



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης και συστήματος  
μετα-επεξεργασίας δεδομένων ανοικτού κώδικα  
για χρήση σε εφαρμογές μικρών  
ανεμογεννητριών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Ανάπτυξη μετρητικής διάταξης και συστήματος  
μετα-επεξεργασίας δεδομένων ανοικτού κώδικα  
για χρήση σε εφαρμογές μικρών  
ανεμογεννητριών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΥ

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29η Ιουλίου 2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

*(Υπογραφή)*

.....

**ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

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

© 2017 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Οικονομόπουλος Δημήτρης, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την υποστήριξη της παρούσας εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τον Αθανάσιο Βασιλάκη και όλα τα παιδιά του εργαστηρίου για την καθοδήγηση και τη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ στον Άρη Σταθάκη για τη βοήθεια και για την προθυμία του να με εισάγει στον κόσμο των νέων τεχνολογιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου για τη στήριξη που μου προσέφεραν απλόχερα όλα αυτά τα χρόνια.





# Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και υλοποίηση ενός μετρητικού συστήματος για εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών και στη συνέχεια το σύστημα παρακολούθησης των μετρούμενων μεγεθών αυτών, απομακρυσμένα. Η υλοποίηση είναι εξ'ολοκλήρου ανοικτού κώδικα με έμφαση στην ευελιξία της εφαρμογής αλλά και στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Το σύστημα που υλοποιήθηκε, μπορεί να χωριστεί σε τρία υποσυστήματα: τη πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος που είναι συνδεδεμένη με την ανεμογεννήτρια και έχει σαν εισόδους τα μεγέθη προς μέτρηση, τον μικροελεγκτή ο οποίος περιλαμβάνει τους αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπείς, μετατρέπει τα σήματα αυτά και κάνει τοπική επεξεργασία και αποθήκευση. Το λογισμικό μεταεπεξεργασίας δεδομένων, περιλαμβάνει τη βάση δεδομένων που αναλαμβάνει την αποθήκευση των μεγεθών αλλά και την επεξεργασία τους και τη προβολή χρήσιμων για τον χρήστη στατιστικών σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 61400-12-1.

Αρχικά, εισάγονται οι βασικές έννοιες και τα χαρακτηριστικά των μικρών ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για τους αισθητήρες και για τους διάφορους τρόπους μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών ενώ ακολουθεί η παρουσίαση βασικών εννοιών γύρω από τους μικροεπεξεργαστές και τους μικροελεγκτές. Γίνεται επίσης ανάλυση της μετατροπής του σήματος από αναλογική σε ψηφιακή μορφή.

Έπειτα, παρουσιάζονται τα πρότυπα IEC τα οποία υπέδειξαν τις προδιαγραφές της παρουσίασης και επεξεργασίας των μετρούμενων μεγεθών. Τα προγραμματιστικά εργαλεία που καθίστησαν δυνατή αυτή την επεξεργασία αναλύονται στη συνέχεια.

Τέλος, γίνεται εμφανής η τελική επιλογή στοιχείων όσον αφορά το υλικό αλλά και η τελική διαμόρφωση του μικροελεγκτή ώστε να ικανοποιεί την εφαρμογή μας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

## Λέξεις Κλειδιά

καταγραφέας, σύστημα συλλογής δεδομένων, αισθητήρες, οργανολογία, μικρές ανεμογεννήτριες, μικροελεγκτές, μικροί υπολογιστές, ανοικτός κώδικας, εφαρμογές χαμηλού κόστους, ακρίβεια, STMicroelectronics, μέτρηση ενέργειας, χαμπύλη ισχύος, πρωτόκολλα επικοινωνίας, βάσεις δεδομένων, πρότυπα IEC, περιβάλλον ιστού, Python.



# Abstract

The purpose of this diploma thesis is to develop and implement a measurement system for small wind turbines applications and in advance the monitoring system of the measurements, remotely. The implementation is entirely based on the open source philosophy with emphasis on the flexibility of the applications as well as the minimization of the cost.

The system can be divided in three subsystems: The printed circuit board (PCB) which is connected to the wind turbine and its inputs are the desirable measurands, the microcontroller which consists of the analog to digital converters and feeds the converted signals to the postprocessing software module. This includes the database that stores the measurements and the software written in Python that processes the measurements and gives the user useful statistical analysis tools compliant with the IEC 61400-12-1 international standards.

Initially, the basic concept and the small wind turbines characteristics are introduced as well as the reasons this application was implemented. Subsequently, sensors and the various ways of measuring electric signals are referred while the presentation of basic concepts concerning microprocessors and microcontrollers follows. An analysis also takes place regarding the analog to digital conversion.

Then, the IEC standards -that suggest the specifications of the data acquisition system and the processing of the measurands- are presented. This processing was implemented in Python and with the assistance of other programming tools which are analyzed afterwards

Finally, the final choice of hardware elements becomes clear as well as the final configuration of the microcontroller in a way that it satisfies the need of the application in the best possible way.

## Keywords

datalogger, data acquisition system, sensors, instrumentation, small wind turbines, microcontrollers, mini computers, open source, low cost, accuracy, STMicroelectronics, energy metering, power curve, communication protocols, databases, IEC standards, Web interface, Python.



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	12
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>13</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	14
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά ανέμου	14
1.2.1 Κατανομή ανέμου	14
1.2.2 Η τύρβη στον άνεμο (turbulence intensity)	15
1.3 Βασικά μεγέθη ανεμογεννήτριας	16
1.3.1 Ισχύς εξόδου	17
1.3.2 Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας	17
1.3.3 Καμπύλη ισχύος	17
1.3.4 Ετήσια ενεργειακή παραγωγή (ΑΕΠ)	19
1.4 Τύποι ελέγχου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών	19
1.5 Μικρές ανεμογεννήτριες	20
1.6 Οργάνωση του τόμου	21
<b>2 Αισθητήρες και μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών</b>	<b>23</b>
2.1 Κατηγοριοποίηση των αισθητήρων	24
2.2 Χαρακτηριστικά αισθητήρων	25
2.2.1 Σχέση εισόδου/εξόδου	25
2.2.2 Σφάλμα γραμμικότητας	26
2.2.3 Ολίσθηση	27
2.2.4 Βαθμονόμηση	27
2.2.5 Υστέρηση	28
2.2.6 Κορεσμός	28

2.3	Μέτρηση ρεύματος . . . . .	28
2.3.1	Μέτρηση ρεύματος με αντιστάσεις . . . . .	30
2.3.2	Μέτρηση ρεύματος με το μαγνητικό πεδίο . . . . .	30
2.4	Μέτρηση τάσης . . . . .	35
2.4.1	Απευθείας σύνδεση . . . . .	36
2.4.2	Διαιρέτης τάσης . . . . .	36
2.4.3	Hall effect μετατροπείς τάσης . . . . .	37
2.4.4	Ενισχυτές . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Μικρουπολογιστές και μικροελεγκτές</b>	<b>41</b>
3.1	Ενσωματωμένα συστήματα . . . . .	41
3.2	Μικροεπεξεργαστής . . . . .	41
3.3	Μνήμη . . . . .	43
3.4	Απευθείας Προσπέλαση Μνήμης (DMA) . . . . .	44
3.5	Περιφερειακές συσκευές . . . . .	44
3.6	Διεπαφή χρήστη . . . . .	45
3.7	Οι επεξεργαστές ARM . . . . .	45
3.7.1	Αρχιτεκτονική RISC . . . . .	45
3.7.2	Αρχιτεκτονική ARM . . . . .	46
3.8	Πρωτόκολλα επικοινωνίας . . . . .	46
3.8.1	TCP/IP . . . . .	46
3.8.2	MQTT . . . . .	47
3.9	Μικροελεγκτές και λογισμικό . . . . .	48
3.9.1	IDE . . . . .	49
3.9.2	STMCube . . . . .	49
3.9.3	RTOS . . . . .	50
3.10	Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό . . . . .	50
3.10.1	Δειγματοληψία . . . . .	51
3.10.2	Κυκλώματα Sample-and-Hold . . . . .	52
3.10.3	Κβαντοποίηση . . . . .	52
3.10.4	Αρχιτεκτονικές μετατροπέων . . . . .	53
3.10.5	Τρόποι χρησιμοποίησης των ADCs . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Επεξεργασία και παρουσίαση των μετρήσεων</b>	<b>59</b>
4.1	Βασική επεξεργασία . . . . .	59
4.2	Κανονικοποίηση δεδομένων . . . . .	60
4.3	Προσδιορισμός της καμπύλης ισχύος . . . . .	61
4.4	Ετήσια ενεργειακή παραγωγή (AEP) . . . . .	61
4.5	Συντελεστής ισχύος . . . . .	62
4.6	Προσδιορισμός αβεβαιοτήτων . . . . .	63
4.6.1	Αβεβαιότητες κατηγορίας A . . . . .	63

4.6.2	Αβεβαιότητες κατηγορίας B	63
4.7	Αποκλίσεις από τα πρότυπα	66
<b>5</b>	<b>Προγραμματιστικά εργαλεία</b>	<b>69</b>
5.1	Περιγραφή των βασικών γλωσσών προγραμματισμού	69
5.1.1	Python	69
5.1.2	HTML, Javascript και CSS	70
5.2	Στοιχειώδη προγραμματιστικά εργαλεία	71
5.2.1	Flask	71
5.2.2	Bootstrap	72
5.3	Γραφήματα	72
5.3.1	Matplotlib	73
5.3.2	Mpld3	73
5.3.3	Bokeh	74
5.4	Βάση δεδομένων	74
5.4.1	SQL βάσεις δεδομένων	75
5.4.2	NoSQL βάσεις δεδομένων	75
5.4.3	SQL ή NoSQL;	75
5.5	Παρουσίαση γραφικού περιβάλλοντος ιστού	75
5.5.1	Προβολή μετρήσεων	77
5.5.2	Γραφήματα	80
5.5.3	Γραφικοποίηση μετρήσεων	80
5.5.4	Λοιπές πληροφορίες και δυνατότητες	85
<b>6</b>	<b>Καταγραφέας δεδομένων ανοικτού κώδικα και επιλογή υλικού</b>	<b>89</b>
6.1	Επισκόπηση του datalogger	89
6.2	Περιγραφή του συστήματος συλλογής δεδομένων	90
6.3	Μετρητική μονάδα ηλεκτρικών μεγεθών	92
6.3.1	Γαλβανική απομόνωση	92
6.3.2	Μέτρηση εναλλασσομένου ρεύματος	94
6.3.3	Μέτρηση τάσης	95
6.3.4	Μέτρηση συνεχούς ρεύματος	96
6.3.5	Λογισμικό σχεδίασης πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος	96
6.4	Μικροελεγκτής	97
6.5	Λογισμικό	102
<b>7</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>103</b>
7.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	103
7.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	104
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>105</b>





# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Μορφή της κατανομής Reyleigh για διάφορες τιμές της παραμέτρου κλίμακας $c$	16
1.2	Καμπύλες ισχύος για A/Γ με παθητικό έλεγχο και με έλεγχο του βήματος του πτερυγίου αντίστοιχα . . . . .	18
2.1	Μοντέλο αισθητήρα . . . . .	23
2.2	Μη γραμμική ενίσχυση συνεπάγεται ανεπιθύμητες διαταραχές στην έξοδο . . . .	26
2.3	Καμπύλη βαθμονόμησης του αισθητήρα . . . . .	27
2.4	Σχέση μεταξύ εισόδου-εξόδου με εμφανές το φαινόμενο της υστέρησης . . . . .	29
2.5	Μέτρηση του ρεύματος με τη μέθοδο των shunt αντιστάσεων . . . . .	31
2.6	Ένταση του μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στο ρεύμα που διαπερνά έναν αγωγό . . . . .	32
2.7	Επεξήγηση λειτουργίας μετασχηματιστή ρεύματος . . . . .	33
2.8	Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρεύματος . . . . .	33
2.9	Πηνίο Rogowski και το κύκλωμα ολοκληρωτή υπεύθυνο για την κατασκευή της τάσης $V_{out}$ . . . . .	34
2.10	Φαινόμενο Hall χωρίς και με την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα . . . . .	35
2.11	Ο διαιρέτης τάσης . . . . .	36
2.12	Λειτουργία ενός Hall μετατροπέα τάσης . . . . .	37
2.13	Τελεστικός ενισχυτής . . . . .	38
2.14	Διαφορικός ενισχυτής . . . . .	38
3.1	Ο μικροελεγκτής STM32F4-Discovery της STMicroelectronics . . . . .	42
3.2	Τρόπος λειτουργίας του πρωτοκόλλου TCP/IP . . . . .	47
3.3	Στην μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, συνδέεται ο αναλογικός κόσμος και οι φυσικές ποσότητες με τον ψηφιακό κόσμο των αριθμών και των bits . . . . .	51
3.4	Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό στρογγυλοποιεί το πλάτος του συνεχούς σήματος στη πλησιέστερη τιμή της κλίμακας διακριτού πλάτους . . . .	53
3.5	Ο full-flash μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό . . . . .	54
3.6	Ο SAR μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό . . . . .	54
5.1	Αρχική σελίδα της εφαρμογής . . . . .	77
5.2	Κύρια σελίδα της εφαρμογής που δίνει πρόσβαση στις υπηρεσίες . . . . .	78

5.3	Modal που εμφανίζεται με το πάτημα του Display Measurements . . . . .	78
5.4	Προβολή μετρήσεων . . . . .	79
5.5	Στατιστική ανάλυση των δεδομένων που ζητήθηκαν . . . . .	79
5.6	Γραφική αναπαράσταση της καμπύλης ισχύος . . . . .	81
5.7	Καμπύλη ισχύος και διάφορα μεγέθη σε μορφή πίνακα . . . . .	81
5.8	Καμπύλη ταχύτητας ανέμου-αεροδυναμικού συντελεστή . . . . .	82
5.9	Πίνακας της ετήσιας παραγωγής ενέργειας για ετήσιες μέσες ταχύτητες ανέμου από 4 έως 11 m/s κατανομής Reyleigh . . . . .	82
5.10	Διάγραμμα διασποράς στατιστικών μεγεθών της ισχύος εξόδου . . . . .	83
5.11	Διάγραμμα διασποράς της έντασης της τύρβης συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου . . . . .	83
5.12	Διάγραμμα διασποράς της έντασης της τύρβης συναρτήσει της διεύθυνσης του ανέμου . . . . .	84
5.13	Διάγραμμα διασποράς της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει της διεύθυνσης του . . . . .	84
5.14	Επιλογές για την εξαγωγή του γραφήματος . . . . .	85
5.15	Γράφημα τάσης και ρεύματος εξόδου συναρτήσει του χρόνου . . . . .	86
5.16	Δυαδικό γράφημα ύπαρξης μετρήσεων στη βάση δεδομένων . . . . .	87
6.1	Σχεδίαση του συστήματος συλλογής δεδομένων στα επιμέρους του στοιχεία . . . . .	91
6.2	Τρόπος λειτουργίας του datalogger . . . . .	92
6.3	Το schematic του PCB . . . . .	93
6.4	Η τρισδιάστατη προβολή της πλακέτας όπως φαίνεται από το πρόγραμμα Kicad . . . . .	94
6.5	Ο μετασχηματιστής ρεύματος AC-1020 . . . . .	95
6.6	Συσχέτιση των στοιχείων με τα ίχνη τους με χρήση του εργαλείου Cnrcb του KiCad . . . . .	98
6.7	Η ολοκληρωμένη έκδοση της πλακέτας όπως φαίνεται από το εργαλείο Pcbnew του KiCad . . . . .	98
6.8	Η αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-144 με STM32F429ZI MCU . . . . .	99
6.9	Η διαμόρφωση των pins του επεξεργαστή του μικροελεγκτή . . . . .	100
6.10	Η διαμόρφωση των ρολογιών του μικροελεγκτή . . . . .	101
6.11	Δακτύλιος που δείχνει εννοιολογικά τη δομή ενός ring buffer . . . . .	102

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Κοιτάζοντας πίσω στον χρόνο, από τις απαρχές της έναρξης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και πριν από λίγα χρόνια, βλέπουμε πως το έργο αυτό το αναλάμβαναν οι λεγόμενες συμβατικές μονάδες παραγωγής. Μιλάμε για μονάδες παραγωγής οι οποίες στηρίζονται στην καύση των φυσικών, ορυκτών πόρων της Γης όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας, ο λιγνίτης και το φυσικό αέριο. Προέρχονται από την αποσύνθεση ζωικής ή φυτικής ύλης και για τον σχηματισμό τους χρειάστηκαν εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Επειδή η εξάρτηση της ανθρωπότητας από αυτά είναι ακόμη τεράστια, αν εξαντληθούν τα κοιτάσματά τους, η ανθρωπότητα θα βρεθεί σε δύσκολη θέση γιατί το μεγαλύτερο μέρος της σημερινής κατανάλωσης ενέργειας προέρχεται από αυτά, και συνεπώς θα πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί με την χρήση τους άλλα παράλληλα να φροντίσουμε για την αντικατάστασή τους από άλλες ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης, η καύση των ορυκτών καυσίμων προκαλεί έντονα περιβαλλοντικά προβλήματα αέριας κυρίως ρύπανσης ενώ το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα είναι «υπεύθυνο» για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεχίζει να συμβάλει σε αυτό, παρά το ότι αναπτύσσονται τεχνολογίες καύσης, πιο αποδοτικές, με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ βελτιώνονται και οι τεχνολογίες καθαρισμού των καυσαερίων. Συνεπώς, για τα ανθρώπινα μέτρα, αυτοί οι πόροι ενέργειας είναι εξ ορισμού μη ανανεώσιμοι και η χρήση τους εγείρει σημαντικά ζητήματα όσον αφορά την αειφόρο ανάπτυξη.

Φαίνεται λοιπόν, πως πρέπει να γίνει λόγος για την σταδιακή και τελικά ολοκληρωτική αντικατάστασή τους από ανανεώσιμους πόρους και εν συνεχεία, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να αναληφθεί από τις λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η βάση για την άποψη αυτή τίθεται αν εξετάσει κανείς την αφθονία ενέργειας που μας παρέχει η φύση. Ο ήλιος, ο άνεμος, η ενέργεια των κυμάτων είναι λίγες από τις φυσικές πηγές. Το έργο που πρέπει να επιτελέσει ο άνθρωπος λοιπόν είναι να βρει τους τρόπους και να κατασκευάσει τα εργαλεία για να καταστήσει δυνατή την εκμετάλλευση των και τη μετατροπή τους σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Αυτή τη στιγμή, έχει καταφέρει να εκμεταλλευτεί αρκετές εξ'αυτών όπως την αιολική, την ηλιακή, τη γεωθερμία, την υδατόπτωση που την εκμεταλλεύεται με τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, την κυματική, τη βιομάζα αλλά και τη χημική ενέργεια του υδρογόνου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από διατάξεις που ονομάζονται κυψέλες καυσίμου ή υδρογόνου.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αιολική ενέργεια και οι μηχανές που πραγματοποιούν την εν λόγω μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, οι επονομαζόμενες Ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Οι τελευταίες μαζί με τα φωτοβολταϊκά και τα υδροηλεκτρικά αποτελούν τις περισσότερες και τις πιο διαδεδομένες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε παγκόσμιο επίπεδο.

