LUH 2016)**, Athens, Greece, June 20-24, 2016. Presented at the Conference. To appear in **Acta Horticulturae (Listed in Scopus, Print ISSN: 0567-7572, e-ISSN: 2406-6168)**.

2.1. Αρχιτεκτονικές Ειδικού Σκοπού (End Systems Architectures)

Οι αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού (end-systems architectures) αφορούν το σχεδιασμό ασύρματων κόμβων αισθητήρων δίνοντας την έμφαση είτε στην επίλυση συγκεκριμένων πρακτικών προβλημάτων στο πεδίο της εφαρμογής, είτε στην βελτίωση συγκεκριμένων λειτουργιών του κόμβου. Οι ασύρματοι κόμβοι αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού είναι διαθέσιμοι σε μορφή έτοιμου τελικού προϊόντος στην αγορά και ως επί το πλείστον απευθύνονται σε επιλεγμένες περιοχές εφαρμογών, π.χ. στην γεωργία, στη μελέτη του περιβάλλοντος, κλπ. Οι λύσεις αυτές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά γνωρίσματα:

- ο κύριος σκοπός είναι η εξυπηρέτηση στην επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και στην κάλυψη εξειδικευμένων απαιτήσεων και αναγκών στο εκάστοτε πεδίο εφαρμογής,
- οι τεχνολογικές λεπτομέρειες για το ενσωματωμένο λογισμικό (firmware), το υλικό (hardware), καθώς και για το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας, είναι "κρυμμένες" από τους τελικούς χρήστες,
- η ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία στηρίζεται σε μερικώς τροποποιημένα πρότυπα πρωτόκολλα (modified standard protocols), ή σε εντελώς ιδιωτικές υλοποιήσεις (proprietary protocols),
- η μορφή, το μέγεθος, καθώς και το περίβλημα του ασύρματου κόμβου υλοποιούνται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συγκεκριμένες ανάγκες του εκάστοτε πεδίου εφαρμογής, και
- η τεκμηρίωση των λειτουργιών των ασύρματων κόμβων δίνει την έμφαση στην ρύθμιση και στην εγκατάσταση του κόμβου.

Επί πλέον, οι εμπορικές λύσεις των ασύρματων κόμβων αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού συνεπάγονται και συγκεκριμένες δεσμεύσεις και υποχρεώσεις:

- ο ασύρματος κόμβος πρέπει να συνοδεύεται από όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις, σχετικά με την λειτουργία του υλικού του και την λειτουργία της επικοινωνίας του,
- πρέπει να παρέχεται από τις εταιρίες κατασκευής των κόμβων πλήρης και διαρκής τεχνική υποστήριξη πριν και μετά την πώληση,

- οι εταιρίες κατασκευής των ασύρματων κόμβων είναι υπεύθυνες για την συνεχή συντήρηση, διόρθωση, και αναβάθμιση του ενσωματωμένου λογισμικού του κόμβου καθ' όλη την διάρκεια ζωής του κόμβου, και
- οι ασύρματοι κόμβοι, ως έτοιμα προϊόντα, πρέπει να συνοδεύονται από εγγύηση καλής και αξιόπιστης λειτουργίας για ένα ή περισσότερα έτη,

Από την άλλη πλευρά, στη διεθνή βιβλιογραφία περιλαμβάνονται πλήθος εργασιών στις οποίες προτείνονται διάφορες αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού για το σχεδιασμό ασύρματων κόμβων. Συνήθως, στις εργασίες αυτές περιγράφεται η χρήση κάποιων νέων κυκλωμάτων, π.χ. για την ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία. Ίσως, ο όρος "αρχιτεκτονική" να μην είναι ο καταλληλότερος για την περιγραφή μιας νέας κυκλωματικής τοπολογίας η οποία βασίζεται σε νέα προϊόντα της βιομηχανίας ημιαγωγών και μικροηλεκτρονικής. Παρ' όλα αυτά, ο όρος "αρχιτεκτονική" έχει επικρατήσει.

Στην πλειοψηφία τους, οι ασύρματοι κόμβοι αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού, είτε με τη μορφή έτοιμων εμπορικά διαθέσιμων λύσεων, είτε με τη μορφή ερευνητικών προτάσεων και πρωτοτύπων επίδειξης, βασίζονται στην τυπική παραδοσιακή αρχιτεκτονική (βλ. Κεφάλαιο 1, Εικόνα 1.1).

Τα πλεονεκτήματα για τους τελικούς χρήστες των ασύρματων κόμβων αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού, δηλαδή τους μηχανικούς εφαρμογών και ίσως κάποιους καλά καταρτισμένους αγρότες, είναι τα ακόλουθα:

- μηδενικός χρόνος ανάπτυξης - μόνο ρυθμίσεις απαιτούνται (solutions out-of-the-box, ή αλλιώς, turn-key solutions),
- το προϊόν είναι πλήρως ελεγμένο και πιστοποιημένο για καλή, ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία,
- το προϊόν παρέχει την απαιτούμενη ανθεκτικότητα και ευρωστία, και
- το προϊόν είναι ειδικά σχεδιασμένο για την επίλυση προβλημάτων και την κάλυψη αναγκών για το συγκεκριμένο πεδίο, π.χ. της γεωργίας.

Ταυτόχρονα με τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα στην υλοποίηση των ασύρματων κόμβων αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού. Αυτά κυρίως εντοπίζονται στην μεριά του κατασκευαστή τους κι όχι των τελικών χρηστών. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι:

- τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης (RnD: Research and Development departments) υποχρεωτικά πρέπει να στελεχώνονται από μέλη με μεγάλη εξειδίκευση σε διάφορα γνωστικά αντικείμενα (π.χ. διαχείριση ενέργειας, σχεδιασμός τυπωμένου κυκλώματος, ασύρματη δικτύωση, ενσωματωμένα συστήματα, κλπ),
- ο χρόνος ανάπτυξης είναι πολύ μεγάλος,
- τα αρχικά κόστη για την ανάπτυξη πρωτοτύπων και δοκιμών είναι πολύ υψηλά,
- τα αρχικά κόστη για την παραγωγή των τυπωμένων κυκλωμάτων είναι υψηλά,
- συνήθως απαιτείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ειδικού περιβλήματος στέγασης (housing, ή αλλιώς, enclosure), το οποίο συνεπάγεται πολύ υψηλό αρχικό κόστος, και
- η απόκτηση των απαραίτητων πιστοποιητικών από ανεξάρτητους φορείς για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των κόμβων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία, κατά την οποία αρκετά συχνά επιβάλλεται ο επανασχεδιασμός μέρους ή ολόκληρου του κόμβου,

Συγκεκριμένα για το υλικό των ασύρματων κόμβων αισθητήρων, δηλαδή για τα κυκλώματα και το τυπωμένο κύκλωμα, οι κόμβοι αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού στην πλειοψηφία τους ακολουθούν το δόγμα της σμίκρυνσης (the miniaturization doctrine) [1,2] κύριο εκπρόσωπο του οποίου ιστορικά αποτελεί ο ασύρματος κόμβος *Smart Dust*. Για τις εφαρμογές των ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων στην γεωργία δεν υπάρχει απαίτηση για υπερβολές στη μείωση των φυσικών διαστάσεων των κόμβων, όπως π.χ. υπάρχει στους φορέσιμους κόμβους (wearable nodes). Από την άλλη πλευρά, ο περιορισμός στις φυσικές διαστάσεις εμμέσως επιβάλλει περιορισμούς στην επεκτασιμότητα και στην επανατροποποίηση του κόμβου. Γενικά, από την πλευρά όλων των τελικών χρηστών, όπως των ερευνητών στο πεδίο της γεωργίας, ή των μηχανικών ανάπτυξης εφαρμογών, ή ακόμα και των καλά καταρτισμένων αγροτών, εντοπίζονται προβλήματα στην χρήση των ασύρματων κόμβων αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού [1,3-6] όπως:

- έλλειψη τυποποίησης στα πρωτόκολλα ασύρματης δικτύωσης και επικοινωνίας (protocols standardization),

- έλλειψη τυποποίησης στα εργαλεία ανάπτυξης (development tools standardization),
- αδυναμία επανατροποποίησης του υλικού (reconfigurability),
- αδυναμία επεκτασιμότητας (expandability),
- αδυναμία κλιμάκωσης της επεξεργαστικής ισχύος καθώς και της μνήμης προγράμματος και δεδομένων,
- αδυναμία κλιμάκωσης του πλήθους εισόδων/εξόδων για την διασύνδεση διαφορετικών τύπων αισθητήρων,
- περιορισμένη επαναχρησιμοποίηση (reusability) σε εφαρμογές με μικρές παραλλαγές στο σενάριο λειτουργίας,
- υψηλό κόστος απόκτησης,
- η τεκμηρίωση του συστήματος περιορίζεται σε οδηγίες χρήσης του προϊόντος και δεν αναφέρονται λεπτομέρειες για τον σχεδιασμό του κόμβου, όπως π.χ. σχέδια σχηματικών κυκλωμάτων, σχέδια τυπωμένου κυκλώματος, πηγαίος κώδικας του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή του κόμβου, και
- δεν υπάρχει εναλλακτικός προμηθευτής για τον εκάστοτε συγκεκριμένο ασύρματο κόμβο (no second source).

Εν κατακλείδι, οι αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού διασφαλίζουν την αναγκαία αξιοπιστία και ευρωστία των ασύρματων κόμβων αισθητήρων, επιβάλλοντας όμως υψηλά κόστη απόκτησης. Στην περίπτωση της γεωργίας, οι εμπορικά διαθέσιμες λύσεις αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού είναι αρκετά περιορισμένες σε πλήθος. Ενδεχομένως, οι λόγοι για την έλλειψη αυτή να σχετίζονται με τα προαναφερθέντα προβλήματα και το υψηλό κόστος ανάπτυξης, αλλά και με την ευελιξία στην ενσωμάτωση διαρκώς νέων δυνατοτήτων και λειτουργιών (βλ. Κεφάλαιο 1, Εικόνα 2).

2.2. Εμπορικά Διαθέσιμες Αρχιτεκτονικές Γενικής Χρήσης (COTS Architectures)

Ο όρος COTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *Commercial of the Shelf* και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων οι οποίοι διατίθενται στο εμπόριο και είναι γενικής χρήσης. Οι εν λόγω κόμβοι χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές και τους μηχανικούς ανάπτυξης εφαρμογών σε διάφορα πεδία, π.χ. στο πεδίο της γεωργίας, ως μια έτοιμη λύση υλικού και ενσωματωμένου λογισμικού. Αυτές οι λύσεις επιτρέπουν την μείωση του συνολικού χρόνου ανάπτυξης μιας εφαρμογής παρέχοντας στους χρήστες πλήθος τεκμηρίωσης και πόρων σχεδίασης και ανάπτυξης.

Οι αρχιτεκτονικές των ασύρματων κόμβων αισθητήρων γενικής χρήσης συναντώνται σε δύο μορφές στο εμπόριο:

- ως πλήρως έτοιμοι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων, στους οποίους περιλαμβάνονται η κεραία, καθώς και μερικοί ενδεικτικοί αισθητήρες οι οποίοι είναι συγκολλημένοι πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα των κόμβων [7]. Οι ασύρματοι κόμβοι αυτοί ονομάζονται αλλιώς και ως *motest*, και
- ως ειδικές πλατφόρμες ανάπτυξης και δοκιμής (*testbeds*) κυκλωμάτων ασύρματων κόμβων αισθητήρων.

Στην πρώτη από τις παραπάνω περιπτώσεις, για το σχεδιασμό του υλικού του ασύρματου κόμβου αισθητήρων ακολουθείται κατά κόρον η τυπική αρχιτεκτονική (βλ. Κεφάλαιο 1, Εικόνα 1.1.). Δύο από τα πρώτα και σημαντικότερα *motest* είναι το *Telos* [8] (βλ. Εικόνα 2.1) και το *MicaZ* [9] (βλ. Εικόνα 2.2), τα οποία αναπτύχθηκαν στις αρχές του 2000 από τις ερευνητικές ομάδες του Πανεπιστημίου Berkeley στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.



Εικόνα 2.1. Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων, αρχιτεκτονικής *mote*, *Telos* (έκδοση *Telos-B*).



Εικόνα 2.2. Ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων, αρχιτεκτονικής mote, MicaZ.

Αυτές, και άλλες παρόμοιες λύσεις, αποτελούν δημιουργήματα ερευνητικών προσπαθειών που γνώρισαν μεγάλη αποδοχή και δημοφιλία λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκαν πρακτικώς ως αναπτυξιακά εργαλεία (development and evaluation tools) στα χέρια πολλών άλλων ετερογενών ερευνητικών ομάδων με σκοπό τη συνέχιση της έρευνας. Πρακτικά, οι λύσεις αυτές περισσότερο βοήθησαν στην έρευνα των πρωτοκόλλων της ασύρματης δικτύωσης και επικοινωνίας παρά στην έρευνα για την ανάπτυξη νέου, βελτιωμένου υλικού.

Γενικά, τα πλεονεκτήματα των εμπορικά διαθέσιμων αρχιτεκτονικών γενικής χρήσης (COTS architectures) είναι [10-13]:

- συμβάλλουν σε σημαντικό βαθμό στη μείωση του συνολικού χρόνου ανάπτυξης νέων εφαρμογών ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων λόγω του γεγονότος πως οι ερευνητές, οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί εφαρμογών δεν απαιτείται να ανακαλύψουν τον τροχό σχετικά με το σχεδιασμό του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού των κόμβων,
- λόγω του πλήρως υλοποιημένου υλικού των κόμβων στις ομάδες έρευνας και ανάπτυξης δεν απαιτούνται μέλη με εξειδικευμένες γνώσεις στο σχεδιασμό υλικού και ενσωματωμένων συστημάτων,
- τα πρωτόκολλα ασύρματης διασύνδεσης διατίθενται πλήρως τεκμηριωμένα και δοκιμασμένα,
- το κόστος είναι αρκετά χαμηλότερο από εκείνο των ασύρματων κόμβων αισθητήρων αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού, και

- παρέχεται ένα είδος τυποποίησης στις ερευνητικές πλατφόρμες των διαφόρων ερευνητικών ομάδων από την άποψη πως όλοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ίδια πλατφόρμα για παρεμφερείς εργασίες.

Από την άλλη πλευρά, οι αρχιτεκτονικές τύπου *COTS* χαρακτηρίζονται από πλήθος περιορισμών και αδυναμιών σχετικά με το υλικό των ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι:

- παρέχουν πολύ περιορισμένες δυνατότητες σχετικά με την διαχείριση ενέργειας του κόμβου. Συνήθως διαθέτουν κυκλώματα ρύθμισης και σταθεροποίησης τάσης τροφοδοσίας η οποία προέρχεται είτε από συσσωρευτές ενέργειας (π.χ. τύπου AA των 1.5 V) είτε από θύρα USB (τάση +5 Vdc). Η οποιαδήποτε τροποποίηση στα κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας καθίσταται αδύνατη, λόγω του ότι τα σχετικά εξαρτήματα είναι συγκολλημένα στο τυπωμένο κύκλωμα του κόμβου και λόγω του ότι δεν παρέχεται κανενός είδους συνδετήρας επέκτασης ενέργειας,
- δεν υπάρχει πρόβλεψη για την διασύνδεση και τροφοδοσία πολλών και διαφορετικών τύπων αισθητήρων (απαίτηση αρκετά συνηθισμένη στις εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας),
- η επεκτασιμότητα (*expandability*) είναι πολύ περιορισμένη,
- η δυνατότητα επανακαθορισμού (*reconfigurability*) είναι πολύ περιορισμένη,
- η επιβολή χρήσης συγκεκριμένων λειτουργικών συστημάτων του μικροελεγκτή του κόμβου δημιουργεί περιορισμούς στην ευελιξία ανάπτυξης σεναρίων εφαρμογών. Συνήθως τα λειτουργικά αυτά συστήματα (π.χ. *TinyOS*) αφιερώνουν το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας τους στην εξυπηρέτηση της εκτέλεσης του πρωτοκόλλου της ασύρματης δικτύωσης και αφήνουν ελάχιστες δυνατότητες για π.χ. την συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων από τους αισθητήρες της εφαρμογής,
- λόγω της προσέγγισης της γενικής χρήσης, αλλά και της προσπάθειας των αρχιτεκτονικών *COTS* να χρησιμοποιούνται σχετικά εύκολα και γρήγορα για την ανάπτυξη πλοτικών και πρωτοτόπων επίδειξης, οι

ασύρματοι κόμβοι είναι φορτωμένοι με πλήθος κυκλωμάτων επίδειξης. Έτσι, συναντώνται κυκλώματα φωτεινών ενδεικτών τύπου LED, κυκλώματα μικρο-αισθητήρων (π.χ. μέτρησης κίνησης, θερμοκρασίας, κλπ), και άλλα πολλά. Τα κυκλώματα αυτά καταναλώνουν άσκοπα ενέργεια από το σύστημα του κόμβου, δεν είναι δυνατόν να αποσυγκολληθούν από το τυπωμένο κύκλωμα του κόμβου, και αποτελούν ένα μεγάλο και περιττό βάρος στις πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας,

- το υλικό των ασύρματων κόμβων είναι σχεδιασμένο για το εσωτερικό περιβάλλον (π.χ. εργαστήρια και γραφεία), κι όχι για το εχθρικό εξωτερικό περιβάλλον της γεωργίας,
- δεν υπάρχει καμία πρόβλεψη για τη φυσική μορφή του κόμβου καθώς και για το περίβλημα στέγασής του έτσι ώστε να μπορεί να διευκολύνονται οι εγκαταστάσεις στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας των κόμβων, π.χ. στο χωράφι, και
- εμμέσως επιβάλλεται η χρήση συγκεκριμένων εργαλείων ανάπτυξης του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή του κόμβου.

Παρά το γεγονός πως με σχετικά μικρό κόστος αρχικής επένδυσης οι ερευνητικές ομάδες μπορούν εύκολα και σχετικά γρήγορα να στήσουν ένα δίκτυο ασύρματων κόμβων αισθητήρων για το πεδίο της γεωργίας, στην πράξη, όπως επισημαίνεται σε αρκετές εργασίες στην βιβλιογραφία [6,14-16], οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων αρχιτεκτονικών COTS αδυνατούν να ανταποκριθούν στην ικανοποίηση των αναγκών των πραγματικών εφαρμογών στο πεδίο της γεωργίας.

2.3. Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής (Open-Source Hardware Architectures)

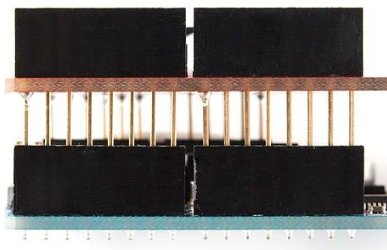
Η αντίδραση των σχεδιαστών και των μηχανικών ανάπτυξης ασυρμάτων κόμβων στους περιορισμούς και στις δυσκολίες που συνοδεύουν τις αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού και γενικής χρήσης, ήταν η υιοθέτηση της ιδέας του υλικού ανοικτής πηγής (OSH: Open-Source Hardware, ή αλλιώς, OSHW). Η ιδέα αυτή εμφανίστηκε πριν περίπου από μια δεκαετία και είχε ως στόχο τη χρήση γενικών πλατφορμών μικροελεγκτών (MCU boards) για την εκπαίδευση και τους χομπίστες. Μεταξύ των

πιο τοπικών υλοποιήσεων τέτοιων πλατφορμών συγκαταλέγονται το Arduino, το Raspberry Pi, κ.α. [17-19].

Σύμφωνα με την ιδέα του υλικού ανοικτής πηγής, αυτές οι πλατφόρμες συνοδεύονται από τα πλήρη σχέδια των κυκλωμάτων καθώς και του τυπωμένου κυκλώματός τους, τα οποία είναι ελεύθερα προς χρήση αλλά και αναπαραγωγή είτε για προσωπική είτε για επαγγελματική χρήση.

Η αρχιτεκτονική του υλικού ανοικτής πηγής προϋποθέτει τη χρήση μιας γενικής πλακέτας με μικροελεγκτή στην οποία επίσης περιλαμβάνονται τα κυκλώματα για την τροφοδοσία και τον προγραμματισμό του. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες αρχιτεκτονικές είναι η δυνατότητα επέκτασης της κύριας πλακέτας χρησιμοποιώντας πλακέτες επέκτασης (shields, ή αλλιώς caps, ή αλλιώς hats). Οι πλακέτες επέκτασης είναι κι αυτές υλικού ανοικτής πηγής και περιλαμβάνουν κυκλώματα λειτουργιών που επιθυμεί ο χρήστης να προσθέσει στην δική του εφαρμογή. Με άλλα λόγια, παρέχεται η μέγιστη επεκτασιμότητα και επανακαθορισμός του υλικού αναλόγως των αναγκών της εκάστοτε εφαρμογής. Από την άλλη πλευρά διασφαλίζεται στο μέγιστο βαθμό η επαναχρησιμοποίηση του υλικού αλλά και το μειωμένο κόστος αρχικής επένδυσης.

Ο μηχανισμός μέσω του οποίου επιτρέπεται η εύκολη και περιστασιακά επαναλαμβανόμενη προσθήκη και αφαίρεση των πλακετών επέκτασης είναι απλός και στηρίζεται στη χρήση συνδετήρων σύνδεσης όπως αυτών που απεικονίζονται στην Εικόνα 2.3. Οι συνδετήρες αυτοί στο επάνω μέρος τους περιέχουν υποδοχές σύνδεσης ακίδων, ενώ στο κάτω μέρος τους διαθέτουν μακριές ακίδες (long pins) οι οποίες συγκολλούνται στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας και την διαπερνούν ώστε να μπορούν να συνδεθούν με συνδετήρες άλλων πλακετών.



Εικόνα 2.3. Σύνδεση δύο πλακετών χρησιμοποιώντας συνδετήρες επέκτασης.

Μέσω των συνδετήρων επέκτασης, τα σήματα του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας, δηλαδή της πλακέτας που περιέχει τον μικροελεγκτή, δρομολογούνται προς τις οποιεσδήποτε πλακέτες επέκτασης. Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται η κύρια πλακέτα επέκτασης αρχιτεκτονικής ανοικτής πηγής *Arduino* (έκδοση *Arduino Uno Rev.3*). Στην Εικόνα 2.5 εμφανίζεται η σύνθεση ενός συστήματος υλικού ανοικτής πηγής χρησιμοποιώντας μια κύρια πλακέτα επέκτασης *Arduino* και μια πλακέτα επέκτασης επικοινωνίας δεδομένων.



Εικόνα 2.4. Η κύρια πλακέτα επέκτασης αρχιτεκτονικής υλικού ανοικτής πηγής *Arduino Uno Rev.3* (της εταιρίας *Arduino*). Διακρίνονται δύο σειρές με συνδετήρες για την σύνδεση πλακετών επέκτασης.



Εικόνα 2.5. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθεσης συστήματος αρχιτεκτονικής υλικού ανοικτής πηγής χρησιμοποιώντας μια κύρια πλακέτα επέκτασης (*Arduino Uno Rev.3* στην συγκεκριμένη περίπτωση) και μια πλακέτα επέκτασης. Οι δύο πλακέτες συνδέονται μεταξύ τους μέσω των συνδετήρων επέκτασης. Στο επάνω μέρος του συστήματος μπορούν να συνδεθούν αρκετές ακόμα πλακέτες επέκτασης.

Εκτός από την ευκολία στην επεκτασιμότητα του υλικού, οι διάφορες πλατφόρμες ανοικτής πηγής διευκολύνουν και στην ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας επέκτασης παρέχοντας πλήθος έτοιμων βιβλιοθηκών συναρτήσεων (APIs: Application Programming Interfaces). Στην πλειοψηφία τους, οι συναρτήσεις αυτές είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού C. Για την σύνταξη του λογισμικού παρέχονται ολοκληρωμένα περιβάλλοντα ανάπτυξης από τους εκάστοτε κατασκευαστές των κύριων πλακετών επέκτασης. Όλοι αυτοί οι σχεδιαστικοί πόροι και όλα τα εργαλεία ανάπτυξης ενσωματωμένου λογισμικού (firmware development tools) είναι ανοικτής πηγής και μπορούν ελεύθερα, δίχως κόστος, να χρησιμοποιηθούν και να τροποποιηθούν από τους χρήστες.

Τα πολλά πλεονεκτήματα που συνοδεύουν τις αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής τις κατέστησαν πολύ δημοφιλείς τόσο μεταξύ μαθητών και ερασιτεχνών, όσο και μεταξύ ερευνητών, σχεδιαστών και μηχανικών ανάπτυξης. Στις μέρες μας υπάρχουν διεθνώς πολυπληθείς κοινότητες χρηστών, οι οποίες αλληλεπιδρούν μέσω του διαδικτύου μεταξύ τους, παρέχοντας πλήθος έτοιμων σχεδιαστικών βοηθημάτων, συμβουλών, και παραδειγμάτων εφαρμογών. Όλες αυτές οι εγγενείς δυνατότητες της ιδέας του υλικού και του λογισμικού ανοικτής πηγής αποτελούν δέλεαρ για όλους όσους ασχολούνται με την ανάπτυξη συστημάτων ασύρματων κόμβων αισθητήρων [3,14,20].

Σχετικά με την υλοποίηση υλικού ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων, η προσέγγιση σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής περιλαμβάνει τη σύνθεση του κόμβου από μια κύρια πλακέτα επέκτασης, μια πλακέτα επέκτασης για την ασύρματη δικτύωση, και μια πλακέτα επέκτασης για τους αισθητήρες της εφαρμογής. Συγκεκριμένα για το πεδίο της γεωργίας, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις εργασιών στη βιβλιογραφία στις οποίες χρησιμοποιούνται αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής για την υλοποίηση ασύρματων κόμβων αισθητήρων για πραγματικές εφαρμογές. Οι εν λόγω αρχιτεκτονικές φαίνεται πως έρχονται να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για γρήγορη, εύκολη, επεκτάσιμη και κλιμακούμενη υλοποίηση συστημάτων κόμβων για τη γεωργία [6,17,21,22].

Εν κατακλείδι, οι αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής θεωρούνται ως οι προτιμότερες για την υλοποίηση ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων, και φαίνεται πως μπορούν να συμβάλλουν θετικά στην δοκιμή και ενσωμάτωση νέων μεθόδων και τεχνολογιών. Στο Κεφάλαιο 3, πραγματοποιείται σε βάθος η παρουσίασή τους και οι

διάφορες διαθέσιμες εναλλακτικές υλοποιήσεις τους. Επί πλέον παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα πλεονεκτήματά τους καθώς επίσης και οι περιορισμοί και οι αδυναμίες τους.

2.4. Σχεδιάζοντας Ασύρματους Κόμβους Αρχιτεκτονικής Ειδικού Σκοπού για τις Εφαρμογές Τεχνητού Φωτισμού στην Γεωργία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός ασύρματου κόμβου αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού για τις εφαρμογές στη γεωργία, και συγκεκριμένα για τις εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας που λαμβάνει χώρα σε κλειστά ελεγχόμενα περιβάλλοντα, δηλαδή στη φυτοκομία (horticulture) και στην ανθοκομία (floriculture). Ο φυσικός φωτισμός (natural lighting), ή αλλιώς, το φως της ημέρας (daylight), που προσλαμβάνεται με τη μορφή ροής φωτονίων (photos flux) από τα φύλλα των φυτών είναι ο κυριότερος παράγοντας για την ανάπτυξη της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης (photosynthesis).

2.4.1. Ο Τεχνητός Φωτισμός στην Γεωργία

Σε αντίθεση με τις καλλιέργειες σε ανοικτά περιβάλλοντα, όπου υπάρχει εποχικότητα στις καλλιεργητικές περιόδους, στα κλειστά ελεγχόμενα περιβάλλοντα καλλιέργειας είναι εφικτό να υπάρχουν σταθερές και επαναλαμβανόμενες καλλιεργητικές περιοδοί ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και την εποχή. Τυπικά παραδείγματα κλειστών ελεγχόμενων περιβαλλόντων αποτελούν τα θερμοκήπια. Επί πλέον, στις μέρες μας διαφαίνεται η τάση για την αστική φυτοκομία (urban horticulture), η οποία πραγματοποιείται από κατοίκους των πόλεων αξιοποιώντας ειδικά διαμορφωμένες στέγες, υπόγεια, βεράντες, κλπ.

Ο τεχνητός φωτισμός σε τέτοια κλειστά ελεγχόμενα περιβάλλοντα καλλιέργειας συναντιέται σε μία, ή περισσότερες, από τις εξής μορφές [23]:

- ως συμπληρωματικός φωτισμός στο φως της ημέρας (supplemental to daylight),
- ως πηγή φωτισμού για την επέκταση της χρονικής περιόδου του φυσικού φωτισμού (photoperiodic lighting), δηλαδή να υπάρχει φυσικό φως και μετά τη δύση του ηλίου,
- ως αποκλειστική πηγή φυσικού φωτός στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει καθόλου φυσικό φως, και

- ως πηγή φωτισμού σε επιλεγμένα μήκη φάσματος για τον φωτισμό ειδικών καλλιέργειών στις οποίες δεν πρέπει να υπάρχει φυσικός φωτισμός (artificial lighting).

Σύμφωνα με πλήθος ερευνητικών εργασιών, ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να επιδράσει θετικά στις καλλιέργειες σε κλειστά ελεγχόμενα περιβάλλοντα [24-26] Συγκεκριμένα μπορεί να βοηθήσει:

- στην ανάπτυξη των φυτών (growth),
- στο φύλλωμα (leaf area),
- στο ισοζύγιο νωπού/ξηρού προϊόντος (fresh and dry weight),
- στο περιεχόμενο των φωτοσυνθετικών χρωστικών (photosynthetic pigment content),
- στην διάρκεια ζωής των ανθέων στο βάζο (vase life),
- στις απαιτήσεις για νερό (water requirements), και
- στον έλεγχο της έναρξης της καλλιέργειας και του χρόνου συγκομιδής (control of the beginning and harvest time).

Γενικά, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο τεχνητός φωτισμός στις καλλιέργειες [27] είναι:

(α) προκλήσεις για τις δυνατότητες τοποθέτησης των φωτιστικών σωμάτων (LF: Lighting Fixtures) [26]. Συγκεκριμένα υπάρχουν απαιτήσεις για:

- τοποθέτηση πάνω από τα φυτά (top lighting),
- τοποθέτηση ανάμεσα στα φυλλώματα των φυτών (inter-canopy lighting), και
- τοποθέτηση στο κάτω μέρος των φυτών (bottom lighting).

(β) προκλήσεις σχετικά με την ασφαλή λειτουργία των συστημάτων φωτισμού: τα συστήματα φωτισμού θα πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν λιγότερες και πιο τακτοποιημένες καλωδιώσεις, όπως επίσης να αποφεύγεται η χρήση υψηλών τάσεων τροφοδοσίας, έτσι ώστε να προφυλάσσεται η υγεία των συστημάτων και των χρηστών τους. Αυτό είναι ιδιαίτερος κρίσιμος στις περιπτώσεις της αστικής φυτοκομίας όπου τελικοί χρήστες είναι ιδιώτες χωρίς ιδιαίτερη κατάρτιση και προϋποθέσεις τακτοποιημένου περιβάλλοντος εργασίας.

(γ) *προκλήσεις σχετικά με την προστασία των φυτών*: τα διάφορα συστήματα φωτισμού δεν πρέπει να έχουν μεγάλες θερμοκρασίες κατά τη λειτουργία τους γιατί υπάρχει ο κίνδυνος τα φυτά να καούν [28].

Ιδιαίτερος για τον τεχνητό φωτισμό σε κλειστούς ελεγχόμενους χώρους, όπως αυτούς των θερμοκηπίων, ή των αστικών υποδομών, οι απαιτήσεις από ένα σύστημα φωτισμού διακρίνονται σε αυτές που σχετίζονται με την καθημερινότητα της καλλιέργειας αλλά και σε αυτές που σχετίζονται με την υποστήριξη της έρευνας από τους ειδικούς της γεωργίας. Συγκεκριμένοι οι απαιτήσεις είναι:

(α) *Λειτουργικές απαιτήσεις* (Functional Requirements):

- το σύστημα φωτισμού θα πρέπει να είναι ελέγξιμο ως προς το μήκος κύματος εκπομπής φωτός (wavelength spectrum), ως προς την ένταση της φωτεινής ροής (light density), καθώς επίσης να έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης σεναρίων φωτισμού,
- το σύστημα φωτισμού θα πρέπει να είναι "ευφυές" έτσι ώστε να μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλα συστήματα ελέγχου που τυχόν υπάρχουν και λειτουργούν στο πεδίο της εκάστοτε εφαρμογής καλλιέργειας,
- το σύστημα φωτισμού θα πρέπει να είναι ευέλικτο έτσι ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την ομαδοποίηση των διαφόρων φωτιστικών σωμάτων (lighting fixtures' clustering) αναλόγως του σεναρίου της εκάστοτε εφαρμογής, και
- το σύστημα φωτισμού θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα της δικτύωσης και της επικοινωνίας όλων των φωτιστικών σωμάτων έτσι ώστε να υποστηρίζεται η εκτέλεση σεναρίων εφαρμογών ελεγχόμενων τόσο τοπικά όσο και από απόσταση.

(β) *Ηλεκτρικές και θερμικές απαιτήσεις* (Electrical and Thermal Requirements)

- τα φωτιστικά σώματα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας,
- ο βαθμός απόδοσης των φωτιστικών σωμάτων θα πρέπει να είναι υψηλός ώστε να μην χάνεται άσκοπα ενέργεια σε θερμότητα,
- η εκπεμπόμενη θερμότητα (irradiant heat) από τα φωτιστικά σώματα θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή έτσι ώστε να προστατεύονται τα φυτά αλλά και οι διάφοροι χρήστες,

- στο σύστημα φωτισμού θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας υψηλής στάθμης, έτσι ώστε να μην απαιτείται ενισχυμένη δαπανηρή καλωδίωση, αλλά και, από την άλλη μεριά, να μην κινδυνεύουν οι χρήστες από ηλεκτροπληξία, και
- να γίνεται χρήση τροφοδοσίας χαμηλής στάθμης συνεχούς ρεύματος (DC).

(γ) *Πρακτικές απαιτήσεις* (Practical Requirements):

- απαιτείται η ύπαρξη ενός συνεκτικού και ξεκάθαρου τρόπου αλληλεπίδρασης συστήματος φωτισμού και χρήστη (HMI: Human-Machine Interface), έτσι ώστε να διευκολύνονται οι χρήστες στον προγραμματισμό νέων σεναρίων εφαρμογών φωτισμού,
- τα συστήματα φωτισμού θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχουν την αναγκαία προστασία και ανθεκτικότητα κατά τη λειτουργία τους στις πραγματικές συνθήκες του περιβάλλοντος της καλλιέργειας,
- τα συστήματα φωτισμού θα πρέπει να παρέχουν ευελιξία στην αλλαγή των θέσεων εγκατάστασης των φωτιστικών σωμάτων. Η φορητότητα των φωτιστικών σωμάτων είναι ιδιαίτερος χρήσιμη παράμετρος στις αστικές καλλιέργειες, ή σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες στις οποίες είτε υπάρχει διαρκής αλλαγή στα καλλιεργούμενα είδη, είτε στον ίδιο χώρο και για την ίδια χρονική περίοδο καλλιεργούνται περισσότερα από ένα είδη, και
- τα συστήματα φωτισμού θα πρέπει να επιτρέπουν την εύκολη επεκτασιμότητα και κλιμάκωση των φωτιστικών σωμάτων, δηλαδή να υπάρχει η δυνατότητα για την εύκολη αφαίρεση και προσθήκη φωτιστικών σωμάτων.

(δ) *Οικονομικές απαιτήσεις* (Economical Requirements):

- γενικά το κόστος της αρχικής επένδυσης (initial investment cost) θα πρέπει να είναι όσο πιο χαμηλό γίνεται. Στο κόστος αυτό περιλαμβάνονται, οι αρχικές εγκαταστάσεις, καλωδιώσεις, ρυθμίσεις, καθώς και η αγορά των φωτιστικών σωμάτων και των συστημάτων τροφοδοσίας και ελέγχου τους, και

- το κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης (ownership cost) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο χαμηλό.

Οι πηγές φωτισμού που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στο πεδίο της γεωργίας είναι αυτές των λαμπτήρων υψηλής πίεσης νατρίου (HPS: High-Pressure Sodium), και αυτές της υψηλής έντασης εκφόρτισης (HID: High Intensity Discharge). Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογικές εξελίξεις στις διόδους εκπομπής φωτός (LEDs: Light-Emitting Diodes) προκάλεσαν πραγματική επανάσταση στο χώρο του φωτισμού διεθνώς. Τα πλεονεκτήματα των νέων αυτών πηγών φωτός είναι [29,30]:

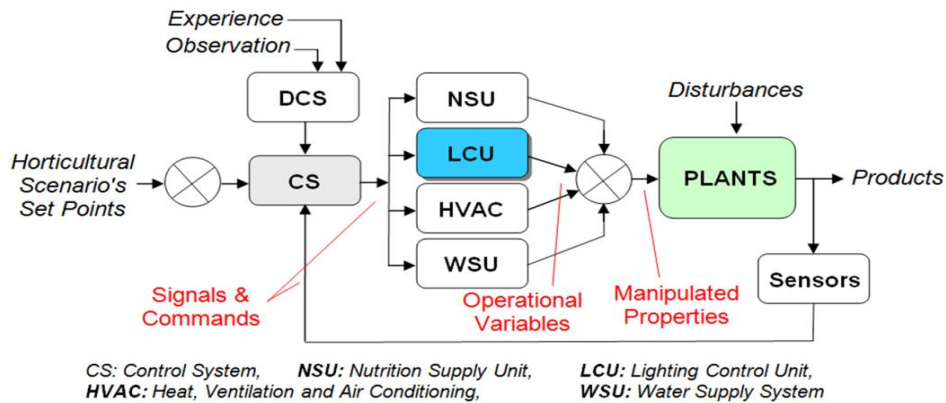
- είναι τάξεις μεγέθους πιο χαμηλής κατανάλωσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πηγές,
- έχουν πολύ μεγάλη δυναμική απόκριση,
- έχουν πολύ μεγαλύτερο χρόνο ζωής, και
- ως εξαρτήματα στερεάς κατάστασης που είναι (solid-state devices), τα LEDs επιτρέπουν τον έλεγχο του παραγόμενου φωτός στο μέγιστο βαθμό, π.χ. έλεγχος μήκους φάσματος εκπομπής (wavelength spectrum control), έλεγχος επιπέδου φωτεινής έντασης (light dimming), έλεγχος θερμοκρασίας χρώματος φωτός (color temperature), κλπ.

Παρά το υψηλό κόστος των πηγών φωτισμού τεχνολογίας LED, το οποίο είναι δικαιολογημένο για τα προϊόντα κάθε πρωτοεμφανιζόμενης τεχνολογίας, οι εν λόγω πηγές ήδη χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές του τεχνητού συμπληρωματικού φωτισμού σε συνδυασμό με πηγές τύπου HPS ή HID. Στο προσεχές μέλλον, αναμένεται οι πηγές τύπου LED να μπορούν να προσφέρουν μέχρι και 350 lumens/Watt, επιτρέποντας έτσι την αύξηση του PFD για την φυτοκομία [31]. Σύμφωνα με τις προβλέψεις των ειδικών, οι πηγές τύπου LED θα επικρατήσουν ολοκληρωτικά στο χώρο του φωτισμού στο προσεχές μέλλον [27]. Οι προκλήσεις, αλλά και οι απαιτήσεις, που αναφέρθηκαν παραπάνω, φαίνεται να μπορούν να αντιμετωπιστούν από συστήματα φωτισμού που χρησιμοποιούν πηγές τύπου LED.

2.4.2. Συστήματα Φωτισμού

Ιδανικά, ένα σύστημα φωτισμού για τον φωτισμό ακριβείας (precision lighting) στη φυτοκομία θα έπρεπε να μπορεί να ενσωματωθεί πλήρως σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου όπου η ανάδραση πληροφορίας από αισθητήρες (π.χ. βιο-αισθητήρες, αισθητήρες φωτεινής έντασης, κλπ) θα μπορούσε να αντισταθμίσει δυναμικά μεταβολές και διαταράξεις του περιβάλλοντος (π.χ. σκιάσεις,

περιβαλλοντικές αλλαγές, κλπ). Η Εικόνα 2.6 αναπαριστά ένα τυπικό σύστημα αυτοματισμού στο οποίο έχει ενσωματωθεί το σύστημα φωτισμού.

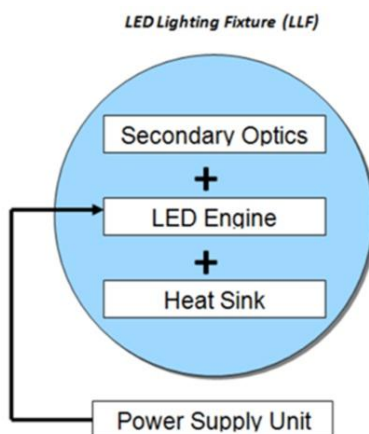


Εικόνα 2.6. Μπλοκ διάγραμμα τυπικού συστήματος αυτοματισμού στο οποίο έχει ενσωματωθεί το σύστημα ελέγχου του φωτισμού.

Η τεχνολογία των πηγών φωτισμού LED υποστηρίζει την δημιουργία φωτιστικών σωμάτων τα οποία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και να ελεγχθούν από ένα κεντρικό σύστημα φωτισμού.

Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζεται η γενική δομή ενός φωτιστικού σώματος (LF: Lighting Fixture). Αυτό αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη:

- την διάταξη των εξαρτημάτων LED (LED Engine), στην οποία τα LEDs είναι συνδεδεμένα εν σειρά ή εν παραλλήλω αναλόγως της επιθυμητής μεθόδου τροφοδοσίας τους,
- την ψύκτρα (het sink) για την απαγωγή της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά την λειτουργία των εξαρτημάτων LED, η οποία τοποθετείται στο πίσω μέρος του φωτιστικού σώματος,
- την δευτερεύουσα οπτική λειτουργία (secondary optics) σε μορφή πολλών φακών (έναν σε κάθε LED) ή σε μορφή ενός ενιαίου φακού για όλη την συστοιχία των LEDs του φωτιστικού σώματος. Οι εν λόγω φακοί επιλέγονται σύμφωνα με τη γωνία, την απόσταση των αντικειμένων από το φωτιστικό, καθώς και το σχήμα του εκπεμπόμενου φωτός που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή, και
- τη μονάδα τροφοδοσίας.

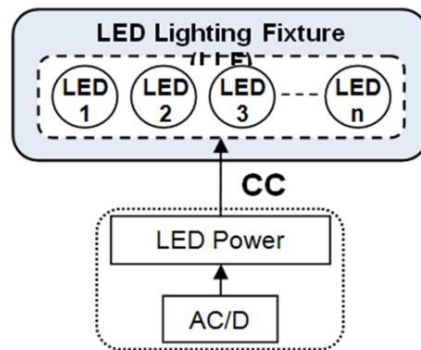


Εικόνα 2.7. Τυπικό μπλοκ διάγραμμα της δομής ενός φωτιστικού σώματος τεχνολογίας LED.

Στην κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος του φωτιστικού σώματος επιλέγεται απλό πλαστικό υλικό (π.χ. τύπου FR4) όταν η ισχύς των LEDs είναι χαμηλή και δεν αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες, ή αλουμίνιο για τις περιπτώσεις όπου πρέπει η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία να απάγεται γρήγορα προς την ψύκτρα του φωτιστικού σώματος. Είναι προφανές πως οι λαμπτήρες τεχνολογίας LED, σε αντίθεση με τις συμβατικές λύσεις, είναι εξ' ολοκλήρου ηλεκτρονικές συσκευές.

Η μονάδα τροφοδοσίας μπορεί να είναι υλοποιημένη στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για την στήριξη των LEDs, ή να είναι ανεξάρτητη εξωτερική μονάδα. Η μονάδα αυτή μπορεί είτε να είναι τοποθετημένη εντός του περιβλήματος στέγασης του φωτιστικού σώματος, ή να είναι εξωτερικά τοποθετημένη. Συγκεκριμένα, για την διανομή τροφοδοσίας των φωτιστικών σωμάτων ακολουθούνται δύο προσεγγίσεις, αυτή της τροφοδοσίας με σταθερό ρεύμα (CC: Constant Current), και αυτή της τροφοδοσίας με σταθερή τάση (CV: Constant Voltage) [32]. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται η τοπολογία τροφοδοσίας ενός φωτιστικού σώματος με σταθερό ρεύμα. Τα εξαρτήματα LEDs για να λειτουργήσουν, και να εξαγάουν την επιθυμητή ένταση φωτός, πρέπει να τροφοδοτούνται με ρεύμα σταθερής τιμής. Στις περιπτώσεις όπου πολλά LEDs συνδέονται σε σειρά, κι επειδή η τάση ορθής φοράς (V_f : Forward Voltage) των διόδων LED μπορεί να κυμαίνεται ελαφρώς από εξάρτημα σε εξάρτημα, επιβάλλεται η οδήγησή όλης της σειράς των LEDs με ρεύμα ίδιας ονομαστικής τιμής. Στην περίπτωση όπου η σειρά των LEDs

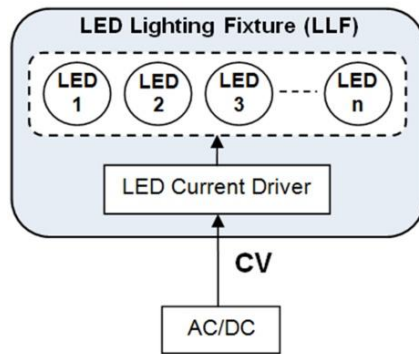
τροφοδοτείται από σταθερή τάση, τότε θα εμφανίζονταν οπτικές διαφορές στην φωτεινή ένταση των εξαρτημάτων LEDs με την μεγαλύτερη τάση V_f .



Εικόνα 2.8. Τοπολογία διανομής τροφοδοσίας μέσω σταθερού ρεύματος.

Για τη δημιουργία του σταθερού ρεύματος χρησιμοποιούνται κυκλώματα μετατροπής τάσης (DC/DC Converters) σε τοπολογίες υποβιβασμού (step-down converters) ή σε τοπολογία ανύψωσης τάσης (step-up converters). Η επιλογή του είδους του μετατροπέα εξαρτάται από την τάση DC που παρέχει η διάταξη μετατροπής της τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (V_{ac}) σε τάση σταθερού ρεύματος (V_{dc}).

Η τοπολογία της τροφοδοσίας του φωτιστικού σώματος με σταθερή τάση απεικονίζεται στην Εικόνα 2.9. Στην περίπτωση αυτή, τα κυκλώματα οδήγησης των LEDs θα πρέπει να βρίσκονται πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα του φωτιστικού σώματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται LDoB (LED Driver-on-Board) [33]. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την χρήση απλών εξωτερικών τροφοδοτικών μονάδων συνεχούς τάσης (DC) για την τροφοδοσία των φωτιστικών σωμάτων. Οι μονάδες τροφοδοσίας αυτές κοστίζουν αρκετά λιγότερο σε σχέση με τις εξειδικευμένες μονάδες τροφοδοσίας σταθερού ρεύματος.

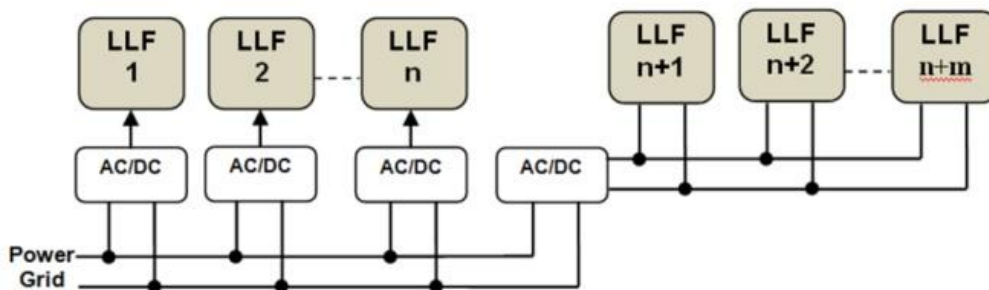


Εικόνα 2.9. Τοπολογία διανομής τροφοδοσίας μέσω σταθερής τάσης.

Η χρήση ενσωματωμένων μετατροπέων τάσης στο φωτιστικό σώμα για την δημιουργία σταθερού ρεύματος επιβάλλει μια μικρή αύξηση στο κόστος σε επίπεδο φωτιστικού σώματος. Από την άλλη πλευρά, τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι:

- πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των LEDs παρέχουν δυνατότητες ελέγχου και προστασίας των LEDs, π.χ. έλεγχος βραχυκυκλώματος, έλεγχος βλάβης, κλπ. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα προστασίας σε επίπεδο φωτιστικού σώματος,
- ικανοποιεί τις τάσεις και τις απαιτήσεις για τυποποίηση στην κατασκευή φωτιστικών σωμάτων [34],
- φωτιστικά σώματα με διαφορετικούς τύπους LED και διαφορετικές απαιτήσεις σε ρεύμα, μπορούν να τροφοδοτηθούν όλα μαζί από τροφοδοτικά σταθερής τάσης, και
- επιτρέπει την κεντρική διαχείριση της διανομής τροφοδοσίας από κεντρικές μονάδες τροφοδοσίας.

Στην Εικόνα 2.10 απεικονίζεται παράδειγμα τροφοδοσίας φωτιστικών σωμάτων μέσω σταθερής τάσης (CV). Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται και οι περιπτώσεις τροφοδοσίας μεμονωμένων φωτιστικών σωμάτων, αλλά και σειράς φωτιστικών σωμάτων. Η τελευταία, είναι αρκετά συνηθής στις εφαρμογές φωτισμού στη γεωργία.

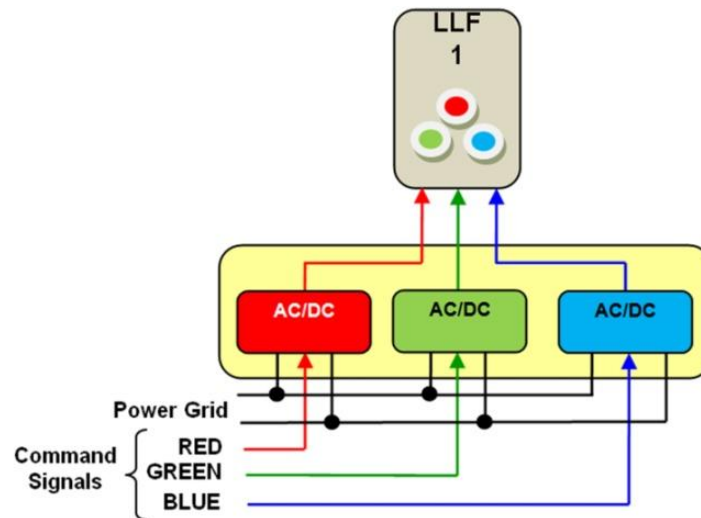


Εικόνα 2.10. Διανομή σταθερής τάσης σε μεμονωμένα φωτιστικά σώματα και σε σειρά φωτιστικών σωμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις τα κυκλώματα οδήγησης των LEDs με σταθερό ρεύμα είναι ενσωματωμένα εντός των φωτιστικών σωμάτων (LDoB).

Οι τιμές των τάσεων τροφοδοσίας των εξωτερικών τροφοδοτικών είναι συνήθως +24 Vdc ή +48 Vdc. Για τη διανομή της τάσης τροφοδοσίας απαιτούνται δύο καλώδια (τάση και γείωση).

Στις περιπτώσεις όπου τα φωτιστικά σώματα πρέπει να εκπέμπουν φως σε διάφορα χρώματα (διάφορα μήκη κύματος φωτός), τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν LEDs διαφορετικών χρωμάτων φωτός. Ένα φωτιστικό σώμα μπορεί να περιλαμβάνει μονοχρωματικά LED ενός συγκεκριμένου χρώματος, είτε συνδυασμό LEDs με διαφορετικών χρωμάτων.

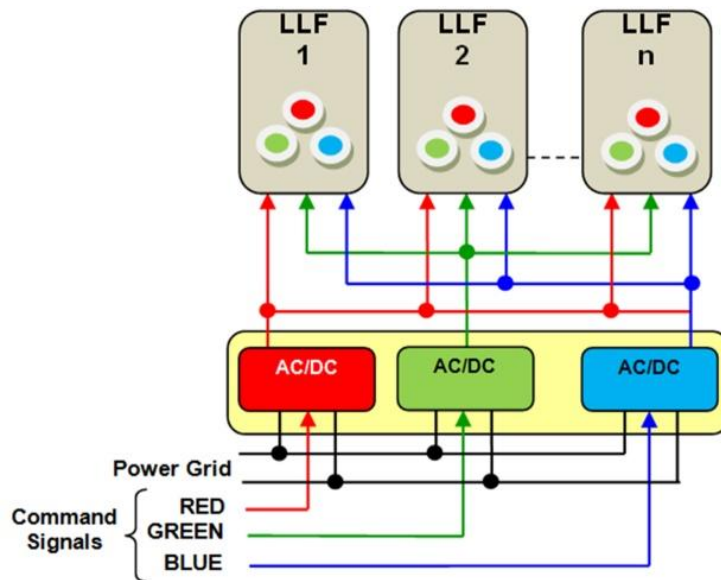
Στην Εικόνα 2.11 φαίνεται η οδήγηση ενός τρι-χρωματικού (RGB: Red-Green-Blue) φωτιστικού σώματος μέσω σταθερού ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή, στο εσωτερικό του φωτιστικού σώματος θα πρέπει να περιλαμβάνονται τρία διαφορετικά κυκλώματα οδήγησης ρεύματος LED, ένα για κάθε χρωματική ομάδα LEDs. Από πλευράς εξωτερικής τροφοδοσίας, θα πρέπει να υπάρχουν τρεις διαφορετικές μονάδες τροφοδοσίας σταθερής τάσης. Κάθε μια από τις μονάδες αυτές θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος (power electronics) μέσω των οποίων θα επιτρέπεται η αυξομείωση του ρεύματος με σκοπό την αυξομείωση της φωτεινής έντασης του κάθε χρώματος. Με τη μίξη της έντασης των τριών χρωμάτων είναι δυνατόν να παραχθεί οποιοδήποτε χρώμα.



Εικόνα 2.11. Ελεγχόμενη τροφοδοσία σταθερού ρεύματος ενός τρι-χρωματικού (RGB) φωτιστικού σώματος με δυνατότητα δημιουργίας οποιουδήποτε χρώματος φωτισμού.

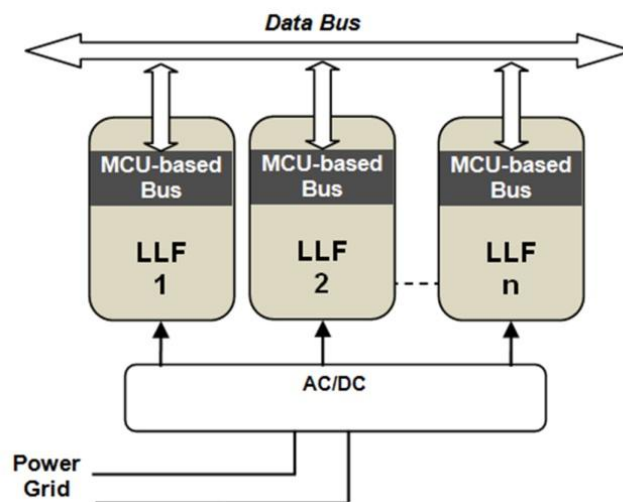
Σε εφαρμογές συστημάτων τεχνητού φωτισμού όπου πρέπει να τροφοδοτηθούν περισσότερα από ένα φωτιστικά σώματα και ταυτόχρονα να ελέγχεται ο συνδυασμός των χρωματικών εντάσεων των τριών χρωματικών ομάδων LEDs, η τοπολογία της διαχείρισης που ακολουθείται είναι αυτή της Εικόνας 2.12. Στην περίπτωση αυτή, τα τρία εξωτερικά τροφοδοτικά σταθερού ρεύματος τροφοδοτούν παράλληλα όλα τα φωτιστικά σώματα.

Σύμφωνα με την μέθοδο ρύθμισης των χρωμάτων μέσω της αυξομείωσης του ρεύματος τροφοδοσίας, απαιτούνται καλωδιώσεις μεγάλων διατομών. Στις περιπτώσεις όπου τα φωτιστικά είναι διασπαρμένα σε μεγάλη έκταση, τότε εμφανίζονται δυσκολίες στην δρομολόγηση των καλωδίων. Από την άλλη πλευρά, η εν λόγω προσέγγιση επιβάλλει πολυπλοκότητα στις συνδέσεις αλλά και σημαντικό κόστος λόγω της αξίας των μεγάλων χάλκινων καλωδίων. Επί πλέον, η δρομολόγηση καλωδίων διακοπόμενης ροής ρεύματος στο πεδίο, είναι αιτία πρόκλησης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στα διάφορα τοπικά συστήματα ελέγχου [35].



Εικόνα 2.12. Ελεγχόμενη τροφοδοσία σταθερού ρεύματος ομάδας τρι-χρωματικών (RGB) φωτιστικών σωμάτων με δυνατότητα δημιουργίας οποιουδήποτε χρώματος φωτισμού.

Για την αποφυγή των προαναφερθέντων προβλημάτων, τα προβληματικά και ακριβά καλώδια μεταφοράς των ρευμάτων ανά χρώμα αντικαθίστανται από διαύλους επικοινωνίας δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή τα φωτιστικά σώματα πρέπει να διαθέτουν ενσωματωμένο κύκλωμα ρύθμισης ρεύματος των LEDs ελεγχόμενου από μικροελεγκτή (MCU) (βλ. Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13. Χρήση διαύλου επικοινωνίας δεδομένων για την αποστολή εντολών ρύθμισης χρώματος φωτισμού σε ομάδα φωτιστικών σωμάτων.

Ιστορικά, οι πρώτη εμφάνιση των δικτύων ελέγχου συστημάτων φωτισμού προήλθαν από τον χώρο του αυτοματισμού κτιρίων (BMS: Building Management Systems). Στις μέρες μας η τεχνολογία των πηγών φωτισμού LED έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη εφαρμογών όπως π.χ. για την διαχείριση του φωτισμού για την εξοικονόμηση ενέργειας [36,37], μέχρι τη δημιουργία προσομοίωσης του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό περιβάλλον [38].

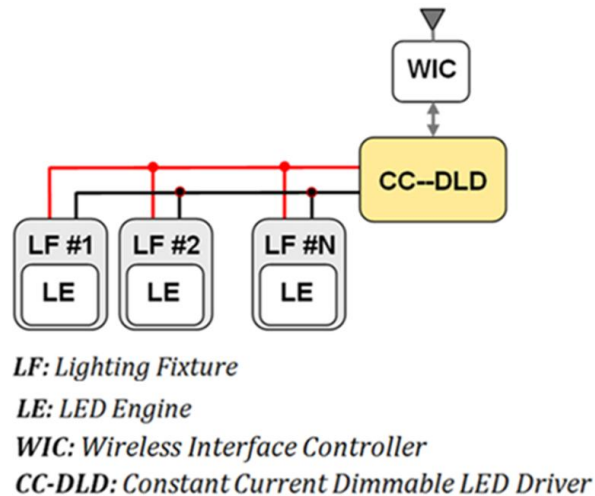
Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν αρκετά πρωτόκολλα για την δικτύωση και τον έλεγχο των φωτιστικών σωμάτων. Μεταξύ των πιο διαδομένων από αυτά είναι τα: DMX512, DALI (Digital Addressable Lighting Interface), και EIB-KNX (EIB: European Installation Bus), και LON (Local Operation Network) [39-41]. Σχετικά με το φυσικό επίπεδο (physical layer) των παραπάνω πρωτοκόλλων επικοινωνίας χρησιμοποιούνται ενσύρματες διασυνδέσεις οι οποίες βασίζονται είτε στο βιομηχανικό πρότυπο EIA-485 [42], είτε στο πρότυπο X10 για την μεταφορά δεδομένων μέσω των γραμμών του ηλεκτρικού δικτύου (Power Line Communication).

Για τις περιπτώσεις εφαρμογών όπου απαιτείται ο συγχρονισμός των φωτιστικών σωμάτων, τα παραπάνω πρωτόκολλα δεν μπορούν να ανταποκριθούν επαρκώς λόγω του ότι δεν διαθέτουν τους απαραίτητους μηχανισμούς. Για τον λόγο αυτό, με την πάροδο του χρόνου, υιοθετήθηκαν πρωτόκολλα από τον χώρο των δικτύων υπολογιστών, όπως το Ethernet, το WiFi, και άλλα διαδικτυακά πρωτόκολλα (IP protocols) [43,44], τα οποία εμπεριέχουν ισχυρούς μηχανισμούς για τον συγχρονισμό των διασυνδεδεμένων συσκευών. Επί πλέον, την τελευταία δεκαετία, έχει αρχίσει η χρήση και πρωτοκόλλων από το χώρο των ασυρμάτων δικτύων κόμβων αισθητήρων (π.χ. IEEE 802.15.4/ZigBee, κλπ.) [45].

Η χρήση ασύρματων τεχνολογιών στην διασύνδεση και στην επικοινωνία των φωτιστικών σωμάτων στα συστήματα τεχνητού φωτισμού στην γεωργία εξαλείφουν τα μειονεκτήματα των ενσύρματων λύσεων, όπως π.χ. την πολυπλοκότητα στις καλωδιώσεις, το υψηλό κόστος καλωδίων, την μείωση της αξιοπιστίας των εφαρμογών λόγω ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, κλπ. Από την άλλη πλευρά, οι ασύρματες λύσεις διασφαλίζουν την απρόσκοπτη κλιμάκωση του πλήθους των φωτιστικών σωμάτων των δικτύων φωτισμού καθώς επίσης επιτρέπουν την ευκολία στην επανατοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων στο πεδίο της εφαρμογής.

Παρ' όλα αυτά, ιδανικά, τα συστήματα φωτισμού θα έπρεπε να υποστηρίζουν τη δυνατότητα ομαδοποίησης των φωτιστικών σωμάτων τους (Lighting Fixtures

Clustering). Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό για τις εφαρμογές στα θερμοκήπια και στις εφαρμογές αστικών καλλιεργειών. Δυστυχώς, σήμερα η κοινή πρακτική που ακολουθείται για την υλοποίηση ομαδοποίησης φωτιστικών σωμάτων στις εφαρμογές των θερμοκηπίων είναι η τοπολογία της Εικόνας 2.14.



Εικόνα 2.14. Τυπική τοπολογία για την ομαδοποίηση φωτιστικών σωμάτων σε εφαρμογές συστημάτων τεχνητού φωτισμού σε θερμοκήπια.

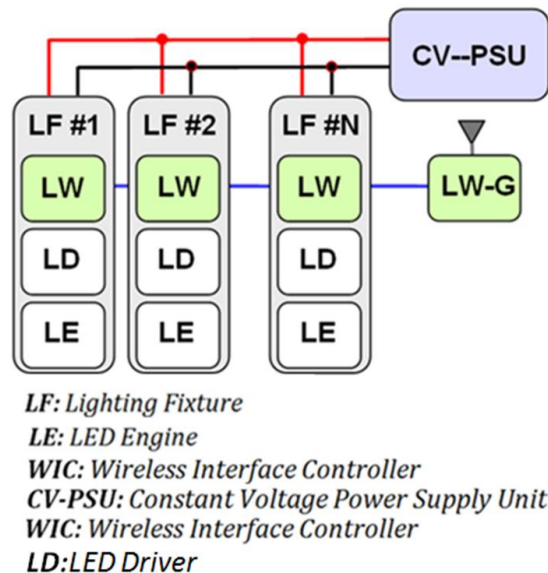
Τα κυριότερα προβλήματα στην προσέγγιση αυτή είναι:

- όλα τα φωτιστικά σώματα πρέπει υποχρεωτικά να προέρχονται από τον ίδιο κατασκευαστή, και να έχουν ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας, έτσι ώστε να έχουν την ίδια οπτική συμπεριφορά όταν οδηγούνται από το ίδιο εξωτερικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος,
- δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον φωτιστικά σώματα άλλου κατασκευαστή,
- η προσθήκη επί πλέον φωτιστικών σωμάτων περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού τροφοδοτικού σταθερού ρεύματος. Αρκετά συχνά, η αύξηση του πλήθους των φωτιστικών σωμάτων ισοδυναμεί με αγορά νέου, μεγαλύτερης ισχύος, τροφοδοτικού σταθερού ρεύματος και αντικατάστασης του υπάρχοντος,
- τα τροφοδοτικά σταθερού ρεύματος μεγάλης ισχύος είναι εξαιρετικά ακριβά,
- το εξωτερικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος πρέπει να παρέχει δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος εξόδου του (dimming),

- το εξωτερικό τροφοδοτικό σταθερού ρεύματος πρέπει να είναι του ίδιου κατασκευαστή με τα φωτιστικά σώματα, και
- όλα τα φωτιστικά σώματα της ομάδας υποχρεωτικά όλα μαζί θα εκτελούν τις εντολές που παραλαμβάνονται από το ασύρματο δίκτυο.

2.4.3. Η Αρχιτεκτονική LEDWIRE

Στα πλαίσια της παρούσης διδακτορικής διατριβής, προτείνεται μια νέα αρχιτεκτονική, η LEDWIRE. Η αρχιτεκτονική αυτή παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας ομάδων φωτιστικών σωμάτων χρησιμοποιώντας ενσύρματη και ασύρματη διασύνδεση. Η κάθε ομάδα φωτιστικών ελέγχεται από μια κύρια συσκευή (master device) η οποία παρέχει την ασύρματη διασύνδεση με το δίκτυο φωτισμού της εγκατεστημένης εφαρμογής. Η παραπάνω τοπολογία μπορεί πλέον να πάρει την μορφή της Εικόνας 2.15. Στην κύρια συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε πρότυπο πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης και επικοινωνίας από τον χώρο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων [46], ή ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί WiFi.



Εικόνα 2.15. Τοπολογία τροφοδοσίας και ελέγχου ομάδας φωτιστικών σωμάτων βάσει της αρχιτεκτονικής LEDWIRE.

Τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής LEDWIRE σε σχέση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις είναι:

- τα φωτιστικά σώματα μπορούν να τροφοδοτούνται από χαμηλού κόστους εξωτερικά τροφοδοτικά σταθερής τάσης κι όχι από ακριβά και δυσεύρετα τροφοδοτικά σταθερού ρεύματος,
- επιτρέπεται η ομαδοποίηση ετερογενών φωτιστικών σωμάτων, δηλαδή τα φωτιστικά μπορούν να είναι διαφορετικών τύπων και διαφορετικών κατασκευαστών,
- επιτρέπεται η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων ελέγχου και των φωτιστικών, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες λύσεις όπου επιτρέπεται μόνο η αποστολή εντολών προς τα φωτιστικά,
- το κόστος των καλωδίων είναι μικρότερο,
- διευκολύνεται η φορητότητα των φωτιστικών σωμάτων,
- διευκολύνονται εφαρμογές αστικής καλλιέργειας στις οποίες η ανάγκη για επανακαθορισμό των ομάδων φωτιστικών σωμάτων είναι επιτακτική και συχνή, και
- διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό η διαχείριση του δικτύου φωτισμού [47].

Για την διασύνδεση της ομάδας των φωτιστικών σωμάτων, αρχικά μελετήθηκε η χρήση δύο πρωτοκόλλων από τον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας (automotive communication protocols) λόγω της υψηλής αξιοπιστίας τους, και συγκεκριμένα λόγω της ανοχής τους σε τάσεις τροφοδοσίας μεγαλύτερων των +5 Vdc, και της αναισθησίας τους σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [48,49]. Η ιδέα για την χρήση του πρωτοκόλλου CAN εγκαταλείφθηκε λόγω του μεγάλου πλήθους καλωδίων του διαύλου του αλλά και λόγω της πολυπλοκότητάς της υλοποίησής του σε μικροελεγκτές χαμηλού κόστους αρχιτεκτονικής 8-bit. Τελικά υιοθετήθηκε το πρωτόκολλο LIN, το οποίο είναι πολύ απλό στην υλοποίησή του σε μικροελεγκτές και απαιτεί μόνο ένα καλώδιο για το δίαυλο δεδομένων του. Επί πλέον, το κόστος των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης διαύλου LIN (LIN driver chips) είναι εύκολα ανευρέσιμα στην αγορά και έχουν πολύ μικρό κόστος. Το πρότυπο του πρωτοκόλλου LIN, εκτός από τις λεπτομέρειες των λειτουργιών του πρωτοκόλλου, περιέχει και οδηγίες για την διασύνδεση στο φυσικό επίπεδο όπως επίσης, και λεπτομέρειες για τα εργαλεία ανάπτυξης εφαρμογών [50].

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του πρότυπου πρωτοκόλλου LIN είναι:

- η επικοινωνία δεδομένων βασίζεται στην μέθοδο αποστολής/λήψης δεδομένων UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter),

- το δίκτυο απαρτίζεται από μια κύρια συσκευή (master device) και από πολλές ελεγχόμενες συσκευές (slave devices),
- για την διασύνδεση στο φυσικό επίπεδο απαιτείται μόνο ένα καλώδιο, δηλαδή, απαιτείται μόνο ένα σήμα για την αμφίδρομη επικοινωνία,
- χαμηλό κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης του διαύλου δεδομένων,
- τα ολοκληρωμένα οδήγησης του διαύλου αυτοσυγχρονίζονται δίχως την απαίτηση χρήσης κρυστάλλου (crystal quartz) ή κεραμικού ταλαντωτή (ceramic resonator),
- τα χρονικά διαστήματα αποστολής δεδομένων είναι προκαθορισμένα (deterministic signals transmission), ως εκ τούτου, η μέγιστη χρονική καθυστέρηση στη λήψη δεδομένων είναι εξ' αρχής γνωστή (computable propagation delay),
- τα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης του διαύλου μπορούν να λειτουργούν με μεγάλες τάσεις τροφοδοσίας, και
- τα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης του διαύλου εμπεριέχουν μετατροπέα τάσης DC/DC για την δημιουργία τάσης +5 Vdc ή +3.3 Vdc. Η τάση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή καθώς επίσης και όποιων άλλων κυκλωμάτων υπάρχουν στο ίδιο τυπωμένο κύκλωμα.

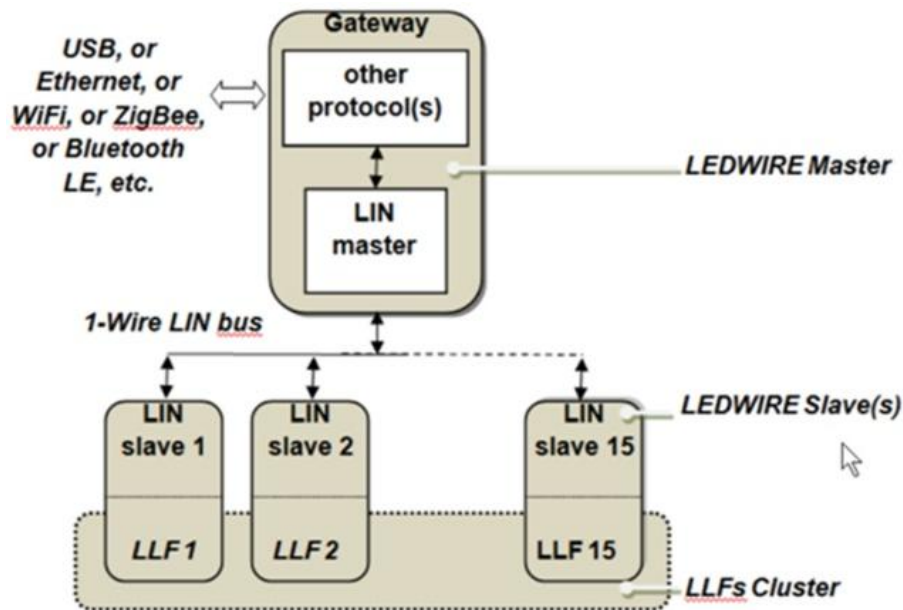
Στον Πίνακα 1.1 παρατίθενται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του διαύλου LIN σε αντιπαραβολή με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διαύλου του EIA-485 [51] ο οποίος είναι ο πιο διαδεδομένος διάυλος στις εφαρμογές ενσφύρατων δικτύων φωτισμού.

Πίνακας 2.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά των διαύλων επικοινωνίας EIA-485 και LIN.

Parameter	EIA-485	LIN
Bus Length (m)	1200	40
Number of Bus Wires	2 for half	1
Voltage Levels (V)	-7 to +12	-27 to 40
Max. Number of Nodes	32	16
Cost	Low	Very Low
Driver Supply Voltage DC/DC converter	+3.3V up to No	Up to +27V Yes

Baud Rate	> 10Mbit/sec	20kbits/sec
ESD/EMI immunity	Normal	High
Under-Voltage Protection	No	Yes
Over-Temperature Control	No	Yes
Short-Circuit Protection	Yes	Yes
Installation/Wiring	Difficult	Easy
Special Wires	Twisted Pairs	No

Στην Εικόνα 2.16 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα της ομαδοποίησης φωτιστικών σωμάτων σύμφωνα με την αρχιτεκτονική LEDWIRE. Από πλευράς σχεδιασμού υλικού (hardware design), υπάρχουν δύο τύποι υποσυστημάτων επικοινωνίας, η συσκευή LEDWIRE Master, και η συσκευή LEDWIRE Slave. Η μεν συσκευή LEDWIRE Master μπορεί να υλοποιηθεί ως ανεξάρτητη πλακέτα, οι δε συσκευές LEDWIRE Slave πρέπει να ενσωματώνονται στα φωτιστικά σώματα. Η συσκευή LEDWIRE Master θεωρείται ως πύλη δρομολόγησης δεδομένων (data gateway). Για τον λόγο αυτό μπορεί να παρέχει δυνατότητες διασύνδεσης χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα πρωτόκολλα δικτύωσης και επικοινωνίας.



Εικόνα 2.16. Μπλοκ διάγραμμα τοπολογίας ομαδοποίησης και ελέγχου φωτιστικών σωμάτων σύμφωνα με την αρχιτεκτονική LEDWIRE. Διακρίνονται δύο τύποι συσκευών: αυτή της κύριας συσκευής ελέγχου και δρομολόγησης (LEDWIRE Master), και αυτή των ελεγχόμενων συσκευών (LEDWIRE Slave).

Για την επικοινωνία μεταξύ του LEDWIRE Master και των LEDWIRE Slaves υλοποιήθηκε στο επίπεδο εφαρμογής του πρωτοκόλλου επικοινωνίας (application layer) ένα πολύ περιεκτικό σύνολο μηνυμάτων επικοινωνίας. Τα μηνύματα αυτά αποστέλλονται και παραλαμβάνονται μέσω του διαύλου LIN από τους μικροελεγκτές των συσκευών LEDWIRE Master και Slave.

Συγκεκριμένα, η συσκευή LEDWIRE Master ελέγχει τα δικτυωμένα LEDWIRE Slaves στέλνοντάς του περιοδικά ένα καθολικό μήνυμα/εντολή (global message command). Η δομή του μηνύματος αυτού καθορίζεται αυστηρώς από το πρότυπο του προτύπου LIN (LIN standard ver. 2.1) [50]. Η δομή του μηνύματος *Global Message/Command*, απεικονίζεται στην Εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17. Δομή του καθολικού μηνύματος *Global Message/Command*.

Τα πεδία από τα οποία απαρτίζεται το μήνυμα *Global Message/Command* είναι:

- *Break*: το πεδίο αυτό αποτελεί τον πρόλογο του μηνύματος/εντολής, έχει χαμηλή λογική στάθμη (0 V), διαρκεί 13 bits και τερματίζεται από 1 stop bit (το πεδίο έχει παραληφθεί από την Εικόνα 2.17 λόγω μεγάλου μήκους),
- *Synch*: το πεδίο αυτό διαρκεί 10 bits (το πεδίο έχει παραληφθεί από την Εικόνα 2.17 λόγω μεγάλου μήκους),
- *PID* (Protection Identification): το πεδίο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.18 και περιέχει την διεύθυνση του/των συσκευών LEDWIRE Slave που απευθύνεται το μήνυμα (βλ. Εικόνα 2.18),
- *Data*: το πεδίο αυτό αποτελείται από 6 bytes (RED, GREEN, BLUE, WHITE, FADE, SCEN),
- *Null*: το πεδίο αυτό περιλαμβάνει 2 bytes τα οποία είναι δεσμευμένα προς μελλοντική χρήση, και
- *CS* (Checksum): το πεδίο αυτό έχει μήκος 1 byte και περιέχει την πληροφορία για τον έλεγχο ορθότητας ολόκληρου του μηνύματος.



Εικόνα 2.18. Η δομή του πεδίου *Protected Identification (PID)*.

Τα bits *ID0-ID3* του πεδίου *PID* προσδιορίζουν την διεύθυνση της συσκευής LEDWIRE Slave στην οποία απευθύνεται το μήνυμα *Global Message/Command*. Όταν τα bits αυτά παίρνουν την τιμή 000 τότε το μήνυμα είναι καθολικό και απευθύνεται σε όλες τις συσκευές LEDWIRE Slave. Τα bits *ID4-ID5* προσδιορίζουν το πλήθος σε bytes όλου του μηνύματος. Τα bits *P0* και *P1* χρησιμοποιούνται ως bits ισοτιμίας του μηνύματος.

Σχετικά με τα bytes του πεδίου *Data* του μηνύματος που στέλνει η συσκευή LEDWIRE Master στις συσκευές LEDWIRE Slave, υιοθετήθηκε να περιλαμβάνονται τα εξής:

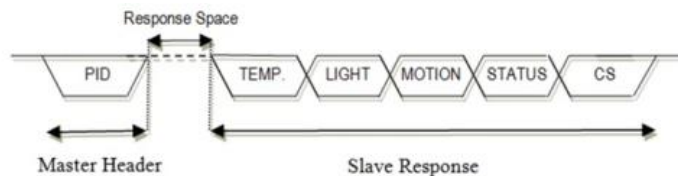
- *Red*: στο byte αυτό περιέχεται η τιμή του κόκκινου χρώματος του φωτός,
- *Green*: το byte αυτό περιέχει την τιμή του πράσινου χρώματος του φωτός,
- *Blue*: το byte αυτό περιέχει την τιμή του μπλε χρώματος του φωτός,
- *White*: το byte αυτό περιέχει την τιμή του λευκού χρώματος του φωτός,
- *Fade*: το byte αυτό παίρνει τιμές από 0 έως 100 και καθορίζει το επίπεδο φωτεινής έντασης όλων των χρωμάτων (*Fade-In/Fade-Out*), και
- *Scen*: το byte αυτό παίρνει τιμές από 0 έως 255 και υποδηλώνει τον κωδικό σεναρίου φωτισμού που πρέπει να εκτελεστεί αυτόματα από ένα ή από όλα τα φωτιστικά σώματα της ομάδας,

Μέσω των τριών bytes *RED*, *GREEN*, και *BLUE*, παρέχεται η δυνατότητα της μίξης των τριών χρωμάτων για την δημιουργία οποιουδήποτε επιθυμητού χρώματος (24-bits true color). Το byte *WHITE* χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της έντασης των λευκών LEDs (στην περίπτωση που το φωτιστικό σώμα διαθέτει) έτσι ώστε να πραγματοποιείται ο απαραίτητος κορεσμός λευκού χρώματος (*white color saturation*).

Επί πλέον, υπάρχει η δυνατότητα ερώτησης της κατάστασης καθενός από τα φωτιστικά σώματα μέσω του προβλεπόμενου μηχανισμού. Στην περίπτωση αυτή, η

συσκευή LEDWIRE Master αποστέλλει στον διαυλο μια διαδοχή πεδίων *Break*, *Synch* και *PID*, περιμένει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και διαβάζει την απόκριση της ερωτούμενης συσκευής (βλ. Εικόνα 2.19). Σχετικά με τα εν λόγω πεδία ισχύουν τα εξής:

- *Break*: ομοίως όπως και στην περίπτωση του μηνύματος *Global Message/Command*,
- *Synch*: ομοίως όπως και στην περίπτωση του μηνύματος *Global Message/Command*, και
- *PID*: περιέχει τη διεύθυνση της συσκευής στην οποία απευθύνεται η συσκευή LEDWIRE Master.



Εικόνα 2.19. Διαδοχή και δομή πεδίων δεδομένων για την ερώτηση της κατάστασης συσκευής από τη συσκευή LEDWIRE Master.

Η συσκευή LEDWIRE Slave που αντιλαμβάνεται πως αυτήν αφορά η ερώτηση, μπορεί να απαντήσει μέσα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, η ερώτηση τερματίζεται. Η απάντηση της συσκευής LEDWIRE Slave απαρτίζεται από τα ακόλουθα bytes:

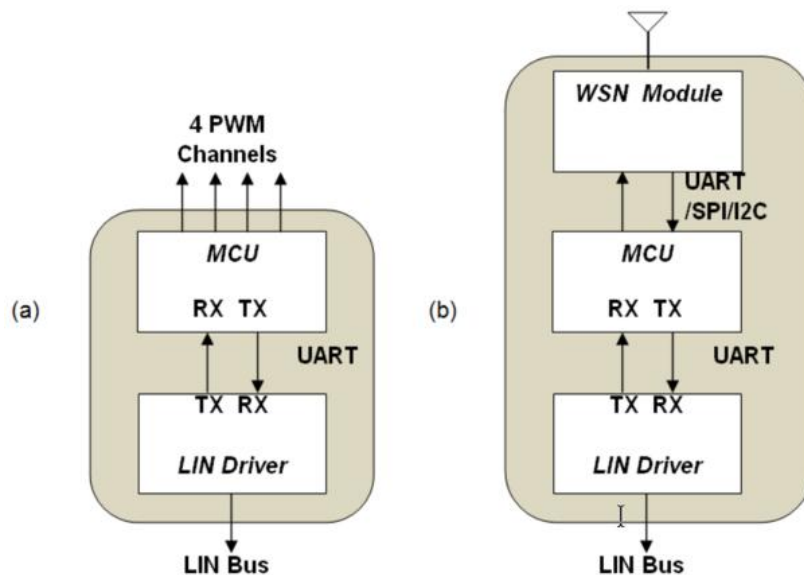
- *TEMP*: το byte αυτό περιέχει την θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό του φωτιστικού σώματος, και συγκεκριμένα τη θερμοκρασία πάνω στην πλακέτα των LEDs,
- *LIGHT*: το byte αυτό περιέχει την τιμή της φωτεινότητας εξωτερικά του φωτιστικού σώματος,
- *MOTION*: το πεδίο αυτό μπορεί να περιέχει τιμή 0xAA ή τιμή 0xFF υποδηλώνοντας την ύπαρξη ή την ανυπαρξία κίνησης στον περιβάλλοντα χώρο του φωτιστικού,
- *STATUS*: το byte αυτό περιέχει έναν κωδικό ο οποίος αντιστοιχεί σε προκαθορισμένες καταστάσεις σφάλματος, και καλής λειτουργίας του φωτιστικού σώματος, και

- CS: το byte αυτό περιέχει την πληροφορία για τον έλεγχο ορθότητας των δεδομένων της απάντησης της συσκευής LEDWIRE Slave.

Σχετικά με το εύρος ζώνης (bandwidth) του διαύλου LIN, η μέγιστη ταχύτητα αποστολής δεδομένων είναι 20 kbits/s. Για την αρχιτεκτονική LEDWIRE έχει επιλεγεί η τυποποιημένη ταχύτητα των 19.2 kbits/s. Η ταχύτητα αυτή διασφαλίζει τη δυναμική απόκριση των φωτιστικών σωμάτων ακόμα και για εφαρμογές όπου οι φωτεινές εναλλαγές υπερβαίνουν το όριο αντίληψης της ανθρώπινης όρασης (πάνω από 100 Hz).

2.4.4. Σχεδιασμός και Υλοποίηση της Αρχιτεκτονικής LEDWIRE

Ο σχεδιασμός του υλικού των δύο τύπων συσκευών (LEDWIRE Master και LEDWIRE Slave) βασίζεται σε αρχιτεκτονική ειδικού σκοπού. Αυτό σημαίνει πως οι δύο συσκευές θα σχεδιαστούν ειδικά για την ικανοποίηση των λειτουργικών απαιτήσεων των εφαρμογών των συστημάτων φωτισμού, δίνοντας έμφαση στην αξιοπιστία και στην μέγιστη επίδοση. Ως εκ τούτου, το υλικό σχεδιάζεται εξ' αρχής (from the scratch) και πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα βέλτιστα κυκλώματα από πλευράς λειτουργιών, μεγέθους και δυνατοτήτων. Στην Εικόνα 2.20 απεικονίζονται τα μπλοκ διαγράμματα των δύο συσκευών της αρχιτεκτονικής LEDWIRE.



Εικόνα 2.20. Μπλοκ διαγράμματα: **α)** της συσκευής του φωτιστικού LEDWIRE Slave, και **β)** της συσκευής της LEDWIRE Master.

Στην συσκευή LEDWIRE Slave, έχει τοποθετηθεί ένας οδηγός διαύλου LIN (LIN bus driver), ο οδηγός επικοινωνεί μέσω θύρας UART με τον μικροελεγκτή της συσκευής. Ο μικροελεγκτής, με την σειρά του, παρέχει τέσσερα κανάλια διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM: Pulsed-Width Modulation) μέσω των οποίων ελέγχει τα τέσσερα χρώματα των LEDs του φωτιστικού σώματος (Red, Green, Blue, και White). Στην περίπτωση της συσκευής LEDWIRE Master έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ένας οδηγός διαύλου LIN, και ένας μικροελεγκτής. Εδώ, ο μικροελεγκτής επικοινωνεί μέσω θύρας UART με το ολοκληρωμένο λειτουργικό υποσύστημα ασύρματης δικτύωσης (wireless communication module).

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε και για τις δύο συσκευές είναι ο CY8C21123 (της εταιρίας Cypress) [52]. Ο μικροελεγκτής αυτός είναι ένα πλήρως προγραμματιζόμενο σύστημα (PSoC: Programmable System-on-Chip). Διαθέτει μόνο οκτώ ακίδες, δύο εκ των οποίων είναι για τη σύνδεση της τάσης λειτουργίας του, ενώ οι υπόλοιπες έξι είναι πλήρως προγραμματιζόμενες. Κάθε μια από αυτές τις έξι ακίδες μπορεί να καθοριστεί είτε ως αναλογική, ή ψηφιακή είσοδος/έξοδος, είτε ως χρονιστής (timer), είτε ως σήμα PWM, είτε ως σήμα περιφερειακών επικοινωνίας όπως π.χ. UART, I2C, ή SPI. Οι ρυθμίσεις των προγραμματιζόμενων ακίδων σε κάθε συσκευή είναι:

- LEDWIRE Master: δύο ακίδες καθορίζονται ως περιφερειακό UART για την επικοινωνία με τον οδηγό διαύλου LIN, και άλλες δύο ακίδες καθορίζονται ως δευτερο UART για την επικοινωνία με το ολοκληρωμένο λειτουργικό υποσύστημα της ασύρματης επικοινωνίας. Οι δύο ακίδες που μένουν αχρησιμοποίητες και εν αναμονή για οποιαδήποτε μελλοντική χρήση, και
- LEDWIRE Slave: δύο ακίδες καθορίζονται ως περιφερειακό UART για την επικοινωνία με τον οδηγό διαύλου LIN, και οι υπόλοιπες τέσσερις ακίδες καθορίζονται ως κανάλια εξόδου παλμών διαμορφούμενου εύρους.

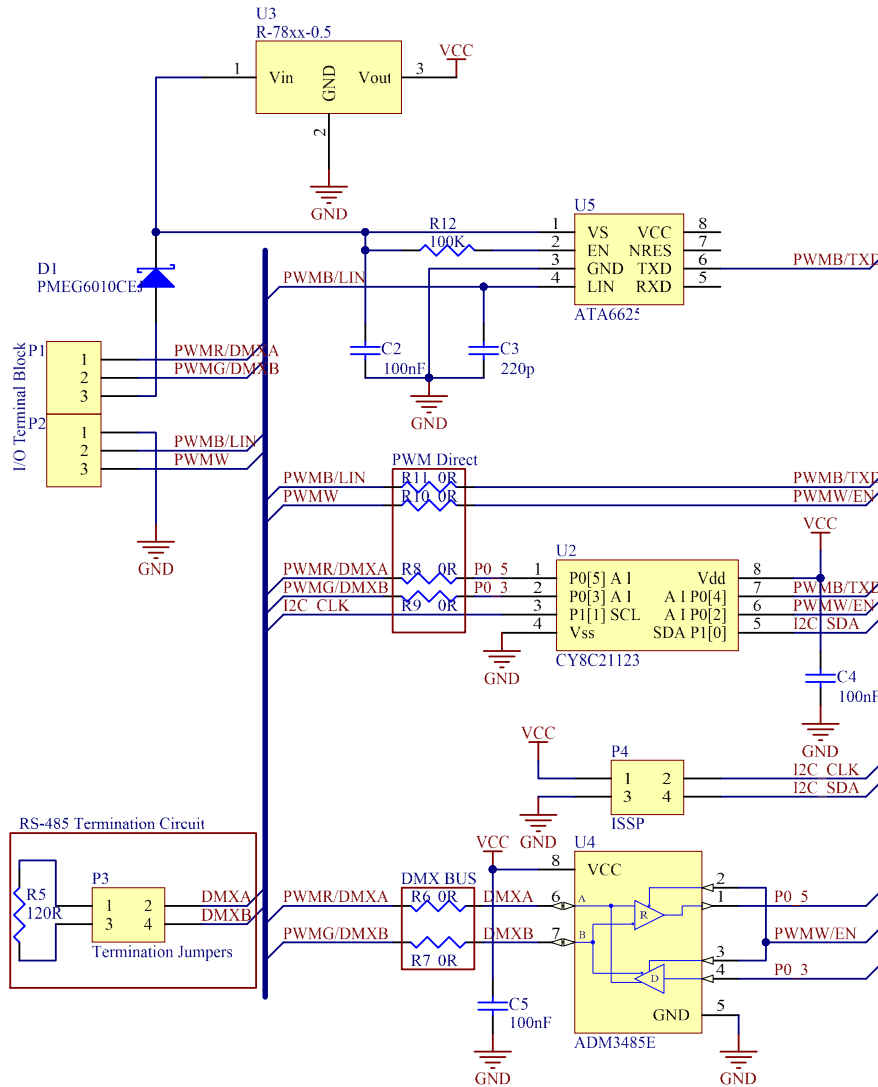
Σχετικά με τις επιλογές των υπόλοιπων εξαρτημάτων του υλικού των δύο συσκευών, επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATA6625 [53] (της εταιρίας Atmel) για την οδήγηση του διαύλου LIN, και το R78B5.0-0.5 (της εταιρίας Recom) [54] για την μετατροπή και σταθεροποίηση της τάσης στα +5 Vdc. Εκτός από τις λειτουργίες τους, όλα τα εξαρτήματα έχουν επιλεγεί επίσης με κριτήριο τις ελάχιστες

διαστάσεις τους. Στην **Εικόνα 2.21** απεικονίζεται η συσκευασία των 8 ακίδων του μικροελεγκτή και του οδηγού του διαύλου LIN.



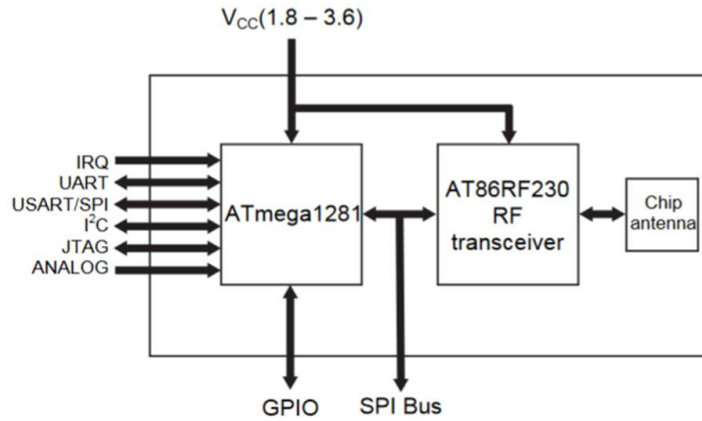
Εικόνα 2.21. Η συσκευασία (package) τύπου SO8, των 8 ακίδων, με διαστάσεις 4.9 x 3.9 mm.

Στην Εικόνα 2.22 παρατίθεται το πρώτο τμήμα του σχηματικού κυκλώματος της συσκευής LEDWIRE Master. Διακρίνονται, τα κυκλώματα τροφοδοσίας, το κύκλωμα της οδήγησης του διαύλου LIN, καθώς επίσης και οι συνδετήρες για την πρόσβαση στα σήματα της πλακέτας. Επί πλέον, έχει προστεθεί και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα για την οδήγηση διαύλου EIA-485 με σκοπό την δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα ενσύρματα δίκτυα φωτισμού μέσω του πρωτοκόλλου EIA-485. Το ολοκληρωμένο αυτό συγκολλείται προαιρετικά στο τυπωμένο κύκλωμα της συσκευής.



Εικόνα 2.22. Το σχηματικό κύκλωμα για την τροφοδοσία, την οδήγηση του διαύλου LIN, και του μικροελεγκτή της συσκευής LEDWIRE Master.

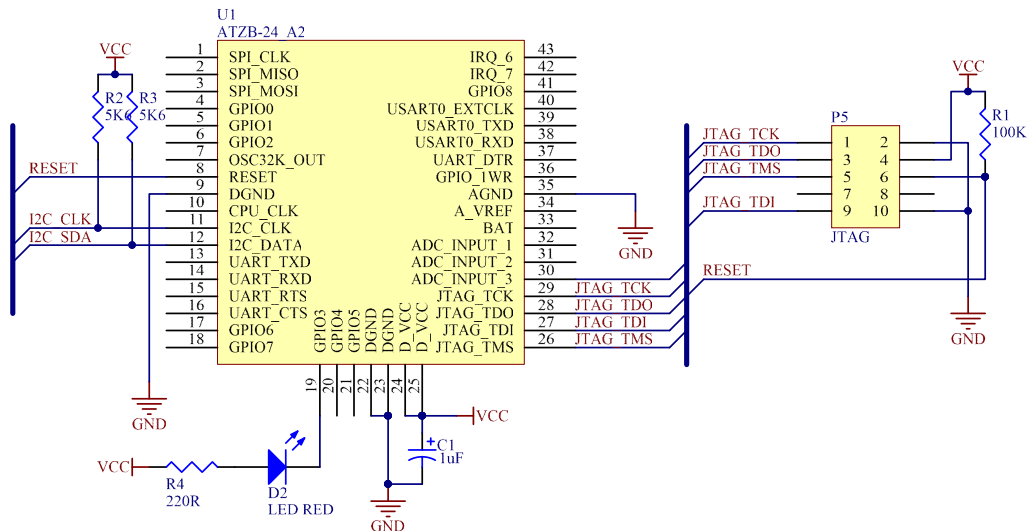
Για την ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία, επιλέχθηκε το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4/ZigBee, και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο λειτουργικό υποσύστημα (module) ZigBit ATZB-24A2 (της εταιρίας Atmel) [55]. Το εν λόγω υποσύστημα περιέχει ένα μικροελεγκτή τύπου AVR (της εταιρίας Atmel) καθώς και το απαραίτητο κύκλωμα για τον ασύρματο πομποδέκτη στα 2.4 GHz (βλ/ Εικόνα 23 και Εικόνα 2.24). Στην Εικόνα 2.25 παρατίθεται το δεύτερο, και τελευταίο, μέρος του σχηματικού κυκλώματος της συσκευής LEDWIRE Master στο οποίο διακρίνεται το ZigBit module μαζί με το συνδετήρα για τον προγραμματισμό του από εξωτερική συσκευή (JTAG programming device).



Εικόνα 2.23. Η δομή του ολοκληρωμένου λειτουργικού υποσυστήματος ασύρματης δικτύωσης και επικοινωνίας ZigBit ATZB-24A2 (της εταιρίας Atmel).