Συγκεκριμένα μελετάται και κατασκευάζεται ένα υποσύστημα αυτών, το μετρητικό σύστημα των ανεμογεννητριών. Το σύστημα εκείνο που θα καταστήσει δυνατή την παρακολούθηση και τη μέτρηση των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών της ανεμογεννήτριας, την επεξεργασία τους ώστε να παρουσιάζονται διαμορφωμένα σε μορφή χρήσιμη για τον άνθρωπο και την επικοινωνία του ανθρώπου απομακρυσμένα με το μετρητικό σύστημα.

## Αντικείμενο της διπλωματικής

Σκοπός της εργασίας ήταν η σχεδίαση και η κατασκευή ενός καταγραφέα ανοιχτού κώδικα, χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας για την μέτρηση και καταγραφή δεδομένων σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών.

Η φιλοσοφία του ανοιχτού κώδικα (open source) προωθεί την ιδέα της καθολικής πρόσβασης μέσω ελεύθερων αδειών στο σχέδιο ενός προϊόντος, καθώς και στην καθολική αναδιανομή του εν λόγω σχεδίου, συμπεριλαμβανομένων και των μεταγενέστερων βελτιώσεων για συγκεκριμένες άδειες. Η φιλοσοφία αυτή ενισχύει την δημιουργία ανοιχτών κοινοτήτων δημιουργίας και μοιράσματος της γνώσης ελεύθερα.

Η επιλογή δημιουργίας ενός καταγραφέα ανοιχτού κώδικα έγινε ως συνέχεια της λογικής κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών. Επίσης, η δημιουργία ενός project ανοιχτού κώδικα δημιουργεί τις βάσεις της συνεργασίας, ενώ αυξάνει και την λειτουργικότητα ενός προϊόντος καθώς τα σχέδια του είναι ανοιχτά σε όλους για βελτιώσεις.

Η σχεδίαση έγινε με βάση έναν μικροελεγκτή της STMicroelectronics. Επιλέχθηκε υλικό και αισθητήρες για τη μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών όπως οι εναλλασσόμενες τάσεις και ρεύματα, η DC τάση και ρεύμα των μπαταριών καθώς και τα μετεωρολογικά μεγέθη. Τα μεγέθη αυτά, σαν έξοδοι από την πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος, εισέρχονται σαν εισόδοι στον μικροελεγκτή και συγκεκριμένα στους ενσωματωμένους αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπείς, όπου στην συνέχεια αποστέλλονται στη βάση δεδομένων και στο λογισμικό μεταεπεξεργασίας δεδομένων. Στη συνέχεια, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα περιβάλλον ιστού όπου του τίθονται διαθέσιμα όλα τα στατιστικά μεγέθη που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων σύμφωνα με τα IEC πρότυπα.

## Βασικά χαρακτηριστικά ανέμου

### Κατανομή ανέμου

Ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη όσον αφορά την εξέταση μιας περιοχής για την ένταξη ανεμογεννητριών σε αυτή, είναι τα στατιστικά μεγέθη της ταχύτητας του ανέμου. Μας

ενδιαφέρει η μέση ταχύτητά του αλλά και το πόσο συχνά εμφανίζεται αυτή καθώς και η διασπορά της ταχύτητας γύρω από αυτή. Η σημασία της γνώσης αυτής, έγκειται στο γεγονός ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μέσης ταχύτητας του ανέμου καθορίζουν την ενεργειακή απόδοση των ανεμογεννητριών. Είναι προφανές ότι, αφού η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή, θα μεταβάλλεται και η μηχανική ισχύς στη γεννήτρια και άρα η ισχύς που αυτή παράγει [12].

Εξαιτίας των ελλιπών ιστορικών δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου στις περισσότερες περιοχές, χρησιμοποιείται η μαθηματική συνάρτηση Weibull, για να χαρακτηρίσει το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής, η οποία προσεγγίζει σε πολύ καλό βαθμό την κατανομή του ανέμου. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται από την παράμετρο κλίμακας  $c$ , η οποία καθορίζει την μέση ταχύτητα ανέμου και μετράται σε m/s και την παράμετρο μορφής  $k$  που συνήθως παίρνει τιμές από 1,5 έως 2,5. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull περιγράφεται με τον εξής τύπο:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1.1)$$

όπου:

- $k$  είναι η παράμετρος μορφής
- $c$  είναι η παράμετρος κλίμακας

Εξ ορισμού, η τιμή  $h(v)$  ισούται με τη πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ  $v$  και  $v+dv$ , οπότε:

$$\int_0^{\infty} h(v)dv = 1 \quad (1.2)$$

Τέλος, η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου διαστήματος τιμών υπολογίζεται από την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

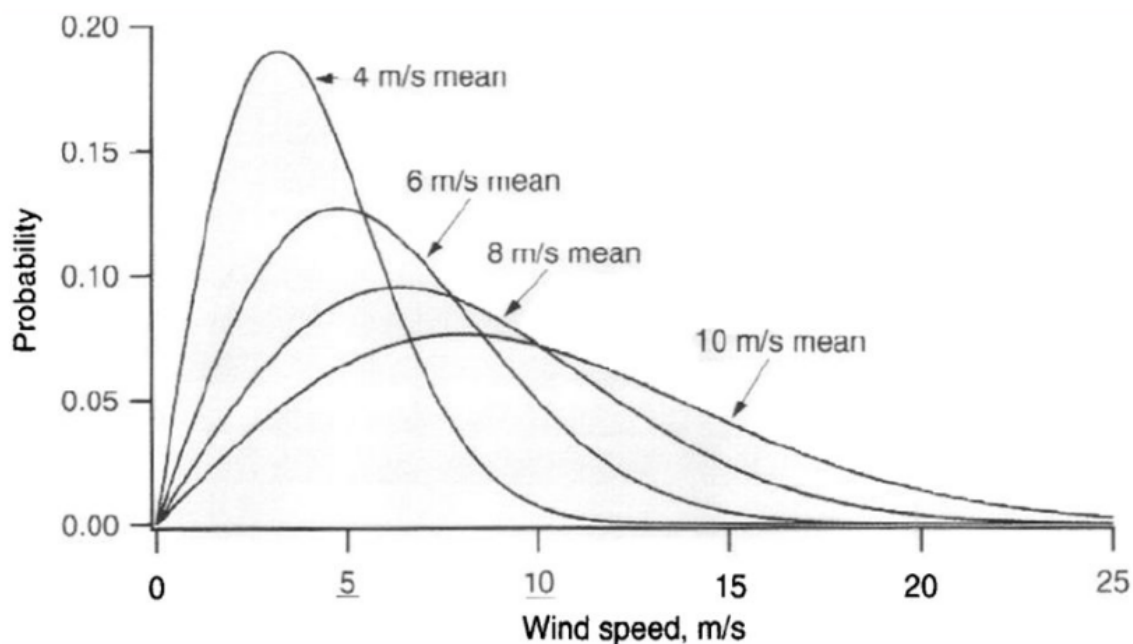
$$H(v) = p(v \leq V) = \int_0^V h(v)dv \quad (1.3)$$

Η μορφή της συνάρτησης  $h(v)$  καθορίζεται από τη τιμή της παραμέτρου μορφής,  $k$ . Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1,5 και 2,0. Συχνά (όταν είναι γνωστή μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου) και επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της παραμέτρου μορφής, λαμβάνεται η τιμή  $k=2$ , που τότε η κατανομή Weibull ονομάζεται κατανομή Rayleigh με τύπο:

$$h(v) = \frac{2}{c^2} v e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1.4)$$

## Η τύρβη στον άνεμο (turbulence intensity)

Η τύρβη μπορεί να χαρακτηριστεί ως οι διακυμάνσεις στη ροή του ανέμου. Μια σταθερή ροή ανέμου θα έχει χαμηλή τύρβη ενώ μια ασταθής ροή ανέμου, υψηλή. Αλλά δεν έχει νόημα να μιλάμε για «χαμηλή» και «υψηλή» τύρβη, όταν δεν έχουμε ορίσει κάποια ενιαία μονάδα μέτρησης γι'αυτή. Αυτή η μονάδα μέτρησης είναι η ένταση της τύρβης.



Σχήμα 1.1: Μορφή της κατανομής Reyleigh για διάφορες τιμές της παραμέτρου κλίμακας  $c$

Η ένταση της τύρβης, είναι μια κλίμακα που χαρακτηρίζει τη τύρβη σαν ποσοστό. Μια ιδανική ροή ανέμου χωρίς διακυμάνσεις στην ταχύτητα ή στη διεύθυνση του, θα είχε τιμή έντασης της τύρβης ίση με 0%. Αυτή η ιδανική περίπτωση όμως ποτέ δεν συναντάται στη Γη, καθώς είναι και πιθανές τιμές μεγαλύτερες από το 100%. Αυτό για παράδειγμα μπορεί να συμβεί όταν έχουμε πολύ χαμηλή μέση ταχύτητα αλλά μεγάλες διακυμάνσεις [8].

Η ένταση της τύρβης, ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T.I = \frac{u'}{U} \quad (1.5)$$

όπου:

$u'$  είναι η τυπική απόκλιση του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

$U$  είναι η μέση ταχύτητα στην ίδια τοποθεσία για την ίδια χρονική περίοδο.

Η μέτρηση της έντασης της τύρβης είναι σημαντική καθώς μπορεί να επηρεάσει την αιολική ενέργεια με αρκετούς τρόπους και συγκεκριμένα να έχει επιδράσεις στην απόδοση της ισχύος, στα φορτία της γεννήτριας, στην κόπωση των μηχανικών μερών αλλά και στην διάδοση του θόρυβου. Η γνώση της λοιπόν, μας βοηθάει να προβλέψουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την ενεργειακή παραγωγή.

## Βασικά μεγέθη ανεμογεννήτριας

Ο βασικός σκοπός μιας ανεμογεννήτριας είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν, να αναλυθούν τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής καθώς και η ποσότητα αυτής συναρτήσει χαρακτηριστικών του ανέμου.

## Ισχύς εξόδου

Η χαρακτηριστική εξίσωση της παραγόμενης ισχύος είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \quad (1.6)$$

όπου:

- $P$  είναι η παραγόμενη ισχύς
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του ανέμου (στους 20°C είναι περίπου ίση με  $1.2 \text{ kg/m}^3$ )
- $A$  είναι το εμβαδό σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με  $A = \pi R^2$  όπου  $R$  είναι το μήκος της πτερωτής
- $U_0$  είναι το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου

Βλέπουμε λοιπόν, πως τα χαρακτηριστικά του ανέμου από τα οποία εξαρτάται η εξαγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι η πυκνότητα του και ο κυβος της ταχύτητας του.

Πρέπει να τονιστεί πάντως, πως πρακτικά ποτέ δεν λαμβάνουμε όλη αυτήν την ενέργεια από τον άνεμο γιατί, για να ήταν αυτό εφικτό θα έπρεπε ο άνεμος να έχανε όλη αυτήν την ενέργεια, στην ουσία δηλαδή να «ακινητοποιούταν». Επίσης, αυτή η εξίσωση δεν λαμβάνει υπ' όψην την ύπαρξη των πτερυγίων αλλά μόνο την περιοχή που σαρώνουν αυτά. Αν συμπεριλάβουμε και τις απώλειες της γεννήτριας, του όλου συστήματος οδήγησης και των αεροδυναμικών απωλειών, υπολογίζεται πως η ενέργεια που πρακτικά μετατρέπεται σε αιολική, είναι περίπου το 40% αυτής που δίνεται από την εξίσωση (1.6)

## Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας

Ο συντελεστής ισχύος ( $C_p$ ) είναι ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη της ανεμογεννήτριας. Ορίζεται ως εξής:

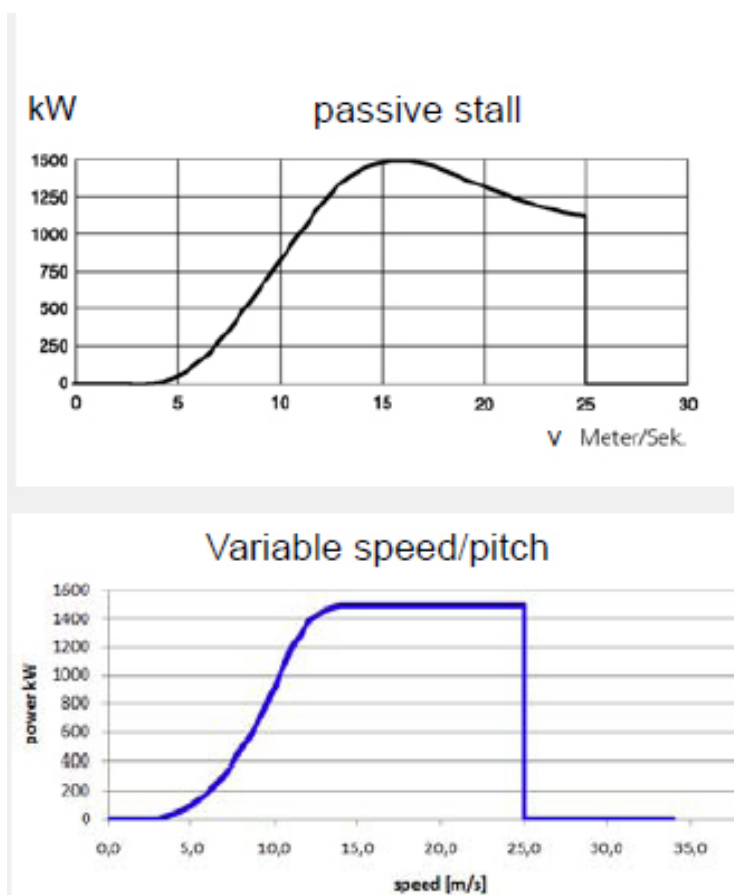
$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2} \rho A U_0^3} \quad (1.7)$$

στην ουσία ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ισχύος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια προς την ισχύ του ανέμου που εισέρχεται σε αυτήν. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως πρόκειται για ένα βασικό μέγεθος το οποίο μας προσδιορίζει το μέρος της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια.

## Καμπύλη ισχύος

Η καμπύλη ισχύος είναι ίσως το πιο πρακτικό και χρήσιμο εργαλείο μιας ανεμογεννήτριας. Είναι αυτό που ενδιαφέρει πιο πολύ τον ιδιοκτήτη και αυτό γιατί εκφράζει την εξαγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου. Προκύπτει από τον κατασκευαστή ύστερα από δοκιμές της ανεμογεννήτριας για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα τέτοιο ώστε να περιλαμβάνει ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου και το οποίο ορίζεται καλύτερα σε επόμενο κεφάλαιο. Στην ουσία δηλαδή, δίνει τη πληροφορία για το πόση ισχύ να αναμένει ο ιδιοκτήτης ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου στην περιοχή του. Οπότε, μια σύνηθης πρακτική είναι πριν την απόκτηση της ανεμογεννήτριας, να προηγείται μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου με ένα

ανεμόμετρο στην περιοχή ενδιαφέροντος τοποθέτησής της ώστε να εκτιμηθεί και η αναμενόμενη παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 1.2: Καμπύλες ισχύος για Α/Γ με παθητικό έλεγχο και με έλεγχο του βήματος του πτερυγίου αντίστοιχα

Από την εικόνα 1.2 φαίνονται τα εξής:

- Η ανεμογεννήτρια, ξεκινάει να παράγει ισχύ από μια ταχύτητα ανέμου και έπειτα, γνωστή και ως ταχύτητα ένταξης (cut in)
- Μέχρι και την ονομαστική ταχύτητα ανέμου στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας, η ισχύς εξόδου αυξάνεται ραγδαία ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας ανέμου όπως φαίνεται από την εξίσωση (1.6)
- Στη συνέχεια παραμένει σταθερή ή μειώνεται σταδιακά (ανάλογα με τον έλεγχο) μέχρι μια ορισμένη ταχύτητα ανέμου η οποία ονομάζεται ταχύτητα αποκοπής (cut out)
- Ύστερα από την ταχύτητα αποκοπής, η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας κατά κύριο λόγο για να αποφευχθούν καταπονήσεις στα μηχανικά της μέρη λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτά στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου αλλά και για να



αποφευχθεί η εξαγωγή μεγαλύτερης ισχύος από αυτή που μπορεί να χειριστεί η γεννήτρια.

### Ετήσια ενεργειακή παραγωγή (ΑΕΠ)

Το μέγεθος εκείνο που ενδιαφέρει σε τελική ανάλυση τον άνθρωπο όταν γίνεται λόγος για μια ανεμογεννήτρια είναι το ποση ενέργεια παράγει. Η ενέργεια αυτή δεν θα πρέπει να συγχέεται με την έννοια της ονομαστικής ισχύος εξόδου. Η ονομαστική ισχύς επιτυγχάνεται μόνο στις ονομαστικές τιμές ανέμου οι οποίες λαμβάνουν μέρος σποραδικά. Η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται από τη μέση ισχύ και όχι την ονομαστική. Η μέση ισχύς εξαρτάται προφανώς από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και από τη μέση ταχύτητα ανέμου στον τόπο τοποθέτησης της.

Συνοπτικά, η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (ΑΕΡ) ορίζεται ως η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί θεωρητικά για την κατανομή ανέμου μιας περιοχής και για μια συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας. Είναι δυνατόν να υπολογισθεί και πριν την εγκατάσταση αυτής, γνωρίζοντας μόνο την καμπύλη ισχύος της απο τον κατασκευαστή και έχοντας πάρει μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου στον χώρο ενδιαφέροντος. Με μεγαλύτερη ακρίβεια, ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει ύστερα από την τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας, έχοντας πάρει μετρήσεις της ισχύος εξόδου της και έχοντας συνθέσει τη πραγματική καμπύλη ισχύος. Η διαφορά της πραγματικής καμπύλης ισχύος με αυτής παρεχόμενη από τον κατασκευαστή είναι ότι συχνά οι τελευταίες είναι ιδανικότερες και εξιδανικευμένες σε σχέση με τη πραγματική συμπεριφορά της.

Σε γενικές γραμμές, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E = 8760 \sum_{V_{cutin}}^{V_{cutout}} P_0(v_w)H(v_w) \quad (1.8)$$

όπου:

$E$	είναι η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή
$h = 8760$	είναι οι ώρες ενός έτους
$P_0$	είναι η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Α/Γ
$H$	είναι η διακριτή ή συνεχή κατανομή του ανέμου

### Τύποι ελέγχου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών

Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια με τα οποία γίνεται ο χωρισμός των ανεμογεννητριών έχει να κάνει με τον τύπο ελέγχου των πτερυγίων. Αυτός αναλαμβάνει δράση για περιπτώσεις όπου η ταχύτητα ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική. Σε αυτές τις περιπτώσεις, για λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω και επιπροσθέτω γιατί γενικά μεγέθη μεγαλύτερα των ονομαστικών εγκυμονούν κινδύνους (π.χ. μεγαλύτερες τιμές ρεύματος διαπερνούν τα τυλίγματα με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση τους), καθίσταται αναγκαίος ο έλεγχος της.

Σε περιπτώσεις λοιπόν μεγάλων και ακριβών εφαρμογών (συνήθως για ανεμογεννήτριες παραγωγής αρκετών MW), υλοποιείται ο λεγόμενος έλεγχος του βήματος πτερυγίου (*pitch control*). Το χαρακτηριστικό των πτερυγίων με αυτό το σύστημα είναι η δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα τους. Έτσι, είναι δυνατός ο έλεγχος της γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά προέκταση της απορριφθείσας αεροδυναμικής ισχύς από τον δρομέα. Το σύστημα ελέγχου του βήματος πτερυγίου, προσαρμόζει την γωνία των πτερυγίων ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Σε ταχύτητες μικρότερες ή ίσες της ονομαστικής, η γωνία των πτερυγίων ισούται με μηδέν, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη απόδοση της ανεμογεννήτριας. Όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, το σύστημα αλλάζει τη γωνία των πτερυγίων αυτόματα, ώστε να περιορίσει τις στροφές τους και να αποτρέψει τυχόν σφάλματα όπως προειπώθηκε.

Έτσι, για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, το σύστημα ελέγχου προσαρμόζει τη γωνία των πτερυγίων ώστε να διατηρήσει την ταχύτητα περιστροφής τους ανάλογα με αυτήν που θα είχαν σε ονομαστικές ταχύτητες ανέμου και άρα η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας παραμένει σταθερή, πράγμα που είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου. Στα μειονεκτήματα, συγκαταλέγονται η πολυπλοκότητα αυτού του συστήματος αυτομάτου ελέγχου και συνεπώς το κόστος, καθώς και η ανάγκη για συντήρηση επιπρόσθετων μηχανικών μερών στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, συνηθίζεται να συναντάται σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

Επειδή όμως αυτό είναι ασύμφορο σε εφαρμογές μικρού κόστους, όπως είναι οι μικρές ανεμογεννήτριες στις οποίες θα αναφερθούμε στη συνέχεια, συναντώνται πιο «απλά» συστήματα ελέγχου. Μια τέτοια τεχνική η οποία συγκαταλέγεται στην κατηγορία *ελέγχου παθητικής απώλειας στήριξης* (*passive stall control*), είναι το λεγόμενο *furling* στο οποίο, ο περιορισμός της ισχύος επιτυγχάνεται μέσω αλλαγής της γωνίας πρόσπτωσης της κατεύθυνσης του ανέμου προς τη φτερωτή, πράγμα που βασίζεται στην ουρά που διαθέτουν αυτού του τύπου οι ανεμογεννήτριες. Ουσιαστικά λοιπόν, απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου κατά μια γωνία, η οποία ονομάζεται γωνία yaw. Το σύστημα *furling* είναι αυτό που συναντάται κατά βάση στις μικρές ανεμογεννήτριες.

## Μικρές ανεμογεννήτριες

Το μετρητικό σύστημα κατασκευάζεται για χρήση σε μικρές ανεμογεννήτριες αλλά με ελάχιστες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιονδήποτε τύπο ανεμογεννήτριας. Τι εννοούμε όμως με τον όρο «μικρή» ανεμογεννήτρια; Εννοούμε εκείνες που χρησιμοποιούνται για κλίμακα πιο ειδικής και όχι μαζικής κατανάλωσης. Χρησιμοποιούνται για «μικροπαραγωγή» σε αντίθεση με τις πλήρους κλίμακας ανεμογεννήτριες οι οποίες συναντώνται σε αιολικά πάρκα με πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες παραγωγής ισχύος και συνδεδεμένες στο δίκτυο τροφοδοτούν με ισχύ έναν ευρύ πληθυσμό παράγοντας αρκετά MW. Παρόλα αυτά, η μεγάλης κλίμακας συγκεντρωτική παραγωγή δεν εξυπηρετεί πάντα τις ανάγκες της τοπικής κοινωνίας. Πολλές φορές έχουν υπάρξει αντιδράσεις που αφορούν περιβαλλοντικές συνέπειες των μεγάλων σταθμών παραγωγής όσο και τον τρόπο διαχείρισής τους. Γι αυτό αντιπροτείνεται η λύση των μικρών πηγών παραγωγής ενέργειας.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες, παράγουν από 1kW έως και 400kW ισχύ. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τροφοδοσία μιας φάρμας, ενός σπιτιού, μιας γειτονιάς ή αθροίζοντας τες, ενός χωριού. Η σύνδεση τους γίνεται είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε, σε περιπτώσεις που η σύνδεση στο δίκτυο είναι αδύνατη, αυτόνομα. Χαρακτηριστικό των μικρών ανεμογεννητριών είναι η καμπύλη ισχύος που επιτρέπει τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που παράγεται στη διάρκεια ενός έτους και ονομάζεται ενεργειακή απόδοση. Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου. Στο γενικότερο κοινωνικό πλαίσιο οι μικρές εφαρμογές επιτρέπουν την αυτονομία και τον έλεγχο της παραγωγής από κοινότητες ανθρώπων. Η κατασκευή, η συντήρηση και ο έλεγχος της τεχνολογίας από τους ίδιους τους ανθρώπους της κοινότητας, χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις δημιουργεί συνθήκες συλλογικής δουλειάς με αρκετές προεκτάσεις σε οικονομικό, κοινωνικό και κατ' επέκταση πολιτικό πεδίο.

## Οργάνωση του τόμου

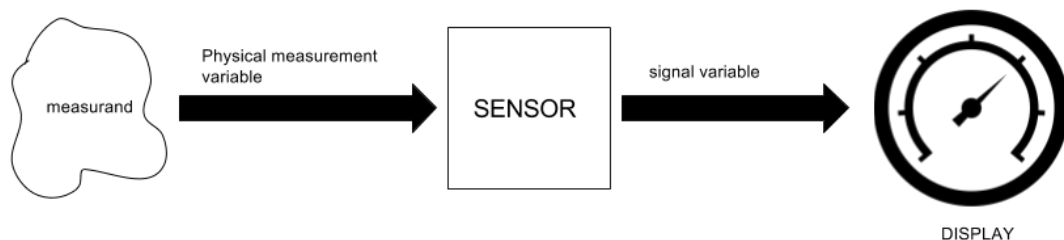
Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι διάφοροι αισθητήρες αλλά και οι τρόποι μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών. Στο κεφάλαιο 3 αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροελεγκτών και των μικροεπεξεργαστών καθώς και οι βασικές αρχές της μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η επεξεργασία που πρέπει να υποστούν τα δεδομένα για να εξαχθούν τα στατιστικά μεγέθη σύμφωνα με τα πρότυπα IEC ενώ στο κεφάλαιο 5 τα προγραμματιστικά εργαλεία με τα οποία έγινε δυνατή αυτή η επεξεργασία. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 φαίνεται το υλικό που επιλέχθηκε για την εφαρμογή.



## Κεφάλαιο 2

# Αισθητήρες και μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών

Σε γενικούς όρους, ένας αισθητήρας είναι η συσκευή εκείνη που μετατρέπει μία φυσική μεταβλητή (το μετρούμενο μέγεθος) σε μια μορφή κατάλληλη για καταγραφή. Κατάλληλη υπό την άποψη να είναι κατανοήσιμη και να έχει ένα συνεπές νόημα για τον άνθρωπο. Γι'αυτόν τον λόγο έχει καθιερωθεί το σύστημα των μονάδων με το οποίο η μέτρηση από έναν αισθητήρα λαμβάνει υπόσταση και μπορεί να συγκριθεί με κάποια άλλη μέτρηση. Σαν ένα τέτοιο βασικό παράδειγμα μπορούμε να παραθέσουμε τον χάρακα. Το μετρούμενο μέγεθος είναι το μήκος κάποιου αντικειμένου και η μέτρηση είναι ο αριθμός των μονάδων (μέτρα, εκατοστά κλπ.) που αντιπροσωπεύουν το μήκος.



Σχήμα 2.1: Μοντέλο αισθητήρα

Στην εικόνα 2.1 φαίνεται το γενικευμένο μοντέλο ενός απλού αισθητήρα. Το μετρούμενο φυσικό μέγεθος είναι στα αριστερά της εικόνας, και μετά από επεξεργασία από τον αισθητήρα παράγεται το (ηλεκτρικό συνήθως) σήμα το οποίο έχει και νόημα για τον άνθρωπο. Οι μεταβλητές σήματος που παράγονται από τον αισθητήρα, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χειραγωγηθούν και απο ένα σύστημα μετάδοσης, όπως ένα ηλεκτρικό ή μηχανικό κύκλωμα. Με αυτήν την ιδιότητα, το σήμα μπορεί να μεταδωθεί σε μια συσκευή καταγραφής η οποία θα είναι απομακρυσμένη από τον αισθητήρα. Στα ηλεκτρικά συστήματα, οι πιο συνήθεις μεταβλητές σήματος είναι η τάση ή το ρεύμα. Αυτά μεταδίδονται σε μια συσκευή προς προβολή ή προς καταγραφή από έναν ανθρώπινο παρατηρητή.

Επίσης κρίνεται απαραίτητο να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ ενός αισθητήρα και ενός μετατροπέα (transducer). Ο transducer, είναι ο μετατροπέας μιας μορφής ενέργειας σε μία άλλη ενώ ο αισθητήρας μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα παράδειγμα ενός μετατροπέα είναι το μεγάφωνο όπου μετατρέπεται το ηλεκτρικό σήμα σε μεταβλητό μαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια σε ακουστικά κύματα. Οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα αυτοματισμών, μετρήσεων και συστήματα ελέγχου όπου σήματα μετατρέπονται σε και από άλλες φυσικές ποσότητες όπως η ενέργεια, δύναμη, ροπή κ.α.

Ένας μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ενεργοποιητής. Αυτό είναι μια συσκευή υπεύθυνη για την κίνηση ή έλεγχο ενός μηχανισμού ή συστήματος. Η λειτουργία της οδηγείται από μια πηγή ενέργειας η οποία μπορεί να είναι είτε μηχανική δύναμη, ηλεκτρικό ρεύμα, υδραυλική πίεση κ.α. και μετατρέπει αυτήν την ενέργεια σε κινητική. Είναι στην ουσία ο μηχανισμός με τον οποίο ένα σύστημα ελέγχου δρα σε ένα περιβάλλον. Για παράδειγμα, ένας ηλεκτρικός κινητήρας είναι ενεργοποιητής, καθώς μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική.

## Κατηγοριοποίηση των αισθητήρων

Οι αισθητήρες, είναι υποκατηγορία των μετατροπέων με την έννοια ότι μετατρέπουν την ενέργεια μιας μορφής στην είσοδο, σε ενέργεια άλλης μορφής στην έξοδο. Οι αισθητήρες, μπορούν να διαχωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες με βάση το πως αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν και σε σχέση με την επιλεγόμενη αναφορά.

Ο πρώτος διαχωρισμός διακρίνει τους ενεργητικούς και τους παθητικούς αισθητήρες:

- Οι παθητικοί αισθητήρες δεν προσθέτουν ενέργεια σαν μέρος της διαδικασίας μέτρησης αλλά μπορεί να αφαιρέσουν ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ένα θερμοστοιχείο το οποίο μετατρέπει μια φυσική θερμοκρασία σε ένα σήμα τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος παράγει μια θερμοηλεκτρική τάση η οποία γίνεται και η μεταβλητή σήματος.
- Οι ενεργητικοί αισθητήρες προσθέτουν ενέργεια στο περιβάλλον της μέτρησης σαν μέρος της διαδικασίας. Ένα παράδειγμα ενεργητικού αισθητήρα είναι ένα σοναρ το οποίο στέλνει ένα ηχητικό σήμα το οποίο ανακλώμενο σε κάποια επιφάνεια μετράει την απόσταση του.

Ο δεύτερος διαχωρισμός διακρίνει τους απόλυτους και τους σχετικούς αισθητήρες

- Ένας απόλυτος αισθητήρας ανιχνεύει ένα σήμα σε συνάρτηση με τη απόλυτη φυσική κλίμακα η οποία είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες της μέτρησης. Ένα παράδειγμα είναι το θερμίστορ. Η ηλεκτρική τιμή της αντίστασης είναι ευθέως ανάλογη στην απόλυτη θερμοκρασία στην κλίμακα Kelvin. Επίσης, ένας απόλυτος αισθητήρας πίεσης παράγει ένα σήμα με βάση το κενό, που είναι το απολυτο μηδέν στην κλίμακα πίεσης.
- Ένας σχετικός αισθητήρας παράγει ένα σήμα που σχετίζεται με κάποια ειδική τιμή. Για παράδειγμα, το θερμοστοιχείο είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας που παράγει μία τάση

που είναι συνάρτηση της κλίσης της θερμοκρασίας στα άκρα των καλωδίων του στοιχείου. Ένας σχετικός αισθητήρας πίεσης, παράγει ένα σήμα σε σχέση με μια επιλεγμένη τιμή βάσης διαφορετική του μηδενός, όπως για παράδειγμα η ατμοσφαιρική πίεση.

## Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Μεταξύ της εισόδου και της εξόδου, το σήμα μπορεί να περάσει από περισσότερα από ένα στάδια μέχρι να φτάσει στην τελική του μορφή. Παρακάτω θα αναλυθούν τα πιο κύρια από αυτά στάδια.

### Σχέση εισόδου/εξόδου

Μία ιδανική ή θεωρητική σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου υφίσταται για κάθε αισθητήρα. Εάν ο αισθητήρας είχε σχεδιαστεί και κατασκευαστεί κάτω από ιδανικές συνθήκες και υλικά, τότε το σήμα εξόδου θα αναπαριστούσε πάντοτε την αληθινή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ιδανική συνάρτηση μπορεί να αναπαριστάται με την μορφή πίνακα τιμών, γραφικής παράστασης ή μαθηματικής σχέσης. Αυτή η θεωρητική σχέση ονομάζεται *συνάρτηση μεταφοράς*. Η συνάρτηση μεταφοράς εκφράζει τη σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος  $S$ , που παράγεται από τον αισθητήρα και του μετρούμενου μεγέθους  $s$ , δηλαδή σε μαθηματική μορφή  $S = f(s)$ . Η συνάρτηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική (για παράδειγμα λογαριθμική, εκθετική κ.ά). Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μονοδιάστατη και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$S = \alpha + bs \quad (2.1)$$

όπου:

- $\alpha$  είναι το σημείο τομής ή μετατόπισης (intercept ή offset), δηλαδή η έξοδος με μηδενικό σήμα εισόδου
- $b$  είναι η κλίση ή κέρδος της συνάρτησης.

Το μέγεθος  $S$  μπορεί να είναι κάποιο από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού σήματος, δηλαδή το πλάτος, η συχνότητα, η φάση και εξαρτάται από τις ιδιότητες και το είδος του αισθητήρα.

Για λογαριθμικές συναρτήσεις μεταφοράς έχουμε την παρακάτω έκφραση :

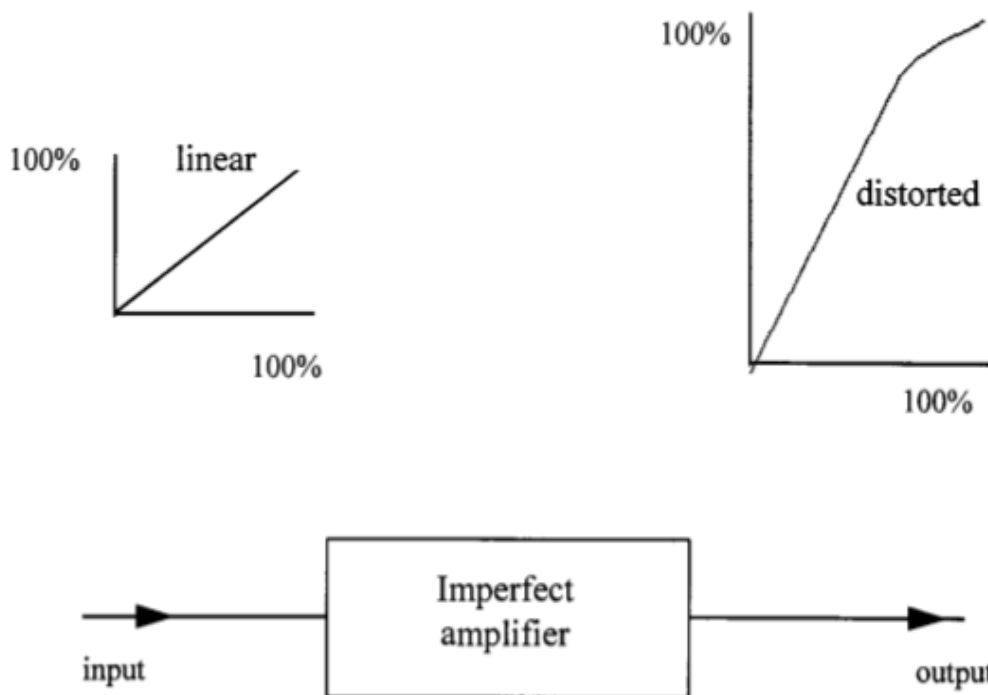
$$S = \alpha + \ln s \quad (2.2)$$

Για εκθετικές συναρτήσεις μεταφοράς :

$$S = \alpha e^{ks} \quad (2.3)$$

όπου:

- $k$  είναι γνωστή σταθερά



Σχήμα 2.2: Μη γραμμική ενίσχυση συνεπάγεται ανεπιθύμητες διαταραχές στην έξοδο

Σε μερικές περιπτώσεις, οι παραπάνω συναρτήσεις δεν εκφράζουν με τον κατάλληλο τρόπο το αποτέλεσμα του αισθητήρα. Επομένως μη γραμμικές συναρτήσεις είναι κατάλληλες για τη μαθηματική έκφραση της εξόδου. Η κλίση λοιπόν της συνάρτησης για δεδομένη είσοδο  $s_0$ , έχει ως εξής :

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds} \quad (2.4)$$

Σε πολλούς μη γραμμικούς αισθητήρες παρατηρείται γραμμική προσέγγιση σε συγκεκριμένο εύρος τιμών. Επομένως, ακόμα και μη γραμμικά μοντέλα είναι δυνατόν να εκφραστούν μαθηματικά από τη σχέση (2.1).