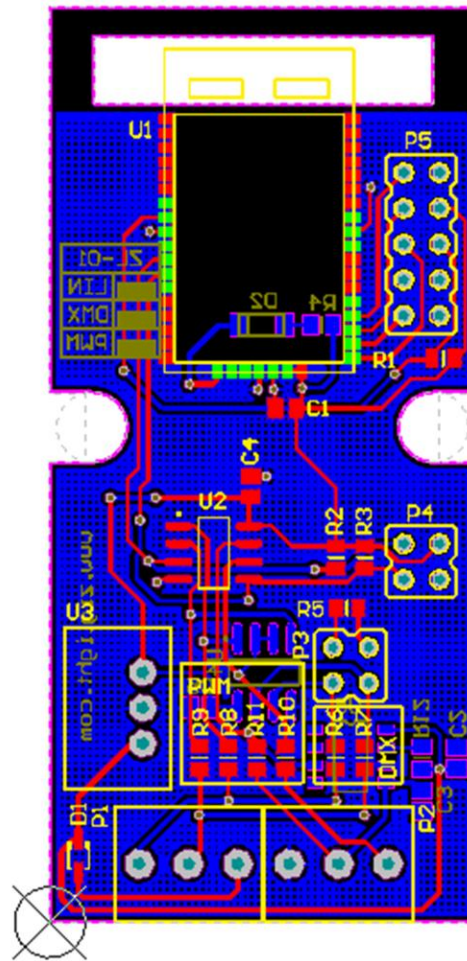


Εικόνα 2.24. Το ολοκληρωμένο λειτουργικό υποσύστημα ZigBit ATZB-24A2 (της εταιρίας Atmel) για την ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία βάσει του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4/ZigBee στα 2.4 GHz. Οι φυσικές διαστάσεις του είναι 18.8 x 13.5 mm και περιέχει chip antenna.



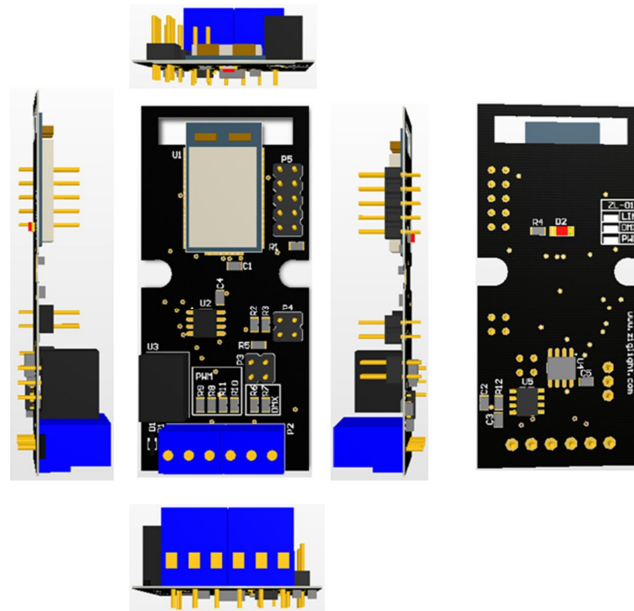
Εικόνα 2.25. Το σχηματικό κύκλωμα του ολοκληρωμένου λειτουργικού υποσυστήματος ZigBit ATZB-24A2 (της εταιρίας Atmel) για την ασύρματη δικτύωση και επικοινωνία δεδομένων βάσει του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4/ZigBee.

Στην Εικόνα 2.26 παρουσιάζεται το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος (PCB: Printed-Circuit Board) της συσκευής LEDWIRE Master. Το τυπωμένο κύκλωμα είναι δύο όψεων (double-layer PCB) και όλα τα εξαρτήματα εκτός από τους συνδετήρες είναι τεχνολογίας επιφανειακής στήριξης (SMT: Surface-Mount Technology). Η φυσική μορφή (form factor) καθώς επίσης οι διαστάσεις του τυπωμένου κυκλώματος, υλοποιήθηκαν έχοντας ως στόχο τη χρήση ειδικού πλαστικού περιβλήματος το οποίο ήταν διαθέσιμο και κατάλληλο για εφαρμογές ελέγχου φωτισμού.

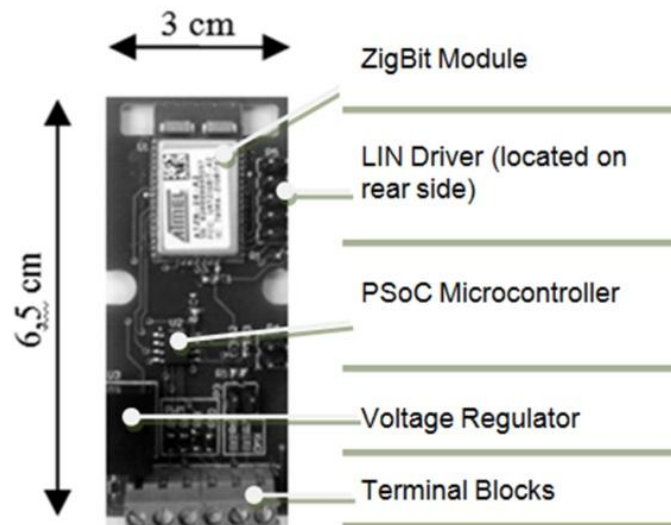


Εικόνα 2.26. Σε μεγέθυνση, το σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της συσκευής LEDWIRE Master.

Μετά από την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος και την συγκόλληση όλων των εξαρτημάτων σ' αυτό, η συσκευή LEDWIRE Master έχει την μορφή της Εικόνας 2.27. Στην Εικόνα 2.28 παρουσιάζεται η συσκευή σε πραγματική μορφή.



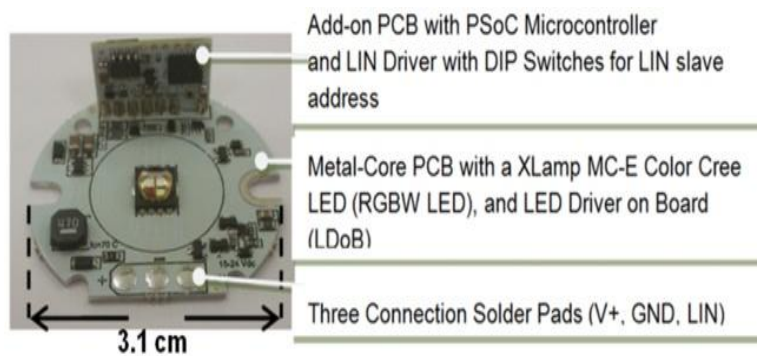
Εικόνα 2.27. Εικονική αναπαράσταση των όψεων της συσκευής LEDWIRE Master.



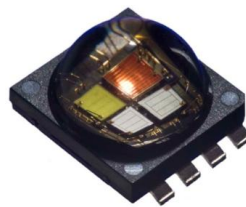
Εικόνα 2.28. Φωτογραφία της συσκευής LEDWIRE Master (σε πραγματικές διαστάσεις).

Σχετικά με την συσκευή LEDWIRE Slave, στην Εικόνα 2.29 απεικονίζεται μια ενδεικτική υλοποίηση χρησιμοποιώντας μια πλακέτα με ένα τετραπύρρηνο LED. Συγκεκριμένα, περιέχεται το LED ισχύος MC-E (της εταιρίας Cree) [56], το οποίο περιέχει τέσσερα διαφορετικού χρώματος LEDs κάτω από τον ίδιο φακό (βλ. Εικόνα

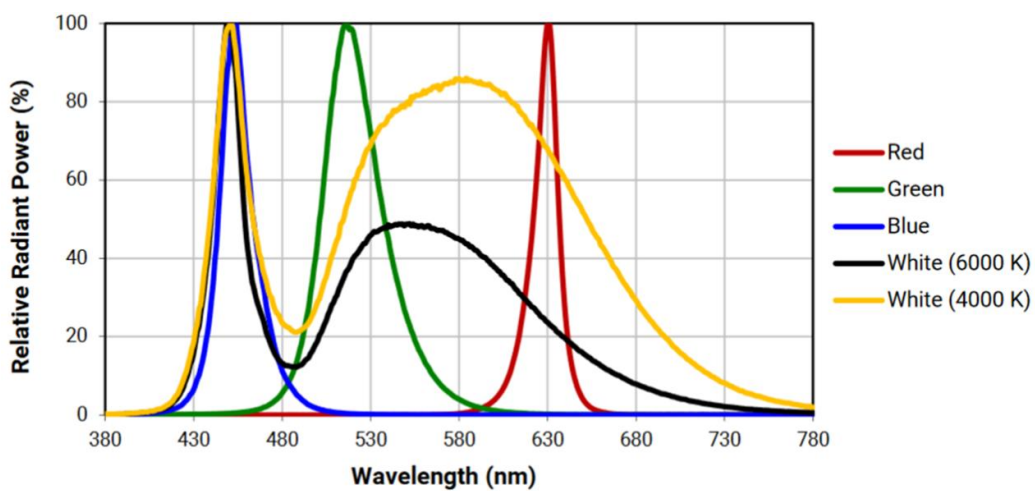
30). Στην Εικόνα 2.31 απεικονίζεται η φασματική κατανομή ισχύος (για ρεύμα τροφοδοσίας $I_f = 350 \text{ mA}$) του LED MC-E.



Εικόνα 2.29. Ενδεικτική υλοποίηση συσκευής LEDWIRE Slave ενσωματωμένης σε πλακέτα λαμπτήρα LED.



Εικόνα 2.30. Το τετραπύρηνo LED MC-E (της εταιρίας Cree). Διαθέτει τέσσερα ανεξάρτητα LEDs διαφορετικού χρώματος το καθένα (Red, Green, Blue, White) στο ίδιο περίβλημα και κάτω από τον ίδιο φακό.



Εικόνα 2.31. Φασματική κατανομή ισχύος εξόδου του τετραπύρηνo LED MC-E (της εταιρίας Cree).

Για την δοκιμή της αρχιτεκτονικής LEDWIRE σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε εφαρμογή λογισμικού στον Η/Υ μέσω της οποίας ελέγχονται μέχρι έξι διαφορετικές ομάδες φωτιστικών σωμάτων (βλ. Εικόνα 2.32). Η εφαρμογή σχεδιάστηκε στο περιβάλλον ανάπτυξης LabVIEW (της εταιρίας National Instruments). Για τον έλεγχο του ασύρματου δικτύου ομάδων φωτιστικών από τον Η/Υ, χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή LEDWIRE Master η οποία συνδέθηκε με τον Η/Υ μέσω ενός μετατροπέα σημάτων UART σε USB. Για κάθε μια από τις ελεγχόμενες ομάδες φωτιστικών ελέγχονται το χρώμα και η ένταση του φωτός. Κάθε ομάδα φωτιστικών μπορεί να έχει διαφορετικές ρυθμίσεις φωτισμού. Επί πλέον, παρέχεται η δυνατότητα για την αποστολή καθολικών εντολών προς όλες τις ομάδες φωτιστικών σωμάτων.



Εικόνα 2.32. Εφαρμογή λογισμικού Η/Υ για τον έλεγχο και τις δοκιμές του ασύρματου δικτύου φωτιστικών σωμάτων βάσει της αρχιτεκτονικής LEDWIRE.

2.4.5. Συμπεράσματα μετά τον Σχεδιασμό για τις Αρχιτεκτονικές Ειδικού Σκοπού

Ο σχεδιασμός που περιγράφηκε παραπάνω για την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής LEDWIRE είναι τυπικό παράδειγμα αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού. Παρά το γεγονός πως η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι καινοτόμος και παρέχει πολλά πλεονεκτήματα για τη δικτύωση και τον έλεγχο φωτιστικών σωμάτων στο πεδίο του τεχνητού φωτισμού με τεχνολογία LED της γεωργίας και των αστικών καλλιιεργειών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- απαιτούνται μεγάλη γνώση και εμπειρία για τον σχεδιασμό του,
- είναι μια εξειδικευμένη λύση η οποία χρησιμοποιείται ως έχει (as it is),
- στην περίπτωση κατάργησης ενός από τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στην πλακέτα των συσκευών, οι συσκευές θα πρέπει να σχεδιαστούν εξ' αρχής,
- δεν υπάρχει δεύτερη πηγή προμήθειας των εξαρτημάτων λόγω του ότι κάθε ένα από τα εξαρτήματα αποτελεί μια ειδική λύση ενός μόνο κατασκευαστή,
- το ενσωματωμένο λογισμικό των μικροελεγκτών δεν έχει γραφεί για χρήση από άλλους σχεδιαστές,
- η χρήση των συσκευών σε άλλες εφαρμογές είναι περιορισμένη,
- η αρχιτεκτονική δεν παρέχει δυνατότητες επεκτασιμότητας (expandability),
- η αρχιτεκτονική δεν υποστηρίζει την κλιμάκωση (scalability) της επεξεργαστικής ισχύος, της μνήμης, καθώς και των εισόδων/εξόδων, διότι εστιάζει αποκλειστικά στους σκοπούς των εφαρμογών για τις οποίες σχεδιάστηκε,
- παρέχει πολύ περιορισμένη δυνατότητα τροποποίησης του (reconfiguration),
- λόγω της έμφασης που δόθηκε στην ελαχιστοποίηση του μεγέθους των συσκευών, η επέμβαση για συγκόλληση/αποσυγκόλληση ή προσθήκη εξαρτημάτων στο τυπωμένο κύκλωμα είναι αρκετά δύσκολη, και
- το αρχικό κόστος για την ανάπτυξη των συσκευών είναι υψηλό λόγω του ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση έγιναν εξ' αρχής δίχως να χρησιμοποιηθούν έτοιμες εμπορικές λύσεις.

Βιβλιογραφία

1. Gaura, E.; Girod, L.; Brusey, J.; Allen, M.; Challen, G. Learning from deployment experience. In *Wireless sensor networks: Deployments and design frameworks*, Springer US: 2010; pp 15-50.
2. Gajjar, S.; Choksi, N.; Sarkar, M.; Dasgupta, K. In *Comparative analysis of wireless sensor network notes*, 1st International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2014, Noida, 2014; IEEE Computer Society: Noida, pp 426-431.
3. Aqeel Ur, R.; Abbasi, A.Z.; Islam, N.; Shaikh, Z.A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Comput Stand Interfaces* **2014**, *36*, 263-270.
4. Alamri, A.; Ansari, W.S.; Hassan, M.M.; Hossain, M.S.; Alelaiwi, A.; Hossain, M.A. A survey on sensor-cloud: Architecture, applications, and approaches. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2013**, 2013.
5. Panchard, J.; Papadimitratos, P.; Hubaux, J.P.; Rao, P.R.S.; Sheshshayee, M.S.; Kumar, S. In *Wireless sensor networking for rain-fed farming decision support*, ACM SIGCOMM 2008 Conference on Computer Communications - 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Networked Systems for Developing Regions, NSDR'08, Seattle, WA, 2008; Seattle, WA, pp 31-36.
6. Barcelo-Ordinas, J.M.; Chanet, J.P.; Hou, K.M.; Garcia-Vidal, J. In *A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture*, 9th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2013, Lleida, Catalonia, 2013; Lleida, Catalonia, pp 801-808.
7. Panda, R.; Ranasinghe, D.C.; Parlikad, A.; McFarlane, D. In *A condition monitoring platform using cots wireless sensor networks - lessons and experience*, 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA2010, Perth, WA, 2010; Perth, WA, pp 473-480.
8. Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D. In *Telos: Enabling ultra-low power wireless research*, 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005, Los Angeles, CA, 2005; Los Angeles, CA, pp 364-369.

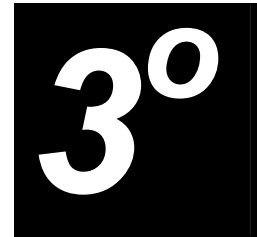
9. Hill, J.L.; Culler, D.E. Mica: A wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro* **2002**, *22*, 12-24.
10. Serrano, P.; Bernardos, C.J.; De La Oliva, A.; Soto, I. In *Lessons learned from the deployment of a multihop ieee 802.11g testbed using cots devices*, 2010 European Wireless Conference, EW 2010, Lucca, 2010; Lucca, pp 667-674.
11. Cena, G.; Scanzio, S.; Valenzano, A.; Zunino, C. In *Wireless machine vision systems based on cots equipment*, 2012 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, WFCS 2012, Lemgo, 2012; Lemgo, pp 3-12.
12. Ashok, A.; Subbiah, I.; Varga, G.; Schrey, M.; Heinen, S.; Achtzehn, A.; Petrova, M. In *Whitelan: Facilitate cost-efficient sdr research with cots ieee 802.11b/g devices*, ACM SIGCOMM 2014 Workshop on Software Radio Implementation Forum, SRIF 2014, Chicago, IL, 2014; Association for Computing Machinery: Chicago, IL, pp 45-52.
13. Chavez-Burbano, P.; Marin-Garcia, I.; Muñoz-Arcentales, A. In *Ad-hoc network implementation and experimental testing using low cost and cots components*, 3rd IEEE International Work-Conference on Bioinspired Intelligence, IWOBI 2014, 2014; Arroyo-Hernandez, J.; Travieso-Gonzalez, C.M.; Ramirez-Bogantes, M., Eds. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: pp 133-137.
14. Zia, H.; Harris, N.R.; Merrett, G.V.; Rivers, M.; Coles, N. The impact of agricultural activities on water quality: A case for collaborative catchment-scale management using integrated wireless sensor networks. *Comput. Electron. Agric.* **2013**, *96*, 126-138.
15. Ali, H.; Sharawi, M.S.; Al-Naffouri, T.Y. In *Error sources in cots wsn platforms for impulsive signal acquisition applications*, 2012 19th International Conference on Telecommunications, ICT 2012, Jounieh, 2012; Jounieh.
16. Tavli, B.; Bicakci, K.; Zilan, R.; Barcelo-Ordinas, J.M. A survey of visual sensor network platforms. *Multimedia Tools Appl* **2011**, 1-38.
17. Faugel, H.; Bobkov, V. Open source hard- and software: Using arduino boards to keep old hardware running. *Fusion Eng Des* **2013**, *88*, 1276-1279.

18. Chandra, A.A.; Lee, Y.; Kim, B.M.; Maeng, S.Y.; Park, S.H.; Lee, S.R. In *Review on sensor cloud and its integration with arduino based sensor network*, 2013 3rd International Conference on IT Convergence and Security, ICITCS 2013, Macau, 2013; Macau.
19. Pham, C. Communication performances of iee 802.15.4 wireless sensor nodes for data-intensive applications: A comparison of waspmote, arduino mega, telosb, micaz and imote2 for image surveillance. *J Network Comput Appl* **2014**, *46*, 48-59.
20. Nighot, V.P.; Lambor, S.M.; Joshi, S.M. In *Efficient battery management in wireless sensor node: Review paper*, 11th IEEE and IFIP International Conference on Wireless and Optical communications Networks, WOCN 2014, 2014; IEEE Computer Society.
21. Ferdoush, S.; Li, X. In *Wireless sensor network system design using raspberry pi and arduino for environmental monitoring applications*, 9th International Conference on Future Networks and Communications, FNC 2014 and the 11th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing, MobiSPC 2014, Niagara Falls, ON, 2014; Elsevier: Niagara Falls, ON, pp 103-110.
22. Kanda, K.; Ishii, T.; Kameoka, T.; Saitoh, K.; Sugano, R. In *Field monitoring system using agri-server*, 50th Annual Conference on Society of Instrument and Control Engineers, SICE 2011, Tokyo, 2011; Tokyo, pp 2069-2072.
23. OSRAM. *Horticulture lighting with leds*; OSRAM Opto Semiconductors: March 2015, 2015.
24. Böhme, M.; Grbic, N.; Paschko, K.; Pinker, I. Growth and internal quality of vietnamese coriander (*polygonum odoratum* Lour.) affected by additional lighting with blue, red and green leds. In *Acta Horticulturae*, De Pascale, S.; Jiang, W.J.; Connellan, G., Eds. International Society for Horticultural Science: 2015; Vol. 1107, pp 113-119.
25. Han, J.; Huang, G.J.; Wu, T.; Sun, X.M.; Liu, Y.; Gao, R.F. Photoperiod affects morphology, flower productivity and photosynthesis of forced potted

- paeonia lactiflora in greenhouses. In *Acta Horticulturae*, Criley, R.A., Ed. International Society for Horticultural Science: 2015; Vol. 1104, pp 211-217.
26. Gómez, C.; Mitchell, C.A. Physiological and productivity responses of high-wire tomato as affected by supplemental light source and distribution within the canopy. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **2016**, *141*, 196-208.
 27. Pinho, P.; Jokinen, K.; Halonen, L. Horticultural lighting - present and future challenges. *Light Res Technol* **2012**, *44*, 427-437.
 28. Bergstrand, K.J.; Asp, H.; Larsson Jönsson, E.H.; Schüssler, H.K. Plant developmental consequences of lighting from above or below in the production of poinsettia. *Eur. J. Hortic. Sci.* **2015**, *80*, 51-55.
 29. Yasuda, T.; Hayakashi, T.; Naoki, S.; Saito, A.; Maehara, A.; Okada, A.; Otani, H.; Hasegawa, J. Light sources and lighting circuits. *Journal of Light and Visual Environment* **2011**, *35*, 142-159.
 30. Doshi, M.; Zane, R. In *Digital architecture for driving large led arrays with dynamic bus voltage regulation and phase shifted pwm*, Anaheim, CA, 2007; Anaheim, CA, pp 287-293.
 31. Bergesen, J.D.; Tähkämö, L.; Gibon, T.; Suh, S. Potential long-term global environmental implications of efficient light-source technologies. *J. Ind. Ecol.* **2016**, *20*, 263-275.
 32. Thomas, B.A.; Azevedo, I.L.; Morgan, G. Edison revisited: Should we use dc circuits for lighting in commercial buildings? *Energy Policy* **2012**, *45*, 399-411.
 33. Piromalis, D.; Arvanitis, K.; Papageorgas, P.; Tseles, D.; Psomopoulos, C. Ledwire: A versatile networking platform for smart led lighting applications using lin-bus and wsns *Sensors Transducers* **2016**, *200*, 50-59.
 34. Zhaga. What is an led light engine? .
<http://www.zhagastandard.org/specifications/lightengine.html>
 35. Ren, H.; Zhou, K.; Li, Z.; Wang, H.Q. In *Research and realization of new stage lighting control system*, Kunming, Lijiang, Yunnan, 2011; Kunming, Lijiang, Yunnan, pp 777-779.

36. Pandharipande, A.; Caicedo, D. Daylight integrated illumination control of led systems based on enhanced presence sensing. *Energy and Buildings* **2011**, *43*, 944-950.
37. Delaney, D.T.; O'Hare, G.M.P.; Ruzzelli, A.G. In *Evaluation of energy-efficiency in lighting systems using sensor networks*, Berkeley, CA, 2009; Berkeley, CA, pp 61-66.
38. Huynh, T.P.; Tan, Y.K.; Tseng, K.J. In *Energy-aware wireless sensor network with ambient intelligence for smart led lighting system control*, Melbourne, VIC, 2011; Melbourne, VIC, pp 2923-2928.
39. *Lighting control protocols*; Report IES-TM-23-11; Illuminating Engineering Society of North America - IES 2011.
40. Association, L.I. Lonmark ® application layer interoperability guidelines. 2002.
41. Cho, S.; Dhingra, V. In *Street lighting control based on lonworks power line communication*, Jeju Island, 2008; Jeju Island, pp 396-398.
42. López, C.; Doval, J.; Pereira, M.; Pérez, S.; Dios, J.; López, O. In *Dmx512 controller for high brightness rgb led matrix*, Caixanova - Vigo, 2007; Caixanova - Vigo, pp 3025-3029.
43. Connected lighting solution. <http://www.greenwavereality.com/solutions/connected-lighting-solution/> (8/10/2013),
44. Newton, S. In *Art-net and wireless routers*, Perth, Western Australia, 2005; Perth, Western Australia, pp 857-861.
45. Maxfield, C. Ipv4, ipv6, the internet of things, 6lowpan, and lots of other "stuff". http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1285236&pid=1_msgpage=2#msgs
46. Yurish, S.Y.; Cañete, J. High performance sensor nodes for wireless sensor networks applications. *Sensors Transducers* **2013**, *18*, 92-99.

47. Smet, K.A.G.; Ryckaert, W.R.; Pointer, M.R.; Deconinck, G.; Hanselaer, P. Optimization of colour quality of led lighting with reference to memory colours. *Lighting Research and Technology* **2012**, *44*, 7-15.
48. Tian, F.; Wu, X.; Liu, J. In *Research and realization of led display system based on combining can bus with dmx512 standard*, Shanghai, 2008; Shanghai, pp 813-818.
49. *Interior ambient lighting module with lin interface, user's guide - ds51714a*; Microchip Tchnology Inc.: 2008.
50. LIN, C. Lin specification package, revision 2.1. 2006.
51. *Rs-422 and rs-485 standards overview and systems configurations, application report - slla070d*; Texas Instruments: 2002 (2010 revisited).
52. Inc., C. Cy8c21123 psoc. <http://www.cypress.com/file/139211/download> (01-01-2016),
53. Inc., A. Ata6625c lin bus transceiver with integrated voltage regulator. http://www.atmel.com/Images/Atmel-4957-LIN-Networking-ATA6623C-ATA6625C_Datasheet.pdf (02-10-2014),
54. Recom Inc. Dc/dc converter 1.5 amp single output. http://www.recom-power.com/pdf/Innoline/R-78Bxx-1.5_L.pdf (01-02-2016),
55. Inc., A. Zigbit 2.4 ghz wireless modules -atzb-24a2/b0. http://www.atmel.com/Images/Atmel-8226-ZigBit-2.4GHz-Wireless-Modules-ATZB-24-A2B0_Datasheet.pdf (21-09-2016),
56. Inc., C. Cree xlamp m-c-e led. <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/Data-and-Binning/XLampMCE.pdf> (03-03-2016),



Χαρακτηριστικά και Περιορισμοί των Αρχιτεκτονικών Υλικού Ανοικτής Πηγής

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.
- [J-1]. **P.Papageorgas**, **D.Piromalis**, **K.Antonakoglou**, **G.Vokas**, **D.Tseles** and **K.G.Arvanitis**, «*Smart Solar Panels: In-Situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks*», **Energy Procedia (ISSN: 1876-6102)**, Vol. 36, pp. 535-345, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.062 (Listed in Scopus).

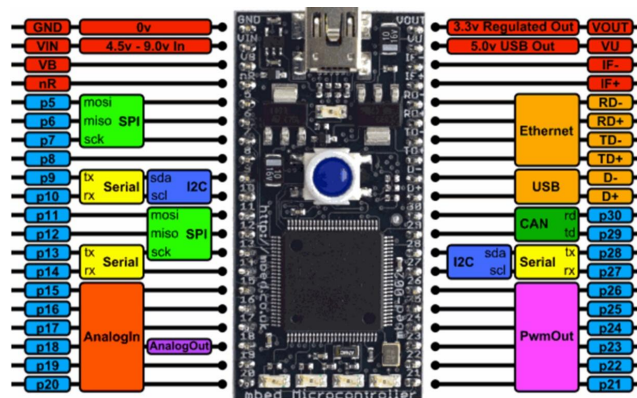
3.1. Διαθέσιμες Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής

Λαμβάνοντας υπ' όψη το διαρκώς μεταβαλλόμενο τεχνολογικό περιβάλλον των ασύρματων κόμβων αισθητήρων (βλ. Εικόνα ή Κεφάλαιο ...), διαπιστώνονται οι ακόλουθες ταυτόχρονες απαιτήσεις ως προς την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στο σύστημα ενός κόμβου:

- να δημιουργηθούν νέα εργαλεία για την ανάπτυξη και τη δοκιμή τους (development and evaluation tools),
- να μελετηθούν και να ενσωματωθούν όσο το δυνατόν γρηγορότερα σε υλοποιήσεις νέων κόμβων, οι οποίοι με τη σειρά τους ως συστήματα δύνανται να δημιουργήσουν νέα γνώση και νέες τεχνολογικές προκλήσεις.

Παράλληλα με τις παραπάνω πιέσεις, υπάρχει πάντα και η πίεση από τους πάση φύσεως ενδιαφερομένους (stakeholders), για άμεσα διαθέσιμα και με χαμηλό κόστος εύρωστα και αξιόπιστα προϊόντα κόμβων.

Οι παραπάνω συνθήκες επέβαλλαν στη διεθνή βιομηχανία ημιαγωγών, υλικού, αλλά και λογισμικού, να κατευθύνουν τις προσπάθειές τους προς την υλοποίηση λύσεων ανάπτυξης πρωτοτύπων (prototyping) με μεγάλη επαναχρησιμοποίηση και ευελιξία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το *MBED* [1] (βλ. Εικόνα 3.1), το *Codebender* [2], και το *i-Sense* [3]).



Εικόνα 3.1. Η πλατφόρμα υλικού MBED LPC1788 (της εταιρίας NXP) [4].

Η πραγματική επανάσταση όμως προήλθε από μια νέα περιοχή του ευρύτερου χώρου της σχεδίασης και ανάπτυξης συστημάτων, στην οποία οι υλοποιήσεις των

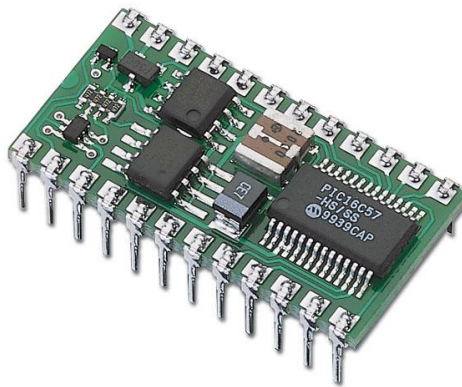
συστημάτων στηρίζονται στην χρήση λογισμικού και υλικού ελεύθερα διαθέσιμων από μια μεγάλη κοινότητα χρηστών. Το υλικό που αναπτύσσεται με τον τρόπο αυτό ονομάζεται υλικό ανοικτής πηγής (OSH - Open-Source Hardware).

3.1.1. Αρχιτεκτονικές Επεκτάσιμων Πλακετών Μικροελεγκτών

Σύμφωνα με την ιδέα της ανοικτής πηγής, οι σχεδιαστές πλέον έχουν στην διάθεσή τους ένα πολύ μεγάλο πλήθος πόρων, όπως π.χ. τεκμηρίωση, παραδείγματα εφαρμογών, σχέδια σχηματικών και τυπωμένων κυκλωμάτων, ενσωματωμένο λογισμικό (firmware), κλπ, τα οποία έχουν αναπτυχθεί από μια μεγάλη κοινότητα χρηστών με παρόμοια ενδιαφέροντα και ανάγκες (open-source communities). Οποιοδήποτε προϊόν σχεδίασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρως ή μερικώς από τρίτους, είτε για προσωπική, είτε ακόμα και για εμπορική εκμετάλλευση. Δεν υπάρχει κόστος αγοράς ή δικαιώματα χρήσης, παρά μόνο η απαίτηση αναγνώρισης των αρχικών παραγωγών από τους χρήστες. Όλοι οι όροι της χρήσης λύσεων ανοικτής πηγής διέπονται από την πράξη CCSA (Common Creative Commons Share-Alike) [5]. Η πιο σημαντική λύση για ενσωματωμένο λογισμικό και υλικό ανοικτής πηγής είναι το *Arduino* [6]. Το *Arduino* είναι μια πλακέτα στην οποία έχουν τοποθετηθεί ένας μικροελεγκτής τύπου AVR (της εταιρίας Atmel), το κύκλωμα τροφοδοσίας +5 Vdc για τον μικροελεγκτή και τα κυκλώματά του, καθώς επίσης και ένα κύκλωμα για την μετατροπή των σημάτων TXD και RXD του περιφερειακού σειριακής επικοινωνίας (UART) σε σήματα θύρας επικοινωνίας USB. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του *Arduino*, όλα τα σήματα των ακίδων του μικροελεγκτή παρέχονται σε συνδεδεμένες επέκτασης πλακετών. Οι χρήστες από τη δική τους πλευρά, μπορούν να συνδέσουν δικές τους, ή του εμπορίου, πλακέτες πάνω στην κύρια πλακέτα (main-board), δηλαδή πάνω στην πλακέτα του *Arduino*. Οι πλακέτες αυτές χαρακτηρίζονται ως οι πλακέτες επέκτασης του συστήματος που αναπτύσσεται από τον εκάστοτε χρήστη. Για την μεγαλύτερη διευκόλυνση των χρηστών, το *Arduino* παρέχει ένα πλήρες σετ έτοιμων βιβλιοθηκών μέσα στις οποίες ο χρήστης μπορεί να βρει όλες τις αναγκαίες συναρτήσεις (functions) για την ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή AVR. Οι συναρτήσεις αυτές είναι γραμμένες σε γλώσσα προγραμματισμού C. Επίσης, παρέχεται και ένα υποτυπώδες αλλά ουσιαστικό περιβάλλον ανάπτυξης ενσωματωμένου λογισμικού για τον Η/Υ (*Arduino IDE - Integrated Development Environment for Arduino*).

Οι παραπάνω ευκολίες και δυνατότητες του υλικού ανοικτής πηγής επέτρεψαν στην έρευνα και την ανάπτυξη συστημάτων να αποκτήσουν την από καιρό ζητούμενη επεκτασιμότητα (expandability) και την επαναχρησιμοποίηση (reusability). Για το λόγο αυτό, η αρχιτεκτονική υλικού ανοικτής πηγής Arduino, παρά το γεγονός πως αρχικά (το 2005) σχεδιάστηκε για μαθητές και χομπίστες [7], πολύ γρήγορα έγινε δημοφιλές και στην ερευνητική κοινότητα και στους σχεδιαστές συστημάτων. Η αρχιτεκτονική Arduino, εφεξής το Arduino, έχει χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση υλικού συστημάτων ασύρματων κόμβων ακόμα και για τις εφαρμογές στην γεωργία.

Ομολογουμένως, η ιδέα του επεκτάσιμου υλικού, καθώς και της εφαρμογοκεντρικής ανάπτυξης ενσωματωμένου λογισμικού μικροελεγκτών δεν μπορεί να αποδοθεί στο Arduino. Πριν από το Arduino, είχαν γίνει προσπάθειες όπως: α) το *Basic Stamp* [8,9] στις αρχές την δεκαετία του 1990, το οποίο επέτρεπε την ανάπτυξη ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή της πλακέτας του σε γλώσσα προγραμματισμού BASIC (βλ. Εικόνα 3.2), και β) η επεκτάσιμη πλατφόρμα υλικού *e-Blocks* [10] την δεκαετία του 2000 (βλ. Εικόνα 3.3).



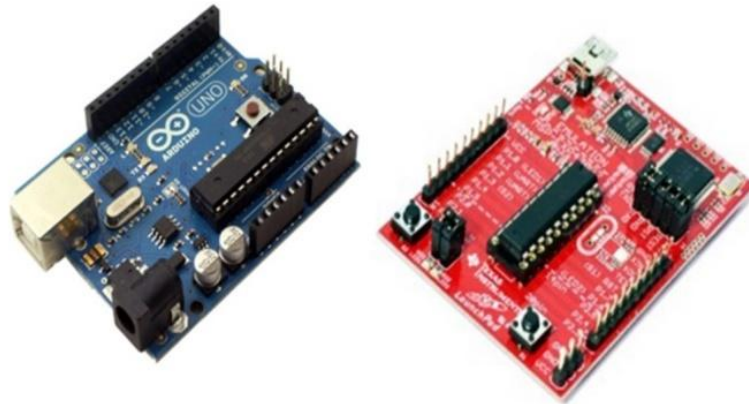
Εικόνα 3.2. Η πλακέτα ανάπτυξης *Basic Stamp* (της εταιρίας Parallax) με δυνατότητα προγραμματισμού του μικροελεγκτή της σε γλώσσα προγραμματισμού BASIC.



Εικόνα 3.3. Η επεκτάσιμη πλατφόρμα υλικού e-Blocks (της εταιρίας Matrix).

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους λύσεις όπως το *Basic Stamp* και το *e-Blocks* δεν έτυχαν τις μεγάλης αποδοχής και δημοφιλίας του *Arduino* ήταν πως εκτός από τους περιορισμούς τους σε λειτουργικό και φυσικό επίπεδο, αποτελούσαν εμπορικές κλειστές λύσεις (*single-source solutions*) στις οποίες οι χρήστες είχαν μηδενική ή ελάχιστη συμμετοχή για την ανάπτυξή τους. Έτσι, η δωρεάν υποστήριξη και οι δωρεάν σχεδιαστικοί πόροι των αρχιτεκτονικών ανοικτής πηγής επέδρασαν καταλυτικά για την επικράτησή τους στο χώρο της ανάπτυξης υλικού. Η τάση αυτή ασφαλώς επηρέασε και συνεχίζει να επηρεάζει την ανάπτυξη και των ασύρματων κόμβων αισθητήρων.

Σήμερα από τις πιο δημοφιλείς αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής είναι οι πλατφόρμες *Arduino* (της εταιρίας *Arduino*) [6], και η πλατφόρμα *Launchpad* (της εταιρίας *Texas Instruments*) [11]. Και οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές διατίθενται σε αρκετές παραλλαγές πλακετών με διαφορετικούς μικροελεγκτές, με διαφορετικό πλήθος σημάτων και λειτουργιών. Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δύο εν λόγω αρχιτεκτονικών, ενώ στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά τους.



(a)

(b)

Εικόνα 3.4. α) Η κύρια πλακέτα επέκτασης της *Arduino Uno* αρχιτεκτονικής Arduino (της εταιρίας Arduino), και β) η κύρια πλακέτα επέκτασης *MSP-EXP430G2* της αρχιτεκτονικής *Launchpad* (της εταιρίας Texas Instruments).

Πίνακας 3.1. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των αρχιτεκτονικών Arduino (της εταιρίας Arduino) και Launchpad (της εταιρίας Texas Instruments).

Parameter	Arduino	Launchpad
Manufacturer	Arduino	Texas Instruments
MCU/CPU Core	RISC 8-bit, RISC 32-bit	RISC 16-bit, RISC 32-bit
Core Architecture	AVR, ARM Cortex-M0+, ARM Cortex-M4	MSP430, ARM Cortex-M4, ARM Cortex-R
Clock Frequency	16MHz to 84MHz	16MHz to 220MHz
Expansion Headers	(1 X 10) and (2 x 8) and (1 x 6) pins)2 x 10) pins
Integrated Development Environment (IDE)	Arduino	Energia, Code Composer Studio
Expansion Boards Name	Shields	BoosterPacks
Cost	25€ - 55€	9€ - 55€

Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια βιομηχανία ηλεκτρονικών συνειδητοποιώντας τα πλεονεκτήματα της ιδέας του υλικού ανοικτής πηγής καθώς επίσης και την τεράστια αποδοχή και επιτυχία της αρχιτεκτονικής Arduino, αναγνώρισε το άνοιγμα μιας νέας επικερδούς αγοράς.

Εν τω μεταξύ, οι πιο σημαντικές εταιρίες κατασκευής ημιαγωγών στον κόσμο αποφάσισαν να διαθέσουν λύσεις παρόμοιες με αυτή του *Arduino*, ή λύσεις συμβατές με το *Arduino*, με σκοπό να προωθήσουν τα προϊόντα τους, π.χ. νέους μικροελεγκτές, μικροεπεξεργαστές, αισθητήρες, κλπ. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων λύσεων αποτελούν: α) το Nucleo (της εταιρίας ST-Microelectronics) [12], β) το FRDM (της εταιρίας Freescale, πλέον NXP), γ) [13], γ) το XPresso (της εταιρίας (NXP, πρώην Philips) [14] και, γ) η πλατφόρμα Blackfin DSP (της εταιρίας Analog Devices) [15]. Επίσης, άλλες εταιρίες αποφάσισαν να παρέχουν λύσεις σε μορφή πλακετών επέκτασης για το *Arduino*, π.χ. η εταιρία Infineon (πρώην Siemens) [16].

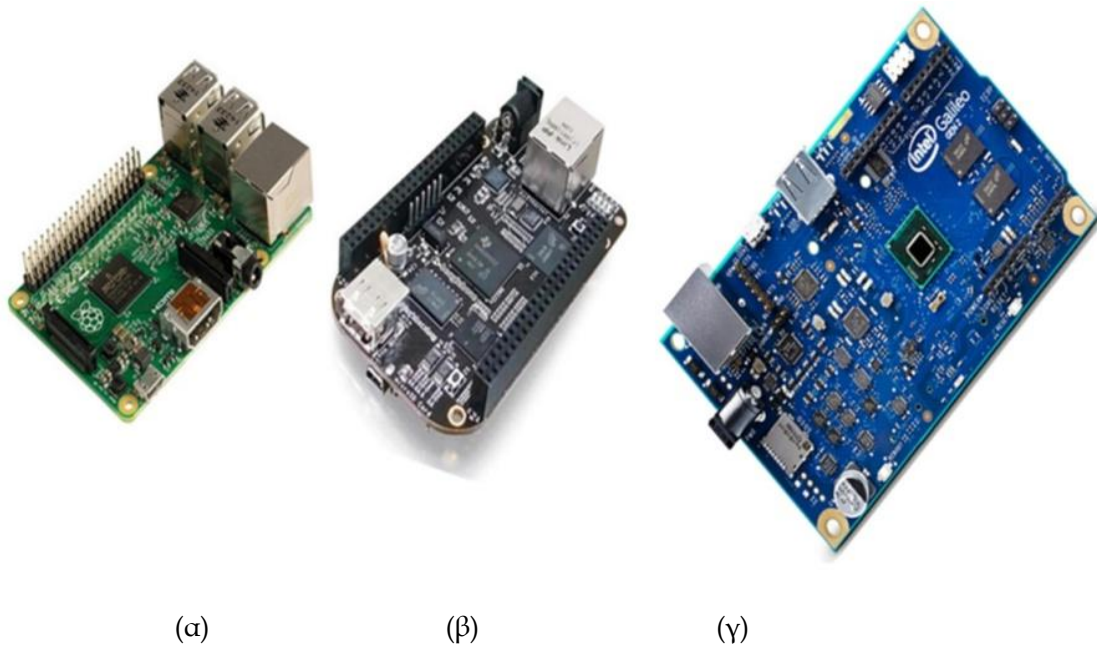
3.1.2. Αρχιτεκτονικές Η/Υ Πλακέτας (Single-Board Computers)

Η ιδέα του υλικού ανοικτής πηγής επίσης επηρέασε δραματικά τη βιομηχανία των Η/Υ πλακέτας (SBCs - Single-Board Computers). Έτσι, σήμερα είναι διαθέσιμα SBCs τα οποία σε σχέση με τις αρχιτεκτονικές τύπου *Arduino*, διαφέρουν στο ότι:

- *έχουν ασύγκριτα μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ, λόγω του ότι χρησιμοποιούν επεξεργαστές με υψηλά ρολόγια χρονισμού κι όχι μικροελεγκτές,*
- *χρησιμοποιούν λειτουργικά συστήματα ανοικτής πηγής, π.χ. χρησιμοποιούν Linux,*
- *δέχονται συσκευές USB, π.χ. ως Η/Υ που είναι, μπορούν να δεχτούν συσκευές όπως USB Flash Disks, WiFi USB dongles, GSM/3G/4G USB modems, κλπ,*
- *συνδέονται άμεσα με συσκευές διεπαφής, π.χ. οθόνες απεικόνισης, κάμερες, πληκτρολόγια, ποντίκια, κλπ.*

Πολλές από τις υπάρχουσες λύσεις SBCs, παρέχουν επίσης συμβατότητα με πλακέτες επέκτασης τύπου *Arduino*, με σκοπό να μπορούν οι χρήστες να χρησιμοποιούν υλικό το οποίο ήδη διαθέτουν. Οι πιο δημοφιλείς συσκευές SBCs είναι το *Raspberry Pi* (του ιδρύματος Raspberry Pi) [17], το BeagleBone (της εταιρίας Texas Instruments) [18], καθώς και το Galileo from Intel (της εταιρίας Intel) [19]. Όλες αυτές οι πλατφόρμες θεωρούνται αρχιτεκτονικής ανοικτής υλικού και λογισμικού ανοικτής πηγής διότι όλα τους τα σχέδια είναι ελεύθερα στους χρήστες, χρησιμοποιούν λειτουργικά συστήματα ανοικτής πηγής, και υποστηρίζονται από

εξαιρετικά πολυπληθείς κοινότητες χρηστών. Επίσης, οι διαστάσεις των νέων SBCs είναι ως επί το πλείστον ίδιες με αυτές των πιστωτικών καρτών. Στην Εικόνα 3.5 παρατίθενται οι φωτογραφίες των τριών προαναφερομένων SBCs. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των SBCs παρατίθενται στον Πίνακα 3.2, ενώ μια πλήρης σύγκριση μεταξύ όλων των διαθέσιμων SBCs παρέχεται στην εργασία [20].



Εικόνα 3.5. Η/Υ πλακέτας (SBCs) υλικού και λογισμικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα: **α)** Raspberry Pi (μοντέλο Raspberry Pi 2), **β)** BeagleBone (μοντέλο BeagleBone Black), **γ)** Galileo (μοντέλο Galileo Gen 2).

Πίνακας 3.2. Κύρια χαρακτηριστικά των επεκτάσιμων Η/Υ πλακέτας (Single-Board Computers) υλικού και λογισμικού ανοικτής πηγής, BeagleBone, Raspberry Pi, και Galileo.

Parameter	BeagleBone	Raspberry Pi	Galileo
Manufacturer	Texas Instruments, Digi-Key, Neqark element 14	Farnell, Element 14, RS-Components	Intel
MCU/CPU Core	RISC 32-bit	RISC 32-bit	X86 32-bit
Core Architecture	ARM Cortex-A8	ARM1176JZF-S, ARM Cortex-A7	Quark X1000
Clock	720MHz to	700MHz to 900MHz	400MHz

Frequency	1000MHz		
Operating System	Linux, Android	Linux, RISC-OS, Windows 10	Linux, Windows 10
Expansion Boards Name	Capes	Shields	Shields
Cost	50 € to 65 €	25€ to 35€	65€ to €80

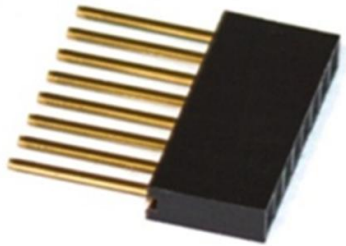
Θέλοντας να συμβαδίσουν με την τεχνολογία των SBCs, οι κατασκευαστές των επεκτάσιμων πλακετών μικροελεγκτών υλικού ανοικτής πηγής, π.χ. τύπου Arduino, έσπευσαν να δημιουργήσουν λύσεις με ισχυρότερους μικροελεγκτές οι οποίοι να μπορούν να υποστηρίξουν λειτουργικά συστήματα ανοικτής πηγής (π.χ. *Linux*). Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων αποτελούν, το *Leonardo*, το *Due*, και το *Tre* (της εταιρίας Arduino) [21], καθώς και το FRDM Kinetis KL64 (της εταιρίας Freescale, νυν NXP) [22].

Γενικώς, τα επεκτάσιμα, ανοικτής πηγής, SBCs, λόγω των δυνατοτήτων που έχουν για την υποστήριξη ανάπτυξης διαδικτυακών εφαρμογών, π.χ. διαδικτυακούς εξυπηρετητές (web servers), κλπ, χρησιμοποιούνται από πολλούς για τη δημιουργία ασύρματων κόμβων αισθητήρων με δυνατότητες διαδικτυακής πύλης δεδομένων (data gateways). Είναι ιδιαίτερος σημαντική η ευκολία και η μείωση στον χρόνο ανάπτυξης που προσφέρουν. Από την άλλη μεριά, για τις εφαρμογές των ασύρματων κόμβων αισθητήρων στη γεωργία, όπου οι κόμβοι λειτουργούν με συσσωρευτές ενέργειας, θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την τροφοδοσία των SBCs μιας και αυτή μπορεί στις χειρότερες των περιπτώσεων να φτάσει και τα 5 A.

3.1.3. Μηχανισμοί Επέκτασης Πλακετών

Για να συνδεθούν δύο πλακέτες μεταξύ τους, είναι απαραίτητη η χρήση συνδετήρων τύπου πλακέτα-με-πλακέτα (board-to-board connectors). Από την άλλη πλευρά, για να μπορούν να συνδεθούν περισσότερες από δύο πλακέτες, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συνδετήρων οι οποίοι να επιτρέπουν το στοίβαγμα (stacking) των πλακετών. Οι αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής, όπως το *Arduino*, χρησιμοποιούν συνδετήρες οι οποίοι από την μια μεριά τους έχουν υποδοχές ακίδων (female side), ενώ στην άλλη τους μεριά έχουν μακριές ακίδες (male side). Οι μακριές ακίδες αυτών των συνδετήρων διαπερνούν το τυπωμένο κύκλωμα της

πλακέτας στην οποία συγκολλούνται λόγω του μεγάλου μήκους τους. Ένας τέτοιος συνδετήρας απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6.

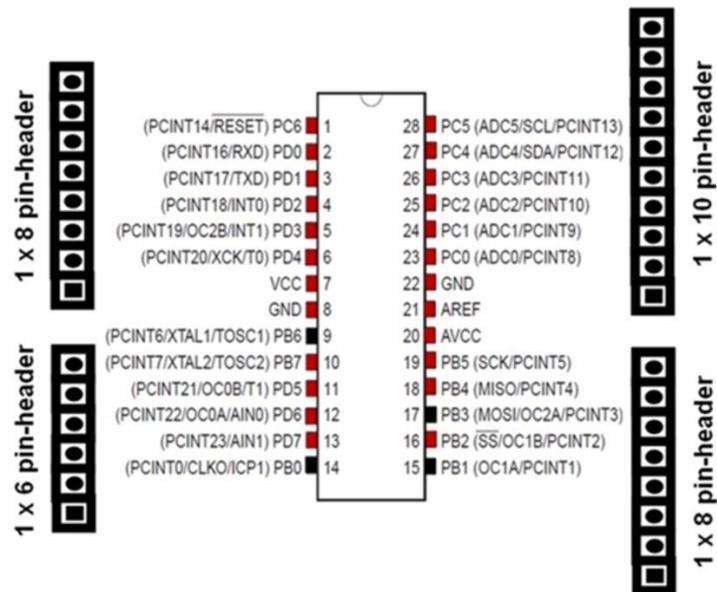


Εικόνα 3.6. Συνδετήρας σύνδεσης πλακετών.

Για τους συνδετήρες αυτούς διεθνώς, δεν υπάρχει κάποιο καθορισμένο όνομα. Μερικοί τους αποκαλούν ως συνδετήρες με μακριά πόδια (headers with long pins), άλλοι τους αποκαλούν ως συνδετήρες που διαπερνούν την πλακέτα (pass-through connectors), και πολλοί άλλοι τους αποκαλούν απλώς ως συνδετήρες *Arduino* (Arduino headers). Στην διατριβή αυτή, υιοθετήθηκε η ονομασία "συνδετήρες επέκτασης πλακετών" (BECs - Board Expansion Connectors).

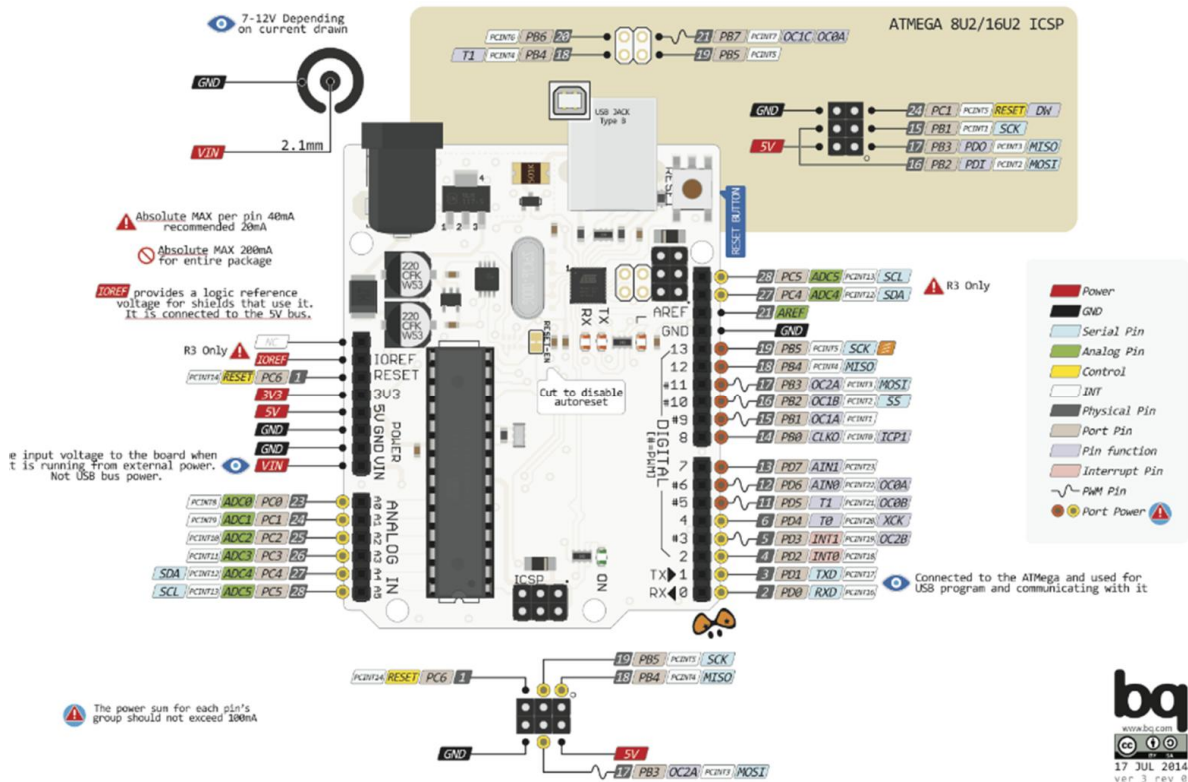
Αρχικά, το *Arduino* χρησιμοποίησε τέσσερις συνδετήρες επέκτασης πλακετών (μοντέλο *Arduino Uno Rev. 3*) [23,24], έτσι ώστε να επιτρέπει τη σύνδεση πολλών πλακετών επέκτασης (shields) με αυτό.

Πρακτικά, οι συνδετήρες επέκτασης του *Arduino* παρέχουν τη φυσική πρόσβαση σε όλα τα σήματα του μικροελεγκτή της πλακέτας του (του 8-bit AVR μικροελεγκτή στην περίπτωση του μοντέλου *Arduino Uno*), βλ. Εικόνα 3.7). Αν και η τεχνική αυτή της επέκτασης της αρχιτεκτονικής *Arduino* μπορεί να φαίνεται χαμηλής επιστημονικής στάθμης, μιας και είναι μια απλή πρακτική λύση, εν τούτοις αποτελεί όχι μόνο τον κυριότερο λόγο για τη δημοφιλία του *Arduino* διεθνώς, αλλά και τη λύση για το αναζητούμενο ευέλικτο, κλιμακούμενο και επαναχρησιμοποιούμενο υλικό. Οι σχεδιαστές πλέον μπορούν να υλοποιήσουν συστήματα χρησιμοποιώντας μια κύρια πλακέτα (main-board) και τις πλακέτες επέκτασης που χρειάζονται για την εφαρμογή του.



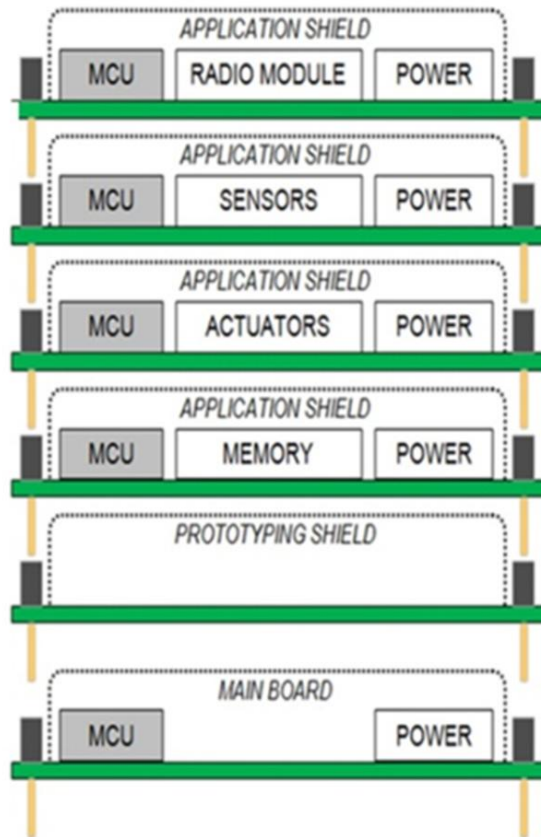
Εικόνα 3.7. Οι τέσσερις συνδετήρες επέκτασης (BECs) και τα σήματα του μικροελεγκτή AVR (της εταιρίας Atmel).

Οποιαδήποτε πλακέτα έχει τους τέσσερις συνδετήρες επέκτασης πλακετών συγκολλημένους στις ακριβείς θέσεις που ορίζει το μοντέλο αναφοράς του Arduino, μπορούν να θεωρούνται ως πλακέτες επέκτασης αρχιτεκτονικής Arduino. Με αυτόν τον τρόπο, οι σχεδιαστές συστημάτων μπορούν να δημιουργούν τις δικές τους πλακέτες επέκτασης Arduino έχοντας τις λειτουργίες που επιθυμούν. Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται η κύρια πλακέτα (main-board) *Arduino Uno Rev.3* με τους τέσσερις συνδετήρες επέκτασης πλακετών, και την περιγραφή των σημάτων των συνδετήρων. Επίσης, στην εν λόγω εικόνα, διακρίνονται, στο πάνω μέρος, το κύκλωμα τροφοδοσίας από πηγή εξωτερικής τάσης καθώς και το κύκλωμα σύνδεσης μέσω USB με τον Η/Υ για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή της πλακέτας.



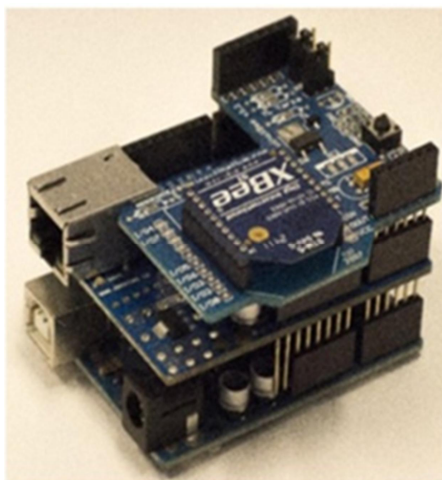
Εικόνα 3.8. Η κύρια πλακέτα *Arduino Uno Rev. 3* (της εταιρίας Arduino).

Σχετικά με τις εφαρμογές στη γεωργία, ο ασύρματος κόμβος αισθητήρων μπορεί να πάρει τη μορφή στοιβάς επεκτάσιμων πλακετών (stacking expandable boards). Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτό πολλές από τις νέες τεχνολογίες, τεχνικές και μεθόδους που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) να μπορούν να ενσωματώνονται εύκολα και σχετικώς γρήγορα. Μέχρι σήμερα, αρκετές υλοποιήσεις ασύρματων κόμβων αισθητήρων για εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας έχουν πραγματοποιηθεί [25-28]. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται πως ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων που στηρίζεται στην παραδοσιακή τυπική αρχιτεκτονική (βλ. Εικόνα) μπορεί να υλοποιηθεί με την μορφή στοιβάς επεκτάσιμων πλακετών.



Εικόνα 3.9. Οι λειτουργίες ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων της τυπικής αρχιτεκτονικής υλοποιημένες σε μορφή στοίβας επεκτάσιμων πλακετών κατά την αρχιτεκτονική *Arduino*.

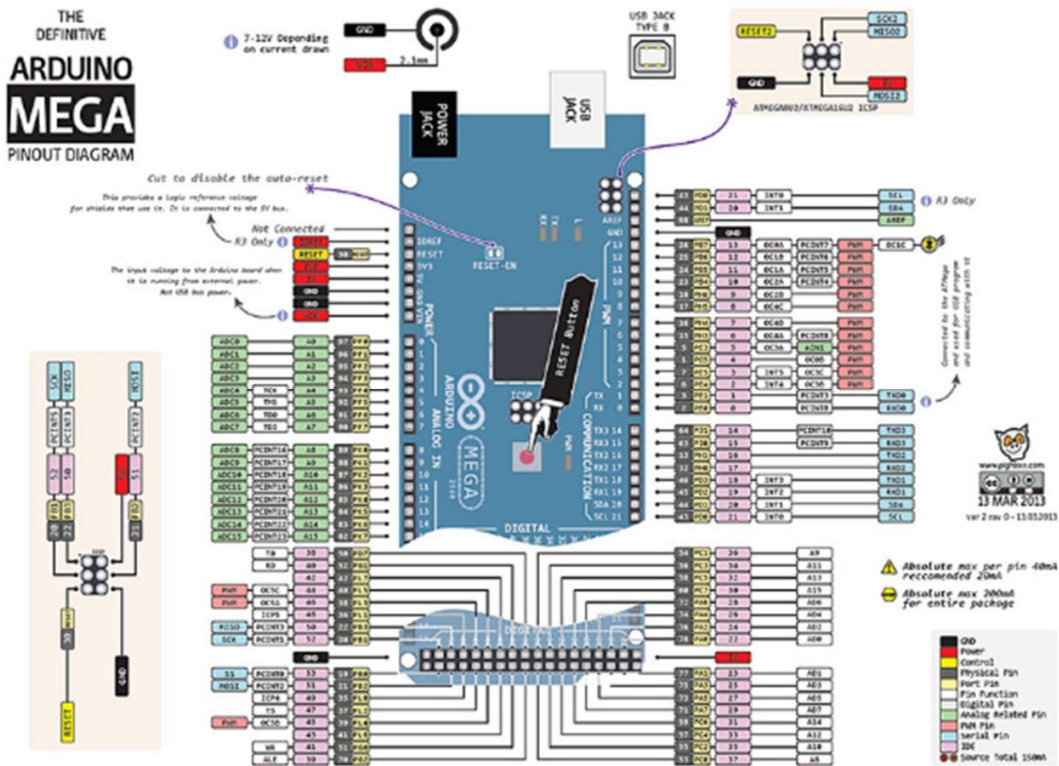
Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται η σύνθεση ενός συστήματος κόμβου με δυνατότητες πύλης δεδομένων (data gateway). Συγκεκριμένα, έχει χρησιμοποιηθεί μια κύρια πλακέτα (main-board) τύπου *Arduino Uno* στην οποία, στη συνέχεια, έχουν συνδεθεί, μέσω συνδετήρων επέκτασης, μια κάρτα επέκτασης Ethernet [29], και μια πλακέτα επέκτασης ασύρματης δικτύωσης βασισμένης στο πρότυπο IEEE 802.15.4/ZigBee [30].



Εικόνα 3.10. Σύνθεση συστήματος κόμβου με δυνατότητα πύλης δεδομένων (data gateway) χρησιμοποιώντας μια κύρια πλακέτα Arduino Uno, μια πλακέτα επέκτασης Ethernet (Ethernet expansion shield), καθώς επίσης, και μια πλακέτα επέκτασης xBee για την ασύρματη δικτύωση βάσει του προτύπου IEEE 802.15.4/ZigBee,

Ταυτόχρονα με την ραγδαία αποδοχή της αρχιτεκτονικής τύπου Arduino από τους σχεδιαστές συστημάτων και τους ερευνητές, αυξήθηκαν και οι απαιτήσεις αλλά και οι προσδοκίες από τις αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής. Η ανταπόκριση της βιομηχανίας στις αυξανόμενες αυτές ανάγκες ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση λύσεων τύπου πλατφορμών ανοικτής πηγής με περισσότερους και πιο σύνθετους συνδετήρες πλακετών επέκτασης αλλά και χρησιμοποιώντας μεγαλύτερης επεξεργαστικής ισχύος μικροελεγκτές. Παρ' όλα αυτά, οι περισσότερες αρχιτεκτονικές από αυτές διατηρούν τη μηχανική συμβατότητα με τους συνδετήρες επέκτασης της αρχιτεκτονικής *Arduino Uno Rev.3* (π.χ. λύσεις αρχιτεκτονικής MBED με συμβατότητα ως προς το *Arduino Uno Rev.3* [12,14].

Στην Εικόνα 3.11 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική της κύριας πλακέτας (main-board) *Arduino Mega*. Σ' αυτήν, εκτός από τους συνδετήρες επέκτασης πλακετών του *Arduino Uno*, έχουν προστεθεί και άλλοι παρόμοιοι συνδετήρες επέκτασης ώστε να παρέχονται περισσότερα σήματα για τη σύνθεση συστημάτων. Επίσης, αντί του μικροελεγκτή AVR ATmega328 (της εταιρίας Atmel), έχει χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής AVR ATmega2560 (της εταιρίας Atmel).

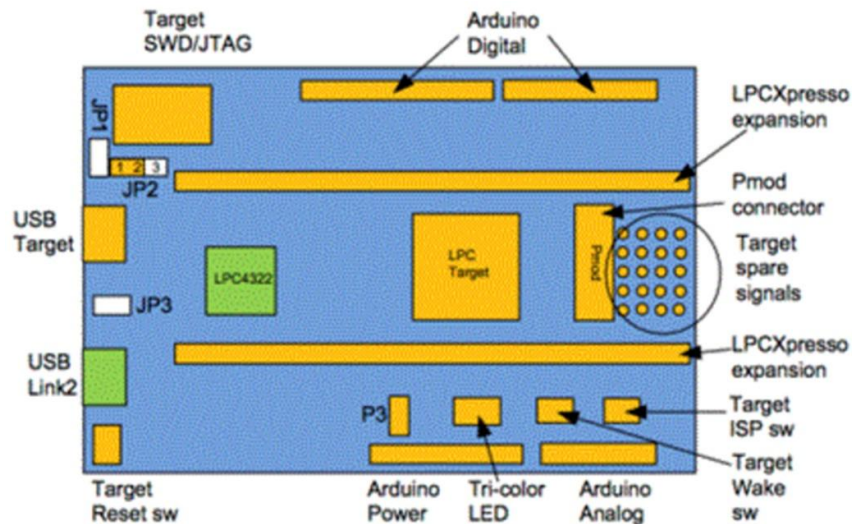


Εικόνα 3.11. Η αρχιτεκτονική της κύριας πλακέτας *Arduino Mega*.

Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται φωτογραφία της κύριας πλακέτας αρχιτεκτονικής LPC XPresso (της εταιρίας NXP) [31]. Η πλακέτα αυτή είναι αρχιτεκτονικής υλικού ανοικτής πηγής και διαθέτει συνδετήρες επέκτασης πλακετών διαφορετικών από αυτούς της αρχιτεκτονικής *Arduino*. Όμως, για την προσέλκυση όσο περισσότερων χρηστών γίνεται, έχουν προστεθεί και συνδετήρες επέκτασης πλακετών *Arduino*, όπως φαίνεται στο μπλοκ διάγραμμα της Εικόνας 3.13.

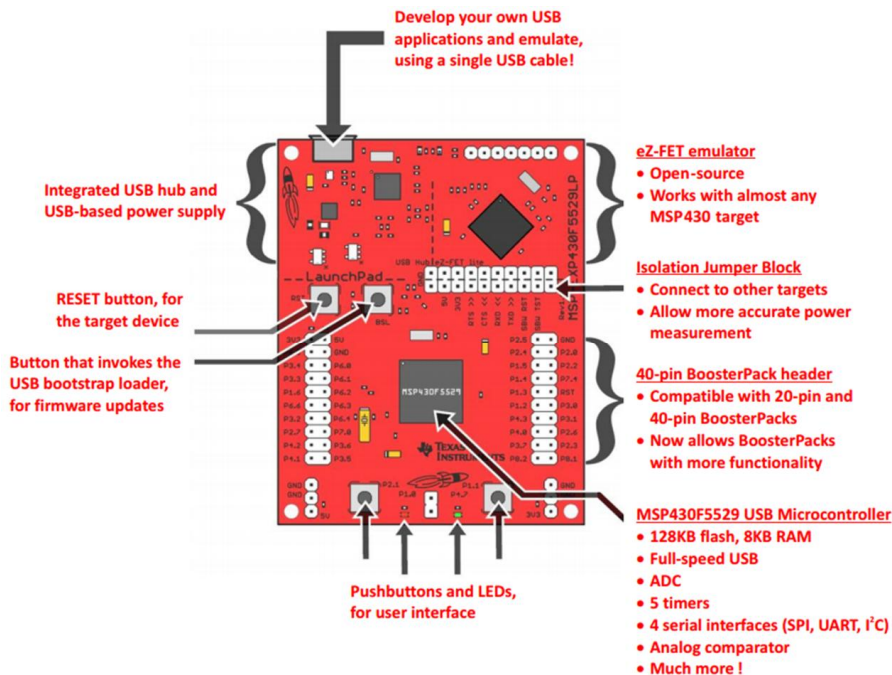


Εικόνα 3.12. Η κύρια πλακέτα επέκτασης LPC XPresso (με τον μικροελεγκτή LPC11U68 της εταιρίας NXP).

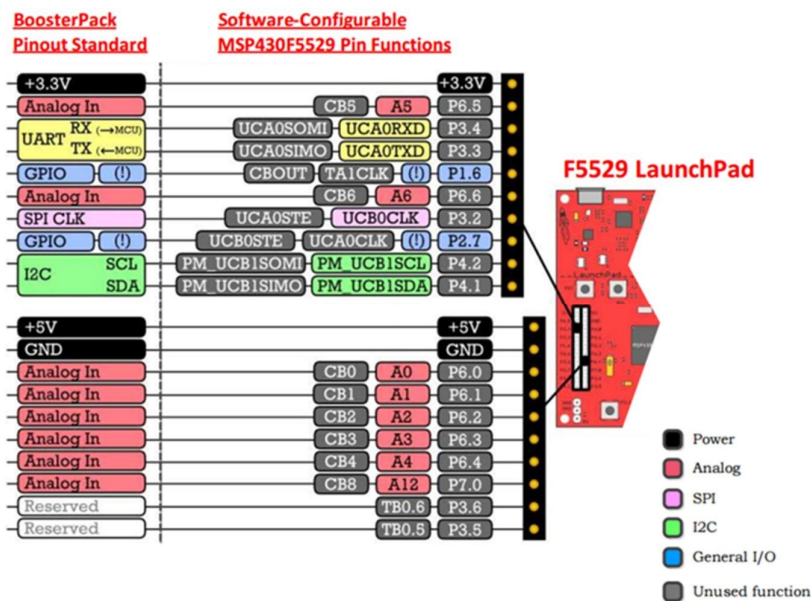


Εικόνα 3.13. Το μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής LPC XPresso στο οποίο διακρίνονται όλες οι κύριες βαθμίδες της κύριας πλακέτας καθώς επίσης και οι συνδετήρες πλακετών επέκτασης πλακετών. Διακρίνονται επίσης, οι συνδετήρες επέκτασης πλακετών για τη συμβατότητα στις συνδέσεις με τις πλακέτες επέκτασης αρχιτεκτονικής Arduino.

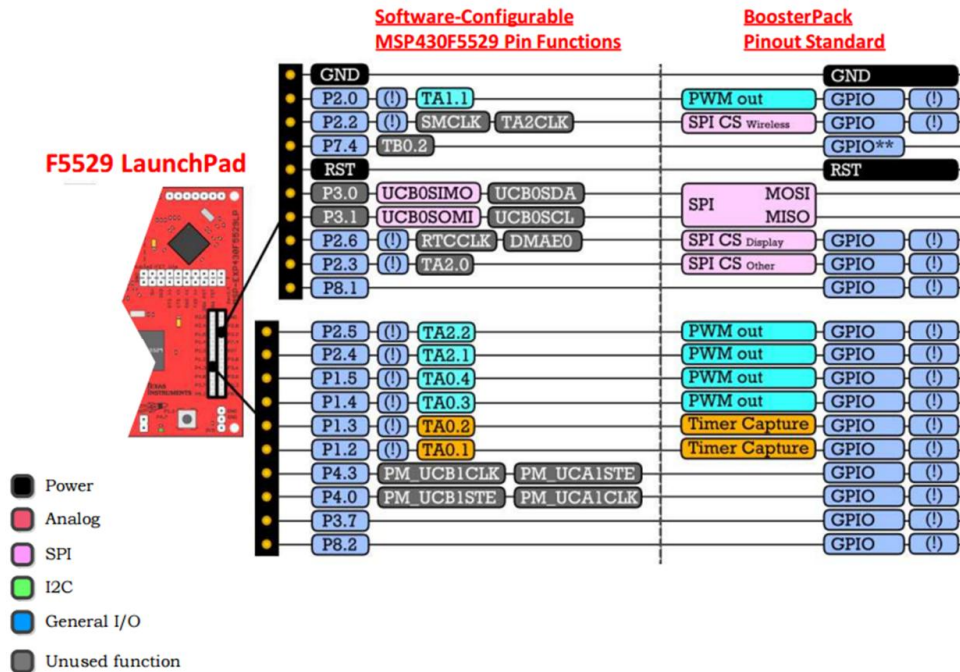
Σχετικά με την αρχιτεκτονική *LaunchPad* (της εταιρίας Texas Instruments), παρέχονται κύριες πλακέτες (main-boards) στις οποίες ως επί το πλείστον είναι συγκολλημένος ένας μικροελεγκτής των 16-bit αρχιτεκτονικής MSP430. Στο τυπωμένο κύκλωμα της κύριας πλακέτας παρέχονται όλα τα σήματα του μικροελεγκτή σε συνδετήρες επέκτασης πλακετών. Στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται μια κύρια πλακέτα αρχιτεκτονικής *LaunchPad* [32]. Στην Εικόνα 3.15 και στην Εικόνα 3.16 επεξηγούνται τα σήματα των συνδετήρων πλακετών επέκτασης. Η αρχιτεκτονική αυτή δεν παρέχει συνδετήρες συμβατούς με την αρχιτεκτονική *Arduino*, αλλά έχουν προταθεί λύσεις, όπως το *Polytרון* [33], το οποίο είναι μια κύρια πλακέτα διπλής όψης, που παρέχει στη μια όψη επεκτασιμότητα με αρχιτεκτονική *Arduino* και στην άλλη όψη επεκτασιμότητα με αρχιτεκτονική *LaunchPad*.



Εικόνα 3.14. Η δομή της κύριας πλακέτας της αρχιτεκτονικής *LaunchPad* (της εταιρίας Texas Instruments). Διακρίνονται η μονάδα τροφοδοσίας, η μονάδα προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης, καθώς και οι συνδετήρες επέκτασης πλακετών.

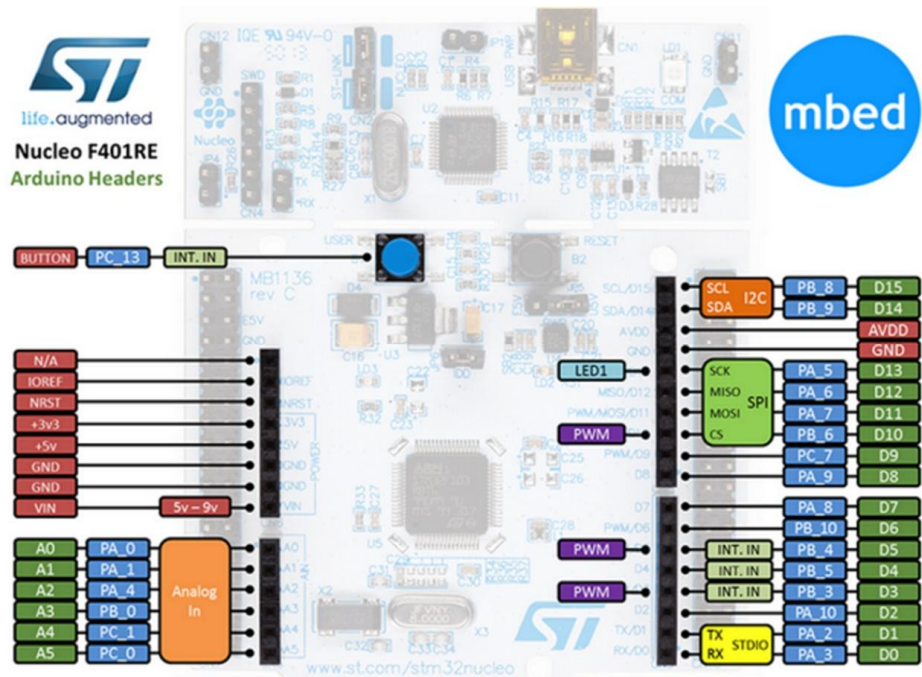


Εικόνα 3.15. Περιγραφή των λειτουργιών και των θέσεων των σημάτων των αριστερών συνδετήρων επέκτασης πλακετών της κύριας πλακέτας της αρχιτεκτονικής *LaunchPad*.

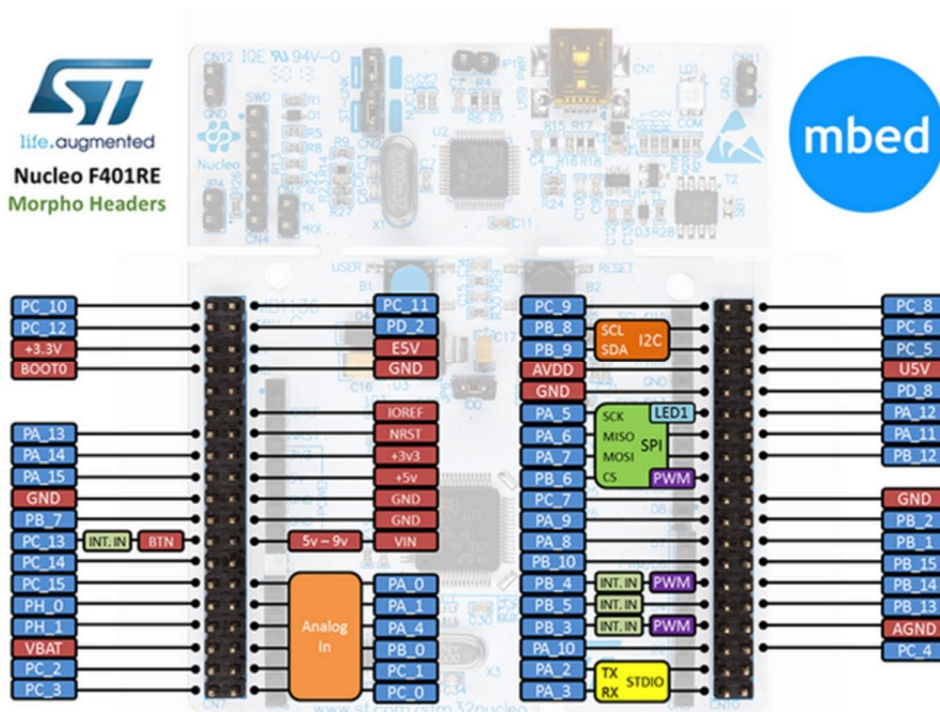


Εικόνα 3.16. Περιγραφή των λειτουργιών και των θέσεων των σημάτων των δεξιών συνδετήρων επέκτασης πλακετών της κύριας πλακέτας της αρχιτεκτονικής *LaunchPad*.

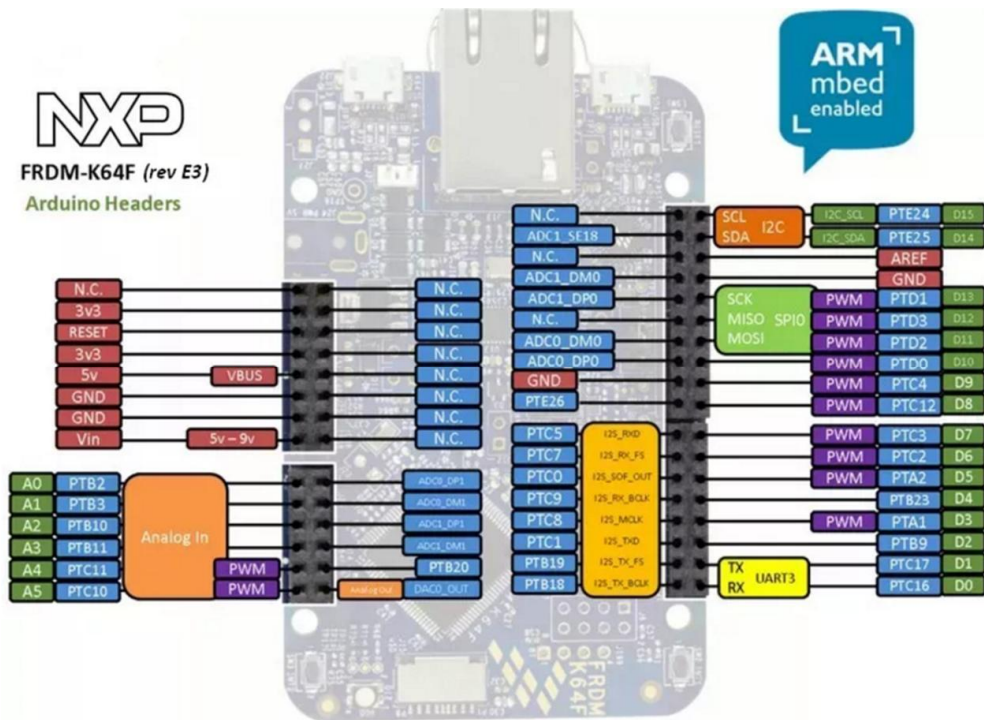
Δύο αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής που έχουν παρουσιαστεί πρόσφατα, και εμφανίζουν αρκετά μεγάλη δημοφιλία, είναι το Nucleo (της εταιρίας ST Microelectronics) και το FRDM (της εταιρίας Freescale, νυν NXP). Και οι δύο αυτές λύσεις προωθούν την χρήση μικροελεγκτών τύπου 32-bit ARM. Στις τρεις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται οι κύριες πλακετών αυτών των δύο αρχιτεκτονικών καθώς επίσης και οι συνδετήρες πλακετών επέκτασης.



Εικόνα 3.17. Η κύρια πλακέτα της αρχιτεκτονικής Nucleo δείχνοντας τους συνδετήρες επέκτασης για πλακέτες αρχιτεκτονικής Arduino.



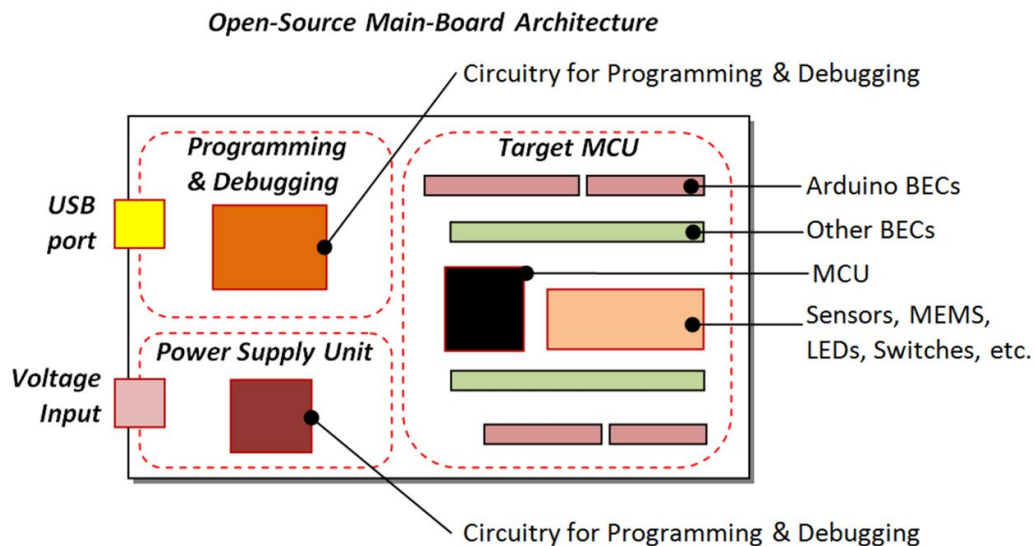
Εικόνα 3.18. Η κύρια πλακέτα της αρχιτεκτονικής Nucleo δείχνοντας τους συνδετήρες επέκτασης για πλακέτες αρχιτεκτονικής Nucleo.



Εικόνα 3.19. Κύρια πλακέτα αρχιτεκτονικής *FRDM* (της εταιρίας Freescale, νυν NXP) στην οποία περιγράφονται οι συνδετήρες πλακετών επέκτασης. Η εσωτερική πλευρά των συνδετήρων παρέχει πλήρη συμβατότητα με πλακέτες επέκτασης αρχιτεκτονικής *Arduino*.

Μετά τη μελέτη της δομής των κύριων πλακετών των αρχιτεκτονικών ανοικτής πηγής μπορεί να αποτυπωθεί το μπλοκ διάγραμμα της γενικής αρχιτεκτονικής τους. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20, σε κάθε κύρια πλακέτα συναντώνται τρία μέρη: α) η μονάδα τροφοδοσίας (power supply unit), β) η μονάδα για τον προγραμματισμό και την εκοφαλμάτωση του μικροελεγκτή της πλακέτας, και γ) η μονάδα του μικροελεγκτή. Στην τελευταία μονάδα περιλαμβάνονται πάντοτε οι συνδετήρες για τη σύνδεση πλακετών επέκτασης, διάφορα βοηθητικά στοιχεία όπως φωτεινές ενδείξεις τύπου LED, διακόπτες κλπ. Σχετικά με τους συνδετήρες επέκτασης, στις περισσότερες περιπτώσεις συναντώνται και συνδετήρες τύπου *Arduino* για λόγους περαιτέρω επεκτασιμότητας και συμβατότητας με την εν λόγω αρχιτεκτονική. Επί πλέον, στις περισσότερες κύριες πλακέτες, συναντώνται διάφορα στοιχεία για επίδειξη και δοκιμή όπως αισθητήρες MEMS (επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, μαγνητόμετρα, θερμομέτρα, κλπ). Τέλος, σε κάθε κύρια πλακέτα συναντώνται ένας

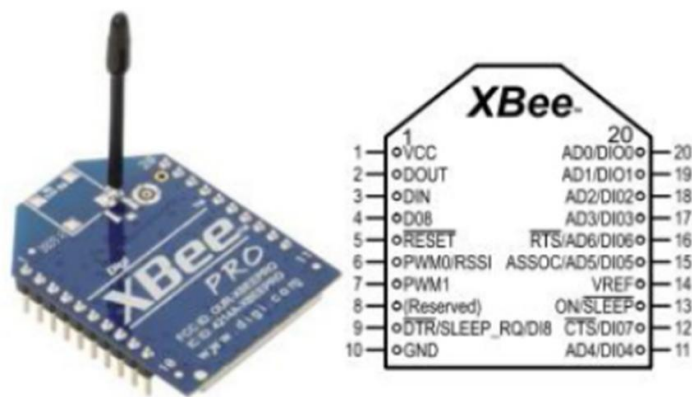
συνδετήρας για την είσοδο εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας, καθώς επίσης και ένας συνδετήρας για την σύνδεση με Η/Υ μέσω θύρας USB.



Εικόνα 3.20. Η γενική αρχιτεκτονική, σε μορφή μπλοκ διαγράμματος, της κύριας πλακέτας υλικού ανοικτής πηγής

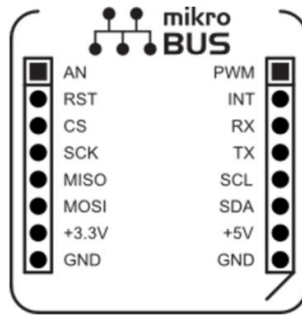
Σύμφωνα με την προσέγγιση των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής, ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων θα πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνει μια κύρια πλακέτα επέκτασης (main-board), μια πλακέτα επέκτασης με λειτουργίες ασύρματης δικτύωσης, καθώς επίσης και μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης με λειτουργίες σχετικές με την εκάστοτε εφαρμογή (π.χ. πλακέτα επέκτασης με αισθητήρες, κλπ). Ειδικότερα για τις λειτουργίες της ασύρματης δικτύωσης, σύμφωνα με την προσέγγιση του υλικού ανοικτής πηγής, χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένες λειτουργικές υπομονάδες (modules) οι οποίες περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα και στοιχεία, όπως π.χ. ασύρματο πομποδέκτη και κυκλώματα οδήγησης της κεραίας, αλλά και έναν μικροελεγκτή εντός του οποίου είναι προ-τοποθετημένο το πρωτόκολλο επικοινωνίας (protocol stack) σε μορφή ενσωματωμένου λογισμικού (firmware). Η επικοινωνία των ασύρματων λειτουργικών μονάδων με την κύρια πλακέτα του συστήματος του κόμβου πραγματοποιείται μέσω ανταλλαγής δεδομένων με τον μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Για την επικοινωνία αυτή χρησιμοποιούνται συνήθως περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας δεδομένων, όπως π.χ. περιφερειακά UART, SPI, και I2C. Σχετικά με τη φυσική σύνδεση των λειτουργικών ασύρματων υπο-μονάδων στις κύριες πλακέτες, η τάση είναι αυτά να

συνδέονται μέσω συνδετήρων πρόσθεσης/αφαίρεσης πλακετών ώστε να μπορούν να προστίθενται και να αφαιρούνται κατά περίπτωση. Από πλευράς αρχιτεκτονικής, η προσέγγιση των προσθαφαιρούμενων ασύρματων λειτουργικών υπο-μονάδων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δεύτερο επίπεδο επέκτασης του συστήματος το οποίο πραγματοποιείται τοπικά στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης. Οι λειτουργικές υπο-μονάδες ασφαλώς δεν επιτρέπουν σε άλλες πλακέτες να συνδεθούν πάνω τους. Στην Εικόνα 3.21 παρουσιάζεται, ίσως η πιο δημοφιλής, ασύρματη λειτουργική υπο-μονάδα, το XBee [34], το οποίο παρέχει ασύρματη διασύνδεση σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.15.4/ZigBee.



Εικόνα 3.21. Η ασύρματη λειτουργική υπο-μονάδα (wireless module) XBee (της εταιρίας Digi International Inc.) για την ασύρματη δικτύωση βάσει του προτύπου IEEE 802.15.4/ZigBee.

Η μεγάλη αποδοχή των αποσπώμενων ασύρματων λειτουργικών υπο-μονάδων από τους σχεδιαστές συστημάτων ασύρματων κόμβων, οδήγησε αρκετούς κατασκευαστές στην καθιέρωση τυποποιημένων σημάτων και συνδετήρων. Στην Εικόνα 3.21 απεικονίζεται (στο δεξιό μέρος) το μοντέλο των σημάτων και των συνδετήρων της υπο-μονάδας XBee, ενώ στην Εικόνα 3.22 απεικονίζεται το προτεινόμενο μοντέλο *Mikro-Bus* της εταιρίας Mikroelektronika [35].



Εικόνα 3.22. Το προτεινόμενο μοντέλο Mikro-BUS (της εταιρίας Mikroelektronika) για την τυποποίηση στην ανάπτυξη ασύρματων λειτουργικών υπο-μονάδων (wireless modules).

Εν κατακλείδι, φαίνεται πως διεθνώς υπάρχει ένας αγώνας δρόμου της παγκόσμιας βιομηχανίας προς την τυποποίηση μηχανισμών του φυσικού επιπέδου του υλικού ανοικτής πηγής στους οποίους βασίζεται η μέγιστη επεκτασιμότητα, κλιμάκωση, και επαναχρησιμοποίηση υλικού.

3.2. Προβλήματα και Περιορισμοί

Αναμφισβήτητα, οι αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής (OSH) θεωρούνται ως η διέξοδος στο σχεδιασμό υλικού από την αρχή (hardware design from the scratch). Για τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων, η υιοθέτηση της ιδέας του υλικού ανοικτής πηγής (OSH), και πιο συγκεκριμένα των αρχιτεκτονικών επεκτάσιμων πλακετών (expandable boards), είναι πολύ βολική λόγω του γεγονότος ότι οι ερευνητές και οι μηχανικοί μπορούν να δοκιμάσουν, να αξιολογήσουν, και να ενσωματώσουν πολλές λύσεις ασύρματης δικτύωσης μέσω προσθαφαιρούμενου υλικού. Ως εκ τούτου, αυτή η προσέγγιση, αυξάνει την ελευθερία των σχεδιαστών και μειώνει το χρόνο του κύκλου ανάπτυξης του συστήματος του ασύρματου κόμβου προς όφελος της υλοποίησης και της εγκατάστασης του συστήματος (deployment).

Στις επόμενες ενότητες εντοπίζονται και αναδεικνύονται αρκετοί περιορισμοί σχετικά με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμων πλακετών υλικού ανοικτής πηγής με σκοπό την έμφαση της ανάγκης για μια νέα λύση η οποία θα επιτρέψει στο επεκτάσιμο υλικό ανοικτής πηγής να πραγματοποιήσει το επόμενο βήμα, δηλαδή το βήμα από την απλή υλοποίηση πιλοτικών (pilots) και πρωτοτύπων (prototypes) συστημάτων προς τη βελτιστοποίηση και την ευρωστία των συστημάτων ειδικού σκοπού.

3.2.1. Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση Σημάτων

Τα κυριότερα προβλήματα και οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν σχετικά με τη διαχείριση των σημάτων στις επεκτάσιμες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής είναι:

(α) *Καθορισμός λειτουργιών και βραχυκυκλώματα σημάτων:* Όλα τα σήματα εισόδου/εξόδου (input/output signals), π.χ. ψηφιακά σήματα, αναλογικά σήματα, καθώς και τα σήματα θυρών και διαύλων επικοινωνίας, καθορίζονται αποκλειστικά από το μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας του συστήματος. Αυτό εξηγείται και από το γεγονός ότι όλα τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης πλακετών είναι τα σήματα του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Οι πλακέτες επέκτασης μπορούν να συνδέσουν τα σήματά τους στους συνδετήρες επέκτασης αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να καθορίσουν εάν π.χ. ένα σήμα του συνδετήρα θα είναι είσοδος ή έξοδος. Από την άλλη πλευρά, εάν σε ένα σήμα του συνδετήρα επέκτασης το οποίο είναι έξοδος και φέρει τάση π.χ. +5 Vdc συνδεθεί εκ παραδρομής ένα σήμα μιας πλακέτας επέκτασης το οποίο κι αυτό είναι έξοδος και φέρει τάση 0 Vdc (γείωση), το αποτέλεσμα είναι το βραχυκύκλωμα της μονάδας τροφοδοσίας του συστήματος. Αυτές οι πιθανότητες ασφαλώς μειώνουν την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος.

(β) *Μηδενική υποστήριξη υλοποιήσεων με πολλούς μικροελεγκτές:* Ο εγωκεντρικός χαρακτήρας του καθορισμού των λειτουργιών των σημάτων από το μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας του συστήματος αποτελεί εμπόδιο στην ανάπτυξη συστημάτων με περισσότερους από ένα μικροελεγκτές. Προφανώς, δεν υπάρχουν οι μηχανισμοί για την ταυτόχρονη διαχείριση των σημάτων των συνδετήρων επέκτασης από δύο ή ακόμα και περισσότερους μικροελεγκτές. Προς το παρόν, στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, μπορούν να συνδεθούν πλακέτες επέκτασης με το δικό της μικροελεγκτή η κάθε μια, με τον περιορισμό όμως πως οι μικροελεγκτές αυτοί μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο σε σήματα επικοινωνίας δεδομένων.

(γ) *Σπατάλη πόρων του συστήματος:* Πολλές φορές πολλοί από τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος μένουν ανεκμετάλλευτοι παρά το γεγονός πως είναι πλήρως ενεργοποιημένοι από την τροφοδοσία του συστήματος. Αυτό είναι σήνηθες στις περιπτώσεις των συστημάτων ασύρματων κόμβων όπου γίνεται συχνά χρήση ασύρματων λειτουργικών υπο-μονάδων (wireless modules). Οι υπο-μονάδες αυτές

ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω κάποιου σειριακού περιφερειακού (π.χ. UART, SPI, I2C) με το μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Από την άλλη πλευρά, οι υπο-μονάδες αυτές περιέχουν το δικό τους μικροελεγκτή, ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πιο ισχυρός από εκείνον της κύριας πλακέτας, του οποίου αρκετά σήματα παρέχονται προς γενική χρήση σε ακίδες συνδέσεων της υπο-μονάδας. Δυστυχώς, όμως αυτοί οι πόροι αν και καταναλώνουν ενέργεια του συστήματος, δεν αξιοποιούνται καθόλου από το σύστημα λόγω αδυναμιών στη διαχείριση σημάτων από πολλούς μικροελεγκτές ταυτόχρονα.