### Σφάλμα γραμμικότητας

Ιδανικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει μια αυστηρώς γραμμική σχέση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ενός αισθητήρα. Στην πράξη όμως όλα τα στοιχεία έχουν έναν βαθμό *μη γραμμικότητας*. Αν ένα στοιχείο έχει σταθερό κέρδος για όλα τα σήματα εισόδου, τότε το γράφημα της εισόδου και της εξόδου θα ήταν μια ευθεία γραμμή. Αυτή η σχέση ονομάζεται γραμμική [11].

Η *γραμμικότητα* είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει πόσο ταυτίζεται η πραγματική απόκριση ενός αισθητήρα με την ευθεία γραμμή. Το *σφάλμα γραμμικότητας* είναι το σφάλμα της απόκρισης αυτής από την ευθεία. Αυτά γίνονται καλύτερα κατανοητά από το σχήμα 2.2.



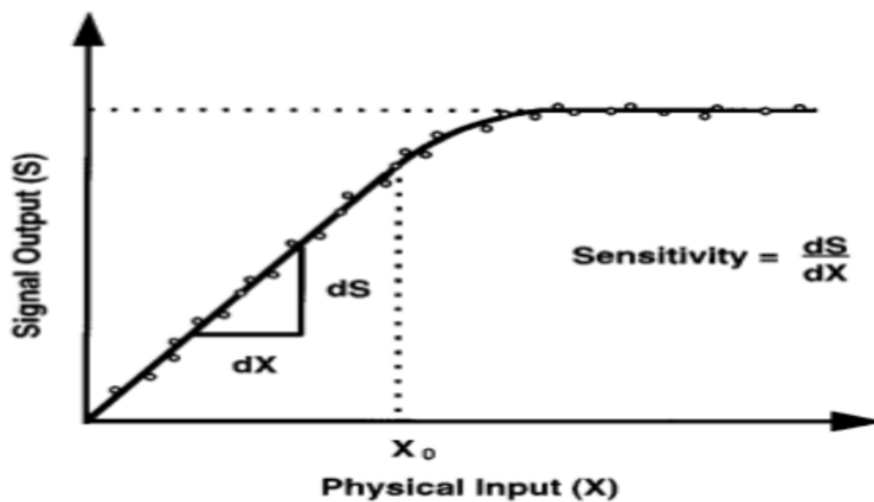
## Ολίσθηση

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα ενός μετρητικού οργάνου είναι η ολίσθηση. Η ανακρίβεια που προκύπτει σε μια μέτρηση είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων και μεταβολών που λαμβάνουν μέρος στα συστατικά ενός οργάνου με τη πάροδο του χρόνου. Οι βασικές αιτίες είναι οι αλλαγές στις χημικές δομές αυτών καθώς και στις μηχανικές καταπονήσεις. Η ολίσθηση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που μπορεί να μεταβάλλει την ακρίβεια της μέτρησης σε ένα όργανο ανάλογα με το πλάτος της εισόδου.

Η ολίσθηση προκαλείται από μεταβολές σε διάφορες παραμέτρους του περιβάλλοντος στο οποίο είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, όπως στην θερμοκρασία στην πίεση ή στην υγρασία. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την αλλαγή της τιμής μιας ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είναι βασικό συστατικό του ενισχυτή ο οποίος αναλαμβάνει να ενισχύσει το σήμα προς μέτρηση.

Ο χρόνος και οι περιβαντολογικές συνθήκες είναι οι κύριες αιτίες της ολίσθησης. Οι κατασκευαστές μπορούν να την περιορίσουν αλλά όσο περιορίζεται το σφάλμα της μέτρησης, αυξάνεται κατά πολύ το κόστος.

## Βαθμονόμηση



Σχήμα 2.3: Καμπύλη βαθμονόμησης του αισθητήρα

Η σχέση μεταξύ της φυσικής μεταβλητής της μέτρησης και της μεταβλητής σήματος που προκύπτει στην έξοδο για έναν συγκεκριμένο αισθητήρα είναι γνωστή ως βαθμονόμηση του αισθητήρα. Τυπικά, ο αισθητήρας βαθμονομείται παρέχοντας του μια γνωστή φυσική είσοδο στο σύστημα και καταγράφοντας την έξοδο. Τα δεδομένα σχεδιάζονται στην καμπύλη βαθμονόμησης όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Σε αυτό το παράδειγμα, ο αισθητήρας έχει μια γραμμική απόκριση για τιμές του φυσικού μεγέθους λιγότερο από  $X_0$ . Η ευαισθησία του αι-

σθητήρα, προσδιορίζεται από την κλίση της καμπύλης βαθμονόμησης. Σε αυτό το παράδειγμα, για τιμές φυσικής εισόδου μεγαλύτερες από  $X_0$ , η καμπύλη βαθμονόμησης γίνεται όλο και πιο ευαίσθητη μέχρι να φτάσει μια οριακή τιμή για το σήμα εισόδου. Αυτή η συμπεριφορά είναι γνωστή ως *κορεσμός* και ο αισθητήρας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τιμές μεγαλύτερες από την τιμή κορεσμού. Συνήθως, ο αισθητήρας δεν ανταποκρίνεται καλά για μικρές τιμές εισόδου. Το εύρος μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης φυσικής εισόδου που μπορεί να καταγράψει ένας αισθητήρας είναι γνωστό και ως *δυναμικό εύρος* της συσκευής.

## Υστέρηση

Προσεκτική παρατήρηση της σχέσης μεταξύ εισόδου και εξόδου ενός αισθητήρα σε ένα μηχανικό σύστημα, θα αποκαλύψει κάποιες φορές διαφορετικά αποτελέσματα όσο τα μηχανικά σήματα διαφέρουν ως προς την διεύθυνση της κίνησης. Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και στα ηλεκτρικά συστήματα αλλά πλέον λόγω του μαγνητικού πεδίου το οποίο αλλάζει τη διεύθυνση του σε ένα μαγνητικό υλικό. Αυτό το χαρακτηριστικό ονομάζεται *υστέρηση*. Στην εικόνα 2.4 φαίνεται ένα γενικευμένο γράφημα που δείχνει τη σχέση μεταξύ εισόδου/εξόδου παρουσιάζοντας πως δημιουργείται ένας κλειστός βρόχος.

Συνοπτικά, το σφάλμα υστέρησης είναι η απόκλιση της εξόδου του αισθητήρα όταν η κατεύθυνση της μεταβολής της εισόδου αντιστραφεί. Ο ορισμός γίνεται πιο κατανοητός με το παράδειγμα ενός αισθητήρα μετατόπισης, στον οποίο η τιμή της τάσης εξόδου όταν το αντικείμενο μετακινείται κατά τη θετική φορά του άξονα διαφέρει από την τιμή αρνητική μετατόπισης. Αν η διαφορά αυτή είναι 20mV και ο αισθητήρας μετράει 10mV/mm τότε η υστέρηση σε μονάδες μετατόπισης είναι 2mm

## Κορεσμός

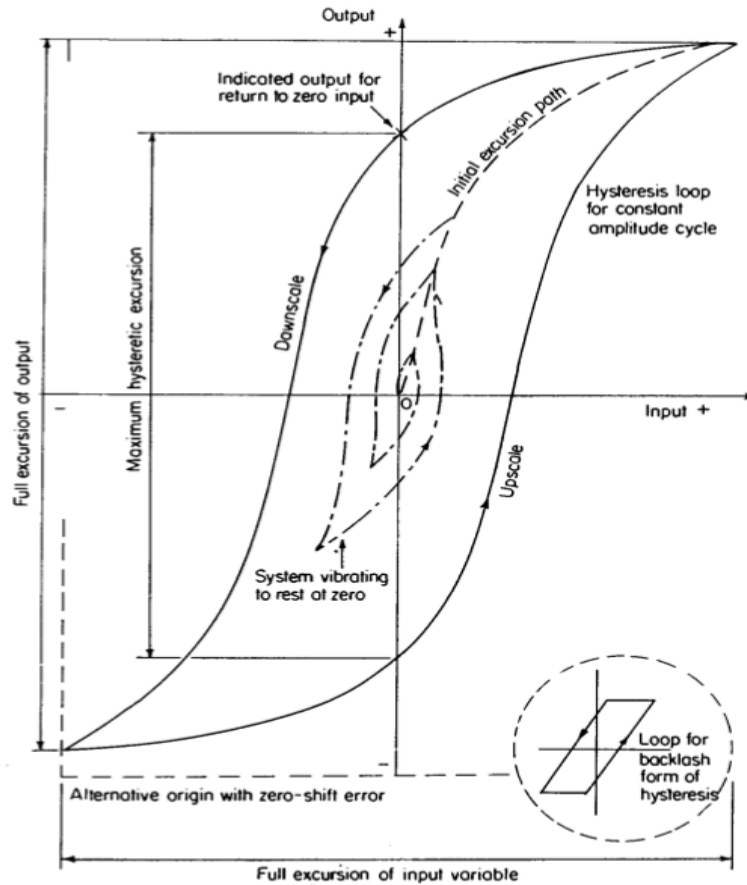
Όταν γίνεται λόγος για σήματα εισόδου των οποίων το πλάτος είναι εκτός του επιτρεπτού εύρους, το φαινόμενο του κορεσμού γίνεται εμφανές. Αν το σήμα δεν έχει ενισχυθεί κατάλληλα ώστε το πλάτος του να ανήκει στο εύρος αυτό, η σχέση του με την έξοδο δεν θα έχει την ίδια γραμμικότητα και χαρακτηριστικά.

Το κέρδος που προκύπτει στο τελικό στάδιο, είναι συνήθως μικρότερο όσο αυξάνεται το πλάτος του σήματος. Ένα μεταβαλλόμενο σήμα θα ενισχυθεί ανάλογα με την καμπύλη κέρδους/πλάτους του στοιχείου.

Η κατάσταση όπου για ερεθίσματα εκτός του εύρους λειτουργίας χάνεται η γραμμικότητα και προκύπτουν μη συνεπή σήματα στην έξοδο ονομάζεται *κορεσμός*.

## Μέτρηση ρεύματος

Μέτρηση ρεύματος γίνεται για τον προσδιορισμό του «πόσο» ρεύμα περνάει μέσα από ένα κύκλωμα και για να γίνει αυτό εφικτό είναι απαραίτητος ένας αισθητήρας η μετατροπέας ρεύματος. Το παραγόμενο σήμα μπορεί να είναι αναλογικό ρεύμα, αναλογική τάση ή ακόμα



Σχήμα 2.4: Σχέση μεταξύ εισόδου-εξόδου με εμφανές το φαινόμενο της υστέρησης

και ψηφιακό σήμα. Η είσοδος μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενη, είτε συνεχές ρεύμα και ανάλογα την εφαρμογή επιλέγουμε τον κατάλληλο αισθητήρα.

Οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες μέτρησης ρεύματος για μετρητικά και καταγραφείς είναι η παρακάτω:

- Μέτρηση με αντιστάσεις (άμεση μέτρηση)
- Μέτρηση με το μαγνητικό πεδίο (έμμεση μέτρηση)
  1. Μετασχηματιστής ρεύματος
  2. Πηνίο Rogowski
  3. Με αξιοποίηση του φαινομένου Hall

Κάθε μία μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της που την κάνουν αποτελεσματική για τη μέτρηση του ρεύματος αλλά επίσης έχει και κάποια μειονεκτήματα βασικά για την τελική αξιοπιστία ή κόστος της εφαρμογής. Επίσης, άμεση μέτρηση σημαίνει ότι το μετρητικό είναι συνδεδεμένο απευθείας πάνω στο κύκλωμα και άρα εκτεθειμένο στην τάση της γραμμής, ενώ η έμμεση μέθοδος προσφέρει απομόνωση που μερικές φορές αποδεικνύεται απαραίτητη για την ασφάλεια της σχεδίασης [9].

## Μέτρηση ρεύματος με αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις μέτρησης ρεύματος, γνωστές και ως shunt αντιστάσεις, είναι μια άμεση μορφή μέτρησης που έχει το προνόμιο της απλότητας και της γραμμικότητας. Η shunt αντίσταση συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα και η ροή ρεύματος σε αυτή προκαλεί μια μικρή ποσότητα ισχύος να μετατραπεί σε θερμότητα. Αυτή η μετατροπή ισχύος παρέχει το σήμα τάσης. Με άλλα λόγια, η μέτρηση του ρεύματος επιτυγχάνεται με τη μέτρηση της πτώσης τάσης που προκαλεί το ρεύμα που διαπερνά την αντίσταση.

Πέρα από τα προνόμια της γραμμικότητας και της απλότητας, η μέθοδος αυτή είναι μια ελάχιστα δαπανηρή λύση. Επιπροσθέτως, τέτοιες ειδικές αντιστάσεις με πολύ χαμηλή τιμή αντίστασης ( $<1 \text{ m}\Omega$ ) και κατασκευασμένες με ειδικά υλικά κράματος μετάλλου προσφέρουν αξιόπιστη προστασία λόγω βραχυκυκλωμάτων και υπερεντάσεων [10].

Το βασικό μειονέκτημα των shunt αντιστάσεων είναι η ακρίβεια τους. Ειδικά όταν γίνεται χρήση αντιστάσεων με μικρή τιμή αντίστασης (λιγότερο από λίγα milliohms, η αντίσταση του μετάλλου γίνεται ένα βασικό μέρος της αντίστασης μέτρησης και συμβάλλει σημαντικά στο σφάλμα μέτρησης. Γι'αυτόν τον λόγο συχνά χρησιμοποιούνται αντιστάσεις 4-τερματικών, ή αντιστάσεις Kelvin προς εξάλειψη αυτού του σφάλματος. Αυτές οι αντιστάσεις ειδικού σκοπού όμως μπορούν να αποβούν ακριβές.

Για τη ελαχιστοποίηση του σφάλματος στη χρήση απλών shunt αντιστάσεων, μπορούν να εφαρμοστούν προσεγγίσεις στη σχεδίαση του τυπωμένου κυκλώματος, όπου με σωστή διάταξη των μερών χαλκού και σωστή δρομολόγηση του ρεύματος προς μέτρηση πάνω στη πλακέτα, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ισχύος στην αντίσταση και συνεπώς το σφάλμα μέτρησης [32].

Οι δύο βασικές μέθοδοι χρήσης των αντιστάσεων είναι στην χαμηλή πλευρά και στην υψηλή πλευρά δηλαδή μετά ή πριν το φορτίο. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στις ίδιες αρχές μέτρησης, δηλαδή στο νόμο του Ohm:

$$V_{\text{signal}} = I_{\text{sensor}} R_{\text{shunt}} \quad (2.5)$$

Στην εικόνα 2.5, φαίνονται τα κυκλώματα και για τις δυο μεθόδους.

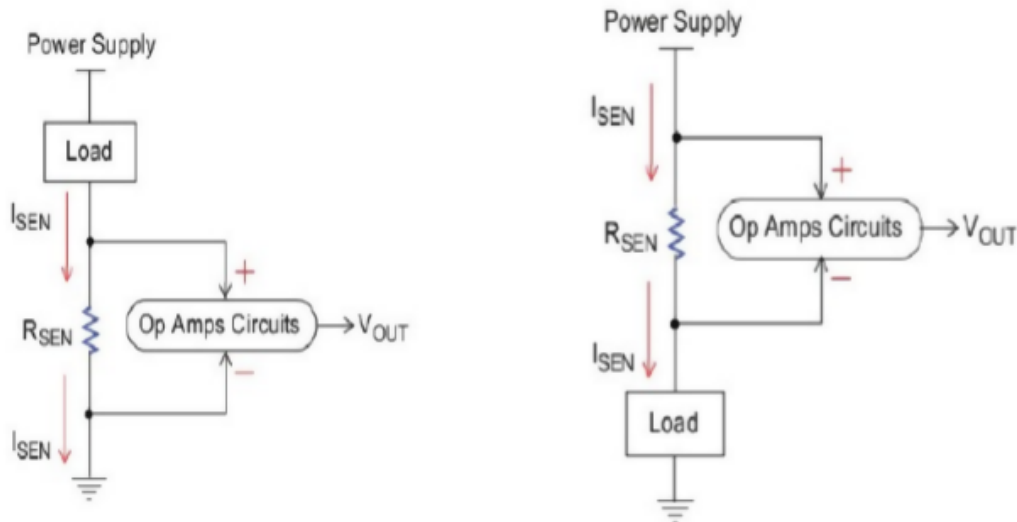
## Μέτρηση ρεύματος με το μαγνητικό πεδίο

Αρχικά ας γίνει μια εισαγωγή για τη σχέση μεταξύ ρεύματος και μαγνητικού πεδίου. Οι εξισώσεις του Maxwell για τον μαγνητισμό, διευκρινίζουν δύο βασικά μεγέθη: την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  και την ένταση της μαγνητικής επαγωγής,  $\mathbf{B}$ . Τα δύο αυτά μεγέθη σχετίζονται ανάλογα με το υλικό με τον τύπο

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.6)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού επί τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Ο νόμος του Amper όμως είναι αυτό που σχετίζει το ρεύμα που διαπερνά έναν αγωγό με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από αυτόν σε έναν κλειστό νοητό βρόχο σύμφωνα με την εξίσωση:



Σχήμα 2.5: Μέτρηση του ρεύματος με τη μέθοδο των shunt αντιστάσεων

$$\oint_C H dl = \iint_S J dS = I_{enc} \quad (2.7)$$

όπου:

- $\oint_C$  είναι το κλειστό επικαμπύλιο ολοκλήρωμα γύρω από την κλειστή καμπύλη C
- $H$  είναι Η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε A/m
- $J$  είναι η πυκνότητα ρεύματος μέσα από την επιφάνεια S που περικλύει το σύνορο C σε A/m<sup>2</sup>
- $I_{enc}$  είναι το ρεύμα που περικλείεται από την καμπύλη C

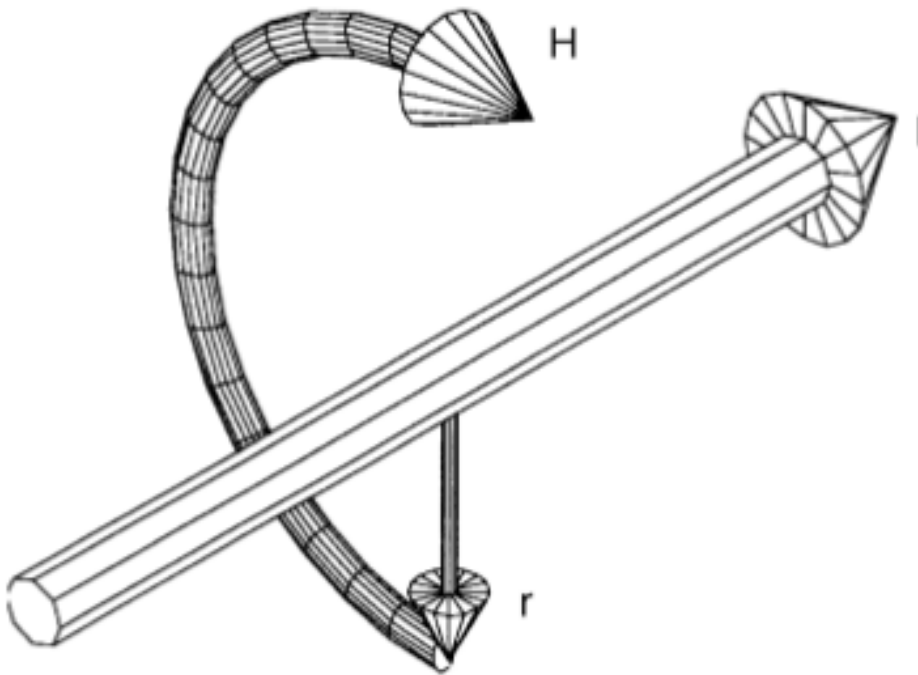
Με βάση την παραπάνω εξίσωση, αν ορίσουμε έναν αμπεριανό κυκλικό βρόχο γύρω από τον αγωγό και επιλύσουμε το ολοκλήρωμα, προκύπτει πως

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.8)$$

και γίνεται σαφής η σχέση του ρεύματος που διαπερνά έναν αγωγό με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από αυτόν σε έναν κλειστό νοητό βρόχο καθώς και η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από την απόσταση από τον αγωγό [2].

### Μετασχηματιστής ρεύματος

Όπως οποιοσδήποτε μετασχηματιστής, έτσι και ο μετασχηματιστής ρεύματος έχει ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον τυλίγμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαπερνά το πρωτεύον, παράγει ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στον πυρήνα του μετασχηματιστή το οποίο επάγει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον. Η ένταση του ρεύματος του δευτερεύοντος θα είναι αυτή της τιμής του πρωτεύοντος διαιρεμένη με τον λόγο των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, δηλαδή θα ισχύει η σχέση



Σχήμα 2.6: Ένταση του μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στο ρεύμα που διαπερνά έναν αγωγό

$$I_{sec} = \frac{I_{pr}}{n} \quad (2.9)$$

όπου:

$I_{sec}$  είναι το ρεύμα του δευτερεύοντος

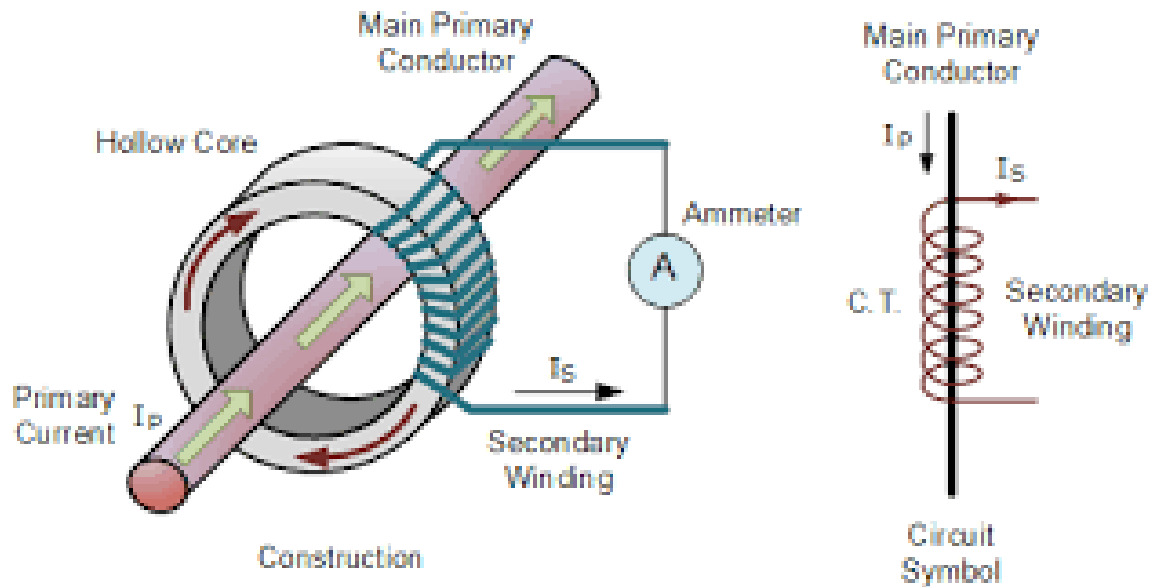
$I_{pr}$  είναι το ρεύμα του πρωτεύοντος

$n$  είναι ο λόγος των τυλιγμάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, δηλαδή

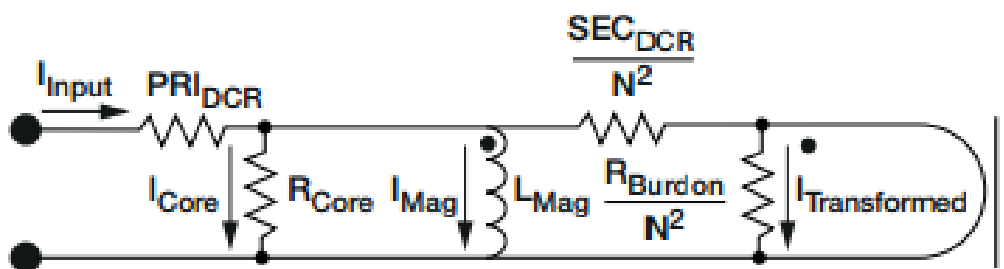
$$n = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.10)$$

Οι μετασχηματιστές ρεύματος προσδιορίζονται από τον λόγο πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Για να δώσουμε ένα παράδειγμα, ένας μετασχηματιστής ρεύματος του τύπου 4000:5, θα παρέχει 5 Amper στο δευτερεύον όταν έχει 4000 Amper στο πρωτεύον.

Ο μετασχηματιστής ρεύματος, παρέχει τρία βασικά πλεονεκτήματα: Απομόνωση από την τάσης γραμμής, μέτρηση ρεύματος χωρίς απώλειες και μεγάλο σήμα τάσης εξόδου με απώλεια θορύβου [3]. Αυτή η έμμεση μέθοδος μέτρησης του ρεύματος, απαιτεί ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ώστε να παρέχει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, μαγνητικά συζευγμένο στα τυλίγματα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η τάσης μέτρησης του δευτερεύοντος κλιμακώνεται ανάλογα με τον λόγο τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Επίσης, η μέθοδος θεωρείται χωρίς απώλειες καθώς το κύκλωμα του μετασχηματιστή είναι ξεχωριστό από αυτο στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση αλλά παρ'όλα αυτά, υπάρχουν κάποιες μικρές



Σχήμα 2.7: Επεξήγηση λειτουργίας μετασχηματιστή ρεύματος



Σχήμα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρεύματος

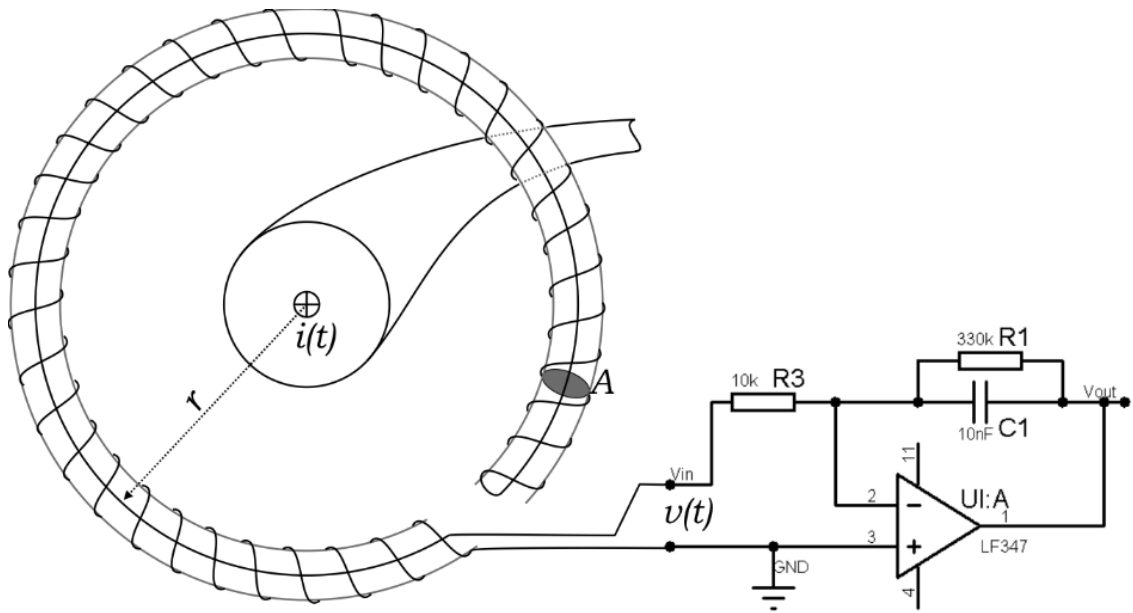
απώλειες που οφείλονται στην αντίσταση μέτρησης (burden resistor), στις απώλειες πυρήνα και στην DC αντίσταση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος [4].

Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ρεύματος φαίνεται στην εικόνα 2.8. Πρακτικά οι μετασχηματιστές έχουν ένα ρεύμα μαγνήτισης στο πυρήνα του σιδήρου και πτώση τάσης ανάλογη του ρεύματος του δευτερεύοντος εξαιτίας της αντίστασης των τυλιγμάτων. Η αντίσταση μέτρησης είναι αυτή στα άκρα της οποίας γίνεται η μέτρηση της τάσης. Άρα, δεν πρέπει να επιλέξουμε αυθαίρετα την τιμή της αλλά έτσι ώστε το εύρος της τάσης εξόδου να είναι εντός των προδιαγραφών του μετρητικού μας.

### Πηνίο Rogowski

Το πηνίο Rogowski είναι παρόμοιο με τον μετασχηματιστή ρεύματος υπό την έννοια ότι επαγεται τάση στο δευτερεύον ανάλογη με το ρεύμα του πρωτεύοντος. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι το πηνίο Rogowski έχει σχεδιασμό κενού πυρήνα σε αντίθεση με τον μετασχηματιστή ρεύματος του οποίου ο πυρήνας βασίζεται σε κάποιο υλικό υψηλής διαπερατότητας

όπως ασάλι, για να πραγματοποιήσει τη σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Ο σχεδιασμός κενού πυρήνα έχει μικρότερη μαγνητική αντίσταση και παρέχει γρηγορότερη απόκριση σήματος και μεγαλύτερη γραμμικότητα στη τάση εξόδου.



Σχήμα 2.9: Πηνίο Rogowski και το κύκλωμα ολοκληρωτή υπεύθυνο για την κατασκευή της τάσης  $V_{out}$

Η τάση εξόδου του πηνίου Rogowski, είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους (2.11). Το σήμα αυτό εξαρτάται από την παράγωγο του ρεύματος του πρωτεύοντος στον χρόνο. Για να έχει νόημα η χρήση τέτοιων σημάτων, πρέπει να υποστούν κάποια επεξεργασία σήματος. Μια συνήθης πρακτική είναι να περάσει το σήμα από στάδιο ολοκληρωτή όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.9 [5].

$$v(t) = -\mu_0 n S \frac{di(t)}{dt} = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (2.11)$$

όπου:

- $v_0$  είναι η στιγμιαία τάση εξόδου
- $\mu_0$  είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- $n$  είναι η πυκνότητα των τυλιγμάτων (τυλίγματα ανά μονάδα μήκους)
- $S$  είναι η διατομή του πυρήνα
- $M$  είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των τυλιγμάτων

### Hall effect transducers

Όταν ένας αγωγός στον οποίο υπάρχει ρεύμα, τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού κάθετη στο μαγνητικό πεδίο και στην κατεύθυνση του



ρεύματος. Αυτό το δυναμικό είναι ανάλογο με το πλάτος του ρεύματος. Τα φορτία αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο, προκαλώντας την μεταβολή της κατανομής του ρεύματος, πράγμα που δημιουργεί τη τάση Hall.

Το φαινόμενο Hall προκαλείται από τις δυνάμεις Lorentz που επιδρούν σε κινούμενα φορτία μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη Lorentz είναι ίση με:

$$F_L = q(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (2.12)$$

Πιο συγκεκριμένα, όταν μια ακτίνα από φορτισμένα σωματίδια περάσει μέσα από ένα ηλεκτρικό πεδίο, οι δυνάμεις Lorentz επιδρούν πάνω τους με αποτέλεσμα οι ακτίνα να εκτραπεί από την αρχική της κατεύθυνση. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να θεωρήσουμε το ρεύμα που διαπερνά έναν αγωγό σαν ακτίνα από φορτισμένα σωματίδια. Έτσι, όταν ένας αγωγός τοποθετηθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο κάθετο στη διεύθυνση του ρεύματος, τα ηλεκτρόνια θα εκτραπούν. Σαν αποτέλεσμα, η μία πλευρά του αγωγού θα γίνει θετικά και η άλλη αρνητικά φορτισμένη. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι η τάση Hall [6].

Στην πράξη, αποτελείται από ένα ημιαγώγιμο κρυσταλλικό στοιχείο με υψηλή αγωγιμότητα που τοποθετείται σε ένα μαγνητικό πεδίο και διαρέεται από ρεύμα  $I$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Φαινόμενο Hall χωρίς και με την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα

Το πλεονέκτημα των μετατροπέων Hall, είναι ότι είναι ικανοί να μετρήσουν μεγάλα ρεύματα με μικρές απώλειες ισχύος. Από την άλλη όμως, υπάρχουν και αρκετά μειονεκτήματα με κάποια από αυτά να είναι η ολίσθηση που προκαλείται λόγω της θερμοκρασίας και άρα η μη γραμμικότητα, περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, ευαισθησία σε άλλα μαγνητικά πεδία που οδηγεί σε μεγαλύτερα σφάλματα και το υψηλό κόστος.

## Μέτρηση τάσης

Όσον αφορά τις τεχνικές μέτρηση της τάσης η βασικότερη διάκριση των μεθόδων μπορεί να γίνει ανάμεσα σε απομονωμένες και μη απομονωμένες. Συχνά, ιδιαίτερα στην περίπτωση που το σύστημα μας είναι υψηλής τάσης, ιδιαίτερα πάνω από τα 50V, είναι αναγκαία η παρουσία απομόνωσης του. Η πρόβλεψη αυτή είναι αναγκαία πέρα των λόγων ασφαλείας και για περίπτωση καταστροφής του εξοπλισμού λόγω υπερτάσεων αλλά και σε θέματα γειώσεων, λόγω του γεγονότος ότι έχουν κοινή γείωση με το μετρούμενο σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα μέτρησης.

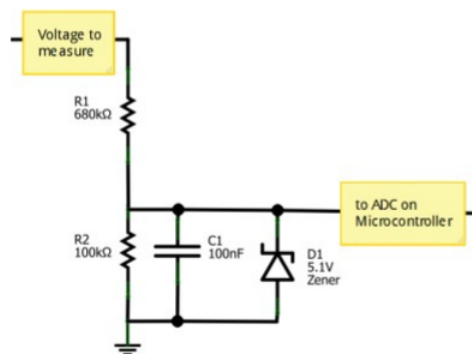
## Απευθείας σύνδεση

Υπάρχει η δυνατότητα απευθείας σύνδεσης της τάσης σε έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ή σε έναν μικροελεγκτή και στη συνέχεια να ακολουθήσει η επεξεργασία του σήματος και η παρουσίαση της μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή το βασικότερο πρόβλημα είναι ότι οι περισσότεροι μικροελεγκτές έχουν περιορισμό στο εύρος της τάσης εισόδου, συνήθως κυμαίνονται μέχρι την τιμή των 5V. Επομένως οποιαδήποτε διαφορά στην τιμή της τάσης για οποιονδήποτε λόγο θα προκαλούσε καταστροφή στον μικροελεγκτή ή στον μετατροπέα.

Επομένως, η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για μετρήσεις πολύ χαμηλών σημάτων τάσεων και επομένως κατάλληλη για ένα πολύ μικρό εύρος εφαρμογών.

## Διαίρετης τάσης

Ο διαίρετης τάσης είναι η απλούστερη και πιο συνηθισμένη μέθοδος μέτρησης της τάσης. Τα μόνα απαραίτητα στοιχεία για το διαίρετη είναι δύο αντιστάσεις σε σειρά. Η τάση εξόδου μετριέται μεταξύ της γείωσης και του μέσου των δύο αντιστάσεων. Το κύκλωμα του διαίρετη φαίνεται στην εικόνα 2.11.



Σχήμα 2.11: Ο διαίρετης τάσης

Η τάση εξόδου στο διαίρετη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (2.13)$$

Επιλέγοντας λοιπόν τον κατάλληλο λόγο των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , είναι δυνατή η ρύθμιση της επιθυμητής τάσης εξόδου σε σχέση με την μετρούμενη τάση. Ο πυκνωτής  $C1$  που υπάρχει στο σχήμα, χρησιμοποιείται σαν φίλτρο αποκοπής των υψηλών συχνοτήτων του σήματος εισόδου και η χρησιμοποίησή του δεν είναι απαραίτητη για όλες τις περιπτώσεις.

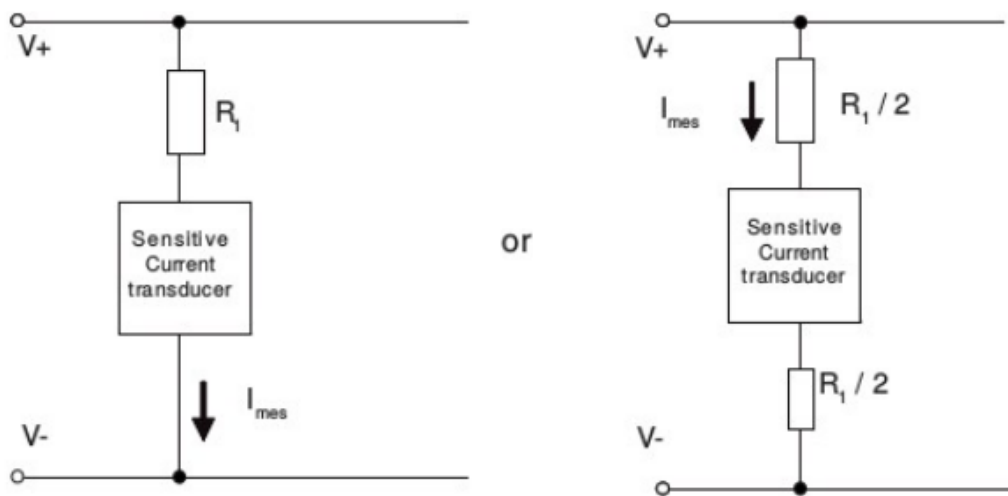
Συμπερασματικά, ο διαίρετης τάσης είναι απλός στην υλοποίηση και αρκετά χαμηλού κόστους. Τα μειονεκτήματά αυτής της μεθόδου είναι η μειωμένη ασφάλεια λόγω υψηλών τάσεων ή υπερτάσεων και η πιθανότητα καταστροφής του εξοπλισμού. Οι αντιστάσεις επίσης, επηρεάζονται από την θερμοκρασία, επομένως οι μετρήσεις δεν έχουν τη βέλτιστη ακρίβεια.