(δ) *Ασυμβατότητα στις τάσεις λειτουργίας*: Πολύ συχνά, στο υλικό των πλακετών επέκτασης υπάρχουν λογικά και αναλογικά κυκλώματα τα οποία χρειάζονται περισσότερες από μια τάσεις λειτουργίας. Ως επί το πλείστον, απαιτούνται οι τάσεις των +5 Vdc και +3.3 Vdc. Πολλά από τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης, και κυρίως τα σήματα ψηφιακών εισόδων/εξόδων αλλά και τα σήματα των περιφερειακών επικοινωνίας δεδομένων, έχουν συγκεκριμένη τιμή τάσης στις δύο λογικές καταστάσεις τους (π.χ. +3.3 Vdc για το λογικό "1"). Αυτό συνεπάγεται πως στις πλακέτες επέκτασης που θα υποδεχτούν αυτό το σήμα θα πρέπει να ισχύει η ίδια ακριβώς λογική τάσης. Σε διαφορετική περίπτωση θα υπάρξει πρόβλημα στη συνεργασία των δύο συστημάτων. Για την αποφυγή ασυμβατότητας των λογικών σταθμών της τάσης των σημάτων, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits) τα οποία εκτελούν τη λειτουργία της μετατροπής τάσης. Συγκεκριμένα, ένα σήμα λογικής στάθμης +3.3 Vdc εισέρχεται στο μετατροπέα τάσης και εξάγεται ως σήμα λογικής στάθμης +5 Vdc. Με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να γεφυρωθούν σήματα μεταξύ διαφορετικής λογικής στάθμης. Στην περίπτωση όπου ένα σήμα μπορεί να λειτουργήσει και ως εισόδος και ως εξόδος, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετατροπείς τάσης δύο κατευθύνσεων (b-directional voltage level translators). Στις πλακέτες επέκτασης υλικού ανοικτής πηγής, η συνήθης πρακτική είναι η μετάθεση της ευθύνης της ενδεχόμενης αναγκαίας μετατροπής τάσης στις πλακέτες επέκτασης οι οποίες θα υποδεχτούν το σήμα. Αυτή η τακτική μειώνει το βαθμό επαναχρησιμοποίησης των πλακετών επέκτασης και αυξάνει την πολυπλοκότητα αλλά και το κόστος της ανάπτυξης ενός συστήματος.

(ε) *Διευθέτηση ασύνδετων σημάτων*: Σε πολλές περιπτώσεις σύνθεσης ενός συστήματος, π.χ. ενός ασύρματου κόμβου, αρκετά από τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης δεν χρησιμοποιούνται, είτε γιατί δεν τα χρειάζεται η συγκεκριμένη

εφαρμογή, είτε γιατί έχει χρησιμοποιηθεί μια κύρια πλακέτα πολύ μεγαλύτερων δυνατοτήτων (π.χ. με πολλά σήματα και συνδετήρες επέκτασης). Τα αχρησιμοποιητά σήματα βρίσκονται εν αναμονή στους συνδετήρες επέκτασης, έχουν συνήθως κάποια τάση ηρεμίας, και στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν διευθετούνται καταλλήλως (floating signals). Σωστή διευθέτηση σημαίνει πως το αχρησιμοποιητό σήμα οδηγείται και τερματίζεται με σωστό τρόπο. Κάθε κατασκευαστής μικροελεγκτών ή άλλων λογικών κυκλωμάτων, συνιστά τις σωστές μεθόδους διευθέτησης των αχρησιμοποιητών σημάτων. Εάν δεν ακολουθηθούν οι σωστές μέθοδοι τότε το σύστημα θα υποφέρει από μειωμένη αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, τα αχρησιμοποιητά σήματα επιφέρουν ανεπιθύμητες καταναλώσεις ενέργειας, ευπάθεια του συστήματος στην πρόσληψη ηλεκτρομαγνητικού θορύβου (low ESD and EMI performance [36]), αστάθεια στην εκτέλεση του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή (π.χ. απρόσμενες πυροδοτήσεις συμβάντων και διακοπών λόγω θορύβου). Γενικώς, στις λύσεις των επεκτάσιμων πλακετών υλικού ανοικτής πηγής δεν υπάρχουν προβλέψεις στο φυσικό επίπεδο, δηλαδή στο τυπωμένο τους κύκλωμα, για τη σύνδεση κυκλωμάτων διευθέτησης [37].

(στ) Δρομολόγηση σημάτων: Τα σήματα του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας του συστήματος δρομολογούνται προς τους συνδετήρες επέκτασης και μέσω αυτών διαπερνούν όλες τις πλακέτες επέκτασης του συστήματος. Από την μεριά τους, οι πλακέτες επέκτασης δεν έχουν καμία δυνατότητα για αναδρομολόγηση των σημάτων τους σε σχέση με τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης. Δηλαδή, σε επίπεδο πλακέτας επέκτασης, ο χρήστης δε μπορεί να επιλέξει ποιο σήμα της πλακέτας επέκτασης θα συνδεθεί με ποια σήματα των συνδετήρων επέκτασης - κάτι τέτοιο είναι δυνατόν μόνο κατά τον σχεδιασμό του τυπωμένου της πλακέτας επέκτασης και δεν αλλάζει στην συνέχεια.

Επί πλέον, δεν υπάρχει κανένας μηχανισμός για τη διασύνδεση σημάτων μεταξύ γειτονικών πλακετών επέκτασης δίχως όμως αυτά να εμπλέκουν τα σήματα του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας.

3.2.2. Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση Επικοινωνιών

Οι πόροι επικοινωνίας δεδομένων του συστήματος το οποίο απαρτίζεται από μια κύρια πλακέτα και από διάφορες πλακέτες επέκτασης, σύμφωνα με την αρχιτεκτονική των επεκτάσιμων λύσεων υλικού ανοικτής πηγής, καθορίζονται

αποκλειστικά από τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Συγκεκριμένα, πόροι όπως π.χ. η θύρα σειριακής επικοινωνίας (UART), ή οι διαυλοί σειριακής επικοινωνίας (π.χ. SPI και I2C) παρέχονται ως σήματα προς χρήση, μέσω των συνδετήρων επέκτασης. Συνήθως, οι πόροι αυτοί είναι πολύ περιορισμένοι σε πλήθος και δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών στην επικοινωνία με τις άλλες πλακέτες επέκτασης. Επί πλέον, οι ίδιοι αυτοί πόροι χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Ως εκ τούτου, δημιουργούνται όχι μόνο ανεπιθύμητες ελλείψεις πόρων επικοινωνίας, αλλά και προβλήματα ηλεκτρικών συνδέσεων (π.χ. βραχυκυκλώματα από την ταυτόχρονη χρήση των σημάτων από πολλά διαφορετικά κυκλώματα). Οι εν λόγω περιορισμοί προκαλούν δυσκολίες στις συνδέσεις των σημάτων επικοινωνίας, οι οποίες πολύ συχνά αναγκάζουν τους τελικούς χρήστες να υλοποιούν ιδιοκατασκευές με αναμφίβολη αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα.

3.2.3. Προβλήματα και Περιορισμοί στον Προγραμματισμό και την Εκσφαλμάτωση Μικροελεγκτών

Οι λειτουργίες του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης του ενσωματωμένου λογισμικού των μικροελεγκτών είναι κρίσιμης σημασίας για την ανάπτυξη του συστήματος. Οι σημαντικότεροι περιορισμοί και οι δυσκολίες που εντοπίστηκαν μετά από τη μελέτη των επεκτάσιμων λύσεων υλικού ανοικτής πηγής είναι:

(α) Απασχόληση πόρων επικοινωνίας δεδομένων και κατανάλωση ενέργειας: Όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, οι πόροι επικοινωνίας του συστήματος χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας. Αυτό οδηγεί στην έλλειψη πόρων για τις λειτουργίες του συστήματος. Επί πλέον, τα κυκλώματα για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση, όπως π.χ. μετατροπείς σειριακής θύρας σε ISB, κλπ, είναι συγκολλημένα μόνιμα στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών επιφέρει πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας στο ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερος επιβλαβής για τα συστήματα ασύρματων κόμβων αισθητήρων τα οποία πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα και η τροφοδοσία τους προέρχεται αποκλειστικά από

συσσωρευτές ενέργειας (μπαταρίες). Όπως θα εξηγηθεί λεπτομερώς με πειραματικές μετρήσεις στο Κεφάλαιο 7, η μόνιμη ύπαρξη των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης στις πλακέτες επέκτασης αυξάνει άσκοπα την κατανάλωση ενέργειας καθώς επίσης αυξάνει το συνολικό κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος του ασύρματου κόμβου.

(β) *Περιορισμένες δυνατότητες εκοφαλμάτωσης*: Σύμφωνα με την ιδέα της ανάπτυξης με πόρους ανοικτής πηγής, είναι σύνηθες, το ενσωματωμένο λογισμικό των μικροελεγκτών να χρησιμοποιεί έτοιμα κομμάτια κώδικα, γραμμένα από άλλους. Για το λόγο αυτό, η εκοφαλμάτωση είναι πολύ σημαντική και κρίσιμη για την αξιόπιστη και μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος, ιδιαιτέρως στις περιπτώσεις των ανεπιτήρητων ασύρματων κόμβων στο πεδίο της γεωργίας.

Στις περισσότερες λύσεις επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, οι δυνατότητες για εκοφαλμάτωση είναι πολύ περιορισμένες.

(γ) *Αδυναμία υποστήριξης ανάπτυξης συστημάτων με πολλούς μικροελεγκτές*: Οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής δεν παρέχουν κανέναν μηχανισμό για την υποστήριξη της ανάπτυξης συστημάτων με πολλούς μικροελεγκτές. Συγκεκριμένα, η κάθε η πλακέτα επέκτασης θα πρέπει να διαθέτει τα δικά της κυκλώματα για τον προγραμματισμό και την εκοφαλμάτωση του μικροελεγκτή της. Δεν υπάρχει ενιαίος μηχανισμός για τον προγραμματισμό και την εκοφαλμάτωση όλων των μικροελεγκτών του συστήματος. Επίσης, λόγω του εγωκεντρικού χαρακτήρα της κύριας πλακέτας, τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης δεν μπορούν να ελέγχονται ταυτόχρονα από δύο ή περισσότερους μικροελεγκτές.

3.2.4. Προβλήματα και Περιορισμοί στη Διαχείριση της Ενέργειας

Η διαχείριση της ενέργειας με αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μακροζωία και την αξιοπιστία των συστημάτων ασύρματων κόμβων. Τα σημαντικότερα προβλήματα που εντοπίστηκαν, μετά από μελέτη, στις αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής είναι:

(α) *Χαμηλή ενεργειακή απόδοση (poor energy efficiency)*: Εξ αιτίας του ότι οι λύσεις του επεκτάσιμου λογισμικού ανοικτής πηγής, π.χ. το Arduino κλπ, έχουν αρχικά δημιουργηθεί για εκπαιδευτικούς και πειραματικούς (proofs and pilots) σκοπούς σε εσωτερικό περιβάλλον (indoor environment), αγνοούν παντελώς το θέμα της

ενεργειακής απόδοσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον, γραμμικούς ρυθμιστές τάσεις (linear voltage regulators), οι οποίοι καταναλώνουν αρκετή ενέργεια, και το χειρότερο είναι πως τη διαφορά μεταξύ της εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας και της σταθεροποιημένης τάσης τη μετατρέπουν σε θερμότητα. Από την άλλη πλευρά, η χρήση κυκλωμάτων που στηρίζεται στην τεχνολογία των παλμοτροφοδοτικών (SMPS - Switch-Mode Power Supplies) είναι πολύ αποδοτική ενεργειακά αλλά έχει μεγαλύτερο κόστος.

(β) *Αδυναμία στην κλιμάκωση της ζήτησης ενέργειας:* Η εξωτερική τάση τροφοδοσίας η οποία συνδέεται στην κύρια πλακέτα μετατρέπεται από τους ρυθμιστές τάσης σε σταθεροποιημένες τάσεις των +5 Vdc, ή και των +3.3 Vdc. Οι τάσεις αυτές, με τη σειρά τους, δρομολογούνται σε συγκεκριμένες θέσεις σημάτων στους συνδετήρες επέκτασης έτσι ώστε οι πλακέτες επέκτασης να μπορούν να τροφοδοτήσουν τα δικά τους κυκλώματα. Η μέγιστη ισχύς στην τροφοδοσία του συστήματος καθορίζεται από τις δυνατότητες του ρυθμιστή τάσης της κύριας πλακέτας [38]. Δυστυχώς, επειδή δεν είναι γνωστό πόσες και τι είδους πλακέτες επέκτασης θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση του τελικού συστήματος, π.χ. ενός ασύρματου κόμβου, πολλές φορές παρατηρείται ανεπάρκεια ισχύος. Στις περιπτώσεις αυτές, θα πρέπει οι πλακέτες επέκτασης να έχουν τα δικά τους κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας και να δέχονται εξωτερική τάση τροφοδοσίας. Κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό. Σε κάθε περίπτωση, η έλλειψη ισχύος οδηγεί τους χρήστες σε ιδιοκατασκευές και πρόχειρες λύσεις οι οποίες μπορεί να πλήξουν σοβαρά την αξιοπιστία και την ευρωστία του τελικού συστήματος.

(γ) *Αταξία στην καλωδίωση:* Στις περιπτώσεις όπου δυο ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης δέχονται εξωτερική τάση τροφοδοσίας, είτε στις περιπτώσεις όπου απαιτούνται συνδέσεις με εξωτερικά στοιχεία, όπως π.χ. συσσωρευτές ενέργειας και φωτοβολταϊκές κυψέλες, το τελικό σύστημα υποφέρει από αταξία στις καλωδιώσεις. Αυτή η αταξία επιφέρει μειωμένη επίδοση του συστήματος ως προς την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC - Electromagnetic Compatibility).

(δ) *Καμία πρόβλεψη για τάσεις διαφορετικών λογικών σταθμών?:* Στους συνδετήρες επέκτασης δεν υπάρχουν θέσεις για σήματα τάσης διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιούνται για τα λογικά κυκλώματα, δηλαδή +5 Vdc και 3.3 Vdc. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως μέχρι σήμερα η έμφαση στο σχεδιασμό των πλακετών

επέκτασης έχει δοθεί σε κυκλώματα όπως οδήγησης αισθητηρίων, επικοινωνίας, κλπ, κι όχι σε κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας.

(ε) *Ενεργοποίηση αχρησιμοποίητων κυκλωμάτων*: Στις αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, είναι σύνηθες στις κύριες πλακέτες να υπάρχουν διάφορα στοιχεία για λόγους επίδειξης και δοκιμών. Συγκεκριμένα, συναντώνται πολύ συχνά κυκλώματα φωτεινών ενδεικτών (LEDs), κυκλώματα αισθητηρίων τεχνολογίας MEMS (MEMS - Micro-Electro-Mechanical Sensors), ή κυκλώματα επαγωγικών πλήκτρων, κλπ. Τα στοιχεία αυτά είναι συγκολλημένα στο τυπωμένο κύκλωμα της κύριας πλακέτας και δεν υπάρχει κανένας μηχανισμός απενεργοποίησής τους από το χρήστη. Η τακτική αυτή συναντιέται επίσης και στα συστήματα ασύρματων κόμβων που βασίζονται στις αρχιτεκτονικές των συστημάτων ειδικού σκοπού (End-Systems) καθώς και στις αρχιτεκτονικές συστημάτων γενικής χρήσης (COTS) [39]. Τα κυκλώματα αυτά δεν είναι καθόλου απαραίτητα στις τελικές υλοποιήσεις των συστημάτων. Για παράδειγμα, ένα LED το οποίο είναι διαρκώς αναμμένο, ή αναβοσβήνει, το οποίο είναι συγκολλημένο σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο οποίος είναι κλεισμένος σε ένα προστατευτικό περίβλημα και εγκατεστημένος σε ένα απομακρυσμένο χωράφι, σίγουρα δεν έχει καμία αξία. Επίσης, η ενέργεια που δαπανά π.χ. ένα LED είναι συγκρίσιμη, και μερικές φορές μεγαλύτερη, από την ενέργεια που δαπανά ο κόμβος για την ασύρματη επικοινωνία του με το δίκτυο αισθητήρων.

3.2.5. Προβλήματα και Περιορισμοί στη Φυσική Μορφή και στο Περιβλήμα Στέγασης

Σε καμία από τις υπάρχουσες λύσεις αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής δεν λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για τις φυσικές διαστάσεις των κύριων πλακετών. Ασφαλώς, υπάρχει η τάση για τη διατήρηση όσο το δυνατόν πιο μικρών διαστάσεων των τυπωμένων κυκλωμάτων αλλά σε καμία περίπτωση δεν λαμβάνονται υπ' όψη τυχόν ιδιαίτερες ανάγκες και απαιτήσεις των τελικών εφαρμογών. Συγκεκριμένα, για τις εφαρμογές των ασύρματων κόμβων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας δεν υπάρχει καμία μέριμνα ούτε για το φυσικό μέγεθος αλλά ούτε και για το περίβλημα στέγασης των πλακετών του συστήματος. Σχετικά με τη στέγαση των κόμβων σε στεγανά περιβλήματα κατάλληλα για το εχθρικό περιβάλλον της γεωργίας, την αποκλειστική ευθύνη την φέρουν οι τελικοί χρήστες.

Ως εκ τούτου, η παραγνώριση ή η αδιαφορία για τα θέματα της φυσικής μορφής και του περιβάλλοντος στέγασης των κόμβων μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την επιτυχία της συνολικής εφαρμογής στο πεδίο.

3.3. Κριτήρια Αξιολόγησης για τις Πλατφόρμες Ανοικτής Πηγής

Στην βιβλιογραφία δεν αναφέρονται κριτήρια (metrics) για την αξιολόγηση των λύσεων πλατφορμών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής. Μια εξήγηση για την έλλειψη αυτή, ίσως αποτελεί το γεγονός πως οι πλατφόρμες αυτές αρχικά σχεδιάστηκαν για εκπαιδευτικούς και πειραματικούς σκοπούς μικρής έκτασης. Όμως η μεγάλη δημοφιλία τους και η αποδοχή τους όχι μόνο από φοιτητές και χομπίστες αλλά και από επαγγελματίες (μηχανικούς, ερευνητές, κλπ) για την υλοποίηση τελικών πραγματικών εφαρμογών ανέβασε τον πήχη των απαιτήσεων για αξιοπιστία και ευρωστία. Ως εκ τούτου η θέσπιση κριτηρίων αξιολόγησης καθίσταται πλέον επιτακτική.

Η μελέτη και ο εντοπισμός των σύμφυτων περιορισμών και προβλημάτων που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες μπορεί να συμβάλει προς την κατεύθυνση της θέσπισης ουσιαστικών κριτηρίων αξιολόγησης των επεκτάσιμων πλατφορμών υλικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, προτείνεται η υιοθέτηση έξι κατηγοριών κριτηρίων:

- α) κριτήρια για τη διαχείριση των σημάτων,
- β) κριτήρια για τη διαχείριση πόρων επικοινωνίας δεδομένων,
- γ) κριτήρια για τη διαχείριση των λειτουργιών προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης,
- δ) κριτήρια για την υποστήριξη της ανάπτυξης συστημάτων με πολλούς μικροελεγκτές,
- ε) κριτήρια για τη διαχείριση της ενέργειας και
- στ) κριτήρια για τη φυσική μορφή και το περιβάλλον στέγασης.

3.4. Σχεδιάζοντας ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων Εικόνας για την Παρακολούθηση Εντόμων με Αρχιτεκτονικές Ανοικτής Πηγής

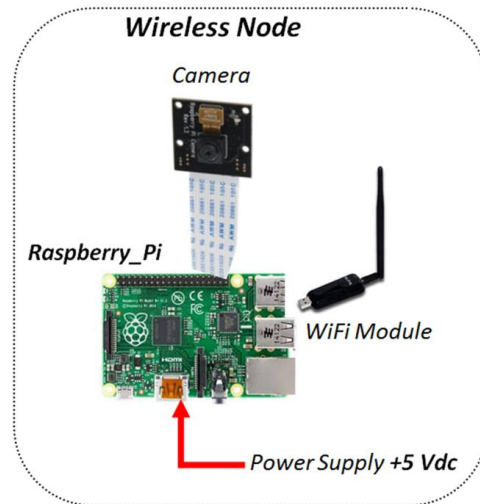
Λαμβάνοντας υπ' όψη την εφαρμογή παρακολούθησης εντόμων σε οπωρώνες, υιοθετήθηκε η προσέγγιση της φωτογράφισης των δύο πλευρών μιας εντομοπαγίδας σε τακτά χρονικά διαστήματα και η αποστολή των φωτογραφιών μέσω του διαδικτύου σε ένα διαδικτυακό εξυπηρετητή (web server) για επεξεργασία και ανάλυση από τους ειδικούς εντομολόγους. Οι εντομολόγοι με τη σειρά τους, έχοντας τις εν λόγω φωτογραφίες στην διάθεσή τους, δεν χρειάζεται να επισκέπτονται τους ελαιώνες για οπτικό έλεγχο. Μετά την ανάλυση των φωτογραφιών εξάγονται συμπεράσματα περί του είδους και του πληθυσμού των επιβλαβών εντόμων.

Για την υλοποίηση ενός συστήματος για την κάλυψη των αναγκών της παραπάνω εφαρμογής, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί εξ' ολοκλήρου υλικό ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Η/Υ μικρών διαστάσεων (SBC) Raspberry Pi (συγκεκριμένα το μοντέλο Raspberry Pi 2). Ανάμεσα στους κυριότερους λόγους που οδήγησαν στην επιλογή αυτή είναι:

- είναι ολοκληρωμένος Η/Υ,
- επιτρέπει την εκτέλεση λειτουργικού συστήματος ανοικτής πηγής, όπως είναι το Linux,
- διαθέτει όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για τη σύνδεση κάμερας χαμηλού κόστους και υψηλής ανάλυσης (5 Megapixel),
- διαθέτει θύρες USB για τη σύνδεση διαφόρων περιφερειακών συσκευών,
- ως Η/Υ που είναι, μπορεί να προγραμματιστεί σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού για την ανάπτυξη διαδικτυακών εφαρμογών,
- διαθέτει συνδετήρες για τη σύνδεση πλακετών επέκτασης,
- υποστηρίζεται από μια τεράστια κοινότητα χρηστών,
- υπάρχουν διαθέσιμες πολλές πληροφορίες για την ανάπτυξη εφαρμογών
- οποιοσδήποτε συσκευές ασύρματης επικοινωνίας, π.χ. WiFi, Bluetooth, GSM, 3G/4G, Κλιπ, μπορούν πολύ εύκολα να συνδεθούν μέσω της θύρας USB, και
- έχει πολύ χαμηλό κόστος.

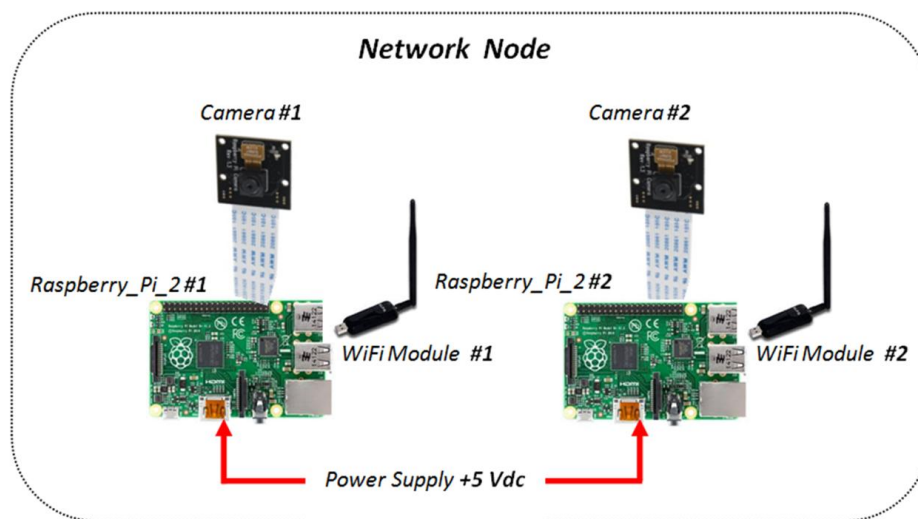
Στην Εικόνα 3.23 παρουσιάζεται η υλοποίηση του ασύρματου κόμβου συλλογής φωτογραφιών και αποστολής τους στον διαδικτυακό εξυπηρετητή. Αποτελείται από μια πλακέτα Η/Υ Raspberry Pi, από μια κάμερα 5 Megapixels η οποία συνδέεται απ' ευθείας στον ειδικό αισθητήρα του Raspberry Pi, και από μια φορητή συσκευή USB για τη διασύνδεση μέσω WiFi με ένα διαδικτυακό δρομολογητή δεδομένων (web

data router). Για τη λειτουργία του κόμβου απαιτείται η σύνδεση εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας τιμής +5 Vdc. Η μέγιστη κατανάλωση του ασύρματου κόμβου δεν ξεπερνάει τα 2 A. Η ευκολία στην υλοποίηση του υλικού του ασύρματου κόμβου είναι προφανής.



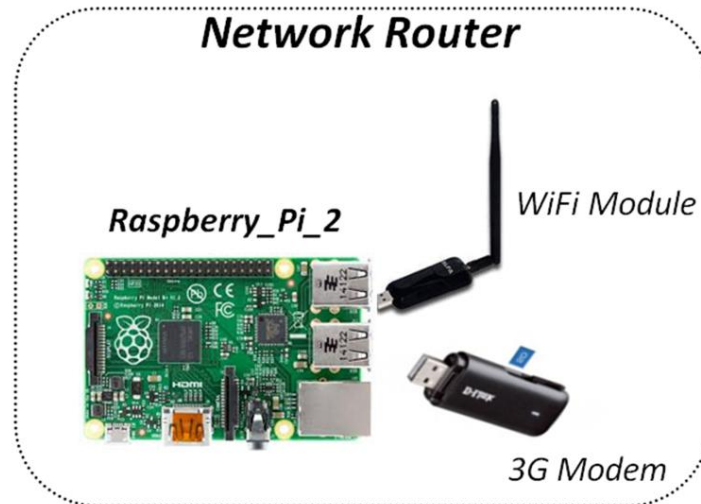
Εικόνα 3.23. Ασύρματος κόμβος συλλογής φωτογραφιών βασισμένος σε υλικό ανοικτής πηγής (SBC Raspberry Pi).

Για να μπορεί το σύστημα να λαμβάνει φωτογραφίες και από τις δύο πλευρές της εντομοπαγίδας, τοποθετήθηκε άλλη μια διάταξη Raspberry Pi όπως αυτή της Εικόνας 3.23. Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζεται η τελική έκδοση της υλοποίησης του ασύρματου κόμβου συλλογής φωτογραφιών.



Εικόνα 3.24. Ασύρματος κόμβος συλλογής φωτογραφιών βασισμένος σε υλικό. Σε κάθε πλευρά της εντομοπαγίδας τοποθετείται από μια διάταξη Raspberry Pi.

Για την υλοποίηση του διαδικτυακού δρομολογητή χρησιμοποιήθηκε επίσης ο Η/Υ Raspberry Pi μαζί με δύο συσκευές USB για τη διασύνδεση με το διαδίκτυο (μέσω 3G modem) αλλά και με τους ασύρματους κόμβους (μέσω WiFi) (βλ. Εικόνα 3.25).



Εικόνα 3.24. Υλοποίηση διαδικτυακού δρομολογητή βασισμένου στον Η.Υ Raspberry Pi.

Τα επόμενα βήματα για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και της υλοποίησης του συστήματος περιλαμβάνουν την προσθήκη των εξής αισθητήρων για την μέτρηση του μικροκλίματος:

- αισθητήρας θερμοκρασίας αέρα,
- αισθητήριο υγρασίας αέρα,
- αισθητήριο στάθμης βροχής, και
- αισθητήριο ταχύτητας ανέμου.

Συγκεκριμένα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας DHT22 (της εταιρίας Aosong Electronics) [40], και ο αισθητήρας στάθμης υγρών eTape (της εταιρίας Milone Technologies) [41]. Το κριτήριο επιλογής των συγκεκριμένων αισθητήρων ήταν η δημοφιλία τους στις κοινότητες χρηστών (users communities) και η ως εκ τούτου μεγάλη διαθεσιμότητα έτοιμου κώδικα και σχεδίων υλοποίησης.

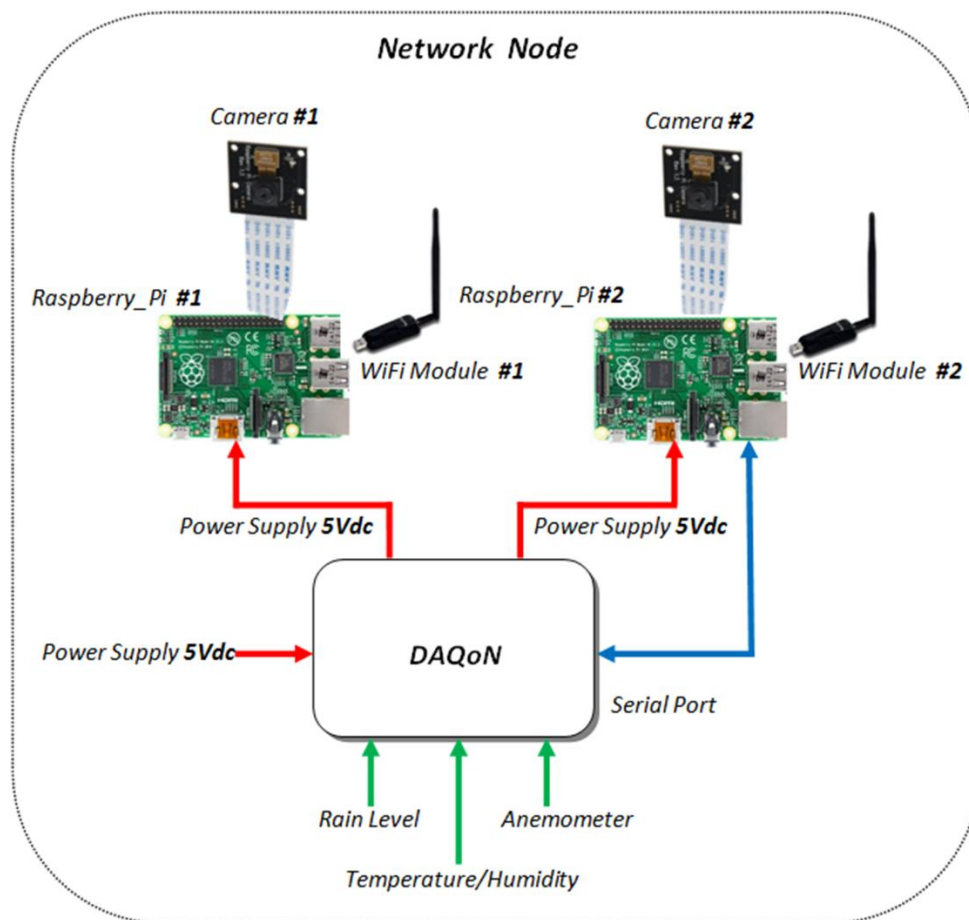
Η τροφοδοσία του συστήματος του ασύρματου κόμβου προέρχεται από φωτοβολταϊκή κυψέλη και συσσωρευτές ενέργειας τύπου οξέος μολύβδου (lead acid

batteries). Πριν τη διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης και των συσσωρευτών ενέργειας πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές κατά το στάδιο ανάπτυξης των εφαρμογών λογισμικού των Raspberry Pi's σε περιβάλλον εργαστηρίου. Οι δοκιμές αυτές έδειξαν πως η κατανάλωση των δύο Raspberry Pi του κόμβου είναι μεγάλη (περίπου 4 A). Επίσης, διαπιστώθηκε πως οι εν λόγω Η/Υ δεν διαθέτουν κάποιο μηχανισμό υλικού ή λογισμικού για το χρονικό έλεγχο της λειτουργίας τους. Έτσι, θα πρέπει να λειτουργούν συνέχεια ακόμα κι όταν δεν λαμβάνουν φωτογραφίες.

Γενικά, οι επεκτάσιμες πλατφόρμες Η/Υ ανοικτής πηγής δεν διαθέτουν:

1. μηχανισμούς επιτήρησης καλής λειτουργίας (watchdog controller),
2. ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC - Real-Time Clock),
3. μηχανισμό για να αυτοενεργοποιηθούν όντας σε κατάσταση πλήρους κλεισίματος (power-off).

Για τους παραπάνω λόγους αποφασίστηκε ο σχεδιασμός μιας επί πλέον πλακέτας με την οποία θα είναι δυνατός ο έλεγχος της λειτουργίας των δύο Raspberry Pi. Στην Εικόνα 3.25 απεικονίζεται η τελική έκδοση του ασύρματου κόμβου συλλογής φωτογραφιών. Όπως φαίνεται στην εν λόγω εικόνα, οι τροφοδοσίες των δύο Raspberry Pi ελέγχονται από την πλακέτα ελέγχου έτσι ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί η ενεργοποίηση των Raspberry Pi μόνο όταν κάποιο από αυτά πρέπει να συλλέξει μια φωτογραφία. Βάσει του σεναρίου της εφαρμογής, το κάθε ένα Raspberry θα πρέπει να στέλνει από δύο έως δέκα φωτογραφίες ημερησίως. Επομένως, εάν τα Raspberry Pi λειτουργούν σε κύκλο εργασίας (duty-cycle) τότε η καταναλισκόμενη ενέργεια μειώνεται πολλές τάξεις μεγέθους.



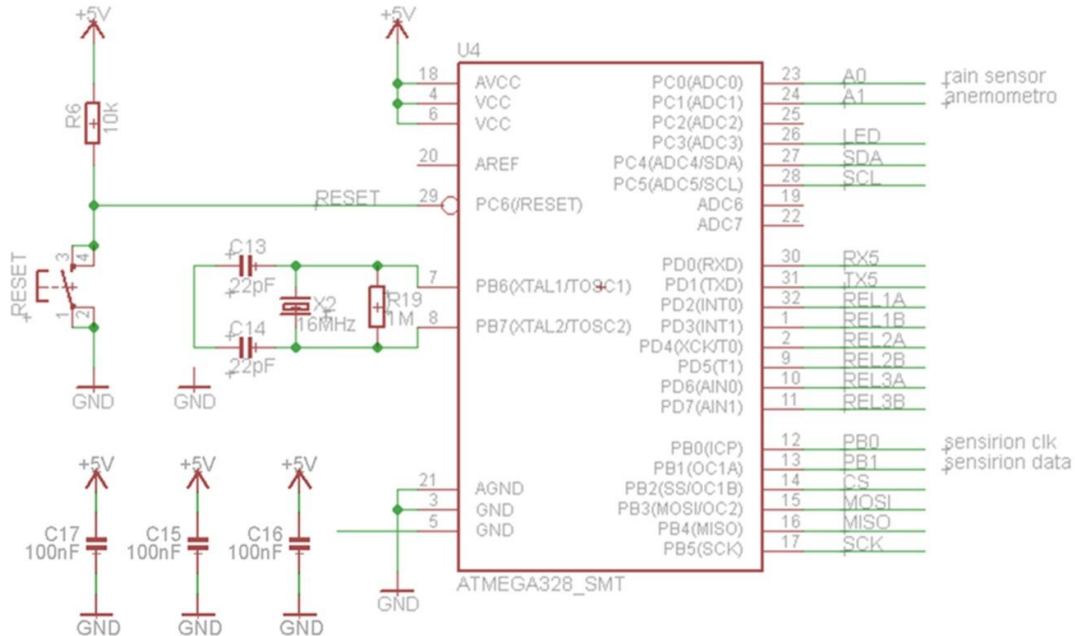
Εικόνα 3.25. Ο ασύρματος κόμβος συλλογής φωτογραφιών βασισμένος σε δύο Η/Υ τύπου Raspberry Pi και μια πλακέτα ελέγχου.

Επίσης, στην πλακέτα ελέγχου μετατοπίζεται η ευθύνη για τη διασύνδεση και τη λειτουργία των αισθητήριων. Η πλακέτα ελέγχου θα λειτουργεί διαρκώς, σε αντίθεση με τις πλακέτες Raspberry Pi οι οποίες θα λειτουργούν μόνο όταν πρέπει να συλλέξουν μια νέα φωτογραφία. Επειδή οι μετρήσεις για τις παραμέτρους του μικροκλίματος πρέπει να λαμβάνονται κάθε λίγα λεπτά καθ' όλο το εικοσιτετράωρο της ημέρας, είναι σκόπιμη η διασύνδεσή τους με την πλακέτα ελέγχου.

Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες μεταφέρονται από την πλακέτα ελέγχου στο ένα από τα δύο Raspberry Pi μέσω σειριακής θύρας (UART) έτσι ώστε να αποσταλούν και αυτές στον απομακρυσμένο διαδικτυακό εξυπηρετητή και να αποθηκευτούν στην βάση δεδομένων.

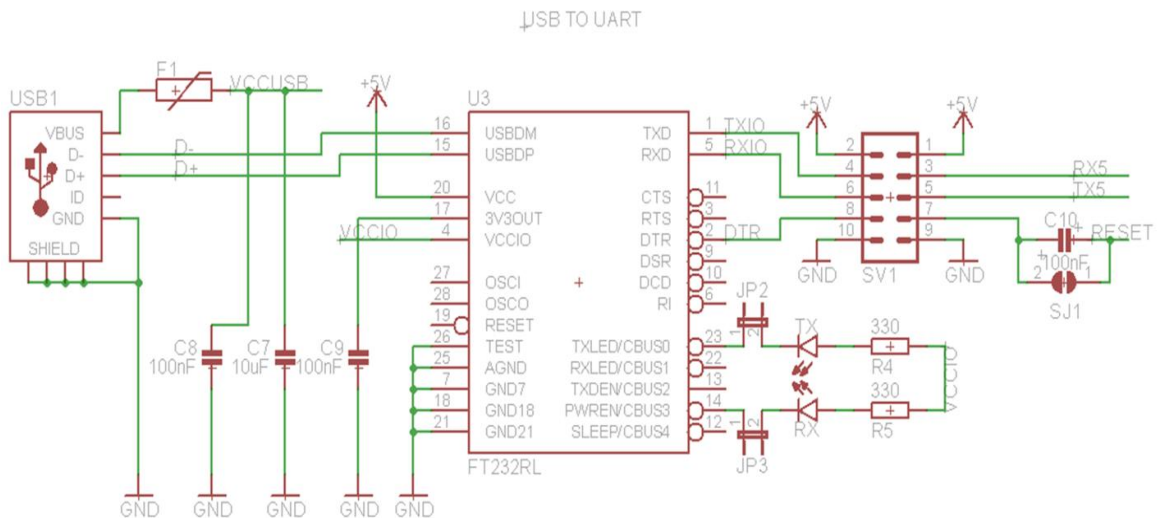
Για το σχεδιασμό της πλακέτας ελέγχου επιλέχθηκε η χρήση αποκλειστικά πόρων υλικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, αποφασίστηκε η χρήση ενός

μικροελεγκτή AVR ATmega328, όπως δηλαδή αυτού που χρησιμοποιείται στο Arduino. Το σχηματικό κύκλωμα του μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου απεικονίζεται στην Εικόνα 3.26.



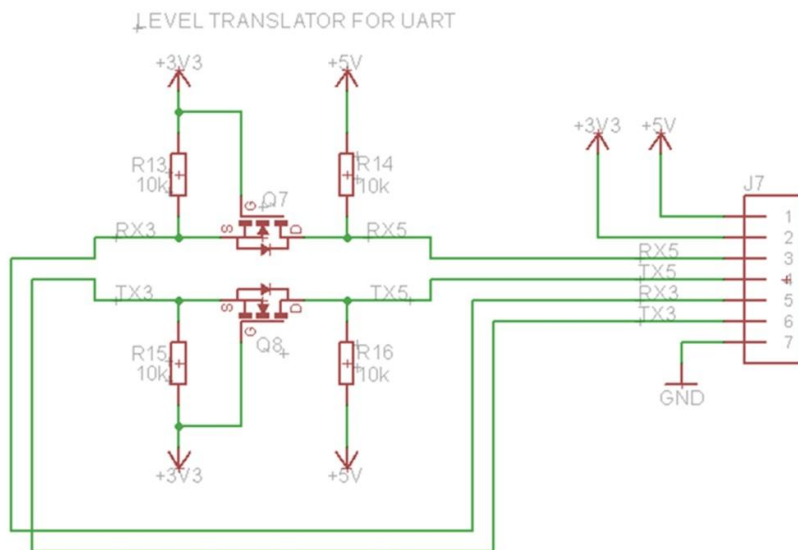
Εικόνα 3.26. Το κύκλωμα λειτουργίας του μικροελεγκτή AVR ATmega328 της πλακέτας ελέγχου του ασύρματου κόμβου συλλογής φωτογραφιών εντόμων.

Για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή μέσω Η/Υ σχεδιάστηκε το κύκλωμα της Εικόνας 3.27. Βάσει του κυκλώματος αυτού, η σειριακή θύρα του μικροελεγκτή (UART) μετατρέπεται σε θύρα USB ώστε να μπορεί να συνδεθεί με τον Η/Υ. Στον Η/Υ είναι εγκατεστημένο το περιβάλλον ανάπτυξης (IDE - Integrated Development Environment) για τις κύριες πλακέτες αρχιτεκτονικής Arduino. Για να μπορέσει το παραγόμενο ενσωματωμένο λογισμικό να γραφτεί στη μνήμη προγράμματος του μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου, ο μικροελεγκτής έχει αρχικά προγραμματιστεί με το ειδικό ενσωματωμένο λογισμικό που παρέχεται από τον κατασκευαστή του Arduino (Arduino bootloader). Η διαδικασία αυτή αρκεί να γίνει μόνο μια φορά κι από εκεί και πέρα ο μικροελεγκτής AVR ATmega328 συμπεριφέρεται όπως και οι μικροελεγκτές Arduino.



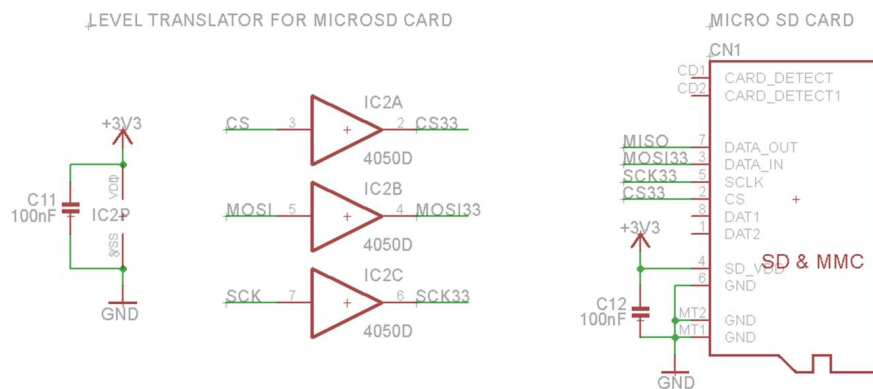
Εικόνα 3.27. Το κύκλωμα λειτουργίας μετατροπής των σημάτων της σειριακής θύρας του μικροελεγκτή (σήματα YX και RX) σε σήματα θύρας USB για τη σύνδεση σε H/Y.

Σχετικά με τις λογικές στάθμες της τάσης των σημάτων των θυρών σειριακής επικοινωνίας, για το Raspberry Pi είναι στα +3.3 Vdc, ενώ για την πλακέτα ελέγχου είναι στα +5 Vdc. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε το κύκλωμα της Εικόνας 3.28 το οποίο επιτελεί τη μετατροπή των τάσεων των +5 Vdc σε +3 Vdc, καθώς και το αντίστροφο.



Εικόνα 3.28. Το κύκλωμα μετατροπής τάσεων +5 Vdc σε +3.3 Vdc και το αντίστροφο.

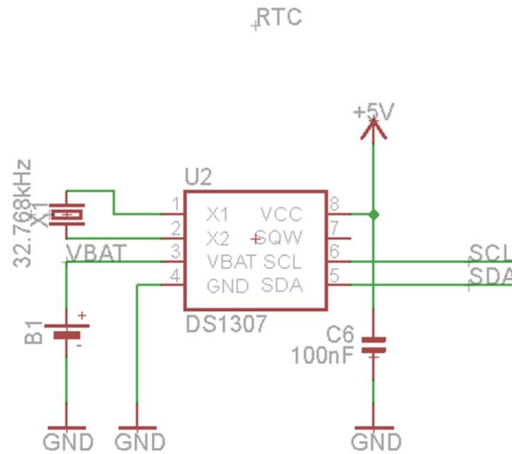
Για τη διατήρηση των μετρήσεων από τους αισθητήρες στην πλακέτα επέκτασης, επιλέχθηκε η χρήση τοπικής μη-πτητικής μνήμης (non-volatile memory) τύπου microSD. Η μνήμη αυτή μπορεί να προσθαιρείται περιστασιακά από τη βάση στήριξής της η οποία βρίσκεται συγκολλημένη στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης θα μπορεί να επιλέγει κατά περίπτωση το ακριβές μέγεθος της μνήμης αποθήκευσης δεδομένων του συστήματός του. Με την προσθήκη της μνήμης αυτής, το σύστημα θα διαθέτει ένα μεγάλο χώρο αποθήκευσης δεδομένων (buffer data memory) έτσι ώστε να μη χάνονται δεδομένα λόγω π.χ. της αδυναμίας του κόμβου να διασυνδεθεί με το διαδίκτυο και να στείλει τις μετρήσεις του στον διαδικτυακό εξοπλιστή. Από την άλλη πλευρά, οι συλλεγόμενες φωτογραφίες μπορούν να αποθηκεύονται προσωρινά στη μνήμη microSD της πλακέτας τους, στην οποία εκτελείται το λειτουργικό σύστημα Linux. Το κύκλωμα της μνήμης microSD που σχεδιάστηκε για την πλακέτα ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.29. Οι μετατροπείς τάσης χρησιμοποιήθηκαν για τη συμβατότητα στις λογικές στάθμες των σημάτων του μικροελεγκτή και της μνήμης microSD. Η επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτή και μνήμης πραγματοποιείται μέσω του σειριακού διαύλου επικοινωνίας δεδομένων SPI (αυτό το επιβάλλει η μνήμη microSD).



Εικόνα 3.29. Το κύκλωμα διασύνδεσης μνήμης microSD με το μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης του ασύρματου κόμβου.

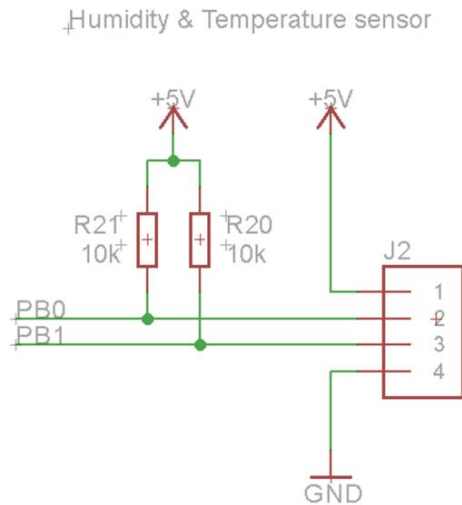
Λόγω του ότι τα Raspberry Pi δεν διαθέτουν ρολόι πραγματικού χρόνου (RTC - Real-Time Clock), και λόγω του ότι τα Raspberry Pi δεν θα είναι διαρκώς σε κατάσταση λειτουργίας, αποφασίστηκε να υλοποιηθεί κύκλωμα ρολογιού πραγματικού χρόνου στην πλακέτα ελέγχου. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τον ακριβή χρονοπρογραμματισμό του κύκλου εργασίας (duty-cycle) των δύο Raspberry Pi,

καθώς επίσης και του ακριβούς καθορισμού των περιόδων δειγματοληψίας των αισθητήρων. Επί πλέον, λόγω του ότι το ρολόι πραγματικού χρόνου έχει τη δυνατότητα ημερολογιακού χρόνου (calendar time), οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν να αποθηκεύονται στη μνήμη microSD με χρονοσήμανση (timestamp). Το πλήρες κύκλωμα για τη λειτουργία του ρολογιού/ημερολογίου πραγματικού χρόνου απεικονίζεται στην Εικόνα 3.30.

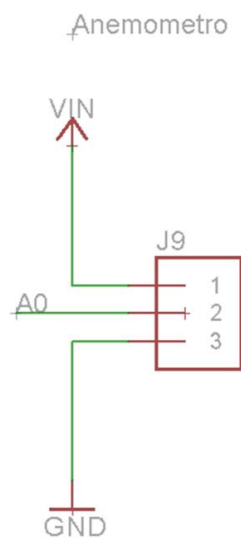


Εικόνα 3.30. Το κύκλωμα λειτουργίας του ρολογιού/ημερολογίου πραγματικού χρόνου. Διακρίνονται το ολοκληρωμένο DS1307 (RTCC chip) και ο συσσωρευτής ενέργειας για την αδιάλειπτη τροφοδοσία του ρολογιού.

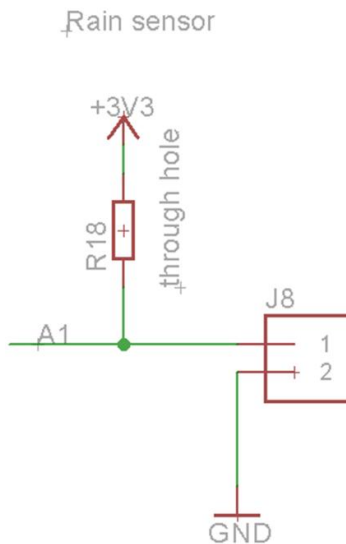
Τα κυκλώματα για τη διασύνδεση των αισθητήρων του ασύρματου κόμβου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω υλοποιούνται στην πλακέτα ελέγχου του κόμβου. Στην Εικόνα 3.31 παρατίθεται το κύκλωμα για τη διασύνδεση του διπλού αισθητήρα θερμοκρασίας/υγρασίας, στην Εικόνα 3.32 παρατίθεται το κύκλωμα διασύνδεσης του ανεμομέτρου, ενώ στην Εικόνα 3.33 παρατίθεται το κύκλωμα διασύνδεσης του αισθητήρα για τη μέτρηση της στάθμης της βροχής.



Εικόνα 3.31. Το κύκλωμα για τη διασύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας-υγρασίας DHT22 με το μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου του ασύρματου κόμβου.

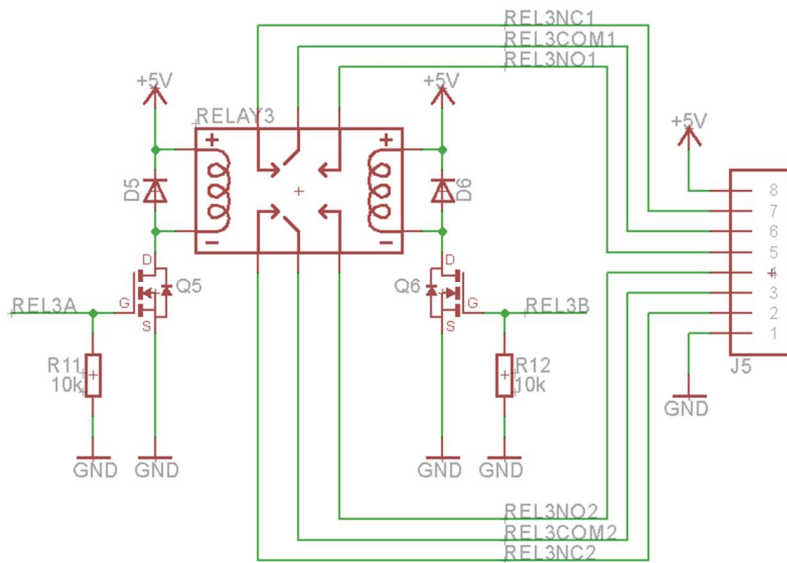


Εικόνα 3.32. Το κύκλωμα για τη διασύνδεση του αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου (anemometer) με το μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου του ασύρματου κόμβου.



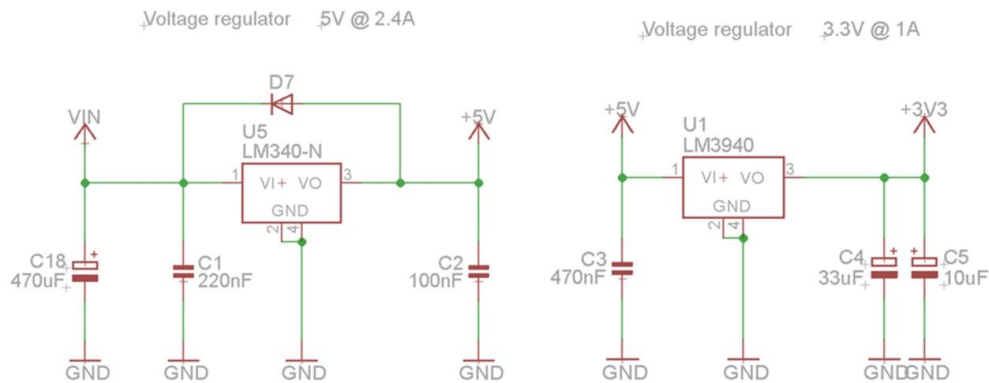
Εικόνα 3.33. Το κύκλωμα για τη διασύνδεση του αισθητήρα μέτρησης της στάθμης της βροχής με το μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου του ασύρματου κόμβου.

Στην Εικόνα 3.34 παρατίθεται το κύκλωμα μέσω του οποίου η πλακέτα ελέγχου ελέγχει τον κύκλο εργασίας των Raspberry Pi. Συγκεκριμένα, η τάση του κάθε ενός από τα δύο Raspberry Pi ελέγχεται από έναν ηλεκτρονόμο (relay). Οι ηλεκτρονόμοι που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι τύπου μανδάλωσης με διπλό πηνίο ενεργοποίησης (dual coil latch relay). Αυτή η σχεδιαστική επιλογή αποφασίστηκε έτσι ώστε οι επαφές των ηλεκτρονόμων να διατηρούν την κατάσταση τους ακόμα και με απουσία τάσης στο σύστημα. Από την άλλη πλευρά, η δυνατότητα αυτή συμβάλει στη δραματική μείωση της απαιτούμενης ενέργειας στον κόμβο.



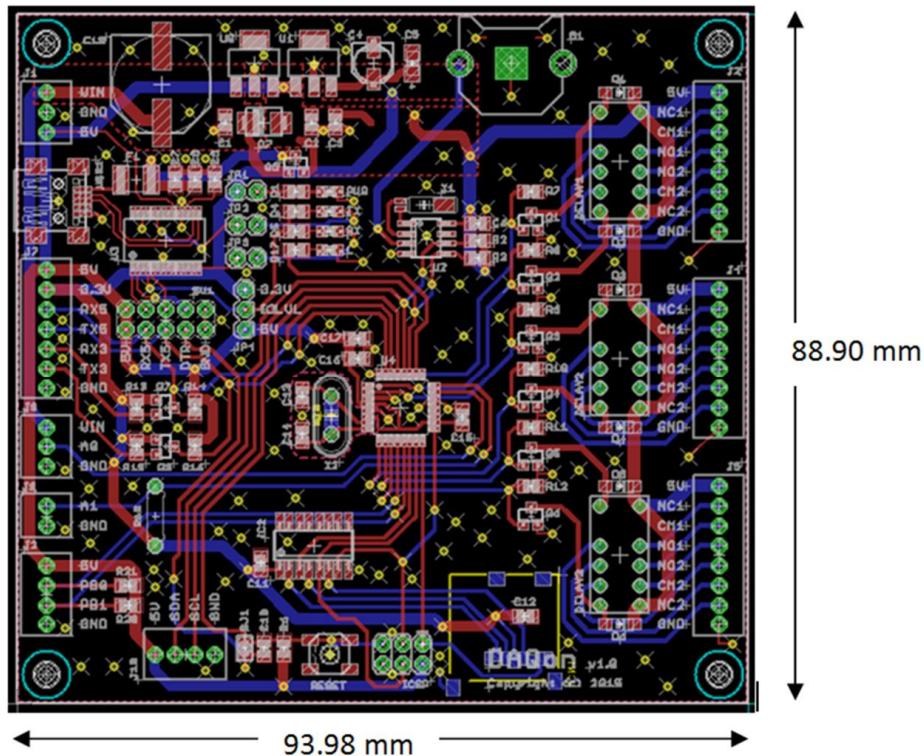
Εικόνα 3.34. Το κύκλωμα για τη λειτουργία ηλεκτρονόμου με διπλό πηνίο ενεργοποίησης και δυνατότητα μανδάλωσης των καταστάσεων των επαφών του.

Στην Εικόνα 3.35 παρατίθεται το κύκλωμα για τη ρύθμιση των τάσεων τροφοδοσίας της πλακέτας ελέγχου. Συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η μετατροπή της εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας τιμής έως +24 Vdc σε τάση στάθμης +5 Vdc, και σε δεύτερο στάδιο η τάση των +5 Vdc μετατρέπεται σε τάση στάθμης +3.3 Vdc. Η τάση των +5 Vdc χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή, των ηλεκτρονόμων, του ρολογιού πραγματικού χρόνου, καθώς και των Raspberry Pi (ως τάση εισόδου). Η τάση των +3.3 Vdc χρησιμοποιείται για τα σήματα σειριακής επικοινωνίας του μικροελεγκτή με τα Raspberry Pi, και για την μνήμη microSD. Σχετικά με τα κυκλώματα διασύνδεσης αισθητήρων, κάποια από αυτά χρησιμοποιούν την τάση των +5 Vdc και κάποια χρησιμοποιούν την τάση των +3.3 Vdc. Η εξωτερική τάση τροφοδοσίας της πλακέτας ελέγχου προέρχεται από φωτοβολταϊκή κυψέλη 50 W και από συσσωρευτή ενέργειας 12 Vdc.



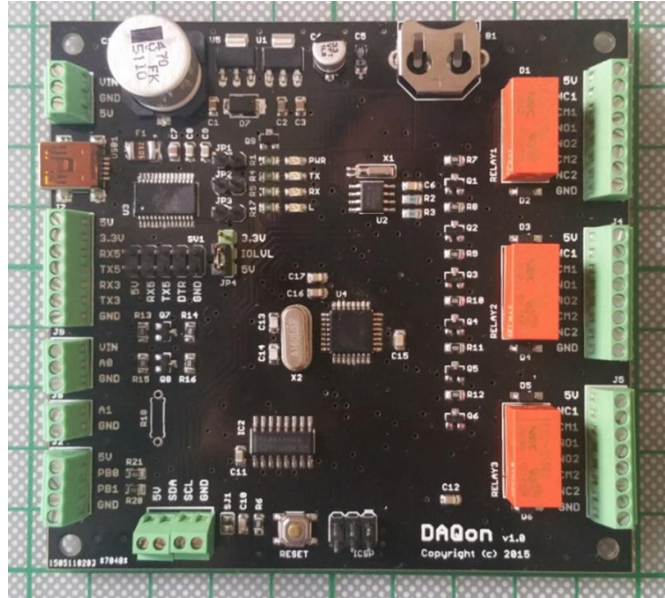
Εικόνα 3.35. Τα κυκλώματα μετατροπής της εξωτερικής τάσης τροφοδοσίας σε τάσεις των +5 Vdc και +3.3 Vdc.

Το σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.36. Το εν λόγω τυπωμένο κύκλωμα είναι δύο επιπέδων (double-layer PCB). Όπως διακρίνεται, όλα τα σήματα εισόδου/εξόδου καταλήγουν σε συνδετήρες τύπου κλέμας (screw-drive terminal blocks), έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύνδεση καλωδίων ακόμα και στο πεδίο του ελαϊώνα.

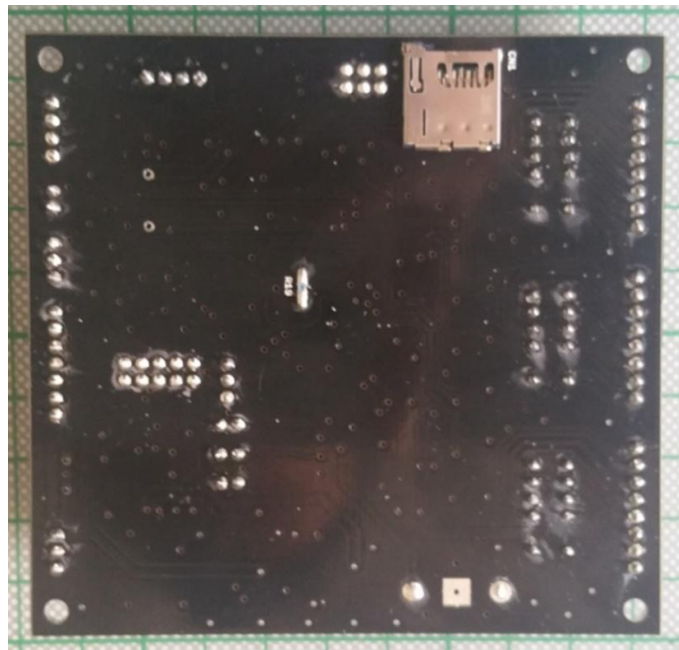


Εικόνα 3.36. Το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας ελέγχου του ασφράμιτου κόμβου συλλογής φωτογραφιών και μετρήσεων παραμέτρων μικροκλίματος.

Μετά την παραγωγή του τυπωμένου κυκλώματος και τη συγκόλληση των εξαρτημάτων, η πλακέτα ελέγχου έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.37. Στην Εικόνα 3.38 φαίνεται η πίσω όψη της πλακέτας ελέγχου.

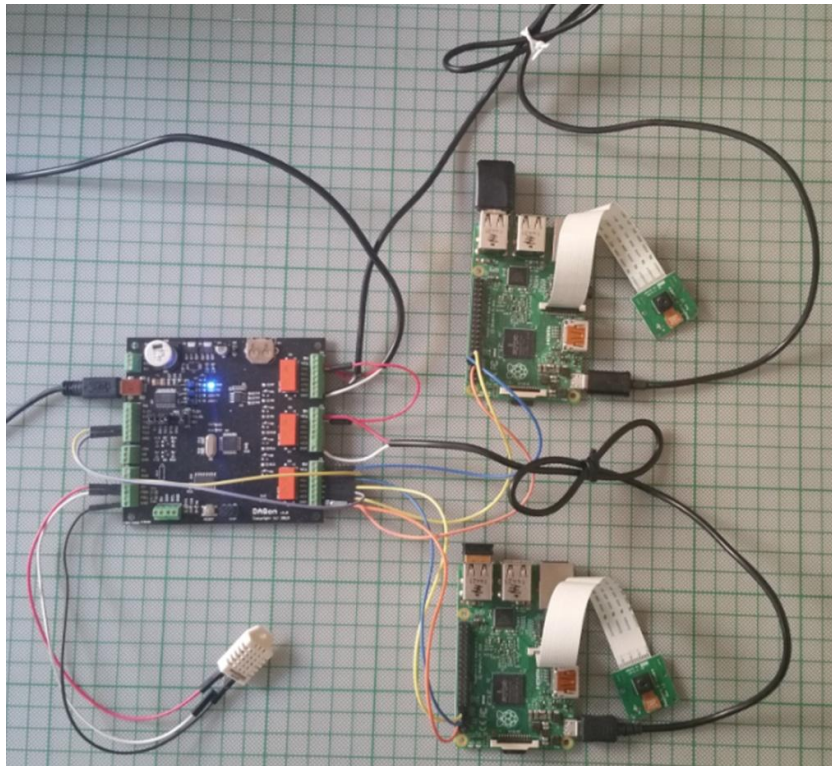


Εικόνα 3.37. Η πλακέτα ελέγχου πλήρως υλοποιημένη με το τυπωμένο κύκλωμα και τα εξαρτήματα συγκολλημένα.



Εικόνα 3.38. Η πίσω όψη της πλακέτας ελέγχου. Στο πάνω μέρος διακρίνεται ο συνδετήρας/βάση της μνήμης microSD.

Η πλήρης διάταξη του ασύρματου κόμβου, στον πάγκο του εργαστηρίου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.39.



Εικόνα 3.39. Το πλήρες σύστημα του ασύρματου κόμβου συλλογής φωτογραφιών και παραμέτρων μικροκλίματος ανεπτυγμένο στον πάγκο του εργαστηρίου. Διακρίνονται στο αριστερό μέρος η πλακέτα ελέγχου και στο δεξιό μέρος τα δύο Raspberry Pi. Στην πλακέτα ελέγχου είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας, ενώ στα δύο Raspberry Pi είναι συνδεδεμένα τα USB WiFi modules και οι κάμερες λήψης φωτογραφιών.

Το λογισμικό του συστήματος του κόμβου αναπτύχθηκε σε γλώσσα C για τον μικροελεγκτή της πλακέτας ελέγχου, και σε γλώσσα Python για τα δύο Raspberry Pi. Για την ανάπτυξη των προγραμμάτων χρησιμοποιήθηκαν ευρέως τεχνικές και προγραμματιστικοί πόροι από τις κοινότητες χρηστών του λογισμικού ανοικτής πηγής.

Ο σχεδιασμός του κόμβου πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο δυνατό βαθμό σε τεχνικές και υλικό ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα για την πλακέτα ελέγχου, η οποία σχεδιάστηκε εξ' αρχής (from the scratch), η προσέγγιση ήταν να αξιοποιηθούν όσο περισσότεροι πόροι ανοικτής πηγής. Από την άλλη πλευρά, λαμβάνοντας υπ' όψη

τις ιδιαίτερες ανάγκες του ασύρματου κόμβου στο πεδίο της γεωργίας (ελαιώνας), για χαμηλή κατανάλωση και ευελιξία, ακολουθήθηκαν τεχνικές που συναντώνται όχι στις γενικής χρήσης λύσεις ανοικτής πηγής αλλά στα συστήματα αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού (end systems). Με άλλα λόγια, η προσέγγιση στον σχεδιασμό ήταν να δημιουργηθεί ένα σύστημα ανοικτής πηγής αλλά με την αξιοπιστία των συστημάτων ειδικού σκοπού. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν οι παρακάτω λειτουργίες, οι οποίες ομολογουμένως, δεν συναντώνται στα συστήματα υλικού ανοικτής πηγής:

- υλοποίηση κυκλωμάτων προστασίας της θύρας USB,
- τοποθέτηση μνήμης microSD για την αποθήκευση παραμέτρων λειτουργίας και δεδομένων μετρήσεων,
- προσθήκη κυκλώματος πραγματικού χρόνου και ημερολογίου (real-time clock calendar) για τη χρονοσήμανση των μετρήσεων και των συμβάντων αλλά και για το σαφή χρονοπρογραμματισμό του κύκλου εργασιών των ελεγχόμενων υποσυστημάτων (Raspberry Pi),
- υλοποίηση κυκλωμάτων μετατροπής λογικών σταθμών τάσεων,
- επιλεκτική αποσύνδεση των φωτεινών ενδεικτών τύπου LED μέσω αποσπώμενων βραχυκυκλωτήρων (shorting jumpers) για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο χωράφι,
- προσθήκη επαφών σύνδεσης των σημάτων εισόδου/εξόδου τύπου κλέμας για ευκολία και ασφάλεια στις συνδέσεις καλωδίων στο πεδίο,
- επιλογή ηλεκτρονόμων (relays) τύπου μανδάλωσης για μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, και
χρήση κυκλωμάτων MOSFET αντί διπολικών τρανζίστορ (bipolar transistors) για μείωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Ο εν λόγω σχεδιασμός της πλακέτας ελέγχου αποδεικνύει πως είναι εφικτό να σχεδιαστούν συστήματα που να έχουν καλή απόδοση και αξιοπιστία, όπως των συστημάτων ειδικού σκοπού. Όμως, κάποια από τα βασικά πλεονεκτήματα των αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής φαίνεται πως υποβαθμίζονται. Συγκεκριμένα:

- χάνεται η επεκτασιμότητα με την έννοια των μηχανισμών επέκτασης πλακετών,
- χάνεται η ομοιομορφία μεταξύ των πλακετών του συστήματος,

- μειώνεται η αναγνωρισιμότητα των πλακετών από τους χρήστες των κοινοτήτων υλικού ανοικτής πηγής, π.χ. η πλακέτα ελέγχου που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι στην ουσία ένα εξειδικευμένο Arduino αλλά κανείς δεν μπορεί οπτικά να το διακρίνει αυτό,
- απαιτούνται ικανότητες σχεδιασμού συστημάτων ειδικού σκοπού και γνώσεις και δεξιότητες οι οποίες δεν συναντώνται ανάμεσα στους χρήστες των κοινοτήτων υλικού ανοικτής πηγής,
- το κόστος υλοποίησης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το κόστος αγοράς μιας έτοιμης κύριας πλακέτας υλικού ανοικτής πηγής, π.χ. ενός Arduino. Ο λόγος για την αύξηση αυτή είναι πως χρησιμοποιούνται ειδικά κυκλώματα για την αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Αυτά τα κυκλώματα σίγουρα δεν είναι απαραίτητα για τις δοκιμές στο εργαστήριο αλλά σίγουρα απαιτούνται για τη μακροζωία, την αξιοπιστία, και τη χαμηλή κατανάλωση του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο.

Έχοντας υπ' όψη τις προσεγγίσεις και τις αρχιτεκτονικές σχεδιασμού, καθώς και τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι προφανές πως υπάρχει ανάγκη για νέες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου λογισμικού ανοικτής πηγής οι οποίες θα διασφαλίζουν όλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ιδέας του υλικού ανοικτής πηγής ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζουν την υλοποίηση τεχνικών και μεθόδων για βελτιστοποίηση και ευρωστία του συστήματος με τυποποιημένο και ξεκάθαρο τρόπο.

Βιβλιογραφία

1. Mbed. <http://en.wikipedia.org/wiki/Mbed> (20/11/2014),
2. Codebender. <https://codebender.cc> (10),
3. I-sense.
<http://www.coalesenses.com/index.php/products/solutions/isense-modules/> (21/12/2014),
4. NXP. Mbed lpc1788 platform.
<https://developer.mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/> (05-01-2016),
5. Creative commons. [<http://creativecommons.org/licenses/>
6. Arduino. www.arduino.cc (01/03/2016),
7. Recktenwald, G.W.; Hall, D.E. In *Using arduino as a platform for programming, design and measurement in a freshman engineering course*, 118th ASEE Annual Conference and Exposition, Vancouver, BC, 2011; Vancouver, BC.
8. Parallax basic stamp. http://en.wikipedia.org/wiki/BASIC_Stamp (15/01/2015),
9. Kelemen, M.; Kelemenová, T.; Virgala, I.; Miková, L.; Lipták, T. In *Rapid control prototyping of embedded systems based on microcontroller*, Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems, MMaMS 2014, 2014; Trebuna, F., Ed. Elsevier Ltd: pp 215-220.
10. Matrix e-blocks. <http://www.matrixsl.com/eblockscircuitboards.php> (20/01/2015),
11. Launchpad, texas instruments.
<http://www.ti.com/ww/en/launchpad/launchpad.html?DCMP=mcu-launchpad&HQS=launchpad> (28/03/2016),
12. Nucleo stm32.
http://www2.st.com/content/st_com/en/products/ecosystems/stm32-open-development-environment/stm32-nucleo.html?querycriteria=productId=SC2003 (15/03/2016),

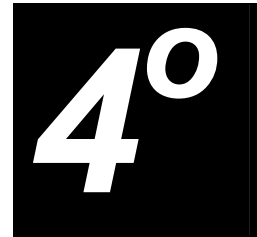
13. Frdm kl25. <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-kl14-kl15-kl24-kl25-mcus:FRDM-KL25Z> (01/02/2016),
14. Nxp lpc xpresso. <http://www.lpcware.com/lpcxpresso> (15/02/2015),
15. Adi blackfin dsp platform with arduino interface. <http://www.analog.com/en/about-adi/news-media-relations/news-room/2015-Press-Releases/2-25-15-low-cost-dsp-development-platforms.html> (17/04/2015),
16. Infineon arduino compatible shields. <http://www.infineon.com/cms/en/product/microcontroller/32-bit-industrial-microcontroller-based-on-arm-registered-cortex-tm-m/32-bit-xmc1000-industrial-microcontroller-arm-registered-cortex-tm-m0/xmc-development-tools-kits-and-boards/channel.html?channel=db3a30433d5e5530013d64397b0c2043> (28/11/2015),
17. Raspberry pi. <https://www.raspberrypi.org/products/> (2016),
18. Beaglebone. <http://beagleboard.org/bone> (02/04/2016),
19. Intel galileo gen 2. <http://www.intel.com/content/www/us/en/embedded/products/galileo/galileo-overview.html> (02/04/2016),
20. Single board computers comparison. http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_single-board_computers (2/4/2015),
21. Arduino products. <https://www.arduino.cc/en/Main/Products> (02/04/2016),
22. Frdm kl64. <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-k64-k63-and-k24-mcus:FRDM-K64F> (02/04/2016),
23. Arduino uno rev.3. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> (02/04/2016),

24. Arduino uno rev. 3, schematic drawing.
https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/Arduino_Uno_Rev3-schematic.pdf (02/04/2016),
25. Agrawal, N.; Singhal, S. In *Smart drip irrigation system using raspberry pi and arduino*, 2015 International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2015, 2015; Swaroop, A.; Sharma, V., Eds. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: pp 928-932.
26. Kabir, A.F.M.S.; Shorif, M.A.; Li, H.; Yu, Q. In *A study of secured wireless sensor networks with xbee and arduino*, 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2014, 2015; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: pp 492-496.
27. Lim, W.; Torres, H.K.; Oppus, C.M. In *An agricultural telemetry system implemented using an arduino-android interface*, 2014 7th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2014 - Joint with 6th International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics, co-located with 10th ERDT Conference, 2014; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
28. Silva, J.F.M.C.; Gomes, R.C.; Nascimento, A.O.F.; Menezes, J.W.M.; Silva, F.D.; Alves, L.E.B. In *Building a node for wireless sensor network based on open source platform arduino*, 2012 2nd Brazilian Symposium on Computing System Engineering, SBESC 2012, Natal, 2012; Natal, p 224.
29. Arduino ethernet shield.
<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield> (01/04/2016),
30. Xbee rf modules. <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions> (08/04/2016),
31. NXP. Nxp lpc xpresso. <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/lpcxpresso-boards/lpcxpresso-board-for-lpc11u68:OM13058?fsrch=1&sr=3&pageNum=1> (08-01-2016),
32. Instruments, T. Slau533c msp430f5529 launchpad development kit
<http://www.ti.com/lit/ug/slau533c/slau533c.pdf> (03-02-2016),

33. Papageorgas, P.; Piromalis, D.; Iliopoulou, T.; Agavanakis, K.; Barbarosou, M.; Prekas, K.; Antonakoglou, K. Wireless sensor networking architecture of polytropon: An open source scalable platform for the smart grid. *Energy Procedia* **2014**, *50*, 270-276.
34. Inc., D.I. Xbee rf modules. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf> (23-10-2015),
35. Mikroelektronika. Mikro-bus. <http://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf> (18-09-2015),
36. Han, Y.; Yan, Z.; Che, M.; Wang, T. In *The si and emi analysis and pre-design of the sensor*, 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, MAPE 2011, Beijing, 2011; Beijing, pp 566-569.
37. Atmel 8-bit microcontroller with 4/8/16/32kbytes in-system programmable flash. http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf (18/03/2016),
38. Naito, K.; Nakanishi, K.; Mori, K.; Kobayashi, H. Implementation of tree-based data collection scheme for arduino-compatible board. In *8th KES International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services, IIMSS-2015*, Damiani, E.; Howlett, R.J.; Jain, L.C.; Gallo, L.; de Pietro, G., Eds. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH: 2015; Vol. 40, pp 335-345.
39. Panda, R.; Ranasinghe, D.C.; Parlikad, A.; McFarlane, D. In *A condition monitoring platform using cots wireless sensor networks - lessons and experience*, 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA2010, Perth, WA, 2010; Perth, WA, pp 473-480.
40. Electronics, A. Digital output relevant humidity and temperature sensor/module. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> (19-04-2015),

41. Inc., M.T. Continuous fluid level sensor, pn-6573-p-8.
https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/eTape%20Datasheet%206573P-8_030611.pdf (18-04-2016),

Κεφάλαιο



Βελτιστοποίηση Ασυρμάτων Κόμβων Αισθητήρων Υλικού Ανοικτής Πηγής

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. **(Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437)**. Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.
- [J-1]. **P.Papageorgas**, **D.Piromalis**, **K.Antonakoglou**, **G.Vokas**, **D.Tseles** and **K.G.Arvanitis**, «*Smart Solar Panels: In-Situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks*», **Energy Procedia (ISSN: 1876-6102)**, Vol. 36, pp. 535-345, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.062 **(Listed in Scopus)**.

4.1. Το Πολυ-επίπεδο Μοντέλο των Λειτουργιών του Ιδανικού Κόμβου: Η Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική SensoTube

Λαμβάνοντας υπ' όψη τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, γεννιέται εύλογα η προσδοκία για μία νέα, κλιμακούμενη, αρχιτεκτονική η οποία, από τη μία μεριά να μπορεί να διατηρεί τα προφανή πλεονεκτήματα του υλικού ανοικτής πηγής, ενώ από την άλλη μεριά, να μπορεί να υποστηρίξει την ιδέα του υλικού ανοικτής πηγής και να πραγματοποιήσει το επόμενο βήμα προς την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης και της ευρωστίας παρέχοντας τους αναγκαίους μηχανισμούς για την αποφυγή των υπαρχόντων περιορισμών. Μόνον έτσι η ιδέα του υλικού ανοικτής πηγής θα μπορέσει να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στις εφαρμογές των κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων ακόμη και στο απαιτητικό και δύσκολο περιβάλλον της γεωργίας. Προς αυτήν την κατεύθυνση προτείνεται η αρχιτεκτονική SensoTube.

Οι κύριοι στόχοι της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής υλικού ανοικτής πηγής είναι:

α) Αποδέσμευση από τους δομικούς περιορισμούς των υπαρχουσών αρχιτεκτονικών:

Η προσκόλληση στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική σχεδιασμού ασύρματων κόμβων σε συνδυασμό με την εμμονή στο δόγμα της σμίκρυνσης (miniaturization) φαίνεται πως δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις ιδιαιτερότητες των εφαρμογών στο πεδίο της γεωργίας. Στην πράξη, το μέγεθος του ηλεκτρονικού μέρους του ασύρματου κόμβου δεν παίζει σημαντικό ρόλο [1]. Αυτό επιβεβαιώνεται ιδιαίτερος για τις εφαρμογές στην γεωργία, πρώτον από την τρέχουσα τάση να χρησιμοποιούνται εκπαιδευτικές πλακέτες υλικού ανοικτής πηγής (π.χ. Arduino), και δεύτερον από το γεγονός πως τελικά όλα τα ηλεκτρονικά μέρη του κόμβου θα τοποθετηθούν εντός μεγάλων περιβλημάτων στέγασης.

β) Διατήρηση της ιδέας του επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής:

Η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να διατηρεί τα προφανή πλεονεκτήματα για τα οποία άλλωστε αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής όπως π.χ. το Arduino, έγιναν τόσο πολύ δημοφιλείς. Ενδεικτικώς, μερικά από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η απλότητα, η επεκτασιμότητα, η αναδιάρθρωση, και η επαναχρησιμοποίηση του υλικού.

γ) Αποφυγή των υπαρχουσών δυσκολιών και περιορισμών στην ανάπτυξη και σύνθεση:

Η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να παρέχει τους απαραίτητους μηχανισμούς ώστε να αποφεύγονται οι δυσκολίες στην ανάπτυξη συστημάτων που στηρίζονται στη χρήση επεκτάσιμων πλατφορμών υλικού ανοικτής πηγής. Με άλλα λόγια, το υλικό το οποίο θα βασίζεται στη νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να είναι ευέλικτο και προσαρμόσιμο, στο μέγιστο βαθμό.

δ) Ικανοποίηση των ενδιαφερόμενων μερών (stakeholders):

Η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να επιτρέπει σε σχεδιαστές διαφορετικών αντικειμένων και ενδιαφερόντων, π.χ. σχεδιαστές ηλεκτρονικών ισχύος, σχεδιαστές συστημάτων επικοινωνιών δεδομένων, σχεδιαστές συστημάτων συλλογής δεδομένων κλπ, να προσαρμόζουν εύκολα τη συνεισφορά τους στο συνολικό σύστημα, διασφαλίζοντας το μέγιστο δυνατό βαθμό ανεξαρτησίας τους από τα γνωστικά αντικείμενα και τις απαιτήσεις των άλλων περιοχών σχεδίασης. Επίσης, η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να οδηγεί στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση υλικού το οποίο να είναι απολύτως ξεκάθαρο στον τελικό χρήστη και εάν είναι δυνατόν να υπάρχουν ξεκάθαρα ανεξάρτητα λειτουργικά δομικά στοιχεία με τα οποία ο τελικός χρήστης θα μπορεί να ικανοποιήσει πολλές και διαφορετικές εφαρμογές. Επί πλέον, το νέο υλικό θα πρέπει να είναι επαναχρησιμοποιήσιμο και χαμηλού κόστους έτσι ώστε να επιτρέπεται η αρχική επένδυση από τους τελικούς αγοραστές των εφαρμογών.

ε) Αποσύνδεση της ανάπτυξης από την μέριμνα για την ασύρματη δικτύωση:

Πολύ συχνά υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον για τη μελέτη νέων τεχνολογιών και μεθόδων που ενδεχομένως να μπορούσαν να βοηθήσουν στην πρόοδο των εφαρμογών ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων. Στις περιπτώσεις αυτές, υπάρχει η τάση της αποσύζευξης της λειτουργίας της ασύρματης δικτύωσης του κόμβου από τις υπόλοιπες λειτουργίες του [2].

Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, π.χ. για τη δυνατότητα αναδιάρθρωσης σεναρίων λειτουργίας ασύρματων κόμβων [3,4], για τις στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας στους ασύρματους κόμβους αισθητήρων [5], για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, για την υλοποίηση τεχνικών όπως η μετάβαση από κατάσταση αδράνειας σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας βασισμένης στην ασύρματη λήψη σημάτων (Wakeup Radio technique) [6], κλπ, είναι μερικές μόνο ενδεικτικές περιπτώσεις όπου η αποσύζευξη της μελέτης από τη μέριμνα για την ασύρματη επικοινωνία είναι απαραίτητη.

Από πλευράς σχεδίασης συστημάτων, η προαναφερόμενη αποσύζευξη μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω της προσθήκης περισσότερων μικροελεγκτών (MCUs) στην πλακέτα του ασύρματου κόμβου, είτε με τη χρήση προγραμματιζόμενων λογικών κυκλωμάτων τύπου FPGA (Field Programmable Gate Array), είτε με την προσθήκη επί πλέον κυκλωμάτων ή έτοιμων λειτουργικών μονάδων (modules) ασύρματης επικοινωνίας. Τέτοιες τροποποιήσεις ασφαλώς υπερβαίνουν τα όρια των υπάρχοντων ασύρματων κόμβων των οποίων το υλικό έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί βάσει των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών. Από την άλλη μεριά, ακόμα και να μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με σχετική ευκολία τέτοιου είδους τροποποιήσεις, στο τέλος των υλοποιήσεων τα συστήματα που θα προέκυπταν θα χαρακτηρίζονταν ως συστήματα κλειστής αρχιτεκτονικής λόγω των πολλών ιδιομορφιών τους. Ως εκ τούτου, η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων λειτουργιών απρόσκοπτα και εύκολα.

στ) Υποστήριξη της μοντελοποίησης των λειτουργιών του ασύρματου κόμβου:

Η νέα αρχιτεκτονική θα πρέπει να διευκολύνει τη μοντελοποίηση όλων των λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα σε έναν ασύρματο κόμβου, δηλαδή από τις λειτουργίες της ασύρματης δικτύωσης, μέχρι τη λειτουργία των μονάδων ενέργειας και τις λειτουργίες των διαφόρων αισθητήρων μέτρησης. Αυτό προϋποθέτει από πλευράς της νέας αρχιτεκτονικής, πως θα εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) και τυποποίησης του παραγόμενου υλικού. Ιδανικά θα πρέπει κάθε λειτουργία του ασύρματου κόμβου να μπορεί να αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο δομικό στοιχείο το οποίο να μπορεί περιστασιακά να προστίθεται ή να αφαιρείται δίχως να επηρεάζεται η συνολική λειτουργία του κόμβου, εξασφαλίζοντας πάντα την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία.

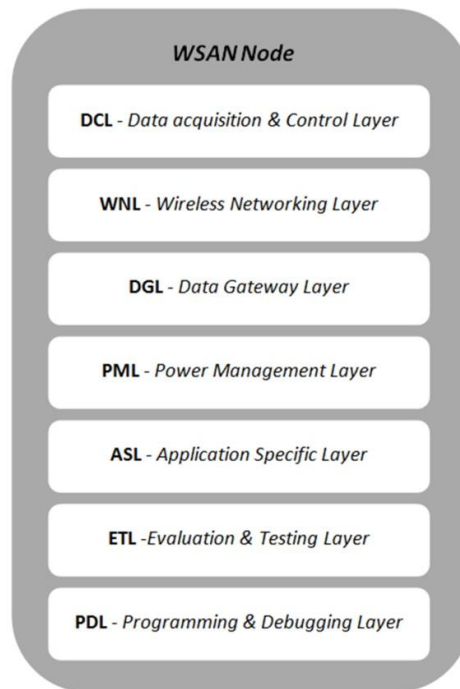
ζ) Βελτιστοποίηση και ευρωστία του ασύρματου κόμβου:

Οι ασύρματοι κόμβοι με υλικό ανοικτής πηγής βάσει της νέας αρχιτεκτονικής θα πρέπει να συνδυάζουν τις καλές επιδόσεις, οι οποίες συναντώνται σε διάφορες εξειδικευμένες εμπορικές ή ερευνητικές υλοποιήσεις πραγματικών εφαρμογών [7], με τις ευκολίες και τις δυνατότητες για τροποποιήσεις και δοκιμές των εργαλείων αναπτυξιακών εργαλείων ελέγχου (testbeds). Επί πλέον, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για τη φυσική μορφή του υλικού των ασύρματων κόμβων δεδομένου του δύσκολου και εχθρικού περιβάλλοντος λειτουργίας στο πεδίο της γεωργίας.

Το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση της θεμελίωσης της νέας αρχιτεκτονικής SensoTube ήταν ο εντοπισμός κάθε διακριτής λειτουργίας η οποία ενδέχεται να υπάρχει σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων για την γεωργία. Οι λειτουργίες αυτές, λαμβάνοντας υπ' όψη και τις επιθυμητές λειτουργίες ενός ιδανικού κόμβου, κατατάχθηκαν σε συγκεκριμένες ομάδες αναλόγως των ομοιοτήτων τους και των σκοπών τους. Στη συνέχεια, οι ομάδες αυτές αντιμετωπίστηκαν ως διακριτά επίπεδα λειτουργίας:

- 1) *Επίπεδο λειτουργίας Απόκτησης και Ελέγχου Δεδομένων (DCL - Data Acquisition and Control Layer)*
- 2) *Επίπεδο λειτουργίας Ασύρματης Δικτύωσης (WNL - Wireless Networking Layer)*
- 3) *Επίπεδο λειτουργίας Πύλης Δεδομένων (DGL - Data Gateway Layer)*
- 4) *Επίπεδο λειτουργίας Ιδιαιτέρων Εφαρμογών (ASL - Application-Specific Layer)*
- 5) *Επίπεδο λειτουργίας Διαχείρισης Ενέργειας (PML - Power Management Layer)*
- 6) *Επίπεδο λειτουργίας Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης (PDL - Programming and Debugging Layer)*
- 7) *Επίπεδο λειτουργίας Αποτίμησης και Δοκιμών (ETL - Evaluation and Testing Layer)*

Μέσω των επτά αυτών επιπέδων λειτουργιών οποιοσδήποτε ασύρματος κόμβος αισθητήρων μπορεί να αναλυθεί, να μελετηθεί, να σχεδιαστεί, και να δομηθεί ((βλ. Εικόνα 4.1)). Κάθε προσπάθεια προς την αφαιρετική εννοιολογικά προσέγγιση (abstraction) του υλικού ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων, αυξάνει την πιστότητα στον χαρακτηρισμό (characterization) και στην κατάταξη (classification) του υλικού ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων [8].



Εικόνα 4.1. Ασύρματος κόμβος δικτύου αισθητήρων αναλυμένος βάσει των επτά διακριτών επιπέδων λειτουργιών της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική SensoTube, κάθε ένα από τα επτά παραπάνω επίπεδα λειτουργιών θα πρέπει να μπορεί να υλοποιηθεί ως μια πλήρως ανεξάρτητη πλακέτα επέκτασης υλικού (hardware shield). Συγκεκριμένα, αυτές οι πλακέτες επέκτασης υλικού θα πρέπει να είναι:

- *Αυτόνομες* (Autonomous): Κάθε πλακέτα επέκτασης υλικού θα πρέπει να είναι υλοποιημένη στο δικό της ανεξάρτητο τυπωμένο κύκλωμα (PCB - Printed Circuit Board)
- *Επικεντρωμένες* (Dedicated): Κάθε πλακέτα επέκτασης υλικού θα πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να κυκλώματά της να είναι επικεντρωμένα μόνο στην εξυπηρέτηση των αναγκών του επιπέδου λειτουργιών στο οποίο ανήκει η συγκεκριμένη πλακέτα.
- *Ευφρείς* (Intelligent): Θα πρέπει κάθε πλακέτα επέκτασης να διαθέτει τοπικά κάποιου είδους νοημοσύνη έτσι ώστε να μπορεί να εκτελέσει σε τοπικό επίπεδο σενάρια που αφορούν στις λειτουργίες του επιπέδου που ανήκει. Επί πλέον, η υπολογιστή τοπική νοημοσύνη της πλακέτας

επέκτασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση μέρους του συνολικού σεναρίου της εφαρμογής του κόμβου.

- *Μοναδικά Αναγνωρίσιμες (Uniquely Identified)*: Όταν ένας ασύρματος κόμβος περιλαμβάνει πλακέτες επέκτασης οι οποίες ανήκουν στο ίδιο ή/και σε διαφορετικό επίπεδο λειτουργιών, τότε η κάθε πλακέτα επέκτασης θα πρέπει να είναι αναγνωρίσιμη από το συνολικό σύστημα του κόμβου. Επί πλέον θα πρέπει η κάθε πλακέτα επέκτασης να μπορεί να πάρει μια προσωρινή ή μόνιμη μοναδική διεύθυνση μέσω της οποίας θα αναφέρεται ως προς τις υπόλοιπες πλακέτες επέκτασης του ίδιου κόμβου.
- *Αυτο-επεκτάσιμες (Self-Expandable)*: Οι πλακέτες επέκτασης θα πρέπει να μπορούν να επεκταθούν και οι ίδιες δίχως αλλαγές και επεμβάσεις στο υλικό τους.
- *Ενήμερες για τον Περιβάλλον τους (Context Aware)*: Κάθε πλακέτα επέκτασης υλικού θα πρέπει να μπορεί να ενημερωθεί για το περιβάλλον της, δηλαδή, να γνωρίζει ποιές άλλες πλακέτες επέκτασης είναι συνδεδεμένες μαζί της.
- *Ελέγξιμες (Testable)*: Κάθε πλακέτα επέκτασης πρέπει να επιτρέπει τον έλεγχο στις βασικές τις λειτουργίες. Π.χ. να είναι προσβάσιμα τα βασικά της ηλεκτρικά σήματα.
- *Συμβατές (Compatible)*: Όλες οι πλακέτες ελέγχου, ανεξαρτήτως σε ποιο επίπεδο λειτουργιών ανήκουν, θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους με τυποποιημένο και ομοιόμορφο τρόπο.

Από τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά των πλακετών επέκτασης, είναι προφανές πως ο ασύρματος κόμβος θα πρέπει να είναι ένα σύστημα με περισσότερους από ένα μικροελεγκτές (multi-MCU system). Αυτό δεν αποτελεί απαίτηση μόνο της αρχιτεκτονικής SensoTube, αλλά συναντιέται και σε ασύρματος κόμβους βασισμένους στην αρχιτεκτονική COTS στους οποίους χρησιμοποιούνται εκτός από το βασικό μικροελεγκτή του συστήματος και άλλοι μικροελεγκτές οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό των ολοκληρωμένων μονάδων ασύρματης δικτύωσης (wireless networking modules) [9]. Από την άλλη μεριά, η πρόβλεψη για την υποστήριξη της δυνατότητας Multi-MCU συστημάτων κόμβων μπορεί να

βοηθήσει τους σχεδιαστές συστημάτων να απαλλαγούν από τον εγωκεντρικό χαρακτήρα των αρχιτεκτονικών πολλαπλών επεκτάσιμων πλακετών (multi-board expandable architectures) (π.χ. Arduino και άλλων παρόμοιων), οι οποίες ενώ φαινομενικά υποστηρίζουν τη συνύπαρξη πολλών μικροελεγκτών, στην πράξη μόνο ο μικροελεγκτής της κεντρικής πλακέτας (*main-board) έχει τον έλεγχο των συνδετήρων επέκτασης (BECs).

Οι εξαιρετικές επιδόσεις των εμπορικά διαθέσιμων μικροελεγκτών [10], σε συνδυασμό με τη διαρκή έρευνα για το σχεδιασμό και την παραγωγή μικροελεγκτών εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (Ultra-low power MCUs) εγγυώνται την υιοθέτηση της προσέγγισης για multi-MCU κόμβους έως και στις εφαρμογές κόμβων που λειτουργούν με συσσωρευτές ενέργειας (battery-operated WSN nodes) [11,12]. Ενδεικτικά, μεταξύ των πιο σημαντικών επιτευγμάτων συναντώνται: οι νέοι χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής επίδοσης μικροελεγκτές 32-bit τεχνολογίας ARM, οι οποίοι ήδη έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων στη γεωργία [13,14], και οι εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης μικροελεγκτές MSP430FRAM των 16-bit οι οποίοι χρησιμοποιούν τεχνολογία φερο-ηλεκτρικής μη-πτητικής μνήμης RAM (Ferroelectric RAM) ως μνήμη προγράμματος (program memory) [15].

Αναφορικά με τις σχετικές ερευνητικές προσπάθειες, αυτές εστιάζονται προς την εξάλειψη των ηλεκτρικών διαρροών (current leakages) στο εσωτερικό των μικροελεγκτών [16], τη μείωση του επιπέδου της απαιτούμενης τάσης τροφοδοσίας των μικροελεγκτών [17,18] και τη βελτίωση των εσωτερικών κυκλωμάτων διαχείρισης ενέργειας [19,20]. Επί πλέον, έχουν προκύψει αξιόλογα θετικά αποτελέσματα από αρκετές ερευνητικές εργασίες σχετικά με τη χρήση τεχνικών για την εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματους κόμβους με συσσωρευτές ενέργειας (battery-operated WSN nodes) όπως π.χ. για τη διαχείριση του κύκλου καταστάσεων πλήρους και αδρανούς λειτουργίας (active and sleep mode)[12,21,22], ή για την αντιμετώπιση των μικροελεγκτών ως κανονικά απενεργοποιημένων μονάδων (normally-off devices) [23,24].

Η υλοποίηση των προτεινόμενων επιπέδων λειτουργίας με τη μορφή διακριτών πλακετών επέκτασης (expansion shields) μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές να αποφασίζουν ποιά και πόσα από τα επίπεδα λειτουργίας απαιτούνται από την εφαρμογή που μελετούν και να συνθέτουν με ευκολία το τελικό σύστημα του ασύρματου κόμβου που χρειάζονται. Με άλλα λόγια, η υλοποίηση των επιπέδων

λειτουργίας ως ανεξάρτητα δομικά στοιχεία επιτρέπουν τη σύνθεση ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων ο οποίος ικανοποιεί τις οποιεσδήποτε ιδιαίτερες ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

4.1.1. Επίπεδο Λειτουργίας Απόκτησης και Ελέγχου Δεδομένων

Σε πραγματικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας είναι πολύ σύνηθες να προκύπτουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων για την απόκτηση και τον έλεγχο δεδομένων (data acquisition and control) [25]. Για παράδειγμα, η χρήση ενός τύπου αισθητήρα μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας ή διαφορετική ακρίβεια μέτρησης. Επίσης, στις περιπτώσεις προσθήκης νέων αισθητήρων μέτρησης μπορεί να απαιτείται η αύξηση του πλήθους των αναλογικών καναλιών που πρέπει να διαθέτει ο μικροελεγκτής του συστήματος. Σε άλλες περιπτώσεις, η προσθήκη ενός νέου τύπου αισθητήρα μπορεί να επιβάλλει την ύπαρξη ειδικών κυκλωμάτων για την υποδοχή του σήματος (signal conditioning), π.χ. ενίσχυση, φιλτράρισμα από θόρυβο, κλπ. Ειδικά στον χώρο των εφαρμογών για τη γεωργία, όπου οι ασύρματοι κόμβοι καλούνται να μετρήσουν και να επιτηρούν πλήθος διαφορετικών φυσικών παραμέτρων, η εναλλαγή στη χρήση πολύπλοκων αισθητήρων είναι κοινός τόπος [26]. Για τους λόγους αυτούς, αναφορικά με τους ασύρματους κόμβους στη γεωργία, συνιστάται η λειτουργία της απόκτησης δεδομένων να έχει τη μορφή ανεξάρτητης αποσπώμενης πλακέτας η οποία να μπορεί περιστασιακά να συνδέεται και να αποσυνδέεται από το σύστημα του ασύρματου κόμβου [27].

Μέχρι στιγμής, η λειτουργία της απόκτησης δεδομένων σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων εμφανίζεται να είναι κάπως υποτιμημένη από τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού υλικού κόμβων. Για παράδειγμα, στους κόμβους που στηρίζονται στην προσέγγιση των COTS, π.χ. motes, η έμφαση δίνεται αποκλειστικά στη λειτουργία της ασύρματης δικτύωσης. Συγκεκριμένα, πολλοί από αυτούς τους κόμβους (motes) περιλαμβάνουν δυο-τρεις αισθητήρες κολλημένους στην πλακέτα τους με αποκλειστικό σκοπό να προβάλλουν τη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων αισθητήρων [28,29]. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι αισθητήρες αυτοί δεν ανταποκρίνονται από πλευράς τύπου και χαρακτηριστικών για την κάλυψη των αναγκών των πραγματικών εφαρμογών των κόμβων στο πεδίο της γεωργίας.

Επί πλέον, όπως αναφέρεται στη μελέτη [30] σχετικά με τους κόμβους τύπου motes, προκύπτουν σημαντικές δυσκολίες από πλευράς ικανοποίησης της συλλογής και της επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων από τους μικροελεγκτές των κόμβων λόγω του ότι στους ίδιους κόμβους εκτελούνται επίσης και τα πρωτόκολλα της ασύρματης δικτύωσης. Στις περιπτώσεις αυτές ένας άλλος παράγοντας δυσκολίας είναι η χρήση λειτουργικού συστήματος στο εσωτερικό του μικροελεγκτή το οποίο επιβάλλει αρκετούς περιορισμούς από πλευράς εξυπηρέτησης των λειτουργιών της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Από πλευράς υλικού, οι κόμβοι που στηρίζονται στην προσέγγιση COTS αφήνουν εξ' ολοκλήρου στο χρήστη την ευθύνη για την ανάπτυξη του υλικού της συλλογής δεδομένων. Συγκεκριμένα, ένας κόμβος, π.χ. τύπου mote, απλώς παρέχει σε κάποιον συνδετήρα (connector) τις αναλογικές εισόδους που διαθέτει ο μικροελεγκτής της πλακέτας του κόμβου. Στη συνέχεια ο χρήστης θα πρέπει να συνδέσει μόνος του τα κυκλώματα για την υποδοχή και λειτουργία των αισθητήρων που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει στην εφαρμογή του.

Από την άλλη μεριά, οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής (OSH) παρέχουν περιορισμένες δυνατότητες για την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων εξ' αιτίας των περιορισμών που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2.

Επί πλέον, αυτές οι λύσεις δεν είναι οι βέλτιστες από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας ώστε να υποστηρίζουν τις περιπτώσεις ασύρματων κόμβων που λειτουργούν εξ' ολοκλήρου από ενέργεια συσσωρευτών. Ενδεικτικά, οι αισθητήρες που συνδέονται σε έναν OSH κόμβο, ανεξαρτήτως του χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας, π.χ. αισθητήρες μέτρησης εδαφικών παραμέτρων (soil sensors) που στηρίζονται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας SDI-12 [31], είναι διαρκώς σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας (active mode). Επίσης, στους κόμβους που στηρίζονται στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής (OSH) δεν υπάρχει η δυνατότητα κλιμάκωσης της επεξεργαστικής ισχύος (scalable processing power), καθώς και των διαθέσιμων περιφερειακών πόρων επικοινωνίας (communication peripherals). Ως εκ τούτου, οι αρχιτεκτονικές αυτές είναι βολικές μόνο για τους σκοπούς σύντομων και πλήρως ελεγχόμενων πιλοτικών υλοποιήσεων.

Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής, η αρχιτεκτονική SensoTube δίνει τη δυνατότητα για το σχεδιασμό εξειδικευμένων και αποτελεσματικών πλακετών επέκτασης (shields) για την ικανοποίηση των αναγκών

συλλογής και ελέγχου δεδομένων μετρήσεων σε έναν ασύρματο κόμβο για τη γεωργία.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική SensoTube, ένας ασύρματος κόμβος αισθητήρων δύναται να φέρει μία ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης του επιπέδου λειτουργίας απόκτησης και ελέγχου (DCL). Κάθε μια από τις πλακέτες επέκτασης επιπέδου DCL μπορεί να διαθέτει το δικό της τοπικό μικροελεγκτή (MCU). Αυτό επιτρέπει την αναδιάρθρωση του σεναρίου λήψης και επεξεργασίας δεδομένων (DAQ scenario) σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή επί της συγκεκριμένης πλακέτας επέκτασης δίχως την επιβάρυνση του μικροελεγκτή στον οποίον εκτελείται το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας του συστήματος του κόμβου. Σχετικά με την επιλογή του μικροελεγκτή μιας πλακέτας επέκτασης επιπέδου DCL, οι σχεδιαστές μπορούν να επιλέξουν: οποιαδήποτε από τις εμπορικά διαθέσιμες λύσεις μικροελεγκτών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, να χρησιμοποιήσουν FPGA [32], ή να χρησιμοποιήσουν έναν επεξεργαστή τύπου mixed-signal [33].

Η υλοποίηση των λειτουργιών της απόκτησης και ελέγχου δεδομένων από μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης (DCL shields) προσφέρει σημαντικά οφέλη για τον σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού και εύρωστου ασύρματου κόμβου αισθητήρων, όπως:

- *Ακεραιότητα σημάτων (signals integrity).* Τα κυκλώματα συλλογής δεδομένων περιλαμβάνουν τόσο ψηφιακά όσο και αναλογικά μέρη. Τα κυκλώματα αυτά είναι ως επί τω πλείστον ευπαθή στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Για το λόγο αυτό πρέπει οι σχεδιαστές να λαμβάνουν ειδική μέριμνα στο σχεδιασμό του τυπωμένου κυκλώματος ώστε να διασφαλίζουν την ακεραιότητα των σημάτων αλλά και την απουσία πρόσληψης ή παραγωγής ηλεκτρομαγνητικού θορύβου. Η προσέγγιση της αρχιτεκτονικής SensoTube για την ανεξαρτησία της λειτουργίας απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων με τη μορφή διακριτής ανεξάρτητης πλακέτας επέκτασης βοηθάει τους σχεδιαστές δίνοντάς τους την δυνατότητα σχεδιασμού ανεξάρτητου τυπωμένου κυκλώματος.
- *Ευκολία στις φυσικές συνδέσεις (signals connections).* Η πλακέτα επέκτασης επιπέδου DCL μπορεί να παρέχει τη φυσική πρόσβαση και σύνδεση των αισθητήρων επί του τυπωμένου κυκλώματος.

- *Βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση* (optimum energy management). Λόγω του γεγονότος πως όλα τα κυκλώματα για τη συλλογή δεδομένων βρίσκονται τοποθετημένα στην ίδια πλακέτα επέκτασης, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με πιο σωστό τρόπο η διαχείριση ενέργειας τους. Επί πλέον είναι εφικτή η αντιμετώπιση της πλακέτας επέκτασης ως ανεξάρτητο δομικό στοιχείο το οποίο μπορεί να ενεργοποιείται/απενεργοποιείται (ON/OFF) βάσει του σεναρίου της εφαρμογής από μια άλλη, ή από άλλες, πλακέτες επέκτασης άλλων επιπέδων λειτουργιών.
- *Απεριόριστοι πόροι σχεδίασης* (unlimited design resources). Λόγω του ότι οι απαιτούμενοι πόροι, π.χ. περιφερειακά επικοινωνίας, αναλογικά κανάλια, ταχύτητα λειτουργίας μικροελεγκτή, κλπ, δεν εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά ενός κεντρικού μικροελεγκτή, όπως συμβαίνει σε άλλες αρχιτεκτονικές, δεν υπάρχει περιορισμός στο είδος και στο πλήθος των πόρων.
- *Επαναχρησιμοποιήσιμο υλικό* (reusability). Οι οποιοσδήποτε αλλαγές απαιτούνται στα κυκλώματα της συλλογής δεδομένων υλοποιούνται αποκλειστικά στην πλακέτα επέκτασής τους και δεν επηρεάζουν το υπόλοιπο υλικό των υπόλοιπων επιπέδων λειτουργίας του ασύρματου κόμβου.

Επομένως, με την προσέγγιση της αρχιτεκτονική SensoTube μπορούν να καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις ενός κόμβου για τις λειτουργίες της απόκτησης, της επεξεργασίας και του ελέγχου δεδομένων μετρήσεων.

4.1.2 Επίπεδο Λειτουργίας Ασύρματης Δικτύωσης

Η καθιέρωση της λειτουργίας της ασύρματης δικτύωσης του ασύρματου κόμβου ως ανεξάρτητη πλακέτα επέκτασης, πρώτον επιτρέπει στους σχεδιαστές των κόμβων να εστιάσουν στις λεπτομέρειες και στις ιδιαιτερότητες της ασύρματης δικτύωσης π.χ. της ενσωμάτωσης και λειτουργίας του πρωτοκόλλου δικτύωσης σε λειτουργικό σύστημα (operating systems) [34,35], τις λειτουργίες δρομολόγησης δεδομένων (data routing [36], την ενσωμάτωση νέων τάσεων [37] και τεχνολογιών [38-40], κλπ, και

δεύτερον, υποστηρίζει την προσέγγιση της αποσύζευξης του σχεδιασμού της εφαρμογής του κόμβου από τη λειτουργία της ασύρματης δικτύωσης [2].

Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, μια πλακέτα επέκτασης επιπέδου λειτουργίας WNL (Wireless Networking Layer) μπορεί να υλοποιηθεί στο δικό της τυπωμένο κύκλωμα (PCB) έχοντας το δικό της μικροελεγκτή (MCU). Ως εκ τούτου, μια πλακέτα επιπέδου WNL δύναται να συνεργαστεί με κάθε άλλη πλακέτα επέκτασης από άλλα επίπεδα λειτουργίας και να αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητο δομικό στοιχείο κατά το "χτίσιμο" ενός ασύρματου κόμβου. Σε μια πλακέτα επέκτασης επιπέδου WNL οποιαδήποτε από τις υπάρχουσες τεχνικές ή/και μεθόδους σχεδιασμού υλικού ασύρματης δικτύωσης μπορεί να υλοποιηθεί, π.χ. χρήση ζεύγους ολοκληρωμένων (chip-sets), συστήματα εντός ολοκληρωμένων (SoCs - Systems-on-Chips), ή αυτόνομα λειτουργικά υποσυστήματα (modules).

Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές ανοικτής πηγής, η αρχιτεκτονική SensoTube διασφαλίζει τη δυνατότητα στον κόμβο να διαθέτει περισσότερες από μια μεθόδους ασύρματης δικτύωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο ασύρματος κόμβος μπορεί να έχει συνδεδεμένες πάνω του περισσότερες από μια πλακέτες επέκτασης επιπέδου WNL σε κάθε μια από τις οποίες μπορεί να έχει υλοποιηθεί διαφορετική τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης. Μεταξύ άλλων, αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την ενσωμάτωση στον κόμβο τεχνολογιών όπως κόμβοι ετερογενών δικτύων (heterogeneous networks)[41].

Από πλευράς ενεργειακής απόδοσης και ευρωστίας, η συγκέντρωση όλων των λειτουργιών της ασύρματης δικτύωσης σε μια διακριτή πλακέτα επέκτασης φαίνεται να υπερέχει σε σχέση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές. Συγκεκριμένα, όλη η πλακέτα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως μια ενεργειακή οντότητα, επιτρέπεται η καθολική ενεργοποίηση/απενεργοποίησή της από άλλες πλακέτες επέκτασης άλλων επιπέδων λειτουργιών, επιτρέπει τη μέτρηση και την επιτήρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας καθολικά ή κατά την εκτέλεση επιλεγμένων διεργασιών της ασύρματης δικτύωσης, κλπ. Δεδομένης της κρισιμότητας της διαχείρισης ενέργειας στους ασύρματους κόμβους που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από συσσωρευτές ενέργειας και καλούνται να λειτουργήσουν ανεπιτήρητα σε απομακρυσμένα και εχθρικά περιβάλλοντα, όπως αυτά της γεωργίας, δυνατότητες όπως αυτές που προαναφέρθηκαν αποτελούν σημαντικό βήμα όχι μόνο προς την αξιοπιστία και την ευρωστία των κόμβων αλλά και ως προς

την περαιτέρω κατανόηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία της ασύρματης δικτύωσης σε πραγματικές συνθήκες.

Από την άλλη πλευρά, η προσέγγιση για την ύπαρξη ανεξάρτητων πλακετών επέκτασης επιπέδου WNL επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των ανεξάρτητων λειτουργικών υποσυστημάτων ασύρματης επικοινωνίας (wireless modules) τα οποία μέχρι στιγμής δεν αξιοποιούνται πλήρως από τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής σχετικά με τα διαθέσιμα περιφερειακά επικοινωνίας (π.χ. UART ports, SPI and I2C buses) αλλά και σημάτων εισόδου/εξόδου (I/O signals).

4.1.3. Επίπεδο Λειτουργίας Πύλης Δεδομένων

Ένα ασύρματος κόμβος με δυνατότητες πύλης δεδομένων (data gateway) θα πρέπει να μπορεί να γεφυρώσει τα δεδομένα που αφορούν στο τοπικό ασύρματο δίκτυο, π.χ. ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο ZigBee, με τα συστήματα άλλων δικτύων, π.χ. του διαδικτύου (internet), ή άλλων τοπικών δικτύων υπολογιστών (LANs - Local Area Networks), ή με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (π.χ. 3G/4G, GSM/GPRS).

Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής, η αρχιτεκτονική SensoTube επιτρέπει την ανάπτυξη ασύρματων κόμβων οι οποίοι μπορούν να διαθέτουν περισσότερα από ένα κανάλια πύλης δεδομένων. Αυτό στην πράξη μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της σύνδεσης στον κόμβο περισσότερων από μιας πλακετών επέκτασης επιπέδου λειτουργίας DGL (Data Gateway Layer). Ως εκ τούτου η αρχιτεκτονική SensoTube μπορεί στον μέγιστο βαθμό να υποστηρίξει τις εφαρμογές ή/και λειτουργίες που εντάσσονται στο γενικότερο πεδίο της διασύνδεσης με εξωτερικά δίκτυα [42]. Για παράδειγμα, μια πλακέτα επέκτασης επιπέδου λειτουργίας DGL μπορεί να εξασφαλίζει τη διασύνδεση με το διαδίκτυο, ενώ μια άλλη να πραγματοποιεί διασύνδεση μέσω πρωτοκόλλου Bluetooth για επικοινωνία του κόμβου με το χρήστη σε τοπικό επίπεδο (Human-Machine Interface). Επί πλέον μια πλακέτα επέκτασης επιπέδου λειτουργίας DGL μπορεί να παρέχει τη δυνατότητα για ενσύρματη διασύνδεση με τοπικά δίκτυα μετρήσεων και ελέγχου, π.χ. δίκτυα για την επικοινωνία συστημάτων μέσω πρωτοκόλλου RS-485, κλπ. Αυτή είναι μια επί πλέον σημαντική διαφορά σε σχέση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές.

Ο κύριος μικροελεγκτής του συστήματος του ασύρματος κόμβου, π.χ. ο μικροελεγκτής της πλακέτας επέκτασης επιπέδου DCL ή άλλης, μπορεί να διευθύνει την λειτουργία των πλακετών επέκτασης επιπέδων WNL και DGL έτσι ώστε οι

αντίστοιχες λειτουργίες να ακολουθούν το σενάριο εκτέλεσης της συνολικής εφαρμογής του κόμβου στο πεδίο. Αυτό, σημαίνει επίσης πως διασφαλίζεται η αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας στον κόμβο.

Επίσης, όπως και στην περίπτωση των πλακετών επέκτασης επιπέδου λειτουργίας WNL έτσι και στις πλακέτες επέκτασης επιπέδου λειτουργίας DGL, προτείνεται η ύπαρξη τοπικού μικροελεγκτή ενσωματωμένου στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας. Αυτό εξυπηρετεί στην απελευθέρωση από τους περιορισμούς των κόμβων υλικού ανοικτής πηγής που στηρίζονται στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές σχετικά με τους πόρους περιφερειακών σύνδεσης του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας (main-board) για τη διασύνδεσή του με τα λειτουργικά υποσυστήματα (modules) της ασύρματης δικτύωσης (βλ. Κεφάλαιο 3).

Επί πλέον, η ύπαρξη ανεξάρτητων δομικών στοιχείων για την επίτευξη των σκοπών των πολλών δεδομένων μπορεί να υποστηρίξει στον μέγιστο βαθμό τη μελέτη και την ανάπτυξη σχετικών κυκλωμάτων, τεχνολογιών και μεθόδων, και να βοηθήσουν προς την κατεύθυνση της έρευνας προς το "διαδίκτυο των αντικειμένων" (IoT - Internet-of-Things) [43], το οποίο πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί και ως "διαδίκτυο των πολλών δεδομένων" (IoG - Internet-of-Gateways), αλλά και προς την κατεύθυνση της ενοποίησης φυσικού και εικονικού περιβάλλοντος (CPS - Cyber-Physical Space) [44].

4.1.4. Επίπεδο Λειτουργίας Ιδιαίτερων Εφαρμογών

Στις λειτουργίες του επιπέδου ιδιαίτερων εφαρμογών ASL (Application-Specific Layer) περιλαμβάνονται όλες εκείνες που αφορούν στις ιδιαίτερες ανάγκες του συστήματος του ασύρματου κόμβου και που δεν εντάσσονται σε κανένα από τα υπόλοιπα προτεινόμενα επίπεδα λειτουργιών. Μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως ένα επίπεδο δεσμευμένο για κάθε μελλοντική χρήση. Αυτό καθιστά την προτεινόμενη αρχιτεκτονική *Sensotube* πραγματικά ανοικτή και ευέλικτη σε οποιεσδήποτε προκλήσεις, τάσεις και εξελίξεις στον τομέα των ασύρματων κόμβων αισθητήρων στη γεωργία.

Όπως και στις περιπτώσεις της υλοποίησης των υπολοίπων επιπέδων λειτουργιών, έτσι και στην περίπτωση του επιπέδου ASL, η προτεινόμενη σχεδίαση και υλοποίηση περιλαμβάνει ανεξάρτητο τυπωμένο κύκλωμα με δικό του ενσωματωμένο μικροελεγκτή σε μορφή διακριτής πλακέτας επέκτασης. Αυτό το δομικό στοιχείο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, π.χ. για την εκτέλεση του σεναρίου

της εφαρμογής του κόμβου, δηλαδή, ο μικροελεγκτής μιας ASL πλακέτας επέκτασης να διευθύνει όλες τις υπόλοιπες πλακέτες επέκτασης στα πλαίσια της συνολικής εφαρμογής.

4.1.5. Επίπεδο Λειτουργίας Διαχείρισης Ενέργειας

Όσο η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων εξελίσσεται, η απαίτηση για διαχείριση της ενέργειας των κόμβων αυξάνεται διαρκώς [45]. Ειδικά για τις υλοποιήσεις στο πεδίο εφαρμογών, η ενέργεια είναι ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας για την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των ασύρματων κόμβων αισθητήρων [18]. Δυστυχώς, υπάρχουν πολλοί συμβιβασμοί από πλευράς των εμπορικά διαθέσιμων ασύρματων κόμβων σχετικά με την ενέργειά τους [46].

Παραδοσιακά, το υλικό των ασύρματων κόμβων δικτύων αισθητήρων που στηρίζονται στις αρχιτεκτονικές COTS και OSH, σχεδιάζεται δίχως καμία ιδιαίτερη μέριμνα για τις επιπτώσεις της ενέργειας. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία των διαθέσιμων υλοποιήσεων ασύρματων κόμβων περιλαμβάνει έναν απλό γραμμικό ρυθμιστή/σταθεροποιητή τάσης (linear voltage regulator), και αφήνουν την ευθύνη για τη σύνδεση εξωτερικής τάσης αποκλειστικά στο χρήστη. Αυτή η τακτική όμως μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία του κόμβου και να πλήξει σοβαρά την αξιοπιστία όλης της εφαρμογής.

Εκτός από τους λόγους ασφάλειας και αξιοπιστίας, η αποτελεσματική κι αποδοτική διαχείριση της ενέργειας επιβάλλεται κι από την ανάγκη της ενσωμάτωσης πολλών νέων τεχνολογιών [47].

Στους ασύρματους κόμβους για τις εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας, εκτός από φωτοβολταϊκές κυψέλες (photovoltaic panels) [48], μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κι άλλες σύγχρονες τεχνολογίες όπως π.χ. αυτή της ανάκτησης ενέργειας από το περιβάλλον (energy harvesting) [49-51]. Επίσης, εκτός από τους παραδοσιακούς συσσωρευτές ενέργειας, όπως π.χ. μπαταρίες οξέων μολύβδου (Lead Acid), μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά νέες τεχνολογίες όπως οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-Ion) [52], οι υπερ-πυκνωτές (super capacitors) [5,53,54], οι υβριδικοί υπερπυκνωτές (hybrid ultra-capacitors) [55], ή συνδυασμοί μπαταριών λεπτού φιλμ (thin-film batteries) και υπερ-πυκνωτών [56].

Η διάδοση τέτοιων τεχνολογιών σε πραγματικές εφαρμογές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας συνεπάγεται στέρεες τεχνικές και

μηχανισμούς διαχείρισης ενέργειας που να επιτρέπουν τόσο την αξιολόγηση (evaluation) όσο και την μοντελοποίηση (modeling) τους.

Στην αντίθετη περίπτωση, αυτές οι τέτοιες τεχνολογίες θα περιοριστούν μόνο σε πειραματικές υλοποιήσεις επίδειξης (pilot and demonstrator projects). Ως εκ τούτου, η δυνατότητα της υλοποίησης των λειτουργιών της διαχείρισης ενέργειας στην μορφή μιας ανεξάρτητης, διακριτής πλακέτας επέκτασης, θα επιτρέψει σίγουρα τη δυνατότητα για έρευνα και μελέτη ακόμα και σε πραγματικό χρόνο σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, εξασφαλίζει έναν ανεξάρτητο χώρο στον οποίο οι σχεδιαστές συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος και διαχείρισης ενέργειας θα μπορούν να υλοποιούν τις ιδέες τους προς όφελος του ασύρματου κόμβου δίχως να επηρεάζουν τις υπόλοιπες ζωτικές λειτουργίες του κόμβου.

Σε επίπεδο συστήματος ασύρματου κόμβου, σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες από μια πλακέτες επέκτασης επιπέδου PM. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η ελάχιστη τροποποίηση στο σύστημα κατά τις περιπτώσεις όπου απαιτείται κάποια αλλαγή στα χαρακτηριστικά, π.χ. της τροφοδοσίας τάσης του κόμβου. Έτσι. Για παράδειγμα, όταν απαιτείται η ύπαρξη μιας δευτερεύουσας τάσης λειτουργίας σε κάποια από τις λειτουργίες του κόμβου, π.χ. για έναν νέο τύπο αισθητήρα, ή όταν απαιτείται περισσότερο ρεύμα, τότε απλώς τοποθετείται μια νέα πλακέτα επέκτασης PML δίχως να απαξιώνεται το υπόλοιπο υλικό του κόμβου. Διασφαλίζονται έτσι, εκτός των άλλων, και η μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του υλικού, με συνέπειες τόσο στη μείωση του κόστους όσο και στην ευελιξία και στη μείωση του χρόνου της ανάπτυξης του συστήματος του κόμβου. Επί πλέον, παρέχεται η δυνατότητα για ομοιομορφία στη διαχείριση της ενέργειας αλλά και στην καλή οργάνωση της καλωδίωσης των σημάτων τροφοδοσίας.

4.1.6. Επίπεδο Λειτουργίας Προγραμματισμού και Εκφαλμάτωσης

Οι λειτουργίες του προγραμματισμού (programming) και της εκφαλμάτωσης (debugging) είναι πολύ σημαντικές για οποιοδήποτε σύστημα το οποίο φέρει έναν μικροελεγκτή, και ιδιαιτέρως για έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων στον οποίο, παραδοσιακά, εκτελείται σε μορφή προγράμματος (firmware) το εκάστοτε πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης αλλά και το συνολικό σενάριο της εφαρμογής [2]. Για τον λόγο αυτό η αρχιτεκτονική SensoTube δίνει ιδιαίτερη σημασία στις

λειτουργίες προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης προτείνοντας ένα διακριτό επίπεδο για τις λειτουργίες αυτές.

Συγκεκριμένα, μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης επιπέδου PDL (Programming and Debugging Layer) μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα του ασύρματου κόμβου έτσι ώστε να ικανοποιηθούν όλες οι ανάγκες για προγραμματισμό και εκοφαλάτωση όλων των μικροελεγκτών όλων των πλακετών επέκτασης του κόμβου. Όπως είναι γνωστό, ο προγραμματισμός και η εκοφαλάτωση ενός μικροελεγκτή πρέπει να ολοκληρώνεται με επιτυχία εντός του εργαστηρίου ή του εργοστασίου πριν την πώληση και την εγκατάσταση του κόμβου στο πεδίο της τελικής εφαρμογής του. Η αρχιτεκτονική SensoTube, με τη δυνατότητα διακριτών πλακετών επέκτασης επιπέδου PDL παρέχει την ευελιξία της περιστασιακής προσθήκης και της αφαίρεσης των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης από τον ασύρματο κόμβο. Αυτό έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- *Εξοικονόμηση ενέργειας.* Όταν τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης απουσιάζουν από τον κόμβο στο πεδίο, τότε απαιτείται λιγότερη ενέργεια.
- *Προστασία του κώδικα της εφαρμογής.* Όταν τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης απουσιάζουν από τον ασύρματο κόμβο, ο οποίος είναι ανεπιτήρητος σε κάποιο απομακρυσμένο μέρος, τότε είναι εξαιρετικά δύσκολο σε κακοπροαίρετους ή περιέργους τρίτους να επέμβουν στη μνήμη προγράμματος των μικροελεγκτών και να αντιγράψουν ή να τροποποιήσουν τον κώδικά τους.
- *Μεγαλύτερη οικονομία.* Ιδιαίτερα σε υλοποιήσεις μεσαίας, μεγάλης, και πολύ μεγάλης κλίμακας, η αφαίρεση των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης επιφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη.
- *Μείωση της πολυπλοκότητας.* Αποφεύγεται η πολυπλοκότητα που προκαλείται από τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές, σύμφωνα με τις οποίες κάθε πλακέτα μικροελεγκτή θα πρέπει να έχει τα δικά της κυκλώματα προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης. Η μείωση της πολυπλοκότητας εκτός από τη μείωση χώρου και κόστους, συμβάλλει

επίσης και στην αύξηση της αξιοπιστίας και στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας.

- *Ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών.* Στο διακριτό επίπεδο PDL μπορούν να ενσωματωθούν νέες προκλητικές τεχνολογίες δίχως να επηρεάζουν το υλικό και τις λειτουργίες του ασύρματου κόμβου. Ενδεικτικά, τέτοιες τεχνολογίες είναι η απομακρυσμένη αναβάθμιση του κώδικα των μικροελεγκτών του συστήματος (upgrade over-the-air) [57], η εξ' αποστάσεως αναθεώρηση του πρωτοκόλλου ασύρματης δικτύωσης [58], η καταγραφή του χαρακτήρα της κατανάλωσης ενέργειας των μικροελεγκτών ταυτόχρονα με την εκσφαλμάτωσή τους από ειδικές συσκευές προγραμματισμού (energy profiling) [59,60].

4.1.7. Επίπεδο Λειτουργίας Αποτίμησης και Δοκιμών

Η συμπεριφορά των ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων συνήθως χειροτερεύει όταν αυτοί εγκαθίστανται προς λειτουργία στο πεδίο [61]. Δυστυχώς, τέτοιου είδους μεταβολές δεν μπορούν να προσομοιωθούν στο περιβάλλον του εργαστηρίου [62]. Σε κάθε περίπτωση, η δυνατότητα του εντοπισμού πιθανών πηγών σφαλμάτων στην λειτουργία ενός ασύρματου κόμβου, είτε αυτή προέρχεται από το υλικό είτε από το ενσωματωμένο λογισμικό (firmware), είναι πολύ σημαντική [63].

Παραδοσιακά, για την ανίχνευση και τον εντοπισμό πηγών προβλημάτων, οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί των ασύρματων κόμβων αισθητήρων χρησιμοποιούν ειδικές συσκευές τις επονομαζόμενες και ως "testbeds" [64-67]. Τα testbeds είναι ευμεγέθεις συσκευές οι οποίες είτε διασυνδέονται με τους ασύρματους κόμβους, είτε περιέχουν μια πιστή απόδοση του υπό μελέτη κόμβου στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας τους. Η ιδανική συσκευή testbed [62] θα πρέπει να είναι:

- *κλιμακούμενη (scalable),*
- *ευέλικτη (flexible),*
- *ακριβής (accurate),*
- *επαναλαμβανόμενη από πλευράς αποτελεσμάτων (repeatable),*
- *ευδιάκριτη και σαφής (visible),*
- *έγκυρη κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες (cross-environment valid), και*

- *επαναχρησιμοποιήσιμη* (and, reusable).

Δυστυχώς, υπάρχουν πολύ λίγα διαθέσιμα testbeds στην αγορά [68], και από την άλλη μεριά, κανένα από αυτά δεν είναι κατάλληλο για χρήση στο πεδίο υπό πραγματικές συνθήκες [37,62].

Μέσω της καθιέρωσης του επιπέδου λειτουργίας αποτίμησης και δοκιμής ETL (Evaluation and Testing Layer), και της υλοποίησής τους σε διακριτές πλακέτες επέκτασης, η αρχιτεκτονική SensoTube επιτρέπει τον έλεγχο και τη δοκιμή κάθε μεμονωμένης λειτουργίας του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού του συστήματος του κόμβου. Με άλλα λόγια δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα του κόμβου να φέρει το δικό του, εξειδικευμένο, testbed, ενσωματωμένο με ομοιομορφία στο τελικό σύστημα, και ικανό να συνοδεύει τον κόμβο καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργικής του ζωής στο πεδίο.

Στο σύστημα του κόμβου μπορούν να συνδέονται μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης επιπέδου ETL, οι οποίες μπορούν περιστασιακά να προστίθενται και να αφαιρούνται.

Μεταξύ των πιο ενδιαφερόντων λειτουργιών αποτίμησης και δοκιμών που μπορούν να υλοποιηθούν σε μια πλακέτα επέκτασης επιπέδου ETL συγκαταλέγονται οι εξής:

- *επιτήρηση ενέργειας του συστήματος* (in-system energy monitoring),
- *έλεγχος των διεργασιών της ασύρματης δικτύωσης* (control over the networking protocol execution),
- *διάγνωση δυσλειτουργιών* (e malfunctions diagnostics),
- *επιτήρηση συσσωρευτών ενέργειας* (energy storage monitoring),
- *ανίχνευση ανωμαλιών αξιοπιστίας και διάρκειας* (reliability and lifetime anomalies detection) [69,70].

Προφανώς, οι παραπάνω δυνατότητες αποτελούν μεγάλα πλεονεκτήματα για τη μελέτη, τη μοντελοποίηση και την αξιοπιστία των λειτουργιών που επιτελούνται σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων για εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας.

4.2. Δι-επίπεδες Υπηρεσίες Διαχείρισης και Ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, το προτεινόμενο μοντέλο των επιπέδων λειτουργιών και η αντιμετώπισή τους ως ανεξάρτητες πλακέτες επέκτασης, μπορούν να οδηγήσουν στο σχεδιασμό του υλικού των ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι πως πολλές και διαφορετικών λειτουργιών πλακέτες επέκτασης μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους με τυποποιημένο και ομοιόμορφο τρόπο, δίχως η μια πλακέτα να εμποδίζει την άλλη. Σίγουρα για να μπορέσει να συμβεί η ιδανική διασύνδεση συστημάτων/πλακετών απαιτείται ιδιαίτερη μέριμνα. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρθηκαν οι προσεγγίσεις στην διασύνδεση πλακετών επέκτασης των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής και εξηγήθηκαν οι περιορισμοί και οι αδυναμίες τους.

Εστιάζοντας στην πραγματοποίηση των προτεινόμενων επιπέδων λειτουργιών στην μορφή διακριτών πλακετών επέκτασης, προκύπτουν οι ακόλουθες ομοιότητες:

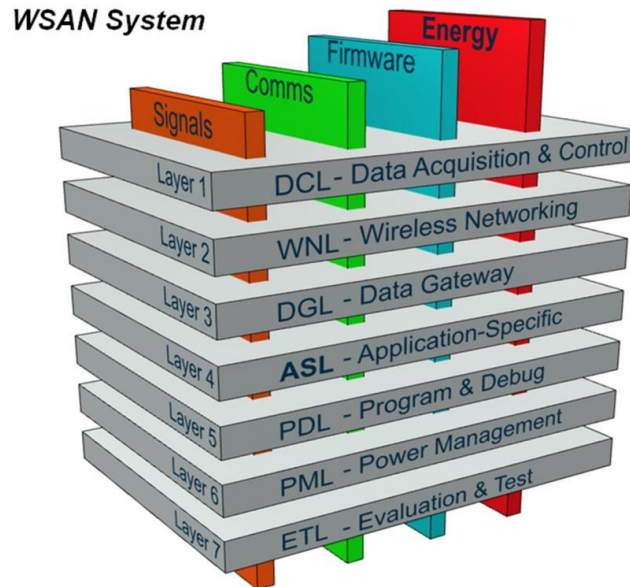
- πρέπει να μπορούν να μοιραστούν τα ηλεκτρικά τους σήματα με τις υπόλοιπες πλακέτες επέκτασης του κόμβου,
- χρειάζονται μία ή περισσότερες τάσεις λειτουργίας,
- πρέπει οι μικροελεγκτές τους να μπορούν να προγραμματιστούν και να εκοφλαματωθούν όντας κολλημένοι (soldered) πάνω στο τυπωμένου κύκλωμά τους (in-system programming), και
- οι μικροελεγκτές τους πρέπει να μπορούν να επικοινωνούν με τους μικροελεγκτές των υπολοίπων πλακετών επέκτασης του κόμβου.

Η αρχιτεκτονική *SensoTube* λαμβάνοντας υπ' όψη τις παραπάνω ανάγκες για την τυποποιημένη, ομοιόμορφη, ευέλικτη, αποτελεσματική, και ανοικτή διασύνδεση των πλακετών επέκτασης, προτείνει την καθιέρωση τεσσάρων δι-επίπεδων υπηρεσιών (inter-layer services). Οι δι-επίπεδες αυτές υπηρεσίες είναι οι:

- *Διαχείριση σημάτων* (Signals Management),
- *Δι-επίπεδη Επικοινωνία* (Inter-layer Communications),
- *Προγραμματισμός και Εκοφλαμάτωση* (Programming and Debugging), και
- *Διαχείριση Ενέργειας* (Energy Management).

Οι προτεινόμενες τέσσερις δι-επίπεδες υπηρεσίες, λόγω του ότι πρέπει να διατρέχουν ταυτόχρονα όλες τις πλακέτες επέκτασης των διαφόρων επιπέδων

λειτουργιών του ασύρματου κόμβου, είναι αδύνατον από πλευράς σχεδίασης και αρχιτεκτονικής να υλοποιηθούν στη μορφή πλακετών επέκτασης. Στην Εικόνα 4.2. παρουσιάζεται το πλήρες μπλοκ διάγραμμα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής SensoTube για τη σχεδίαση και υλοποίηση ασύρματων κόμβων αισθητήρων υποστηρίζοντας την προσέγγιση του υλικού ανοικτής πηγής.



Εικόνα 4.2. Η αρχιτεκτονική SensoTube με τα επτά οριζόντια επίπεδα λειτουργιών του ασύρματου κόμβου και με τις τέσσερις κάθετες δι-επίπεδες υπηρεσίες.

Η υιοθέτηση των τεσσάρων αυτών δι-επίπεδων υπηρεσιών και των μηχανισμών υλοποίησής τους αποτελεί καινοτομία της αρχιτεκτονικής SensoTube και είναι η εγγύηση για την αποφυγή των περιορισμών και των προβλημάτων των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής για την υλοποίηση ασύρματων κόμβων αισθητήρων.

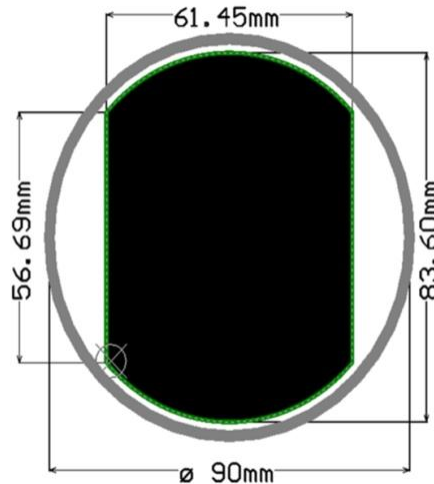
4.3. Το Μοντέλο Αναφοράς Σχεδιασμού και Ανάπτυξης

Ο ακριβής καθορισμός του τυπωμένου κυκλώματος των πλακετών επέκτασης αποτελεί προϋπόθεση για την εφαρμογή της αρχιτεκτονικής SensoTube. Πριν την

διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου αναφοράς του τυπωμένου κυκλώματος ελήφθησαν υπ' όψη τα ακόλουθα:

- το μέγεθος και το σχήμα του τυπωμένου κυκλώματος (form factor),
- η πλήρης ικανοποίηση των αναγκών όλων των πλακετών επέκτασης όλων των επιπέδων λειτουργιών,
- η διασφάλιση επαναχρησιμοποίησης των πλακετών επέκτασης,
- η απλότητα και η ευκολία στις τροποποιήσεις και στις καλωδιώσεις,
- η διασφάλιση της μέγιστης επεκτασιμότητας και ανοικτότητας (openness),
- η εύκολη και οικονομική κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος, και
- η εξασφάλιση ενός σαφούς και απλού προτύπου σχεδίασης.

Σχετικά με τις φυσικές διαστάσεις και το σχήμα (form factor) του τυπωμένου κυκλώματος αναφοράς (PCB Reference Model), η ιδέα ήταν το σύστημα του ασύρματου κόμβου, το οποίο θα συντίθεται από πλακέτες επέκτασης, να μπορεί να στεγαστεί πλήρως και απρόσκοπτα εντός πλαστικού σωλήνα. Άλλωστε, το όνομα της προτεινόμενης νέας αρχιτεκτονικής SensoTube, βασίζεται πάνω στην ιδέα της ενσωμάτωσης των ασύρματων κόμβων αισθητήρων σε χαμηλού κόστους πλαστικούς σωλήνες. Αυτή η προσέγγιση συνεπάγεται πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα για τις υλοποιήσεις εφαρμογών ασύρματων κόμβων στο πεδίο της γεωργίας, όπως αναλυτικά εξηγούνται παρακάτω στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η χρήση σωλήνα διαμέτρου 90 mm. Η διάσταση αυτή είναι ευρέως διαθέσιμη στην αγορά των σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης. Στην Εικόνα 4.3 αναπαρίσταται το προτεινόμενο μοντέλο του τυπωμένου κυκλώματος των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube, δείχνοντας τις ακριβείς φυσικές διαστάσεις και την μορφή του όντας περιβεβλημένος από πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 90 mm.



Εικόνα 4.3. Οι φυσικές διαστάσεις και η μορφή του μοντέλου αναφοράς του τυπωμένου κυκλώματος της αρχιτεκτονικής SensoTube. Ο κύκλος που περιστοιχίζει το τυπωμένο κύκλωμα αναπαριστά την τομή πλαστικού σωλήνα διαμέτρου 90 mm ο οποίος παίζει το ρόλο του περιβλήματος στέγασης (encapsulation).

Η διατομή του προτεινόμενου τυπωμένου κυκλώματος επιλέχθηκε να είναι 83.62 mm έτσι ώστε να χωράει σε σωλήνες των 90 mm με πάχος τοιχώματος από 1.8 mm έως και 3.2 mm. Τα ευθύγραμμα κοψίματα στις δύο πλευρές του τυπωμένου κυκλώματος έχουν σκοπίμως σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπεται η απρόσκοπτη όδευση των διαφόρων ενδεχομένων καλωδιώσεων είτε μεταξύ των διαφόρων πλακετών επέκτασης, είτε των καλωδιώσεων μεταξύ της φωτοβολταϊκής κυψέλης με τις πλακέτες επέκτασης διαχείρισης ενέργειας και τους συσσωρευτές ενέργειας.

Ομολογουμένως, η χρήση ευρύχωρων τυπωμένων κυκλωμάτων δεν συνάδει με την προσκόλληση στο δόγμα της σμίκρυνσης (miniaturization) [25] του υλικού των ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Όμως στην πράξη, δεν αναφέρεται στην βιβλιογραφία ούτε μια περίπτωση εφαρμογής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας στην οποία να απαιτείται η σμίκρυνση του υλικού του κόμβου. Μια πιθανή εξήγηση γι' αυτό, αποτελεί το γεγονός πως για λόγους προστασίας του υλικού του ασύρματου κόμβου από το εχθρικό περιβάλλον της γεωργίας, οι κόμβοι τοποθετούνται σε μεγάλα πλαστικά ηλεκτρολογικά κουτιά γενικής χρήσης (βλ. Κεφάλαιο 5).

Μετά από την υιοθέτηση και την παγίωση του μοντέλου αναφοράς του τυπωμένου κυκλώματος το οποίο θα πρέπει να ακολουθούν όλες οι πλακέτες

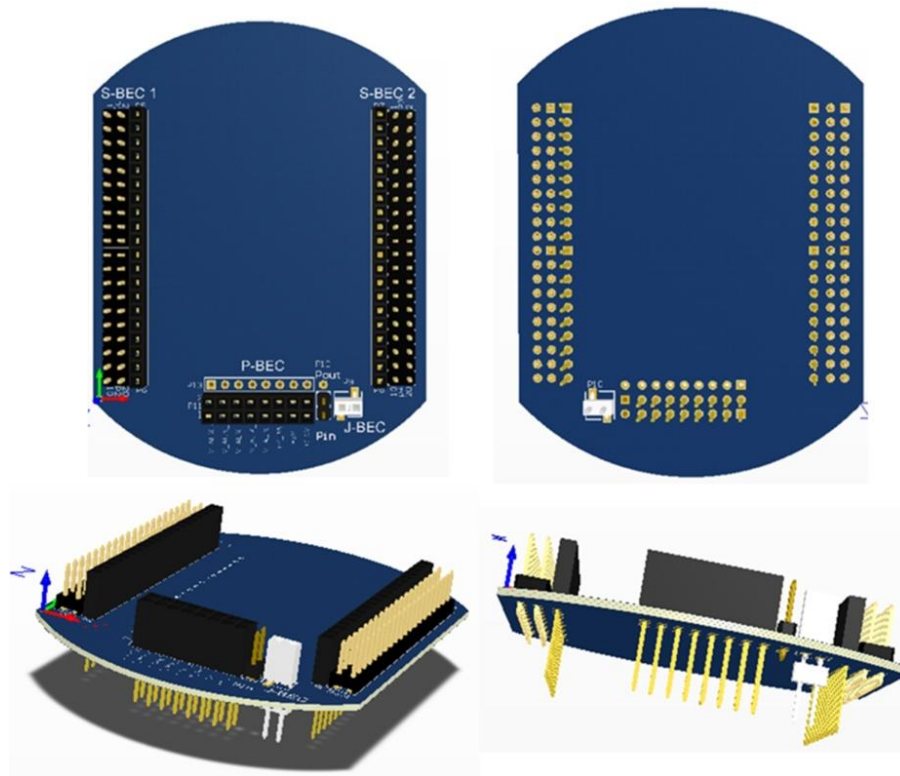
επέκτασης των διαφόρων επιπέδων λειτουργίας, σειρά έχει η δημιουργία και ο σχεδιασμός των μηχανισμών επέκτασης των πλακετών.

Συγκεκριμένα, για τη δημιουργία των μηχανισμών επέκτασης υιοθετήθηκε η μέθοδος χρήσης συνδετήρων επέκτασης πλακετών (BECs), η οποία είναι κοινός τύπος σε όλες τις αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι οι νέοι χρήστες, αλλά και όσοι ήδη ασχολούνται με την ανάπτυξη υλικού ανοικτής πηγής, να αισθάνονται οικεία και να μην αλλάξουν τις συνήθειές τους. Επί πλέον, η μέθοδος των συνδετήρων επέκτασης πλακετών (BECs) αποτελεί την πιο απλή και οικονομική λύση διεθνώς.

Προχωρώντας ένα βήμα παραπάνω, σχετικά με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής όπου οι συνδετήρες επέκτασης πλακετών χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο για τη διασύνδεση των πλακετών με τα σήματα της κύριας πλακέτας (main-board shield), η αρχιτεκτονική SensoTube υλοποιεί μέσω των BECs τις τέσσερις δι-επίπεδες υπηρεσίες. Για το λόγο αυτό δημιουργούνται τέσσερις σαφώς καθορισμένοι μηχανισμοί επέκτασης, ήτοι:

- Ο μηχανισμός επέκτασης S-BEC για τη διαχείριση σημάτων (S-BEC - Signals' Boards Expansion Connector),
- Ο μηχανισμός επέκτασης P-BEC για τη διαχείριση της ενέργειας (P-BEC -
- Ο μηχανισμός επέκτασης J-BEC για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του ενσωματωμένου λογισμικού (firmware) των μικροελεγκτών των πλακετών επέκτασης (J-BEC - JTAG Boards Expansion Connector).

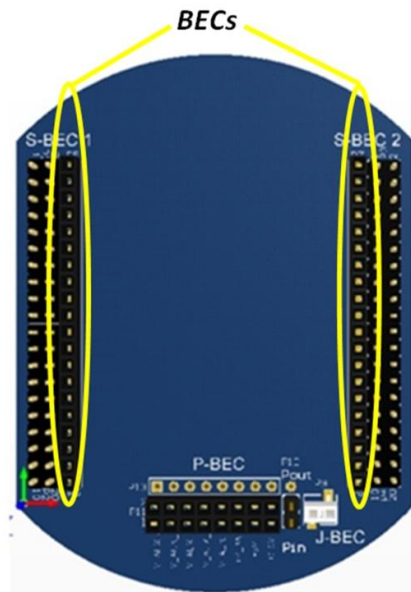
Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζεται μια πλακέτα επέκτασης, σε μορφή μοντέλου αναφοράς, δηλαδή δεν περιέχει κυκλώματα πάνω της, στην οποία διακρίνονται οι ακριβείς θέσεις και η μορφή των τριών μηχανισμών επέκτασης για τη δι-επίπεδη διαχείριση σημάτων, προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης, καθώς και ενέργειας.



Εικόνα 4.4. Επάνω, κάτω, και τρισδιάστατες όψεις του μοντέλου αναφοράς του τυπωμένου κυκλώματος των πλακετών επέκτασης μαζί με τους τρεις μηχανισμούς επέκτασης S-BEC, P-BEC, και J-BEC.

4.3.1. Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Σημάτων

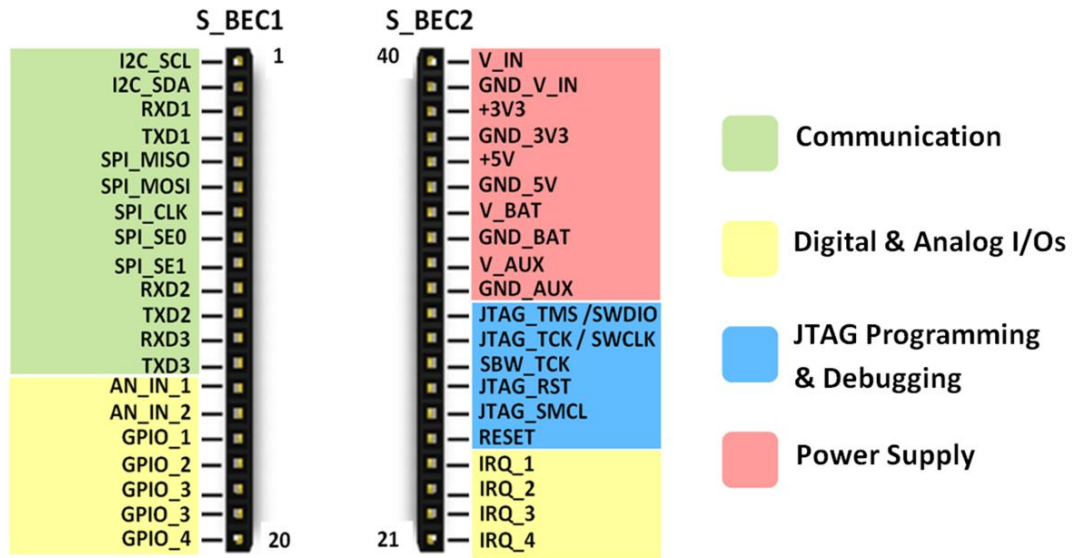
Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο αναφοράς της υλοποίησης της αρχιτεκτονικής SensoTube, για τη διασύνδεση των πλακετών χρησιμοποιούνται συμβατικοί συνδετήρες επέκτασης πλακετών, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε όλες τις αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται δύο συνδετήρες των είκοσι ακίδων έκαστος (2 x 20-pins headers) (βλ. Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5. Οι συνδετήρες διασύνδεσης πλακετών επέκτασης σημάτων S-BEC1 και S-BEC2 της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Κάθε μια ακίδα, από τις σαράντα συνολικά διαθέσιμες, έχει δεσμευτεί με συγκεκριμένο ρόλο και ονομασία. Αυτό γίνεται για τη διασφάλιση της τυποποίησης στο σχεδιασμό των τυπωμένων κυκλωμάτων, ιδιαιτέρως μεταξύ τυπωμένων κυκλωμάτων διαφορετικών κατασκευαστών. Στην Εικόνα 4.6. παρουσιάζεται η ακριβής θέση και η ονομασία όλων των παρεχόμενων ακίδων σημάτων. Στην Εικόνα 4.6 τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης S-BEC1 και S-BEC2 έχουν χρωματικώς κωδικοποιηθεί σύμφωνα με την κατηγορία λειτουργίας που ανήκουν:

- *σήματα επικοινωνιών (communication signals) με πράσινο χρώμα,*
- *ψηφιακά και αναλογικά σήματα εισόδου/εξόδου (digital and analog I/O signals) με πορτοκαλί χρώμα,*
- *σήματα για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση ενσωματωμένου λογισμικού (firmware programming and debugging) βάσει του προτύπου JTAG με μπλε χρώμα, και*
- *σήματα για την παροχή τροφοδοσίας τάσης (voltage power supply) με κόκκινο χρώμα.*



Εικόνα 4.6. Τα παρεχόμενα σήματα από τους συνδετήρες επέκτασης πλακετών S-BEC1 και S-BEC2 της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Το πλήθος και το είδος των παρεχομένων σημάτων επαρκούν για να ικανοποιήσουν οποιοδήποτε απαιτήσεις των πλακετών επέκτασης. Σχετικά με τα σήματα που παρέχονται από τους συνδετήρες επέκτασης άλλων αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής, η αρχιτεκτονική SensoTube πλεονεκτεί για τα ακόλουθα:

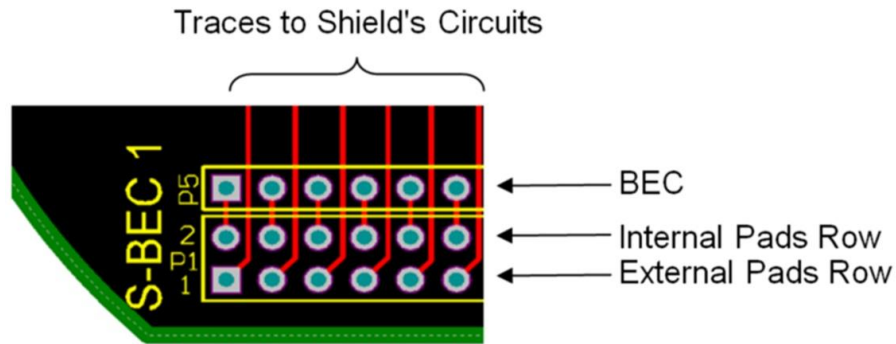
- *Επάρκεια σε σήματα περιφερειακών επικοινωνιών* (communication peripherals). Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές, παρέχονται περισσότερα σήματα για τη σύνδεση περιφερειακών επικοινωνίας μεταξύ των πλακετών επέκτασης. Π.χ. στο Arduino υπάρχει μόνο μια διαθέσιμη σειριακή θύρα (serial communication port) η οποία παρέχεται από τα σήματα TX και RX επί του ενός από τους συνδετήρες επέκτασής του. Την ίδια αυτή σειριακή θύρα τη χρησιμοποιεί και για τον προγραμματισμό του από τον Η/Υ. Είναι πάρα πολλές οι περιπτώσεις εκείνες στις οποίες η μια μόνο σειριακή επικοινωνία δεν μπορεί να καλύψει και τις ανάγκες για διασύνδεση πλακετών επέκτασης με λειτουργικά υποσυστήματα ασύρματης επικοινωνίας (wireless communications modules). Από την άλλη πλευρά, η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει μια πληθώρα σημάτων, π.χ. τρεις σειριακές θύρες

τύπου UART, διαυλο δεδομένων τύπου I2C, διαυλο επικοινωνίας τύπου SPI με δύο σήματα επιλογής (chip select signals).

- *Σήματα διακοπής (interrupt signals).* Επί πλέον συνεισφορά της αρχιτεκτονικής SensoTube αποτελεί η ύπαρξη τεσσάρων σημάτων διακοπών (interrupt signals). Η επιλογή αυτή υποστηρίζει την ανάπτυξη συστημάτων κόμβων που απαρτίζονται από πλακέτες επέκτασης με πολλούς μικροελεγκτές. Ενδεικτικά, ο μικροελεγκτής μιας πλακέτας επέκτασης του κόμβου μπορεί να μεταβεί από την κατάσταση αδράνειας (sleep mode) σε κατάσταση ενεργούς λειτουργίας (active mode) μέσω της ενεργοποίησης ενός σήματος διακοπής, το οποίο συνδέεται σε μια από τις ψηφιακές τους εισόδους και ελέγχεται από την ψηφιακή έξοδο ενός μικροελεγκτή μιας άλλης πλακέτας επέκτασης του συστήματος. Η δυνατότητα αυτή βοηθάει στη μείωση της ενέργειας των πλακετών επέκτασης που βάσει σεναρίου χρειάζεται να λειτουργούν συνέχεια. Η ύπαρξη των σημάτων διακοπών επιτρέπει επίσης την ανάπτυξη τεχνικών και την υιοθέτηση μεθόδων που σχετίζονται με νέες τεχνολογικές τάσεις και προκλήσεις της, όπως, π.χ. ο προγραμματισμός βάσει συμβάντων (event-driven programming) και οι σύγχρονες πεπερασμένες καταστάσεις επεξεργασίας (SFSM) [71], με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί βελτιστοποίηση στην ενεργειακή διαχείριση των ασύρματων κόμβων.
- *Επί πλέον σήματα παροχής τάσης τροφοδοσίας.* Μια επί πλέον καινοτομία στα σήματα των συνδετήρων επέκτασης των πλακετών αποτελεί η καθιέρωση δέκα (10) σημάτων αφιερωμένων αποκλειστικά στις τάσεις τροφοδοσίας των πλακετών επέκτασης. Στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής συνήθως συναντώνται το πολύ δύο τάσεις τροφοδοσίας, αυτή των +5 Vdc και αυτή των +3.3 Vc. Όντως αυτές οι τάσεις είναι απαραίτητες για την τροφοδοσία όλων των ψηφιακών κυκλωμάτων καθώς και των μικροελεγκτών του συστήματος. Όμως αυτές οι τάσεις δεν είναι οι μόνες που απαιτούνται σε μια υλοποίηση πραγματικής εφαρμογής ασύρματων κόμβων στο πεδίο της γεωργίας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν οι τάσεις εξόδου των φωτοβολταϊκών κυψελών, υπάρχουν οι τάσεις των συσσωρευτών, υπάρχουν τάσεις σε

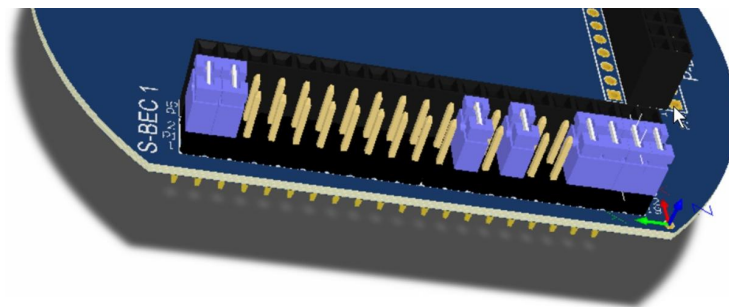
ενδιάμεσα στάδια μετατροπής και σταθεροποίησης των τάσεων εισόδου, κλπ. Όλες αυτές οι επί πλέον τάσεις, για τις οποίες δεν υπάρχει καμία πρόβλεψη και μέριμνα από τις τρέχουσες αρχιτεκτονικές, επιβάλλουν την υιοθέτηση ανορθόδοξων πρακτικών για τη σύνδεση των σημάτων τροφοδοσίας καθώς και αναρχία στις καλωδιώσεις. Όλα αυτά αποτελούν αιτίες για μείωση της αξιοπιστίας του τελικού συστήματος του κόμβου. Η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει σε τυποποιημένες θέσεις επί των συνδετήρων επέκτασης πέντε διαφορετικά σήματα τροφοδοσίας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ευελιξία και η μέγιστη τυποποίηση στην ανάπτυξη του συστήματος αλλά και να διασφαλίζεται η μέγιστη αξιοπιστία της λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, παρέχονται: η τάση των + 5 Vdc, η τάση των +3.3 Vdc, η γενική τάση εισόδου +Vin, η τάση των συσσωρευτών ενέργειας +Vbat, καθώς και μια γενικής χρήσης τάση +Vaux. Για κάθε ένα από αυτά τα σήματα τάσης τροφοδοσίας παρέχεται και το αντίστοιχο σήμα γείωσης. Σε επίπεδο συνδετήρων επέκτασης, τα σήματα των γειώσεων των πέντε διαφορετικών σημάτων τροφοδοσίας δεν είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα. Αυτό γίνεται για να μπορούν οι σχεδιαστές των πλακετών επέκτασης να υλοποιούν διάφορες τεχνικές απόρριψης ηλεκτρικού θορύβου.

Για την αποφυγή των περιορισμών και των προβλημάτων στη σύνδεση των πλακετών επέκτασης υλικού ανοικτής πηγής (βλ. Κεφάλαιο 3), η αρχιτεκτονική SensoTube εισάγει την υιοθέτηση ενός μηχανισμού για την διαχείριση των σημάτων στο φυσικό επίπεδο (physical layer). Στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται λεπτομέρεια από το σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος μιας πλακέτας επέκτασης στην οποία φαίνεται τμήμα του συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC1. Παράλληλα με τα σημεία στήριξης και συγκόλλησης του συνδετήρα (pads) έχουν τοποθετηθεί δύο επί πλέον σειρές pads. Τα pads της σειράς που γειτονεύει με το συνδετήρα επέκτασης είναι συνδεδεμένα με αυτά του συνδετήρα επέκτασης. Τα pads της εξωτερικής σειράς μένουν ασύνδετα και είναι διαθέσιμα προς σύνδεση με τα διάφορα σήματα των κυκλωμάτων της πλακέτας επέκτασης.



Εικόνα 4.7. Λεπτομέρεια από τον συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC στην οποία διακρίνονται η τοποθέτηση των δύο επί πλέον σειρών pads καθώς και οι ηλεκτρικές ενώσεις τους με τα pads του συνδετήρα επέκτασης πλακετών.

Μέσω του μηχανισμού αυτού επιτρέπεται η αποσύζευξη των σημάτων του συνδετήρα επέκτασης πλακετών. Βάσει της αρχιτεκτονικής SensoTube, τα σήματα της πλακέτας μπορούν επιλεκτικά να συνδέονται με τα σήματα του συνδετήρα επέκτασης. Για μεγαλύτερη διευκόλυνση, στις δύο βοηθητικές σειρές των pads μπορεί να συγκολληθεί ένας συνδετήρας με διπλή σειρά ακίδων (dual-pin header), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.8, έτσι ώστε ο χρήστης με τη χρήση αποσπώμενων συνδετήρων βραχυκυκλώματος (shorting jumpers) να μπορεί να ενώσει ένα σήμα της πλακέτας με ένα σήμα του συνδετήρα επέκτασης πλακετών.

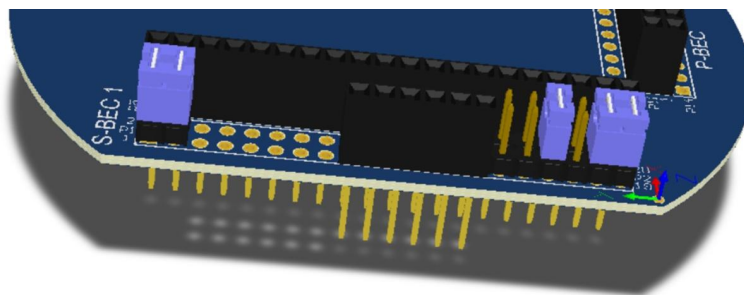


Εικόνα 4.8. Λεπτομέρεια από το συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC1 στην οποία διακρίνονται οι επιλεκτικές συνδέσεις σημάτων της πλακέτας με σήματα του συνδετήρα επέκτασης πλακετών μέσω της χρήσης συνδετήρα ακίδων και αποσπώμενων συνδετήρων βραχυκυκλώματος.

Σύμφωνα με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής σήματα μιας πλακέτας επέκτασης είναι μονίμως ενωμένα με τα αντίστοιχα σήματα του

συνδετήρα επέκτασης. Οι ενώσεις αυτές πραγματοποιούνται στο τυπωμένο κύκλωμα και δεν είναι δυνατόν να αλλάξουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της πλακέτας. Επομένως δεν είναι δυνατή η αναδρομολόγηση των σημάτων της πλακέτας. Η αρχιτεκτονική SensoTube λύνει αυτόν τον περιορισμό μέσω του πρόσθετου μηχανισμού των σειρών pads δίπλα σε κάθε συνδετήρα επέκτασης. Έτσι, στην περίπτωση όπου έχει συγκολληθεί συνδετήρας ακίδων (dual-pin header) μπορεί ο χρήστης να γεφυρώσει τις ακίδες των σημάτων της πλακέτας με τις ακίδες που επιθυμεί από τον συνδετήρα επέκτασης. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση όπου δεν έχει συγκολληθεί ο συνδετήρας ακίδων, τότε ο χρήστης μπορεί να γεφυρώσει τα αναδρομολογούμενα σήματα μέσω συγκόλλησης καλωδίου απ' ευθείας στα pads του μηχανισμού επέκτασης.

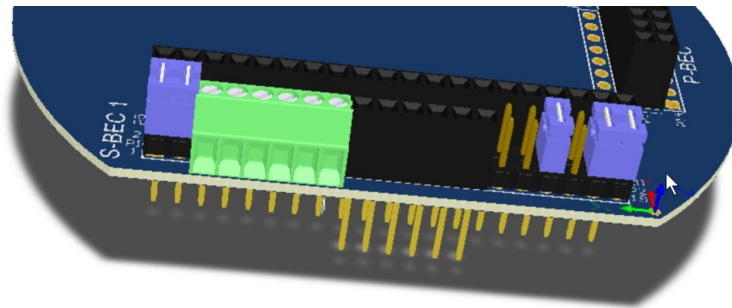
Δεύτερη μέριμνα της αρχιτεκτονικής SensoTube για την διαχείριση σημάτων αποτελεί η δυνατότητα της τοποθέτησης δευτερευόντων συνδετήρων επέκτασης πλακετών στην σειρά των pads στα οποία καταλήγουν τα σήματα της πλακέτας, δηλαδή στη εξωτερική σειρά των pads (βλ. Εικόνα 4.7). Με τη μέθοδο αυτή η πλακέτα επέκτασης μπορεί να διασυνδέσει τα σήματά της με τα σήματα γειτονικών της πλακετών επέκτασης. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως δυνατότητα για επέκταση δευτέρου βαθμού μεταξύ γειτονικών πλακετών. Με άλλα λόγια η κάθε πλακέτα επέκτασης δύναται να διαθέτει το δικό της οικοσύστημα πλακετών επέκτασης όντας ταυτόχρονα συνδεδεμένη με το σύστημα του κόμβου μέσω των κεντρικών γενικών συνδετήρων επέκτασης. Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται ενδεικτικό παράδειγμα χρήσης των δευτερευόντων συνδετήρων επέκτασης μαζί με συνδετήρες για την επιλεκτική σύνδεση σημάτων στον κεντρικό συνδετήρα επέκτασης πλακετών.



Εικόνα 4.9. Λεπτομέρεια από τον συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC1 στην οποία διακρίνονται, πρώτον, οι επιλεκτικές συνδέσεις σημάτων της πλακέτας με σήματα του συνδετήρα επέκτασης πλακετών μέσω της χρήσης συνδετήρα ακίδων και

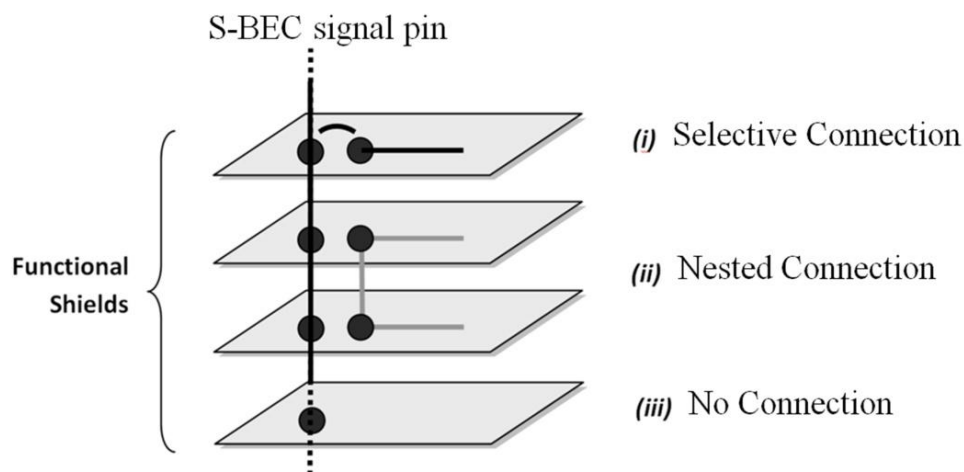
αποσπώμενων συνδετήρων βραχυκυκλώματος, και δεύτερον, οι συνδετήρες επέκτασης πλακετών για διασύνδεση των σημάτων της πλακέτας με αυτά των γειτονικών της πλακετών.

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται η φυσική διασύνδεση των σημάτων μιας πλακέτας επέκτασης με εξωτερικά στοιχεία, π.χ. αισθητήρες, ενεργοποιητές (actuators), κλπ, στις εξωτερικές σειρές των pads του μηχανισμού διαχείρισης σημάτων μπορούν να τοποθετηθούν συνδετήρες τύπου κλέμας με βίδα (screw-drive terminal blocks), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.10. Αυτή η πρόβλεψη διευκολύνει σημαντικά τις συνδέσεις και τις καλωδιώσεις ειδικά στις υλοποιήσεις των ασύρματων κόμβων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας.



Εικόνα 4.10. Λεπτομέρεια από τον συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC1 στην οποία διακρίνονται όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι διαχείρισης των σημάτων της πλακέτας επέκτασης. Ενδεικτικά παρουσιάζεται και η χρήση συνδετήρων τύπου κλέμας για την καλωδίωση των σημάτων της πλακέτας με εξωτερικά στοιχεία.

Στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζονται όλες οι δυνατές μέθοδοι για τη διαχείριση σημάτων πλακετών επέκτασης σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube. Είναι προφανές πως ο μηχανισμός διαχείρισης σημάτων της αρχιτεκτονικής SensoTube παρέχει στον μέγιστο βαθμό την επεκτασιμότητα, την επαναχρησιμοποίηση, την ευελιξία, την τυποποίηση και την κλιμάκωση, που αποτελούν τον πολυπόθητο στόχο σε κάθε αρχιτεκτονική υλικού ανοικτής πηγής.



Εικόνα 4.11. Οι διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης σημάτων πλακετών επέκτασης σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube.

4.3.2. Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Επικοινωνιών

Ο μηχανισμός για τη δι-επίπεδη επικοινωνία περιλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ των μικροελεγκτών πλακετών επέκτασης, αλλά και μεταξύ των μικροελεγκτών αυτών και των πάσης φύσεως εξωτερικών στοιχείων του συστήματος του κόμβου όπως π.χ. αισθητήρες, κλπ. Επίσης, υπάρχει και η περίπτωση όπου μια πλακέτα επέκτασης δεν διαθέτει μικροελεγκτή αλλά περιλαμβάνει ένα πλήρως λειτουργικό υποσύστημα (module) π.χ. για την ασύρματη δικτύωση του κόμβου. Τέτοια υποσυστήματα διαθέτουν μικροελεγκτή στο εσωτερικό τους ο οποίος θα πρέπει να επικοινωνεί με έναν ή περισσότερους μικροελεγκτές από άλλες πλακέτες επέκτασης. Για όλες τις ανάγκες επικοινωνίας τέτοιου είδους, παρέχονται σε συγκεκριμένες θέσεις των συνδετήρων επέκτασης πλακετών S-BEC1 και S-BEC2 του προτεινόμενου μοντέλου αναφοράς της αρχιτεκτονική SensoTube, σήματα για περιφερειακά επικοινωνίας όπως θύρες σειριακής σύγχρονης/ασύγχρονης επικοινωνίας (UART), θύρες επικοινωνίας SPI, και διάυλος επικοινωνίας δεδομένων τύπου I2C [72]. Από τα τρία αυτά μέσα επικοινωνίας, ο διάυλος I2C επιλέγεται για την επικοινωνία μεταξύ όλων των μικροελεγκτών του συστήματος του κόμβου λόγω του ότι τα άλλα δύο μέσα επικοινωνίας αφορούν στην αμφίδρομη επικοινωνία μόνο δύο μερών. Συγκεκριμένα, στο διάυλο I2C μπορούν να διασυνδεθούν έως 32 διαφορετικές συσκευές, π.χ. μικροελεγκτές, αισθητήρες, κλπ. [73]. Ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου απαιτούνται περισσότερες συσκευές τότε μπορούν να χρησιμοποιούν κυκλώματα επέκτασης του διαύλου I2C [74]. Γενικώς, η υιοθέτηση

του διαύλου για τη διασύνδεση υπολογιστικών μονάδων έχει στην πράξη αποδειχθεί ως μια πλήρως αξιόπιστη και στιβαρή λύση [75].

Εναλλακτικά, αντί για τον δίαυλο I2C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο δίαυλος CAN (CAN - Control Area Network) ο οποίος έχει δοκιμαστεί επιτυχώς στο χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας [76]. Ο δίαυλος αυτός περιέχεται ως εσωτερικό περιφερειακό σε πολλούς από τους εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής 33-bit ARM. Σχετικά με τα απαιτούμενα σήματα της εν λόγω διασύνδεσης, οι χρήστες μπορούν να δεσμεύσουν δύο οποιαδήποτε ψηφιακά σήματα εισόδου/εξόδου του συνδετήρα επέκτασης S-BEC1.

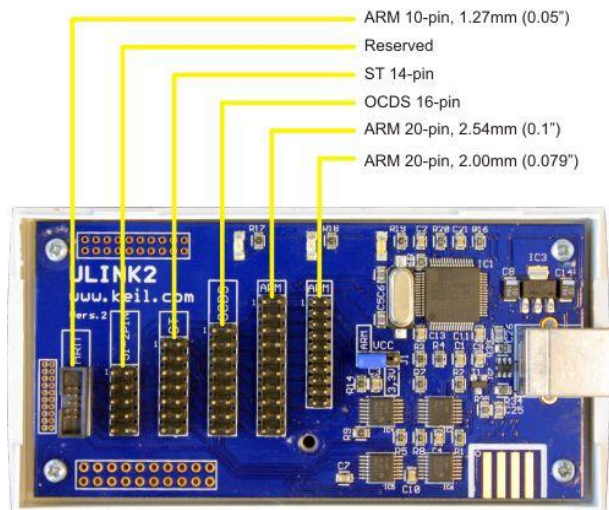
4.3.3. Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης

Παραδοσιακά, οι μικροελεγκτές πρέπει να μπορούν να προγραμματίζονται όντας συγκολλημένοι στο τυπωμένο κύκλωμα του συστήματός τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας "In-Circuit". Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, ο μικροελεγκτής μέσω συγκεκριμένων περιφερειακών επικοινωνίας μπορεί να προγραμματιστεί όντας συγκολλημένος στο τυπωμένο κύκλωμα. Αυτό, εκτός των άλλων, είναι μια μέθοδος πολύ σημαντική όχι μόνο γιατί επιτρέπει να λάβει χώρα ο προγραμματισμός μετά την παραγωγή του συστήματος, αλλά και διότι οι περισσότεροι από τους σύγχρονους μικροελεγκτές είναι τεχνολογίας επιφανειακής στήριξη (SMT - Surface-Mount Technology) και είναι εξαιρετικά δύσκολο και δαπανηρό να ξεκολληθεί και να προγραμματιστεί εκτός τυπωμένου κυκλώματος. Σχετικά με τα κυκλώματα που απαιτούνται για τη διαδικασία In-Circuit προγραμματισμού, ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται είτε το περιφερειακό σειριακής επικοινωνίας (UART), είτε το περιφερειακό διαύλου SPI. Στην πρώτη περίπτωση, απαιτείται η ύπαρξη μηχανισμού στο εσωτερικό του μικροελεγκτή ώστε να μπορεί αυτός να αυτο-προγραμματίζεται (bootloader). Στην δεύτερη περίπτωση, απλώς απαιτείται τα σήματα SPI_MOSI, SPI_MISO, SPI_CLK, και SPI_SE του μικροελεγκτή να συνδεθούν σε μια ειδική συσκευή προγραμματισμού, η οποία με την σειρά της συνδέεται στον Η/Υ στον οποίο έχει αναπτυχθεί και παραχθεί το ενσωματωμένο λογισμικό (firmware). Πρέπει να έχει ληφθεί ειδική μέριμνα στο σχεδιασμό του συστήματος έτσι ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα από την παράλληλη χρήση του διαύλου SPI από υποσυστήματα π.χ. μνήμες, άλλοι μικροελεγκτές, κλπ.

Η αρχιτεκτονική SensoTube υποστηρίζει τη διαδικασία In-Circuit προγραμματισμού παρέχοντας στον συνδετήρα επέκτασης πλακετών τα σήματα του διαύλου SPI προσθέτοντας επίσης, για μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό των πλακετών, δύο σήματα επιλογής συσκευής (SPI_SE0, SPI_SE1). Επί πλέον, παρέχει τα σήματα για τρία περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας (UART), αντί ενός που παρέχεται σε αρχιτεκτονικές τύπου Arduino.

Σχετικά με τη διαδικασία της εκσφαλμάτωσης του ενσωματωμένου λογισμικού, ή αλλιώς του κώδικα, των μικροελεγκτών, υπάρχουν δύο μέθοδοι:

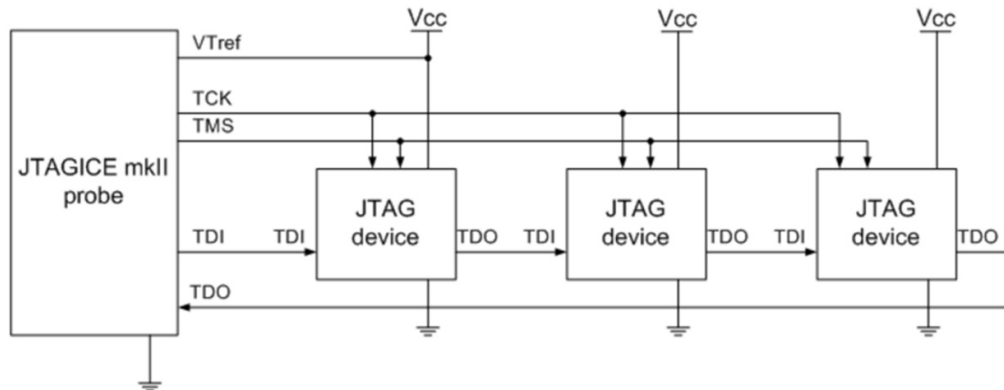
- *Απλή εκσφαλμάτωση (debugging)*. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την διαδικασία In-Circuit προγραμματισμού και παρέχει τη δυνατότητα περιορισμένης έκτασης εκσφαλμάτωσης, π.χ. μερικά μόνο σημεία ελέγχου (breakpoints), ή περιορισμένη δυνατότητα ταχύτητας εκτέλεσης κώδικα σε σχέση με την μέγιστη συχνότητα ρολογιού των μικροελεγκτών.
- *Προσομοίωση (emulation)*. Η προσομοίωση θεωρείται ως η πιο πλήρης και αποτελεσματική μέθοδος εκσφαλμάτωσης κώδικα μικροελεγκτών. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων εξωτερικών συσκευών οι οποίες διασυνδέονται με το συγκολλημένο μικροελεγκτή του υπό δοκιμή συστήματος ως επί το πλείστον μέσω του προτύπου In-Circuit προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης IEEE 1149.1, και είναι γνωστές ως συσκευές JTAG [77,78]. Τα σήματα που απαιτούνται για τη διασύνδεση μιας συσκευής εκσφαλμάτωσης τύπου JTAG με έναν μικροελεγκτή ποικίλουν σε πλήθος και μπορούν να είναι από δέκα (10) έως είκοσι (20). Από την πλευρά του το υπό δοκιμή σύστημα θα πρέπει να διαθέτει συγκολλημένο ειδικό συνδετήρα τύπου (IDC connectors, ή Dual-pin Headers). Οι συνδετήρες αυτοί είναι αρκετά μεγάλου μεγέθους. Στην Εικόνα 4.12 διακρίνεται μια τυπική συσκευή εκσφαλμάτωσης JTAG έχοντας μάλιστα ενσωματωμένους όλους τους εναλλακτικούς συνδετήρες για τη σύνδεσή της με οποιονδήποτε μικροελεγκτή.



Εικόνα 4.12. Συσκευή εκσφαλμάτωσης JTAG στην οποία διακρίνονται οι διάφοροι συνδετήρες για τη σύνδεση σε διάφορους τύπους μικροελεγκτών. (μοντέλο ULINK2 της εταιρίας KEIL).

Η αρχιτεκτονική SensoTube λαμβάνει μέριμνα και για τις δύο μεθόδους εκσφαλμάτωσης. Συγκεκριμένα, σχετικά με την In-Circuit εκσφαλμάτωση, παρέχονται πλήθος σημάτων περιφερειακών επικοινωνίας στο συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC1. Ειδικότερα για τη δεύτερη μέθοδο εκσφαλμάτωσης, όλα τα απαιτούμενα σήματα διασύνδεσης JTAG παρέχονται σε συγκεκριμένες θέσεις στο συνδετήρα επέκτασης πλακετών S-BEC2 (βλ. σήματα χρωματικά κωδικοποιημένα με μπλε χρώμα στην Εικόνα 4.6). Η δυνατότητα αυτή δεν παρέχεται σε καμία από τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής, παρά το γεγονός πως οι περισσότεροι από τους εμπορικά διαθέσιμους μικροελεγκτές υποχρεωτικά βασίζονται αποκλειστικά στη μέθοδο JTAG για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωσή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν όλοι οι μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής ARM [79]. Μια επί πλέον δυνατότητα του προτύπου IEEE 1149.1 (JTAG) είναι η διασύνδεση πολλών ταυτόχρονα μικροελεγκτών στην ίδια συσκευή εκσφαλμάτωσης. Κάποιες συσκευές εκσφαλμάτωσης υποστηρίζουν ακόμα και την ταυτόχρονη ανάπτυξη και εκσφαλμάτωση πολλών μικροελεγκτών μέσα από το ίδιο περιβάλλον ανάπτυξης κώδικα στον Η/Υ. Για την πραγματοποίηση αυτής της λειτουργίας, η οποία καλείται ως "daisy-chain", ή αλλιώς "scan chain", απαιτείται το σήμα εξόδου TDO της συσκευής προγραμματισμού/εκσφαλμάτωσης να συνδέεται στο σήμα εισόδου TDI του πρώτου διασυνδεδεμένου μικροελεγκτή, και το σήμα

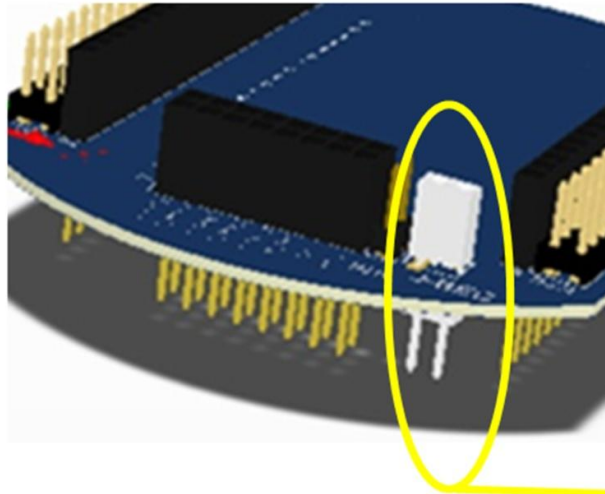
εξόδου TDO του πρώτου μικροελεγκτή να συνδέεται στο σήμα εισόδου TDI του δεύτερου μικροελεγκτή, κ.ο.κ. Στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζεται σε μορφή μπλοκ διαγράμματος η διασύνδεση τύπου "daisy-chain" μιας συσκευής εκσφαλμάτωσης τύπου JTAG με περισσότερους από έναν μικροελεγκτές.



Εικόνα 4.13. Διασύνδεση συσκευής προγραμματισμού/εκσφαλμάτωσης τύπου JTAG με τρεις μικροελεγκτές (αναφέρονται ως JTAG devices) ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την λειτουργία "daisy-chain" (διαδοχή σημάτων εισόδου-εξόδου TDO και TDI) [80].

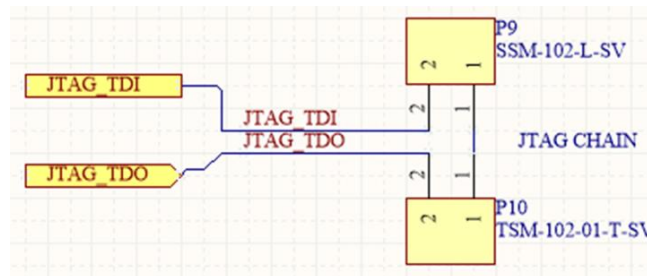
Από την πλευρά του, ένα σύστημα με μικροελεγκτή για να διασυνδεθεί μέσω της λειτουργίας "daisy-chain" θα πρέπει να διαθέτει όχι έναν αλλά δύο όμοιους συνδετήρες JTAG έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η διαδοχή των σημάτων εισόδου/εξόδου TDI/TDO. Αυτή η προσέγγιση αποτελεί κοινό τόπο, ειδικά στις πλακέτες ανάπτυξης μικροελεγκτών (development MCU boards).

Η αρχιτεκτονική SensoTube, παρέχει τη λειτουργία "daisy-chain" μέσω της προσθήκης ενός επί πλέον μηχανισμού επέκτασης, τον J-BEC. Συγκεκριμένα, σύμφωνα και με το προτεινόμενο μοντέλο αναφοράς υλοποίησης, τοποθετούνται σε συγκριμένες θέσεις στο τυπωμένο κύκλωμα δύο συνδετήρες, ένας στο επάνω μέρος και ένας στο κάτω μέρος της πλακέτας. Ο επάνω συνδετήρας επέκτασης έχει δύο υποδοχές (dual-pin female connector), ενώ ο κάτω συνδετήρας έχει δύο ακίδες (dual-pin male connector). Και οι δύο συνδετήρες είναι τεχνολογίας επιφανειακής στήριξης επί του τυπωμένου. Στην Εικόνα 4.14 επισημαίνονται οι δύο συνδετήρες του μηχανισμού J-BEC ενώ στην Εικόνα 4.15 παρουσιάζεται το σχηματικό κύκλωμα (schematic drawing) στο οποίο δείχνονται οι συνδέσεις μεταξύ των σημάτων JTAG TDO και TDI με τις επαφές των δύο συνδετήρων του μηχανισμού J-BEC.



J-BEC

Εικόνα 4.14. Τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου αναφοράς πλακέτας επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube στην οποία επισημαίνεται ο μηχανισμός επέκτασης J-BEC για την διαδοχή σημάτων εισόδου/εξόδου TDI/TDO της λειτουργίας "daisy-chain" της μεθόδου προγραμματισμού/εκοφαλμάτωσης JTAG.



Εικόνα 4.15. Σχηματικό κύκλωμα στο οποίο διακρίνονται οι συνδέσεις των σημάτων JTAG_TDO και JTAG_TDI στις επαφές των συνδετήρων του μηχανισμού επέκτασης J-BEC για την επίτευξη της λειτουργίας "daisy-chain" για τον προγραμματισμό και την εκοφαλμάτωση πολλών ταυτόχρονα μικροελεγκτών.

Η αρχιτεκτονική SensoTube, εκτός του ότι παρέχει στο μέγιστο βαθμό την υποστήριξη των λειτουργιών του προγραμματισμού και της εκοφαλμάτωσης των μικροελεγκτών του συστήματος ενός ασύρματου κόμβου, επίσης συμβάλει ουσιαστικά στην ευκολία, στην ευελιξία, αλλά και στη μείωση της ενέργειας και του κόστους του συστήματος. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των παρεχομένων μηχανισμών επέκτασης επιτρέπεται η αποσύζευξη σε επίπεδο υλικού των

λειτουργιών προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης από τις υπόλοιπες λειτουργίες του ασύρματου κόμβου. Μέσω της χρήσης μιας ή περισσότερων πλακετών επέκτασης επιπέδου PDL (Programming and Debugging Layer) είναι εφικτό τα κυκλώματα των λειτουργιών προγραμματισμού/εκσφαλμάτωσης περιστασιακά να προστίθενται/φαιρούνται στο σύστημα για τον προγραμματισμό ενός ή περισσότερων μικροελεγκτών μιας ή περισσότερων πλακετών επέκτασης του συστήματος. Η παρουσίαση των πλεονεκτημάτων των εν λόγω δυνατοτήτων παρουσιάζονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 7.

4.3.4. Ο Μηχανισμός Διαχείρισης Ενέργειας

Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, η τροφοδοσία των πλακετών επέκτασης έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται στο μέγιστο βαθμό η ευελιξία και η αποτελεσματικότητα κατά την φάση του σχεδιασμού και της υλοποίησης του συστήματος του ασύρματου κόμβου, καθώς και η ευελιξία, η επαναχρησιμοποίηση (reusability) και η επαναδιαμόρφωση (reconfiguration) των πλακετών επέκτασης. Από την άλλη πλευρά, δίνεται έμφαση στην αξιοπιστία και την ευρωστία του συνολικού συστήματος του κόμβου.

Συγκεκριμένα, σε προκαθορισμένες θέσεις στο συνδετήρα του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC2 (βλ. Εικόνα 4.6) παρέχονται τα σήματα για πέντε (5) τάσεις τροφοδοσίας:

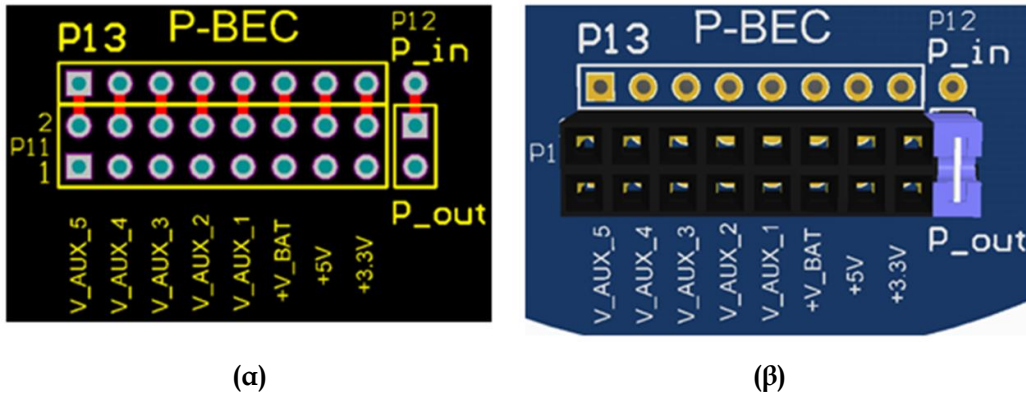
- V_{IN} : η τάση αυτή μπορεί να προέρχεται από άλλη πλακέτα επέκτασης είτε εξωτερικά μέσω συνδετήρων τύπου κλέμας. Τυπικά, η τάση αυτή μπορεί να είναι η τάση εξόδου μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης, ή η τάση από έναν μετατροπέα τάσης (DC/DC converter), κλπ. Γενικά η τάση V_{IN} θεωρείται η τάση με τη μεγαλύτερη τιμή στο επεκτάσιμο σύστημα.
- $+3V3$: η τάση αυτή χρησιμοποιείται από τις πλακέτες επέκτασης που διαθέτουν κυκλώματα λογικής στάθμης τάσης $+3.3\text{ Vdc}$.
- $+5V$: η τάση αυτή χρησιμοποιείται από τις πλακέτες επέκτασης που διαθέτουν κυκλώματα λογικής στάθμης τάσης $+5\text{ Vdc}$.
- V_{BAT} : η τάση αυτή προέρχεται από πλακέτες επέκτασης επιπέδου διαχείρισης ενέργειας, και οι οποίες συγκεκριμένα περιέχουν συσσωρευτές ενέργειας. Η τάση αυτή είναι ιδιαίτερος χρήσιμη σε όλες τις

πλακέτες επέκτασης στις οποίες υπάρχουν λειτουργίες μετατροπής και σταθεροποίησης τάσεων τροφοδοσίας.

- V_{AUX}): η τάση αυτή έχει γενικό χαρακτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους σχεδιαστές και τους χρήστες των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube κατά το δοκούν.

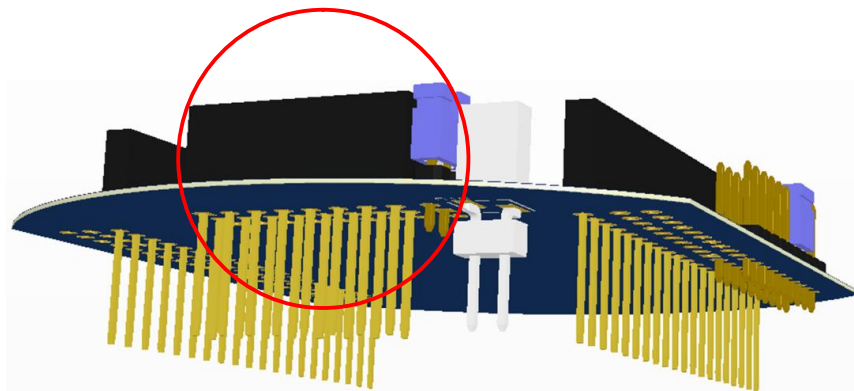
Για κάθε ένα από αυτά τα σήματα τάσης υπάρχει και το αντίστοιχο σήμα γείωσης το οποίο είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητο από τις υπόλοιπες γειώσεις για λόγους διασφάλισης της ακεραιότητας των σημάτων (signals integrity) στο τυπωμένο κύκλωμα. Αυτός ο πλουραλισμός δεν συναντιέται στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής στις οποίες παρέχονται μόνο οι τάσεις τροφοδοσίας των +5 Vdc και των +3.3 Vdc στους συνδετήρες επέκτασης πλακετών, ενώ η τάση τροφοδοσίας (V_{IN}) συνδέεται απ' ευθείας στο σταθεροποιητή τάσης της κύριας πλακέτας επέκτασης (main-board shield) και δεν είναι προσβάσιμη από καμία από τις πλακέτες επέκτασης του συστήματος. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των σημάτων τάσης σε επίπεδο συστήματος, όπως προτείνεται από την αρχιτεκτονική SensoTube, υπερτερεί έναντι όλων των άλλων αρχιτεκτονικών, κι εκτός των άλλων, διασφαλίζει στο μέγιστο βαθμό την τυποποίηση και την τάξη στην δρομολόγηση καλωδίων τροφοδοσίας και γειώσεων.

Εκτός από τις παραπάνω μέριμνες της για τη διαχείριση των σημάτων τάσης τροφοδοσίας, η αρχιτεκτονική SensoTube προχωράει ένα ακόμα βήμα πιο μπροστά, εισάγοντας το μηχανισμό δι-επίπεδης διαχείρισης και επέκτασης σημάτων ενέργειας, τον P-BEC (Power Boards Expansion Connector), μέσω του οποίου παρέχονται οι δυνατότητες για ανάλυση και έλεγχο της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε λειτουργία του συστήματος του ασύρματου κόμβου. Στην Εικόνα 4.16 παρουσιάζεται το τυπωμένο κύκλωμα του μοντέλου αναφοράς (σε δύο και τρεις διαστάσεις) στο οποίο διακρίνεται ο μηχανισμός διαχείρισης ενέργειας P-BEC.



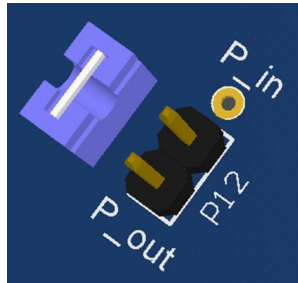
Εικόνα 4.16. Ο μηχανισμός επέκτασης P-BEC της αρχιτεκτονικής SensoTube για τη δι-επίπεδη διαχείριση ενέργειας του συστήματος του ασύρματου κόμβου: α) οι θέσεις στήριξης και συγκόλλησης των συνδετήρων επέκτασης (pads), και β) τρισδιάστατη άποψη του μηχανισμού επέκτασης με τους συνδετήρες συγκολλημένους επί του τυπωμένου κυκλώματος.

Ο μηχανισμός P-BEC περιλαμβάνει δύο είδη συνδετήρων, έναν διπλής σειράς των δεκαέξι (16) συνολικά επαφών (2x8 dual-pin header), και έναν συνδετήρα δύο ακίδων για υποδοχή συνδετήρα βραχυκυκλώματος (shorting jumper). Μόνο ο πρώτος από τους δύο αυτούς συνδετήρες διαπερνά το τυπωμένο κύκλωμα (βλ. εντός κόκκινου κύκλου στην Εικόνα 4.17).

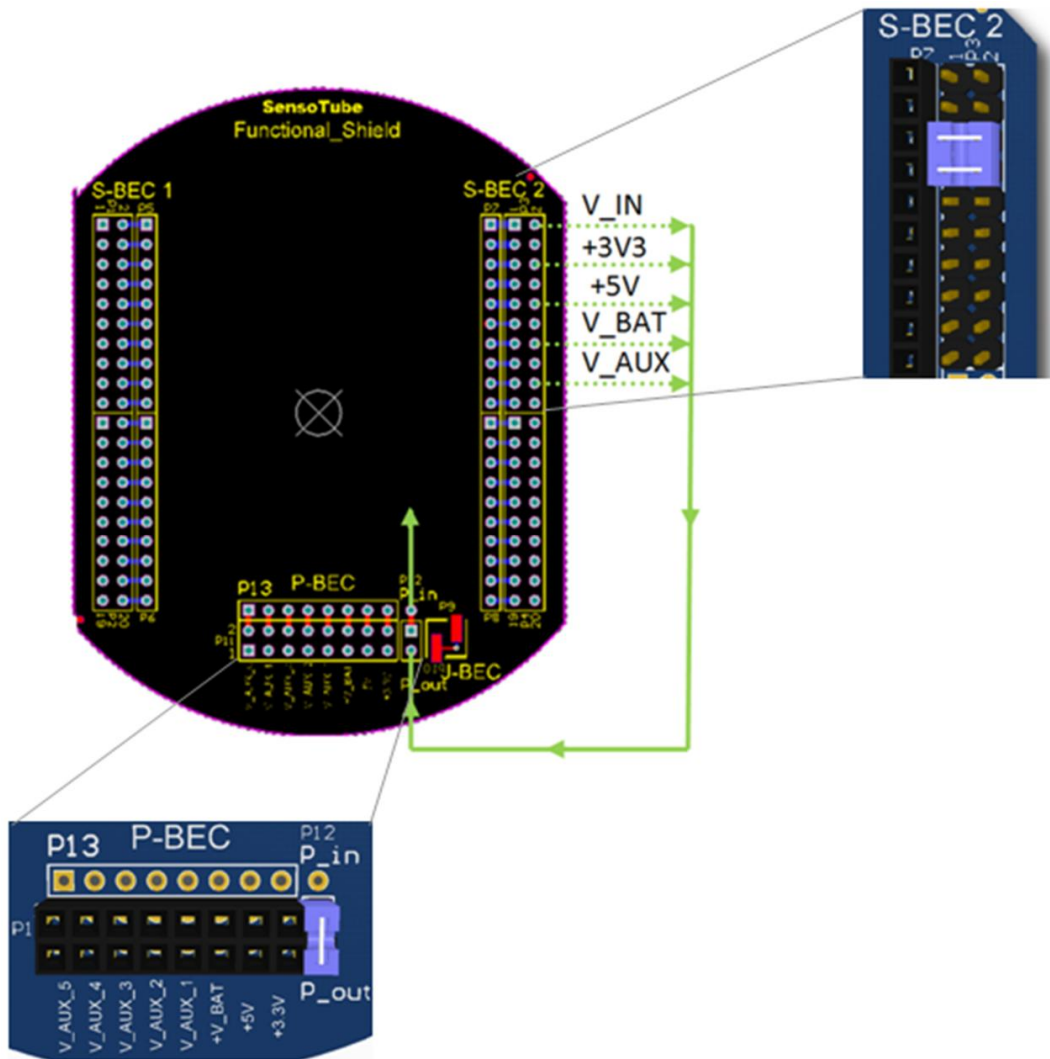


Εικόνα 4.17. Τρισδιάστατη άποψη πλακέτας επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube. Εντός του κόκκινου κύκλου διακρίνονται οι δύο τύποι συνδετήρων του μηχανισμού δι-επίπεδης διαχείρισης ενέργειας P-BEC. Ο συνδετήρας 2 x 8 ακίδων είναι τύπου BEC (board expansion connector), δηλαδή διαπερνά την πλακέτα και παρέχει την δυνατότητα στοίβαξης (stacking) πολλών πλακετών επέκτασης η μια πάνω στην άλλη.