### Hall effect μετατροπείς τάσης

Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν οι μετατροπείς ρεύματος βασισμένοι στο φαινόμενο Hall. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνολογίες των μετατροπέων ρεύματος, είναι δυνατόν να μετρηθεί και η τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος. Οι μετατροπείς τάσης βασίζονται στην τεχνολογία των κλειστού βρόχου μετατροπέων. Η βασικότερη διαφορά από τους μετατροπείς ρεύματος είναι η προσθήκη ενός εσωτερικού πρωτεύοντος τυλίγματος με μεγάλο αριθμό τυλιγμάτων, επιτρέποντας στον μετατροπέα να δημιουργήσει τον απαραίτητο αριθμό  $\text{Ampere} \cdot \text{τυλιγμάτων}$ , για την μέτρηση μικρών ρευμάτων εισόδου.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση ενός μικρού ρεύματος το οποίο είναι ευθέως ανάλογο με την μετρούμενη τάση. Διαιρώντας την τάση με μία μεγάλη αντίσταση, δημιουργείται ένα μικρό ρεύμα, που μπορεί να μετρηθεί με μία από τις γνωστές τεχνολογίες μετατροπέων φαινομένου Hall. Η ελεγχόμενη σύνθετη αντίσταση εισόδου που διαθέτουν διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την ακρίβεια και το εύρος ζώνης μέτρησης. Η αντίσταση προστίθεται σε σειρά με το πρωτεύον του μετατροπέα για να ληφθεί η βέλτιστη τιμή ρεύματος για ονομαστική τιμή της τάσης εισόδου. Η αντίσταση συχνά χωρίζεται σε δύο αντιστάσεις, τοποθετούνται και στις δύο πλευρές του πρωτεύοντος πηνίου, για τη βελτίωση της απόρριψη κοινού σημείου [30].

Η λειτουργία του μετατροπέα τάσης φαίνεται στην εικόνα 2.12.



Σχήμα 2.12: Λειτουργία ενός Hall μετατροπέα τάσης

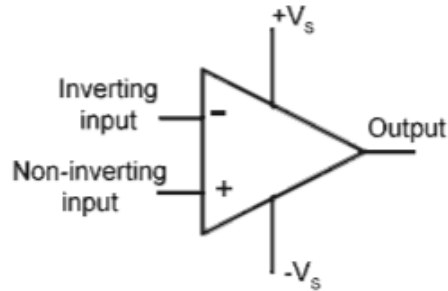
Η ακρίβεια των μετρήσεων με τη χρήση Hall μετατροπέα τάσης, επηρεάζεται από δύο βασικούς παράγοντες.

- Από την ακρίβεια της μέτρησης του ρεύματος, από το οποίο προκύπτει η μετρούμενη τάση.
- Από αναπάντεχες αλλαγές του λόγου του ρεύματος και της τάσης.

Επομένως, η αλλαγή της τιμής της αντίστασης, είτε λόγω θερμοκρασίας, είτε λόγω ανοχής, θα επιδράσει στην ακρίβεια της μέτρησης.

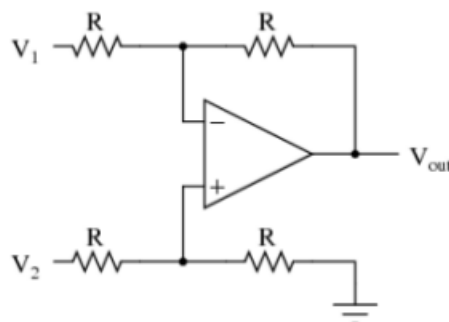
## Ενισχυτές

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι ουσιαστικά ενισχυτής τάσης με υψηλό κέρδος ανοικτού βρόχου, με δύο εισόδους και μία έξοδο και έχει τη δυνατότητα να υλοποιεί πολλές διαφορετικές σχέσεις ανάμεσα στις εισόδους και εξόδους. Τα στοιχεία για μια αρνητική ανάδραση, βρίσκονται συνήθως έξω από τον ενισχυτή.



Σχήμα 2.13: Τελεστικός ενισχυτής

Οι δύο εισόδους ονομάζονται ανάστροφη (και συμβολίζεται με αρνητικό πρόσημο) και μη-ανάστροφη (και συμβολίζεται με θετικό πρόσημο). Ο όρος «αναστροφή» χρησιμοποιείται επειδή η αντίστοιχη τάση ενισχύεται και περιστρέφεται κατά  $180^\circ$ , ενώ η μη-ανάστροφη μόνο ενισχύεται. Ο τελεστικός ενισχυτής ανταποκρίνεται μόνο στο σήμα διαφοράς  $V_2 - V_1$  και αγνοεί οποιοδήποτε σήμα είναι κοινό και στις δύο εισόδους. Επομένως αν  $V_1 = V_2$ , τότε ιδανικά η απόκριση του ενισχυτή θα είναι μηδενική. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται απόρριψη κοινού σήματος (common mode rejection). Οι πιο κοινοί ενισχυτές στην κατασκευή οργάνων μέτρησης είναι οι διαφορικοί ενισχυτές ή ενισχυτές διαφορών (differential amplifiers). Οι ενισχυτές διαφορών ανταποκρίνονται στη διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων που εφαρμόζονται στην είσοδο του και, στην ιδανική περίπτωση, απορρίπτουν τα σήματα τα οποία είναι κοινά στις δύο εισόδους.



Σχήμα 2.14: Διαφορικός ενισχυτής

Ενώ ιδανικά ένας διαφορικός ενισχυτής, ενισχύει μόνο το διαφορικό σήμα εισόδου, στην πράξη η τάση εξόδου καθορίζεται από το διαφορικό κέρδος του ενισχυτή και από το κέρδος κοινού σήματος. Η χρήση των διαφορικών ενισχυτών αντί για τους τελεστικούς, γίνεται εξαι-

τίας του πολύ υψηλού κέρδους του τελεστικού ενισχυτή που καθιστά αδύνατη την απευθείας χρήση του. Αντ' αυτού, είναι απαραίτητο ένα δίκτυο ανάδρασης για σύνδεση στον τελεστικό ενισχυτή ώστε να δημιουργηθεί το κέρδος του κυκλώματος να είναι πεπερασμένο και σταθερό [31].

Η έξοδος του σήματος για τον ενισχυτή της παραπάνω εικόνας είναι

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1) \quad (2.14)$$

Συνήθως, στα συστήματα μέτρησης χρησιμοποιείται ενισχυτής απομόνωσης, ο οποίος είναι ένας διαφορικός ενισχυτής που προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενισχυτή είναι η απομόνωση που προσφέρει, η αρκετά καλή ακρίβεια και η χαμηλή ισχύς εισόδου. Από την άλλη μεριά, το αρνητικό είναι ότι χρειάζεται απομονωμένη τροφοδοσία για την είσοδο.



## Κεφάλαιο 3

# Μικροπολογιστές και μικροελεγκτές

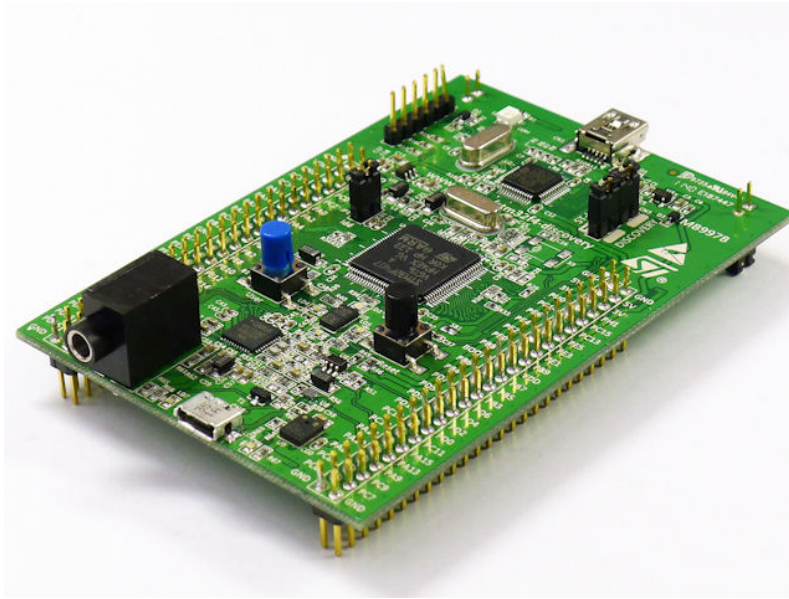
Ζούμε στην λεγόμενη «ψηφιακή εποχή». Το μέγεθος της ψηφιακής πληροφορίας όλο και αυξάνεται και συνεπώς θα πρέπει να αυξηθούν και οι δυνατότητες μας να επεξεργαστούμε και να αξιοποιήσουμε αυτή τη πληροφορία. Αυτόν τον ρόλο καλείται να φέρει εις πέρας ο μικροεπεξεργαστής με τη συνεργασία βέβαια με τα περιφερειακά του στοιχεία όπου και συνθέτει ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα (μικροπολογιστής) και τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

### Ενσωματωμένα συστήματα

Ο όρος ενσωματωμένο σύστημα (embedded system) μπορεί να έχει διάφορες ερμηνείες και ορισμούς. Γενικά, ενσωματωμένο σύστημα είναι ένα σύστημα με βάση έναν μικροεπεξεργαστή που έχει κατασκευαστεί για μια ή περισσότερες λειτουργίες, «τρέχοντας» ένα λογισμικό και δεν μπορεί να προγραμματιστεί από το χρήστη σαν ένα ολοκληρωμένος υπολογιστής. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέγει κάποιες διαδικασίες όσον αφορά τη λειτουργικότητα του συστήματος, αλλά όχι να αφαιρεί ή να προσθέτει λογισμικό. Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής μπορεί να λειτουργεί σαν αριθμομηχανή και συγχρόνως σαν παιχνιδιομηχανή ανάλογα με τον χρήστη και τις ανάγκες του, αντίθετα ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι προορισμένο για συγκεκριμένες λειτουργίες εξαρχής. Συγκρινόμενο, επίσης, με έναν ολοκληρωμένο υπολογιστή, ένα ενσωματωμένο σύστημα έχει περιορισμούς ως προς το υλικό και το λογισμικό ενώ η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας και η μνήμη του συστήματος έχουν χαμηλότερη απόδοση για την εξοικονόμηση ενέργειας. Γενικά, ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι μικρό σε μέγεθος, με χαμηλή κατανάλωση και σχετικά χαμηλού κόστους [22].

### Μικροεπεξεργαστής

Με τον όρο «μικροεπεξεργαστής», αναφερόμαστε στη βασική υπολογιστική μονάδα των υπολογιστικών συστημάτων. Είναι ο πυρήνας ενός υπολογιστικού συστήματος, αφού ανα-



Σχήμα 3.1: Ο μικροελεγχτής STM32F4-Discovery της STMicroelectronics

λαμβάνει να εκτελέσει όλες τις μαθηματικές και λογικές πράξεις που υπαγορεύονται σε αυτόν. Είναι ευρέως γνωστός με τον αγγλικό όρο "CPU" προερχόμενο από το Central Processing Unit (Κεντρική Υπολογιστική Μονάδα). Συγκεκριμένα, ο μικροεπεξεργαστής περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που του επιτρέπουν να επιτελέσει τον σκοπό του σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα [20]. Είναι ένα γενικού σκοπού, οδηγούμενο από ρολόι και βασισμένο στη χρήση καταχωρητών ψηφιακό ολοκληρωμένο κύκλωμα που δέχεται δυαδικά δεδομένα σαν είσοδο, τα επεξεργάζεται σύμφωνα με εντολές που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη του και παρέχει τα αποτελέσματα σαν έξοδο.

Οι βασικές πράξεις που εκτελεί ένας μικροεπεξεργαστής είναι οι εξής [21]:

- Διαβάζει εντολές από τη μνήμη, τις αποκωδικοποιεί και τις εκτελεί.
- Ελέγχει το όλο σύστημα παρέχοντας τα απαραίτητα προς αυτό σήματα. Έτσι μεταφέρει δεδομένα από και προς τη μνήμη καθώς επίσης από και προς τις μονάδες εισόδου/εξόδου.
- Εκτελεί αριθμητικές και λογικές πράξεις.
- Ανταποκρίνεται σε σήματα διακοπών και ελέγχου.
- Διακλαδώνει την ομαλή ακολουθιακή ροή ενός προγράμματος σε άλλο σημείο, σε ρουτίνα, επιστρέφει από ρουτίνα και αποκρίνεται σε διακοπές από εξωτερικά σήματα ή από το πρόγραμμα.

Ο επεξεργαστής σε ένα ενσωματωμένο σύστημα πρέπει να παρέχει την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ για την εκτέλεση των διαδικασιών για τις οποίες σχεδιάστηκε. Παρόλο που φαίνεται προφανές, πολλές φορές υποεκτιμούνται διεργασίες που πρέπει να εκτελεστούν όσον αφορά το μέγεθος και την πολυπλοκότητα με αποτέλεσμα η ισχύς του επεξεργαστή να μην



επαρκεί για τις ανάγκες του συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, τα προβλήματα αυτά επιδεινώνονται από τις μετρήσεις που γίνονται ώστε να χαρακτηριστεί ο τύπος του επεξεργαστή, οι οποίες δεν αντιπροσωπεύουν τις λειτουργίες που χρειάζονται. Έτσι, ο επεξεργαστής λειτουργεί τελείως εκτός της κρυφής μνήμης (cache memory) με αποτέλεσμα το λειτουργικό σύστημα να μην είναι δυνατόν να «σηκώσει» το λογισμικό. Πέρα, όμως, από την επεξεργαστική ισχύ υπάρχουν και άλλα θέματα που πρέπει να ελεγχθούν κατά την επιλογή ενός επεξεργαστή όπως το κόστος, η κατανάλωση ισχύος και η διαθεσιμότητα στα κατάλληλα εξαρτήματα.

## Μνήμη

Η μνήμη αποτελεί βασική μονάδα ενός μικροπολογιστή. Δεν έχουμε όμως ένα είδος μνήμης. Έτσι, ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαζόμενου συστήματος μπορούν να συνδεθούν διαφορετικοί τύποι μνημών με τον ίδιο μικροεπεξεργαστή και να αποτελέσουν αυτό που λέμε σύστημα μνήμης.

Μνήμη ονομάζεται ένας μεγάλος αριθμός καταχωρητών που βρίσκονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και μοιράζονται ένα κοινό σύνολο εισόδου-εξόδου με μια μοναδική γραμμή ρολογιού. Η χωρητικότητά της καθορίζεται από τον μέγιστο αριθμό των bits ή των λέξεων που μπορεί να αποθηκεύσει. Αν θεωρήσουμε για παράδειγμα μια μνήμη με διεύθυνση μήκους 10 bits και λέξη 8 bits, η χωρητικότητά της είναι  $2^{10} * 8$  bits.

Ως προς τον τύπο μνημών, διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες, τις μνήμες ανάγνωσης-εγγραφής (RAM) και τις μνήμες περισσότερο εγγραφής (ROM). Η πρώτη κατηγορία χωρίζεται σε μνήμες στατικές (SRAM) και δυναμικές (DRAM). Στη δεύτερη κατηγορία μπορούμε να διακρίνουμε τις μνήμες μόνο ανάγνωσης ROM, τις μνήμες μιας εγγραφής PROM και τις μνήμες που μπορούν να σβηστούν και να ξαναγραφτούν με υπεριώδες φως EPROM [21].

Σε ένα μικροπολογιστικό σύστημα, στη μνήμη RAM αποθηκεύονται τα δεδομένα όπως οι μεταβλητές του προγράμματος, τα αποτελέσματα και γενικότερα κάθε δεδομένο που προκύπτει κατά την εκτέλεση του λογισμικού. Το πρόγραμμα χρειάζεται μνήμη για να αποθηκεύει τις μεταβλητές και να εκτελεί τις δομές του. Το μέγεθος της μνήμης για τις μεταβλητές είναι συνήθως μικρότερο από αυτό που χρειάζεται για να τρέξει τις συναρτήσεις και τις διαδικασίες. Επειδή συνήθως οι μνήμες RAM είναι πιο ακριβές από τις ROM τα ενσωματωμένα συστήματα, και κυρίως οι μικροελεγκτές, έχουν ενσωματωμένη μνήμη RAM ειδικά για την εκτέλεση του κώδικα. Επομένως, ο προγραμματιστής θα πρέπει να λάβει υπόψιν του το μέγεθος της μνήμης RAM και να το ελαχιστοποιήσει.

Στη μνήμη ROM, αποθηκεύεται το λογισμικό που έχει γραφτεί για τον μικροελεγκτή. Όπως είπαμε, ο μικροελεγκτής εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Έτσι, όταν γράψουμε τον κώδικα, τον «φορτώνουμε» στη μνήμη ROM και το πρόγραμμα μένει εκεί ακόμα και όταν ο μικροελεγκτής δεν λειτουργεί, μέχρι να το σβήσουμε ή να το επαναπρογραμματίσουμε.

## Απευθείας Προσπέλαση Μνήμης (DMA)

Η απευθείας προσπέλαση μνήμης επιτρέπει την ταχύτατη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων μεταξύ τμημάτων μνήμης ή μεταξύ εξωτερικών συσκευών E/E και μνήμης. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να μεταφέρουμε 100 MB δεδομένων από τον σκληρό δίσκο στη μνήμη του συστήματος. Έχουμε δύο επιλογές:

Στην πρώτη, ο επεξεργαστής μπορεί να διαβάσει ένα byte από τον ελεγκτή σκληρού δίσκου τη φορά, να το αποθηκεύει σε έναν καταχωρητή και κατόπιν να μεταφέρει το byte σε μια διεύθυνση της μνήμης. Για κάθε ανάγνωση ενός byte, ο επεξεργαστής πρέπει να κάνει ανάκληση εντολής (fetch), αποκωδικοποίηση της (decode), ανάγνωση των δεδομένων, ανάκληση της επόμενης εντολής, αποκωδικοποίηση της εντολής και τέλος αποθήκευση του δεδομένου στη μνήμη. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για κάθε byte πληροφορίας που πρέπει να μεταφερθεί από τον σκληρό δίσκο στη μνήμη.

Στη δεύτερη επιλογή, τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν με απευθείας προσπέλαση στη μνήμη (DMA). Ένα εξειδικευμένο κύκλωμα ελέγχου απευθείας πρόσβασης στη μνήμη (DMA controller) εκτελεί ταχύτατα την μεταφορά των δεδομένων από τον σκληρό δίσκο στη μνήμη και αντίστροφα. Η παράκαμψη της χρήσης του επεξεργαστή πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός διαύλου μεταξύ συσκευής E/E και της μνήμης. Συνεπώς, τα δεδομένα μεταφέρονται απευθείας, χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση εντολών από τον επεξεργαστή για κάθε δεδομένο που μεταφέρεται (byte, λέξη ή και ολόκληρο block δεδομένων).