Ο δεύτερος συνδετήρας του μηχανισμού είναι απλής μορφής, δηλαδή απλώς συγκολλείται στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας. Στην Εικόνα 4.18 απεικονίζεται σε τρισδιάστατη μορφή ο συνδετήρας των δύο ακίδων. Στην ακίδα με την ονομασία P_out μπορεί να δρομολογηθεί, μέσω του σχεδιασμού αγώγιμων γραμμών (traces) του τυπωμένου κυκλώματος, μια από τις διαθέσιμες τάσεις του συνδέσμου επέκτασης σημάτων S-BEC2. Η τάση αυτή μέσω της χρήσης του συνδέσμου βραχυκυκλώματος (shorting jumper) μεταφέρεται στην ακίδα P_in αλλά και στο pad το οποίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με αυτήν. Μέσω της τάσης της ακίδας P_in παρέχεται η τάση τροφοδοσίας όλων των κυκλωμάτων της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης. Η δυνατότητα αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 4.19.



Εικόνα 4.18. Τρισδιάστατη άποψη του συνδετήρα δύο ακίδων μέσω της βραχυκύκλωσης του οποίου μια από τις παρεχόμενες τάσεις του συνδετήρα επέκτασης σημάτων S-BEC2 εισέρχεται ως τάση τροφοδοσίας στα κυκλώματα της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης.

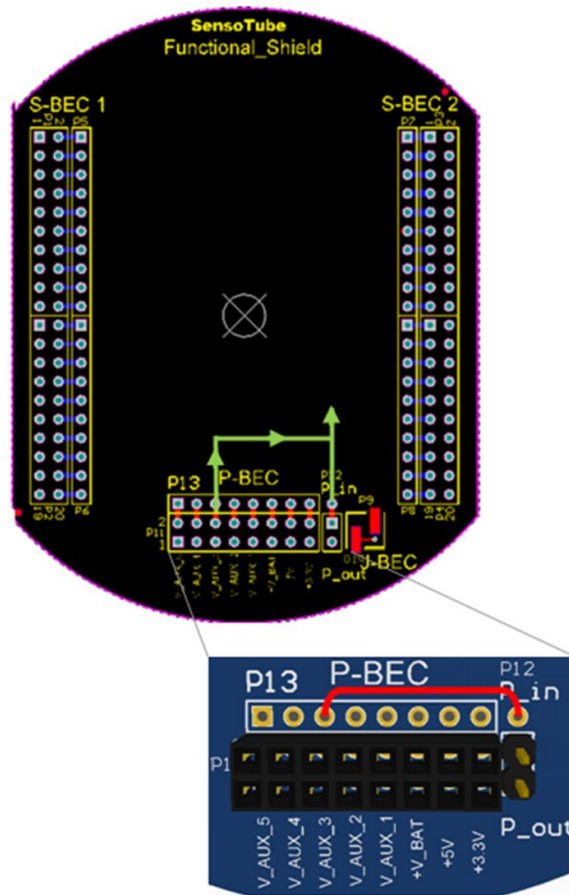


Εικόνα 4.19. Η μέθοδος για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης από μια από τις παρεχόμενες τάσεις τροφοδοσίας του συνδέομου επέκτασης σημάτων S-BEC2.

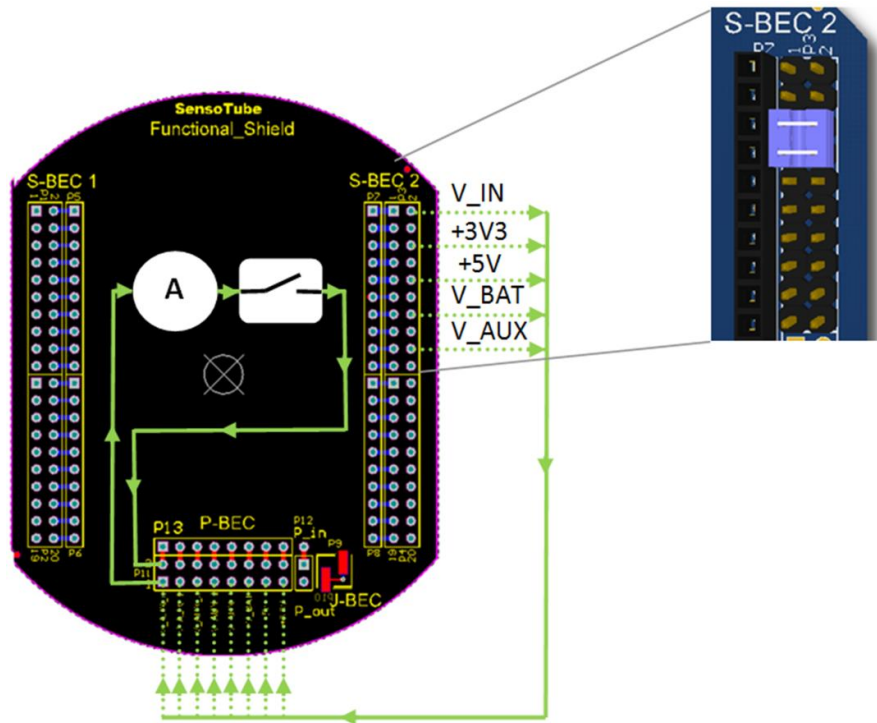
Μια εναλλακτική χρήση του συνδετήρα των δύο ακίδων είναι η παράλληλη σύνδεση σ' αυτόν διαφόρων κυκλωμάτων για τη μέτρηση ρεύματος αλλά και για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση (Power-On/Power-Off) ολόκληρης της πλακέτας επέκτασης. Προφανώς στις περιπτώσεις αυτές δεν γίνεται χρήση του συνδετήρα βραχυκυκλώματος.

Η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει μια επί πλέον μέθοδο για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης, αυτήν των ελεγχόμενων καναλιών τροφοδοσίας. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.20, η ακίδα P_in μπορεί να συνδεθεί μέσω καλωδίωσης με ένα από τα pads που συνδέονται με την πάνω

σειρά των ακίδων του συνδετήρα 2 x 8. Στην περίπτωση αυτή η τάση της ακίδας P_out θα πρέπει να έχει αποσυνδεθεί από την ακίδα P_in, δηλαδή θα πρέπει να έχει αφαιρεθεί ο συνδετήρας βραχυκυκλώματος. Οι τάσεις που παρέχονται από το συνδετήρα επέκτασης σημάτων 2 x 8 ακίδων, προέρχονται από μια ή από περισσότερες πλακέτες επέκτασης. Σ' αυτές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.21, οι τάσεις που παρέχονται από το συνδετήρα επέκτασης σημάτων S-BEC2 μπορούν να συνδεθούν εν σειρά με κυκλώματα μέτρησης ρεύματος αλλά και με κυκλώματα ηλεκτρομηχανικών (ηλεκτρονόμων), στερεάς κατάστασης(solid-state), ή ημιαγωγών διακοπών. Οι σχεδιαστές των πλακετών επέκτασης έχουν την ελευθερία της επιλογής των επιθυμητών για την κάθε εφαρμογή κυκλωμάτων μέτρησης και ελέγχου.



Εικόνα 4.20. Η μέθοδος για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης μέσω ελεγχόμενου καναλιού τάσης.



Εικόνα 4.21. Πλακέτα επέκτασης για τη μέτρηση ρεύματος και τον έλεγχο ενεργοποίησης/απενεργοποίησης καναλιού ελεγχόμενης τάσης τροφοδοσίας. Η τάση αυτή είναι διαθέσιμη προς τις άλλες πλακέτες επέκτασης του συστήματος του ασύρματου κόμβου αισθητήρων.

Η τεχνική διακοπής μιας γραμμής τροφοδοσίας και της παρεμβολής κυκλωμάτων μέτρησης ρεύματος είναι γνωστή στον χώρο του σχεδιασμού ηλεκτρονικών συστημάτων [78], στην περίπτωση όμως των συστημάτων των ασύρματων κόμβων αισθητήρων δεν υπάρχουν τέτοιου είδους προβλέψεις και δυνατότητες. Η αρχιτεκτονική SensoTube, μέσω του μηχανισμού δι-επίπεδης διαχείρισης ενέργειας, διασφαλίζει τη δυνατότητα μετρήσεων ρευμάτων και ελέγχου της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των πλακετών επέκτασης του συστήματος αλλά επιτυγχάνεται με τρόπο απλό και τοποποιημένο η διαχείριση και ο έλεγχος της ενέργειας τόσο σε επίπεδο πλακέτας επέκτασης όσο και σε επίπεδο συστήματος. Η καινοτομία αυτή δυνατότητα επιτρέπει την ενσωμάτωση οποιασδήποτε τεχνικής και τεχνολογίας, υπάρχουσας ή μελλοντικής, σχετικά με την ενέργεια του ασύρματου κόμβου αισθητήρων. Στο Κεφάλαιο 8, ως χαρακτηριστικό παράδειγμα των πλεονεκτημάτων του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός συστήματος κόμβου με δυνατότητες για μετρήσεις και έλεγχο των

λειτουργιών μιας νέας τεχνολογίας συσσωρευτών ενέργειας σε πραγματικό τόπο και χρόνο.

Βιβλιογραφία

1. Newman, R.M.; Gaura, E. In *Size does matter - the case for big motes*, 2006 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show - NSTI Nanotech 2006 Technical Proceedings, Boston, MA, 2006; Boston, MA, pp 441-446.
2. Mottola, L.; Picco, G.P. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. *ACM Comput Surv* **2011**, *43*.
3. Miyazaki, T.; Li, P.; Guo, S.; Kitamichi, J.; Hayashi, T.; Tsukahara, T. In *On-demand customizable wireless sensor network*, The International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, ANT-2015, the International Conference on Sustainable Energy Information Technology, SEIT-2015, 2015; Shakshuki, E., Ed. Elsevier: pp 302-309.
4. Miyazaki, T.; Yamaguchi, S.; Kobayashi, K.; Kitamichi, J.; Guo, S.; Tsukahara, T.; Hayashi, T. In *A software defined wireless sensor network*, 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2014, Honolulu, HI, 2014; IEEE Computer Society: Honolulu, HI, pp 847-852.
5. Chen, H.; Wei, B.; Ma, D. Energy storage and management system with carbon nanotube supercapacitor and multidirectional power delivery capability for autonomous wireless sensor nodes. *IEEE Trans Power Electron* **2010**, *25*, 2897-2909.
6. Oller, J.; Demirkol, I.; Casademont, J.; Paradells, J.; Gamm, G.U.; Reindl, L. Has time come to switch from duty-cycled mac protocols to wake-up radio for wireless sensor networks? *IEEE ACM Trans Networking* **2015**.
7. De, D.; Song, W.Z.; Xu, M.; Shi, L.; Tan, S. Advances in real-world sensor network system. In *Advances in Computers*, 2013; Vol. 90, pp 1-90.
8. Borges, L.M.; Velez, F.J.; Lebres, A.S. Survey on the characterization and classification of wireless sensor network applications. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2014**, *16*, 1860-1890.
9. Ansari, A.W.; Garg, M.; Choudhury, S.; Singh, R. In *Arm based real time video streaming using xbee for perimeter control in defense application*, 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development, INDIACom 2014, New Delhi, 2014; IEEE Computer Society: New Delhi, pp 943-947.

10. Tsekoura, I.; Rebel, G.; Glosekotter, P.; Berekovic, M. In *An evaluation of energy efficient microcontrollers*, 2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC 2014, Montpellier, 2014; IEEE Computer Society: Montpellier.
11. Otero, C.T.O.; Tse, J.; Karmazin, R.; Hill, B.; Manohar, R. In *Ullsnap: An ultra-low power event-driven microcontroller for sensor network nodes*, 15th International Symposium on Quality Electronic Design, ISQED 2014, Santa Clara, CA, 2014; IEEE Computer Society: Santa Clara, CA, pp 667-674.
12. Bol, D.; De Vos, J.; Hocquet, C.; Botman, F.; Durvaux, F.; Boyd, S.; Flandre, D.; Legat, J.D. Sleep walker: A 25-mhz 0.4-v sub-mm² 7- μ w/mhz microcontroller in 65-nm lp/gp cmos for low-carbon wireless sensor nodes. *IEEE J Solid State Circuits* **2013**, *48*, 20-32.
13. Liu, Z.; Shi, J.; Peng, W. Design of a low-power humidity and temperature collector based on stm32. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer Verlag: 2015; Vol. 334, pp 801-811.
14. Noury, N.; Perriot, B.; Collet, J.; Grenier, E.; Cerny, M.; Massot, B.; McAdams, E. Actimedarm - design of a wearable system to monitor daily actimetry. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* **2013**, *2013*, 1851-1854.
15. Khanna, S.; Bartling, S.C.; Clinton, M.; Summerfelt, S.; Rodriguez, J.A.; McAdams, H.P. An fram-based nonvolatile logic mcu soc exhibiting 100% digital state retention at $\{ \backslash \text{rm vdd} \} = 0 \text{ v}$ achieving zero leakage with $\{ < \}$ 400-ns wakeup time for ulp applications. *IEEE J Solid State Circuits* **2014**, *49*, 95-106.
16. Khanna, S.; Bartling, S.; Clinton, M.; Summerfelt, S.; Rodriguez, J.; McAdams, H. In *Zero leakage microcontroller with 384ns wakeup time using fram mini-array architecture*, 2013 9th IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, A-SSCC 2013, Singapore, 2013; Singapore, pp 21-24.
17. Botman, F.; De Vos, J.; Bernard, S.; Stas, F.; Legat, J.D.; Bol, D. In *Bellevue: A 50mhz variable-width simd 32bit microcontroller at 0.37v for processing-intensive wireless sensor nodes*, 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2014, Melbourne, VIC, 2014; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Melbourne, VIC, pp 1207-1210.

18. Tang, W.X.; Wen, S.A.; Tung, S.W.; Lin, K.Y.; Chen, C.C.; Su, C.L. In *A 42.5 μ w/mhz ultra-low power 32-bit microcontroller - spark*, 9th International Conference on Information, Communications and Signal Processing, ICICS 2013, Tainan, 2013; IEEE Computer Society: Tainan.
19. Lueders, M.; Eversmann, B.; Gerber, J.; Huber, K.; Kuhn, R.; Zwerg, M.; Schmitt-Landsiedel, D.; Brederlow, R. Architectural and circuit design techniques for power management of ultra-low-power mcu systems. *IEEE Trans Very Large Scale Integr VLSI Syst* **2014**, *22*, 2287-2296.
20. Mazumdar, K.; Bartling, S.; Khanna, S.; Stan, M. In *A digitally-controlled power-aware low-dropout regulator to reduce standby current drain in ultra-low-power mcu*, 16th International Symposium on Quality Electronic Design, ISQED 2015, 2015; IEEE Computer Society: pp 98-102.
21. Berthier, F.; Beigne, E.; Vivet, P.; Sentieys, O. In *Power gain estimation of an event-driven wake-up controller dedicated to wsn's microcontroller*, 13th IEEE International NEW Circuits and Systems Conference, NEWCAS 2015, 2015; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
22. Bogliolo, A.; Lattanzi, E.; Freschi, V. In *Idleness as a resource in energy-neutral wsns*, 1st International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems, ENSSys 2013, Rome, 2013; Rome.
23. Ohshima, K.; Kobayashi, H.; Nishijima, T.; Yoneda, S.; Tomatsu, H.; Maeda, S.; Tsukida, K.; Takahashi, K.; Sato, T.; Watanabe, K., *et al.* A normally-off microcontroller unit with an 85% power overhead reduction based on crystalline indium gallium zinc oxide field effect transistors. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2014**, *53*.
24. Hayashikoshi, M.; Sato, Y.; Ueki, H.; Kawai, H.; Shimizu, T. In *Normally-off mcu architecture for low-power sensor node*, 2014 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC 2014, Suntec, 2014; Suntec, pp 12-16.
25. Gaura, E.; Girod, L.; Brusey, J.; Allen, M.; Challen, G. Learning from deployment experience. In *Wireless sensor networks: Deployments and design frameworks*, Springer US: 2010; pp 15-50.

26. Lee, W.S.; Alchanatis, V.; Yang, C.; Hirafuji, M.; Moshou, D.; Li, C. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Comput. Electron. Agric.* **2010**, *74*, 2-33.
27. Barcelo-Ordinas, J.M.; Chanet, J.P.; Hou, K.M.; Garcia-Vidal, J. In *A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture*, 9th European Conference on Precision Agriculture, ECPA 2013, Lleida, Catalonia, 2013; Lleida, Catalonia, pp 801-808.
28. Gajjar, S.; Choksi, N.; Sarkar, M.; Dasgupta, K. In *Comparative analysis of wireless sensor network nodes*, 1st International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2014, Noida, 2014; IEEE Computer Society: Noida, pp 426-431.
29. Panda, R.; Ranasinghe, D.C.; Parlikad, A.; McFarlane, D. In *A condition monitoring platform using cots wireless sensor networks - lessons and experience*, 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA2010, Perth, WA, 2010; Perth, WA, pp 473-480.
30. Asensio, Á.; Blasco, R.; Marco, Á.; Casas, R. Hardware architecture design for wsn runtime extension. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2013**, 2013.
31. Sdi-12 specification. http://www.sdi-12.org/current%20specification/SDI-12_version1_3%20January%2028,%202016.pdf (03/03/2016),
32. Rumberg, B.; Graham, D.W.; Clites, S.; Kelly, B.M.; Navidi, M.M.; Dilello, A.; Kulathumani, V. In *Ramp: Accelerating wireless sensor hardware design with a reconfigurable analog/mixed-signal platform*, 14th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2015, 2015; Association for Computing Machinery, Inc: pp 47-58.
33. Rana, C.; Afzal, N. In *Advances in sensor networks using analog signal processing circuits*, 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RA ECS 2014, Chandigarh, 2014; IEEE Computer Society: Chandigarh.
34. Farooq, M.O.; Kunz, T. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. *Sensors* **2011**, *11*, 5900-5930.

35. Molisch, A.F.; Balakrishnan, K.; Cassioli, D.; Chong, C.-C.; Emami, S.; Fort, A.; Karedal, J.; Kunisch, J.; Schantz, H.; Schuster, U. Ieee 802.15. 4a channel model-final report. *IEEE P802* **2004**, *15*, 0662.
36. Guerroumi, M.; Pathan, A.S.K.; Badache, N.; Moussaoui, S. Strengths and weaknesses of prominent data dissemination techniques in wireless sensor networks. *Int. J. Commun. Networks. Inf. Secur.* **2013**, *5*, 158-177.
37. Rodrigues, A.; Camilo, T.; Silva, J.S.; Boavida, F. Diagnostic tools for wireless sensor networks: A comparative survey. *J Network Syst Manage* **2013**, *21*, 408-452.
38. Gomez, C.; Paradells, J. Urban automation networks: Current and emerging solutions for sensed data collection and actuation in smart cities. *Sensors* **2015**, *15*, 22874-22898.
39. Sigfox. <http://www.sigfox.com> (04/04/2016),
40. Lora network. <https://www.lora-alliance.org> (28/03/2016),
41. De Donno, D.; Catarinucci, L.; Tarricone, L. A battery-assisted sensor-enhanced rfid tag enabling heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Sensors J.* **2014**, *14*, 1048-1055.
42. Liutkevicius, A.; Vrubliauskas, A.; Kazanavicius, E. In *A survey of wireless sensor network interconnection to external networks*, 2008 International Conference on Telecommunications and Networking, TeNe 2008, Part of the International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering, CISSE 2008, 2010; pp 41-46.
43. Atzori, L.; Iera, A.; Morabito, G. The internet of things: A survey. *Comput. Networks* **2010**, *54*, 2787-2805.
44. Wu, F.J.; Kao, Y.F.; Tseng, Y.C. From wireless sensor networks towards cyber physical systems. *Pervasive Mob. Comput.* **2011**, *7*, 397-413.
45. Cheour, R.; Lahmar, K.; Abid, M. In *Evolution of wireless sensor networks and necessity of power management technique*, 2011 Faible Tension Faible Consommation, FTFC 2011, Marrakech, 2011; Marrakech, pp 75-78.

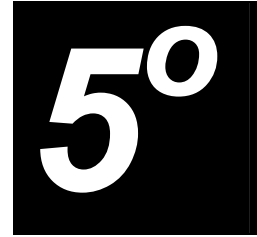
46. Rault, T.; Bouabdallah, A.; Challal, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Comput. Networks* **2014**, *67*, 104-122.
47. Wan, Z.G.; Tan, Y.K.; Yuen, C. In *Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks*, 2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology, ICCT 2011, Jinan, 2011; Jinan, pp 362-367.
48. Bogue, R. Solar-powered sensors: A review of products and applications. *Sens. Rev.* **2012**, *32*, 95-100.
49. Swapna Kumar, S.; Kashwan, K.R. Research study of energy harvesting in wireless sensor networks. *Int. J. Renew. Energy Res.* **2013**, *3*, 745-753.
50. Qian, H.; Sun, P.; Rong, Y. In *Design proposal of self-powered wsn node for battle field surveillance*, 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, FEEM 2012, Hong Kong, 2011; Elsevier BV: Hong Kong, pp 753-757.
51. Zahid Kausar, A.S.M.; Reza, A.W.; Saleh, M.U.; Ramiah, H. Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches. *Renewable Sustainable Energy Rev* **2014**, *38*, 973-989.
52. Berecibar, M.; Gandiaga, I.; Villarreal, I.; Omar, N.; Van Mierlo, J.; Van Den Bossche, P. Critical review of state of health estimation methods of li-ion batteries for real applications. *Renewable Sustainable Energy Rev* **2016**, *56*, 572-587.
53. Le, T.N.; Pegatoquet, A.; Berder, O.; Sentieys, O.; Carer, A. Energy-neutral design framework for supercapacitor-based autonomous wireless sensor networks. *ACM J. Emerg. Technologies Comput. Syst.* **2015**, *12*.
54. Somov, A.; Ho, C.C.; Passerone, R.; Evans, J.W.; Wright, P.K. Towards extending sensor node lifetime with printed supercapacitors. In *9th European Conference on Wireless Sensor Networks, EWSN 2012, Trento, 2012*; Vol. 7158 LNCS, pp 212-227.
55. Kyriakarakos, G.; Piromalis, D.D.; Arvanitis, K.G.; Dounis, A.I.; Papadakis, G. On battery-less autonomous polygeneration microgrids: Investigation of

- the combined hybrid capacitors/hydrogen alternative. *Energy Convers. Manage.* **2015**, *91*, 405-415.
56. Wang, W.; Wang, N.; Vinco, A.; Siddique, R.; Hayes, M.; O'Flynn, B.; O'Mathuna, C. Super-capacitor and thin film battery hybrid energy storage for energy harvesting applications. *J. Phys. Conf. Ser.* **2013**, *476*.
 57. Ansh; Yadav, R.; Deb, D.; Ray, A. In *Multi-purpose auto-programmable reconfigurable embedded system architecture*, 2015 1st International Conference on Electronic Design, Computer Networks and Automated Verification, EDCAV 2015, 2015; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: pp 48-51.
 58. Ruckebusch, P.; De Poorter, E.; Fortuna, C.; Moerman, I. Gitar: Generic extension for internet-of-things architectures enabling dynamic updates of network and application modules. *Ad Hoc Netw.* **2016**, *36*, 127-151.
 59. Optimize for minimal power consumption. <http://datasheet.octopart.com/I-JET-IAR-Systems-datasheet-14433983.pdf> (08/01/2016),
 60. Trace analyzer, user guide. <http://www.ti.com/lit/ug/spruhm7b/spruhm7b.pdf> (01/04/2016),
 61. Djenouri, D.; Baga, M. Synchronization protocols and implementation issues in wireless sensor networks: A review. *IEEE Syst. J.* **2014**.
 62. Garg, K.; Förster, A.; Puccinelli, D.; Giordano, S. Towards realistic and credible wireless sensor network evaluation. In *3rd International ICST Conference on Ad Hoc Networks, ADHOCNETS 2011, Paris, 2012*; Vol. 89 LNICST, pp 49-64.
 63. Mahapatro, A.; Khilar, P.M. Fault diagnosis in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **2013**, *15*, 2000-2026.
 64. Hellbruck, H.; Pagel, M.; Kroller, A.; Bimschas, D.; Pfisterer, D.; Fischer, S. In *Using and operating wireless sensor network testbeds with wisebed*, 2011 the 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Med-Hoc-Net'2011, Favignana Island, Sicily, 2011; Favignana Island, Sicily, pp 171-178.

65. Farooq, M.O.; Kunz, T. Wireless multimedia sensor networks testbeds and state-of-the-art hardware: A survey. In *2011 International Conference on Future Generation Communication and Networking, FGCN 2011, Held as Part of the 3rd International Mega-Conference on Future-Generation Information Technology, FGIT 2011, in Conjunction with GDC 2011, Jeju Island, 2011*; Vol. 265 CCIS, pp 1-14.
66. Tonneau, A.S.; Mitton, N.; Vandaele, J. How to choose an experimentation platform for wireless sensor networks? A survey on static and mobile wireless sensor network experimentation facilities. *Ad Hoc Netw.* **2015**, *30*, 115-127.
67. Kim, H.; Hong, W.K.; Yoo, J.; Yoo, S.E. Experimental research testbeds for large-scale wsns: A survey from the architectural perspective. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2015**, *2015*.
68. Di Francesco, M.; Das, S.K.; Anastasi, G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey. *ACM Trans. Sens. Netw.* **2011**, *8*.
69. Jurdak, R.; Wang, X.R.; Obst, O.; Valencia, P. Wireless sensor network anomalies: Diagnosis and detection strategies. In *Intelligent Systems Reference Library*, Tolk, A.; Jain, L.C., Eds. 2011; Vol. 10, pp 309-325.
70. Nguyen, H.A.; Förster, A.; Puccinelli, D.; Giordano, S. In *Sensor node lifetime: An experimental study*, Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2011 IEEE International Conference on, 2011; IEEE: pp 202-207.
71. Renaux, D.P.B.; Pöttker, F. Power reduction in embedded systems using a design methodology based on synchronous finite state machines. In *4th IFIP TC 10 International Embedded Systems Symposium, IESS 2013, Paderborn, 2013*; Vol. 403, pp 61-72.
72. Kommu, A.; Kanchi, R.R. In *Designing a learning platform for the implementation of serial standards using arm microcontroller lpc2148*, International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2014, 2014; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

73. I2c-bus specification and user manual. http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf (20/03/2016),
74. Zhu, C.; Fei, T.; Liu, X. Multi-machine communication based on i2c-bus. *Sensors Transducers* **2014**, *174*, 138-143.
75. Zhengwei, Z.; Huihui, Z.; Lin, S. In *Design of multi-machine communication system based on twi*, International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2010, Wuhan, 2010; Wuhan, pp 3590-3593.
76. Ismail, K.; Muharam, A.; Pratama, M. In *Design of can bus for research applications purpose hybrid electric vehicle using arm microcontroller*, 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014, 2015; Abu Bakar, R.B.; Froome, C., Eds. Elsevier Ltd: pp 288-296.
77. Tehranipour, M.H.; Ahmed, N.; Nourani, M. Testing soc interconnects for signal integrity using extended jtag architecture. *IEEE Trans Comput Aided Des Integr Circuits Syst* **2004**, *23*, 800-811.
78. Salehi, M.; Ejlali, A. A hardware platform for evaluating low-energy multiprocessor embedded systems based on cots devices. *IEEE Trans Ind Electron* **2015**, *62*, 1262-1269.
79. Keil, R. Embedded development tools trends. *Electron. Prod.* **2013**, *55*.
80. Inc., A. Jtagice mkii physical interfaces. http://www.atmel.com/webdoc/jtagicemkii/jtagicemkii.using_ocd_physical_jtag.html (03-07-2015),

Κεφάλαιο



Περίβλημα Στέγασης και Εγκατάσταση Κόμβων Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.

5.1. Παραδοσιακές Προσεγγίσεις

Το περιβάλλον λειτουργίας των εφαρμογών στη γεωργία είναι εντελώς διαφορετικό από το εσωτερικό και ελεγχόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου εντός του οποίου πραγματοποιούνται οι διαδικασίες του σχεδιασμού, της ανάπτυξης, της υλοποίησης και των δοκιμών καλής λειτουργίας. Γενικά, το περιβάλλον της γεωργίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως "εχθρικό" για τη λειτουργία ενός ηλεκτρονικού συστήματος. Για το λόγο αυτό, κάθε ηλεκτρονική συσκευή η οποία προορίζεται για εγκατάσταση στο δύσκολο περιβάλλον της γεωργίας, επιβάλλεται να διαθέτει προστατευτικό περίβλημα ικανό να ανταπεξέλθει σε διάφορους χημικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ακεραιότητα του συστήματος. Οι πιο συνήθεις από αυτούς τους παράγοντες είναι οι εξής;

- χημικές ουσίες (π.χ. οξέα, βαρέα μέταλλα, κ.α.)
- όξινη βροχή
- ηλιακή ακτινοβολία (ακτινοβολία UV, κ.α.)
- σκόνη
- πάγος
- διάβρωση
- υγρασία
- αλατότητα εδάφους
- περιπτώματα πτηνών και εντόμων
- μικροοργανισμοί (π.χ. μύκητες, βρύα, κ.α.)
- ατμοσφαιρική ρύπανση

Σε σχέση με άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που εγκαθίστανται μονίμως στο εξωτερικό περιβάλλον μιας γεωργικής εφαρμογής, π.χ. ένα σύστημα ελέγχου εκκίνησης και λειτουργίας κινητήρα, οι κόμβοι ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων υφίστανται μεγαλύτερη έκθεση και καταπόνηση από το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, οι συσκευές της πρώτης κατηγορίας είναι συνήθως μόνιμα τοποθετημένες στην κολώνα ηλεκτροδότησης, ενώ οι ασύρματοι κόμβοι:

- τοποθετούνται ανάμεσα στα φυτά της καλλιέργειας,
- είναι εκτεθειμένοι στο εξωτερικό περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας τους,
- τοποθετούνται με την έναρξη της καλλιέργειας και απεγκαθίστανται λίγο πριν ή μετά τη συλλογή της σοδειάς,
- εγκαθίστανται μία ή περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια του έτους αναλόγως των καλλιεργητικών περιόδων καθώς και των ειδών των καλλιεργειών,
- δεν τροφοδοτούνται από σταθερή πηγή τροφοδοσίας (δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας) αλλά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκές κυψέλες), στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας με μεγάλη χωρητικότητα, ή/και από κυκλώματα ανάκτησης ενέργειας από το περιβάλλον (energy harvesting, ή αλλιώς energy scavenging) όπως π.χ. ανάκτηση ενέργειας από ραδιοκύματα ή από διαφορά θερμοκρασίας,
- δεν είναι συχνά επισκέψιμοι από ειδικό προσωπικό όπως μηχανικούς ή τεχνικούς εγκαταστάσεων.

Επομένως, το περίβλημα καθώς επίσης και η στήριξη ενός κόμβου ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων είναι ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την αξιοπιστία και την ευρωστία του. Αυτό το συμπέρασμα στηρίζεται από την πλειοψηφία όσων έχουν πραγματοποιήσει εφαρμογές ασυρμάτων κόμβων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας [1].

Παραδοσιακά, η πιο διαδεδομένη προσέγγιση στο περίβλημα ενός ασύρματου κόμβου είναι η χρήση ηλεκτρολογικών κουτιών γενικής χρήσης. Αυτά συναντώνται τόσο σε εμπορικά διαθέσιμους κόμβους όσο και σε ιδιοκατασκευές στα πλαίσια ερευνητικών πειραματικών υλοποιήσεων στη γεωργία. Η προσέγγιση του σχεδιασμού και της υλοποίησης εξειδικευμένων περιβλημάτων από τους κατασκευαστές περιβλημάτων απαιτεί μεγάλο κόστος αρχικής επένδυσης για την υλοποίηση των μητρών αναπαραγωγής (καλούπια) λαμβάνοντας υπ' όψη το γεγονός πως το περίβλημα αποτελείται από πάρα πολλά διαφορετικά μέρη. Επί πλέον, οι συνεχείς εξελίξεις τόσο στις τεχνολογίες των ίδιων των ασύρματων κόμβων όσο και στις απαιτήσεις της εκάστοτε γεωργικής εφαρμογής, είναι ανασταλτικοί παράγοντες για την τυποποίηση εξειδικευμένων περιβλημάτων. Επομένως, η χρήση

των ηλεκτρολογικών περιβλημάτων γενικής χρήσης αποτελεί τη μόνη συμφέρουσα, από οικονομικής και πρακτικής άποψης, επιλογή. Ένα τυπικό παράδειγμα ηλεκτρολογικού περιβλήματος γενικής χρήσης απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1. Τυπικό παράδειγμα ηλεκτρολογικού περιβλήματος γενικής χρήσης . Στις πλαϊνές μεριές διακρίνονται οι τυποποιημένες οπές με τα προστατευτικά τους καλύμματα οι οποίες χρησιμεύουν για την όδευση καλωδίων.

Τα ηλεκτρολογικά αυτά περιβλήματα διατίθενται σε διάφορα μεγέθη καθώς επίσης και με διαφορετικό βαθμό προστασίας από νερό και σκόνη σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα προστασίας IEC IP Codes [2]. Από πλευράς κόστους, τα εν λόγω περιβλήματα κυμαίνονται από 20 € έως 60 € αναλόγως των διαστάσεών τους, της εσωτερικής τους διαμόρφωσης, αλλά και του παρεχόμενου βαθμού προστασίας από το νερό και τη σκόνη. Το κόστος αυτών των περιβλημάτων ενδεχομένως μπορεί να μην θεωρείται μεγάλο για μια πειραματική υλοποίηση μερικών ασύρματων κόμβων, αλλά για πραγματικές υλοποιήσεις εφαρμογών με μεσαίο ή μεγάλο πλήθος κόμβων το κόστος είναι σημαντικό.

Η προσέγγιση της χρήσης των τυποποιημένων ηλεκτρολογικών περιβλημάτων γενικής χρήσης ενώ εμφανίζεται αρχικά ως μια εξυπηρετική και φαινομενικά χαμηλού κόστους λύση, δημιουργεί πολλές δυσκολίες στην πράξη. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχει πρόβλεψη για τη στήριξη των πλακετών και των άλλων μερών των ασύρματων κόμβων στο εσωτερικό του περιβλήματος. Στην Εικόνα 5.2 διακρίνονται η πλακέτα του ασύρματου κόμβου, η συσκευή φόρτισης και επιτήρησης του συσσωρευτή, ο συσσωρευτής ενέργειας, καθώς και το κύκλωμα σύνδεσης αισθητήρων

τοποθετημένα όλα μαζί στο εσωτερικό ενός ηλεκτρολογικού κουτιού γενικής χρήσης. Είναι εμφανές πως η εσωτερική διαμόρφωση δεν είναι καλαισθητή και δεν ενθαρρύνει τον τεχνικό να επέμβει για την ανεύρεση πιθανής βλάβης. Επί πλέον φαίνεται πως υπάρχει θέμα αταξίας στη δρομολόγηση των καλωδιώσεων.



Εικόνα 5.2. Τυπικό παράδειγμα τοποθέτησης των ηλεκτρονικών μερών και του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας ενός ασύρματου κόμβου εντός ενός ηλεκτρολογικού περιβλήματος γενικής χρήσης.

Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται περισσότερος χώρος, π.χ. ο ασύρματος κόμβος εκτελεί και ρόλο πύλης δεδομένων (data gateway), ή όταν απαιτούνται συσσωρευτές ενέργειας μεγάλου όγκου, κ.α., τότε η συνήθης πρακτική είναι είτε να χρησιμοποιηθεί ένα περίβλημα μεγαλύτερων διαστάσεων, είτε να χρησιμοποιηθούν δύο περιβλήματα, π.χ. ένα για τα ηλεκτρονικά μέρη του κόμβου και ένα για τους συσσωρευτές ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση προκύπτουν δυσκολίες στη στήριξη των μεγάλων ή των πολλών περιβλημάτων στο πεδίο της εφαρμογής.

Επί πλέον, η εσωτερική διαμόρφωση εμποδίζεται από το γεγονός πως τα περιβλήματα εάν τρυπηθούν, π.χ. από βίδες στήριξης των πλακετών, τότε το περίβλημα χάνει την εγγυημένη από τον κατασκευαστή του προστασία από νερό και σκόνη.

Σχετικά με τη στήριξη των περιβλημάτων στο έδαφος, η συνήθης πρακτική είναι η χρήση μεταλλικών ιστών πάνω στους οποίους στερεώνονται τα διάφορα περιβλήματα. Για τη στερέωση συνήθως χρησιμοποιούνται μπράτσα στήριξης από μέταλλο. Στις περιπτώσεις όπου ο ασύρματος κόμβος περιλαμβάνει την ανάκτηση

ενέργειας από φωτοβολταϊκή κυψέλη, τότε αυτή στερεώνεται επίσης πάνω στο μεταλλικό ιστό στήριξης του κόμβου. Κάποιες φορές όταν τα περιβλήματα δεν έχουν πολύ μεγάλο βάρος, μπορούν να τοποθετηθούν στο πίσω μέρος της φωτοβολταϊκής κυψέλης όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.3. Σε κάθε περίπτωση η χρήση μεταλλικών ιστών στήριξης καθιστά σχεδόν απαραίτητη την έδρασή τους σε τοιμεντένια βάση. Σε αντίθετη περίπτωση, ο μεταλλικός ιστός θα πρέπει να βυθιστεί πολύ μέσα στο έδαφος και να ενισχυθεί εξωτερικά με συρμάτινες αντηρίδες στήριξης. Η ύπαρξη μεγάλων μεταλλικών επιφανειών στους ασύρματους κόμβους μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων.



Εικόνα 5.3. Ασύρματος κόμβος σε ηλεκτρολογικό περίβλημα γενικής χρήσης στερεωμένο στο πίσω μέρος μεταλλικού ιστού.

Γενικά, οι παραδοσιακές μέθοδοι περιβλήματος και μηχανικής στήριξης επιφέρουν πρόσθετες δυσκολίες στις εγκαταστάσεις των κόμβων ασύρματων δικτύων στο περιβάλλον της γεωργίας και ενδέχεται να θέσουν σε ρίσκο την επιτυχία των εφαρμογών στο πεδίο.

5.2. Το Μοντέλο του Πλαστικού Σωλήνα ως Περιβλημα Στέγασης και Φορέας Στήριξης

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4, το μοντέλο του τυπωμένου κυκλώματος των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube έχει τις κατάλληλες διαστάσεις και το κατάλληλο σχήμα έτσι ώστε οι πλακέτες να μπορούν να τοποθετηθούν οριζοντίως μέσα σε ένα σωλήνα διαμέτρου 90 mm. Η προσθήκη περισσότερων

πλακετών επέκτασης πραγματοποιείται μέσω των συνδετήρων επέκτασης (Board's Expansion Headers - BECs). Η τελική σύνθεση του ασύρματου κόμβου έχει κυλινδρική μορφή. Η σύνθεση των πλακετών επέκτασης μπορεί άνετα να τοποθετηθεί εντός του σωλήνα δίχως την απαίτηση στήριξής της με βίδες ή άλλο μέσω στερέωσης. Τα τοιχώματα του πλαστικού σωλήνα συγκρατούν ακίνητη τη σύνθεση των πλακετών. Όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα Χ1 και Χ2, οι πλακέτες δεν είναι εντελώς κυκλικές αλλά είναι ευθύγραμμα κομμένες στις δύο άκρες τους. Αυτή η προσέγγιση στον σχεδιασμό του τυπωμένου επιλέχθηκε έτσι ώστε να εξασφαλίζονται ταυτόχρονα τόσο η εύκολη στήριξη όσο και η απρόσκοπτη όδευση των διαφόρων καλωδίων συνδέσεων μεταξύ των πλακετών.

Ο πλαστικός σωλήνας εκτός από το ρόλο του περιβλήματος στέγασης του κόμβου προτείνεται να χρησιμοποιηθεί και ως ιστός στήριξης (support pole). Οι εμπορικά διαθέσιμοι σωλήνες προσφέρουν και τη σκληρότητα, και τη μηχανική αντοχή, αλλά και το μήκος που μπορεί να χρειάζεται οποιαδήποτε εφαρμογή στήριξης στο έδαφος.

Η προσέγγιση της αρχιτεκτονικής SenseTube για τη χρήση πλαστικού σωλήνα ως περίβλημα στέγασης και φορέα στήριξης του κόμβου συνεπάγεται πλήθος πλεονεκτημάτων για την ευρωστία, την αξιοπιστία και την οικονομία της συνολικής εφαρμογής των ασύρματων κόμβων στο πεδίο. Συγκεκριμένα, τα συνεπαγόμενα πλεονεκτήματα συνοψίζονται ως εξής:

α) Ανθεκτικότητα στο περιβάλλον (Ruggedness)

Ένας σωλήνας, π.χ. ύδρευσης ή αποχέτευσης, εξ' ορισμού εξασφαλίζει την μέγιστη προστασία από σκόνη και νερό, ενώ ταυτόχρονα έχει αξιόλογη αντοχή σε οξέα, άλατα, και διάφορες επιβαρυντικές χημικές ουσίες που δύνανται να υπάρχουν στο γεωργικό περιβάλλον. Επομένως, οι πλαστικοί σωλήνες που θεωρούνται ως υλικό χαμηλού κόστους εξασφαλίζουν την προστασία που αναζητούν οι σχεδιαστές και εγκαταστάτες ασυρμάτων κόμβων στα ακριβά περιβλήματα ειδικής ή γενικής χρήσης.

β) Τοποποίηση και ομοιομορφία (Standardization and Uniformity)

Οποτεδήποτε γίνουν αλλαγές στις λειτουργίες και στα κυκλώματα ενός ασύρματου κόμβου συνεπάγεται η ανάγκη για νέα διαρρύθμιση του υπάρχοντος περιβλήματος στέγασης. Αρκετά συχνά επιβάλλεται η αντικατάσταση του περιβλήματος στέγασης αλλά και η αλλαγή στη μηχανική στήριξη του κόμβου επί

του ιστού. Αυτό σημαίνει επί πλέον κόστος αλλά και σπατάλη χρόνου στην ανάπτυξη και την εγκατάσταση του συστήματος στο πεδίο. Με τη χρήση πλαστικού σωλήνα ως περιβλήμα στέγασης και με την προτεινόμενη μορφή για το τυπωμένο κύκλωμα των πλακετών επέκτασης διασφαλίζονται η απρόσκοπτη επέκταση και η οποιαδήποτε τροποποίηση του ασύρματου κόμβου. Ως εκ τούτου, διασφαλίζεται στο μέγιστο βαθμό η επαναχρησιμοποίηση (reusability), η επαναλαμβανόμενη τροποποίηση (reconfigurability), η επεκτασιμότητα (expandability) και η τυποποίηση και ομοιομορφία (standardization and uniformity).

γ) Μη-μεταλλικοί ιστοί στήριξης (Non-metallic Support Poles)

Η χρήση πλαστικού σωλήνα ως φορέα στήριξης αφαιρεί εντελώς τους μεταλλικούς ιστούς στήριξης των κόμβων. Αυτό επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η δραματική μείωση του βάρους και του κόστους του κόμβου. Επί πλέον, διασφαλίζεται η μέγιστη προστασία από κεραυνούς. Επίσης, όταν οι ιστοί των κόμβων είναι απλοί πλαστικοί σωλήνες αποτρέπουν τις κλοπές κόμβων από τα χωράφια εξ' αιτίας της εκμετάλλευσης του μετάλλου των ιστών στην αγορά ανακύκλωσης μετάλλων (metal scrap).

δ) Ευκολία στις υπόγειες εφαρμογές (Underground Applications)

Η χρήση περιβλήματος στέγασης και φορέα στήριξης από πλαστικό σωλήνα διασφαλίζει τη μέγιστη προστασία και ευελιξία σε εφαρμογές κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων εγκατεστημένων εξ' ολοκλήρου ή μερικώς, στο υπέδαφος (underground Wireless Sensors Networks) [3].

ε) Σταθερότητα στην εσωτερική θερμοκρασία (Internal Temperature Stability)

Σύμφωνα με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις, τα περιβλήματα στέγασης των λειτουργικών μερών ενός κόμβου είναι στερεωμένα στους ιστούς στήριξης και είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία αλλά και στο εξωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με την προσέγγιση του σωλήνα, όλα τα λειτουργικά μέρη του κόμβου (πλακέτες, συσσωρευτές, κλπ) μπορούν να έχουν ευνοϊκότερες συνθήκες θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία της μάζας του αέρα που είναι εγκλωβισμένος εντός του πλαστικού σωλήνα καθορίζεται πρώτον από το μέρος του σωλήνα που βρίσκεται πάνω από το έδαφος, και δεύτερον από το μέρος του σωλήνα που βρίσκεται θαμμένο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Όσο πιο βαθιά είναι εγκατεστημένος ο σωλήνας στο έδαφος τόσο πιο σταθερή θα είναι η θερμοκρασία

στο εσωτερικό του σωλήνα. Σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αυξάνουν οι κίνδυνοι για τη μη αξιόπιστη και αδιάλειπτη λειτουργία των κόμβων. Οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 25°C έχει αρνητικές επιπτώσεις στη σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων χρονισμού, π.χ. ταλαντωτές, των μικροελεγκτών καθώς επίσης και στην ονομαστική απόδοση στοιχείων όπως είναι οι συσσωρευτές ενέργειας.

στ) *Ευκολία στην μεταφορά και στην εγκατάσταση (Easy Deployment)*

Εξ' αιτίας του γεγονότος της αντικατάστασης των μεταλλικών ιστών από πλαστικό σωλήνα, το συνολικό βάρος του κόμβου μειώνεται δραματικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη και οικονομικότερη μεταφορά και εγκατάσταση των κόμβων.

ζ) *Μεγάλος εσωτερικός χώρος (Large Internal Space)*

Η προσέγγιση της χρήσης πλαστικού σωλήνα ως περίβλημα στέγασης και φορέας στήριξης εξασφαλίζει πολύ περισσότερο χώρο για τη στέγαση των λειτουργικών μερών του κόμβου. Για παράδειγμα, σε ένα σωλήνα μήκους 2.5 m, με πάχος τοιχώματος 2.7 mm, ο συνολικός αξιοποιήσιμος χώρος είναι περίπου 13723 cm³, ενώ ο χώρος προς αξιοποίηση στο εσωτερικό ενός περιβλήματος γενικής χρήσης διαστάσεων 170 mm x 75 mm ανέρχεται περίπου στα 2100 cm³. Επομένως, υπάρχει πολύ περισσότερος χώρος προς εκμετάλλευση ακολουθώντας την προσέγγιση του πλαστικού σωλήνα της αρχιτεκτονικής SensoTube.

η) *Φιλικότητα με τις κεραιές μετάδοσης ραδιο-συχνοτήτων (Antennae Radio Frequencies Friendliness)*

Οι κεραιές εκπομπής/λήψης των ασύρματων κόμβων, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους, μπορούν πλέον να προστατεύονται από τις αρνητικές συνέπειες της έκθεσής τους στο εξωτερικό περιβάλλοντος τοποθετώντας τις εντός των πλαστικών σωλήνων. Τα υλικά κατασκευής των πλαστικών σωλήνων, όπως π.χ. το PVC, παρουσιάζουν μηδενική εξασθένηση στη διάδοση ραδιο-συχνοτήτων. Από την άλλη μεριά, ο άπλετος διαθέσιμος χώρος εντός του πλαστικού σωλήνα επιτρέπει τη φιλοξενία αρκετά μεγάλου μήκους κεραιών. Αυτό σημαίνει πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεραιές με μεγάλο μήκος κύματος.

θ) *Τακτοποιημένη Καλωδίωση (Neat Cabling)*

Όλες οι καλωδιώσεις μεταξύ των λειτουργικών μερών του ασύρματου κόμβου είναι τακτοποιημένες στο εσωτερικό του πλαστικού σωλήνα. Αυτό διασφαλίζει την προστασία των καλωδίων από το εξωτερικό περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα μειώνεται στο μέγιστο βαθμό η ανάγκη για τρυπήματα στο περίβλημα στέγασης. Επί πλέον, η τάξη στην όδευση των καλωδίων επιτρέπει στο μέγιστο βαθμό την συντήρηση και εμποικία του συστήματος του ασύρματου κόμβου.

ι) Μεγιστοποίηση της απόδοσης των συσσωρευτών ενέργειας (Greater Energy Storage Units Performance)

Οι συσσωρευτές ενέργειας μπορούν να εγκαθίστανται στο κάτω μέρος του σωλήνα. Αυτό το μέρος βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και προστατεύει τα στοιχεία ενέργειας από τις υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος αλλά και από την ηλιακή ακτινοβολία. Ως εκ τούτου η απόδοση των συσσωρευτών ενέργειας δεν θα μειώνεται δραματικά κατά τη λειτουργία της εφαρμογής. Έτσι, δεν απαιτείται υπερ-διαστασιολόγηση των συσσωρευτών ενέργειας για λόγους διασφάλισης της απρόσκοπτης κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του ασύρματου κόμβου. Βεβαίως, η αποφυγή της υπερ-διαστασιολόγησης είναι επωφελής για το κόστος του ασύρματου κόμβου. Από την άλλη μεριά, η δυνατότητα της χαμηλότερης θερμοκρασίας στο εσωτερικό κάτω μέρος του σωλήνα, δηλαδή στο θαμμένο μέρος του, επιτρέπει τη χρήση συσσωρευτών ενέργειας που στηρίζονται στην τεχνολογία των ιόντων λιθίου (Li-Ion).

κ) Φιλικότητα προς τα αγροτικά μηχανήματα (Friendly with Agricultural Machinery)

Η χρήση πλαστικών σωλήνων ως φορείς στήριξης συνεπάγεται τη δραματική μείωση της ανάγκης για χρήση αντηρίδων στήριξης, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις των μεταλλικών ιστών εξ' αιτίας του μεγάλου βάρους τους. Ως εκ τούτου, η έλλειψη αντηρίδων επιτρέπει στα διάφορα γεωργικά μηχανήματα να πραγματοποιούν τις εργασίες τους δίχως περιορισμούς στην περιοχή δράσης τους.

5.2.1. Επιλογή Πλαστικού Σωλήνα

Οι στόχοι στην επιλογή συγκεκριμένου σωλήνα ήταν:

- να έχει διάμετρο 90 mm,
- το εξαιρετικά χαμηλό κόστος,
- η ευκολία στην ανεύρεση και αγορά, και

- η αντοχή του υλικού κατασκευής στις συνθήκες των γεωργικών εφαρμογών,

Οι πλαστικοί σωλήνες ύδρευσης και αποχέτευσης από PVC (πολυ-βινυλοχλωρίδιο) πληρούν τους παραπάνω στόχους. Κοστίζουν περίπου 3€/m, είναι ευρέως διαθέσιμοι στην τοπική και διεθνή αγορά, διατίθενται σε διάμετρο 90 mm, και συμφωνούν με διεθνή πρότυπα για την αντοχή και την προστασία τους. Μια ισοδύναμη επιλογή αποτελούν οι σωλήνες που κατασκευάζονται από υλικό PVC-U (Unplasticized PVC).

Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται οι προδιαγραφές των σωλήνων που βρέθηκαν με μεγάλη άνεση στην Ελληνική αγορά. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διατριβής χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες 90 mm πάχους 2.7 mm και όπως αποδείχθηκε στην πράξη, εκτός των άλλων αναμενόμενων πλεονεκτημάτων, εμφάνισαν εξαιρετική αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις τόσο κατά την μεταφορά τους όσο και κατά την τοποθέτησή τους στο έδαφος της καλλιέργειας.

Πίνακας 5.1. Τυπικές προδιαγραφές σωλήνων διαμέτρου 90 mm.

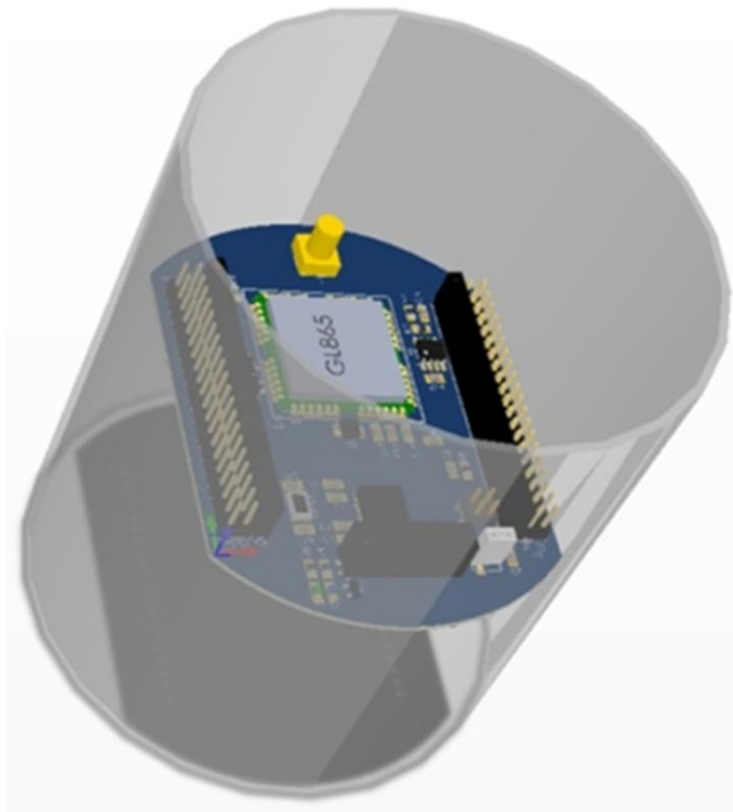
Parameter	Πίεση (Atms)	
	4 Atms	6 Atms
Υλικό Κατασκευής	PVC-U	
Εξωτερική Διάμετρος	90 mm	
Πάχος Τοιχώματος	1.8 mm έως 2.2 mm	2.7 mm έως 3.2 mm
Βάρος/Μήκος	0.785 kgr/m	1.15 kgr/m
Συμβατότητα με Πρότυπα	EN1452-2 [4], DIN 8061, DIN 8062	
Κόστος	3 € /m	

Για όλους τους προαναφερόμενους τύπους σωλήνων προσφέρονται από την αγορά και διάφορα επί πλέον μέρη, π.χ. καπάκια, μούφες, κλπ. Για τις ανάγκες ενός πλαστικού σωλήνα ο οποίος χρησιμοποιείται ως περίβλημα στέγασης και φορέας στήριξης ασύρματων κόμβων απαιτούνται μόνο δύο καπάκια τα οποία τοποθετούνται ένα στο επάνω άκρο κι ένα στο κάτω άκρο του σωλήνα έτσι ώστε να κλείνει υδατοστεγώς και αεροστεγώς ο σωλήνας.

5.2.2. Ένθεση Κόμβων σε Πλαστικό Σωλήνα

Το μήκος του πλαστικού σωλήνα καθορίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τον οποίο καθορίζεται το ύψος των μεταλλικών ιστών στήριξης των κόμβων λαμβάνοντας υπ' όψη το ύψος και το είδος των καλλιεργειών. Ως εκ τούτου, το ύψος του ιστού στήριξης, και κατ' επέκταση και του πλαστικού σωλήνα, μπορεί να είναι από 2.5 m μέχρι και 5 m για τις περιπτώσεις των δενδροκαλλιεργειών ή των δασών.

Στην Εικόνα 5.4 απεικονίζεται σε τρισδιάστατη εικονική άποψη η ένθεση μιας πλακέτας επέκτασης σχεδιασμένης βάσει της αρχιτεκτονικής SenseTube η οποία είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό ενός πλαστικού σωλήνα. Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η φωτογραφία μιας πραγματικής υλοποίησης της εν λόγω αρχιτεκτονικής.



Εικόνα 5.4. Τρισδιάστατη εικονική αναπαράσταση πλακέτας επέκτασης κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων τοποθετημένης εντός περιβλήματος στέγασης από πλαστικό σωλήνα.



Εικόνα 5.5. Φωτογραφία πλακέτας επέκτασης κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων τοποθετημένης εντός περιβλήματος στέγασης από πλαστικό σωλήνα.

Η σύνθεση των πλακετών επέκτασης του ασύρματου κόμβου μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε ύψος εντός του σωλήνα. Αυτό πραγματοποιείται εύκολα και οικονομικά χρησιμοποιώντας έναν δεύτερο πλαστικό σωλήνα μικρότερης διαμέτρου, π.χ. 70 cm, στο εσωτερικό κάτω μέρος του σωλήνα των 90 mm. Ο δεύτερος αυτός σωλήνας λειτουργεί ως αποστάτης συγκράτησης της σύνθεσης των πλακετών επέκτασης και μπορεί να κοπεί στο κατάλληλο μήκος έτσι ώστε να ικανοποιείται το ύψος συγκράτησης των πλακετών. Οι συσσωρευτές ενέργειας, είναι προτιμότερο να τοποθετούνται στο κάτω άκρο του σωλήνα των 90 mm, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (μειωμένη θερμοκρασία, κλπ), αλλά και γιατί με την προσέγγιση αυτή το κέντρο βάρους όλου του κόμβου μετατοπίζεται στο κάτω μέρος του φορέα στήριξης το οποίο είναι θαμμένο στο έδαφος. Έτσι, διασφαλίζεται ακόμη περισσότερο η σταθερότητα στήριξης του πλαστικού ιστού στο έδαφος.

Στις περιπτώσεις των υπογείων κόμβων, οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί των κόμβων μπορούν να χρησιμοποιήσουν οτιδήποτε από μια μεγάλη σειρά παρελκόμενων όπως π.χ. φλάντζες, συνδέσμους, μούφες, καπάκια, κ.α. έτσι ώστε να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε απαίτηση στην εφαρμογή τους διατηρώντας ταυτόχρονα τη μέγιστη προστασία από το νερό, την υγρασία, και το χώμα.

5.3. Παραδείγματα Χρήσης

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 5.6 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα χρήσης κόμβων σχεδιασμένων και υλοποιημένων βάσει της αρχιτεκτονικής SensoTube. Συγκεκριμένα, στην αριστερή φωτογραφία ο κόμβος είναι εγκατεστημένος σε δένδρωνα, ενώ στη δεξιά φωτογραφία ο κόμβος απεικονίζεται εγκατεστημένος σε καλλιέργεια αραβοσίτου. Και στις δύο περιπτώσεις εγκατάστασης, χρησιμοποιήθηκε πλαστικός σωλήνας από PVC-U πάχους τοιχώματος 2.7 mm. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες κανένα από τα λειτουργικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται ο κόμβος δεν είναι εκτεθειμένο στο εξωτερικό περιβάλλον. Επί πλέον, όλες οι καλωδιώσεις είναι κι αυτές τοποθετημένες στο εσωτερικό του πλαστικού σωλήνα.

Η φωτοβολταϊκή κυψέλη του κόμβου είναι εγκατεστημένη στο άνω άκρο του σωλήνα μέσω απλής και οικονομικής μηχανικής στήριξης από μέταλλο η οποία είναι στερεωμένη στο καπάκι του πλαστικού σωλήνα ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα δίχως να αποσυναρμολογείται (βλ. Εικόνα 5.7).

Οι κεραίες των ασύρματων πομποδεκτών των κόμβων είναι πλήρως προστατευμένες στο εσωτερικό του πλαστικού σωλήνα. Στην Εικόνα 5.5 διακρίνεται η χρήση μιας κεραίας η οποία είναι συνδεδεμένη με την πλακέτα επέκτασης του κόμβου μέσω συνδετήρων τύπου SMA.



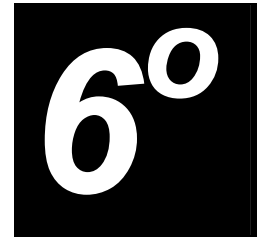
Εικόνα 5.6. Παραδείγματα εγκαταστάσεων κόμβων βασισμένων στην αρχιτεκτονική SensoTube σε δένδρωνα (αριστερά) και σε καλλιέργεια αραβοσίτου (δεξιά). Διακρίνεται η χρήση πλαστικού σωλήνα από PVC ως περίβλημα στέγασης αλλά και ως φορέα στήριξης, δηλ. ως ιστός τοποθέτησης.



Εικόνα 5.7. Λεπτομέρεια από κόμβο αρχιτεκτονικής SensoTube στην οποία διακρίνεται ο μηχανισμός στήριξης της φωτοβολταϊκής κυψέλης στο άνω άκρο του φορέα στήριξης.

Βιβλιογραφία

1. Kanda, K.; Ishii, T.; Kameoka, T.; Saitoh, K.; Sugano, R. In *Field monitoring system using agri-server*, 50th Annual Conference on Society of Instrument and Control Engineers, SICE 2011, Tokyo, 2011; Tokyo, pp 2069-2072.
2. Degrees of protection provided by enclosures (ip code). <https://webstore.iec.ch/publication/2452> (20/03/2016),
3. Yu, X.; Wu, P.; Han, W.; Zhang, Z. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture. *Comput Stand Interfaces* **2013**, *35*, 59-64.
4. Iso 145-2:2009.. Plastics piping systems for water supply and for buried and above-ground drainage and sewerage under pressure -- unplasticized poly(vinyl chloride) (pvc-u) -- part 2: Pipes. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=50362 (09/04/2016),



Σχεδιασμός Κόμβων Βάσει του Υποδείγματος Υλοποίησης της Αρχιτεκτονικής *SensoTube*

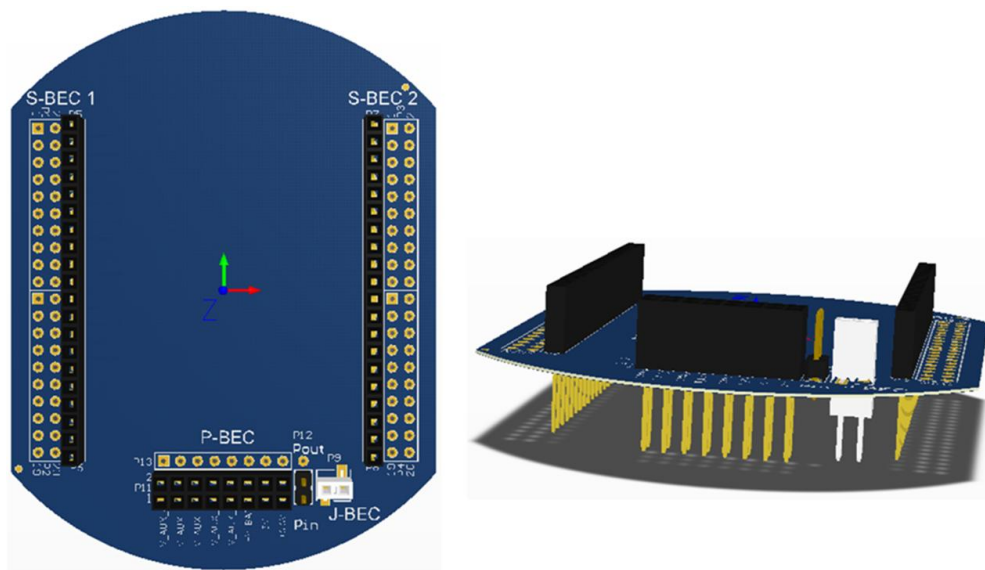
Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.
- [J-3]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*Radio Frequency Identification and Wireless Sensor Networks Application Domains Integration using DASH7 Mode 2 Standard in Agriculture*», **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics**, Vol. 1, No. 2, pp. 178-189, 2015. DOI: 10.1504/IJSAMI.2015.070753
- [J-1]. P.Papageorgas, D.Piromalis, K.Antonakoglou, G.Vokas, D.Tseles and K.G.Arvanitis, «*Smart Solar Panels: In-Situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks*», **Energy Procedia (ISSN: 1876-6102)**, Vol. 36, pp. 535-345, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.062 (Listed in Scopus).
- [C-1]. D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis and N.A.Sigrimis, «*A DASH7-based WSN Node with IEEE 1451 Compatibility for Precision Farming Applications*», **Proceedings of the 2013 EFITA/WCCA/CIGR Conference on Sustainable Agriculture Through ICT Innovation**, Torino, Italy, June 23-27, 2013. Paper C0276.
- [C-2]. D.D.Piromalis and K.G.Arvanitis, «*RFID and WSN Applications Integration using DASH7 Mode 2 Standard in Agriculture*», **Proceedings of the XXXV CIOSTA & CIGR V Conference 2013: From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry**, Billund, Denmark, July 3-5, 2013. Presented at the Conference and included in the CD-ROM Proceedings.
- [C-3]. D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis and N.A.Sigrimis, «*DASH7 Mode 2: A Promising Perspective for Wireless Agriculture*», **Proceedings of the 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry**, Espoo, Finland, August 28-29, 2013, pp. 127-132. DOI: 10.3182/20130828-2-SF-3019.00028. (Listed in Scopus).

6.1. Το Υπόδειγμα Σχεδιασμού της Αρχιτεκτονικής SensoTube

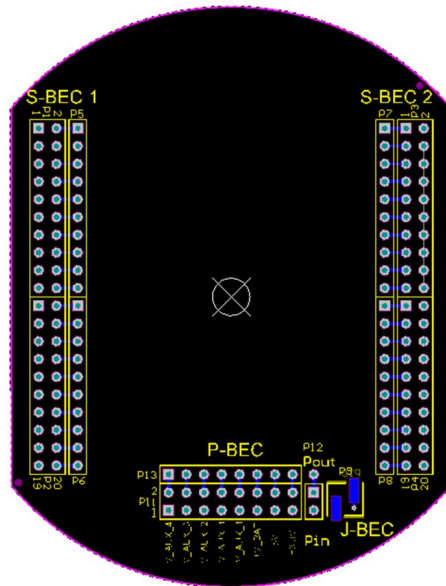
Το υπόδειγμα σχεδιασμού (design template) της αρχιτεκτονικής SensoTube αποτελεί ένα σχεδιαστικό βοήθημα για όσους επιθυμούν να σχεδιάσουν μια πλακέτα επέκτασης βασισμένη στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Η έμφαση στη δημιουργία του υποδείματος σχεδιασμού δόθηκε στη χρήση των μηχανισμών δι-επίπεδων υπηρεσιών διαχείρισης σημάτων, προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης, καθώς και της διαχείρισης ενέργειας (βλ. Κεφάλαιο 4).

Συγκεκριμένα για τη δι-επίπεδη υπηρεσία διαχείρισης σημάτων, ο μηχανισμός επέκτασης περιλαμβάνει δύο συνδετήρες επέκτασης πλακετών, τους S-BEC1 και S-BEC2. Στην Εικόνα 6.1 φαίνονται οι δύο συνδετήρες επέκτασης να διαπερνούν το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης. Κάθε ένας από τους δύο αυτούς συνδετήρες περιλαμβάνει είκοσι (20) επαφές σήματος (signal pins).



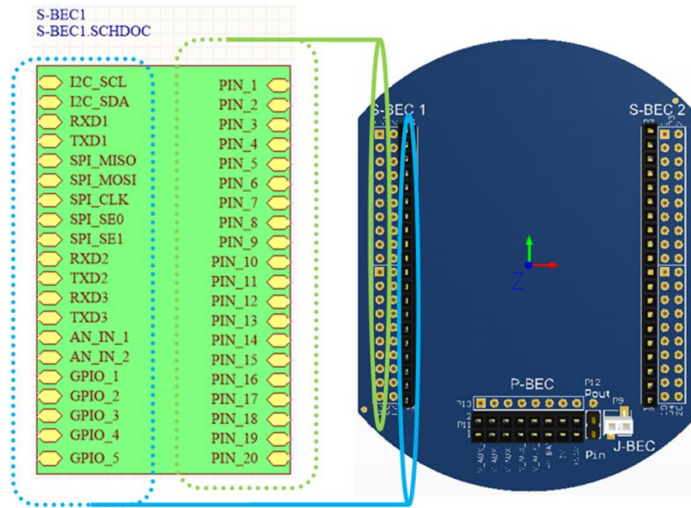
Εικόνα 6.1. Το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube στο οποίο διακρίνονται οι δύο συνδετήρες επέκτασης πλακετών S-BEC1 (αριστερά) και S-BEC2 (δεξιά).

Αριστερά του συνδετήρα επέκτασης S-BEC1, και δεξιά του συνδετήρα επέκτασης S-BEC2, έχουν τοποθετηθεί δύο σειρές pads, και όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2, το κάθε ένα από τα pads αυτά είναι συνδεδεμένο με ένα pad του συνδετήρα επέκτασης.

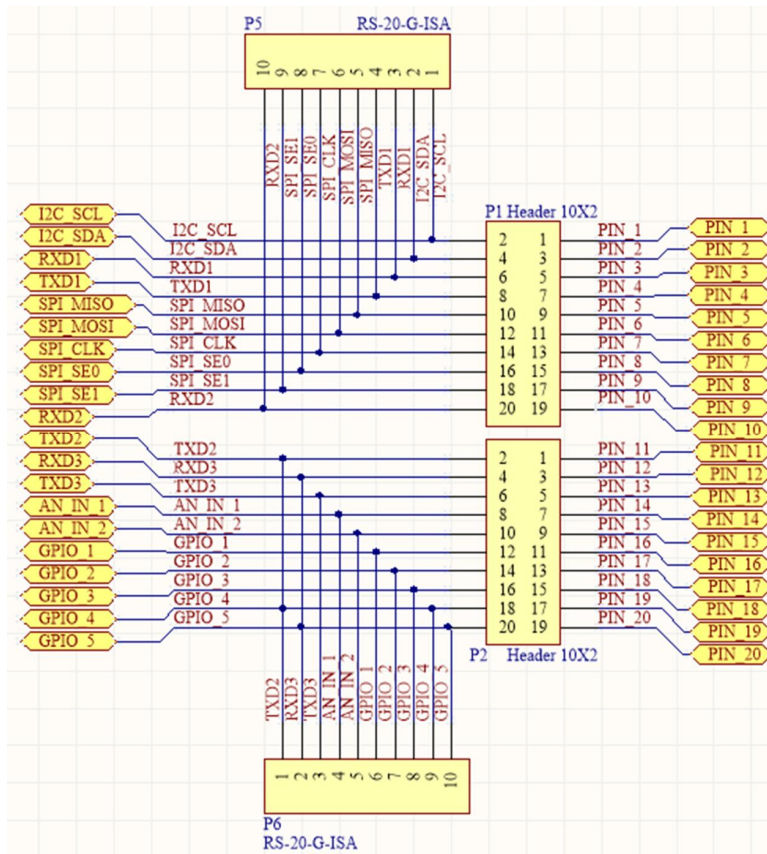


Εικόνα 6.2. Το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης στο οποίο διακρίνονται οι συνδέσεις, με μπλε χρώμα νησίδων (traces), των πρόσθετων σειρών pads με τα pads των συνδετήρων επέκτασης S-BEC1 και S-BEC2.

Για τη μεγαλύτερη ευελιξία και απλότητα στη χρήση του υποδείγματος σχεδιασμού, υιοθετήθηκε η μέθοδος αναπαράστασης των διαφόρων σημάτων του τυπωμένου κυκλώματος μέσω συμβολο-σελίδων (sheet symbols). Αυτή είναι μια διαδομένη μέθοδος κυρίως για την απεικόνιση μεγάλων σχηματικών κυκλωμάτων. Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η αναπαράσταση των σημάτων της σειράς pads δίπλα από το συνδετήρα S-BEC1 καθώς και τα σήματα του εν λόγω συνδετήρα. Το sheet symbol διακρίνεται στο αριστερό μέρος της Εικόνας 6.3. Στο αριστερό του μέρος διακρίνονται τα σήματα του συνδετήρα επέκτασης S-BEC1 ενώ στο δεξιό μέρος του διακρίνονται τα σήματα της σειράς των pads. Όπως είναι γνωστό, σε κάθε sheet symbol αντιστοιχεί ένα σχηματικό κύκλωμα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του sheet symbol της Εικόνας 3.3 το σχηματικό κύκλωμα είναι αυτό που παρατίθεται στην Εικόνα 3.4. Στο σχηματικό αυτό κύκλωμα έχουν υλοποιηθεί όλες οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ όλων των σημάτων όλων των σειρών pads του μηχανισμού επέκτασης S-BEC1. Οι σχεδιαστές πλακετών επέκτασης αρχιτεκτονικής SensoTube, δεν είναι υποχρεωμένοι να σχεδιάζουν κάθε φορά το κύκλωμα του σχηματικού κυκλώματος της Εικόνας 3.4. Αρκεί η τοποθέτηση του sheet symbol που περιέχει ήδη το κύκλωμα αυτό.

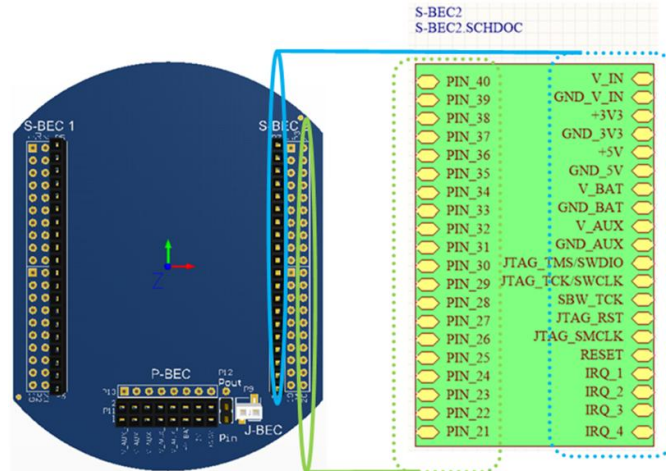


Εικόνα 6.3. Αναπαράσταση μέσω μεθόδου της συμβολο-σελίδας των συνδέσεων των σημάτων του συνδετήρα επέκτασης S-BEC1 και των σημάτων της σειράς pads που βρίσκονται παράλληλα με αυτόν.

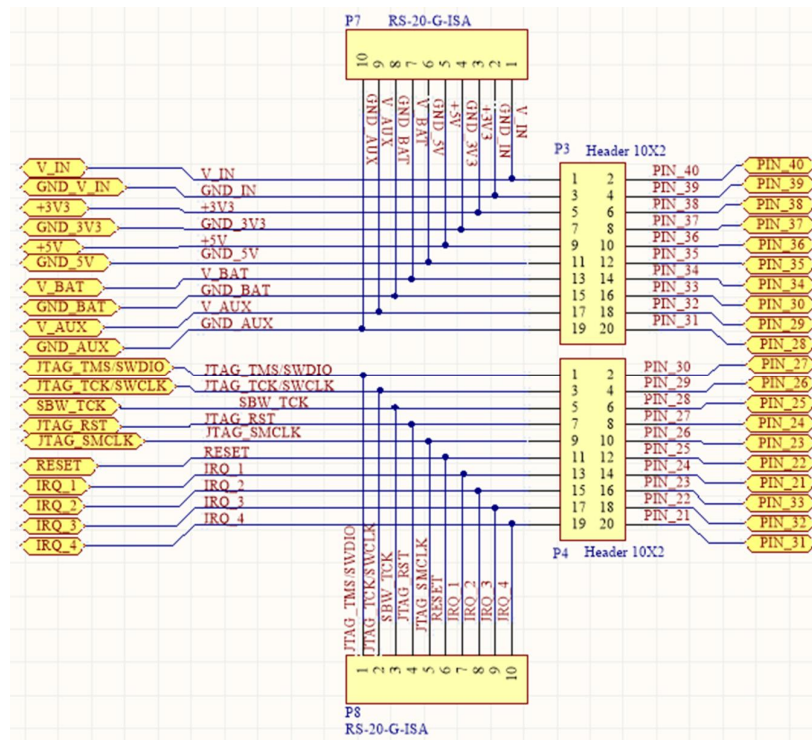


Εικόνα 6.4. Το σχηματικό κύκλωμα της σύνδεσης όλων των σημάτων του μηχανισμού επέκτασης S-BEC1.

Αντίστοιχα και για το μηχανισμό S-BEC2, δημιουργήθηκε ένα ξεχωριστό sheet symbol, αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Το σχηματικό κύκλωμα αυτού του sheet symbol παρατίθεται στην Εικόνα 3.6.

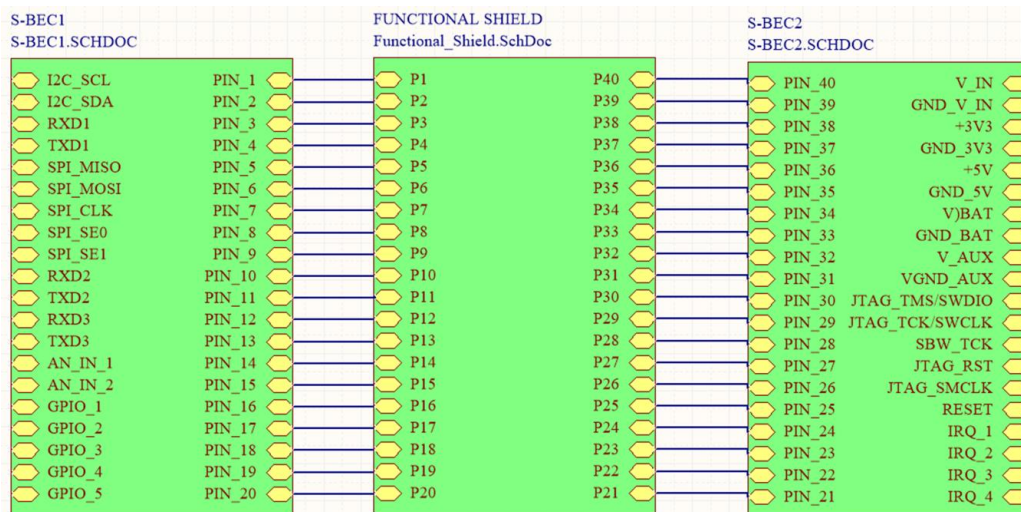


Εικόνα 6.5. Αναπαράσταση μέσω της μεθόδου συμβολο-σελίδας των συνδέσεων των σημάτων του συνδετήρα επέκτασης S-BEC2 και των σημάτων της σειράς pads που βρίσκονται παράλληλα με αυτόν.



Εικόνα 6.6. Το σχηματικό κύκλωμα της σύνδεσης όλων των σημάτων του μηχανισμού επέκτασης S-BEC2.

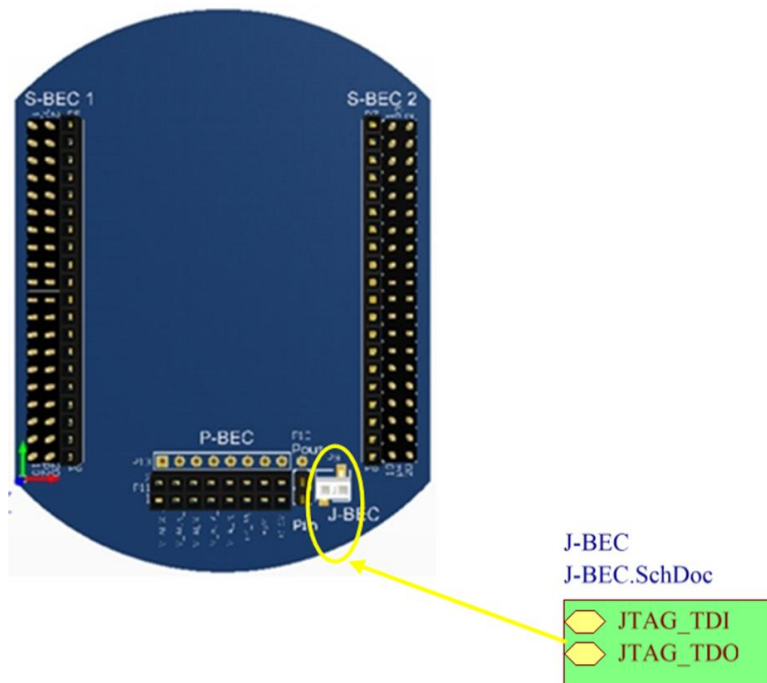
Στην Εικόνα 6.6 απεικονίζεται το σχηματικό κύκλωμα των συνδέσεων των σημάτων μιας νέας πλακέτας επέκτασης, σύμφωνα με το υπόδειγμα σχεδιασμού. Σ' αυτό διακρίνονται στο αριστερό και δεξιό μέρος τα sheet symbols των μηχανισμών επέκτασης και διαχείρισης σημάτων S-BEC1 και S-BEC2. Το sheet symbol στο κέντρο αντιστοιχεί στο σχηματικό κύκλωμα της συγκεκριμένης πλακέτας ελέγχου. Ο σχεδιαστής της νέας πλακέτας μπορεί να αποφασίσει το είδος και το πλήθος των σημάτων που, σύμφωνα με τις ιδιαίτερες λειτουργίες της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης, θα συνδέσει στα pads δίπλα από τα pads των συνδετήρων επέκτασης. Στο παράδειγμα της Εικόνας 6.6, εμφανίζονται συνδεδεμένα σαράντα (40) σήματα. Στη συνέχεια, ο σχεδιαστής σχεδιάζει το σχηματικό κύκλωμα της νέας πλακέτας επέκτασης μέσα στο κεντρικό sheet symbol. Με τη μέθοδο αυτή οι σχεδιαστές εστιάζουν αποκλειστικά στο σχεδιασμό των κυκλωμάτων της νέας πλακέτας επέκτασης χρησιμοποιώντας έτοιμα τα σχηματικά κυκλώματα του μηχανισμού επέκτασης και διαχείρισης σημάτων S-BEC1 και S-BEC2. Στις επόμενες ενότητες θα φανεί με πιο σαφή τρόπο η χρήση των sheet symbols μέσω παραδειγμάτων σχεδίασης συγκεκριμένων πλακετών επέκτασης.



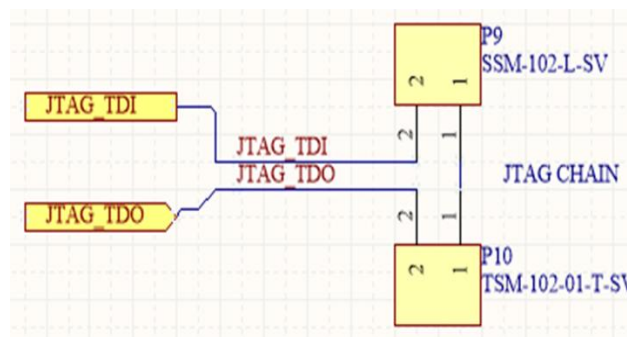
Εικόνα 6.7. Σχεδιασμός νέας πλακέτας επέκτασης χρησιμοποιώντας το υπόδειγμα σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής SensoTube. Στο κέντρο διακρίνεται το sheet symbol της υπό-σχεδίαση νέας πλακέτας.

Η ίδια μέθοδος, αυτή των sheet symbols, ακολουθείται και για τους μηχανισμούς J-BEC και P-BEC, για τη δι-επιπεδη διαχείριση της λειτουργιάς του

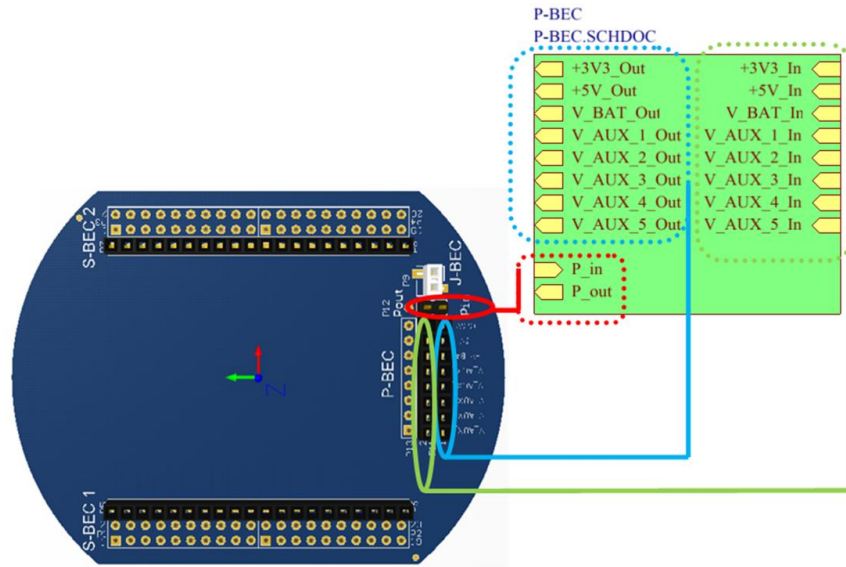
προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης, και του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης της ενέργειας, αντίστοιχα. Στην Εικόνα 6.8 και στην Εικόνα 6.9 παρατίθενται το sheet symbol και το σχηματικό κύκλωμα του μηχανισμού J-BEC. Στην Εικόνα 6.10 και στην Εικόνα 6.11 παρατίθενται το sheet symbol και το σχηματικό κύκλωμα του μηχανισμού P-BEC.



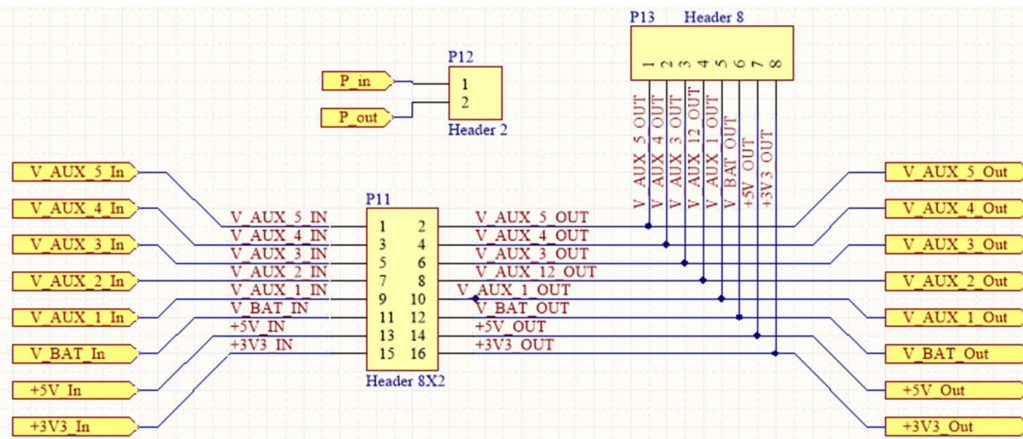
Εικόνα 6.8. Το sheet symbol του δι-επίπεδου μηχανισμού J-BEC για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση των μικροελεγκτών των πλακετών επέκτασης.



Εικόνα 6.9. Το σχηματικό κύκλωμα του sheet symbol του μηχανισμού J-BEC.



Εικόνα 6.10. Το sheet symbol του δι-επίπεδου μηχανισμού P-BEC για τη διαχείριση ενέργειας των πλακετών επέκτασης.



Εικόνα 6.11. Το σχηματικό κύκλωμα του sheet symbol του μηχανισμού P-BEC

Με τη βοήθεια της μεθόδου των sheet symbols κατέστη δυνατή η δημιουργία ενός υποδείγματος σχεδιασμού στο οποίο με τυποποιημένο και ιεραρχημένο τρόπο παρέχονται σε μορφή έτοιμων σχηματικών κυκλωμάτων όλοι οι μηχανισμοί δι-επίπεδων υπηρεσιών και επέκτασης. Επί πλέον, τα σχηματικά κυκλώματα των συνδετήρων μαζί με το τυπωμένο κύκλωμα του μοντέλου αναφοράς της αρχιτεκτονικής SensoTube παρέχονται έτοιμα προς χρήση για το σχεδιασμό κάθε νέας πλακέτας επέκτασης. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η πολυπλοκότητα κατά το στάδιο του σχεδιασμού, καθώς επίσης μειώνεται ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης.

Λαμβάνοντας υπ' όψη το παρεχόμενο υπόδειγμα σχεδιασμού, η διαδικασία της ανάπτυξης μιας νέας πλακέτας επέκτασης απλοποιείται και μπορεί να τυποποιηθεί στα εξής οκτώ (8) βήματα:

- 1) Δημιουργία νέου έργου σχεδιασμού (creation of a new design project),
- 2) Αρχικοποίηση του σχεδιασμού της νέας πλακέτας επέκτασης (initiation of the new shield circuitry design),
- 3) Συνδέσεις απαραίτητων σημάτων (consideration and establishment of required signals),
- 4) Επιλογές για τη διαχείριση ενέργειας (decisions for power management),
- 5) Επιλογές για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή (considerations regarding the programming and debugging of the shield's MCU),
- 6) Σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης (design of the schematic drawing of the shield's circuitry),
- 7) Σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης (design of the printed-circuit board (PCB) of the shield), και
- 8) Κατασκευή και έλεγχος της πλακέτας επέκτασης (fabrication and Testing of the Shield).

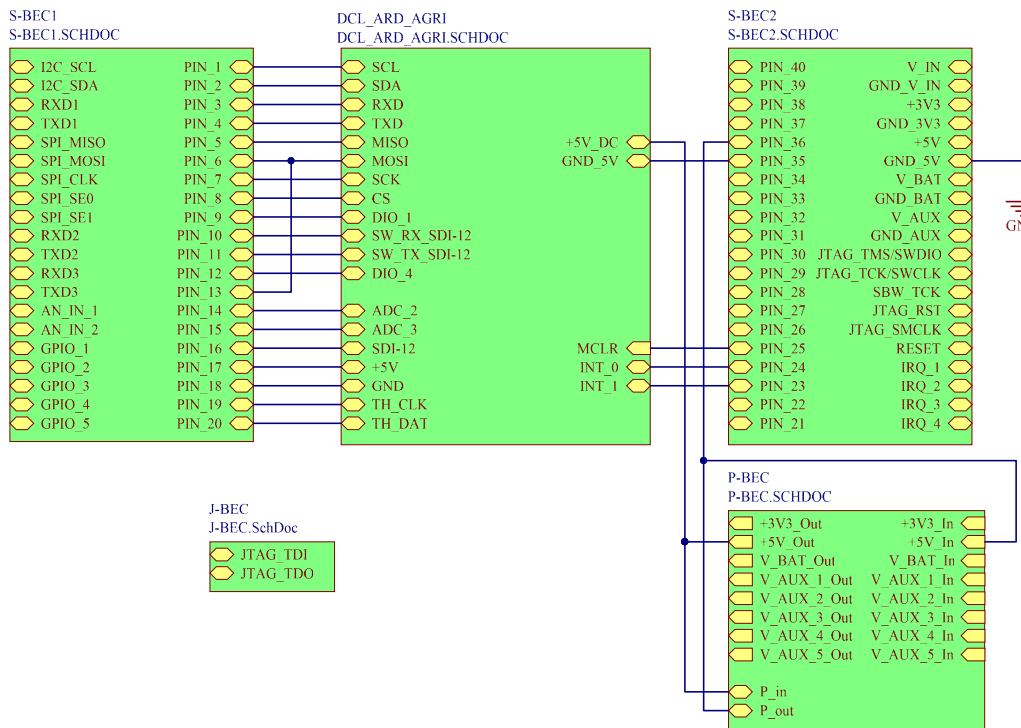
6.2. Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης για τη Μέτρηση Περιβαλλοντικών και Εδαφικών Παραμέτρων

Σε αυτό το παράδειγμα σχεδιασμού εξηγούνται οι προβληματισμοί και τα βήματα ανάπτυξης μιας πλακέτας επέκτασης επιπέδου λειτουργίας DCL (Data acquisition and Control Layer). Η πλακέτα επέκτασης αυτή έχει ως σκοπό τη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα, καθώς επίσης και τη μέτρηση υγρασίας εδάφους (soil moisture) σε εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας. Επίσης, στο παράδειγμα σχεδιασμού φαίνεται πως γίνεται η χρήση του υποδείγματος σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Συγκεκριμένα τα βήματα για την ανάπτυξη της εν λόγω πλακέτας επέκτασης είναι:

- 1) *Δημιουργία νέου έργου σχεδιασμού* (creation of a new design project): δημιουργία ενός νέου έργου (project) στην εφαρμογή λογισμικού Η/Υ για τη σχεδίαση ηλεκτρονικών συστημάτων (EDA- Electronic Design Automation.). Οι σχεδιαστές μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε από τα υπάρχοντα σχεδιαστικά εργαλεία επιθυμούν. Για την εξυπηρέτηση των αναγκών της συγκεκριμένης διατριβής χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό εργαλείο Altium Designer. Προσθήκη των παρεχόμενων sheet symbols του υποδείγματος σχεδιασμού εντός του νέου έργου σχεδιασμού. Προσθήκη των αρχείων των παρεχόμενων σχηματικών κυκλωμάτων των εν λόγω sheet symbols στον κατάλογο του νέου έργου. Με τη διαδικασία αυτή το έργο περιέχει όλα τα εξαρτήματα (components) καθώς και τις συνδέσεις των σημάτων για όλους τους τρεις δι-επίπεδους μηχανισμούς, δηλαδή τους S-BEC, J-BEC και P-BEC. Δεν απαιτούνται αλλαγές ή προσθήκες στα κυκλώματα των sheet symbols καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης και χρησιμοποιούνται απλώς ως έχουν.
- 2) *Αρχικοποίηση του σχεδιασμού της νέας πλακέτας επέκτασης* (initiation of the new shield circuitry design): Δημιουργία ενός νέου sheet symbol. Αυτό το sheet symbol θα περιλαμβάνει το σχηματικό κύκλωμα της νέας πλακέτας επέκτασης. Είναι το μέρος στο οποίο ο σχεδιαστής επικεντρώνεται στο σχεδιασμό των ιδιαίτερων κυκλωμάτων και λειτουργιών της πλακέτας του. Η ονομασία που δίνεται στο νέο sheet symbol θα πρέπει για λόγους σαφήνειας να σχετίζεται με τη λειτουργία της εκάστοτε πλακέτας επέκτασης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται το όνομα *DCL_ARD_AGRI* (θα εξηγηθεί παρακάτω ο λόγος για το συγκεκριμένο όνομα).
- 3) *Συνδέσεις απαραίτητων σημάτων* (consideration and establishment of required signals): Δημιουργία επαφών σημάτων στο sheet symbol της πλακέτας επέκτασης. Οι επαφές αυτές, σύμφωνα με την ορολογία των εργαλείων σχεδιασμού, καλούνται *sheet ports*. Στο συγκεκριμένο βήμα σχεδιασμού, ο σχεδιαστής έχει την δυνατότητα να ορίσει πόσα και ποιά σήματα από τα κυκλώματα της πλακέτας επέκτασης θα πρέπει να δρομολογηθούν προς τις επαφές των σημάτων των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης. Για τη συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης, και σχετικά με τη μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο

διπλός αισθητήρας DHT22. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή έχει εξηγηθεί αναλυτικά παραπάνω στην ενότητα 3.4. Ο αισθητήρας αυτός θα τοποθετηθεί εξωτερικά από το περίβλημα στέγασης της πλακέτας επέκτασης (δηλαδή του ασύρματου κόμβου αισθητήρων) και επικοινωνεί με το μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης μέσω δύο σημάτων, του σήματος Clock και του σήματος Data. Για την τροφοδοσία του ο αισθητήρας χρειάζεται τάση +5 Vdc. Σχετικά με τη μέτρηση υγρασίας εδάφους, οι περισσότεροι από τους διαθέσιμους αισθητήρες της αγοράς χρησιμοποιούν το διαύλο επικοινωνίας *SDI-12*. Για τη διασύνδεση αισθητήρων διαύλου *SDI-12* με τον μικροελεγκτή του συστήματος απαιτείται μόνο ένα σήμα (single-wire communication). Για τη λειτουργία του αισθητήρα υγρασίας εδάφους απαιτείται τάση +5 Vdc. Για το μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης επιλέχθηκε ο μικροελεγκτής των 8-bit AVR ATmega328. Η συγκεκριμένη επιλογή γίνεται για τους λόγους που περιγράφονται παραπάνω στην ενότητα 3.4. Με το συγκεκριμένο μικροελεγκτή, η πλακέτα επέκτασης μπορεί να λειτουργήσει ως μια κύρια πλακέτα αρχιτεκτονικής Arduino, αλλά επωφελούμενη από τους παρεχόμενους δι-επίπεδους μηχανισμούς διαχείρισης και επέκτασης. Στην Εικόνα 6.12, στο κάτω αριστερό μέρος του sheet symbol των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης με την ονομασία DCL_ARD_AGRI, διακρίνονται τα sheet ports που δημιουργήθηκαν για τη διασύνδεση της πλακέτας επέκτασης με τους εξωτερικούς αισθητήρες. Τα σήματα αυτά είναι τα: *SDI-12*, *TH_CLK* (DHT 22 clock), *TH_DATA* (DHT 22 data), +5 Vdc, και GND (γείωση). Τα υπόλοιπα sheet port έχουν δημιουργηθεί για τη δρομολόγηση όλων των υπόλοιπων διαθέσιμων σημάτων του μικροελεγκτή προς τους συνδεδεμένους επέκτασης της πλακέτας με σκοπό την αξιοποίησή τους από ενδεχόμενες άλλες εφαρμογές στο μέλλον.



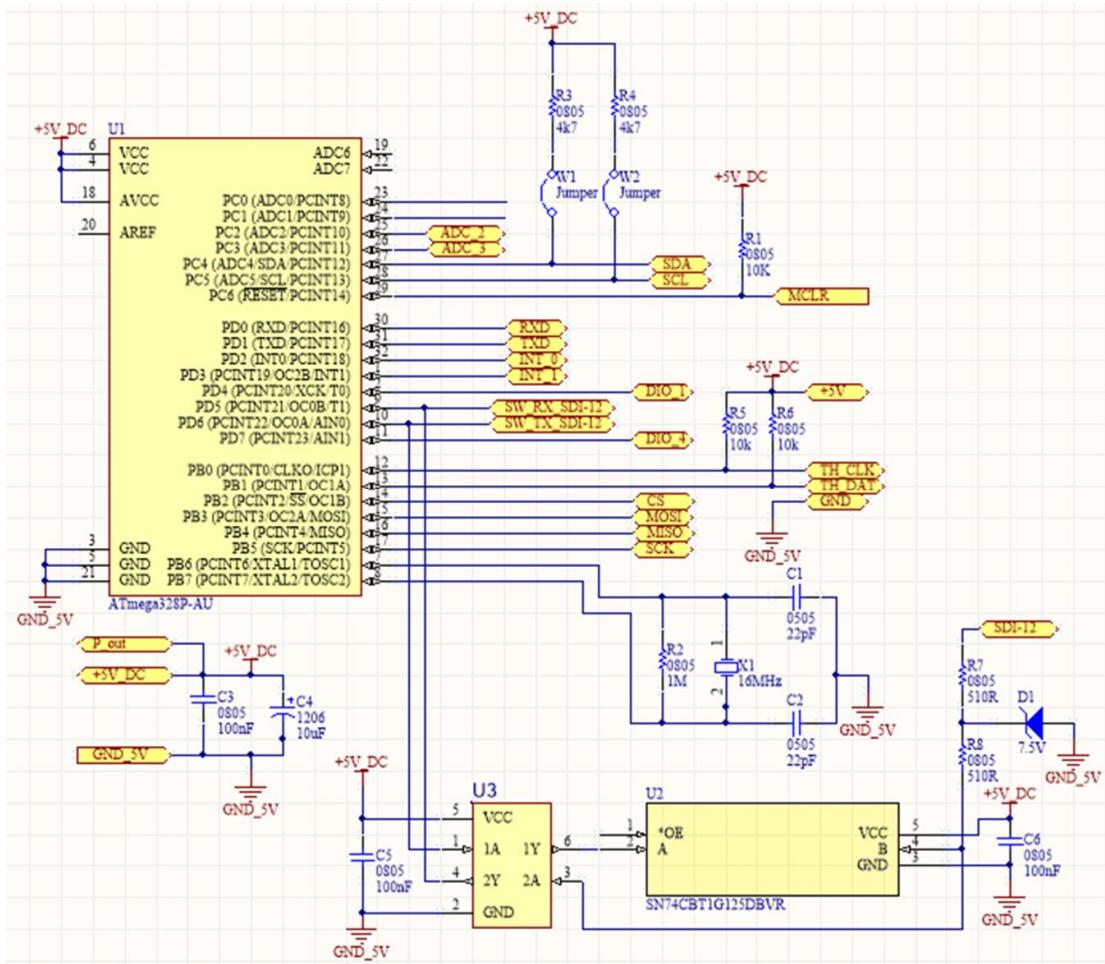
Εικόνα 6.12. Δημιουργία του sheet symbol *DCL_ARD_AGRI* και των sheet ports της νέας πλακέτας επέκτασης και σύνδεση των sheet ports με τα απαραίτητα σήματα των παρεχόμενων δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης.

4) *Επιλογές για τη διαχείριση ενέργειας* (decisions for power management): στο βήμα αυτό πραγματοποιούνται οι επιλογές σχετικά με τη διαχείριση ενέργειας της πλακέτας επέκτασης. Ο σχεδιαστής μπορεί να αποφασίσει ποιές από τις παρεχόμενες δυνατότητες στη διαχείριση ενέργειας επιθυμεί να αξιοποιήσει στη δική του πλακέτα επέκτασης. Για την υπό σχεδίαση πλακέτα επέκτασης *DCL_ARD_AGRI*, του παρόντος παραδείγματος, έχουν δημιουργηθεί τα απαραίτητα sheet ports ώστε η πλακέτα επέκτασης να δέχεται τάση +5 Vdc είτε απ' ευθείας από το συνδεδεμένο επέκτασης *S-BEC2*, είτε μέσω του μηχανισμού *P-BEC*. Στην περίπτωση τροφοδοσίας της πλακέτας επέκτασης μέσω του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας *P-BEC*, είναι δυνατός ο έλεγχος και η παρακολούθηση της καταναλισκόμενης ενέργειας της πλακέτας. Τα προαναφερόμενα sheet ports και οι σχετικές συνδέσεις παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.12.

5) *Επιλογές για τον προγραμματισμό και την εκφαλμάτωση του μικροελεγκτή* (considerations regarding the programming and debugging of the shield's

MCU): Στο βήμα αυτό υλοποιούνται οι συνδέσεις των σημάτων τα οποία θα χρειαστούν για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης θα τοποθετηθεί ένας μικροελεγκτής AVR ATmega328. Για τον προγραμματισμό του εν λόγω μικροελεγκτή, σύμφωνα με την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής Arduino, απαιτούνται μόνο τα σήματα RX, και TX, της θύρας σειριακής επικοινωνίας δεδομένων του μικροελεγκτή καθώς και το σήμα Reset του τελευταίου. Για τα σήματα αυτά δημιουργούνται συγκεκριμένα sheet symbols (βλ. Εικόνα 6.12). Τα sheet ports αυτά συνδέονται στα αντίστοιχα sheet ports του συνδετήρα επέκτασης S-BEC3. Τα σήματα σχετικά με τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση βάσει του προτύπου JTAG δεν χρησιμοποιούνται για το μικροελεγκτή της συγκεκριμένης πλακέτας επέκτασης. Από την άλλη πλευρά, για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή μέσω θύρας επικοινωνίας SPI, έχουν δημιουργηθεί συγκεκριμένα sheet ports και έχουν με την σειρά τους συνδεθεί με τα sheet symbols του συνδετήρα επέκτασης S-BEC1. Η εναλλακτική αυτή μέθοδος προγραμματισμού του μικροελεγκτή είναι χρήσιμη για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή AVR ATmega328 με το ενσωματωμένο λογισμικό του Arduino (Arduino bootloader).

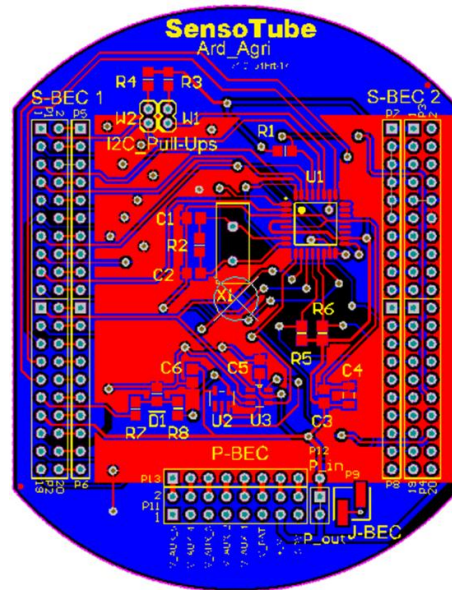
- 6) *Σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης (design of the schematic drawing of the shield's circuitry):* στο βήμα αυτό πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης. Συγκεκριμένα, στο αρχείο του σχηματικού κυκλώματος του sheet symbol DCL_ARD_AGRI σχεδιάζονται τα συγκεκριμένα κυκλώματα και οι σχετικές συνδέσεις σημάτων. Στην Εικόνα 6.13 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα του sheet symbol DCL_ARD_AGRI της υπό σχεδίαση νέας πλακέτας επέκτασης. Οι κίτρινες ταμπέλες σημάτων εντός του κυκλώματος υποδηλώνουν τα sheet ports του sheet symbol DCL_ARD_AGRI. Μέσω αυτών των sheet ports υλοποιούνται αυτόματα οι συνδέσεις των σημάτων με τα sheet ports των sheet symbols των μηχανισμών επέκτασης.



Εικόνα 6.13. Το σχηματικό κύκλωμα του sheet symbol DCL_ARD_AGR1 της υπό σχεδίαση πλακέτας επέκτασης. Διακρίνονται με κίτρινες ταμπέλες τα sheet ports για τη σύνδεση με άλλα sheet symbols.

7) Σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης (design of the printed-circuit board (PCB) of the shield): το τυπωμένο κύκλωμα μιας πλακέτας επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube θα πρέπει να ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς σχεδιασμού και υλοποίησης της εν λόγω αρχιτεκτονικής, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.3. Με τον τρόπο αυτό, θα είναι σίγουρο πως η νέα πλακέτα επέκτασης θα μπορεί να στεγαστεί στο προτεινόμενο περίβλημα στέγασης, δηλαδή στον πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 90 mm (βλ. Κεφάλαιο 5). Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης DCL_ARD_AGR1 σχεδιάστηκε και παρατίθεται στην Εικόνα 6.14. Το τυπωμένο κύκλωμα είναι διπλής όψης, δηλαδή δύο επιπέδων (double-layer PCB). Με μπλε χρώμα διακρίνονται οι

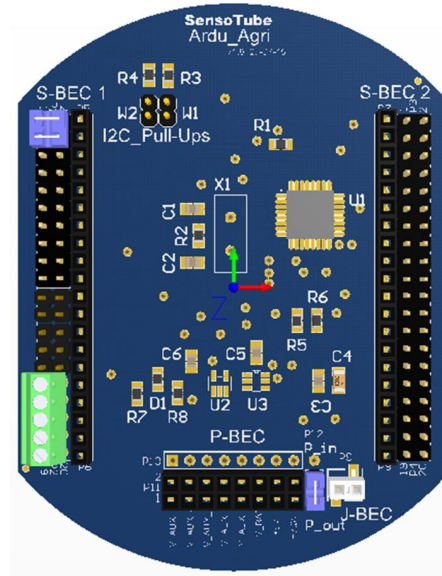
ηλεκτρικές νησίδες (traces) που είναι τοποθετημένες στην πίσω πλευρά του τυπωμένου (bottom side), ενώ με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι ηλεκτρικές νησίδες της μπροστινής πλευράς (top side).



Εικόνα 6.14. Το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης DCL_ARD_AGRI.

- 8) *Κατασκευή και έλεγχος της πλακέτας επέκτασης (fabrication and Testing of the Shield):* Στην Εικόνα 6.15 παρουσιάζεται η όψη της νέας πλακέτας επέκτασης μετά την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος και της συγκόλλησης των εξαρτημάτων της. Ο πράσινος συνδετήρας τύπου κλέμας στο κάτω αριστερό μέρος της πλακέτας εξυπηρετεί για τη φυσική σύνδεση των καλωδίων των εξωτερικών αισθητηρίων θερμοκρασίας/υγρασίας και υγρασίας εδάφους. Στις υπόλοιπες σειρές των pads δίπλα στους συνδετήρες S-BEC1 και S-BEC3 τοποθετούνται συνδετήρες με διπλές σειρές ακίδων (dual-pin headers) έτσι ώστε να είναι εύκολο στο χρήστη να συνδέει τα σήματα της πλακέτας του με τα σήματα των συνδετήρων επέκτασης. Η σύνδεση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αποσπώμενων συνδετήρων βραχυκυκλώματος (shorting jumpers). Στην Εικόνα 6.14, οι δύο μπλε βραχυκυκλωτήρες έχουν τοποθετηθεί για να συνδέουν τα σήματα του διαύλου I2C του μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης με τα αντίστοιχα σήματα των συνδετήρων επέκτασης σημάτων του συστήματος. Ο μπλε βραχυκυκλωτήρας, στο κάτω μέρος της

πλακέτας, επιλέγει την τροφοδοσία της πλακέτας με +5 Vdc είτε από τον μηχανισμό διαχείρισης ενέργειας P-BEC, είτε μέσω της εισόδου +5 Vdc του συνδετήρα επέκτασης σημάτων S-BEC2.



Εικόνα 6.15. Η πλακέτα επέκτασης DCL_ARD_AGRI όπως θα είναι μετά την κατασκευή του τοπωμένου κυκλώματος και τη συγκόλληση όλων των εξαρτημάτων της σ' αυτό.

6.3. Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Ασύρματης Δικτύωσης Βασισμένης στο Πρωτόκολλο LoRa

Στο παράδειγμα αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός μιας νέας πλακέτας επέκτασης επιπέδου λειτουργίας WNL, δηλαδή επιπέδου λειτουργίας ασύρματης δικτύωσης. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται βάσει της αρχιτεκτονικής Sensotube και γίνεται χρήση του προτεινόμενου υποδείγματος σχεδιασμού πλακετών επέκτασης.

Η ασύρματη δικτύωση αποφασίστηκε να στηριχτεί στο νέο πρωτόκολλο LoRa [1]. Το εν λόγω πρωτόκολλο στηρίζεται σε τεχνολογία εξαιρετικά στενού εύρους ζώνης (UNB - Ultra-Narrow Band). Το πρωτόκολλο αυτό στοχεύει στις εφαρμογές του διαδικτύου των αντικειμένων (IoT - Internet of Things), καθώς και στις εφαρμογές επικοινωνίας μεταξύ μηχανών (M2M - Machine-to-Machine). Μεταξύ των κυριότερων πλεονεκτημάτων του πρωτοκόλλου LoRa είναι:

- εξαιρετικά μεγάλη εμβέλεια (της τάξης των χιλιομέτρων),

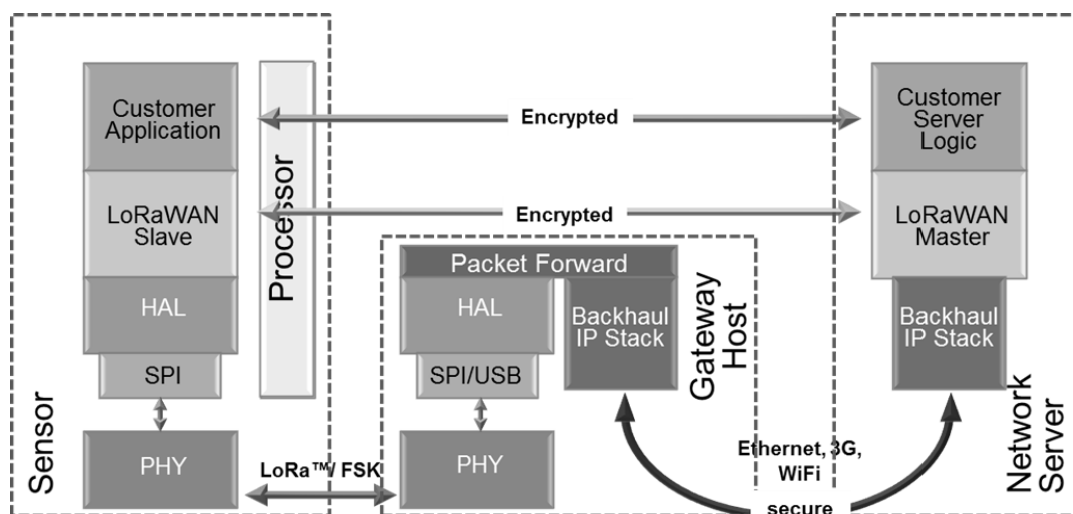
- χαμηλό κόστος,
- εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (ιδανικό για τροφοδοσία από κυκλώματα ανάκτησης ενέργειας από το περιβάλλον (energy harvesting)),
- ιδανικό για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ευρείας γεωγραφικής έκτασης (WAN - Wide Area Networks),
- μεγάλη ασφάλεια δεδομένων,
- αναπτύσσεται και υποστηρίζεται από συμμαχία (alliance) στην οποία συμμετέχουν πολύ σημαντικές εταιρίες του χώρου των ημιαγωγών και της μικροηλεκτρονικής.

Η συμμαχία για την ανάπτυξη, την υποστήριξη και την προώθηση της τεχνολογίας του πρωτοκόλλου LoRa καλείται LoRa Alliance (βλ. Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.16. Το λογότυπο της συμμαχίας για την ανάπτυξη, την υποστήριξη και την προώθηση του πρωτοκόλλου LoRa.

Στην Εικόνα 6.17 παρατίθεται το μπλοκ διάγραμμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων βασισμένου στην τεχνολογία του πρωτοκόλλου LoRa [2] (LoRaWAN).



Εικόνα 6.17. Το μπλοκ διάγραμμα ασύρματου δικτύου αισθητήρων βασισμένου στην τεχνολογία του πρωτοκόλλου LoRa. (Πηγή: [2]).

Το πρωτόκολλο LoRa προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα συγκεκριμένα για τις εφαρμογές των ασύρματων δικτύων στο πεδίο της γεωργίας. Τα σπουδαιότερα από αυτά είναι:

- εξαιρετικά μεγάλη εμβέλεια (χιλιόμετρα),
- στηρίζεται στη χρήση των συχνοτήτων 433 MHz και 868 MHz, οι οποίες, σε αντίθεση με τη συχνότητα των 2.4 GHz, διασφαλίζουν μεγάλη διάδοση και διεισδυτικότητα σήματος,
- η τοπολογία δικτύου (network topology) είναι απλού αστέρος (star network topology),
- λόγω της απλής τοπολογίας δικτύου, όλοι οι κόμβοι δεν επιβάλλεται να είναι διαρκώς ενεργοποιημένοι για λόγους δρομολόγησης δεδομένων άλλων κόμβων (routing), και
- όλοι οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση πλήρους αδράνειας (sleep mode) για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

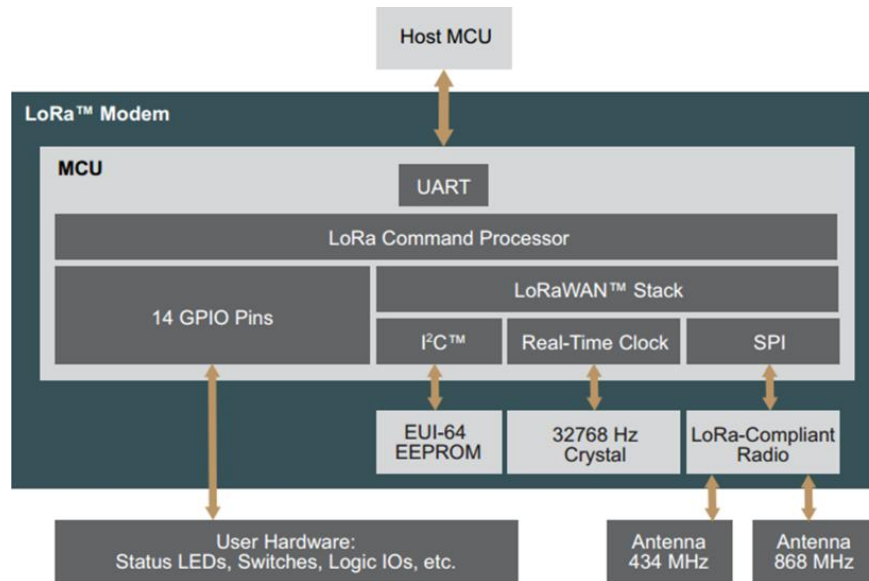
Για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας του πρωτοκόλλου LoRa στην υπό σχεδίαση πλακέτα επέκτασης χρησιμοποιήθηκε το πλήρως λειτουργικό υποσύστημα (module) RN2483 (της εταιρίας Microchip) (βλ. Εικόνα 6.18) [3].



Εικόνα 6.18. Το πλήρως λειτουργικό υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας βάσει του πρωτοκόλλου LoRa, RN2483 LoRa Modem (της εταιρίας Microchip). (Πηγή: [3])

Το module RN2483 περιέχει στο εσωτερικό του όλα τα απαραίτητα κυκλώματα του ασύρματου πομποδέκτη (RF transceiver), καθώς επίσης και του μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής ελέγχει τη λειτουργία του ασύρματου πομποδέκτη και στο εσωτερικό του εκτελείται σε μορφή ενσωματωμένου λογισμικού (firmware) το πρωτόκολλο της ασύρματης επικοινωνίας (protocol stack). Επί πλέον, στο συγκεκριμένο υποσύστημα (module) περιλαμβάνεται και μνήμη μοναδικού κωδικού αναγνώρισης (EUI code).

Στην Εικόνα 6.19 παρουσιάζεται σε μορφή μπλοκ διαγράμματος, η δομή του υποσυστήματος RN2483.



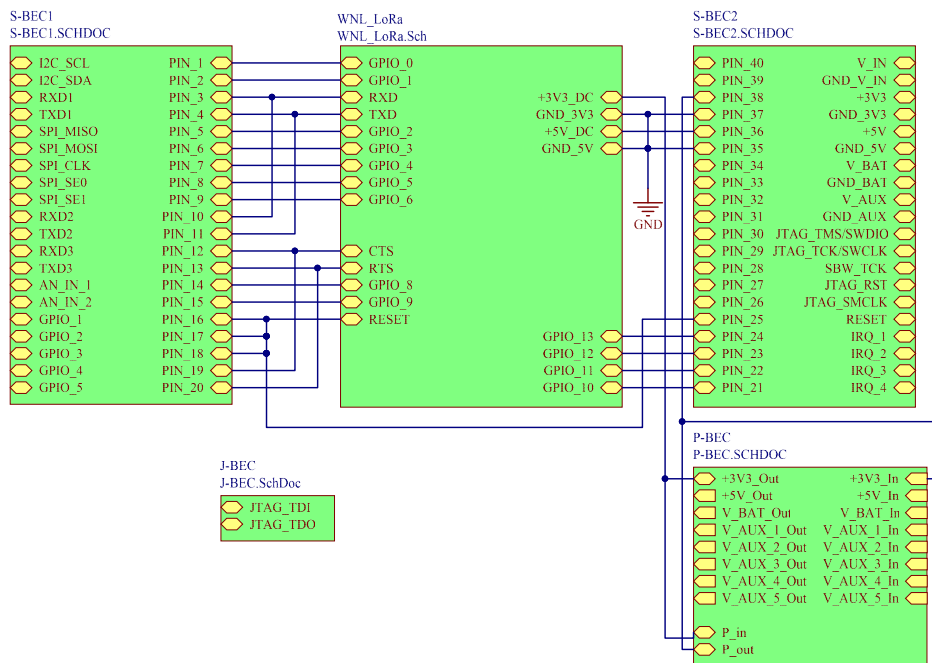
Εικόνα 6.19. Το μπλοκ διάγραμμα της εσωτερικής δομής του υποσυστήματος RN2483 LoRa Modem (της εταιρίας Microchip). [3]).

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του υποσυστήματος RN2483 LoRa Modem είναι τα ακόλουθα:

- εμβέλεια έως 15 km,
- χαμηλή κατανάλωση για λειτουργία με συσσωρευτές ενέργειας έως δέκα (10) έτη,
- λειτουργία στο φάσμα των συχνοτήτων 433 MHz και 868 MHz,
- ενσωματωμένο πρωτόκολλο LoRa (έκδοση LoRaWAN Class A),
- παρέχει την εύκολη διασύνδεση με το μικροελεγκτή ενός συστήματος μέσω απλών εντολών χαρακτήρων (ASCII commands) σε απλή σειριακή επικοινωνία (UART),
- τάση τροφοδοσίας 2.1 έως 3.6 Vdc,
- ρυθμιζόμενη ισχύς εξόδου έως τα +14 dBm,
- εξαιρετικά μεγάλη ευαισθησία δέκτη έως τα -148 dBm,
- παρέχονται δεκατέσσερα (14) σήματα γενικών εισόδων/εξόδων (GPIOs),
- ασφάλεια μέσω μεθόδου κρυπτογράφησης AES-128,
- πιστοποίηση σύμφωνα με την εναρμόνιση στις διατάξεις European R&TE,

Τα βήματα για την ανάπτυξη της νέας πλακέτας επέκτασης επιπέδου ασύρματης δικτύωσης (WNL), βασισμένου στο πρωτόκολλο LoRa, ακολουθώντας το υπόδειγμα σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής SensoTube είναι τα εξής (το εργαλείο σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Altium Designer):

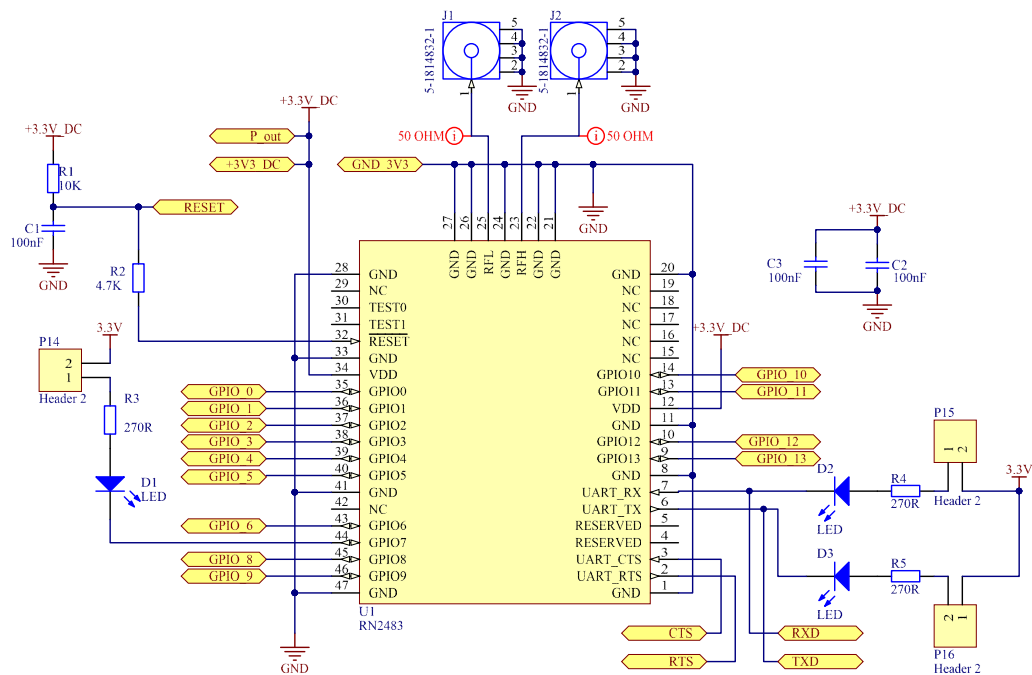
- 1) *Δημιουργία νέου έργου σχεδιασμού*: δημιουργία ενός νέου έργου σχεδίασης (new design project) στο οποίο εισάγονται τα τέσσερα sheet symbols των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης μαζί με τα αντίστοιχα σχηματικά τους κυκλώματα. Τα αρχεία αυτά είναι ήδη έτοιμα και δεν χρειάζεται περαιτέρω εργασία από το σχεδιαστή της πλακέτας επέκτασης.
- 2) *Αρχικοποίηση του σχεδιασμού της νέας πλακέτας επέκτασης*: Δημιουργία ενός νέου sheet symbol, συγκεκριμένα του WNL_LoRa, καθώς επίσης και δημιουργία του αντίστοιχου σχηματικού αρχείου, συγκεκριμένα του WNL_LoRa.SchDoc (βλ. Εικόνα 6.20).
- 3) *Συνδέσεις απαραίτητων σημάτων*: στο βήμα αυτό αποφασίζεται ποιά σήματα από τα κυκλώματα της πλακέτας επέκτασης θα πρέπει να δρομολογηθούν προς τους τέσσερις δι-επίπεδους μηχανισμούς διαχείρισης και επέκτασης. Συγκεκριμένα, η εν λόγω πλακέτα επέκτασης θα περιέχει το υποσύστημα RN2483 LoRa Modem (της εταιρίας Microchip) το οποίο εκτός των σημάτων τάσης τροφοδοσίας και γείωσης παρέχει δεκατέσσερα (14) σήματα ψηφιακών εισόδων/εξόδων γενικής χρήσης (GPIOs), ένα σήμα επανεκκίνησης (Reset), καθώς και τέσσερα (4) σήματα (RXD, TXD, RTS, και CTS) για τη σειριακή επικοινωνία μέσω UART με εξωτερικούς μικροελεγκτές. Όλα αυτά τα σήματα δημιουργούνται ως sheet ports στο sheet symbol του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης. Τα σήματα και οι συνδέσεις τους παρατίθενται στην Εικόνα 6.20. Για λόγους ευκολίας στη χρήση της συγκεκριμένης πλακέτας επέκτασης, τα σήματα σχετικά με τη σειριακή επικοινωνία καθώς και με την επανεκκίνηση (Reset), αποφασίστηκε να δρομολογηθούν σε περισσότερα από ένα σήματα του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων. Αυτή η σχεδιαστική δυνατότητα της αρχιτεκτονικής SensoTube επιτρέπει τη σύνδεση σημάτων σε εναλλακτικές θέσεις σημάτων.



Εικόνα 6.20. Δημιουργία του sheet symbol *WNL_LoRa* και των sheet ports της νέας πλακέτας επέκτασης και σύνδεση των sheet ports με τα απαραίτητα σήματα των παρεχόμενων δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης.

- 4) *Επιλογές για τη διαχείριση ενέργειας:* για τη λειτουργία της εν λόγω πλακέτας επέκτασης απαιτείται τάση τροφοδοσίας +3.3 Vdc. Μέσω των σημάτων +3V3_DC, GND_3V3, και P_out, επιλέγεται η τροφοδοσία της πλακέτας να μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω της τάσης των +3.3 Vdc που είναι διαθέσιμη στον συνδετήρα επέκτασης S-BEC2, είτε μέσω του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας P-BEC. Η τελευταία επιλογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μέτρηση και τον έλεγχο της ενέργειας που καταναλώνει η πλακέτα επέκτασης.
- 5) *Επιλογές για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή:* στην συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης δεν απαιτείται σύνδεση με τα σήματα JTAG του συνδετήρα επέκτασης S-BEC2, όπως επίσης δεν απαιτείται και η χρήση του μηχανισμού διαχείρισης J-TAG. Ο μικροελεγκτής που είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό του υποσυστήματος RN2483 LoRa Modem, μπορεί να προγραμματιστεί μέσω της σειριακής θύρας επικοινωνίας, τα σήματα της οποίας ήδη έχουν δρομολογηθεί και συνδεθεί με το μηχανισμό διαχείρισης σημάτων S-BEC1.

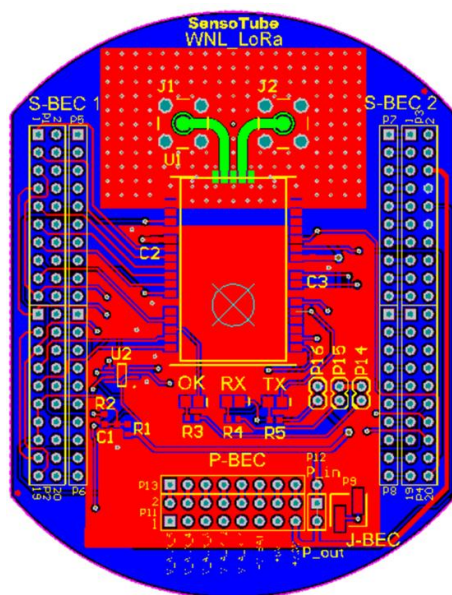
6) Σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης : στην Εικόνα 6.21 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της νέας πλακέτας επέκτασης. Στο μέσο διακρίνεται το σχηματικό σύμβολο μαζί με τα σήματα του που αντιστοιχεί στο υποσύστημα RN2483 LoRa Modem. Επίσης, διακρίνονται τα κυκλώματα τριών φωτεινών ενδεικτών τύπου LED. Τα δύο από αυτά (D2 και D3) δείχνουν την κίνηση δεδομένα στα σήματα RXD και TXD της σειριακής επικοινωνίας του υποσυστήματος RN2483 και του εξωτερικού μικροελεγκτή. Ο τρίτος φωτεινός ενδείκτης (D1) έχει συνδεθεί απ' ευθείας σε μια από τις ψηφιακές εξόδους του υποσυστήματος με σκοπό την ένδειξη της εσωτερικής του κατάστασης, δηλαδή εάν είναι σε κατάσταση αποστολής ή λήψης δεδομένων, κλπ. Και οι τρεις ενδείκτες, για να μην καταναλώνουν άσκοπα ενέργεια όταν ο ασύρματος κόμβος είναι εγκατεστημένος στο πεδίο της γεωργίας, μπορούν να τεθούν εκτός κυκλώματος μέσω της αφαίρεσης των αντίστοιχων προσαφαιρούμενων βραχυκυκλωτήρων (shorting jumpers) (P14, P15, και P16).



Εικόνα 6.21. Το σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης ασύρματης διασύνδεσης βασισμένης στο πρωτόκολλο LoRa.

Στο επάνω μέρος του σχηματικού κυκλώματος διακρίνονται τα σχηματικά σύμβολα των συνδετήρων σύνδεσης τύπου SMA για την σύνδεση των δύο κεραιών για τις συχνότητες των 433 MHz και 868 MHz. Οι κίτρινες ετικέτες σημάτων υποδηλώνουν τα σήματα των sheet symbols *WNL_LoRa*.

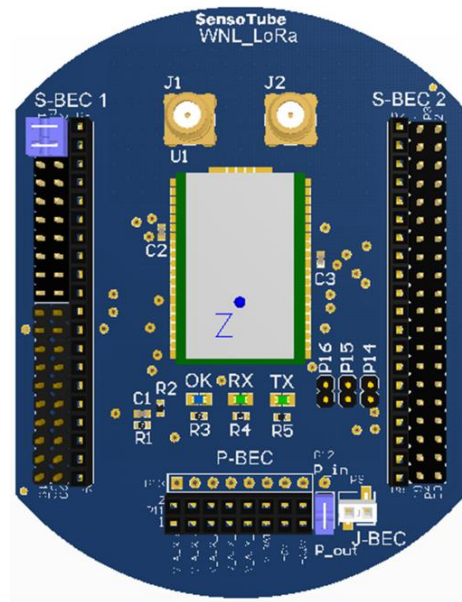
- 7) *Σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης:* στην Εικόνα 6.22 παρατίθεται το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης. Περιέχονται όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα όλων των μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης, καθώς και όλα τα εξαρτήματα των κυκλωμάτων των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης. Το τυπωμένο κύκλωμα είναι δύο επιπέδων. Με μπλε χρώμα διακρίνεται η πίσω όψη (bottom layer, ενώ με κόκκινο διακρίνεται η εμπρός όψη (top layer).



Εικόνα 6.22. Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης ασύρματης διασύνδεσης βασισμένης στο πρωτόκολλο LoRa.

- 8) *Κατασκευή και έλεγχος της πλακέτας επέκτασης:* μετά την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος και την στήριξη και συγκόλληση των εξαρτημάτων, η πλακέτα επέκτασης θα έχει τη μορφή της Εικόνας 6.23. Σχετικά με τον έλεγχο καλής λειτουργίας της νέας πλακέτας επέκτασης, είναι σκόπιμο αυτή να συνδεθεί με ένα εξωτερικό σύστημα που να περιέχει μικροελεγκτή με

σειριακή θύρα επικοινωνίας, ή ακόμα καλύτερα, με μια πλακέτα επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube. Σε κάθε μια από τις δύο αυτές επιλογές, ο εξωτερικός μικροελεγκτής θα πρέπει να στείλει και να λάβει δεδομένα προς και από το υποσύστημα RN2483 LoRa Modem για τον έλεγχο καλής λειτουργίας (ορθότητα δεδομένων, εμβέλεια κάλυψης, κλπ).



Εικόνα 6.23. Η νέα πλακέτα επέκτασης για την ασύρματη διασύνδεση μέσω του πρωτοκόλλου LoRa.

6.4. Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Τροφοδοσίας +3.3 Vdc και +5 Vdc

Η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει τη δυνατότητα στο σύστημα του ασύρματου κόμβου αισθητήρων να έχει μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης με κυκλώματα τροφοδοσίας ειδικά επιλεγμένα για την εκάστοτε εφαρμογή, κι όχι η κάθε πλακέτα επέκτασης να επιβαρύνεται με τα δικά της κυκλώματα για τη διαχείριση ενέργειας.

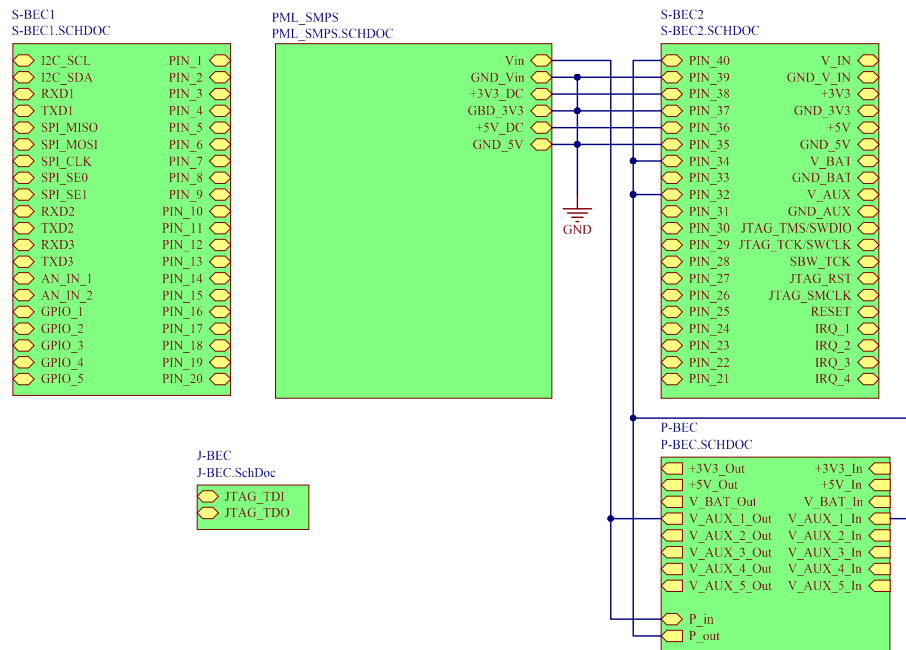
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα σχεδιασμού, παρουσιάζεται η ανάπτυξη μιας πλακέτας επέκτασης επιπέδου διαχείρισης ενέργειας (PML). Η εν λόγω πλακέτα επέκτασης αποφασίστηκε να μην κάνει χρήση των ενεργειακά ασύμφων γραμμικών σταθεροποιητών τάσης (Linear Voltage Regulators), όπως συνηθίζεται στις αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε η χρήση κυκλωμάτων παλμοτροφοδοτικών (SMPS - Switch-Mode

Power Supplies). Οι εν λόγω διατάξεις παρέχουν μεγάλη ενεργειακή απόδοση, η οποία αποτελεί το ζητούμενο στην περίπτωση των ασύρματων κόμβων αισθητήρων που λειτουργούν με συσσωρευτές ενέργειας. Στην συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης ο σκοπός είναι η παραγωγή δύο διαφορετικών τάσεων τροφοδοσίας με δυνατότητα μεγάλων ρευμάτων. Οι δύο επιθυμητές τάσεις είναι αυτές που ως επί στο πλείστον απαιτούνται στα ψηφιακά συστήματα, δηλαδή η τάση των +5 Vdc και η τάση των +3.3 Vdc. Για την υλοποίηση των δύο παλμοτροφοδοτικών δεν ακολουθήθηκε η σχεδιαστική επιλογή των διακριτών κυκλωμάτων αλλά αυτή της χρήσης έτοιμων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε μορφή εξαρτήματος. Η επιλογή αυτή προσφέρει τον ίδιο βαθμό ενεργειακής απόδοσης αλλά επί πλέον απελευθερώνει τον σχεδιαστή από τον προβληματισμό της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) των κυκλωμάτων. Για την εν λόγω πλακέτα επέκτασης χρησιμοποιήθηκαν τα εξαρτήματα R78B3.3-1.5 [4] (για την τάση των +3.3 Vdc), και R78B5.0-1.5 (για την τάση των +5 Vdc). Η δυνατότητα ρεύματος του κάθε εξαρτήματος είναι στα 1.5A έτσι ώστε να μπορεί να ικανοποιηθεί η οποιαδήποτε ανάγκη τροφοδοσίας συστημάτων με πολλές πλακέτες επέκτασης. Η ενεργειακή απόδοση των παλμοτροφοδοτικών αυτών είναι πάνω από 82%, ενώ το ρεύμα ηρεμίας αγγίζει μόλις τα 7 mA. Επί πλέον τα συγκεκριμένα εξαρτήματα δεν απαιτούν ψύξη κατά τη λειτουργία τους.

Τα βήματα για την ανάπτυξη της νέας πλακέτας επέκτασης επιπέδου διαχείρισης ενέργειας (WNL), βασισμένης στη χρήση τεχνολογίας παλμοτροφοδοτικών ακολουθώντας το υπόδειγμα σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής SensoTube είναι τα εξής (το εργαλείο σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Altium Designer):

- 1) *Δημιουργία νέου έργου σχεδιασμού*: δημιουργία ενός νέου έργου σχεδιασμού στο περιβάλλον σχεδίασης και εισαγωγής των sheet symbols και των αντίστοιχων σχηματικών κυκλωμάτων των τεσσάρων μηχανισμών επέκτασης.
- 2) *Αρχικοποίηση του σχεδιασμού της νέας πλακέτας επέκτασης*: δημιουργία ενός νέου sheet symbol, του PML_SMPS και του αντίστοιχου σχηματικού κυκλώματος εντός του οποίου θα σχεδιαστούν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για τις λειτουργίες της πλακέτας επέκτασης.
- 3) *Συνδέσεις απαραίτητων σημάτων*: δημιουργία των sheet ports των σημάτων της πλακέτας επέκτασης. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται μόνο έξι, τα +12V_DC, GND_112V, +5V_DC, GND_5V, +3V3_DC, και GND_3V3. Η τάση των +12

Vdc είναι η εξωτερική τάση (συνήθως από κυκλώματα διαχείρισης φωτοβολταϊκών κυψελών) μέσω της οποίας τροφοδοτείται όλο το σύστημα του ασύρματου κόμβου. Στην Εικόνα 6.24 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης σε υψηλό επίπεδο, δηλαδή μέσω sheet symbols.

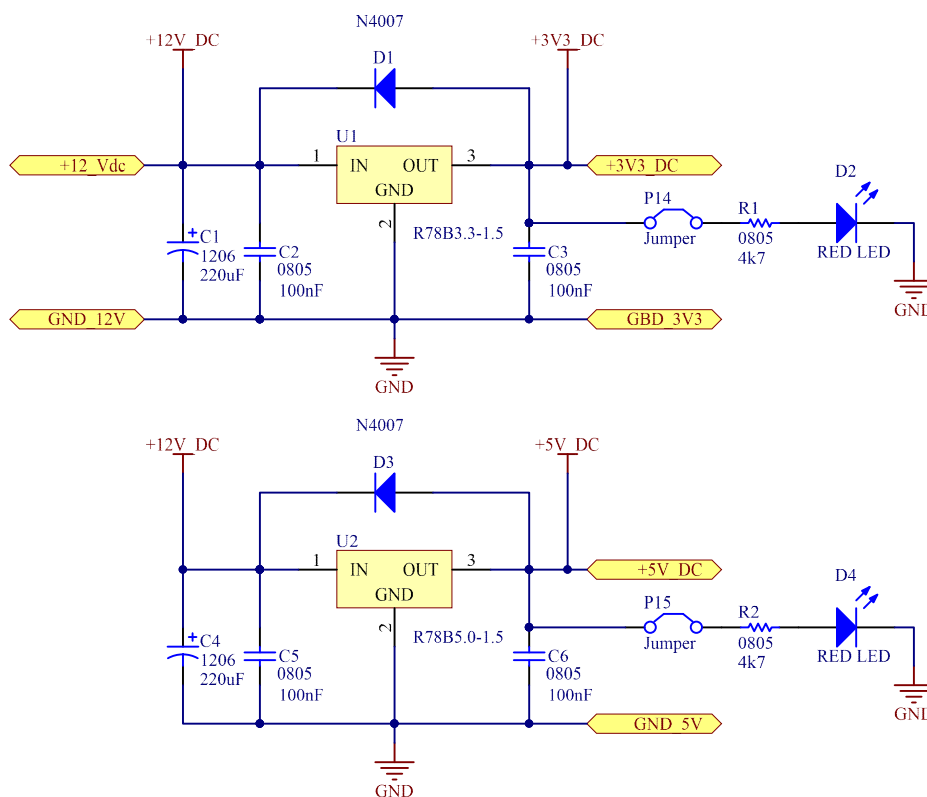


Εικόνα 6.24. Δημιουργία του sheet symbol PML_SMPS και των sheet ports της νέας πλακέτας επέκτασης και σύνδεση των sheet ports με τα απαραίτητα σήματα των παρεχόμενων δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης.

- 4) *Επιλογές για τη διαχείριση ενέργειας:* η εν λόγω πλακέτα απαιτεί την ύπαρξη μιας τάσης εισόδου από +4,5 Vdc έως +18 Vdc. Ενδεικτικά έχει αναφερθεί η ονομαστική τάση εισόδων των +12 Vdc, αλλά αναλόγως της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί να συνδέσει οποιαδήποτε πηγή τάσης βρίσκεται εντός του προαναφερόμενου εύρους τιμών τάσης εισόδου.
- 5) *Επιλογές για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή:* η συγκεκριμένη πλακέτα επέκτασης διαχείρισης ενέργειας δεν περιέχει μικροελεγκτή, και ως εκ τούτου δεν απαιτείται η χρήση των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης των λειτουργιών του

προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης. Για τον λόγο αυτό δεν πραγματοποιείται καμία σύνδεση με τα αντίστοιχα sheet symbols των μηχανισμών αυτών.

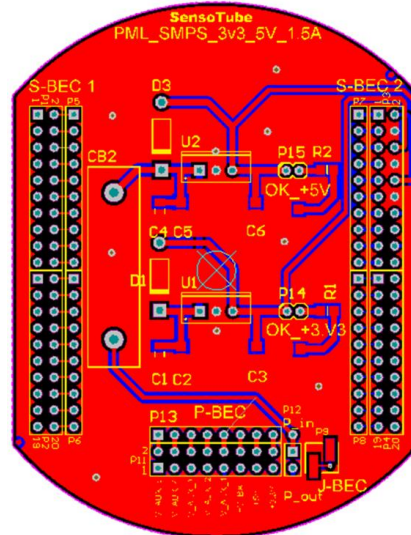
- 6) Σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης : στην Εικόνα 6.25 παρατίθεται το πλήρες σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης παραγωγής τάσεων +5 Vdc και +3.3 Vdc. Στην έξοδο τάσης του καθενός από τα δύο παλμοτροφοδοτικά έχει τοποθετηθεί φωτεινός ενδείκτης τύπου LED για τη γρήγορη οπτική αναγνώριση της καλής λειτουργίας των κυκλωμάτων. Οι ενδείκτες αυτές αποσυνδέονται από το κύκλωμα μέσω προσθαφαιρούμενων βραχυκυκλωτήρων.



Εικόνα 6.25. Το πλήρες σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης παραγωγής τάσεων +5 Vdc και +3,3 Vdc.

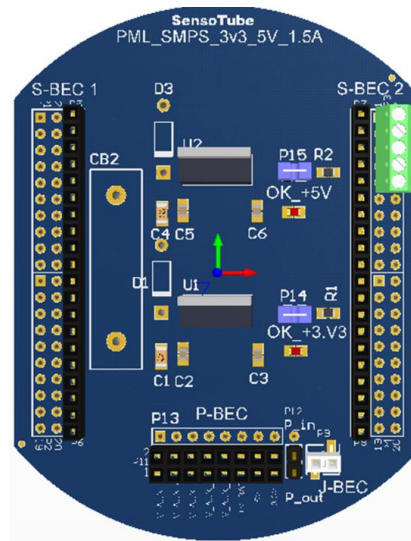
- 7) Σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης : στην Εικόνα 6.26 παρατίθεται το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της νέας πλακέτας επέκτασης. Είναι δύο επιπέδων. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η πίσω όψη

(bottom layer), ενώ με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η εμπρός όψη (top layer).



Εικόνα 6.26. Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης παραγωγής τάσεων +5 Vdc και +3.3 Vdc.

- 8) *Κατασκευή και έλεγχος της πλακέτας επέκτασης:* μετά το στάδιο της κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος και της συγκόλλησης των εξαρτημάτων επάνω σ' αυτό, η νέα πλακέτα επέκτασης θα έχει τη μορφή της Εικόνας 6.27. Ο έλεγχος της λειτουργίας της εν λόγω πλακέτας είναι απλώς η μέτρηση των τάσεων εξόδων των δύο παλμοτροφοδοτικών.

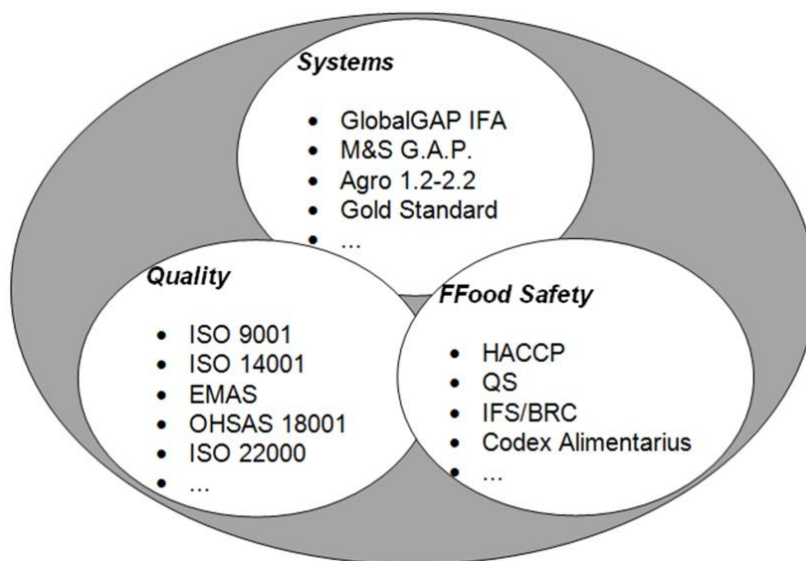


Εικόνα 6.27. Η νέα πλακέτα επέκτασης για την παραγωγή τάσεων +5 Vdc και +3.3Vdc.

6.5. Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Ασύρματης Δικτύωσης Βασισμένης στο Πρωτόκολλο DASH7

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο σχεδιασμός μιας νέας πλακέτας επέκτασης για την ασύρματη διασύνδεση βάσει του πρωτοκόλλου DASH7, με στόχο την ενοποίηση συστημάτων ασύρματων κόμβων αισθητήρων και συστημάτων ανέπαφης αναγνώρισης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID - Radio-Frequency Identification) [5].

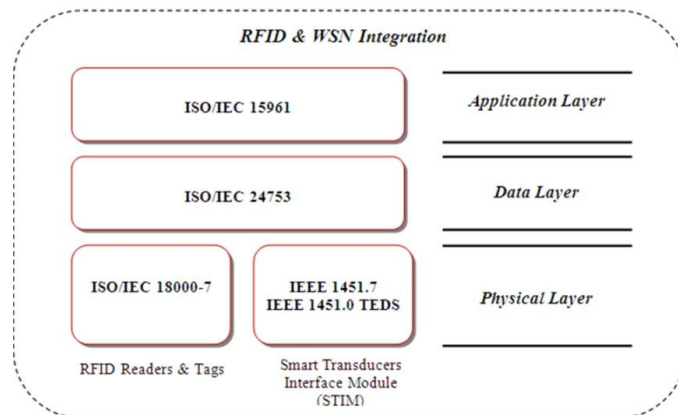
Η τεχνολογία των RFID χρησιμοποιείται ευρέως για την ιχνηλασιμότητα (traceability), τον έλεγχο και τον εντοπισμό (tracking), καθώς και τη συσκευασία αγρο-κτηνοτροφικών προϊόντων σε όλα τα στάδια της παραγωγής, της επεξεργασίας και της αλυσίδας διανομής τους [6]. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) το 2014 χρηματοδότησε το πρόγραμμα F2F (from the Farm to Fork) [7] έχοντας ως στόχο τη χρήση της τεχνολογίας RFID για σε όλα τα στάδια διεργασιών από το χωράφι έως το προϊόνι του καταναλωτή [8]. Το πλαίσιο κανονισμών και προτύπων για τον αγροτικό και κτηνοτροφικό διατροφικό τομέα είναι αρκετά εκτεταμένο και σύνθετο (βλ. Εικόνα 6.27). Ως εκ τούτου τεχνολογίες όπως αυτή του RFID για τη σήμανση, την ταυτοποίηση, και την παρακολούθηση προϊόντων και πρώτων υλών είναι πολύ σημαντικές.



Εικόνα 6.28. Το σύγχρονο πλαίσιο κανονισμών και προτύπων για τον αγροτικό και κτηνοτροφικό διατροφικό τομέα.

Παρά το γεγονός πως οι τεχνολογίες των RFID και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) είναι οι δύο επικρατέστερες ασύρματες τεχνολογίες στο πεδίο της σύγχρονης γεωργίας [6,9], στην πράξη αντιμετωπίζονται ως δύο εντελώς ξεχωριστά πεδία εφαρμογών. Η πιθανή ενοποίηση των δύο αυτών τεχνολογιών σε επίπεδο συστημάτων θα επέτρεπε τη μεγιστοποίηση των εφαρμογών στο πεδίο της γεωργίας [10,11]. Βεβαίως, για την ενοποίηση αυτή απαιτούνται κοινώς αποδεκτά πρότυπα αλλά και εργαλεία ανάπτυξης υλικού [11].

Το πρωτόκολλο DASH7 είναι η εμπορική ονομασία του διεθνούς προτύπου ISO/IEC 18000-7 [12] το οποίο καθορίζει τη διαχείριση αντικειμένων (items managements) χρησιμοποιώντας τεχνολογία ανέπαφης αναγνώρισης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID) στη συχνότητα των 433 MHz. Το πρότυπο αυτό είναι το μοναδικό με διεθνή ισχύ. Παράλληλα, έχει δημιουργηθεί και το πρότυπο IEEE 1451 το οποίο, μέσω της έκδοσής του IEEE 1451.7 [13], επιχειρεί να προσφέρει μια λύση στο φυσικό επίπεδο των εφαρμογών RFID. Στην Εικόνα 6.29 απεικονίζεται η διαστρωμάτωση των εφαρμογών RFID αναφέροντας τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα.



Εικόνα 6.29. Τα επίπεδα λειτουργίας εφαρμογών ανέπαφης αναγνώρισης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID).

Η επιλογή του πρωτοκόλλου DASH7 για το σχεδιασμό της νέας πλακέτας επέκτασης αποφασίστηκε λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του σε σχέση με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα ασύρματης δικτύωσης κόμβων αισθητήρων (βλ. Πίνακα 6.1) καθώς επίσης διότι επιτρέπει την υλοποίηση υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων με ενσωματωμένες λειτουργίες RFID [14,15].

Πίνακας 6.1. Τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου DASH7 σε σύγκριση με αυτά άλλων υπάρχοντων πρωτοκόλλων ασύρματης δικτύωσης.

Characteristic	DASH7	ZigBee	Low Energy Bluetooth	WiFi	Low Power UWB
Range	●	○	●	○	●
Battery Life	●	●	●	○	○
In Building Coverage	●	○	○	○	○
Low Latency	●	○	○	○	○
Multi-Hop	●	●	○	●	○
Co-exist with IEEE 802.11n	●	○	○	●	○
Penetrates Concrete	●	○	○	○	○
Penetrates Water	●	○	○	○	○
“Bends” Around Metal	●	○	○	○	○
Tracks Moving Things	●	○	○	○	○
Security	●	●	●	●	●
Globally Available	●	●	●	●	●
Small Protocol Stack	●	○	○	○	●
Data rate	○	●	●	●	●
Major Market Proponents	●	●	○	●	○

● High, ● Medium, ○ Low

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου DASH7 παρατίθενται στον Πίνακα 6.2, ενώ στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της αρχικής (Mode 1) καθώς και της σύγχρονης έκδοσης (Mode 2) του [16].

Πίνακας 6.2. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου DASH7.

Parameter	Value
Standard	ISO/IEC 18000-7
Range	10m – 10km
Frequency	433.92MHz
Latency	Max. 2 seconds
Data Rate	28kbps – 200kbps
Multi-Hop	Yes
Pear-to-Pear	Yes

Communication	Broadcast, Multicast, Anycast, Unicast
Security	128 AES, Public Key
Battery Life	Up to 10 years

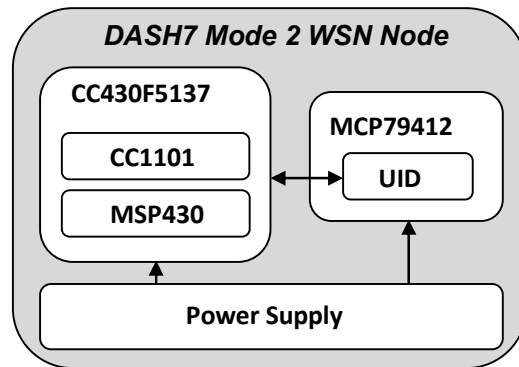
Πίνακας 6.2. Οι προδιαγραφές λειτουργίας των εκδόσεων Mode 1 και Mode 2 του πρωτοκόλλου DASH7.

Characteristic Name	Mode 1	Mode 2
Channel Size	500kHz	216kHz
Channels	1	8
Modulation	FSK ± 50 kHz	GFSK ± 50 kHz
Encoding Options	Manchester	PN9, FEC
Symbol Rate	55.6 kHz	Normal: 55.6 kHz Turbo: 200 kHz
Data Rate	27,8 kbps	Min: 27.8 kbps Max: 200 kbps
Packet Sync	Pulse width	Sync word

Το πρωτόκολλο DASH7 Mode 2 παρέχεται δωρεάν από τη συμμαχία DASH7 Alliance [17] σε μορφή ενσωματωμένου λογισμικού μικροελεγκτών και ονομάζεται OpenTag [18,19]. Το OpenTag είναι ανοικτής πηγής και για τη λειτουργία του απαιτείται μικροελεγκτής των 16-bits με ελάχιστη μνήμη προγράμματος 16 kBytes και ενσωματωμένο περιφερειακό προσπέλασης μνήμης τύπου DMA (Direct Memory Access). Συγκεκριμένα, για τη νέα πλακέτα επέκτασης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής 16-bit CC430F5137 (της εταιρίας Texas Instruments) [20]. Στην πράξη, ο εν λόγω μικροελεγκτής είναι ένα σύστημα (SoC - System on Chip) το οποίο περιέχει ένα μικροελεγκτή της οικογένειας MSP430 και έναν ασύρματο πομποδέκτη τύπου CC1101. Η συγκεκριμένη σχεδιαστική επιλογή εξασφαλίζει την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας του ασύρματου κόμβου αισθητήρων καθώς και την απρόσκοπτη φιλοξενία και εκτέλεση του ενσωματωμένου λογισμικού του OpenTag.

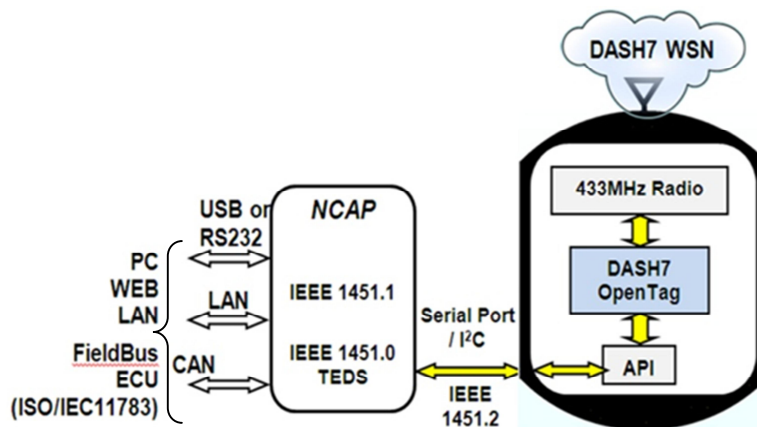
Το μπλοκ διάγραμμα των λειτουργιών της υπό σχεδίαση πλακέτας επέκτασης παρατίθεται στην Εικόνα 6.30. Στην εν λόγω εικόνα, διακρίνονται το σύστημα του μικροελεγκτή με τον ασύρματο πομποδέκτη καθώς επίσης και ένα πρόσθετο

ολοκληρωμένο, το MCP79412, το οποίο είναι μια εξωτερική μη-πιτητική μνήμη στην οποία περιέχεται μια μοναδική διεύθυνση MAC (MAC address: Media Access Control address).



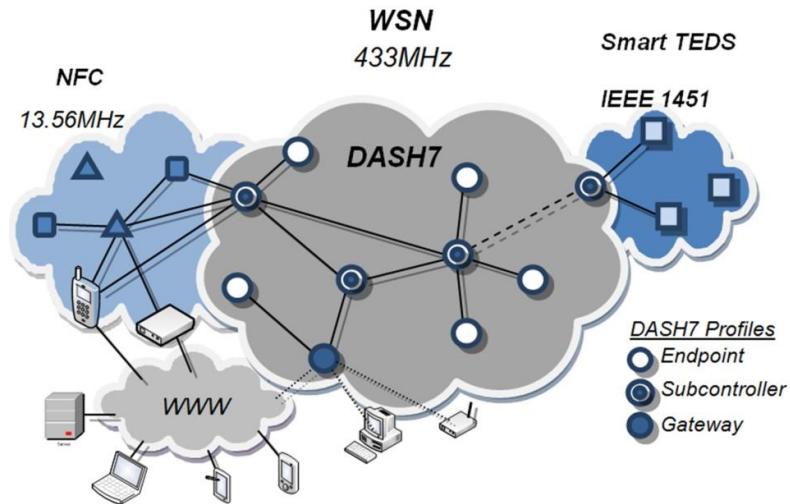
Εικόνα 6.30. Το μπλοκ διάγραμμα των λειτουργιών της πλακέτας ασύρματης δικτύωσης βάσει του πρωτοκόλλου DASH7 Mode 2.

Επί πλέον, όπως εξηγήθηκε στις εργασίες [15,21], η εν λόγω πλακέτα επέκτασης, με τις συγκεκριμένες σχεδιαστικές επιλογές, μπορεί να ενσωματώσει και τη λειτουργία της διασύνδεσης με συστήματα συμβατά με το πρωτόκολλο IEEE 1451. Στην Εικόνα 6.31 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα της εν λόγω ενοποίησης μέσω της πλακέτας επέκτασης.



Εικόνα 6.31. Το μπλοκ διάγραμμα της διασύνδεσης του ασύρματου κόμβου αισθητήρων βασισμένου στο πρωτόκολλο DASH7 με δυνατότητα διασύνδεσης με συστήματα συμβατά με το πρωτόκολλο IEEE 1451.

Επομένως, η πλακέτα επέκτασης αποτελεί έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων ο οποίος υποστηρίζει απόλυτα όλα τα διαθέσιμα πρωτόκολλα για ενοποίηση των τεχνολογιών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και της ανέπαφης αναγνώρισης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID) (βλ Εικόνα 6.32).

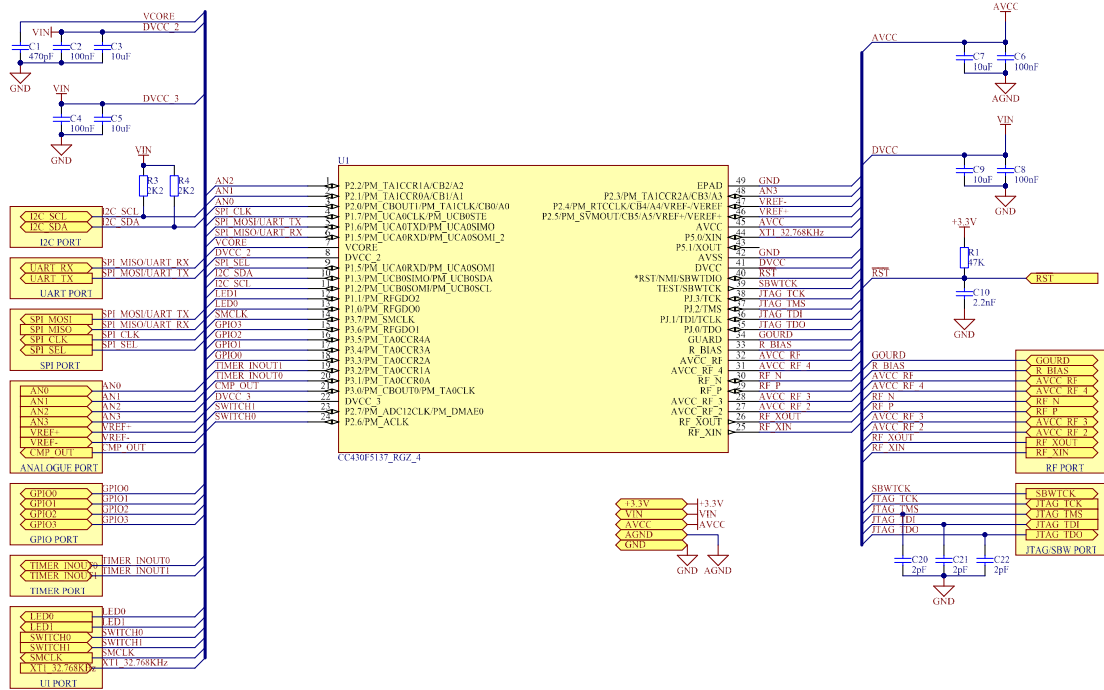


Εικόνα 6.32. Αναπαράσταση της ενοποίησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των ασύρματων συστημάτων ανέπαφης αναγνώρισης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RDID) βασισμένης στη χρήση του πρωτοκόλλου DASH7 Mode 2.

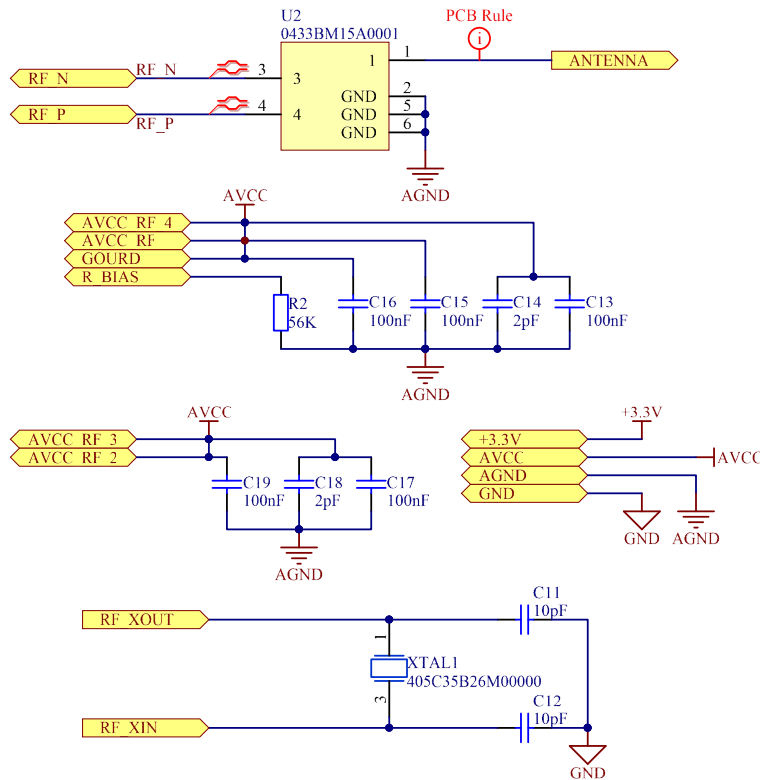
Σχετικά με την ανάπτυξη της πλακέτας επέκτασης, επιλέχθηκε να μην ακολουθηθούν τα βήματα του προτεινόμενου υποδείγματος σχεδιασμού με σκοπό να αναδειχθεί η ευκολία του υποδείγματος. Τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν είναι τα εξής:

1) *Σχεδιασμός των κυκλωμάτων της λειτουργίας της ασύρματης διασύνδεσης:* Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα CC430F5137 (της εταιρίας Texas Instruments), το οποίο περιέχει ένα μικροελεγκτή τύπου 16-bit MSP430 καθώς και έναν ασύρματο πομποδέκτη CC1101. Η εν λόγω σχεδιαστική επιλογή συνδυάζει τη χρήση ενός μικροελεγκτή εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (ultra-low power) με έναν ασύρματο πομποδέκτη χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και υψηλής αξιοπιστίας. Από την άλλη μεριά, η σχεδιαστική αυτή επιλογή απαιτεί τον ελάχιστο χώρο στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας. Για την προσαρμογή της εμπέδησης του σήματος της κεραίας (antenna impedance matching) χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο 0433BM15A0001 (της εταιρίας Johanson). Ο συνδετήρας της κεραίας (antenna connector) είναι τύπου SMA με αντίσταση 50 Ω.

Στην Εικόνα 6.33 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα του κυκλώματος του ολοκληρωμένου συστήματος (SoC) CC430F5137, ενώ στην Εικόνα 6.34 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα του σημάτων του ασύρματου πομποδέκτη.

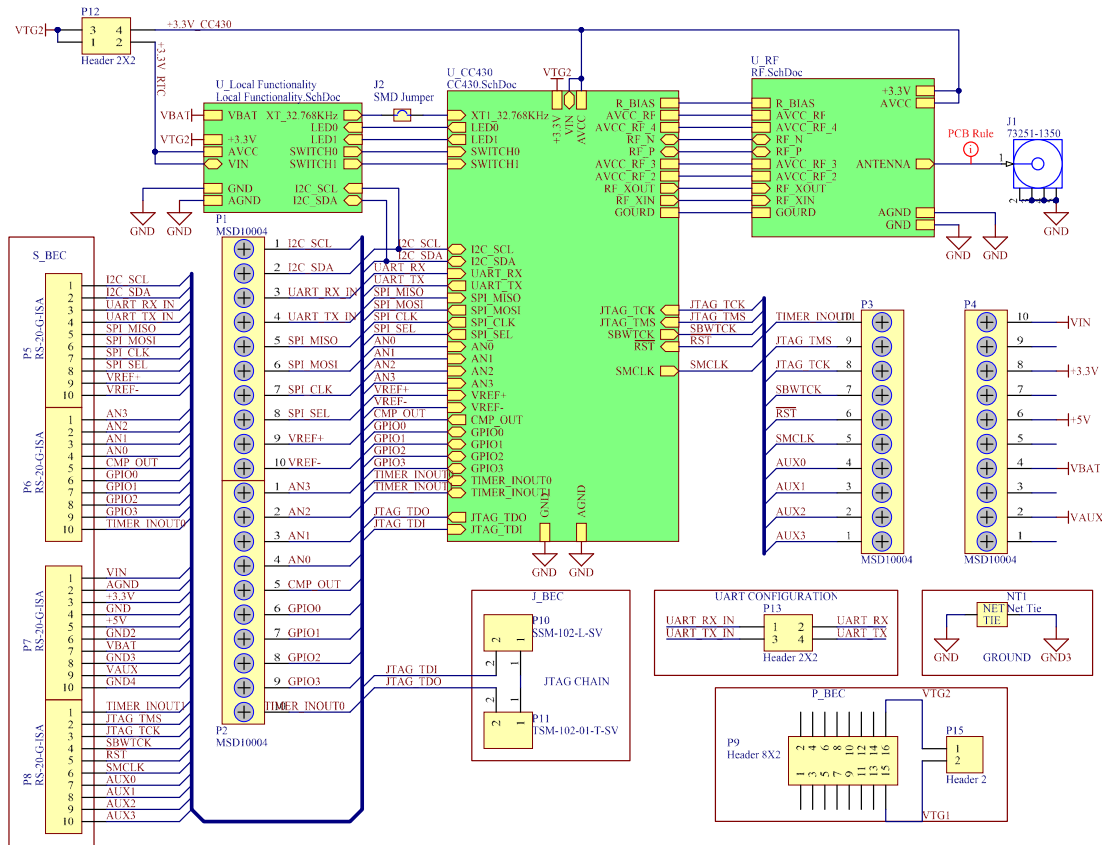


Εικόνα 6.33. Το σχηματικό κύκλωμα του ολοκληρωμένου συστήματος (SoC) CC430F5137.

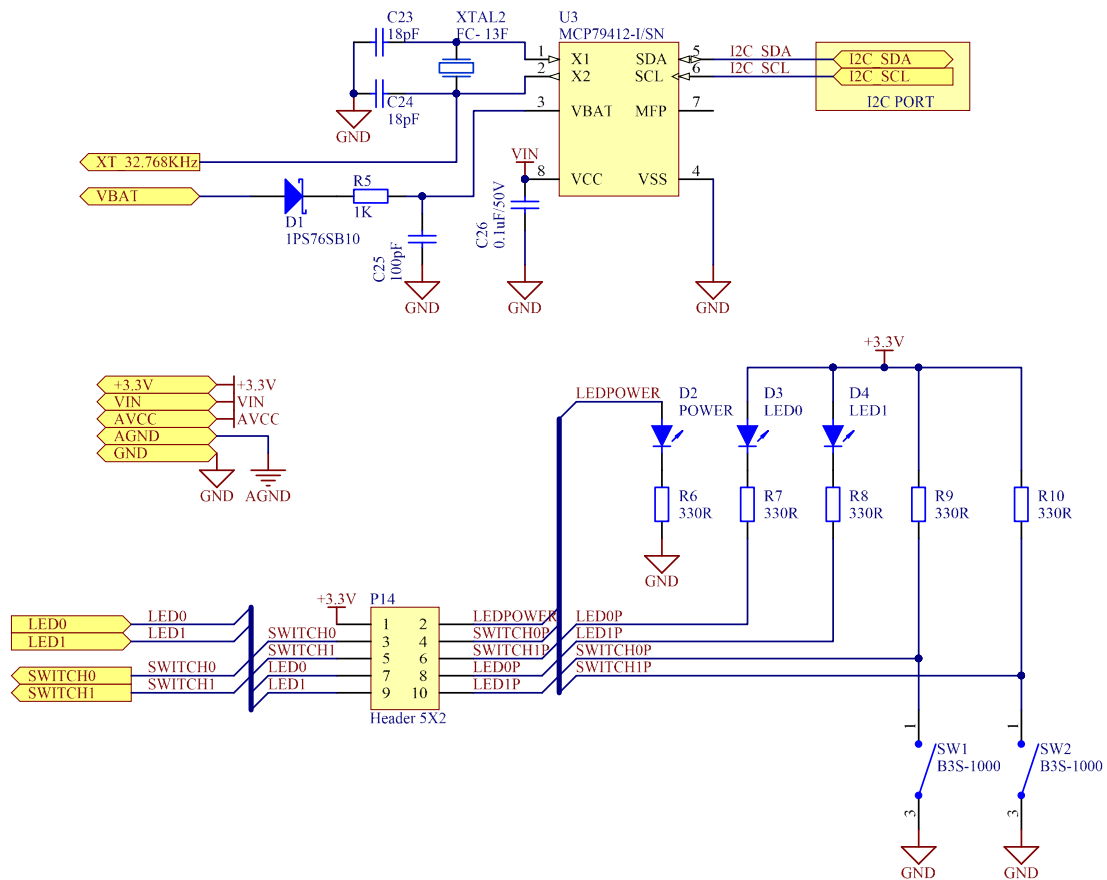


Εικόνα 6.34. Το σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας του ασύρματου πομποδέκτη CC1101 του ολοκληρωμένου συστήματος CC430F5137.

Σε αντίθεση με την περίπτωση της χρήσης του προτεινόμενου υποδείγματος σχεδιασμού πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube, όπου οι δι-επίπεδοι μηχανισμοί διαχείρισης και επέκτασης παρέχονται ως έτοιμα αρχεία σχηματικών κυκλωμάτων, εδώ πρέπει ο σχεδιαστής να σχεδιάσει όλα τους μηχανισμούς εξ-αρχής. Αυτό αυξάνει σημαντικά τον χρόνο ανάπτυξης της νέας πλακέτας επέκτασης. Στην Εικόνα 3.35 παρατίθεται το πλήρες σχηματικό κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης WNL_DASH7. Στην Εικόνα 6.36 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα των επί πλέον κυκλωμάτων της πλακέτας, για τις λειτουργίες της μη-πηκτηκής μνήμης διεύθυνσης MAC, καθώς και των φωτεινών ενδεικτών τύπου LED. Σχετικά με τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή MSP430 της πλακέτας επέκτασης, έχει χρησιμοποιηθεί ο συνδετήρας S-BEC2 του μηχανισμού διαχείρισης σημάτων καθώς και ο συνδετήρας του μηχανισμού J-BEC για τη χρήση του προτύπου JTAG. Τέλος, για την τροφοδοσία της πλακέτας έχει χρησιμοποιηθεί η τάση των +3.3 Vdc η οποία θεωρείται διαθέσιμη στα αντίστοιχα σήματα του συνδετήρα του μηχανισμού επέκτασης S-BEX2.



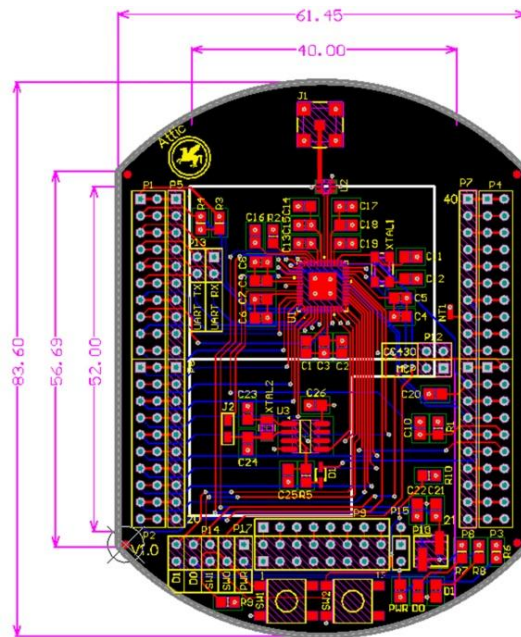
Εικόνα 6.35. Το πλήρες σχηματικό κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης WNL_DASH7 για την ασύρματη διασύνδεση μέσω του πρωτοκόλλου DASH7.



Εικόνα 6.36. Το σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών του ασύρματου πομποδέκτη καθώς και των σημάτων επικοινωνίας δεδομένων.

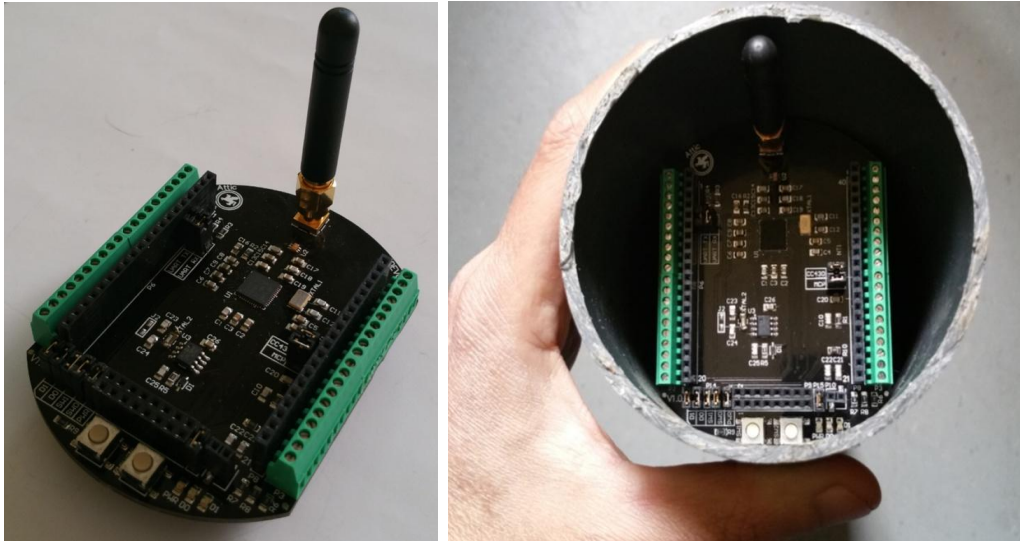
Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των παραπάνω σχηματικών κυκλωμάτων σχεδιάζεται το τυπωμένο κύκλωμα. Εξ' αρχής λαμβάνεται υπ' όψη το μοντέλο αναφοράς για το τυπωμένο κύκλωμα των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube. Πρέπει δηλαδή το νέο τυπωμένο να έχει τις ακριβείς φυσικές διαστάσεις, το ίδιο σχήμα, και τις ίδιες ακριβώς θέσεις για τους συνδετήρες των διαφόρων μηχανισμών επέκτασης με το τυπωμένο κύκλωμα του μοντέλου αναφοράς. Στην Εικόνα 6.37 παρατίθεται το πλήρες αρχείο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης WNL_DASH7. Το εν λόγω τυπωμένο κύκλωμα είναι τεσσάρων επιπέδων. Η σχεδιαστική αυτή επιλογή υιοθετήθηκε έτσι ώστε να υπάρχουν ανεξάρτητα επίπεδα για το σήμα της τάσης τροφοδοσίας (power plane) και το σήμα της γείωσης (ground plane) και να μην επηρεάζεται η λειτουργία των κυκλωμάτων ασύρματης επικοινωνίας από

ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο ή άλλες ηλεκτρικές παρεμβολές από το ίδιο το σύστημα.



Εικόνα 6.37. Το πλήρες αρχείο του τυπωμένου κυκλώματος της νέας πλακέτας επέκτασης WNL_DASH7 για την ασύρματη διασύνδεση μέσω του πρωτοκόλλου DASH7.

Μετά από τα στάδια της κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος και της συγκόλλησης όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων πάνω σ' αυτό, η νέα πλακέτα επέκτασης παρατίθεται στην Εικόνα 6.38. Στην εν λόγω εικόνα παρουσιάζεται επίσης η στέγαση της πλακέτας εντός του πλαστικού σωλήνα διαμέτρου 90 mm ο οποίος παίζει το ρόλο του περιβλήματος στέγασης (βλ. Κεφάλαιο 5). Επίσης, διακρίνονται, η κεραία της ασύρματης επικοινωνίας καθώς και οι συνδετήρες τύπου κλέμας με βίδες για τη φυσική πρόσβαση μέσω καλωδίων σε όλα τα σήματα του κυκλώματος της πλακέτας.



Εικόνα 6.38. Η πλακέτα επέκτασης WNL_DASH7 για την ασύρματη δικτύωση μέσω του πρωτοκόλλου DASH7 (στα αριστερά), και η πλακέτα επέκτασης εντός περιβλήματος στέγασης από πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 90 mm (στα δεξιά).

Βιβλιογραφία

1. Alliance, L. Lora alliance technology. <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology> (03-03-2016),
2. Alliance, L. Lorawan for developers. <https://www.lora-alliance.org/For-Developers/LoRaWANDevelopers> (04-03-2016),
3. Inc., M. Rn2483 (433 / 868 mhz) lora modem. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005219A.pdf> (01-03-2016),
4. Recom Inc. Dc/dc converter 1.5 amp single output. http://www.recom-power.com/pdf/Innoline/R-78Bxx-1.5_L.pdf (01-02-2016),
5. Piromalis, D., D., Arvanitis, K., G. . Rfid and wsn applications integration using dash7 mode 2 standard in agriculture. In *XXXV CIOSTA & CIGR V Conference 2013: From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry*, Billund, Denmark, 2013.
6. Wang, N.; Zhang, N.; Wang, M. Wireless sensors in agriculture and food industry –recent development and future perspective. *Comput. Electron. Agric.* **2006**, *50*, 1-14.
7. Fork, F.t. Farm to fork project. www.rfid-f2f.eu (05-01-2013),
8. CORDIS. Research programs. http://cordis.europa.eu/fp7/ict/enet/rfid-iot-projects_en.html (0-0.4-2014),
9. Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L.; Barreiro, P.; Robla, J.I. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors* **2009**, *9*, 4728-4750.
10. Suprem, A.; Mahalik, N.; Kim, K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. *Comput Stand Interfaces* **2013**, *35*, 355-364.
11. López, T.S. Rfid and sensor integration standards: State and future prospects. *Comput Stand Interfaces* **2011**, *33*, 207-213.
12. ISO/IEC. *Information technology – radio*

frequency identification for item management – part 7: Parameters for active air-interface communications at 433 mhz; ISO/IEC: 2004, 2004.

13. NIST. Draft standard for a smart transducer interface for sensors and actuators - common functions, communications protocols and transducer electronic data sheets (teds) formats. <http://grouper.ieee.org/groups/1451/0> (05-05-2013),
14. Piromalis, D.D.; Arvanitis, K.G.; Sigrimis, N. In *Dash7 mode 2: A promising perspective for wireless agriculture*, 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post Harvest Industry, AGRICONTROL 2013, Espoo, 2013; Espoo, pp 127-132.
15. Piromalis, D.D.; Arvanitis, K.G. Radio frequency identification and wireless sensor networks application domains integration using dash7 mode 2 standard in agriculture. *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics* **2015**, *1*, 178-189.
16. J.P., N. *Introduction to dash7 technologies*; May 2009, 2009.
17. Alliance, D. Dash7 opentag. <http://www.dash7.org> (05-03-2016),
18. Indigresso. Dash7 mode 2. <http://www.indigresso.com/wiki/doku.php?id=dash7mode2:applayer>
19. J.P., N. *Opentag: Office hours, dash7 alliance*; 12-03-2011, 2011.
20. Instruments, T. Slas554h , cc430fxxxx socs. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f6137.pdf> (04-10-2013),
21. Piromalis, D., Arvanitis, K., and Sigrimis, N. A dash7-based wsn node with ieee 1451compatibility for precision agriculture applications. In *EFITA-WCCA-CIGR, Sustainable Agriculture through ICT Innovation*, Turin, Italy, 2013.

Κεφάλαιο



Αποσύνδεση των Λειτουργιών Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης από τους Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. (Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437). Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.

7.1. Τυπικές Προσεγγίσεις στο Σχεδιασμό Κυκλωμάτων Προγραμματισμού και Εκοφαλάτωσης Κώδικα Μικροελεγκτών Κόμβων Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Σε κάθε ασύρματο κόμβο αισθητήρων, ανεξαρτήτως της αρχιτεκτονικής του, υπάρχει τουλάχιστον ένας μικροελεγκτής. Ο μικροελεγκτής αυτός προγραμματίζεται στο εργοστάσιο ή στο εργαστήριο με το κατάλληλο ενσωματωμένο λογισμικό το οποίο περιέχει εκτός του πρωτοκόλλου της ασύρματης δικτύωσης (network protocol stack) και το σενάριο της εκάστοτε εφαρμογής. Η διαδικασία του προγραμματισμού κάποιες φορές επιβάλλεται να πραγματοποιείται επί τόπου, δηλαδή όντας το σύστημα του ασύρματου κόμβου εγκατεστημένο στο πραγματικό πεδίο της εφαρμογής. Ο λόγος για την ανάγκη αυτή είναι συνήθως η αλλαγή μέρους ή όλου του σεναρίου της εφαρμογής, ή ακόμα και η διόρθωση κάποιου μέρους του ενσωματωμένου λογισμικού.

Σε όλες τις πλακέτες των ασύρματων κόμβων αισθητήρων, όλων των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών, υπάρχουν ειδικά κυκλώματα και συνδετήρες σημάτων για τον προγραμματισμό των ενσωματωμένων μικροελεγκτών. Τα ίδια αυτά κυκλώματα τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται και για τη διαδικασία της εκοφαλάτωσης του ενσωματωμένου λογισμικού των μικροελεγκτών. Τα εν λόγω κυκλώματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

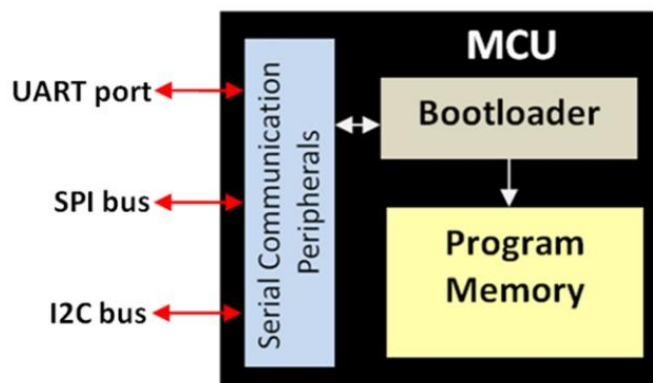
- κυκλώματα για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή επί του κυκλώματος (in-circuit programming), και
- κυκλώματα προγραμματισμού βάσει του προτύπου JTAG.

Παραδοσιακά όλα τα κυκλώματα για τον προγραμματισμό και την εκοφαλάτωση των μικροελεγκτών είναι μόνιμα τοποθετημένα στην τελική έκδοση της πλακέτας του μικροελεγκτή και δεν δύνανται να αφαιρεθούν κατά την διάρκεια της ζωής του συστήματος.

7.1.1. Προγραμματισμός επί του Κυκλώματος (In-Circuit Programming)

Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 4, για τον προγραμματισμό ενός μικροελεγκτή όντας αυτός συγκολλημένος στο τυπωμένο κύκλωμα της τελικής πλακέτας του συστήματος, π.χ. ενός κόμβου, χρησιμοποιούνται διάφοροι πόροι περιφερειακών σειριακής επικοινωνίας δεδομένων. Συγκεκριμένα, οι πόροι αυτοί είναι η θύρα σειριακής επικοινωνίας UART, και οι διαύλοι σειριακής επικοινωνίας

SPI και I2C. Μέσω ποιού περιφερειακού μπορεί να προγραμματιστεί ένας μικροελεγκτής το καθορίζει ρητώς ο κατασκευαστής του. Τα σήματα των περιφερειακών αυτών οδηγούνται σε συνδεδεμένες σημάτων τύπου σειρών ακίδων (pin headers) έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να συνδέσει σ' αυτά την ειδική συσκευή προγραμματισμού του μικροελεγκτή. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως π.χ. αυτή της αρχιτεκτονικής του Arduino, έχει αξιοποιηθεί η δυνατότητα του μικροελεγκτή να αυτο-προγραμματίζεται. και έχει δημιουργηθεί ένας μηχανισμός προγραμματισμού μέσω εντολών που μεταδίδονται προς τον μικροελεγκτή μέσω κάποιου από τα περιφερειακά επικοινωνίας (bootloader). Στην Εικόνα 7.1 αποδίδεται μέσω μπλοκ διαγράμματος η εγγραφή της μνήμης προγράμματος μέσω δεδομένων από κάποιο από τα περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας υπό τον έλεγχο του μηχανισμού bootloader.



Εικόνα 7.1. Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα του μηχανισμού προγραμματισμού μικροελεγκτή μέσω δεδομένων από περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας δεδομένων.

Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η σειριακή θύρα UART για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, μέσω ενός μετατροπέα UART σε USB είναι δυνατός ο προγραμματισμός απ' ευθείας μέσω του Η/Υ. Για την μεγαλύτερη ευκολία των χρηστών, ο μετατροπέας αυτός είναι συνήθως υλοποιημένος στο ίδιο το τυπωμένο κύκλωμα του συστήματος, π.χ. του ασύρματου κόμβου. Αυτή η προσέγγιση ακολουθείται σε όλες τις κύριες πλακέτες επέκτασης (main-boards) όλων των εμπορικά διαθέσιμων λύσεων, π.χ. Arduino, Nucleo, FRDM, LaunchPad, κλπ.

7.1.3. Περιορισμοί και Δυσκολίες στην Ανάπτυξη Κόμβων με Πολλούς Μικροελεγκτές

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3, οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής δεν επιτρέπουν την συνύπαρξη περισσότερων από έναν μικροελεγκτών στο ίδιο σύστημα. Θεωρητικά, αυτό μπορεί να συμβεί, δηλαδή η κάθε μια από τις πλακέτες επέκτασης (shields) να διαθέτει τον δικό της μικροελεγκτή, αλλά στην πράξη με τα δικά του κυκλώματα και συνδετήρες προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης. Στην πράξη αυτή η προσέγγιση από μεριάς των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών μπορεί να είναι αποδεκτή μόνο στα στενά πλαίσια πειραματικών δοκιμών και πιλοτικών υλοποιήσεων. Η πολυπλοκότητα και η έλλειψη τυποποιημένης αντιμετώπισης των αναγκών των λειτουργιών προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης των μικροελεγκτών όλων των πλακετών επέκτασης του συστήματος καθιστά το σύστημα πολύπλοκο, επιρρεπές σε πρόσληψη και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, και ανίκανο να δουλέψει αξιόπιστα στην τελική εφαρμογή στο πεδίο.

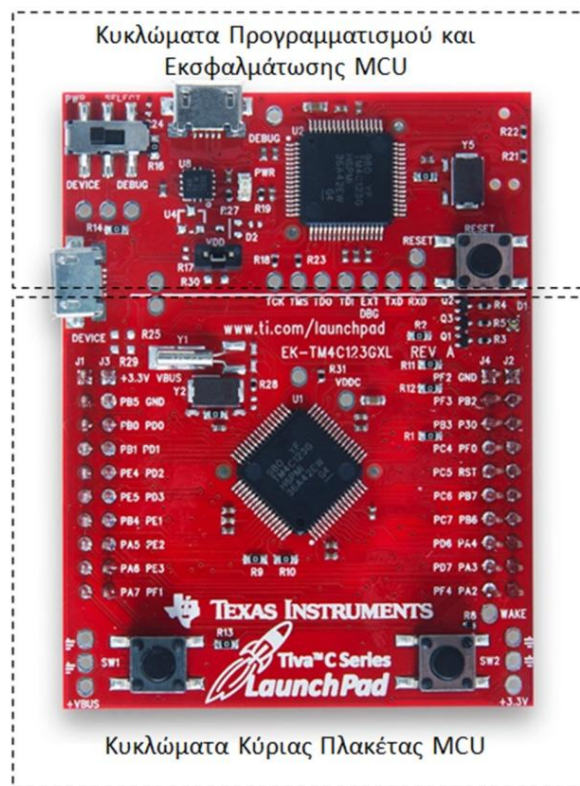
Από την άλλη πλευρά, έστω για λόγους μόνο πειραματισμών, η ύπαρξη πολλών διαφορετικών κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης στο επεκτάσιμο σύστημα, π.χ. στον κόμβο, δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού των μικροελεγκτών. Με άλλα λόγια, δεν είναι εφικτό μέσα στο ίδιο περιβάλλον ανάπτυξης ενσωματωμένου λογισμικού στον Η/Υ να ελέγχονται όλοι, ή τουλάχιστον μερικοί από τους μικροελεγκτές του συστήματος.