## Περιφερειακές συσκευές

Ένα ενσωματωμένο σύστημα, χρειάζεται να επικοινωνεί με τον έξω κόσμο για να μπορεί να φέρνει εις πέρας κάποιες λειτουργίες του. Αυτό αναλαμβάνουν οι περιφερειακές του συσκευές ή συσκευές εισόδου-εξόδου (IO) από τις οποίες θα περιγραφούν συνοπτικά τα *χρονόμετρα/μετρητές*, οι *μετατροπείς A/D και D/A*, και τα *LED's*.

Τα χρονόμετρα (timers) και οι μετρητές (counters) αποτελούνται από λογική αθροιστών με καταχωρητές για να κρατούν τη τρέχουσα τιμή με μια είσοδο προσαύξησης η οποία προσθέτει ένα στην τρέχουσα τιμή του καταχωρητή. Ωστόσο, ένα χρονόμετρο έχει την τη μέτρηση του συνδεδεμένη σε ένα περιοδικό σήμα ρολογιού για να μετρά τα χρονικά διαστήματα ενώ ένας μετρητής έχει την είσοδο μέτρησης του συνδεδεμένη σε ένα μη περιοδικό σήμα για να μετρά τον αριθμό εμφανίσεων κάποιου εξωτερικού γεγονότος. Επειδή η ίδια λογική μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δυο περιπτώσεις, η συσκευή ονομάζεται μετρητής/χρονόμετρο.

Οι αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπείς (ADCs) και οι ψηφιακό σε αναλογικό μετατροπείς (DACs) χρησιμοποιούνται συχνά για να διασυνδέσουν μη ψηφιακές συσκευές σε ενσωματωμένα συστήματα. Συνήθως είναι κυκλώματα ενσωματωμένα στον μικροελεγκτή αλλά κάποιες φορές διασυνδέονται και εξωτερικά. Είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός ενσωματωμένου συστήματος καθώς επιτρέπουν την ψηφιοποίηση αναλογικών σημάτων (φυσικά σήματα) και την επεξεργασία/αποθήκευση/αποστολή τους στη συνέχεια από το ψηφιακό σύστημα του ενσωματωμένου.

Οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι ή κοινώς LEDs συχνά χρησιμοποιούνται για απλές ενδείξεις, ενώ πίνακες από LEDs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πιο πολύπλοκες ενδείξεις. Με απλή αρχή λειτουργίας, παρεμβάλλεται μια αντίσταση μεταξύ του ακροδέκτη εξόδου και του LED προκειμένου να απορροφηθεί η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στη τάση της ψηφιακής εξόδου και τα 0,7 V πτώση τάσης πάνω στο αναμμένο LED. Όταν η ψηφιακή έξοδος πηγαίνει στο 0, η τάση του LED είναι στην εκτός λειτουργίας περιοχή της συσκευής με αποτέλεσμα να μην ανάβει το LED.

Πέρα από τα ανωτέρω, μπορούμε να συμπεριλάβουμε και περιφερειακά όπως πληκτρολόγιο και οθόνη αλλά και τα σημαντικά General Purpose Input Output pins (GPIO Pins) τα οποία μας επιτρέπουν να κάνουμε τη φυσική σύνδεση σημάτων από τον εξωτερικό κόσμο στον μικροελεγκτή.

## Διεπαφή χρήστη

Τα ενσωματωμένα καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος από συστήματα χωρίς καμία διεπαφή μέχρι συστήματα με πολύπλοκες γραφικές διεπαφές που μοιάζουν με τα γραφικά περιβάλλοντα σύγχρονων ηλεκτρονικών συστημάτων. Πιο εξελιγμένες συσκευές, χρησιμοποιούν οθόνες αφής ή και κουμπιά (buttons) για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα προσφέροντας ευελιξία. Επίσης αρκετά ενσωματωμένα χρησιμοποιούν απομακρυσμένες διεπαφές μέσω επικοινωνιακών πρωτοκόλλων (όπως RS-232 ή το I2C) ή ακόμα και σύνδεση δικτύου (Ethernet). Αυτό προσφέρει τεράστιες δυνατότητες επέκτασης των λειτουργιών ενός συστήματος, ενώ ταυτόχρονα ρίχνει και το κόστος λειτουργίας, αντικαθιστώντας την οθόνη από έναν web server.

## Οι επεξεργαστές ARM

Οι επεξεργαστές ARM είναι το πιο διαδεδομένο εξάρτημα ενός ενσωματωμένου συστήματος. Η πρώτη ερμηνεία των αρχικών είναι Acorn RISC Machine, ενώ η μεταγενέστερη αφορά τον όρο Προχωρημένη Μηχανή RISC (Advanced RISC Machine) και κατασκευάζονται από την εταιρία ARM Holdings. Ακολουθούν αρχιτεκτονική συνόλου εντολών RISC (Reduced Instruction Set Computing) και αποτελούν τη δημοφιλέστερη αρχιτεκτονική συστημάτων 32-bit. Αυτό σημαίνει πως οι επεξεργαστές ARM χρειάζονται πολύ λιγότερα transistors από την τυπική CISC (Complex Instruction Set Computing) που χρησιμοποιούν οι επεξεργαστές των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό μειώνει το κόστος, την θερμοκρασία του επεξεργαστή και την κατανάλωση, με αποτέλεσμα η χρήση τους να είναι κατάλληλη για ελαφριές, κινητές εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρία – όπως έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), tablets, notepads, PDAs κá.

## Αρχιτεκτονική RISC

Η υπολογιστική μειωμένου συνόλου εντολών (Reduced Instruction Set Computing) ή αλλιώς RISC, είναι μια στρατηγική σχεδιασμού CPU που βασίζεται στην ιδέα ότι ένα απλο-

ποημένο σύνολο εντολών παρέχει υψηλότερη απόδοση όταν συνδυάζεται με αρχιτεκτονική η οποία εκτελεί τις εντολές σε λιγότερους κύκλους μηχανής [23].

Τα στοιχεία που διατηρήθηκαν στον ARM είναι τα εξής:

- Αρχιτεκτονική φόρτωσης/αποθήκευσης (load/store). Οι εντολές οι οποίες επεξεργάζονται τα δεδομένα λειτουργούν κατευθείαν στους καταχωρητές του επεξεργαστή και είναι ξεχωριστές από τις εντολές προσπέλασης της μνήμης. Αντίθετα με τους CISC επεξεργαστές που επιτρέπουν την προσπέλαση τιμών της μνήμης ενώ γίνεται η επεξεργασία των τιμών.
- Περιλαμβάνει 16 καταχωρητές των 32 bits με σταθερό μέγεθος εντολών για εύκολη αποκωδικοποίηση και διοχέτευση (pipeline), με μειονέκτημα την μικρότερη πυκνότητα κώδικα. Αργότερα με την εισαγωγή του συνόλου εντολών Thumb το τελευταίο τροποποιήθηκε και αυξήθηκε η πυκνότητα του κώδικα.
- Ο χρόνος εκτέλεσης των εντολών γίνεται σε έναν κύκλο ρολογιού.

## Αρχιτεκτονική ARM

Από το 1995 μέχρι σήμερα, το ARM Architecture Reference Manual είναι η βασική πηγή τεκμηρίωσης πάνω στην αρχιτεκτονική του επεξεργαστή ARM και του συνόλου εντολών του, ενώ διακρίνει μεταξύ διεπαφών που όλοι οι επεξεργαστές πρέπει να υποστηρίζουν (όπως η σημασία των εντολών) και λεπτομερειών υλοποίησης, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν ανά περίπτωση. Η αρχιτεκτονική έχει εξελιχθεί και, αρχίζοντας από τη σειρά πυρήνων Cortex, ορίζονται τρία «προφίλ» ("profiles"):

- «Εφαρμογής» ("Application"): σειρά Cortex-A
- «Πραγματικού χρόνου» ("Real-time"): σειρά Cortex-R
- «Μικροελεγκτή» ("Microcontroller"): σειρά Cortex-M

## Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι απαραίτητα για την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τα περιφερειακά ολοκληρωμένα κυκλώματα ή με κάποιο άλλο υπολογιστικό σύστημα όπως ένας εξυπηρετητής. Το κύριο πρωτόκολλο για επικοινωνία μέσω διαδικτύου είναι το TCP/IP ενώ θα γίνει αναφορά και στο πρωτόκολλο MQTT.

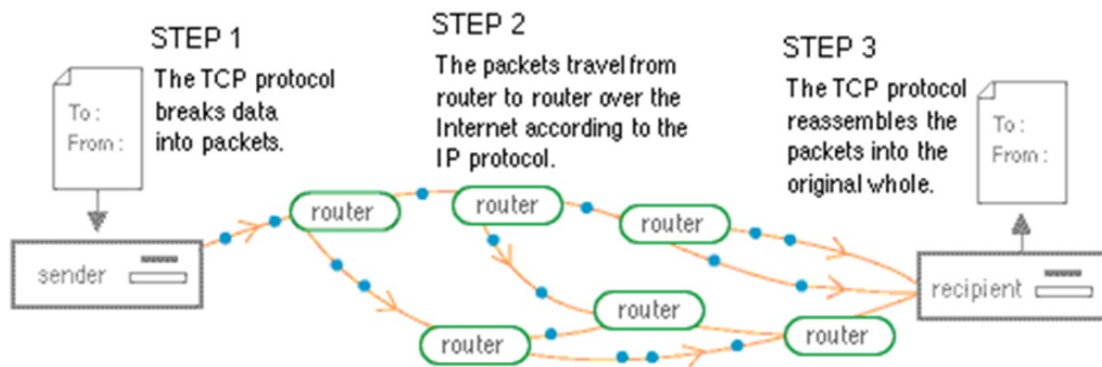
## TCP/IP

Ο βασικός στόχος της σχεδίασης του πρωτοκόλλου TCP/IP ήταν η ικανότητα διασύνδεσης πολλών δικτύων με διαφανή τρόπο. Χρησιμοποιεί το όνομα των δυο βασικών του πρωτοκόλλων, TCP και IP ορίστηκε αρχικά στο έγγραφο των Cerf και Kahn το 1974 [24].

Η ανάγκη για την ανάπτυξη του έγινε όταν το ARPANET, το οποίο αρχικά ήταν ένα ερευνητικό δίκτυο με ανάδοχο το υπουργείο άμυνας των ΗΠΑ, έφτασε να διασυνδέει εκατοντάδες πανεπιστήμια και κρατικές εγκαταστάσεις. Όταν αργότερα προστέθηκαν δορυφορικά δίκτυα και δίκτυα ραδιοκυμάτων, τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα δυσκολεύτηκαν να συνεργαστούν με τα δίκτυα αυτά.

Το επίπεδο διαδικτύου είναι ο ακρογωνιαίος λίθος ολόκληρης της αρχιτεκτονικής. Η δουλειά του είναι να επιτρέπει σε υπολογιστές να εισάγουν τα πακέτα τους σε οποιοδήποτε δίκτυο και αυτά να ταξιδεύουν ανεξάρτητα προς τον προορισμό τους. Τα πακέτα μπορούν να φτάσουν και με διαφορετική σειρά από αυτήν που στάλθηκαν. Το επίπεδο διαδικτύου ορίζει μια επίσημη μορφή για τα πακέτα και ένα επίσημο πρωτόκολλο που ονομάζεται πρωτόκολλο διαδικτύου ή IP (Internet Protocol). Η δουλειά του είναι να παραδίδει τα πακέτα εκεί που πρέπει να πάνε.

Το επίπεδο που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο διαδικτύου στο πρωτόκολλο TCP/IP συνήθως ονομάζεται επίπεδο μεταφοράς. Έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει στους υπολογιστές προέλευσης και προορισμού να συνομιλούν. Το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης ή TCP (Transmission Control Protocol) είναι ένα αξιόπιστο συνδεσμολογικό πρωτόκολλο το οποίο επιτρέπει σε μια ροή byte που προέρχεται από μια μηχανή να παραδίδεται χωρίς σφάλματα σε οποιαδήποτε άλλη μηχανή στο διαδίκτυο. Το πρωτόκολλο τεμαχίζει την εισερχόμενη ροή byte σε διακριτά μηνύματα και μεταβιβάζει το καθένα από αυτά στο επίπεδο του διαδικτύου. Στον προορισμό, η διεργασία-παραλήπτης του TCP ανασυναρμολογεί τα μηνύματα που λαμβάνει σε μια ροή εξόδου. Το TCP χειρίζεται επίσης και τον έλεγχο ροής εξασφαλίζοντας ότι ένας γρήγορος αποστολέας δεν θα μπορεί να κατακλύσει έναν αργό παραλήπτη με περισσότερα μηνύματα απ'όσο μπορεί αυτός να χειριστεί.



Σχήμα 3.2: Τρόπος λειτουργίας του πρωτοκόλλου TCP/IP

## MQTT

Το MQTT είναι ένα Machine-to-machine (M2M)/"Internet of Things" πρωτόκολλο συνδεσιμότητας. Σχεδιάστηκε σαν ένα υπερβολικά «ελαφρύ» σύστημα μετάδοσης μηνυμάτων του τύπου δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe). Είναι χρήσιμο για συνδέσεις με απομακρυσμένες περιοχές όπου απαιτείται συμπυκνωμένος κώδικας και/ή υπάρχει περιορισμένο

εύρος ζώνης δικτύου. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται σε αισθητήρες που επικοινωνούν με δορυφόρο ή σε εφαρμογές αυτοματισμών σπιτιού. Είναι επίσης ιδανικό για φορητές εφαρμογές λόγω του μικρού του μεγέθους, την χαμηλή κατανάλωση ισχύος, τα ελαχιστοποιημένα πακέτα δεδομένων και την αποτελεσματική διανομή της πληροφορίας σε έναν ή πολλούς δέκτες.

Με λίγα λόγια, είναι ιδανικό όταν θέλουμε να μεταφέρουμε πληροφορία με το ελάχιστο κόστος γι'αυτό και χρησιμοποιείται κατα κόρον σε «έξυπνες» εφαρμογές. Η χρήση του είναι σχετικά απλή και βασίζεται στην ιδέα ότι ένας ή πολλοί «πελάτες» (clients) μπορούν να «δημοσιεύσουν» (publish) τα μηνύματά τους σε ένα συγκεκριμένο «θέμα» (topic) στον εξυπηρετητή (broker). Στη συνέχεια, άλλοι πελάτες πέρα από τον εξυπηρετητή μπορούν να «ακούνε» σε αυτό το topic και να λαμβάνουν τα δημοσιευμένα μηνύματα και/ή να δημοσιεύουν ταυτόχρονα δικά τους.

Στη συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα υλοποίησης ενός πελάτη στη γλώσσα Python:

```
import paho.mqtt.client as mqtt

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print("Connected with result code "+str(rc))

    #client subscribes to all topics under "$SYS" tree
    client.subscribe("$SYS/#")

def on_message(client, userdata, msg):
    #print the received message from the subscribed topic
    print(msg.topic+" "+str(msg.payload))

#client definition
client = mqtt.Client()
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message

#connect to broker (localhost) in port 1883
client.connect("localhost", 1883, 60)

client.loop_forever()
```

## Μικροελεγκτές και λογισμικό

Η διευκόλυνση που μας επιφέρει η ψηφιακή λογική και ο ψηφιακός επεξεργαστής, υφίσταται στην ευελιξία να μπορούμε να τον προγραμματίσουμε για οποιαδήποτε εφαρμογή. Ο επεξεργαστής, η μνήμη και τα περιφερειακά ανήκουν στο υλικό (hardware) του μικροελεγκτή. Το

υλικό όμως θα ήταν άχρηστο αν δεν του είχαμε δώσει εντολές να εκτελέσει. Το σύνολο εντολών που εκτελεί ένας επεξεργαστής σε συνεργασία με τα περιφερειακά του δίνεται από τον χρήστη με τη βοήθεια εργαλείων δημιουργημένων γιαυτόν τον σκοπό.

## IDE

Το IDE (Integrated Development Environment) είναι μια εφαρμογή λογισμικού που παρέχει αρκετές ευκολίες στους προγραμματιστές για τη δημιουργία λογισμικού. Ένα IDE συνήθως περιέχει έναν επεξεργαστή κειμένου (πηγαίου κώδικα), αυτοματοποιημένα εργαλεία για το «χτίσιμο» της εφαρμογής (μετατροπή της σε δυαδικό κώδικα ώστε να είναι εφικτή η εκτέλεση της από τον επεξεργαστή) και έναν debugger, δηλαδή ένα εργαλείο που προσφέρει πολλές διευκολύνσεις στον εντοπισμό σφαλμάτων στον κώδικα. Τα πιο πολλά σύγχρονα IDEs παρέχουν επίσης και «έξυπνη» συμπλήρωση κώδικα αλλά και εργαλεία για πιο εύκολη κατασκευή ενός γραφικού περιβάλλοντος.

Ο βασικός στόχος ενός IDE είναι να περιέχει όσα χρειάζεται ο προγραμματιστής σε ένα μόνο λογισμικό. Έτσι για παράδειγμα, χωρίς τη χρήση κάποιου IDE, θα έγραφε τον κώδικα του σε κάποιον text editor όπως ο vi του linux, θα χρησιμοποιούσε για τη μετάφραση του το gcc ή το make ξεχωριστά, τώρα, όλα αυτά τα εργαλεία ολοκληρώνονται σε ένα περιβάλλον που η χρήση του γλυτώνει πολύτιμο χρόνο από τον προγραμματιστή. Τα πιο δημοφιλή IDEs αυτή τη στιγμή είναι το Eclipse και το Visual Studio.

## STMCube

Το STMCube [27] είναι μια πρωτοβουλία της STMicroelectronics και αποσκοπεί στο να διευκολύνει τους προγραμματιστές προσφέροντας δυνατότητας αυτόματης παραγωγής κώδικα και συνεπώς μειώνει τον χρόνο και το κόστος που απαιτείται από αυτούς. Αποτελείται από δυο βασικά υπό-προγράμματα, το STMCubeMX και τη πλατφόρμα STMCubeF4 (προορισμένη για την F4 γενιά μικροελεγκτών της STMicroelectronics).

Το STMCubeMX είναι ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο επιτρέπει να γίνει η παραγωγή όλου του πηγαίου κώδικα που χρειάζεται ένας μικροελεγκτής για να λειτουργήσει. Ο προγραμματιστής, ορίζει γραφικά τη διαμόρφωση που θέλει να έχει ο επεξεργαστής του, δηλαδή ποια pins θέλει να χρησιμοποιήσει για ποιον σκοπό και ποια περιφερειακά χρειάζεται συσχετίζοντάς τα με τα επιθυμητά pins. Στη συνέχεια, διαμορφώνει το ρολόι, δηλαδή τη συχνότητα του καθώς και τα ρολόγια για τα περιφερειακά που έχει επιλέξει. Τέλος, επιλέγει λειτουργίες όπως πιο συγκεκριμένες ρυθμίσεις για τα περιφερειακά ή για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος.