7.2. Αποσύνδεση των Κυκλωμάτων Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης από τον Ασύρματο Κόμβο

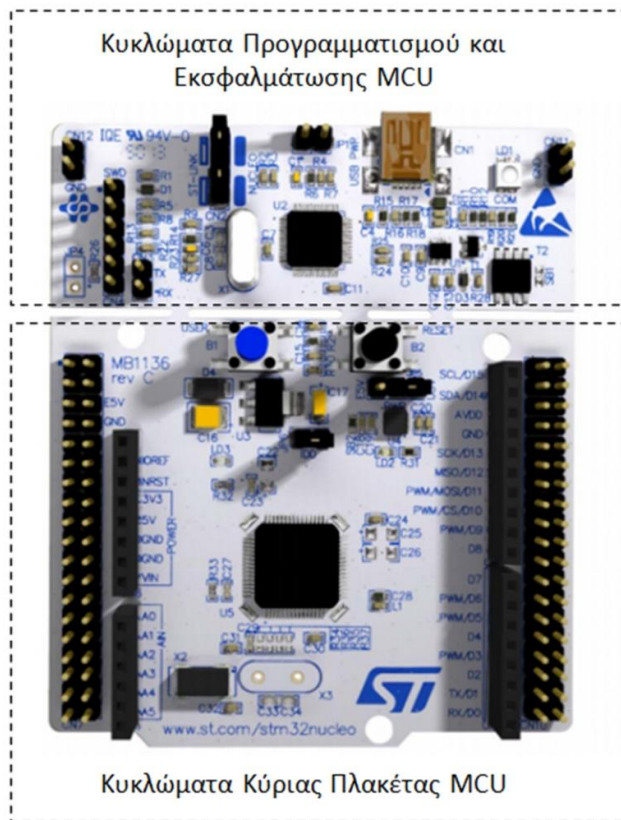
Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, προτείνεται η πλήρης αποσύνδεση των πλακετών επέκτασης με μικροελεγκτή από τις λειτουργίες του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης. Συγκεκριμένα, προτείνεται να μην υπάρχουν καθόλου κυκλώματα προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης στο τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης παρά μόνο η δρομολόγηση των απαραίτητων σχετικών σημάτων του μικροελεγκτή στους συνδετήρες των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης.

Στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής έχει επιχειρηθεί ο διαχωρισμός των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης

σε επίπεδο χωροταξίας των σχετικών εξαρτημάτων πάνω στο τυπωμένο της πλακέτας. Επίσης, οι λύσεις των αρχιτεκτονικών LaunchPad (της εταιρίας Texas Instruments) και STM32 Nucleo (της εταιρίας ST-Microelectronics), δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αποσπάσει το κομμάτι της πλακέτας στο οποίο βρίσκονται τα εν λόγω κυκλώματα προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης (βλ. Εικόνα 7.3 και Εικόνα 7.4). Δυστυχώς, σύμφωνα με τις δύο αυτές αρχιτεκτονικές, δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός επανασύνδεσης των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης με την υπόλοιπη κύρια πλακέτα. Από την άλλη μεριά, καμία από τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές δεν παρέχει τη δυνατότητα στα κυκλώματα προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης της κύριας πλακέτας να μπορούν ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες των μικροελεγκτών των υπολοίπων πλακετών επέκτασης.



Εικόνα 7.3. Η κύρια πλακέτα της αρχιτεκτονικής LaunchPad (της εταιρίας Texas Instruments). Το επάνω μέρος της πλακέτας περιλαμβάνει τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης του μικροελεγκτή (MCU) της πλακέτας και μπορεί να αποσπαστεί κόβοντάς το από την υπόλοιπη πλακέτα.



Εικόνα 7.4. Η κύρια πλακέτα της αρχιτεκτονικής STM32 Nucleo (της εταιρίας ST-Microelectronics). Το επάνω μέρος της πλακέτας περιλαμβάνει τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκφαλμάτωσης του μικροελεγκτή (MCU) της πλακέτας και μπορεί να αποσπαστεί κόβοντάς το από την υπόλοιπη πλακέτα.

7.3. Πλεονεκτήματα από την Προτεινόμενη Αποσύνδεση

Σύμφωνα με την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής SensoTube, τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκφαλμάτωσης δεν υπάρχουν στις πλακέτες επέκτασης και μετά αποσπώνται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για τις αρχιτεκτονικές LaunchPad και Nucleo. Κάτι τέτοιο θα επιβάρυνε οικονομικά την κάθε πλακέτα επέκτασης ανεξάρτητα εάν τα κυκλώματα του προγραμματισμού και της εκφαλμάτωσης συνόδευαν ή όχι το τελικό σύστημα. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, όπως εκτενώς εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4, προτείνεται να υλοποιούνται σε ανεξάρτητες πλακέτες επέκτασης (επιπέδου PDL). Μάλιστα, οι σχεδιαστές μπορούν να υλοποιούν σε μια πλακέτα επέκτασης τα κυκλώματα για τον προγραμματισμό και την εκφαλμάτωση για περισσότερους από έναν

μικροελεγκτές. Επί πλέον, μέσω των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης επιτρέπουν την ομοιογένεια των συνδέσεων και των επεκτάσεων.

Τα πλεονεκτήματα από την προτεινόμενη προσέγγιση της αποσύνδεσης των κυκλωμάτων προγραμματισμού και της εκοφιλμάτωσης από τις πλακέτες επέκτασης είναι:

- μείωση της συνολικής ενέργειας σε επίπεδο πλακέτας επέκτασης αλλά και σε επίπεδο συστήματος,
- μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους των πλακετών επέκτασης, και κατ' επέκταση του συστήματος,
- δυνατότητα για ταυτόχρονη ανάπτυξη πολλών και διαφορετικών μικροελεγκτών.

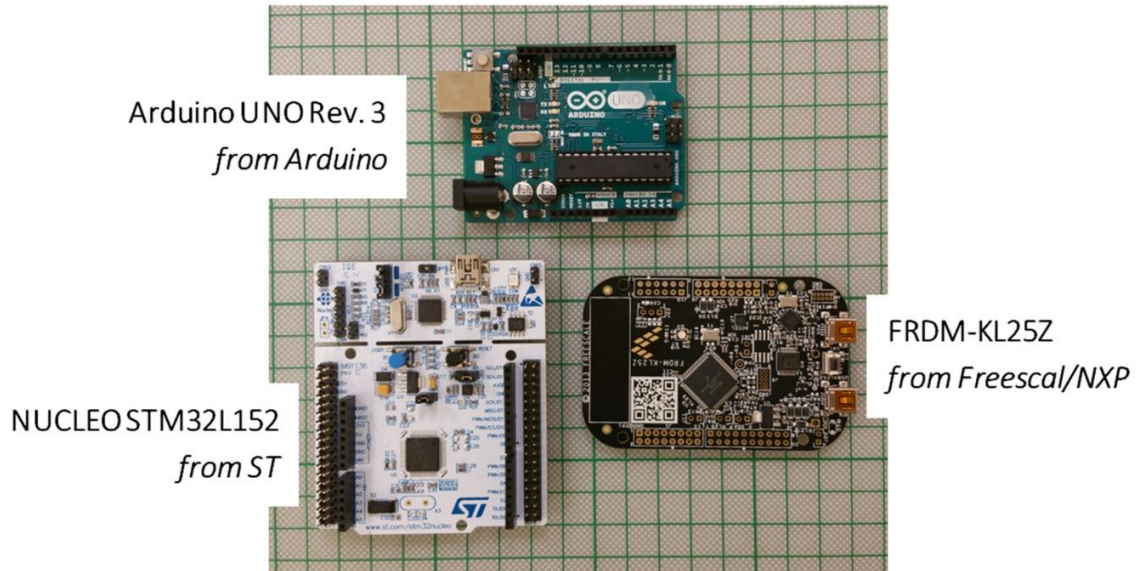
Οι πλακέτες επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube, καθώς και τα συστήματα των ασύρματων κόμβων αισθητήρων που μπορούν να συντεθούν από αυτές, μπορούν να διασφαλίσουν την αξιοπιστία και την ευρωστία των συστημάτων ειδικού σκοπού αλλά χρησιμοποιώντας υλικό ανοικτής πηγής. Από την άλλη μεριά, οι σχεδιαστές και οι χρήστες δεν χρειάζεται να αλλάξουν τις συνήθειες και τα εργαλεία ανάπτυξης που έχουν.

7.3.1. Πλεονεκτήματα στο Ενεργειακό Ισοζύγιο του Κόμβου

Στο ερώτημα εάν θα μπορούσε ένας ασύρματος κόμβος να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας εξ' ολοκλήρου κύριες πλακέτες των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, η απάντηση είναι ναι, όμως το σύστημα του κόμβου θα υπέφερε από τους περιορισμούς και τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Προφανώς, το πιο σημαντικό από τα προβλήματα θα ήταν η πολύ χαμηλή ενεργειακή απόδοση. Για τους ασύρματους κόμβους στο πεδίο της γεωργίας που η ενέργειά τους προέρχεται από συσσωρευτές ενέργειας, η σπατάλη ενέργειας δεν επιτρέπεται διότι είτε θα μειώνεται ο χρόνος της αυτονομίας του συστήματος, είτε θα επιβάλλεται αύξηση της αρχικής επένδυσης εξ' αιτίας της υπερδιαστασιολόγησης των συσσωρευτών ενέργειας.

Για την απόδειξη της θέσης αυτής, επιλέχθηκαν τρεις από τις πιο δημοφιλείς κύριες πλακέτες επέκτασης με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ενέργειας. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.5, χρησιμοποιήθηκαν οι κύριες πλακέτες επέκτασης Arduino Uno Rev. 3 (της εταιρίας Arduino), Nucleo STM32L152

(της εταιρίας ST-Microelectronics), και FRDM-KL25Z (της εταιρίας Freescale, νυν NXP). Η πρώτη εκ των τριών φέρει μικροελεγκτή των 8-bit, ενώ οι άλλες δύο φέρουν μικροελεγκτή των 32-bit αρχιτεκτονικής ARM.



Εικόνα 7.5. Οι κύριες πλακέτες επέκτασης Arduino Uno Rev. 3 (της εταιρίας Arduino), Nucleo STM32L152 (της εταιρίας ST-Microelectronics), και FRDM-KL25Z (της εταιρίας Freescale, νυν NXP).

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την δοκιμή των τριών κύριων πλακετών ήταν η μέτρηση του ρεύματος λειτουργίας τους έχοντας θέσει το μικροελεγκτή της πλακέτας πρώτα σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας (full active mode) και μετά σε κατάσταση πλήρους αδράνειας (deep sleep mode). Η διαφορά μεταξύ των τιμών ρεύματος των δύο καταστάσεων υποδηλώνει την κατανάλωση ρεύματος που θα είχε μια πλακέτα επέκτασης με το συγκεκριμένο μικροελεγκτή αλλά δίχως όλα τα υπόλοιπα κυκλώματα για τον προγραμματισμό, την εκσφαλμάτωση, τη διαχείριση ενέργειας, κλπ. Επίσης, το ρεύμα που καταναλώνεται έχοντας τον μικροελεγκτή σε κατάσταση deep sleep, είναι το ρεύμα που απαιτούν όλα τα υπόλοιπα κυκλώματα της πλακέτας πλην αυτών του μικροελεγκτή.

Η τροφοδοσία και των τριών πλακετών επέκτασης επιλέχθηκε για λόγους ίσης μεταχείρισης, να πραγματοποιηθεί μέσω του συνδετήρα USB της κάθε πλακέτας, ο οποίος παρέχει τάση +5 Vdc, κι όχι μέσω των ιδιαίτερων κυκλωμάτων ρύθμισης και

σταθεροποίησης τάσης της κάθε πλακέτας. Τα τελευταία αυτά κυκλώματα, εκτός του ότι είναι αρκετά ενεργοβόρα, είναι και διαφορετικά υλοποιημένα σε κάθε μια από τις κύριες πλακέτες.

Η θέση του μικροελεγκτών σε κατάσταση πλήρους δραστηριότητας (full active mode) πραγματοποιήθηκε προγραμματίζοντας τους μικροελεγκτές να εκτελούν έναν ατέρμονα βρόχο (never-ending loop). Αντίστοιχα, η θέση των μικροελεγκτών των εν λόγω τριών κύριων πλακετών πραγματοποιήθηκε προγραμματίζοντας τους με κώδικα κλήσης συγκεκριμένων εντολών για την ενεργοποίηση του deep-sleep mode. Και στις δύο περιπτώσεις ο κώδικας (firmware) των μικροελεγκτών αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού C. Στην περίπτωση του Arduino χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE, ενώ στις περιπτώσεις των Nucleo και FRDM, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον Mbed.

Στην Εικόνα 7.6 παρατίθενται τα προγράμματα σε γλώσσα C για τον μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας Arduino. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 7.7, παρατίθενται τα προγράμματα των μικροελεγκτών των κύριων πλακετών Nucleo και FRDM σε γλώσσα C.



```
Just_a_Loop$
#include <avr/sleep.h>

void setup()
{
  pinMode(13, OUTPUT);
  digitalWrite(13, LOW);
}

void loop()
{
  while(1);
}

sketch_jun11a
#include <avr/sleep.h>

void setup()
{
  pinMode(13, OUTPUT);
  digitalWrite(13, LOW);
}

void sleepNow()
{
  set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
  sleep_enable();
  sleep_mode();
}

void loop()
{
  sleepNow();
}
```

Εικόνα 7.6. Τα προγράμματα για τη θέση του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας Arduino σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας (αριστερά), και σε κατάσταση πλήρους αδράνειας (δεξιά).

```

main.cpp x
1 #include "mbed.h"
2
3 int main()
4 {
5     while(1) {
6     }
7 {

main.cpp x
1 #include "mbed.h"
2
3 int main()
4 {
5     deepsleep();
6 }

```

Εικόνα 7.7. Τα προγράμματα για τη θέση των μικροελεγκτών των κύριων πλακετών Nucleo και FRDM σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας (αριστερά), και σε κατάσταση πλήρους αδράνειας (δεξιά).

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στο ρεύμα κατανάλωσης στις δύο καταστάσεις λειτουργίας των μικροελεγκτών δίνονται στον Πίνακα 7.1. Όπου:

I_{fa} είναι η κατανάλωση ρεύματος σε πλήρη λειτουργία του μικροελεγκτή,

I_{ds} είναι το ρεύμα κατανάλωσης όντας ο μικροελεγκτής σε κατάσταση πλήρους αδράνειας, και

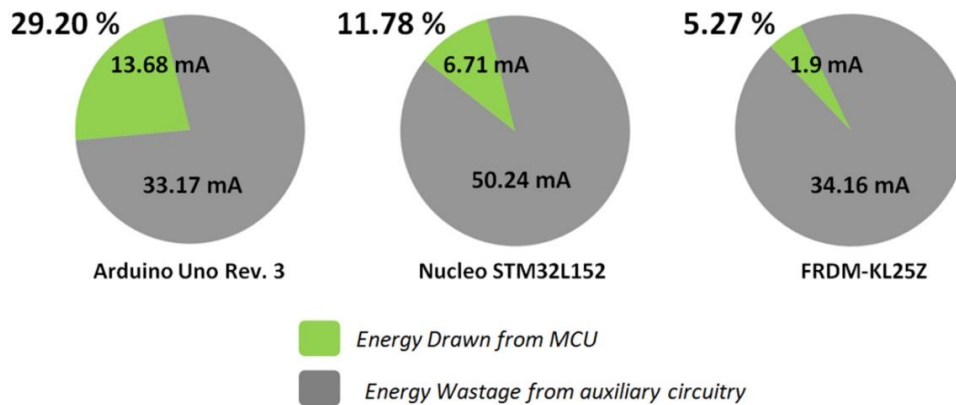
I_{mcu} είναι το μέγιστο ρεύμα που καταναλώνει ο μικροελεγκτής και τα κυκλώματά του.

Πίνακας 7.1. Μετρήσεις ρεύματος για πλήρη και μηδενική λειτουργία των μικροελεγκτών των κύριων πλακετών επέκτασης.

Platform Name	Brand Name	I_{fa} (mA)	I_{ds} (mA)	$I_{mcu} = (I_{fa} - I_{ds})$ (mA)
Arduino Uno Rev. 3	Arduino	46.85	33.17	13.68
Nucleo STM32L152	ST	56.95	50.24	6.71
FRDM-KL25Z	Freescale/NXP	36.06	34.16	1.90

Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, και αναδεικνύεται και από την ανάλυση που παρατίθεται στην Εικόνα 7.8, η ενέργεια που καταναλώνεται στις κύριες πλακέτες επέκτασης εξ' αιτίας των βοηθητικών κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που χρειάζεται ο μικροελεγκτής και τα

κυκλώματά του. Επομένως, η προτεινόμενη αποσύνδεση των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης από την πλακέτα του μικροελεγκτή συμβάλλει αποδεδειγμένα στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στο σύστημα ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων το οποίο απαρτίζεται από πλακέτες επέκτασης.



Εικόνα 7.8. Κατανάλωση ρεύματος του κυκλώματος του μικροελεγκτή (πράσινη περιοχή), κατανάλωση ρεύματος των βοηθητικών κυκλωμάτων για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση, των τριών κύριων πλακετών δημοφιλών αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής.

7.3.2. Πλεονεκτήματα στην Πολυπλοκότητα και το Κόστος του Κόμβου

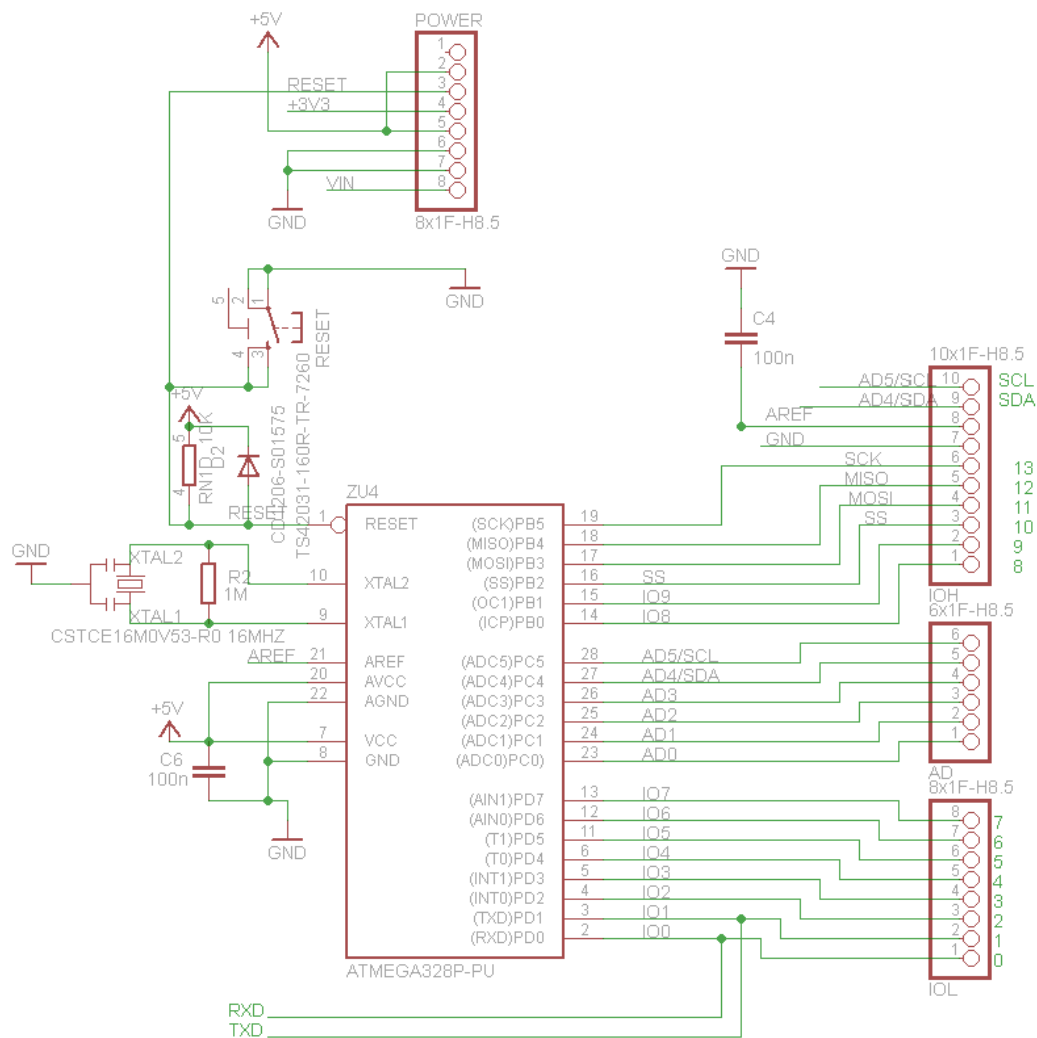
Η αποσύνδεση των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης των μικροελεγκτών από τις πλακέτες επέκτασης συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό των πλακετών επέκτασης καθώς και στη μείωση του κόστους των πλακετών επέκτασης.

Παίρνοντας ως παράδειγμα την πιο δημοφιλή αρχιτεκτονική επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, το Arduino, μπορεί να αποδειχτεί η παραπάνω θέση. Συγκεκριμένα, μελετώντας το σχηματικό κύκλωμα του Arduino Uno Rev.3, όπως παρέχεται ελεύθερα στον διαδικτυακό τόπο του κατασκευαστή του, διαχωρίζουμε τα κυκλώματα σύμφωνα με τις εξής τρεις κατηγορίες:

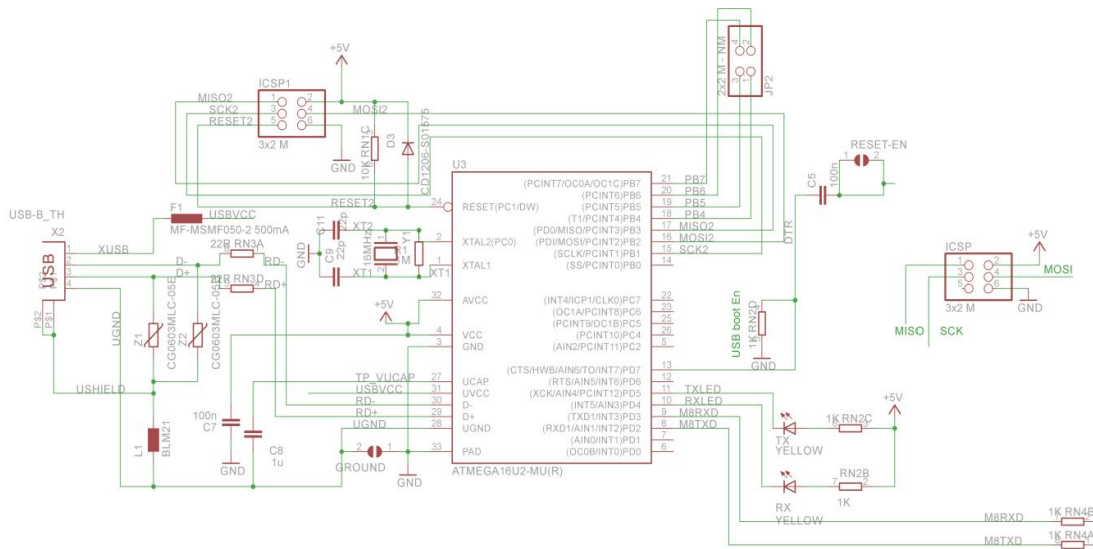
- κυκλώματα του μικροελεγκτή και συνδετήρες επέκτασης της,
- κυκλώματα για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή, και

- κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας της πλακέτας.

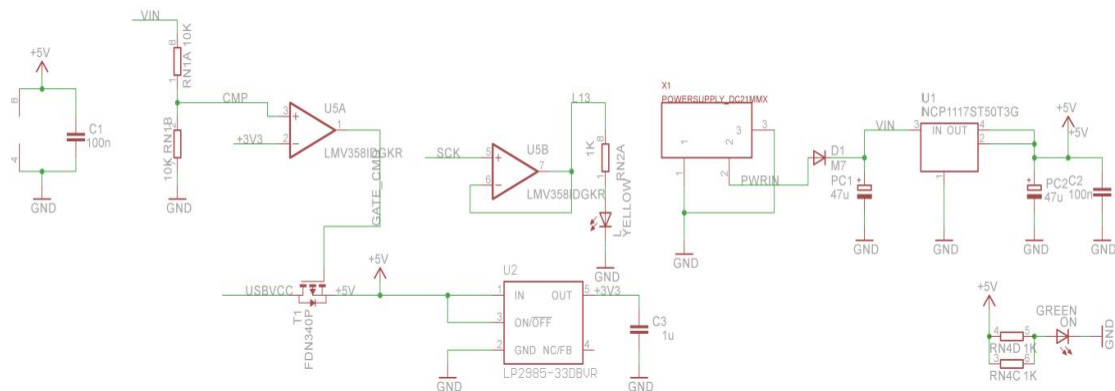
Με τον τρόπο αυτό, το σχηματικό κύκλωμα της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3 μπορεί να αποδοθεί μέσω τριών σχηματικών κυκλωμάτων, αυτό της Εικόνας 7.9 για τα κυκλώματα του μικροελεγκτή και των συνδετήρων σύνδεσης, αυτό της Εικόνας 7.10 για τα κυκλώματα προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης, και τέλος, αυτό της Εικόνας 7.11 για την διαχείριση ενέργειας της πλακέτας.



Εικόνα 7.9. Το σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας του μικροελεγκτή και των συνδετήρων επέκτασης της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.



Εικόνα 7.10. Το σχηματικό κύκλωμα της λειτουργιών του προγραμματισμού και της εκοφαλάτωσης του μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.



Εικόνα 7.11. Το σχηματικό κύκλωμα της διαχείρισης ενέργειας της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.

Ο προγραμματισμός και η εκοφαλάτωση του μικροελεγκτή του Arduino πραγματοποιείται μέσω των σημάτων RXD και TXD του περιφερειακού σειριακής επικοινωνίας UART του μικροελεγκτή (βλ. Εικόνα 7.10). Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, τα σήματα αυτά μπορούν να δρομολογηθούν προς τα σήματα του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC1 και να διαχειριστούν από μια ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης επιπέδου PDL (προγραμματισμού και εκοφαλάτωσης). Αντίστοιχα, και τα κυκλώματα για την διαχείριση ενέργειας μπορούν να αφαιρεθούν από την πλακέτα επέκτασης και να

τοποθετηθούν σε μία ή περισσότερες πλακέτες επέκτασης επιπέδου PML (διαχείρισης ενέργειας).

Με την ανωτέρω προσέγγιση της αρχιτεκτονικής SensoTube, η πλακέτα επέκτασης απλοποιείται σημαντικά. Στους τρεις πίνακες που ακολουθούν, έχουν καταχωρηθεί τα εξαρτήματα που περιλαμβάνονται στα προαναφερόμενα τρία σχηματικά κυκλώματα της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 7.2 αναφέρονται στα εξαρτήματα των κυκλωμάτων του μικροελεγκτή και των συνδετήρων επέκτασης, στον Πίνακα 7.3 αναφέρονται τα εξαρτήματα των κυκλωμάτων του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης, και τέλος, στον Πίνακα 7.4 αναφέρονται τα εξαρτήματα για τη διαχείριση ενέργειας. Τα εξαρτήματα που αναφέρονται στους εν λόγω πίνακες, είναι ακριβώς αυτά που χρησιμοποιούνται στην κύρια πλακέτα Arduino Uno Rev.3, και οι τιμές τους έχουν βασιστεί στον τιμοκατάλογο λιανικής πώλησης γνωστής διαδικτυακής εταιρίας πώλησης ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (www.mouser.com).

Πίνακας 7.2. Η λίστα των εξαρτημάτων του κυκλώματος λειτουργίας του μικροελεγκτή και των συνδετήρων επέκτασης της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.

#	Component	Description	Qty	Part Number	Manufacturer	Cost (€)
1	C4	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
2	C6	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
3	28 pins IC Socket	Connector	1	1-390261-9	TE Conn	0.1
4	6 pins Header Fem.	Connector	1	5-534237-4	TE Conn	1.08
5	10 pins Header Fem.	Connector	1	M20-7821046	Harwin	0.73
6	8 pins Header Fem.	Connector	1	M20-7820842	Harwin	0.996
7	8 pins Header Fem.	Connector	1	M20-7820842	Harwin	0.996
8	XTAL1	Crystal	1	ABL-16.000MHZ-B2	Abracon	0.357
9	D2	Diode	1	CD1206-S01575	Bourns	0.142
10	ZU4	IC	1	ATMEGA328P-PU	Atmel	3.35
11	RN3	Resistor	1	CAY16-220J4LF	Bourns	0.095
12	RESET	Switch	1	TS42031-160R-TR-7260	Omron???	0.317
Total:						8.345 €

Πίνακας 7.3. Η λίστα των εξαρτημάτων των λειτουργιών προγραμματισμού και εκοφιλμάτωσης της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.

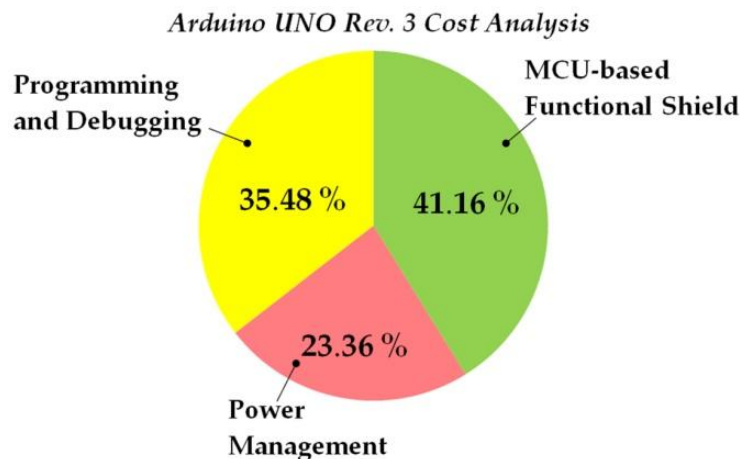
#	Component	Description	Qty	Part Number	Manufacturer	Cost (€)
1	C7	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
2	C5	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
3	C8	Capacitor	1	GRM188R60J105KA01D	Murata	0.091
4	C11	Capacitor	1	500R14N220JV4T	Johanson	0.091
5	C9	Capacitor	1	500R14N220JV4T	Johanson	0.091
6	ICSP1	Connector	1	67996-406HLF	FCI	0.244
7	ICSP	Connector	1	67996-406HLF	FCI	0.244
8	X2	Connector	1	USB-B1HSW6	On Shore	0.58
9	XT1	Crystal	1	CSTCE16M0V53-R0	Murata	0.416
10	D3	Diode	1	CD1206-S01575	Bourns	0.142
11	L1	Ferrite	1	BLM21PG221SN1D	Murata	0.1
12	U3	IC	1	ATMEGA16U2-MUR	Atmel	3.93
13	RX	LED	1	APT2012YC	Kingbright	0.119
14	TX	LED	1	APT2012YC	Kingbright	0.119
15	F1	PTC	1	MF-MSMF050-2	Bourns	0.208
16	R1	Resistor	1	ERJ-3GEYJ105V	Panasonic	0.091
17	R2	Resistor	1	ERJ-3GEYJ105V	Panasonic	0.091
18	RN4	Resistor	1	CAY16-102J4LF	Bourns	0.095
19	Z1	Varistor	1	CG0603MLC-05E	Bourns	0.18
20	Z2	Varistor	1	CG0603MLC-05E	Bourns	0.18
Total:						7.194 €

Πίνακας 7.4. Η λίστα των εξαρτημάτων της διαχείρισης ενέργειας της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.

#	Component	Description	Qty	Part Number	Manufacturer	Cost (€)
1	C1	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
2	C2	Capacitor	1	CC0603KRX7R9BB104	Yageo	0.091
3	C3	Capacitor	1	GRM188R60J105KA01D	Murata	0.091

4	PC1	Capacitor	1	EMVA250ADA470MF55G	United Chemi-Con	0.32
5	PC2	Capacitor	1	EMVA250ADA470MF55G	United Chemi-Con	0.32
6	X1	Connector	1	PJ-102AH	CUI Inc	1.08
7	D1	Diode	1	S2M-13-F	Diodes Inc.	0.311
8	U1	IC	1	NCP1117ST50T3G	On Semi	0.398
9	U2	IC	1	LP2985-33DBVR	TI	0.498
10	U5	IC	1	LMV358IDGKR	TI	0.67
11	L	LED	1	APT2012YC	Kingbright	0.119
12	ON	LED	1	LG R971-KN-1	OSRAM	0.22
13	RN1	Resistor	1	CAY16-103J4LF	Bourns	0.095
14	RN2	Resistor	1	CAY16-102J4LF	Bourns	0.095
15	T1	Transistor	1	FDN340P	Fairchild	0.338
Total:						4.737 €

Στην Εικόνα 7.12 φαίνεται το κόστος κάθε μιας από τις τρεις κατηγορίες κυκλωμάτων ως ποσοστό επί του συνολικού κόστους της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3. Είναι αξιοσημείωτο πως το κόστος της πλακέτας επέκτασης, σύμφωνα με την αρχιτεκτονική *SensoTube*, επιτρέπει τη μείωση του συνολικού κόστους της πλακέτας επέκτασης κάτω από το μισό.



Εικόνα 7.12. Τα επιμέρους κόστη των κυκλωμάτων της λειτουργίας του μικροελεγκτή και των συνδετήρων επέκτασης (με πράσινο), του προγραμματισμού και της εκοφαλμάτωσης, καθώς και της διαχείρισης ενέργειας, ως ποσοστό του συνολικού κόστους της κύριας πλακέτας Arduino Uno Rev.3.

Από την άλλη μεριά, σχετικά με την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων, αλλά και του χρόνου σχεδιασμού και ανάπτυξης της πλακέτας επέκτασης, επιτρέπεται η αφαίρεση τριάντα πέντε (35) από τα συνολικά σαράντα επτά εξαρτήματα της συγκεκριμένης κύριας πλακέτας. Απόδειξη στην πράξη αυτής της θέσης αποτελεί το παράδειγμα σχεδιασμού της πλακέτας επέκτασης με μικροελεγκτή συμβατή με Arduino που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.2.

7.3.3. Υποστήριξη Ταυτόχρονης Ανάπτυξης Πολλών και Διαφορετικών Μικροελεγκτών στον Ίδιο Κόμβο

Η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει στο μέγιστο δυνατό βαθμό την υποστήριξη για την ανάπτυξη συστημάτων με πολλές πλακέτες επέκτασης με μικροελεγκτή (multi-MCU system). Συγκεκριμένα:

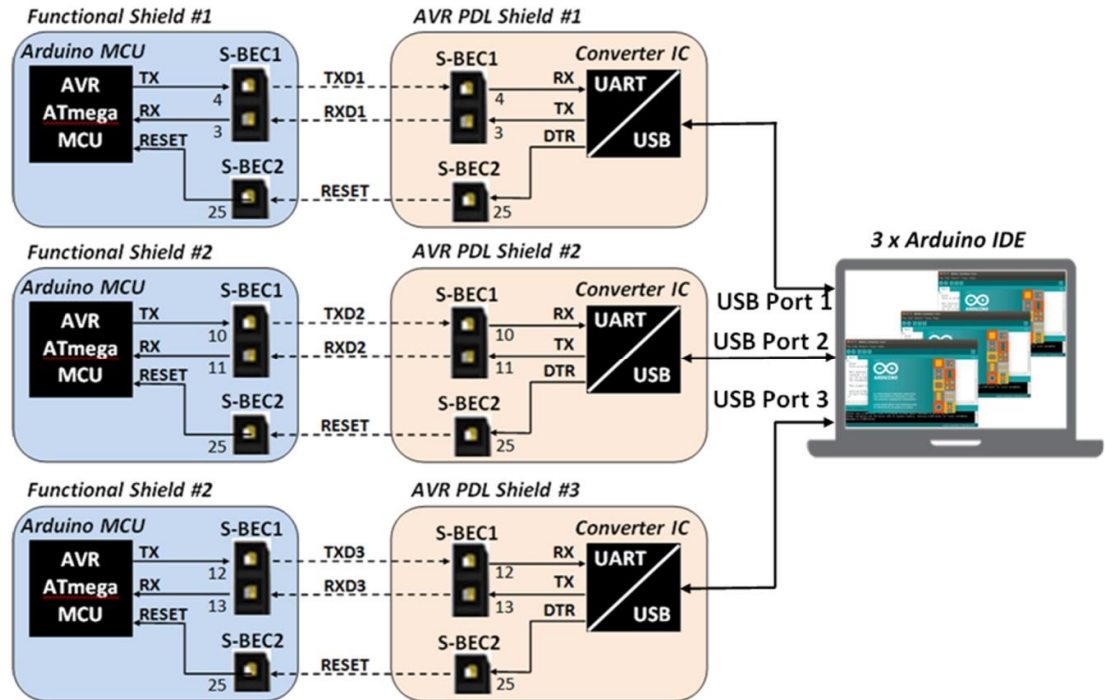
- παρέχει πληθώρα σημάτων περιφερειακών σειριακής επικοινωνίας δεδομένων στο συνδετήρα S-BEC1 του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων. Συγκεκριμένα παρέχονται σε προκαθορισμένες θέσεις τα σήματα για τρία περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας UART (αντί ενός που συνήθως υπάρχει στις διαθέσιμες αρχιτεκτονικές), διαύλου επικοινωνίας I2C, και διαύλου SPI με δύο σήματα ενεργοποίησης/διευθυνοδότησης (αντί ενός που παρέχεται στις διαθέσιμες αρχιτεκτονικές),
- παρέχει τέσσερα σήματα διακοπής (interrupt lines), μέσω των οποίων μπορεί να υποστηριχθούν σενάρια ενεργοποίησης μικροελεγκτών από κατάσταση αδράνειας (deep sleep mode), ή σενάρια κύκλου εργασιών των συνεργαζόμενων μικροελεγκτών,
- παρέχει μέσω του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC την αναδρομολόγηση των σημάτων των πλακετών επέκτασης στα σήματα των κοινών συνδετήρων επέκτασης,
- παρέχει μέσω του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC την πλήρη απομόνωση (isolation) των σημάτων των πλακετών επέκτασης από τα κοινά σήματα των συνδετήρων επέκτασης,

- παρέχει την δυνατότητα για κλιμάκωση του επιπέδου παρεχόμενης ενέργειας, μέσω του ενιαίου μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας έτσι ώστε να καλύπτονται με ξεκάθαρο και τυποποιημένο τρόπο όλες οι ενεργειακές απαιτήσεις των πιθανών πλακετών επέκτασης,
- υποστηρίζει ιδιαίτερος τους σύγχρονους μικροελεγκτές των 16-bit και των 32-bit αρχιτεκτονικής ARM, μέσω των σημάτων και του μηχανισμού αλυσιδωτού προγραμματισμού κι εκσφαλμάτωσης (daisy-chain) J-BEC, και
- μειώνει την πολυπλοκότητα και το κόστος των πλακετών επέκτασης με μικροελεγκτή μέσω της αποσύνδεσης των λειτουργιών του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης από τις πλακέτες επέκτασης και μεταφέροντάστες σε ανεξάρτητες πλακέτες επέκτασης επιπέδου PDL).

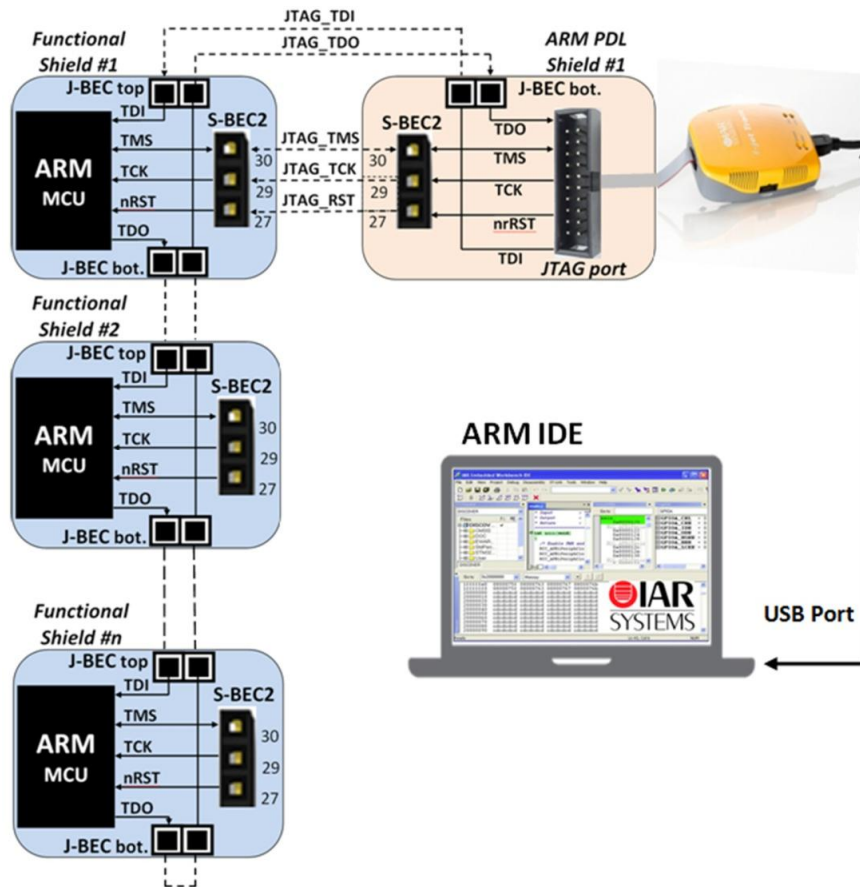
Ως παράδειγμα των δυνατοτήτων της αρχιτεκτονικής *SensoTube* για την ανάπτυξη επεκτάσιμων συστημάτων ανοικτής πηγής με περισσότερους από έναν μικροελεγκτές, παρατίθενται δύο περιπτώσεις:

- *σύστημα με τρεις πλακέτες επέκτασης, κάθε μια από τις οποίες περιλαμβάνει έναν μικροελεγκτή τύπου AVR ATmega328 όπως αυτόν του Arduino. Μετά από τον προγραμματισμό των τριών αυτών μικροελεγκτών με το ειδικό ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό Arduino Bootloader, οι τρεις πλακέτες επέκτασης θεωρούνται ως κύριες πλακέτες Arduino. Στην Εικόνα 7.13 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των τριών πλακετών μέσω των τυποποιημένων συνδετήρων του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC. Επίσης, παρουσιάζεται η χρήση των πλακετών προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης. Στον Η/Υ ο σχεδιαστής μπορεί να αναπτύσσει τον κώδικα των τριών μικροελεγκτών του συστήματός τους ταυτόχρονα, έχοντας τον πλήρη έλεγχο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους.*
- *σύστημα το οποίο περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό πλακετών επέκτασης με μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής ARM. Στο παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται η χρήση του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC καθώς και η χρήση του μηχανισμού διαχείρισης προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης J-BEC, για την ταυτόχρονη ανάπτυξη του*

ενσωματωμένου λογισμικού όλων των μικροελεγκτών μέσα από το ίδιο περιβάλλον ανάπτυξης στον Η/Υ.



Εικόνα 7.13. Σύστημα με τρεις πλακέτες επέκτασης με μικροελεγκτή AVR ATmega328, πλήρως συμβατές με την αρχιτεκτονική Arduino. Διακρίνονται οι συνδέσεις των σημάτων για τον προγραμματισμό και την εκοφαλμάτωση τους μέσω του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων της αρχιτεκτονικής SensoTube. Οι τρεις πλακέτες επέκτασης PDL μπορούν να αντικατασταθούν και από μια μόνο πλακέτα PDL.



Εικόνα 7.14. Ταυτόχρονη ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού πολλών μικροελεγκτών αρχιτεκτονικής ARM πολλών πλακετών επέκτασης μέσω του ίδιου περιβάλλοντος ανάπτυξης στον Η/Υ.

Οι δυνατότητες της αρχιτεκτονικής SensoTube, για τον ταυτόχρονο προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση πολλών μικροελεγκτών πολλών πλακετών επέκτασης παρέχονται με τυποποιημένο και ξεκάθαρο τρόπο. Αυτές οι δυνατότητες δεν συναντώνται όχι μόνο στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, αλλά ούτε και στις αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού και στις αρχιτεκτονικές των διαφόρων εργαλείων ανάπτυξης μικροελεγκτών. Σχετικά με τους ασύρματους κόμβους, οι δυνατότητες αυτές επιτρέπουν την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών δίχως περιορισμούς και ασυμβατότητες.

7.4. Σχεδιασμός Πλακέτας Επέκτασης Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης

Ως απόδειξη των δυνατοτήτων της αρχιτεκτονικής SensoTube για την αποσύνδεση των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης από τις πλακέτες επέκτασης, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός μιας πλακέτας επέκτασης επιπέδου

PDL (PDL - Programming and Debugging Layer). Με την εν λόγω πλακέτα επέκτασης μπορούν να προγραμματιστούν και να εκσφαλματωθούν σχεδόν όλοι οι δημοφιλείς μικροελεγκτές. Συγκεκριμένα, μπορούν να προγραμματιστούν:

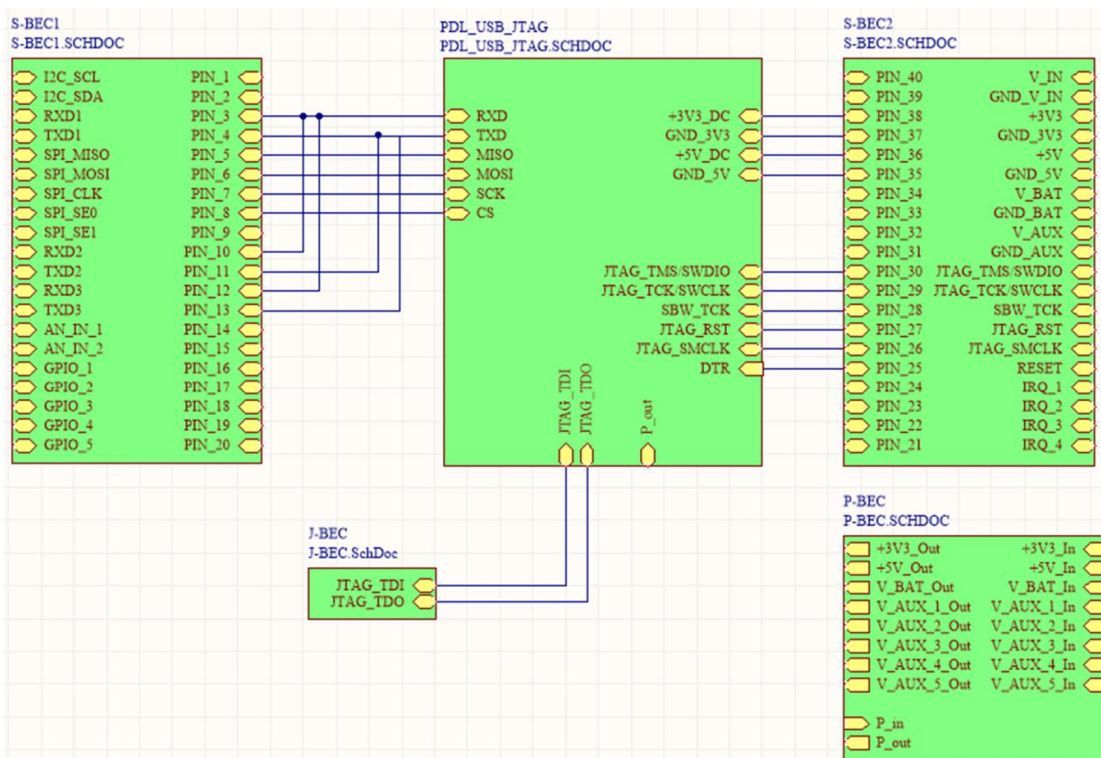
- όλοι οι μικροελεγκτές AVR ATmega που χρησιμοποιούνται σε όλες τις εκδόσεις των κύριων πλακετών αρχιτεκτονικής Arduino,
- όλοι οι μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής ARM όλων των εταιριών, και
- οι μικροελεγκτές της αρχιτεκτονικής εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας MSP430 (της εταιρίας Texas Instruments).

Η εν λόγω πλακέτα επέκτασης επιπέδου PDL σύμφωνα με την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής SensoTube, μπορεί να αφαιρεθεί από το σύστημα του ασύρματου κόμβου αισθητήρων πριν το σύστημα αφήσει το εργαστήριο ή το εργοστάσιο έτσι ώστε να μην περιλαμβάνεται στο σύστημα στο πεδίο. Ασφαλώς, εάν στο πεδίο απαιτηθεί επί τόπου προγραμματισμός ή εκσφαλμάτωση όλων των ασύρματων κόμβων του δικτύου, τότε με μόνο μια τέτοια πλακέτα επέκτασης μπορούν να καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις.

Σύμφωνα με το υπόδειγμα σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής SensoTube, η ανάπτυξη της εν λόγω πλακέτας επέκτασης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) *Δημιουργία νέου έργου σχεδιασμού*: δημιουργία ενός νέου έργου σχεδιασμού στο περιβάλλον σχεδίασης και εισαγωγή των sheet symbols και των αντίστοιχων σχηματικών κυκλωμάτων των τεσσάρων μηχανισμών επέκτασης.
- 2) *Αρχικοποίηση του σχεδιασμού της νέας πλακέτας επέκτασης*: δημιουργία ενός νέου sheet symbol, του *PDL_USB_JTAG* (βλ. Εικόνα 7.15) και του αντίστοιχου σχηματικού κυκλώματος εντός του οποίου θα σχεδιαστούν όλα τα απαραίτητα κυκλώματα για τις λειτουργίες της πλακέτας επέκτασης.
- 3) *Συνδέσεις απαραίτητων σημάτων*: όπως διακρίνεται στην Εικόνα 7.15, έχουν δημιουργηθεί σήματα (sheet ports) στο sheet symbol των κυκλωμάτων των λειτουργιών της νέας πλακέτας επέκτασης, τα οποία είναι σχετικά με τα περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας δεδομένων, όπως UART και SPI. Για λόγους μεγαλύτερης ευελιξίας, τα σήματα TX και RX του περιφερειακού UART, δρομολογούνται σε δύο εναλλακτικές θέσεις στον συνδετήρα

επέκτασης του μηχανισμού S-BEC1. Επίσης, έχουν δημιουργηθεί sheet ports για όλα τα σήματα του προτύπου JTAG.



Εικόνα 7.15. Η σύνδεση του sheet symbol PDL_USB_JTAG με τα sheet symbols των μηχανισμών επέκτασης.

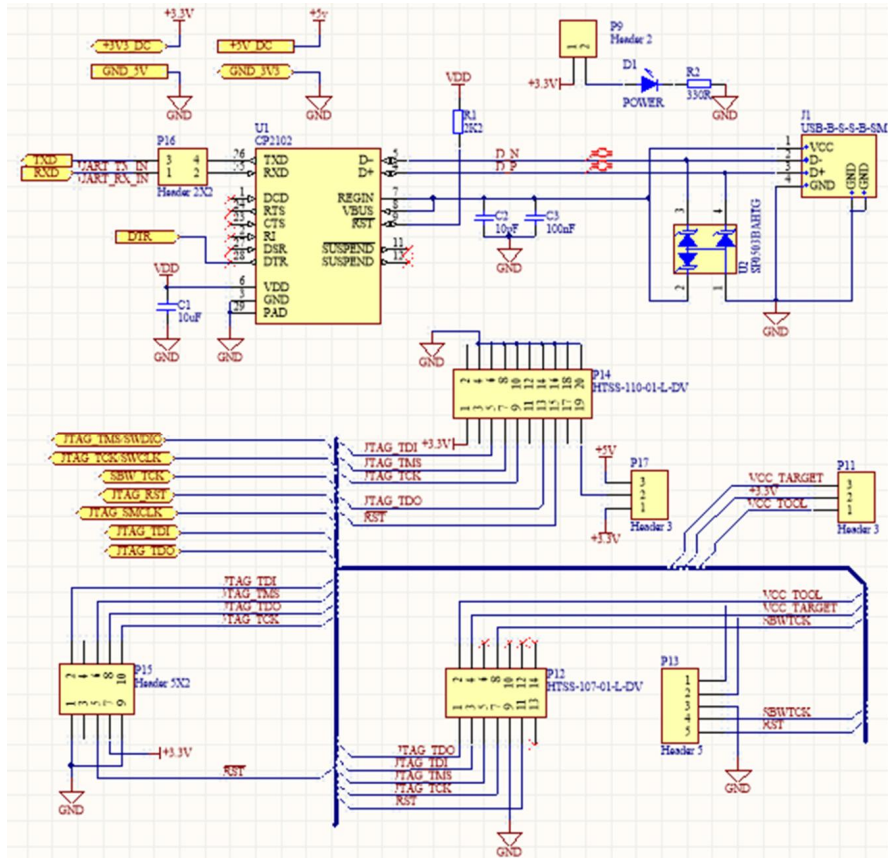
- 4) *Επιλογές για την διαχείριση ενέργειας:* η εν λόγω πλακέτα επέκτασης δεν απαιτεί λειτουργίες μέτρησης και ελέγχου του ρεύματος που καταναλώνει, και ως εκ τούτου, δεν χρησιμοποιεί καθόλου τον μηχανισμό διαχείρισης ενέργειας P-BEC. Από την άλλη μεριά, για την τροφοδοσία της, παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με τις διαθέσιμες τάσεις των +5 Vdc και +3.3 Vdc στο συνδετήρα του μηχανισμού επέκτασης S-BEC2.
- 5) *Επιλογές για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση του μικροελεγκτή :* εκτός από τα σήματα των περιφερειακών σειριακής επικοινωνίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται χρήση του μηχανισμού J-BEC για την υποστήριξη των λειτουργιών του προγραμματισμού και της εκσφαλμάτωσης βάσει του προτύπου J-TAG.

- 6) Σχεδιασμός του σχηματικού κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης: η πλακέτα επέκτασης PDL_USB_JTAG φιλοξενεί όλους τους δυνατούς τύπους συνδετήρων JTAG (JTAG connectors). Στον Πίνακα 7.5 αναφέρονται οι τύποι των χρησιμοποιούμενων συνδετήρων JTAG καθώς και οι κατηγορίες των μικροελεγκτών που απευθύνεται ο καθένας.

Πίνακας 7.5. Οι τέσσερις διαφορετικοί τύποι συνδετήρων JTAG που περιλαμβάνονται στην πλακέτα επέκτασης προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης PDL_USB_JTAG και οι μικροελεγκτές στους οποίους χρησιμοποιούνται.

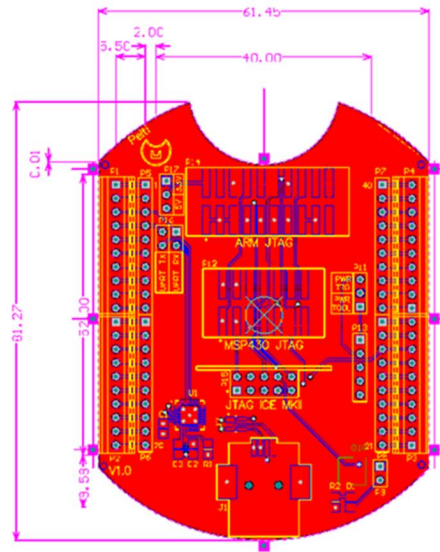
Name	Description	Number of pins	Supported MCUs/CPUs
P14	JTAG ARM	20 (2x10)	ARM, ARM-Cortex
P12	MSP430 JTAG	14 (2x7)	MSP430
P15	AVR JTAG ICE mkII	10 (2x5)	ATMEL AVR MCUs
P13	JTAG Spy-Bi-Wire	5 (1x5)	MSP430 MCUs

Το πλήρες σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης (βλ. Εικόνα 7.16) περιλαμβάνει, εκτός των συνδετήρων JTAG, το κύκλωμα μετατροπής των σημάτων της θύρας σειριακής επικοινωνίας UART σε σήματα διαύλου USB για την διασύνδεση με Η/Υ. Για τη σωστή και αξιόπιστη λειτουργία της χρήσης της θύρας USB της πλακέτας επέκτασης, έχουν συμπεριληφθεί κατάλληλα κυκλώματα προστασίας.



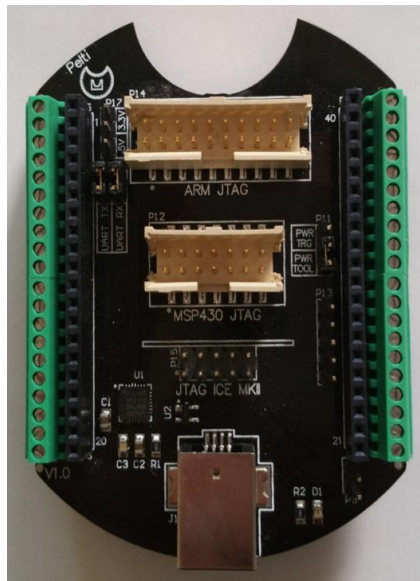
Εικόνα 7.16. Το πλήρες σχηματικό κύκλωμα των λειτουργιών της πλακέτας επέκτασης PDL_USB_JTAG.

7) Σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης: το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος παρατίθεται στην Εικόνα 7.17. Ο σχεδιασμός του τυπωμένου κυκλώματος στηρίχθηκε στο μοντέλο αναφοράς υλοποίησης της αρχιτεκτονικής SensoTube. Το κόψιμο στο επάνω μέρος του τυπωμένου έγινε έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από πλακέτες επέκτασης με κεραία, δηλαδή πλακέτες επέκτασης επιπέδου WNL ή επιπέδου DGL. Το τυπωμένο κύκλωμα είναι δύο επιπέδων. Στην Εικόνα 7.17, με μπλε χρώμα διακρίνεται η πίσω όψη (bottom layer), ενώ με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η πάνω όψη (top layer).



Εικόνα 7.17. Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας PDL_USB_JTAG.

- 8) *Κατασκευή και έλεγχος της πλακέτας επέκτασης:* μετά από την ολοκλήρωση της κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος, και της συγκόλλησης όλων των σχετικών εξαρτημάτων πάνω σ' αυτό, η πλακέτα επέκτασης PDL_USB_JTAG παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.18.



Εικόνα 7.18. Η πλακέτα επέκτασης PDL_USB_JTAG για τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση των μικροελεγκτών των πλακετών επέκτασης ενός συστήματος ασύρματου κόμβου βάσει της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Στην Εικόνα 7.19, παρουσιάζεται η σύνδεση μιας συσκευής προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης JTAG με την πλακέτα επέκτασης PDL_USB_JTAG για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή της πλακέτας επέκτασης ασύρματης διασύνδεσης WNL_DASH7 (βλ. Κεφάλαιο 6).

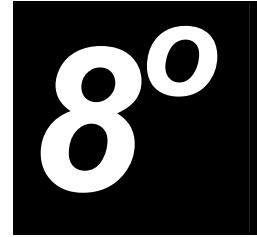


Εικόνα 7.19. Παράδειγμα προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης μικροελεγκτή πλακέτας επέκτασης (WNL_DASH7) μέσω πλακέτας επέκτασης προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης (PDL_USB_JTAG).

Βιβλιογραφία

1. Tehranipour, M.H.; Ahmed, N.; Nourani, M. Testing soc interconnects for signal integrity using extended jtag architecture. *IEEE Trans Comput Aided Des Integr Circuits Syst* **2004**, *23*, 800-811.
2. Salehi, M.; Ejlali, A. A hardware platform for evaluating low-energy multiprocessor embedded systems based on cots devices. *IEEE Trans Ind Electron* **2015**, *62*, 1262-1269.
3. Keil, R. Embedded development tools trends. *Electron. Prod.* **2013**, *55*.

Κεφάλαιο



Διαχείριση και Έλεγχος Ενέργειας σε Πραγματικό Τόπο και Χρόνο

Σχετικές Εργασίες

- [J-5]. **D.D.Piromalis** and **K.G.Arvanitis**, «*SensoTube: A Scalable Hardware Design Architecture for Wireless Sensors and Actuators Networks Nodes in the Agricultural Domain*», **Sensors (ISSN: 1424-8220)**, Vol. 16, No. 8, Paper 1227, 59 pages, 2016. DOI: 10.3390/s16081227. **(Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 2.033, 5-Year Impact Factor: 2.437)**. Full text available on: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1227>.
- [J-2]. **G.Kyriakarakos, D.D.Piromalis, K.G.Arvanitis, A.I.Dounis** and **G.Papadakis**, «*On Battery-Less Autonomous Polygeneration Microgrids: Investigation on the Combined Hybrid Capacitors / Hydrogen Alternative*», **Energy Conversion and Management (ISSN: 0196-8904)**, Vol. 91, pp. 405-415, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.027. **(Listed in the Science Citation Index and in Scopus, Impact Factor: 4.801, 5-Year Impact Factor: 4.631)**.
- [J-1]. **P.Papageorgas, D.Piromalis, K.Antonakoglou, G.Vokas, D.Tseles** and **K.G.Arvanitis**, «*Smart Solar Panels: In-Situ Monitoring of Photovoltaic Panels based on Wired and Wireless Sensor Networks*», **Energy Procedia (ISSN: 1876-6102)**, Vol. 36, pp. 535-345, 2013. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.062 **(Listed in Scopus)**.

8.1. Διαθέσιμες Πρακτικές για τη Μέτρηση και τον Έλεγχο Ενέργειας ενός Ασύρματου Κόμβου

Η ενέργεια σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων εγκατεστημένου στο πεδίο της γεωργίας αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα για την αξιόπιστη και σταθερή λειτουργία της εφαρμογής. Παρ' όλα αυτά, τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα κόμβων, όλων των αρχιτεκτονικών, δίνοντας την έμφαση στις επιδόσεις της ασύρματης διασύνδεσης, παραβλέπουν πολλές φορές τη σημασία της διαχείρισης ενέργειας των κόμβων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται πολλά προβλήματα στις πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο [1]. Από την άλλη πλευρά, η έλλειψη προβλέψεων για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας των κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία ενσωμάτωσης πολλών νέων τεχνολογιών [2].

Παραδοσιακά, για την ανάπτυξη και τη δοκιμή των λειτουργιών των ασύρματων κόμβων αισθητήρων χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές οι οποίες καλούνται testbeds [3-7] (βλ. Κεφάλαιο 4). Οι συσκευές αυτές δίνουν την έμφαση σε θέματα σχετικά με την ασύρματη διασύνδεση καθώς και με την ανάπτυξη του πρωτοκόλλου επικοινωνίας σε μορφή ενσωματωμένου λογισμικού (networking protocol stack). Είναι μεγάλου μεγέθους συγκριτικά με τις φυσικές διαστάσεις των ασύρματων κόμβων, και δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθούν στο εξωτερικό περιβάλλον [7,8]. Σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας ενός ασύρματου κόμβου, η βιβλιογραφία δείχνει πως όλες οι προσπάθειες κινούνται γύρω από τα:

- υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας (energy efficient routing protocols).
- χρήση μικροελεγκτών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πομποδεκτών εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης, και
- μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας σχετικά με τη λειτουργία των μικροελεγκτών, π.χ. λειτουργία σε κύκλους εργασίας (duty-cycle), κλπ.

Για την ανάπτυξη, τη δοκιμή, και την αξιολόγηση των κυκλωμάτων τροφοδοσίας συνήθως χρησιμοποιούνται μέθοδοι εξομοίωσης ή εργαστηριακές πειραματικές διατάξεις. Δυστυχώς, το εξωτερικό περιβάλλον δεν δύναται να εξομοιωθεί ούτε να προσομοιωθεί στο εργαστήριο [7]. Για το λόγο αυτό, η εμπειρία από πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο αποκαλύπτει πολλές φορές θέματα ανεπάρκειας και δυσλειτουργιών.

Επομένως, λαμβάνοντας υπ' όψη πως:

- τα εργαλεία δοκιμών και αξιολόγησης testbeds είναι ελάχιστα [9] και δεν καλύπτουν τα θέματα της διαχείρισης ενέργειας των κόμβων,
- οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων παρουσιάζουν απρόβλεπτες δυσχέρειες στην συμπεριφορά τους στο πεδίο[10],
- υπάρχουν νέες διαθέσιμες τεχνολογίες διαχείρισης ενέργειας, π.χ. νέα κυκλώματα και μέσα αποθήκευσης ενέργειας, και
- το εξωτερικό περιβάλλον δεν μπορεί να εξομοιωθεί ούτε να προσομοιωθεί με ακρίβεια στο εργαστήριο,

γίνεται προφανώς αντιληπτή η ανάγκη για μεθόδους και συστήματα τα οποία θα επιτρέπουν τη διαχείριση και τον έλεγχο της ενέργειας ενός ασύρματου κόμβου αισθητήρων εγκατεστημένου στο πραγματικό περιβάλλον της τελικής εφαρμογής αλλά και σε πραγματικό χρόνο.

8.2. Οι Δυνατότητες της Αρχιτεκτονικής SensoTube στη Διαχείριση και στον Έλεγχο Ενέργειας των Λειτουργιών ενός Κόμβου

Η αρχιτεκτονική SensoTube εισάγει την καινοτομία της ενσωμάτωσης των λειτουργιών των συσκευών testbeds στον ασύρματο κόμβο αισθητήρων. Συγκεκριμένα, αυτό συντελείται:

- μέσω της παροχής όλων των πιθανών τάσεων τροφοδοσίας στο συνδεδητά επέκτασης σημάτων του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC2,
- μέσω του δι-επίπεδου μηχανισμού διαχείρισης και ελέγχου ενέργειας P-BEC,
- μέσω της ενιαίας αντιμετώπισης της διαχείρισης ενέργειας όλων των πλακετών επέκτασης του κόμβου,
- μέσω της φυσικής αποσύνδεσης των κυκλωμάτων διαχείρισης ενέργειας από τα κυκλώματα των λειτουργιών των πλακετών επέκτασης,
- μέσω της δυνατότητας χρήσης εξειδικευμένων και προσαρμοσμένων κυκλωμάτων διαχείρισης ενέργειας τα οποία υλοποιούνται σε πλακέτες επέκτασης επιπέδου PDL, και

- μέσω της δυνατότητας χρήσης εξειδικευμένων κυκλωμάτων μέτρησης και ελέγχου ενέργειας τα οποία υλοποιούνται σε πλακέτες επέκτασης επιπέδου ETL.

Οι δυνατότητες που παρέχει η αρχιτεκτονική SensoTube για τη διαχείριση της ενέργειας σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων είναι:

- μέτρηση και έλεγχος του ρεύματος σε επίπεδο πλακέτας επέκτασης,
- μέτρηση και έλεγχος του ρεύματος σε επίπεδο συστήματος,
- συσχέτιση κατανάλωσης ρεύματος με συμβάντα της λειτουργίας του συστήματος, και
- αποθήκευση των μετρήσεων και των συμβάντων με χρονοσήμανση σε μη-πτητική μνήμη δεδομένων (χρησιμοποιώντας πλακέτες επιπέδου ASL ή επιπέδου ETL).

Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, όλες οι λειτουργίες για τον έλεγχο και την αποτίμηση της ενέργειας του συστήματος του κόμβου δεν παρεμβαίνουν στις λειτουργίες του κόμβου και μιας και έχουν τη μορφή αποσπώμενης πλακέτας επέκτασης μπορούν να παραμένουν στο σύστημα για όσο χρόνο απαιτεί η δοκιμή.

Ως εκ τούτου, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση, η μέτρηση και ο έλεγχος της ενέργειας σε κάθε επίπεδο του συστήματος του κόμβου, με τρόπο ομοιόμορφο και τυποποιημένο.

8.3. Αξιολόγηση και Δοκιμή Νέων Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας

Οι συνεχείς εξελίξεις στο πεδίο της διαχείρισης ενέργειας παρέχουν σήμερα μια πληθώρα νέων τεχνολογιών που πιθανώς να μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και τη λειτουργία των ασύρματων κόμβων αισθητήρων σε πραγματικές εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας. Σύμφωνα με το παραδοσιακό μοντέλο για την εξασφάλιση ενέργειας σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων, χρησιμοποιείται μια φωτοβολταϊκή κυψέλη [11], ένας φορτιστής/επιτηρητής συσσωρευτή ενέργειας, καθώς και ο συσσωρευτής ενέργειας. Σήμερα, είναι διαθέσιμες και άλλες λύσεις για την ανάκτηση της ενέργειας π.χ. από ραδιοσυχνότητες, από θερμοκρασία, από κίνηση, κλπ (energy harvesting) [12-14]. Επί πλέον, σχετικά με τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας, υπάρχουν πλέον σύγχρονες λύσεις όπως οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-Ion) [15], οι υπερπυκνωτές (super-capacitors) [16-18], οι υβριδικοί υπερπυκνωτές (hybrid

ultra-capacitors) [19], ή συνδυασμός συσσωρευτών λεπτού φιλμ (thin-film batteries) και υπερπυκνωτών [20], κλπ.

Οι τεχνολογίες αυτές πρέπει πρώτα να δοκιμαστούν για την απόδοσή τους και την καταλληλότητά τους και μετά να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματους κόμβους αισθητήρων. Στη συνέχεια, θα πρέπει να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες εγκατεστημένων κόμβων στο πεδίο της γεωργίας.

Έχοντας ως σκοπό την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων των μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube στη δοκιμή και αξιολόγηση νέων τεχνολογιών ενέργειας των κόμβων, επιλέγεται η περίπτωση της τεχνολογίας των υβριδικών υπερπυκνωτών ως παράδειγμα μελέτης και εφαρμογής. Η εν λόγω τεχνολογία είναι πολύ νέα και πολλά υποσχόμενη. Μάλιστα, έχει προκριθεί ως ιδιαίτερος σημαντική για την ηλεκτροκίνηση των οχημάτων. Για δε τους ασύρματους κόμβους αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας, η τεχνολογία των υβριδικών υπερπυκνωτών φαίνεται δελεαστική για τους εξής λόγους:

- έχει μεγάλη διάρκεια ζωής (πολλούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης) σε σχέση με τους τυπικούς συσσωρευτές ενέργειας,
- μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας (δεν υποφέρουν από τις υψηλές θερμοκρασίες στο πεδίο),
- πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση, και
- δυνατότητα γρήγορης φόρτισης.

Μετά από ενδελεχή έρευνα αγοράς, εντοπίστηκαν τρεις εταιρίες διεθνώς οι οποίες κατασκευάζουν υβριδικούς υπερπυκνωτές. Το κριτήριο επιλογής πυκνωτών από κάθε εταιρία ήταν η μεγαλύτερη χωρητικότητα σε F. Έτσι, επιλέχθηκε ένας πυκνωτής των 1000 F από την εταιρία A, ένας πυκνωτής των 800 F από την εταιρία B, και τέλος ένας πυκνωτής των 200 F από την εταιρία C. Τα ονόματα των εταιριών αποφασίστηκε να μην δημοσιευτούν για λόγους αποφυγής οποιουδήποτε είδους αρνητικής ή θετικής διαφήμισης. Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζονται οι τρεις υβριδικοί υπερπυκνωτές που επιλέγησαν για δοκιμές, ενώ τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον Πίνακα 8.1.



Εικόνα 8.1. Οι τρεις υβριδικοί υπερποκνωτές που επελέγησαν για δοκιμές (1000 F ο πράσινος, 800 F ο μαύρος, και 200 F ο καφέ).

Πίνακας 8.1. Τα χαρακτηριστικά των τριών επιλεγμένων υβριδικών υπερποκνωτών.

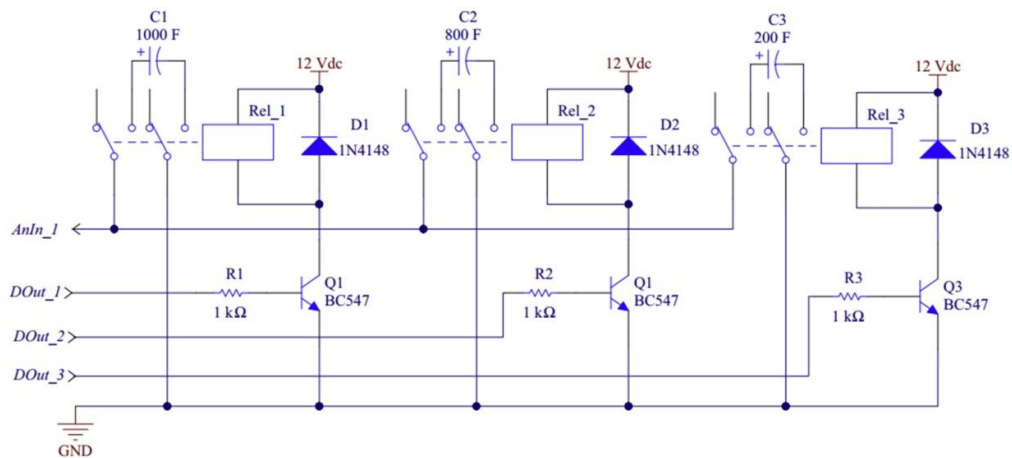
Parameter	Company A	Company B	Company C
Capacity (F)	1000	800	200
Voltage rated (V)	2.3	2.3	3.8
Voltage rated min (V)	1.0	1.0	2.2
Capacitance tolerance	+10%/-5%	+30%/-10%	+20%/-20%
Operational temperature range (°C)	-40 to +60	-25 to +60	-25 to +60
ESR at DC (mΩ)	14	15	50
Diameter (mm)	35	35	25
Length (mm)	88	70	40

Για τη δοκιμή και αξιολόγηση καθενός από τους εν λόγω ποκνωτές απαιτείται:

- να μετρηθεί η αυτο-εκφόρτιση,
- να μετρηθούν το ρεύμα και η τάση φόρτισης,
- να μετρηθούν το ρεύμα και η τάση εκφόρτισης, και
- να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης.

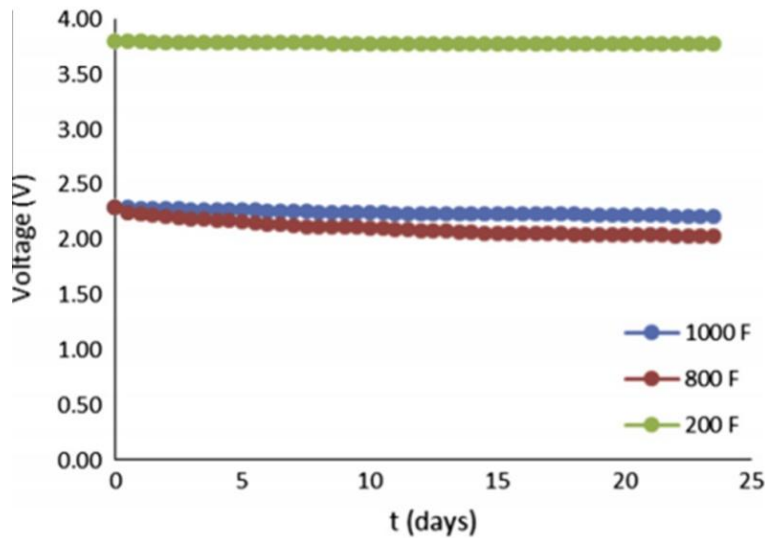
Για την πραγματοποίηση των ανωτέρω ελέγχων δημιουργήθηκε μια πειραματική διάταξη η οποία αποτελείται από κυκλώματα ηλεκτρονόμων και αντιστάσεων. Οι μετρήσεις ρεύματος και τάσης συλλέγονται από μια συσκευή καταγραφής δεδομένων τύπου NI-USB-6008 (της εταιρίας National Instruments). Στην Εικόνα 8.2 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα που υλοποιήθηκε για τις

μετρήσεις της αυτο-εκφόρτισης των τριών υβριδικών υπερπυκνωτών. Συγκεκριμένα, για κάθε έναν πυκνωτή υπάρχει ένας ηλεκτρονόμος ο οποίος σε τακτά χρονικά διαστήματα οπλίζει και συνδέει την αναλογική είσοδο μέτρησης της συσκευής καταγραφής με τα άκρα του πυκνωτή. Με τον τρόπο αυτό, ελήφθησαν μετρήσεις για διάστημα είκοσι τεσσάρων (24) διαδοχικών ημερών.



Εικόνα 8.2. Το κύκλωμα για τη μέτρηση της αυτο-εκφόρτισης των τριών υβριδικών υπερπυκνωτών. Τα σήματα AnIn_1, DOut_1, DOut_2, και DOut_3 συνδέονται απ' ευθείας στη συσκευή NI-USB-6008 (της εταιρίας National Instruments).

Οι μετρήσεις της τάσης από τη συσκευή NI-USB-6008 στέλνονται μέσω θύρας USB στον Η/Υ, στον οποίο μέσω μιας απλής εφαρμογής συλλογής δεδομένων στο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών LabVIEW (της εταιρίας National Instruments) τα δεδομένα καταγράφονται και απεικονίζονται. Στην Εικόνα 8.3 παρουσιάζεται σε γράφημα η μέτρηση της αυτο-εκφόρτισης των τριών επιλεγμένων υβριδικών υπερπυκνωτών. Στον Πίνακα 8.2 αναφέρονται η ονομαστική τάση στα άκρα των πυκνωτών κατά την έναρξη των μετρήσεων, η εναπομένουσα τάση στο τέλος της δοκιμής (μετά από 24 ημέρες), και το ποσοστό επί τοις εκατό της απώλειας τάσης. Η μικρότερη απώλεια από αυτο-εκφόρτιση παρατηρείται για τον υβριδικό υπερπυκνωτή των 200 F. Ο πυκνωτής των 800 F αποδείχτηκε πως έχει την μεγαλύτερη αυτο-εκφόρτιση, ενώ ο πυκνωτής των 1000 F μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικός από πλευράς αυτο-εκφόρτισης.



Εικόνα 8.3. Οι μετρήσεις τάσης αυτο-εκφόρτισης των τριών διαφορετικών υβριδικών υπερπυκνωτών.

Πίνακας 8.2. Χαρακτηριστικά αυτο-εκφόρτισης των τριών υβριδικών υπερπυκνωτών βασισμένα σε μετρήσεις διάρκειας 24 ημερών.

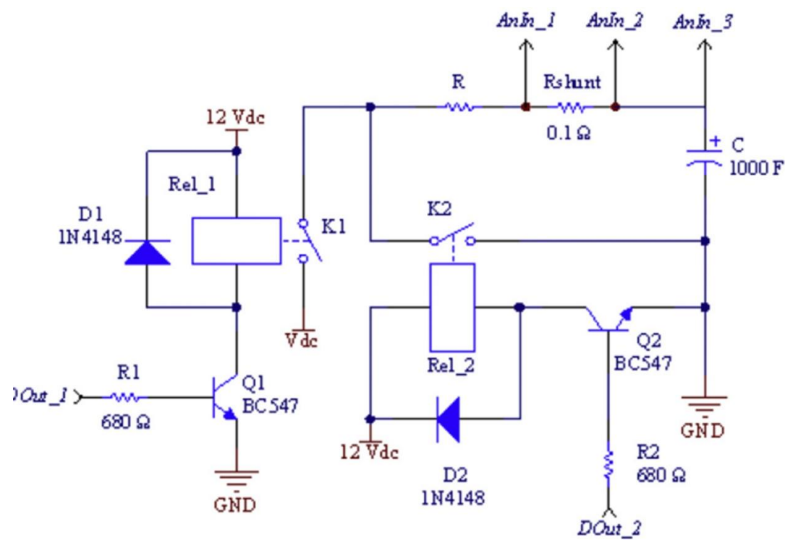
Capacitor (F)	Rated voltage (V)	Remaining voltage (V)	ΔV (V)	ΔV (%)
200	3.8	3.78	0.02	0.53
800	2.3	2.03	0.27	11.74
1000	2.3	2.21	0.09	3.91

Για τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης των τριών υβριδικών υπερπυκνωτών χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές αντιστάσεις βρόχου, δηλαδή εν σειρά με τον εκάστοτε πυκνωτή. Η επιλογή της ωμικής τιμής κάθε αντίστασης καθορίζει το μέγιστο ρεύμα του βρόχου του πυκνωτή (βλ. Πίνακα 8.3).

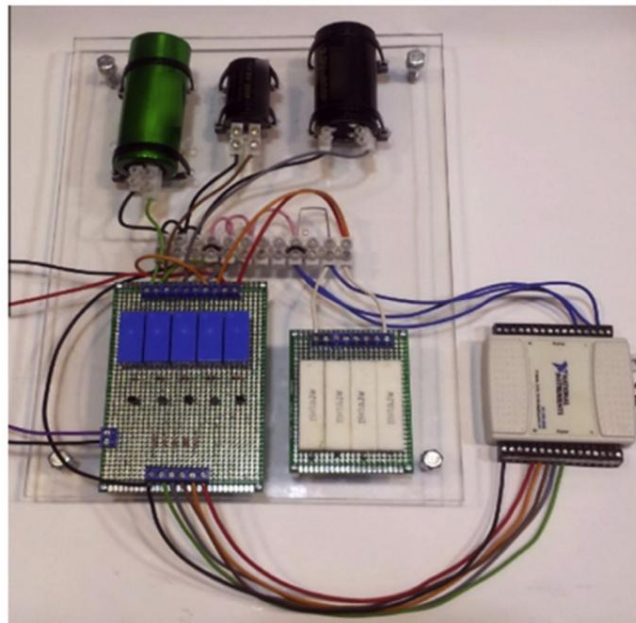
Πίνακας 8.3. Επιλογή ωμικής αντίστασης για τον καθορισμό του μέγιστου ρεύματος βρόχου του υβριδικού υπερπυκνωτή.

Test (#)	R (Ω)	R_{shunt} (Ω)	R_s (Ω)	I_{loop_max} (A)
1	1.1	0.1	1.2	~2
2	2.2	0.1	2.3	1
3	4.4	0.1	4.5	~0.5

Για τις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος στο βρόχο του πυκνωτή, υλοποιήθηκε το κύκλωμα της Εικόνας 8.4. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5.

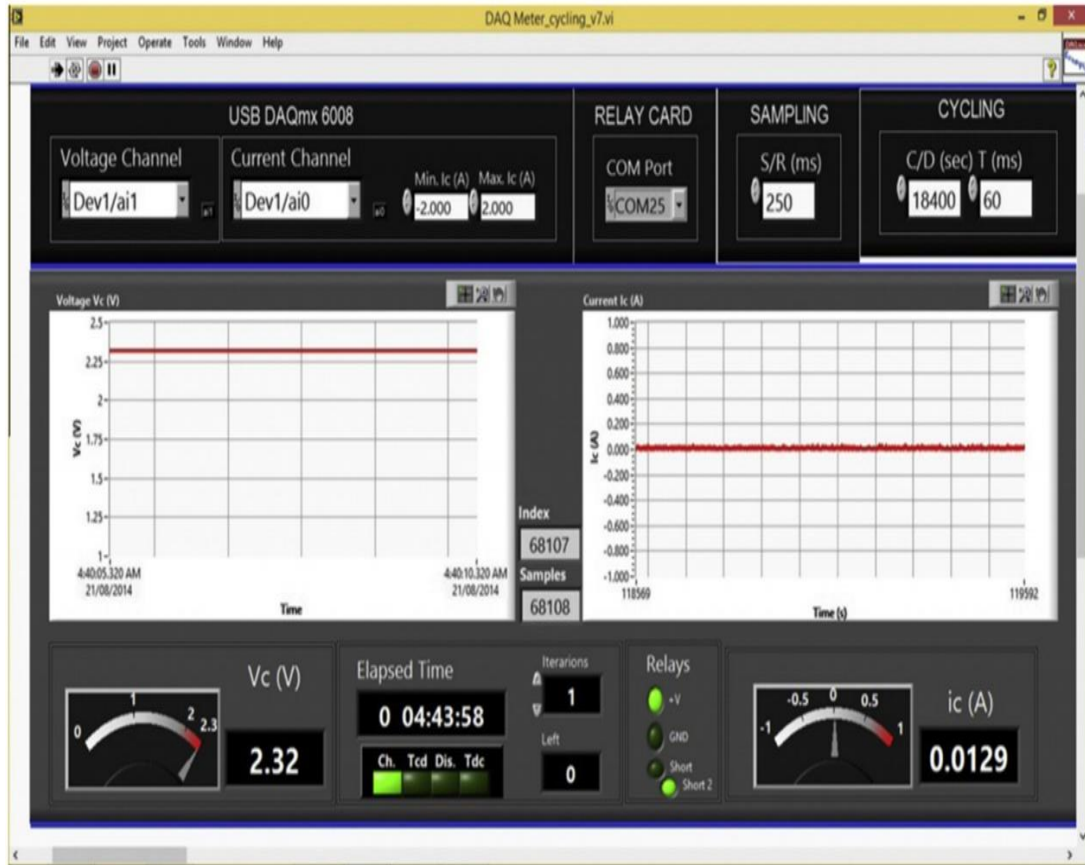


Εικόνα 8.4. Κύκλωμα για τη μέτρηση τάσης και ρεύματος στο βρόχο του υβριδικού υπερπυκνωτή.



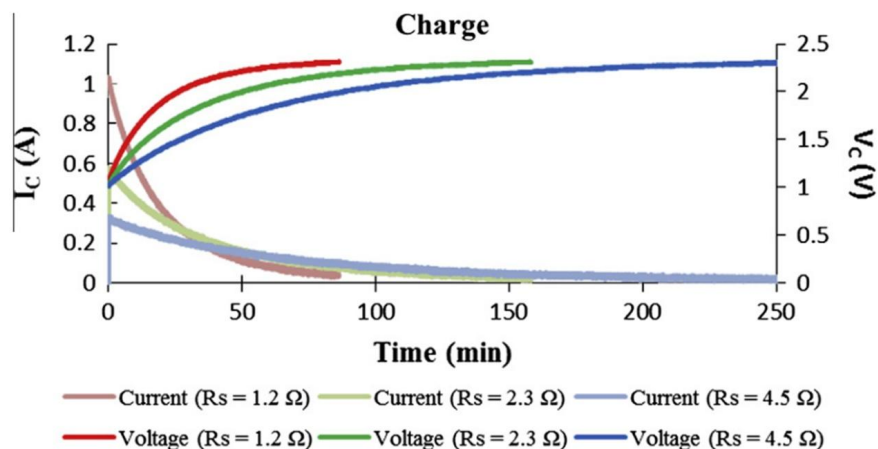
Εικόνα 8.5. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση τάσης και ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης τριών υβριδικών υπερπυκνωτών. Στο δεξιό μέρος διακρίνεται η συσκευή NI-USB-6008 (της εταιρίας National Instruments).

Για την υποδοχή των μετρήσεων στον Η/Υ και την περαιτέρω καταγραφή και απεικόνισή τους, αναπτύχθηκε εφαρμογή λογισμικού στο περιβάλλον ανάπτυξης LabVIEW (βλ. Εικόνα 8.6).

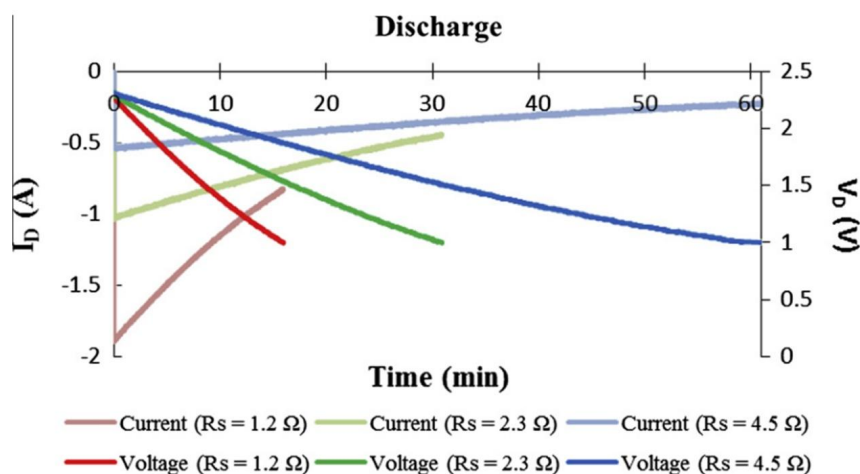


Εικόνα 8.6. Η οθόνη εργασίας της εφαρμογής λογισμικού για τη συλλογή, καταγραφή και απεικόνιση των μετρήσεων τάσης και ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης υβριδικού υπερπυκνωτή.

Μετά από τη συλλογή και την αποθήκευση των δεδομένων των μετρήσεων του ρεύματος και της τάσης φόρτισης και εκφόρτισης των τριών υβριδικών υπερπυκνωτών για ρεύματα βρόχου 0.5 A, 1.0 A, και 2.0 A αντίστοιχα, μπορεί να γίνει περαιτέρω ανάλυση. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 8.7 και στην Εικόνα 8.8 παρουσιάζονται οι τιμές ρεύματος και τάσης στα άκρα του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F για ρεύμα βρόχου 0.5 A, 1.0 A, και 2.0 A αντίστοιχα. Η επιλογή του εν λόγω υβριδικού υπερπυκνωτή έγινε με το κριτήριο της μεγαλύτερης χωρητικότητας.



Εικόνα 8.7. Τιμές ρεύματος και τάσης στα άκρα του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F κατά την φόρτιση του με ρεύμα 0.5 A, 1.0 A, και 2.0 A.



Εικόνα 8.8. Τιμές ρεύματος και τάσης στα άκρα του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F κατά την εκφόρτιση του με ρεύμα 0.5 A, 1.0 A, και 2.0 A.

Σχετικά με τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency) του υβριδικού υπερπυκνωτή, ακολουθείται για έναν πλήρη κύκλο φόρτισης και εκφόρτισης η σχέση:

$$\eta = \frac{\int_0^{t_{disch}} I_C(t) \times V_C(t) dt}{\int_0^{t_{ch}} I_C(t) \times V_C(t) dt} \times 100\% \quad (1)$$

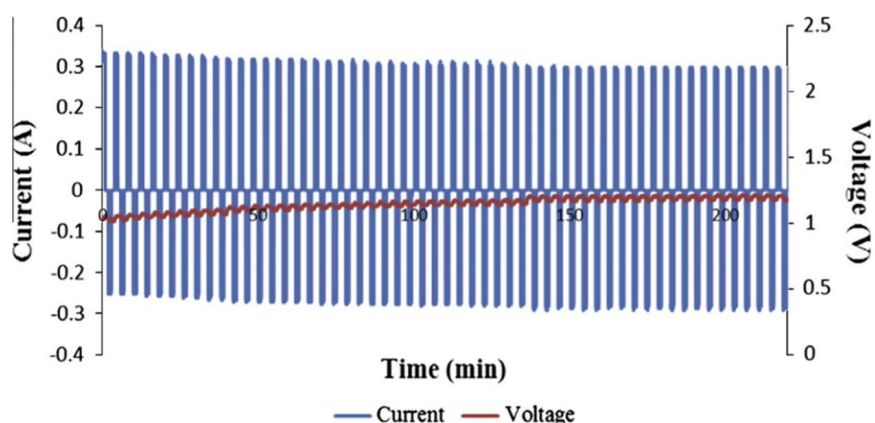
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την περίπτωση του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F, παρατίθενται στον Πίνακα 8.4. Οι τρεις ωμικές

αντιστάσεις που αναφέρονται στον εν λόγω πίνακα αντιστοιχούν σε ρεύμα βρόχου 0.5 A, 1.0 A, και 2.0 A. Επί πλέον στον εν λόγω πίνακα παρατίθενται τα ποσά της διαθέσιμης ενέργειας στον υβριδικό υπερπυκνωτή.

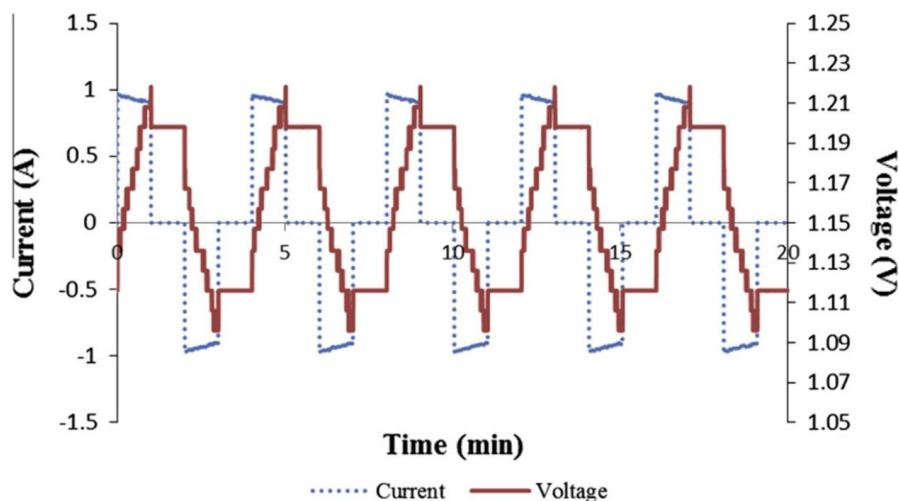
Πίνακας 8.4. Βαθμός ενεργειακής απόδοσης και ποσό διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας στον υβριδικό υπερπυκνωτή των 1000 F για τρεις διαφορετικές τιμές ρεύματος βρόχου.

Circuit R_s (Ω)	Efficiency (%)	Usable energy capacity (W h)
1.15	92.7	0.578
2.30	92.7	0.614
4.60	92.7	0.617

Προχωρώντας ένα επί πλέον βήμα, εξετάστηκε και η συμπεριφορά του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F σε μεταβατικά φαινόμενα. Μια πρώτη, απλή προσέγγιση, προκύπτει από τη μελέτη των τιμών τάσης και ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης σε διαδοχικούς σύντομους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Στην Εικόνα 8.9, και στην Εικόνα 8.10, παρατίθεται η γραφική παράσταση των μετρήσεων πολλών κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης για ρεύμα βρόχου ίσο με 0.5 A και 1.0 A αντίστοιχα. Από τα γραφήματα αυτά των προαναφερομένων μετρήσεων φαίνεται πως ο υβριδικός υπερπυκνωτής των 1000 F έχει σταθερή συμπεριφορά σε μεταβατικά φαινόμενα (transient behavior).



Εικόνα 8.9. Σύντομοι διαδοχικοί κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης (charge/discharge cycling) του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F με ρεύμα βρόχου 0.5 A.



Εικόνα 8.10. Σύντομοι διαδοχικοί κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης (charge/discharge cycling) του υβριδικού υπερπυκνωτή των 1000 F με ρεύμα βρόχου 1.0 A.

8.3.1. Επιλογή Κατάλληλου Υβριδικού Υπερπυκνωτή για Κόμβους Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι παραπάνω μετρήσεις και δοκιμές έδειξαν πως η τεχνολογία των υβριδικών υπερπυκνωτών διακρίνεται από:

- υψηλό βαθμό ενεργειακής απόδοσης,
- πολύ χαμηλή αυτο-εκφόρτιση,
- αρκετή ενέργεια σε αναλογία με τον όγκο και το βάρος τους, και
- σταθερότητα σε μεταβατικά φαινόμενα

Ως εκ τούτου, η τεχνολογία των υβριδικών υπερπυκνωτών εμφανίζεται ως μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε ασύρματους κόμβους αισθητήρων. Συγκεκριμένα, η επιλογή του κατάλληλου υβριδικού υπερπυκνωτή για έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων θα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη τα ακόλουθα κριτήρια:

- να έχει ελάχιστη αυτο-εκφόρτιση έτσι ώστε να μη χάνεται άσκοπα ενέργεια από το ενεργειακό ισοζύγιο του κόμβου,
- να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη αποθηκευμένη ενέργεια,

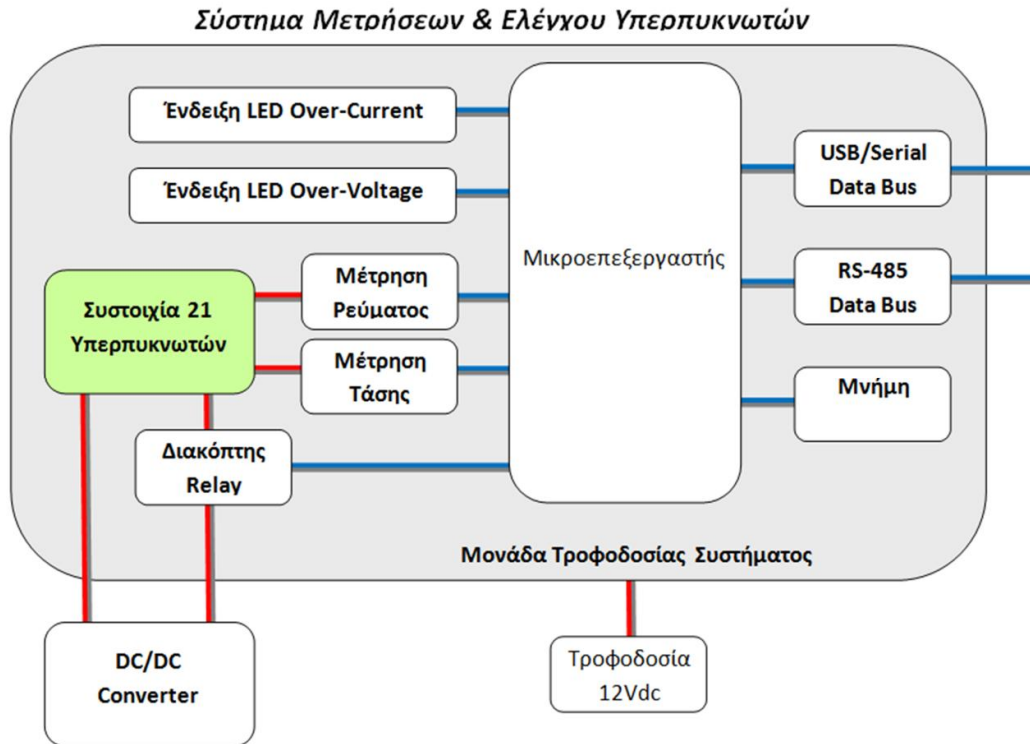
- να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή ονομαστική τάση λειτουργίας, έτσι ώστε να απαιτούνται λιγότεροι πυκνωτές στις περιπτώσεις υλοποίησης συστοιχιών πυκνωτών με τάση άκρων π.χ. +12 Vdc,
- να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος και βάρος, και τέλος,
- να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος.

Ανάμεσα στους συγκεκριμένους τρεις υπερπυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές παραπάνω, η πρώτη επιλογή για χρήση σε ασύρματο κόμβο αισθητήρων θα ήταν ο πυκνωτής των 200 F, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής, σχεδόν μηδενικής αυτοεκφόρτισης και λόγω της ονομαστικής μέγιστης τάσης στα +3.8 Vdc. Παρ' όλα αυτά, προκρίνεται η επιλογή του πυκνωτή των 1000 F λόγω της πολύ μεγαλύτερης χωρητικότητας (άρα απαιτούνται λιγότεροι) και λόγω της ικανοποιητικής αυτοεκφόρτισής του. Σε όλες τις περιπτώσεις των υβριδικών υπερπυκνωτών, το κόστος είναι μεγάλο λόγω του γεγονότος πως αποτελούν τεχνολογία αιχμής η οποία δεν έχει ακόμα περάσει στη φάση ωρίμανσης από πλευράς ζήτησης και παραγωγής.

8.3.2. Σχεδιασμός Συσσκευής Υλικού Ανοικτής Πηγής για τη Μέτρηση και τον Έλεγχο Λειτουργιών Συστοιχιών Υβριδικών Υπερπυκνωτών

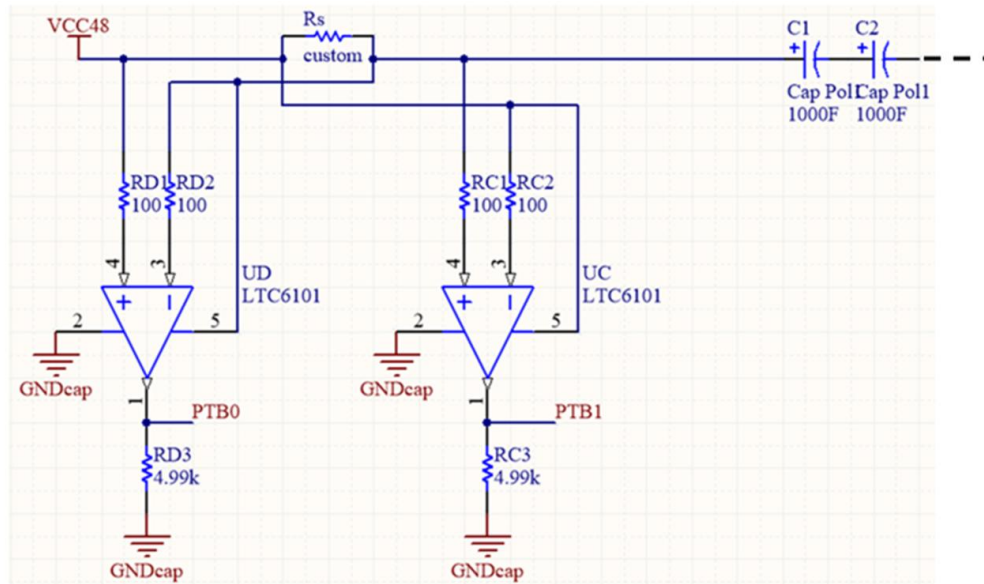
Το νέο σύστημα θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει την τάση και το ρεύμα συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών. Τέτοια συστήματα δε διατίθενται στο εμπόριο διεθνώς, ενδεχομένως λόγω του ότι η τεχνολογία των υβριδικών υπερπυκνωτών είναι πολύ νέα. Επί πλέον, σκοπός του συστήματος είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικά συστήματα παρέχοντας τη δυνατότητα για μετρήσεις και έλεγχο σε πραγματικό χώρο (in-situ) και χρόνο (real-time).

Συγκεκριμένα, για το σχεδιασμό αποφασίστηκε να γίνει χρήση αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος ανάπτυξης και να είναι η λύση ελκυστική και αναδιαμορφώσιμη (reconfigurable) από τους μελλοντικούς χρήστες. Οι λειτουργίες του συστήματος μέτρησης και ελέγχου συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών φαίνονται στο μπλοκ διάγραμμα της Εικόνας 8.11.



Εικόνα 8.11. Το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος μέτρησης και ελέγχου συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών.

Το σύστημα έχει τη δυνατότητα να φιλοξενήσει από έναν (1) έως είκοσι έναν (21) πυκνωτές. Οι πυκνωτές μπορούν να είναι διαφορετικού κατασκευαστή και να έχουν διαφορετικές τιμές ονομαστικής χωρητικότητας και τάσης. Για τη μέτρηση του ρεύματος φόρτισης αλλά και του ρεύματος εκφόρτισης, υλοποιήθηκε το κύκλωμα που παρατίθεται στην Εικόνα 8.12 και στηρίζεται στη χρήση δύο ενισχυτών μέτρησης ρεύματος τύπου LTC6101 (της εταιρίας Linear Technology) [21]. Με τη συνδεομολογία των δύο ενισχυτών στην ίδια αντίσταση μέτρησης ρεύματος (shunt resistor) επιτρέπεται η μέτρηση και των δύο κατευθύνσεων του ρεύματος (bi-directional current measurement). Η τάση των +48 Vdc που αναφέρεται στο σχηματικό κύκλωμα της Εικόνας 8.12 έχει χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς των δοκιμών με είκοσι έναν πυκνωτές των 1000 F και ονομαστικής τάσης 2.3 V. Η τάση εισόδου καθορίζεται από την τάση στα άκρα της συστοιχίας των πυκνωτών υπό δοκιμή.



Εικόνα 8.12. Σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας μέτρησης των ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών.

Οι έξοδοι τάσης των δύο ενισχυτών ρεύματος, PTB0 και PTB1, είναι ανάλογες του ρεύματος εκφόρτισης και του ρεύματος φόρτισης αντίστοιχα, και οι τιμές τους δίνονται από τις εξισώσεις 2 και 3.

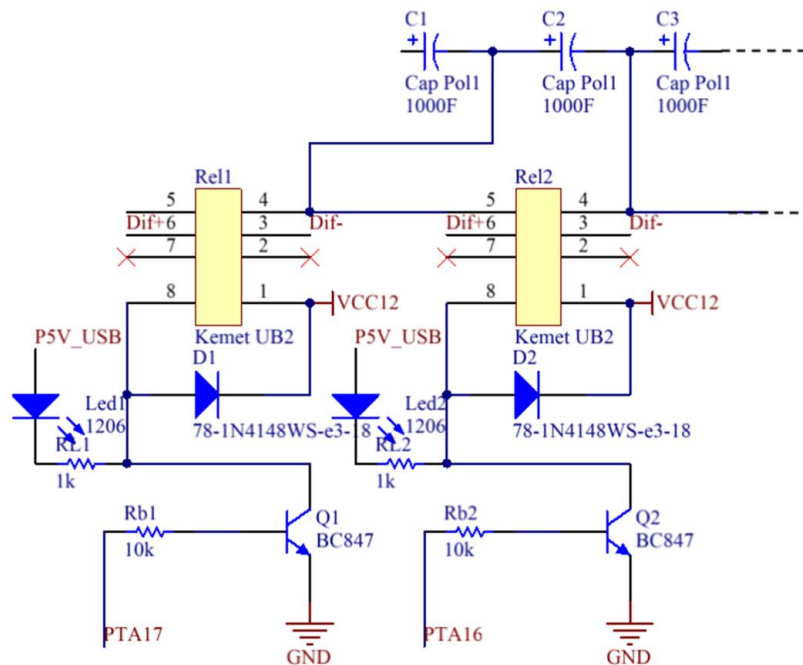
$$V_{OUT_{PtB0}} = I_{DISCHARGE} \times R_{SENSE} \left(\frac{R_{D3}}{R_{D1}} \right), I_{DISCHARGE} \geq 0 \quad (2)$$

$$V_{OUT_{PtB1}} = I_{CHARGE} \times R_{SENSE} \left(\frac{R_{C3}}{R_{C1}} \right), I_{CHARGE} \geq 0 \quad (3)$$

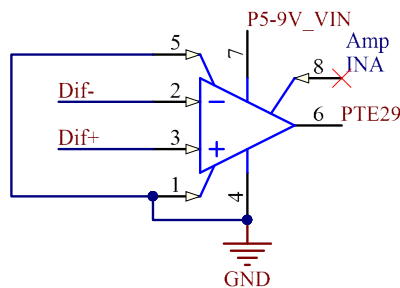
Το σύστημα, εκτός από τη δυνατότητα μέτρησης των ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης, μετράει και την τάση στα άκρα κάθε πυκνωτή έτσι ώστε να επιτρέπεται η μελέτη της κατάστασης κάθε ενός πυκνωτή και να διεξάγονται σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την ανάγκη ισοστάθμισης (balancing). Για το σκοπό αυτό, έχουν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρονόμοι υψηλής ταχύτητας εναλλαγής των επαφών τους, ειδικοί για συστήματα λήψης μετρήσεων, με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Κάθε ένας από τους ηλεκτρονόμους ελέγχεται από τον μικροελεγκτή του συστήματος. Συνολικά υπάρχουν είκοσι ένας (21) ηλεκτρονόμοι, όσες είναι δηλαδή και οι διαθέσιμες θέσεις τοποθέτησης πυκνωτών στο σύστημα. Οι ηλεκτρονόμοι διαθέτουν δύο ανεξάρτητες σειρές επαφών, δηλαδή έχουν δύο κοινά σημεία σύνδεσης (common contacts), κάθε ένα από τα οποία διαθέτει από μια κανονικά κλειστή επαφή (normally closed contact) και από μια κανονικά ανοικτή επαφή

(normally open contact). Τα σήματα των κοινών σημείων σύνδεσης όλων των ηλεκτρονόμων συνδέονται στις δύο εισόδους ενός διαφορικού ενισχυτή μέτρησης τάσης. Ο μικροελεγκτής του συστήματος, ενεργοποιώντας έναν κάθε φορά από τους ηλεκτρονόμους μπορεί να επιλέγει αντίστοιχα από ποιόν πυκνωτή θα πάρει μέτρηση της τάσης στα άκρα του. Ο διαφορικός ενισχυτής μέτρησης μπορεί είτε να περιέχεται σε μορφή ενσωματωμένου περιφερειακού στο εσωτερικό ενός μικροελεγκτή, είτε να είναι ανεξάρτητο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ο ελάχιστος χρόνος μέτρησης της τάσης στα άκρα όλων των πυκνωτών του συστήματος είναι 42 ms. Ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας μεμονωμένου πυκνωτή είναι 2 ms. Η σχεδιαστική επιλογή της χρήσης ηλεκτρονόμων για τη μέτρηση της τάσης στα άκρα των πυκνωτών γίνεται για να μην υπάρχει καμία μόνιμη παρέμβαση με τα υπόλοιπα κυκλώματα μετρήσεων της στοιχίας των πυκνωτών. Επί πλέον, η επιλογή αυτή επιτρέπει μετρήσεις και για την αυτοεκφόρτιση των πυκνωτών.

Το σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας ελέγχου των ηλεκτρονόμων παρατίθεται στην Εικόνα 8.13, ενώ στην Εικόνα 8.14 παρατίθεται η συνδεσμολογία του διαφορικού ενισχυτή μέτρησης τάσης.

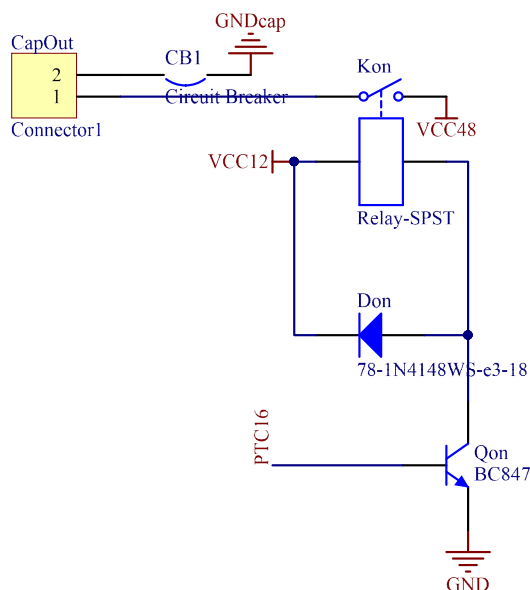


Εικόνα 8.13. Στιγμιότυπο του σχηματικού κυκλώματος της λειτουργίας ελέγχου των ηλεκτρονόμων για τη μέτρηση της τάσης στα άκρα κάθε υβριδικού υπερπυκνωτή.



Εικόνα 8.14. Σχηματικό κύκλωμα της συνδεσμολογίας του διαφορικού ενισχυτή μέτρησης της τάσης στα άκρα υβριδικού υπερπικνωτή.

Για λόγους ασφάλειας του συστήματος, αλλά και του χρήστη, το σύστημα μέτρησης και ελέγχου της συστοιχίας των υβριδικών υπερπικνωτών επιλέχθηκε να διαθέτει τη δυνατότητα ελεγχόμενης γαλβανικής απομόνωσης από την πηγή τροφοδοσίας και το τροφοδοτούμενο φορτίο. Η δυνατότητα αυτή πραγματοποιείται μέσω του κυκλώματος της Εικόνας 8.15. Συγκεκριμένα, η συστοιχία των πικνωτών συνδέεται και αποσυνδέεται από το κύκλωμα ενέργειας μέσω ενός ηλεκτρονόμου μέγιστου ρεύματος ελέγχου 10 A, ο οποίος ελέγχεται από μια ψηφιακή έξοδο του μικροελεγκτή του συστήματος.



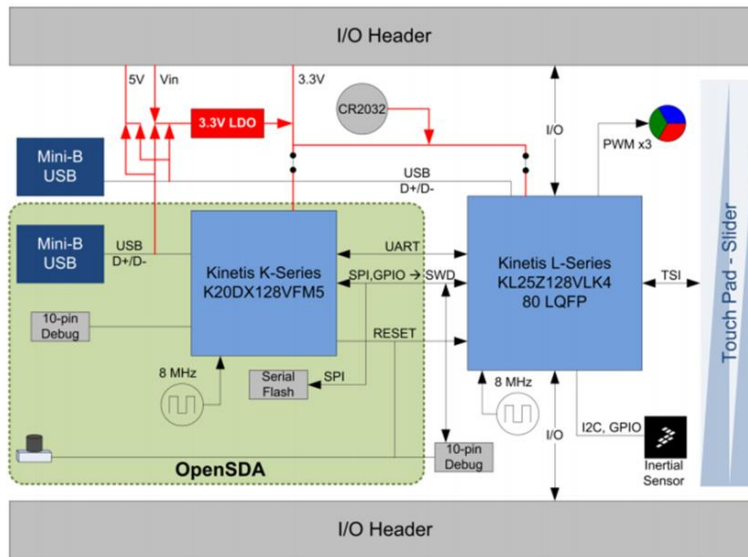
Εικόνα 8.15. Το σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας ελέγχου ηλεκτρονόμου για τη σύνδεση και αποσύνδεση της συστοιχίας των υβριδικών υπερπικνωτών από την τάση τροφοδοσίας και το τροφοδοτούμενο φορτίο.

Σχετικά με τον μικροελεγκτή του συστήματος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η κύρια πλακέτα αρχιτεκτονικής επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής FRDM KL25Z (της εταιρίας Freescale, νυν NXP). Η εν λόγω σχεδιαστική επιλογή καθιστά το σύστημα επεκτάσιμο και εύκολα επανακαθοριζόμενο (reconfigurable). Επί πλέον πλεονέκτημα αποτελεί η ευκολία και ο μειωμένος χρόνος κατά την ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή, εξ' αιτίας των διαθέσιμων σχεδιαστικών πόρων από μεγάλες κοινότητες χρηστών (open-source users' communities). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή της εν λόγω κύριας πλακέτας είναι τα ακόλουθα:

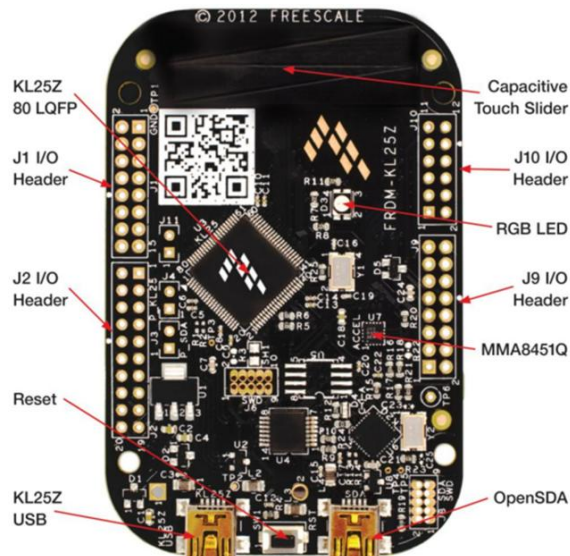
- μικροελεγκτής 48 MHz ARM Cortex-M0+ core σειράς KL25Z Kinetis L,
- 128 KB flash program memory,
- 16 KB RAM,
- μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADCs) υψηλής ταχύτητας (highspeed) των 12/16-bit,
- χαμηλής κατανάλωσης περιφερειακά σειριακής επικοινωνίας δεδομένων τύπου UART, SPI, και I2C,
- χαμηλή τάση λειτουργίας από 1.71 V έως 3.6 V,
- περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας από -40 ~ 105 °C,
- εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας,
- υψηλή αξιοπιστία μέσω μηχανισμού επιτήρησης καλής λειτουργίας (watchdog) με ανεξάρτητη πηγή χρονισμού (independent clock source),
- υλοποίηση λειτουργίας Open-SDA (SDA- Serial and Debug Adapter),

Η κύρια πλακέτα FRDM KL25Z, εκτός του μικροελεγκτή, περιλαμβάνει αρκετά άλλα κυκλώματα, π.χ. για τη σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας, για φωτεινές ενδείξεις, κλπ. Επί πλέον, όπως πολλές από τις κύριες πλακέτες των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, η κύρια πλακέτα FRDM KL25Z περιλαμβάνει κυκλώματα λειτουργιών επίδειξης και δοκιμής, πχ. κύκλωμα αισθητήρα επιτάχυνσης (MEMS accelerometer), επιφάνεια αφής τεχνολογίας capacitive touch, κλπ. Στην Εικόνα 8.16 παρατίθεται το μπλοκ διάγραμμα της εν λόγω κύριας πλακέτας, ενώ στην Εικόνα 8.17 απεικονίζεται η κύρια πλακέτα σε φυσική μορφή.

Η ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού του μικροελεγκτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του δημοφιλούς περιβάλλοντος ανοικτής πηγής ARM MBED δίχως οικονομικό κόστος για άδειες χρήσης.

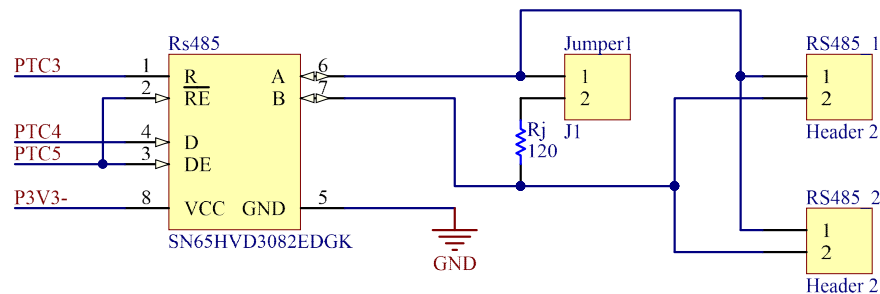


Εικόνα 8.16. Το μπλοκ διάγραμμα των λειτουργιών της κύριας πλακέτας FRDM KL25Z (της εταιρίας Freescale, νυν NXP).



Εικόνα 8.17. Η κύρια πλακέτα επέκτασης FRDM KL25Z (της εταιρίας Freescale, νυν NXP).

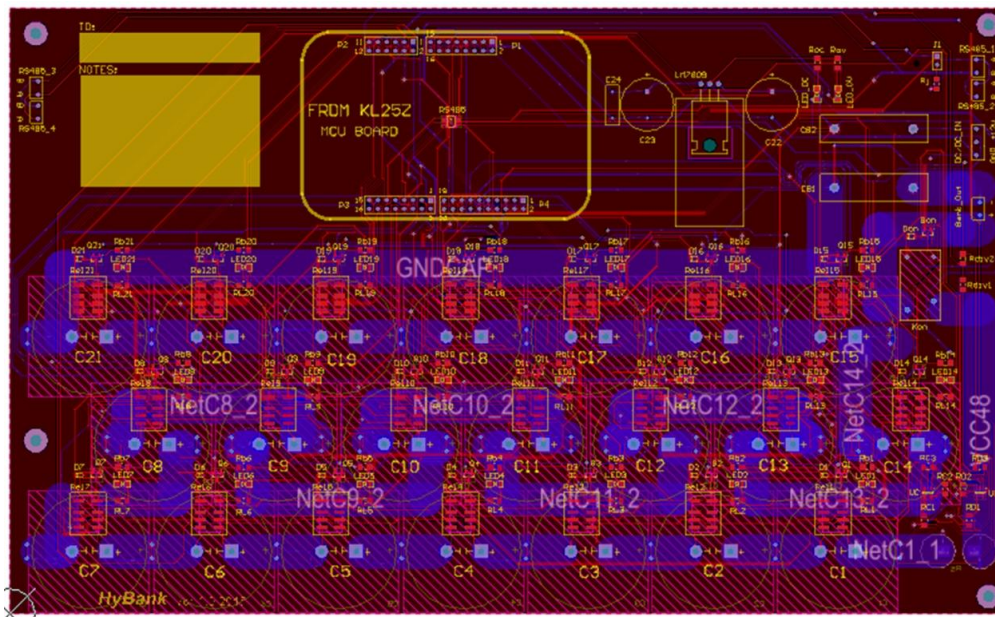
Στον μικροελεγκτή της κύριας πλακέτας FRDM KL25Z εκτελείται το σενάριο για τις μετρήσεις και τον έλεγχο της λειτουργίας των υβριδικών υπερπυκνωτών. Οι αναλογικές έξοδοι των ενισχυτών μέτρησης ρευμάτων και τάσεων χρησιμοποιούνται αντίστοιχες εισόδους του μικροελεγκτή για την μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Επί πλέον, μέσω του κυκλώματος της Εικόνας 8.18, το οποίο υλοποιείται στο τυπωμένο κύκλωμα του συστήματος, παρέχεται η δυνατότητα διασύνδεσης του συστήματος με άλλα ίδια συστήματα έτσι ώστε να δημιουργείται ένα ενσύρματο δίκτυο συστημάτων μέτρησης και ελέγχου υβριδικών υπερπυκνωτών. Για τη διασύνδεση αυτή χρησιμοποιήθηκε το βιομηχανικό πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας δεδομένων RS-485. Εναλλακτικά, αντί για την ενσύρματη διασύνδεση, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο από τα εμπορικά διαθέσιμα ολοκληρωμένα υποσύστημα ασύρματης δικτύωσης (wireless module), π.χ. ZigBee, κλπ, το οποίο θα μπορούσε να συνδεθεί στην κύρια πλακέτα επέκτασης.



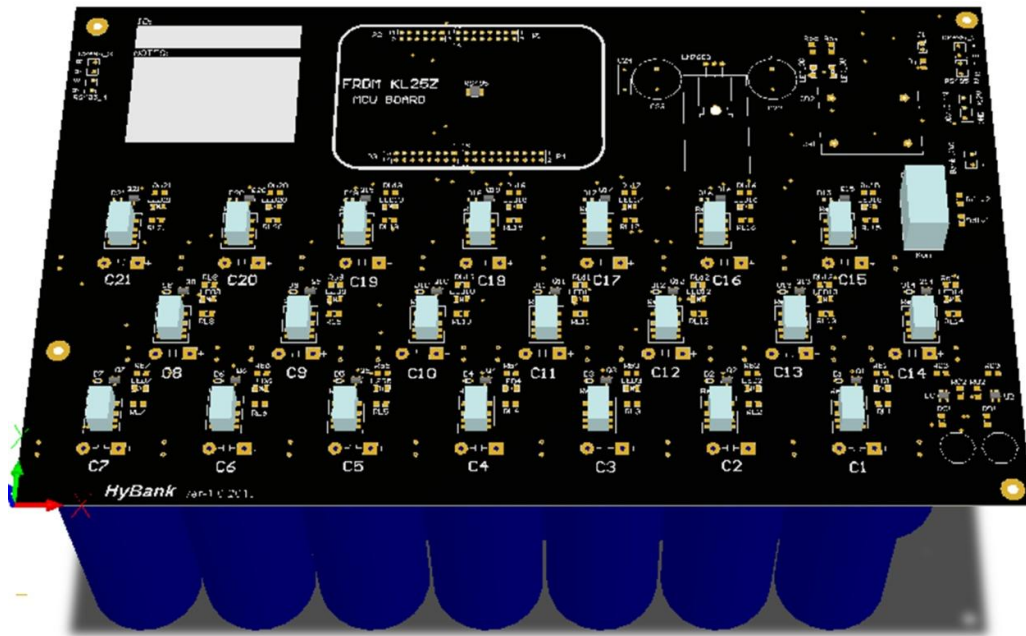
Εικόνα 8.18. Σχηματικό κύκλωμα της λειτουργίας διασύνδεσης σε δίκτυο συστημάτων μέτρησης και ελέγχου υβριδικών υπερπυκνωτών χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο επικοινωνίας RS-485.

Το σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος του συστήματος μέτρησης και ελέγχου συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών παρατίθεται στην Εικόνα 8.19. Το τυπωμένο κύκλωμα είναι δύο επιπέδων (double layer PCB). Στο επάνω μέρος, στο κέντρο, διακρίνονται οι συνδετήρες επέκτασης σημάτων στους οποίους στηρίζεται η κύρια πλακέτα επέκτασης FRDM KL25Z. Το μεγαλύτερο μέρος του τυπωμένου κυκλώματος καταλαμβάνουν οι θέσεις για τη συγκόλληση είκοσι ενός (21) υβριδικών υπερπυκνωτών. Οι εν λόγω πυκνωτές επιλέχθηκε να τοποθετηθούν στην πίσω πλευρά του τυπωμένου κυκλώματος έτσι ώστε να αφήσουν ελεύθερη όλη την επιφάνεια της μπροστινής πλευράς για τη συγκόλληση όλων των εξαρτημάτων των

κυκλωμάτων ελέγχου. Όπως φαίνεται στην τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος, στην Εικόνα 8.20, στο επάνω μέρος της πλακέτας έχουν συγκολληθεί οι ηλεκτρονόμοι για τη μέτρηση της τάσης στα άκρα των πυκνωτών (τα μικρά λευκά εξαρτήματα), τα εξαρτήματα για τη διαχείριση της ενέργειας, η κύρια πλακέτα FRDM KL25Z, τα εξαρτήματα για την αποσύνδεση/σύνδεση της συστοιχίας των πυκνωτών από την τάση τροφοδοσίας, οι ασφαλειοθήκες για τις ασφάλειες προστασίας από υπερένταση, κλπ. Η τοποθέτηση των πυκνωτών στο κάτω μέρος της πλακέτας, εκτός των άλλων, εξυπηρετεί στην καλύτερη μεταχείριση και στήριξη της πλακέτας, αλλά και επιτρέπει την άμεση πρόσβαση στα άκρα των πυκνωτών στο επάνω μέρος της πλακέτας. Οι διαστάσεις της πλακέτας του συστήματος είναι 17.50 cm x 28.73 cm.

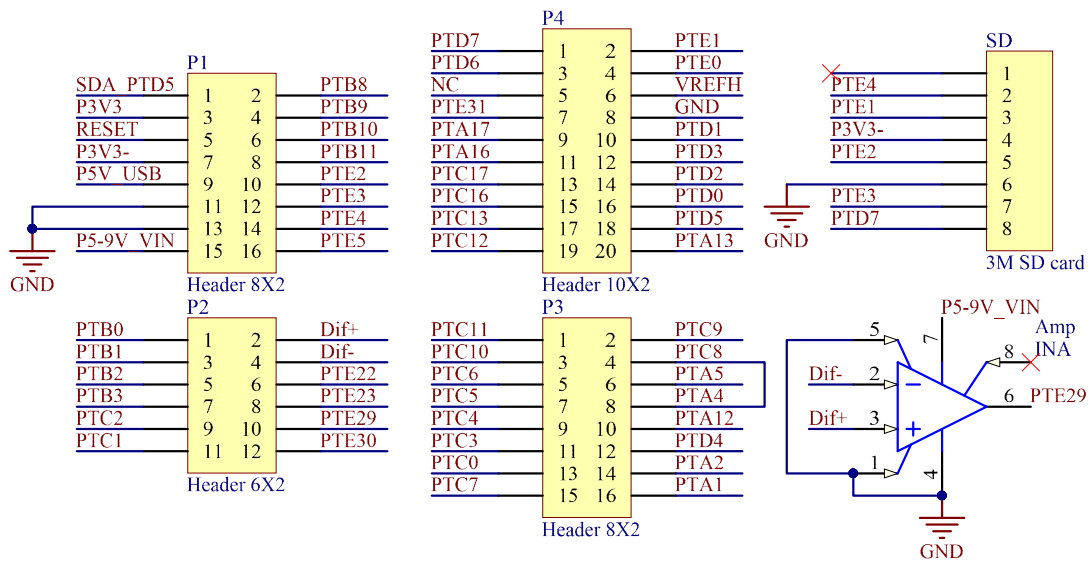


Εικόνα 8.19 Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος του συστήματος μέτρησης και ελέγχου συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών.

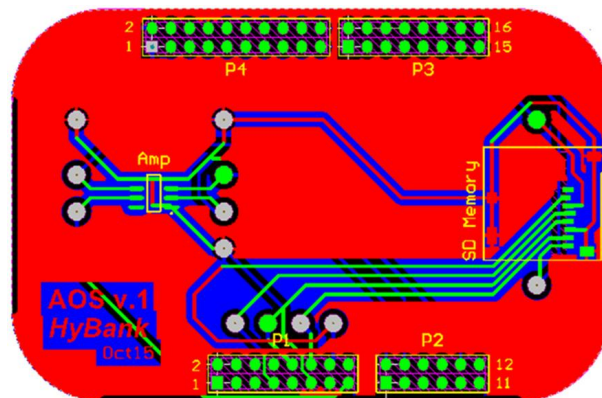


Εικόνα 8.20. Τρισδιάστατη αναπαράσταση της πλακέτας του συστήματος μέτρησης και ελέγχου συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών.

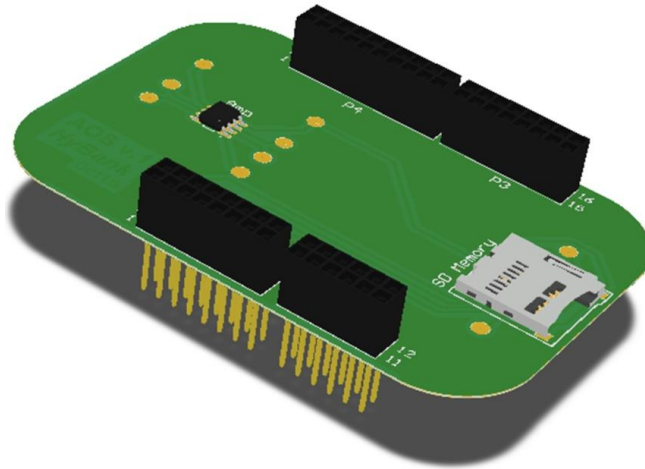
Επίσης, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια πλακέτα επέκτασης, η οποία τοποθετείται κάτω από την κύρια πλακέτα FRDM KL25Z, στην οποία αποφασίστηκε να περιληφθούν, πρώτον το κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή μέτρησης τάσης και δεύτερον, ένας συνδετήρας για την τοποθέτηση μνήμης τύπου microSD για την καταγραφή δεδομένων μετρήσεων των παραμέτρων λειτουργίας των πυκνωτών. Στην Εικόνα 8.21 παρατίθεται το σχηματικό κύκλωμα, στην Εικόνα 8.22 το σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος, και στην Εικόνα 8.23 η τρισδιάστατη αναπαράσταση της πλακέτας επέκτασης.



Εικόνα 8.21. Το σχηματικό κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης της κύριας πλακέτας FRDM KL25Z. Διακρίνονται οι συνδετήρες επέκτασης της κύριας πλακέτας.



Εικόνα 8.22. Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης της κύριας πλακέτας FRDM KL25Z σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας.



Εικόνα 8.23. Τρισδιάστατη αναπαράσταση της πλακέτας επέκτασης της κύριας πλακέτας FRDM KL25Z.

Στην Εικόνα 8.24 φαίνονται πολλά συστήματα μέτρησης και ελέγχου υβριδικών υπερπυκνωτών διασυνδεδεμένα μεταξύ τους για τη σύνθεση μιας μεγάλης αποθήκης ενέργειας (energy storage bank) για την οδήγηση μεγάλων φορτίων. Στην Εικόνα 8.25 φαίνεται σε φορητή μορφή μια τέτοια αποθήκη ενέργειας η οποία χρησιμοποιήθηκε σε σύστημα αφαλάτωσης νερού (water desalination) τροφοδοτούμενου από μικροδίκτυο (microgrid) [22].



Εικόνα 8.24. Διασυνδεδεμένες συσκευές μέτρησης και ελέγχου στοιχείων υβριδικών υπερπυκνωτών κατά τη διαδικασία δοκιμών για τη δημιουργία ενιαίας αποθήκης ενέργειας.



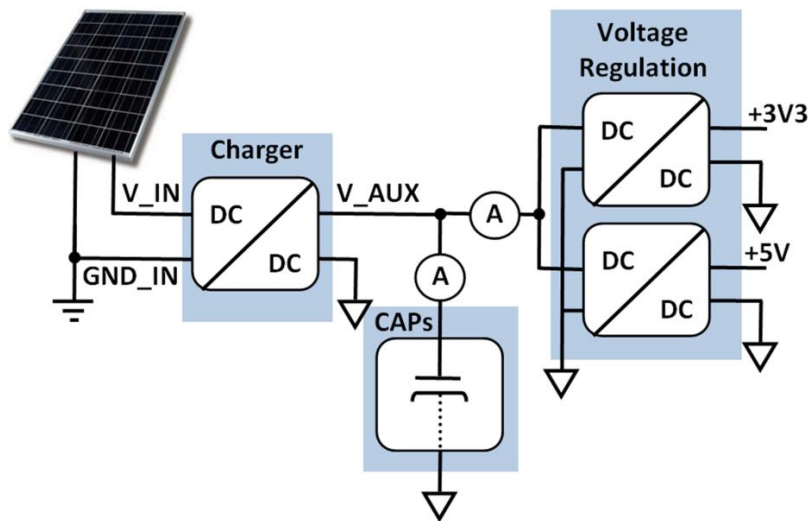
Εικόνα 8.25. Ερμάριο αποθήκευσης ενέργειας βασισμένης σε διασυνδεδεμένες ελεγχόμενες συστοιχίες υβριδικών υπερπυκνωτών.

Το σύστημα μέτρησης και ελέγχου υβριδικών υπερπυκνωτών, το οποίο παρουσιάστηκε λεπτομερώς παραπάνω, αποτελεί άλλο ένα παράδειγμα σχεδιασμού συστημάτων ειδικού σκοπού βασισμένου σε υλικό ανοικτής πηγής. Η κύρια πλακέτα επέκτασης καθώς επίσης και η πλακέτα επέκτασης? χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των λειτουργιών των υβριδικών υπερπυκνωτών και για το λόγο αυτόν δεν είναι δυνατόν να τροφοδοτούνται από αυτούς αλλά από σταθερή πηγή τάσης. Στις περιπτώσεις όπου η συστοιχία των πυκνωτών πρέπει να αποσυνδέεται από το κύκλωμα τροφοδοσίας και από το φορτίο, τότε το σύστημα μέτρησης και ελέγχου θα πρέπει να έχει ανεξάρτητη πηγή τροφοδοσίας. Επομένως, αποτελεί πρόκληση η ενσωμάτωση μεθόδων μέτρησης και ελέγχου μέσω αποθήκευσης ενέργειας νέων τεχνολογιών σε περιπτώσεις συστημάτων, όπως π.χ. είναι οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας.

8.3.3. Μετρήσεις και Έλεγχος βάσει της Αρχιτεκτονικής SensoTube

Για τη χρήση συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων απαιτείται το σύστημα του μπλοκ διαγράμματος της Εικόνας 8.26. Όπως φαίνεται στην εν λόγω εικόνα, η τροφοδοσία του συστήματος προέρχεται από

μια φωτοβολταϊκή κυψέλη. Στη συνέχεια, μια μονάδα μετατροπής τάσης (DC-to-DC voltage converter) αναλαμβάνει τον υποβιβασμό της τάσης της κυψέλης (step-down conversion) έτσι ώστε να φορτίζεται η συστοιχία των υβριδικών υπερπυκνωτών, η οποία παίζει το ρόλο της εφεδρικής πηγής ενέργειας κατά την περίοδο της νύχτας ή γενικά όταν η φωτοβολταϊκή κυψέλη δεν παράγει ενέργεια. Η έξοδος του μετατροπέα τάσης δρομολογείται επίσης και σε οποιαδήποτε μονάδα περαιτέρω ρύθμισης τάσης, π.χ. για την δημιουργία +5 Vdc και +3.3 Vdc.

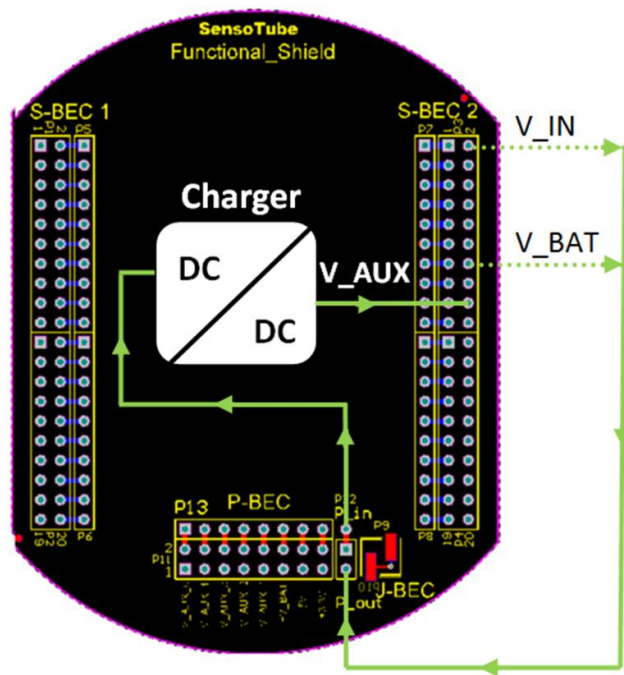


Εικόνα 8.26. Μπλοκ διάγραμμα συστήματος τροφοδοσίας ασύρματου κόμβου από φωτοβολταϊκή κυψέλη, με εφεδρική μονάδα αποθήκευσης ενέργειας τεχνολογίας υβριδικών υπερπυκνωτών, και ρυθμιστές τάσεις στα +5 Vdc και +3.3 Vdc για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων του κόμβου.

Η αρχιτεκτονική SensoTube επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των λειτουργιών του μπλοκ διαγράμματος της Εικόνας 8.26 με απλό και τυποποιημένο τρόπο. Η μεγαλύτερη δυσκολία στην ενσωμάτωση λειτουργιών που σχετίζονται με τη διαχείριση ενέργειας είναι η έλλειψη δυνατότητας των φυσικών συνδέσεων των διαφόρων απαραίτητων τάσεων. Τα επόμενα τρία σχήματα (Εικόνα 8.27, Εικόνα 8.28, και Εικόνα 8.29) δείχνουν πως κάθε λειτουργία μπορεί να υλοποιηθεί με τη μορφή πλακέτας επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube.

Στην Εικόνα 8.27, δείχνεται μια πλακέτα επέκτασης στην οποία υλοποιείται η λειτουργία του μετατροπέα τάσης. Οι σχεδιαστικές επιλογές για την πραγματοποίηση των κυκλωμάτων είναι αρκετές, κάθε μια με διαφορετικές

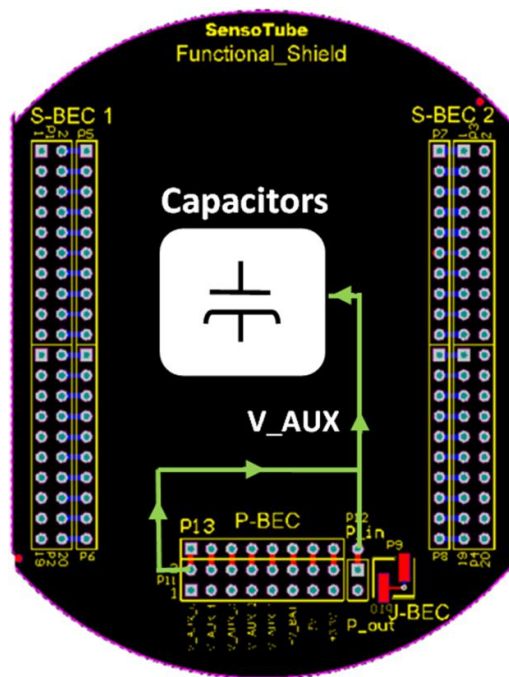
δυνατότητες και πλεονεκτήματα. Σε κάθε περίπτωση, η τάση εξόδου του μετατροπέα καθορίζεται από τη μέγιστη ονομαστική τάση στα άκρα της συστοιχίας των υβριδικών υπερπυκνωτών. Σχετικά με τις συνδέσεις των σημάτων τάσεων, τα κυκλώματα του μετατροπέα μπορούν να τροφοδοτηθούν εναλλακτικά από την τάση V_IN (είσοδος από φωτοβολταϊκή κυψέλη), είτε από την τάση V_BAT (για την περίπτωση δοκιμών μόνο με συσσωρευτές ενέργειας). Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως στο Κεφάλαιο 4, στο οποίο περιγράφεται η χρήση του μηχανισμού για την δι-επίπεδη διαχείριση ενέργειας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας συνδετήρας βραχυκυκλώματος (shorting jumper) για τη δρομολόγηση τάσεων από τον συνδετήρα επέκτασης σημάτων S-BEC2 προς τα κυκλώματα της πλακέτας επέκτασης.



Εικόνα 8.27. Πλακέτα επέκτασης για τη μετατροπή τάσης εισόδου από φωτοβολταϊκή κυψέλη ή από συσσωρευτή ενέργειας.

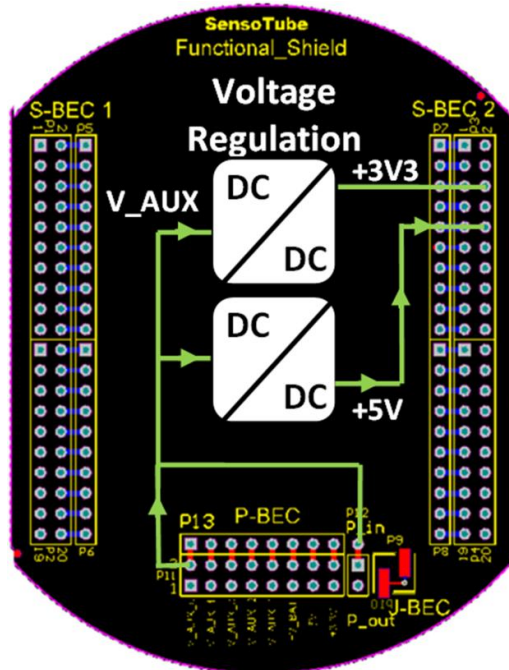
Αντίστοιχα, στην Εικόνα 8.28 δείχνεται μια πλακέτα επέκτασης στην οποία φιλοξενείται η υπό δοκιμή συστοιχία των υβριδικών υπερπυκνωτών. Λόγω της απαίτησης της μέτρησης του ρεύματος της συστοιχίας των πυκνωτών, η τροφοδοσία της συστοιχίας πραγματοποιείται μέσω ενός από τα κανάλια ελεγχόμενων τάσεων του μηχανισμού δι-επίπεδης διαχείρισης ενέργειας (βλ. Κεφάλαιο 4). Η υλοποίηση

των λειτουργιών της μέτρησης ρεύματος καθώς και της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της συστοιχίας μπορεί να υλοποιηθεί σε μια ανεξάρτητη πλακέτα επέκτασης όπως αυτήν της Εικόνας 4.21, στο Κεφάλαιο 4).



Εικόνα 8.28. Πλακέτα επέκτασης με συστοιχία υβριδικών υπερπυκνωτών για την αποθήκευση ενέργειας

Ομοίως, οι λειτουργίες της μετατροπής και της σταθεροποίησης τάσεων, π.χ. σε +5 Vdc και +3.3 Vdc, μπορούν να υλοποιηθούν σε μια πλακέτα επέκτασης, όπως στην Εικόνα 8.29. Και στην περίπτωση αυτή, η τροφοδοσία εισόδου των κυκλωμάτων των μετατροπέων προέρχεται από κανάλι ελεγχόμενης τάσης έτσι ώστε να μετράται το ρεύμα που καταναλώνουν. Οι σταθεροποιημένες τάσεις των εξόδων των μετατροπέων τάσης δρομολογούνται απευθείας στα σχετικά σήματα του μηχανισμού διαχείρισης και επέκτασης σημάτων S-BEC2. Μέσω συνδετήρων βραχυκυκλώματος, οι τάσεις αυτές μπορούν να συνδεθούν με τα ομώνυμα σήματα τάσης του συνδετήρα επέκτασης σημάτων έτσι ώστε να είναι επιλεκτικά διαθέσιμες σε άλλες πλακέτες επέκτασης του συστήματος.

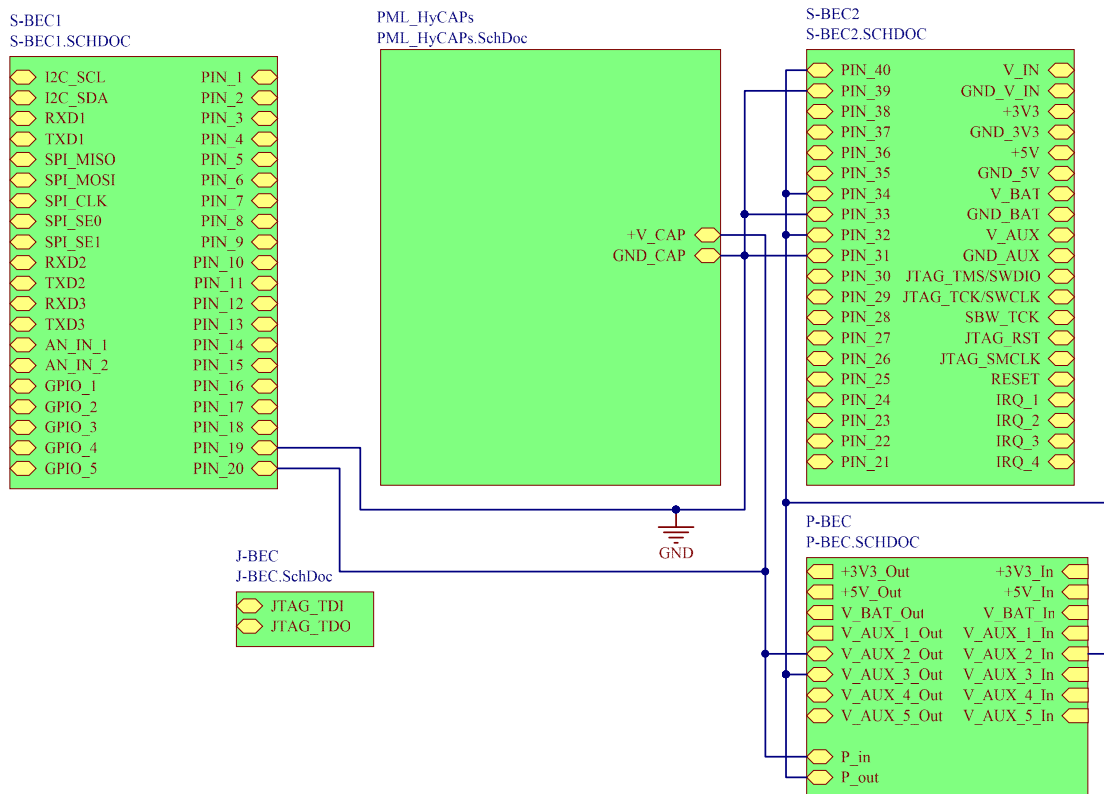


Εικόνα 8.29. Πλακέτα επέκτασης στην οποία υλοποιούνται οι λειτουργίες μετατροπής και σταθεροποίησης τάσεων +5 Vdc και +3.3 Vdc.

Σχετικά με τον τελικό σχεδιασμό και την υλοποίηση των τριών προαναφερόμενων πλακετών επέκτασης:

- η πλακέτα επέκτασης του μετατροπέα/φορτιστή τάσης μπορεί να υλοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, δηλαδή χρησιμοποιώντας διάφορα κυκλώματα. Επί πλέον, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ανεξάρτητη συσκευή φόρτισης, δεν υπάρχει ανάγκη για το σχεδιασμό της εν λόγω πλακέτας επέκτασης. Στην περίπτωση αυτή, η τάση εισόδου V_{IN} θα πρέπει να προέρχεται από την τάση εξόδου του εξωτερικού μετατροπέα/φορτιστή.
- Η πλακέτα επέκτασης για τη μετατροπή και σταθεροποίηση τάσεων μπορεί κι αυτή να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας πλήθος σχεδιαστικών επιλογών. Μια τέτοια πλακέτα έχει σχεδιαστεί και παρουσιαστεί αναλυτικά στα παραδείγματα σχεδιασμού πλακετών επέκτασης βάσει του υποδείγματος σχεδίασης της αρχιτεκτονικής SensoTube, στο Κεφάλαιο 6.
- Η πλακέτα επέκτασης στην οποία φιλοξενείται η συστοιχία των υβριδικών υπερπυκνωτών, σχεδιάζεται και παρατίθεται ακολούθως.

Στην Εικόνα 8.30 παρατίθεται το νέο sheet symbol PML_HyCAPs (στο κέντρο) με τα sheet ports του και τις συνδέσεις τους στα sheet ports των sheet symbols των δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης σημάτων και ενέργειας.

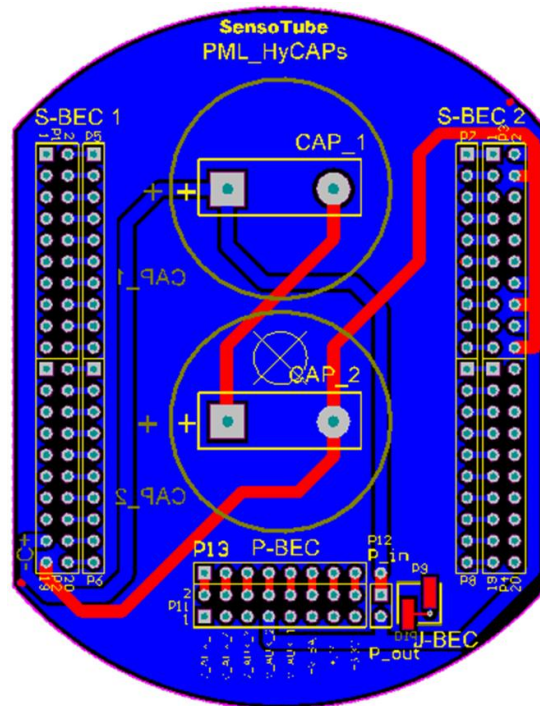


Εικόνα 8.30. Δημιουργία του sheet symbol *PML_HyCAPs* και των sheet ports της νέας πλακέτας επέκτασης και σύνδεση των sheet ports με τα απαραίτητα σήματα των παρεχόμενων δι-επίπεδων μηχανισμών διαχείρισης και επέκτασης.

Σύμφωνα με το μοντέλο αναφοράς υλοποίησης των πλακετών επέκτασης βάσει της αρχιτεκτονικής *Sensotube*, που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, οι φυσικές διαστάσεις της πλακέτας επέκτασης επιτρέπουν την τοποθέτηση μέχρι δύο υβριδικών υπερπυκνωτών. Ο περιορισμός αυτός οφείλεται στο γεγονός πως οι υβριδικοί υπερπυκνωτές είναι αρκετά μεγάλοι σε μέγεθος. Η πλακέτα επέκτασης *PML_HyCAPs* θεωρείται επιπέδου PML, του επιπέδου δηλαδή που σύμφωνα με τα επίπεδα λειτουργιών της αρχιτεκτονικής *Sensotube* σχετίζεται με τη διαχείριση της ενέργειας του συστήματος του ασύρματου κόμβου.

Στην Εικόνα 8.31 παρατίθεται το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης της συστοιχίας των υβριδικών υπερπυκνωτών. Φιλοξενεί δύο πυκνωτές, τους CAP_1 και CAP_2, οι οποίοι τοποθετούνται στην πίσω πλευρά του τυπωμένου κυκλώματος, ενώ οι ακίδες τους συγκολλούνται στην μπροστινή όψη του τυπωμένου. Η επιλογή αυτή επιτρέπει πρώτον, τη φυσική πρόσβαση στις ακίδες των πυκνωτών στην εμπρός όψη του τυπωμένου για μετρήσεις και δοκιμές στο εργαστήριο, και δεύτερον, την καλύτερη στήριξη της πλακέτας και της ευκολότερης τοποθέτησής της στη στοίβα των πλακετών επέκτασης του συστήματος. Λόγω του μεγάλου ύψους των υβριδικών υπερπυκνωτών, η εν λόγω πλακέτα επέκτασης είναι σκόπιμο να τοποθετείται τελευταία, στο κάτω μέρος της στοίβας των πλακετών επέκτασης.

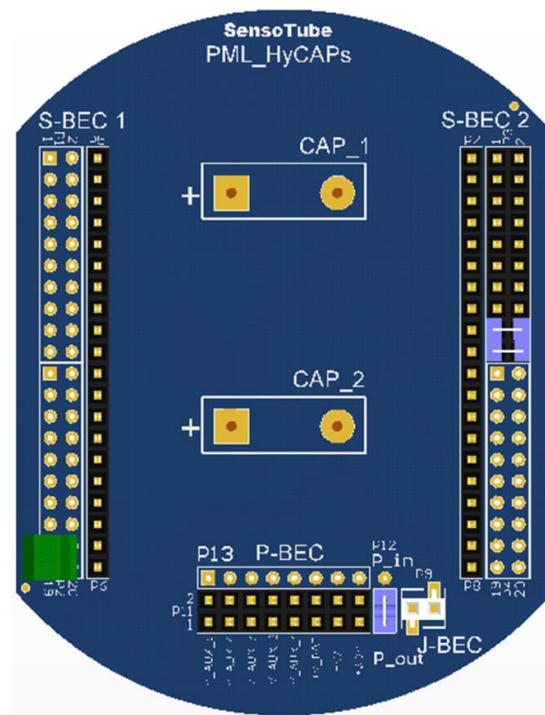
Τα άκρα της συστοιχίας των δύο υβριδικών υπερπυκνωτών της πλακέτας επέκτασης δρομολογούνται σε συνδετήρα τύπου κλέμας με βίδα έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσθήκη μεγαλύτερου πλήθους πυκνωτών. Στην περίπτωση αυτή, οι επί πλέον πυκνωτές θα πρέπει να τοποθετηθούν στο κάτω μέρος του περιβλήματος στέγασης (δηλ. του πλαστικού σωλήνα).



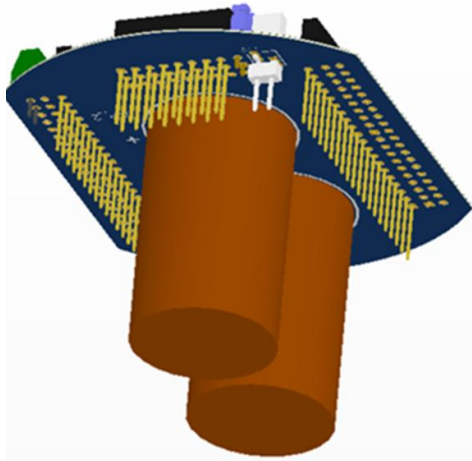
Εικόνα 8.31. Το πλήρες σχέδιο του τυπωμένου κυκλώματος της πλακέτας επέκτασης PML_HyCAPs.

Στο τυπωμένο κύκλωμα έχουν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες συνδέσεις έτσι ώστε η συστοιχία των πυκνωτών να μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από τις τάσεις V_IN ή V_AUX, ή V_BAT, του συνδετήρα επέκτασης του μηχανισμού S-BEC2, είτε μέσω ενός από τα κανάλια ελεγχόμενων τάσεων του συνδετήρα επέκτασης του μηχανισμού διαχείρισης ενέργειας P-BEC. Η τελευταία επιλογή επιτρέπει την μέτρηση του ρεύματος αλλά και τη δυνατότητα για σύνδεση/αποσύνδεση της συστοιχίας από την τάση φόρτισης και το φορτίο.

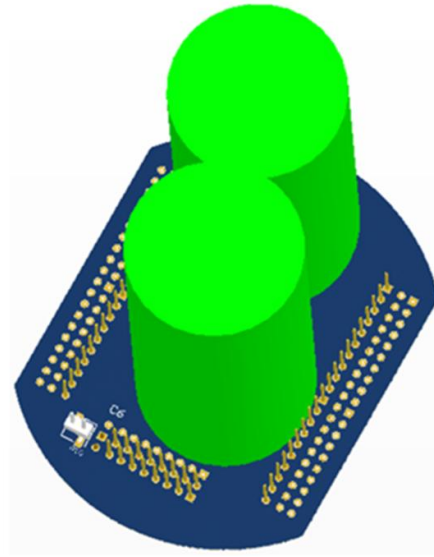
Η πλακέτα επέκτασης μετά την κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος, και την τοποθέτηση και συγκόλληση των εξαρτημάτων, έχει την όψη της Εικόνας 8.32. Στην Εικόνα 8.33 απεικονίζονται όψεις της πλακέτας επέκτασης έχοντας τοποθετήσει δύο υβριδικούς υπερπυκνωτές των 200 F (οι πυκνωτές με καφέ χρώμα), ή δύο υβριδικούς υπερπυκνωτές των 1000 F (οι πυκνωτές με πράσινο χρώμα). Και οι δύο τύποι πυκνωτών έχουν σχεδιαστεί με τις φυσικές τους διαστάσεις στην πλακέτα επέκτασης.



Εικόνα 8.32. Τρισδιάστατη άποψη της πλακέτας επέκτασης PML_HyCAPs. Διακρίνεται στο αριστερό κάτω μέρος ο συνδετήρας τύπου κλέμας με βίδες για την επέκταση της συστοιχίας των υβριδικών υπερπυκνωτών. Διακρίνονται επίσης, οι συνδετήρες βραχυκυκλώματος (τα εξαρτήματα με μπλε χρώμα) για τις επιλογές των συνδέσεων τάσης από το συνδετήρα επέκτασης του μηχανισμού S-BEC2.



(α)



(β)

Εικόνα 8.33. Τρισδιάστατες απόψεις της πλακέτας επέκτασης PML_HyCAPs με **α)** συστοιχία δύο υβριδικών υπερπυκνωτών των 200 F έκαστος, και **β)** με συστοιχία δύο υβριδικών υπερπυκνωτών των 1000 F έκαστος.

Με τις πλακέτες επέκτασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, διασφαλίζεται η απρόσκοπτη τροφοδοσία όλων των υπολοίπων πλακετών επέκτασης του ασύρματου κόμβου αισθητήρων οι οποίες σχετίζονται με τις λειτουργίες της ασύρματης δικτύωσης, της συλλογής δεδομένων, κλπ. Η προσθήκη της πλακέτας επέκτασης με τη συστοιχία υβριδικών υπερπυκνωτών δεν παρεμβαίνει σε καμία από τις υπάρχουσες λειτουργίες του συστήματος του κόμβου. Αυτό οφείλεται στους μηχανισμούς επέκτασης, οι οποίοι παρέχουν τη δυνατότητα για ενσωμάτωση και την απρόσκοπτη λειτουργία ακόμα και των πιο απαιτητικών κυκλωμάτων των νέων τεχνολογιών για τη διαχείριση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η τυποποίηση στις μεθόδους επέκτασης, αλλά και στη μορφή και στις φυσικές διαστάσεις των πλακετών επέκτασης επιτρέπουν την εύκολη και απροβλημάτιστη στέγαση στο περίβλημα του πλαστικού σωλήνα.

Με την παραπάνω πρόταση, καθίσταται πλέον εφικτή η χρήση, η μέτρηση και ο έλεγχος συσσωρευτών ενέργειας υβριδικών υπερπυκνωτών σε πραγματικό τόπο (*in-situ*) και σε πραγματικό χρόνο (*real-time*) στο πραγματικό περιβάλλον της γεωργίας.

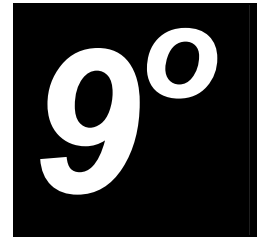
Βιβλιογραφία

1. Rault, T.; Bouabdallah, A.; Challal, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Comput. Networks* **2014**, *67*, 104-122.
2. Wan, Z.G.; Tan, Y.K.; Yuen, C. In *Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks*, 2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology, ICCT 2011, Jinan, 2011; Jinan, pp 362-367.
3. Hellbruck, H.; Pagel, M.; Kroller, A.; Bimschas, D.; Pfisterer, D.; Fischer, S. In *Using and operating wireless sensor network testbeds with wisebed*, 2011 the 10th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, Med-Hoc-Net'2011, Favignana Island, Sicily, 2011; Favignana Island, Sicily, pp 171-178.
4. Farooq, M.O.; Kunz, T. Wireless multimedia sensor networks testbeds and state-of-the-art hardware: A survey. In *2011 International Conference on Future Generation Communication and Networking, FGCN 2011, Held as Part of the 3rd International Mega-Conference on Future-Generation Information Technology, FGIT 2011, in Conjunction with GDC 2011*, Jeju Island, 2011; Vol. 265 CCIS, pp 1-14.
5. Tonneau, A.S.; Mitton, N.; Vandaele, J. How to choose an experimentation platform for wireless sensor networks? A survey on static and mobile wireless sensor network experimentation facilities. *Ad Hoc Netw.* **2015**, *30*, 115-127.
6. Kim, H.; Hong, W.K.; Yoo, J.; Yoo, S.E. Experimental research testbeds for large-scale wsns: A survey from the architectural perspective. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2015**, 2015.
7. Garg, K.; Förster, A.; Puccinelli, D.; Giordano, S. Towards realistic and credible wireless sensor network evaluation. In *3rd International ICST Conference on Ad Hoc Networks, ADHOCNETS 2011, Paris, 2012*; Vol. 89 LNICST, pp 49-64.
8. Rodrigues, A.; Camilo, T.; Silva, J.S.; Boavida, F. Diagnostic tools for wireless sensor networks: A comparative survey. *J Network Syst Manage* **2013**, *21*, 408-452.

9. Di Francesco, M.; Das, S.K.; Anastasi, G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey. *ACM Trans. Sens. Netw.* **2011**, *8*.
10. Djenouri, D.; Bagaa, M. Synchronization protocols and implementation issues in wireless sensor networks: A review. *IEEE Syst. J.* **2014**.
11. Bogue, R. Solar-powered sensors: A review of products and applications. *Sens. Rev.* **2012**, *32*, 95-100.
12. Swapna Kumar, S.; Kashwan, K.R. Research study of energy harvesting in wireless sensor networks. *Int. J. Renew. Energy Res.* **2013**, *3*, 745-753.
13. Qian, H.; Sun, P.; Rong, Y. In *Design proposal of self-powered wsn node for battle field surveillance*, 2012 International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, FEEM 2012, Hong Kong, 2011; Elsevier BV: Hong Kong, pp 753-757.
14. Zahid Kausar, A.S.M.; Reza, A.W.; Saleh, M.U.; Ramiah, H. Energizing wireless sensor networks by energy harvesting systems: Scopes, challenges and approaches. *Renewable Sustainable Energy Rev* **2014**, *38*, 973-989.
15. Berecibar, M.; Gandiaga, I.; Villarreal, I.; Omar, N.; Van Mierlo, J.; Van Den Bossche, P. Critical review of state of health estimation methods of li-ion batteries for real applications. *Renewable Sustainable Energy Rev* **2016**, *56*, 572-587.
16. Chen, H.; Wei, B.; Ma, D. Energy storage and management system with carbon nanotube supercapacitor and multidirectional power delivery capability for autonomous wireless sensor nodes. *IEEE Trans Power Electron* **2010**, *25*, 2897-2909.
17. Le, T.N.; Pegatoquet, A.; Berder, O.; Sentieys, O.; Carer, A. Energy-neutral design framework for supercapacitor-based autonomous wireless sensor networks. *ACM J. Emerg. Technologies Comput. Syst.* **2015**, *12*.
18. Somov, A.; Ho, C.C.; Passerone, R.; Evans, J.W.; Wright, P.K. Towards extending sensor node lifetime with printed supercapacitors. In *9th European Conference on Wireless Sensor Networks, EWSN 2012, Trento, 2012*; Vol. 7158 LNCS, pp 212-227.

19. Kyriakarakos, G.; Piromalis, D.D.; Arvanitis, K.G.; Dounis, A.I.; Papadakis, G. On battery-less autonomous polygeneration microgrids: Investigation of the combined hybrid capacitors/hydrogen alternative. *Energy Convers. Manage.* **2015**, *91*, 405-415.
20. Wang, W.; Wang, N.; Vinco, A.; Siddique, R.; Hayes, M.; O'Flynn, B.; O'Mathuna, C. Super-capacitor and thin film battery hybrid energy storage for energy harvesting applications. *J. Phys. Conf. Ser.* **2013**, *476*.
21. Inc., L.T. Ltc6101 high voltage high-side current sensor amplifier in sot-23. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6101fh.pdf>
22. Αθήνας, Γ.Π. Αριστεία ι, άμεσησ συνδεσησ (χωρισ συσσωρευτεσ) μοναδα αφαλατωσησ αντιστροφησ ωσμωσησ με φωτοβολταικα και ανεμογεννητρια που ενσωματωνει τεχνικεσ υπολογιστικησ νοημοσυνησ. http://smartdesalination.aua.gr/?page_id=33

Κεφάλαιο



*Συμπεράσματα - Προοπτικές
για Περαιτέρω Έρευνα*

9.1. Συμπεράσματα

Ακολουθώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία, μελετήθηκαν όλες οι διαθέσιμες αρχιτεκτονικές για το σχεδιασμό υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν σε βάθος οι αρχιτεκτονικές:

- Η τυπική (Typical Architecture), στο Κεφάλαιο 1,
- Ειδικού Σκοπού (End Systems Architectures), στο Κεφάλαιο 2,
- Γενικής Χρήσης (COTS), στο Κεφάλαιο 2, και
- Υλικού ανοικτής πηγής (Open-Source Hardware Architectures), στο Κεφάλαιο 2 και στο Κεφάλαιο 3.

Για κάθε μια από τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές (εκτός της τυπικής) σχεδιάστηκαν εξ' αρχής κόμβοι ασύρματων δικτύων αισθητήρων έτσι ώστε να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και τα προβλήματά τους. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν:

- Ένας κόμβος ασύρματου δικτύου για τον έλεγχο τεχνητού φωτισμού σε κλειστά προστατευμένα περιβάλλοντα καλλιέργειών βασισμένος σε αρχιτεκτονική ειδικού σκοπού (βλ. Κεφάλαιο 2, Παράγραφος 2.4),
- Ένας σύστημα κόμβου ασύρματου δικτύου αισθητήρων για τη συλλογή εικόνας εντόμων σε δενδρώνα βασισμένο στην αρχιτεκτονική υλικού ανοικτής πηγής (βλ. Κεφάλαιο 3, Παράγραφος 3.4), και
- Ένα σύστημα δοκιμής και αξιολόγησης συστοιχίας υβριδικών υπερπυκνωτών, βασισμένο σε αρχιτεκτονική ειδικού σκοπού αλλά και αρχιτεκτονική ανοικτής πηγής (βλ. Κεφάλαιο 8, Παράγραφος 8.3.2).

Από τα παραπάνω, αποδείχθηκε πως η τυπική αρχιτεκτονική, καθώς και οι αρχιτεκτονικές ειδικού σκοπού και γενικής χρήσης επιβάλλουν πολλούς περιορισμούς και δυσκολίες στην ανάπτυξη υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Μεταξύ των πιο σημαντικών περιορισμών είναι η αδυναμία επεκτασιμότητας, επανατροποποίησης, επαναχρησιμοποίησης, καθώς και κλιμάκωσης. Τα εγγενή αυτά προβλήματα των εν λόγω αρχιτεκτονικών, τις καθιστούν ακατάλληλες για τον σχεδιασμό κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων για το πραγματικό περιβάλλον της γεωργίας.

Από την άλλη πλευρά, οι αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής, ενώ κερδίζουν ολόένα και περισσότερο έδαφος μεταξύ των σχεδιαστών υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων λόγω της μεγάλης ευελιξίας και ευκολίας τους στην

επεκτασιμότητα, στην επανατροποποίηση καθώς και στην επαναχρησιμοποίηση του υλικού, εμφανίζουν αδυναμίες κυρίως λόγω του εγωκεντρισμού τους. Στο Κεφάλαιο 3, εντοπίστηκαν και επεξηγήθηκαν λεπτομερώς όλοι οι περιορισμοί και οι αδυναμίες των αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, ομαδοποιήθηκαν ως εξής:

- σχετικά με τη διαχείριση σημάτων (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 3.2.1),
- σχετικά με τη διαχείριση επικοινωνιών (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 3.2.2),
- σχετικά με τον προγραμματισμό και την εκσφαλμάτωση μικροελεγκτών (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 3.2.3),
- σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 3.2.4), και
- σχετικά με τη φυσική μορφή και το περιβάλλον στέγασης (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 3.2.5)

Οι αρκετοί περιορισμοί και οι σημαντικές δυσκολίες που εντοπίστηκαν αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες για το σχεδιασμό αξιόπιστων και εύρωστων κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, ιδιαίτερος για τις πραγματικές εφαρμογές των κόμβων στο απαιτητικό περιβάλλον της γεωργίας.

Λαμβάνοντας υπ' όψη όλα τα προαναφερόμενα, είναι προφανές πως ο στόχος Σ_1 της διδακτορικής διατριβής (βλ. Κεφάλαιο 1, Παράγραφος 1.4), για τον εντοπισμό των περιορισμών και των αδυναμιών των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών σχεδιασμού υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων, ικανοποιήθηκε πλήρως.

Μετά την τεκμηρίωση των συμπερασμάτων από το σχεδιασμό υλικού κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων βάσει των διαθέσιμων αρχιτεκτονικών, έγινε εμφανής η ανάγκη για τη δημιουργία μιας νέας αρχιτεκτονικής. Για την περίπτωση των πραγματικών εφαρμογών για το εχθρικό περιβάλλον της γεωργίας, η ανάγκη αυτή καθίσταται επιτακτική.

Ως εκ τούτου προτάθηκε η αρχιτεκτονική επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής SensoTube (βλ. Κεφάλαιο 4). Έτσι ικανοποιήθηκε και ο στόχος Σ_2 (βλ. Κεφάλαιο 1, Παράγραφος 1.4) της διδακτορικής διατριβής σχετικά με τη δημιουργία μιας αρχιτεκτονικής η οποία θα διασφαλίζει την αξιοπιστία των αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού με την ευελιξία και την ευκολία των αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής. Συγκεκριμένα, ικανοποιήθηκαν όλοι οι επί μέρους στόχοι (βλ.

Κεφάλαιο 1, Παράγραφος 1.4). Κάθε ένας από τους επί μέρους στόχους επιτεύχθηκε ως εξής:

(Σ_2.1) *Σχετικά με την αποσύζευξη από τη μέριμνα όλων των λειτουργιών του ασύρματου κόμβου αισθητήρων κατά το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη χρήση του: δημιουργήθηκε μια εννοιολογική αφαίρεση (abstraction) όλων των πιθανών λειτουργιών που μπορεί να ζητηθούν να υπάρχουν σε έναν κόμβο ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Συγκεκριμένα, προτάθηκαν επτά διακριτά επίπεδα λειτουργιών ως εξής:*

- *Επίπεδο λειτουργίας Απόκτησης και Ελέγχου Δεδομένων (DCL):* Data Acquisition and Control Layer),
- *Επίπεδο λειτουργίας Ασύρματης Δικτύωσης (WNL: Wireless Networking Layer),*
- *Επίπεδο λειτουργίας Πύλης Δεδομένων (DGL: Data Gateway Layer),*
- *Επίπεδο λειτουργίας Ιδιαιτέρων Εφαρμογών (ASL: Application-Specific Layer),*
- *Επίπεδο λειτουργίας Διαχείρισης Ενέργειας (PML: Power Management Layer),*
- *Επίπεδο λειτουργίας Προγραμματισμού και Εκσφαλμάτωσης (PDL: Programming and Debugging Layer), και*
- *Επίπεδο λειτουργίας Αποτίμησης και Δοκιμών (ETL: Evaluation and Testing Layer)*

Τα προτεινόμενα επτά επίπεδα διακριτών τοποποιούν την εννοιολογική διάκριση των λειτουργία του κόμβου. Κάθε μια λειτουργία μπορεί πλέον να καταταγεί σε ένα από τα επτά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποσύνδεση από τη μέριμνα όλων των λειτουργιών του κόμβου.

(Σ_2.2) *Σχετικά με την ευκολία στην ενσωμάτωση στο υλικό του κόμβου κάθε νέας τεχνολογίας η οποία θα μπορούσε να βελτιώσει τον κόμβο: η δυνατότητα που παρέχει η αρχιτεκτονική SensoTube για τη σύνθεση ενός ασύρματου κόμβου από πλακέτες επέκτασης οι οποίες ανήκουν σε ένα*

από τα επτά επίπεδα λειτουργιών, διασφαλίζει την απαιτούμενη ανοικτότητα (openness) για την ενσωμάτωση όλων των τεχνολογικών προκλήσεων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 1, Παράγραφος 1.3).

(Σ_2.3) *Σχετικά με την τυποποιημένη και ευέλικτη επεκτασιμότητα:* η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει τη δυνατότητα για δι-επίπεδες υπηρεσίες διαχείρισης και ελέγχου σημάτων, περιφερειακών επικοινωνιών, προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης καθώς και ενέργειας του κόμβου. Οι δι-επίπεδες αυτές υπηρεσίες διαπερνούν όλες τις πλακέτες επέκτασης όλων των επιπέδων λειτουργιών. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν στο φυσικό επίπεδο τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί επέκτασης:

- Μηχανισμός επέκτασης και διαχείρισης σημάτων και επικοινωνιών S-BEC (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.3.1, Παράγραφος 4.3.2),
- Μηχανισμός επέκτασης και διαχείρισης προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης μικροελεγκτών J-BEC (Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.3.3), και
- Μηχανισμός επέκτασης και διαχείρισης ενέργειας P-BEC (Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.3.4).

Με τους μηχανισμούς αυτούς διασφαλίζεται στο μέγιστο βαθμό η απρόσκοπτη αλλά και τυποποιημένη επεκτασιμότητα του υλικού των ασύρματων κόμβων. Προς αυτήν την κατεύθυνση ωφελεί και το προτεινόμενο μοντέλο αναφοράς σχεδιασμού και ανάπτυξης του τυπωμένου κυκλώματος της αρχιτεκτονικής SensoTube.

(Σ_2.4) *Σχετικά με την ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας:* σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, προτάθηκε η χρήση πλαστικού σωλήνα διαμέτρου 90 mm, όπως αυτών που χρησιμοποιούνται για την άρδευση και την αποχέτευση, ως περίβλημα στέγασης αλλά και ως φορέας στήριξης του συστήματος του ασύρματου κόμβου (βλ. Κεφάλαιο 5). Με τη μέθοδο αυτή διασφαλίζεται η μέγιστη προστασία του κόμβου από το εχθρικό εξωτερικό περιβάλλον στο πεδίο της γεωργίας. Για το λόγο αυτό, η

μορφή και οι φυσικές διαστάσεις των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube έχουν σχεδιαστεί καταλλήλως. Η χρήση του μοντέλου αναφοράς του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του τυπωμένου κυκλώματος των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube διασφαλίζει απόλυτα την τυποποίηση και την τακτοποίηση των συνδέσεων και των καλωδιώσεων εντός του περιβλήματος στέγασης).

(Σ_2.5) *Σχετικά με την ικανοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερο όλων των εμπλεκόμενων μερών στις εφαρμογές ασύρματων δικτύων κόμβων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας:*

- *Για τους σχεδιαστές υλικού:* οι σχεδιαστές μέσω της νέας αρχιτεκτονικής έχουν πλέον στην διάθεσή τους τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να ενσωματώσουν τη συνεισφορά τους βάσει της εξειδίκευσής τους και της εμπειρίας τους. Σύμφωνα με όλες τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές οι σχεδιαστές πρέπει να είναι ειδικοί πάνω σε όλες τις λειτουργίες του κόμβου, π.χ. από τη συλλογή δεδομένων μέχρι και την ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού του πρωτοκόλλου ασύρματης δικτύωσης και τη σχεδίαση των ασύρματων πομποδεκτών. Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SensoTube, ο κάθε σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει το επίπεδο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην εξειδίκευσή του και στην εμπειρία του και εκεί να ενσωματώσει τη συνεισφορά του με τη μορφή μιας πλακέτας επέκτασης δίχως να παρεμβαίνει στις υπόλοιπες λειτουργίες του ασύρματου κόμβου. Ως εκ τούτου οι σχεδιαστές εξασφαλίζουν τη μέγιστη ευελιξία στο έργο τους. Επί πλέον, για τη μεγαλύτερη εξυπηρέτηση και ευκολία των σχεδιαστών υλικού κόμβων, η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει ένα συνοπτικό και αποτελεσματικό υπόδειγμα σχεδιασμού (design template) μέσω του οποίου παρέχονται έτοιμοι όλοι οι μηχανισμοί επέκτασης και διαχείρισης με τις συνδέσεις τους στο σχηματικό αλλά και στο τυπωμένο κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό ο χρόνος σχεδιασμού μειώνεται δραματικά.

- *Για τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρονικών συστημάτων:* η κατασκευή των πλακετών επέκτασης της αρχιτεκτονικής SensoTube δεν απαιτεί καμία εξειδικευμένη κατεργασία στην κατασκευή του τυπωμένου κυκλώματος. Οι συνδετήρες επέκτασης είναι ευρέως κινούμενα υλικά και μάλιστα έχουν πολύ χαμηλό κόστος. Επίσης, η δυνατότητα της σύνθεσης του συστήματος του ασύρματου κόμβου με περισσότερες από μία πλακέτες επέκτασης επιτρέπει σε διάφορους κατασκευαστές ηλεκτρονικών συστημάτων να εξειδικευτούν στην παραγωγή συγκεκριμένων πλακετών επέκτασης κι όχι σε όλον τον κόμβο. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να συνεισφέρουν πιο ωφέλιμα και πιο γρήγορα. Επί πλέον, η κατασκευή μεμονωμένων πλακετών επέκτασης από έναν ή περισσότερους κατασκευαστές επιτρέπει την κατανομή του κόστους για την απαιτούμενη πιστοποίηση. Τα κόστη αυτά είναι ασφαλώς χαμηλότερα σε σχέση με την πιστοποίηση ενός κόμβου λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας των κυκλωμάτων του κόμβου.
- *Για την βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών:* σε αντίθεση με τις διαθέσιμες αρχιτεκτονικές σχεδιασμού υλικού κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, η αρχιτεκτονική SensoTube επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών. Οι καινοτόμοι μηχανισμοί επέκτασης και διαχείρισης σημάτων, προγραμματισμού/εκσφαλμάτωσης, και ενέργειας, επιτρέπουν την απρόσκοπτη και απεριόριστη επεκτασιμότητα και τυποποίηση. Είναι δυνατή η προσθήκη όχι μόνο πολλών και διαφορετικών πλακετών επέκτασης λειτουργιών αλλά και η προσθήκη πολλών πλακετών με μικροελεγκτές (multi-MCU systems). Ως εκ τούτου, διασφαλίζεται στο μέγιστο βαθμό η ανοικτότητα και η επεκτασιμότητα του υλικού του κόμβου.
- *Για τους μηχανικούς ανάπτυξης εφαρμογών:* η αρχιτεκτονική SensoTube παρέχει τη μέγιστη δυνατότητα επανατροποποίησης του υλικού καθώς επίσης και τη

μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίηση του υλικού. Από την άλλη μεριά η φιλοσοφία των επτά διακριτών επιπέδων λειτουργιών (functions abstraction) επιτρέπει τη στοχευμένη σύνθεση του συστήματος του ασύρματου κόμβου αισθητήρων με το ακριβές πλήθος και είδος λειτουργιών που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση και αποτελεσματικότητα του κόμβου. Επί πλέον, η τυποποίηση στην επεκτασιμότητα και στις συνδέσεις των πιθανών καλωδίων αποτρέπει την αταξία και τις ιδιοκατασκευές που συνήθως αποβαίνουν μοιραίες για την αδιάλειπτη και την αξιόπιστη λειτουργία των κόμβων.

- *Για τους ερευνητές:* η αρχιτεκτονική SensoTube επιτρέπει την ενσωμάτωση κάθε πιθανής νέας μεθόδου ή τεχνικής μετρήσεων και ελέγχου μιας ή περισσότερων λειτουργιών του ασύρματου κόμβου αισθητήρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δυνατότητα της νέας αρχιτεκτονικής να επιτρέπει την ενσωμάτωση λειτουργιών που συναντώνται μόνο σε εξειδικευμένες πλατφόρμες δοκιμών (testbeds) έτσι ώστε να πραγματοποιούνται στο πεδίο δοκιμές και έλεγχοι που μέχρι σήμερα μόνο στο εργαστήριο μπορούσαν να λάβουν χώρα. Από την άλλη πλευρά, για τους ερευνητές της γεωργίας, η απεριόριστη επεκτασιμότητα και η δυνατότητα κλιμάκωσης του υλικού του συστήματος του ασύρματου κόμβου (π.χ. προσθήκη επί πλέον εισόδων αισθητήρων, μεγαλύτερης μνήμης, επεξεργαστικής ισχύος, κλπ) επιτρέπουν τη χρήση μιας μόνο πλατφόρμας για όλες τις τρέχουσες και τις μελλοντικές εφαρμογές στο πεδίο.
- *Για τους εκπαιδευόμενους:* η νέα αρχιτεκτονική παρέχει έναν ξεκάθαρο και συνοπτικό τρόπο διατύπωσης των λειτουργιών που επιτελούνται σε έναν ασύρματο κόμβο αισθητήρων. Επί πλέον, παρέχεται ένας τυποποιημένος και απλός τρόπος για τη μελέτη και την ανάπτυξη λειτουργιών του κόμβου έτσι ώστε οι εκπαιδευόμενοι αναλόγως του υποβάθρου και της

εμπειρίας τους κλιμακωτά να υπεισέρχονται στον κόσμο της ανάπτυξης υλικού για ασύρματους κόμβους αισθητήρων.

- Για τους τελικούς χρήστες: εκτός όλων των προαναφερομένων πλεονεκτημάτων της αρχιτεκτονικής SensoTube, οι τελικοί χρήστες, όπως π.χ. οι αγρότες, κερδίζουν από το χαμηλό κόστος των κόμβων, και από την ευελιξία στην τοποθέτηση πλαστικών αντί μεταλλικών ιστών στήριξης.

Επί πλέον, η αρχιτεκτονική SensoTube δοκιμάστηκε πλήρως και στην πράξη. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν σχεδιασμοί πλακετών επέκτασης διαφόρων λειτουργιών:

- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης για τη μέτρηση περιβαλλοντικών και εδαφικών παραμέτρων (βλ. Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.2),
- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης ασύρματης δικτύωσης βασισμένης στο πρωτόκολλο LoRa (βλ. Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.3),
- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης τροφοδοσιών +3.3 Vdc και +5 Vdc (βλ. Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.4),
- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης ασύρματης δικτύωσης βασισμένης στο πρωτόκολλο DASH7 (βλ. Κεφάλαιο 6, Παράγραφος 6.5).
- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης προγραμματισμού και εκοφαλμάτωσης μικροελεγκτών (βλ. Κεφάλαιο 7, Παράγραφος 7.4), και
- Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης συσσωρευτών ενέργειας τύπου υβριδικών υπερπυκνωτών (βλ. Κεφάλαιο 8, Παράγραφος 8.3.3).

Η εμπειρία από το σχεδιασμό και την υλοποίηση των παραπάνω πλακετών επέκτασης λειτουργιών ανέδειξαν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την αρχιτεκτονική SensoTube:

- επιβεβαιώνεται η ικανοποίηση των στόχων της νέας αρχιτεκτονικής,
- παρά το γεγονός πως είναι μια αρχιτεκτονική επεκτάσιμου υλικού ανοικτής πηγής, επιτρέπει τη δημιουργία εύρωστων και αξιόπιστων συστημάτων κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων εφάμιλλων των κόμβων αρχιτεκτονικών ειδικού σκοπού. Λαμβάνοντας υπ' όψην πως οι

κόμβοι αρχιτεκτονικής ειδικού σκοπού δεν επεκτείνονται και δεν τροποποιούνται, τότε η νέα αρχιτεκτονική υπερτερεί σημαντικά.

- η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών είναι εύκολη υπόθεση και περιορίζεται μόνο από τις γνώσεις, τις ικανότητες και την εμπειρία των σχεδιαστών,
- η χρήση του υποδείγματος σχεδιασμού που συνοδεύει το μοντέλο σχεδιασμού και ανάπτυξης της αρχιτεκτονική SensoTube μειώνει δραματικά το χρόνο σχεδιασμού των σχηματικών και των τυπωμένων κυκλωμάτων,
- η μορφή και οι φυσικές διαστάσεις των πλακετών επέκτασης, όπως προτείνονται από το μοντέλο αναφοράς υλοποίησης (βλ. Κεφάλαιο 4, Παράγραφος 4.3), παρέχουν επαρκή χώρο για την στέγαση πολλών και απαιτητικών κυκλωμάτων,
- εξαλείφεται εντελώς η ανάγκη για καλωδιώσεις μεταξύ των πλακετών επέκτασης όπως συνηθίζεται στις περιπτώσεις των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών υλικού ανοικτής πηγής,
- η διαχείριση της ενέργειας επιτρέπεται σε επίπεδο κυκλωμάτων, σε επίπεδο πλακέτας επέκτασης, αλλά και σε επίπεδο συστήματος. Ως εκ τούτου, διασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση και αποτελεσματικότητα στην ενέργεια του ασύρματου κόμβου,
- η προσθήκη πολλών πλακετών επέκτασης με μικροελεγκτή δεν δημιουργεί απολύτως κανένα πρόβλημα, απεναντίας παρέχεται η δυνατότητα για ταυτόχρονη ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού των μικροελεγκτών από ενιαίες πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού,
- η παρεχόμενη αποσύνδεση των κυκλωμάτων προγραμματισμού και εκοφιλμάτωσης των μικροελεγκτών από το υπόλοιπο υλικό του ασύρματου κόμβου αισθητήρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας τάξης μεγέθους σε σχέση με τις υπόλοιπες αρχιτεκτονικές υλικού ανοικτής πηγής. Επί πλέον επιτυγχάνεται η μείωση της πολυπλοκότητας των κυκλωμάτων αλλά και η μείωση του κόστους των πλακετών επέκτασης,

- οι χρήστες δεν χρειάζεται να αλλάξουν τις συνήθειές τους στην ανάπτυξη του ενσωματωμένου λογισμικού των μικροελεγκτών. Π.χ. μπορούν να προγραμματίζουν σε Arduino IDE, ή σε Mbed, αρκεί η πλακέτα επέκτασης να διαθέτει μικροελεγκτή συμβατό με τις λύσεις αυτές,
- ένας κόμβος αρχιτεκτονικής SensoTube, στεγασμένος και στηριγμένος σε πλαστικό σωλήνα, παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στο πεδίο της γεωργίας, π.χ. έχει πολύ μικρό βάρος (τάξεις μεγέθους από λύσεις στις οποίες χρησιμοποιούνται μεταλλικοί ιστοί και πλαστικά κουτιά γενικής χρήσης), έχει πολύ μικρότερο κόστος αγοράς του ιστού στήριξης, δεν απαιτείται πολλή εργασία για τη στερέωση του ιστού στο έδαφος, δεν αποτελεί δέλεαρ για κλοπή, και παρέχει τη μέγιστη ανθεκτικότητα και προστασία έναντι των ακραίων καιρικών συνθηκών,
- η δυνατότητα στέγασης των κεραιών στο περίβλημα του πλαστικού σωλήνα βοηθάει στη χρήση χαμηλού κόστους κεραιών που προορίζονται για εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους,
- στις περιπτώσεις εφαρμογών κατά τις οποίες διαπιστώνεται πως πρέπει να αυξηθεί η χωρητικότητα των συσσωρευτών ενέργειας δε χρειάζεται πλέον η αγορά και τοποθέτηση μεγαλύτερου πλαστικού περιβλήματος στέγασης διότι εντός του πλαστικού σωλήνα υπάρχει πολύς ελεύθερος χώρος,
- επιτρέπεται ο πλουραλισμός στις μεθόδους τροφοδοσίας του ασύρματου κόμβου,
- διευκολύνεται η μείωση κόστους κατά τη φάση της ανάπτυξης. Συγκεκριμένα, λόγω της αρθρωτής (modular) σύνθεσης του συστήματος του ασύρματου κόμβου, ενσωματώνοντας λειτουργίες με τη μορφή έτοιμων δομικών στοιχείων (πλακέτες επέκτασης), μειώνεται ο απαιτούμενος χρόνος στη φάση ανάπτυξης του τελικού συστήματος. Αυτό συνεπάγεται μείωση στο κόστος ανάπτυξης. Επί πλέον, η χρήση ήδη έτοιμων πλακετών επέκτασης επιτρέπει στις ομάδες έρευνας και ανάπτυξης να περιλαμβάνουν μέλη με συγκεκριμένα γνωστικά αντικείμενα. Ως εκ τούτου, οι ομάδες έρευνας και ανάπτυξης

στελεχώνονται με μικρότερο πλήθος ατόμων και η λειτουργία τους κοστίζει λιγότερο.

- διευκολύνεται η μείωση κόστους σε επίπεδο συστήματος. Το κόστος των πιστοποιήσεων και των ελέγχων μοιράζεται στις διάφορες διαφορετικές πλακέτες επέκτασης. Επίσης, η επανασχεδίαση των κυκλωμάτων μιας συγκεκριμένης λειτουργίας περιορίζεται στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη μιας μεμονωμένης πλακέτας επέκτασης κι όχι όλου του συστήματος του κόμβου, και
- διευκολύνεται η μείωση κόστους σε επίπεδο εφαρμογής. Λόγω του σημαντικά μικρότερου βάρους του κόμβου (εξ' αιτίας του πλαστικού περιβλήματος στέγασης και στήριξης) μειώνει το κόστος των μεταφορικών και της εγκατάστασης στο χωράφι. Επί πλέον, η επαναχρησιμοποίηση και η επανατροποποίηση του υλικού του κόμβου που διασφαλίζει η αρχιτεκτονική SensoTube, επιτρέπει τη χρήση του ίδιου εξοπλισμού για πολλές άλλες διαφορετικές εφαρμογές. Ως εκ τούτου, το κόστος της αρχικής επένδυσης δεν χάνεται αλλά και για την υλοποίηση νέων εφαρμογών απαιτείται ελάχιστο ή μηδενικό κόστος για την αγορά νέου υλικού.

Εν κατακλείδι, η νέα αρχιτεκτονική SensoTube για το σχεδιασμό υλικού ασύρματων κόμβων αισθητήρων αποδείχτηκε πως παρέχει όλα τα προσδοκώμενα εκείνα χαρακτηριστικά που ιδανικά θα πρέπει να έχει μια αρχιτεκτονική για το σχεδιασμό υλικού κόμβων ασύρματων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας, δηλαδή:

- συμβατότητα στην επεκτασιμότητα και στα εργαλεία ανάπτυξης (compatibility),
- κλιμάκωση (scalability),
- πολυμορφισμός και ευχρηστία (versatility),
- επανατροποποίηση (reconfiguration),
- επαναχρησιμοποίηση (reusability),
- αποσύνδεση από τη μέριμνα όλων των λειτουργιών (decoupling of concern),

- έμφαση στην εφαρμογή (design focused),
- μηδενική παρέμβαση μεταξύ των λειτουργιών (zero intervention),
- ομοιομορφία (uniformity),
- ενεργειακή απόδοση (energy efficient capable - zero trade-offs), και
- ανθεκτικότητα στο πραγματικό περιβάλλον (robustness).

Ως εκ τούτου η αρχιτεκτονική SensoTube συμβάλλει στο μέγιστο βαθμό στη βελτιστοποίηση της ευρωστίας του υλικού των κόμβων ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων στο πεδίο της γεωργίας.

9.2. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Οι προτάσεις για την περαιτέρω έρευνα περιλαμβάνουν:

- ❖ τη δημιουργία πλαισίου προγραμματισμού (programming framework) στο οποίο όλες οι πιθανές λειτουργίες των πλακετών επέκτασης θα είναι τυποποιημένες και θα παρέχονται σε μορφή έτοιμων βιβλιοθηκών ενσωματωμένου λογισμικού μικροελεγκτών έτσι ώστε ο μικροελεγκτής μιας πλακέτας επέκτασης να γνωρίζει ποιές άλλες πλακέτες επέκτασης λειτουργιών υπάρχουν στον κόμβο και να μπορεί να στείλει και να λάβει πληροφορίες προς/από αυτές δίχως να τον απασχολεί το υλικό της κάθε πλακέτας (hardware agnostic interface approach),
- ❖ τη μελέτη της επίδρασης της τοποθέτησης συσσωρευτών ενέργειας στο εσωτερικό κάτω μέρος των πλαστικών σωλήνων στήριξης. Συγκεκριμένα, να εξεταστεί το εάν η θερμοκρασία στο κάτω μέρος των πλαστικών σωλήνων είναι μικρότερη από την θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός τυπικού πλαστικού κουτιού γενικής χρήσης το οποίο είναι στερεωμένο σε ιστό στήριξης. Οποιαδήποτε μείωση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον λειτουργίας των συσσωρευτών ενέργειας αυξάνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους καθώς και επηρεάζει την απόδοσή τους.
- ❖ τη μελέτη και θέσπιση συγκεκριμένων κριτηρίων αξιολόγησης (metrics) των αρχιτεκτονικών επεκτάσιμου υλικού. Προτείνεται η κατηγοριοποίησή τους σχετικά με τη διαχείριση σημάτων, τη διαχείριση πόρων επικοινωνιών, τη διαχείριση των λειτουργιών προγραμματισμού και εκσφαλμάτωσης, τη δυνατότητα υποστήριξης σύνθεσης συστήματος

με πολλούς μικροελεγκτές, τη διαχείριση ενέργειας, τη φυσική μορφή των πλακετών επέκτασης και τις προβλέψεις για το περίβλημα στέγασης, και το κόστος απόκτησης και διατήρησης,

- ❖ την ενσωμάτωση λειτουργιών δοκιμών και αξιολόγησης σε πραγματικό χρόνο στο πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας για τη δοκιμή διαφόρων κρίσιμων λειτουργιών του ασύρματου κόμβου των οποίων οι δοκιμές μέχρι σήμερα ήταν περιορισμένες μόνο στο εσωτερικό περιβάλλον του εργαστηρίου,
- ❖ την ενσωμάτωση οποιασδήποτε νέας τεχνολογίας στον ασύρματο κόμβο αισθητήρων, και
- ❖ τη μοντελοποίηση του υλικού των πλακετών επέκτασης του ασύρματου κόμβου αισθητήρων και την ανάπτυξη μεσοσμικού (middleware) για τη διασύνδεση του υλικού σε διαδικτυακές εφαρμογές εξυπηρετητών ή νέφους (web-servers, cloud).