Όταν ολοκληρωθεί η διαμόρφωση του μικροελεγκτή, το STMCubeMX σε συνεργασία με το STMCubeF4, παράγει τον πηγαίο κώδικα που προορίζεται να αποθηκευτεί στην μνήμη ROM του μικροελεγκτή. Αυτός ο κωδικας περιλαμβάνει όλους τους οδηγούς (drivers) αλλά και όλες τις ρυθμίσεις που έχουν οριστεί γραφικά ώστε ο μικροελεγκτής να είναι έτοιμος για λειτουργία. Εννοείται πως μέσα σε αυτόν τον κώδικα, υπάρχουν "user sections", δηλαδή περιοχές για να γράψει ο προγραμματιστής δικό του κώδικα που θα κάνει την εφαρμογή να

ανταποκρίνεται στις δικές του απαιτήσεις.

## RTOS

Το RTOS προέρχεται από τα αρχικά Real Time Operating System (Λειτουργικό σύστημα Πραγματικού Χρόνου) και ο σκοπός του είναι η εξυπηρέτηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου που επεξεργάζονται τα δεδομένα τη στιγμή που εμφανίζονται, τυπικά χωρίς καθυστέρηση. Είναι είτε οδηγούμενα από γεγονότα είτε μοιρασμένου χρόνου. Τα πρώτα αλλάζουν μεταξύ των διεργασιών με βάση τις προτεραιότητες που έχει η καθεμία ενώ τα δεύτερα με βάση τις διακοπές του ρολογιού.

Το βασικό χαρακτηριστικό των RTOS είναι η συνέπεια που προσφέρουν σχετικά με τη διάρκεια της περιόδου από όταν δεχτούν μέχρι και να ολοκληρώσουν μια συγκεκριμένη εργασία. Ένα σύστημα πραγματικού χρόνου είναι ένα υπολογιστικό σύστημα που δεν απαιτεί μόνο να είναι «σωστά» τα αποτελέσματα αλλά και να παράγονται μέσα σε μια συγκεκριμένη προθεσμία. Τα αποτελέσματα που παράγονται μετά τη λήξη της προθεσμίας - ακόμα και αν είναι σωστά - μπορεί να μην έχουν πραγματική αξία. Για αυτά τα συστήματα, πολλοί παραδοσιακοί αλγόριθμοι πρέπει να τροποποιηθούν, έτσι ώστε να ικανοποιούν τις αυστηρές χρονικές προθεσμίες [28].

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος πραγματικού χρόνου είναι τα εξής:

- Ενός σκοπού
- Μικρού μεγέθους
- Μαζικής παραγωγής χωρίς μεγάλο κόστος
- Συγκεκριμένων απαιτήσεων χρονισμού

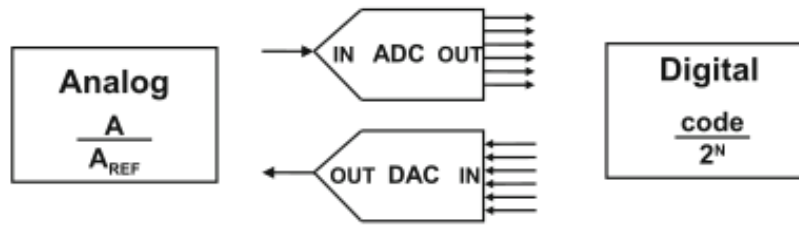
## Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Ο μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό είναι ένα βασικό κομμάτι της σύγχρονης επεξεργασίας σήματος, αφού συνδέει τον φυσικό κόσμο με τους ψηφιακούς υπολογιστές. Χάρη σε αυτήν την εξέλιξη απολαμβάνουμε τη πρόοδο που έχει επέλθει τα τελευταία τριάντα χρόνια, από τη διευκόλυνση στις επικοινωνίες με τα κινητά τηλέφωνα μέχρι τις ιατρικές συσκευές και το διαδίκτυο.

Η αναλογική επεξεργασία που γίνεται με απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα φτάνει για μια πληθώρα περιπτώσεων. Με την εμφάνιση όμως των ψηφιακών κυκλωμάτων και των μικροεπεξεργαστών, η επεξεργασία ψηφιακής πληροφορίας καθίσταται πιο εύκολη και πολύ πιο ευρεία εφαρμογής από την αναλογική.

Η αρχή λειτουργίας είναι ότι ένα αναλογικό σήμα έχει τιμές οι οποίες μας είναι γνωστές σε σύγκριση με μια τιμή αναφοράς που έχουμε για κάποιο φυσικό μέγεθος. Με τη μετατροπή σε ψηφιακό, αυτή η τιμή αντικατοπτρίζεται σε ένα εύρος αριθμών, ανάλογα με το διαθέσιμο μήκος λέξης του μετατροπέα. Με τον ίδιο τρόπο, τα ψηφιακά σήματα είναι αριθμητικές ποσότητες





Σχήμα 3.3: Στην μετατροπή ψηφιακού σήματος σε αναλογικό, συνδέεται ο αναλογικός κόσμος και οι φυσικές ποσότητες με τον ψηφιακό κόσμο των αριθμών και των bits

που έχουν σημασία για τον φυσικό κόσμο μόνο όταν υπάρχει μια συνθήκη που σχετίζει το εύρος των ψηφιακών αριθμών σε μια φυσική τιμή αναφοράς [25].

Οι τρεις κύριες λειτουργίες που χαρακτηρίζουν την μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό είναι:

- Η μετάβαση από συνεχές σε διακριτό χρόνο
- Διακριτοποίηση του πλάτους του σήματος
- Η σχέση μεταξύ φυσικών και αριθμητικών μεγεθών

### Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία προδιορίζει τις τιμές ενός αναλογικού σήματος ανά ένα συγκεκριμένο χρόνο  $T_s$ . Χωρίζει τον συνεχές χρόνο, παίρνοντας τιμές του σήματος ανά συγκεκριμένους διακριτούς χρόνους.

$$t = \frac{n}{f_s} = nT_s, n = -\infty, \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots, \infty \quad (3.1)$$

Η δειγματοληψία συνήθως μετατρέπει ένα χρονικά συνεχές αναλογικό σήμα σε ένα χρονικά διακριτό αναλογικό σήμα. Η μαθηματική περιγραφή της γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης Dirac. Η συνάρτηση Dirac  $\delta(t)$ , είναι μια μαθηματική συνάρτηση που έχει την ιδιότητα η τιμή του ολοκληρώματός της με μια άλλη συνάρτηση, να μετατοπίζει αυτήν στο σημείο που βρίσκεται η  $\delta(t)$ :

$$\int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t - t_0) dt = f(t_0) \quad (3.2)$$

Μια ακολουθία παλμών Dirac που ισαπέχουν μεταξύ τους κατά μια χρονική περίοδο  $T_s$  προσδιορίζει το χρονικό πλαίσιο που χρειάζεται για τη δειγματοληψία:

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta(t - nT_s) \quad (3.3)$$

Κάνοντας χρήση μετασχηματισμών Fourier, προκύπτει ότι το άθροισμα των συναρτήσεων Dirac στο πεδίο της συχνότητας σαν διακριτές σειρές Fourier είναι το ανάλογο των σειρών Dirac στο πεδίο του χρόνου:

$$\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \delta(t - nT_s) \iff \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \delta(f - kf_s) \quad (3.4)$$

Με λίγα λόγια, ο μετασχηματισμός Fourier μια περιοδικής κρουστικής παλμοσειράς στον χώρο του χρόνου, είναι μια περιοδική κρουστική παλμοσειρά στον χώρο της συχνότητας.

Ένα αναλογικό σήμα δειγματοληπτείται σε διακριτά χρονικά διαστήματα,  $t_s = \frac{1}{f_s}$ , τα οποία πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά για να εξασφαλιστεί μια ακριβής αναπαράσταση του αρχικού αναλογικού σήματος. Είναι προφανές, ότι όσο περισσότερα δείγματα λαμβάνονται (δηλαδή όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός της δειγματοληψίας), τόσο πιο ακριβής είναι η ψηφιακή αναπαράσταση, διαφορετικά χάνονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το σήμα. Το κριτήριο Nyquist ορίζει ότι η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα που περιέχεται στο σήμα. Εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μικρότερη από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας του αναλογικού σήματος, τότε θα συμβεί το φαινόμενο aliasing.

### Κυκλώματα Sample-and-Hold

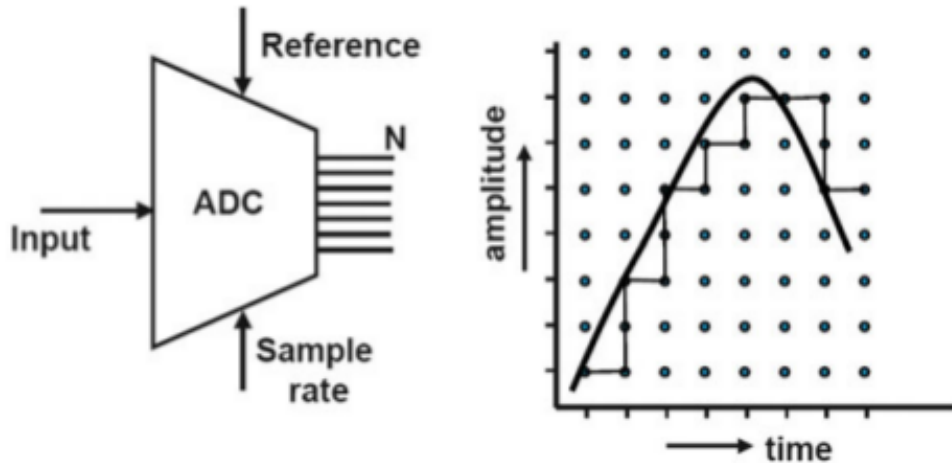
Τα κυκλώματα sample-and-hold αναλαμβάνουν να εκτελέσουν την δειγματοληψία του σήματος. Στην απλούστερη μορφή του αποτελείται από έναν διακόπτη και έναν πυκνωτή. Κατά τη περίοδο αγωγής του διακόπτη, το σήμα στον πυκνωτή ακολουθεί το σήμα εισόδου. Όταν ανοίξει ο διακόπτης, το κύκλωμα κρατάει τη τιμή του σήματος τη στιγμή που άνοιξε. Το κύκλωμα, μπορεί να κρατήσει τη τιμή στην έξοδο του για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και με αυτόν τον τρόπο να επιτρέπει την επανειλημμένη χρήση του σήματος κατά τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό.

### Κβαντοποίηση

Η κβαντοποίηση του σήματος είναι η δεύτερη κύρια διαδικασία κατά τη μετατροπή. Το ψηφιακό σήμα είναι μια ομάδα από bits. Τα bits παίρνουν δυο τιμές, 0 και 1. Το πλήθος των bits που χρειάζονται για να φτιάξουν μια «λέξη» λέγεται «μήκος λέξης». Η δυαδική αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος περιορίζεται από το μήκος της λέξης και το αναλογικό σήμα πρέπει να στρογγυλοποιηθεί στη πλησιέστερη δυαδική αναπαράσταση.

Κατά τη διάρκεια της κβαντοποίησης το επίπεδο του σήματος συγκρίνεται με ένα πλαίσιο τιμών αναφοράς (σχήμα 3.4). Το πλαίσιο αυτό είναι περιορισμένο και άρα το σήμα στρογγυλοποιείται στην πλησιέστερη δυαδική τιμή. Επομένως, κάθε μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό εισάγει κάποια σφάλματα λόγω της στρογγυλοποίησης. Αυτό το σήμα σφάλματος είναι γνωστό και ως σφάλμα κβαντοποίησης.

Οι περισσότερες απεικονίσεις διακριτού πλάτους χρησιμοποιούν το δυαδικό σύστημα. Έτσι, το πλήθος των επιπέδων του ψηφιακού σήματος θα είναι μια δύναμη του «2». Αυτή η δύναμη «N», λέγεται ανάλυση της μετατροπής και προσδιορίζει το πλήθος των επιπέδων στα οποία μπορεί να χωριστεί το πλάτος του αναλογικού σήματος ως  $2^N$ . Έτσι για παράδειγμα



Σχήμα 3.4: Ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό στρογγυλοποιεί το πλάτος του συνεχούς σήματος στη πλησιέστερη τιμή της κλίμακας διακριτού πλάτους

αν έχουμε ανάλυση τριών bits, τότε το κβαντοποιημένο σήμα θα μπορεί να πάρει οχτώ τιμές, από 000 έως 111.

### Αρχιτεκτονικές μετατροπέων

Υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διάφορων ειδών μετατροπέων αναλογικού σε ψηφιακό. Μπορούμε να τους υποδιαιρέσουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες: Παράλληλης αναζήτησης, ακολουθιακής αναζήτησης και γραμμικής αναζήτησης.

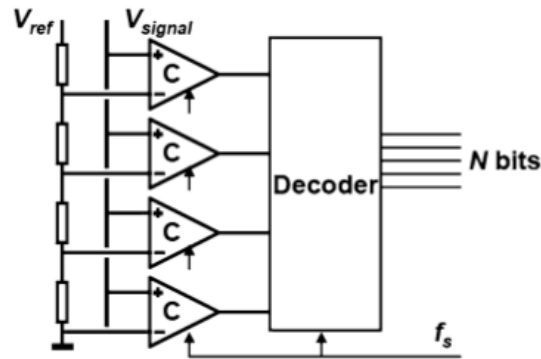
#### Παράλληλης αναζήτησης ή flash ADC

Αυτοί οι μετατροπέες εκτελούν τη μετατροπή σε μια στιγμή στον χρόνο. Το σήμα εισόδου και όλα τα απαιτούμενα επίπεδα αναφοράς πρέπει να είναι παρόντα εκείνη τη στιγμή. Αφού μιλάμε για παράλληλα, το κύκλωμα sample and hold δεν είναι υποχρεωτικό. Επίσης, χαρακτηριστικά του είναι η μεγάλη ταχύτητα της μετατροπής και μέτρια ακρίβεια.

Οι full-flash μετατροπέες χρησιμοποιούνται σαν ξεχωριστές συσκευές όταν θέλουμε να δώσουμε βάση στην μεγάλη ταχύτητα μετατροπής ή σαν συστατικά μέρη άλλων αρχιτεκτονικών μετατροπέων. Αποτελείται από μια σειρά αντιστάσεων όπου οι κόμβοι της κάθε μίας συνδέονται στην είσοδο  $2^N - 1$  συγκριτών, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5. Ένας αποκωδικοποιητής συνδυάζει τις εξόδους των συγκριτών σε μία ψηφιακή λέξη εξόδου.

Το σήμα εισόδου συγκρίνεται με όλα τα επίπεδα αναφοράς ταυτόχρονα. Αν είναι μεγαλύτερο από τη τάση που δίνεται από τους διαιρέτες με τις αντιστάσεις, ο συγκριτής βγάζει σαν έξοδο άσσο ενώ στην αντίθετη περίπτωση, μηδέν.

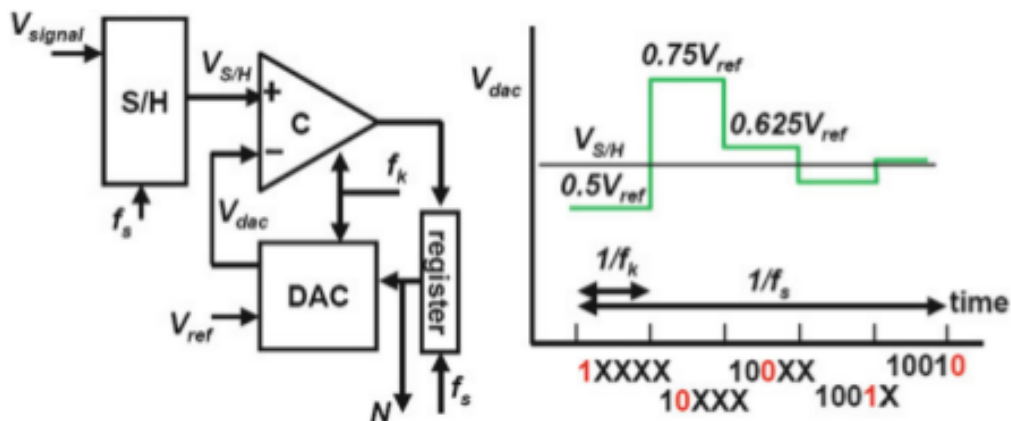
Οι full-flash μετατροπέες, είναι οι πιο γρήγοροι μετατροπέες που υπάρχουν. Η πολυπλοκότητα τους όμως και η κατανάλωση ισχύος τους αυξάνουν όσο αυξάνεται η ανάλυση τους, γι'αυτό και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ανάλυση (μέχρι 8 bits).



Σχήμα 3.5: Ο full-flash μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό

### Successive Approximation μετατροπείς (SAR)

Σε αντίθεση με τον full-flash μετατροπέα που χρειάζεται έναν κύκλο ρολογιού για να εκτελέσει τη μετατροπή, ή τον γραμμικό μετατροπέα ο οποίος χρειάζεται  $2^N$  κύκλους, ο SAR μετατροπέας θα μετατρέψει το σήμα σε  $N$  κύκλους.



Σχήμα 3.6: Ο SAR μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό

Ένας SAR μετατροπέας χρησιμοποιεί έναν συγκριτή για να περιορίσει διαδοχικά ένα εύρος που περιέχει την τάση εισόδου. Σε κάθε διαδοχικό στάδιο, ο μετατροπέας συγκρίνει την τάση εισόδου με την έξοδο ενός D/A μετατροπέα που θα αντιπροσωπεύει το μέσο του επιλεγμένου εύρους τάσης. Σε κάθε βήμα στη διαδικασία αυτή, η προσέγγιση αποθηκεύεται σε έναν successive-approximation καταχωρητή (SAR). Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε μια τάση εισόδου 6,3 V, ενώ το αρχικό εύρος είναι 0 έως 16 V. Για την πρώτη βαθμίδα, η είσοδος 6,3 V συγκρίνεται με τα 8 V (το μέσο του εύρους 0-16 V). Ο συγκριτής αναφέρει ότι η τάση εισόδου είναι μικρότερη από 8 V, έτσι ώστε ο SAR ενημερώνεται για να περιορίσει το εύρος σε 0-8 V. Για το δεύτερο βήμα, η τάση εισόδου συγκρίνεται με 4 V (το μέσο του νέου εύρους 0-8 V). Ο συγκριτής αναφέρει ότι η τάση εισόδου είναι πάνω από 4 V, οπότε ο SAR θα ενημερωθεί ώστε να αντικατοπτρίζει την τάση εισόδου είναι στο εύρος 4-8 V. Για το τρίτο βήμα, η τάση

εισόδου συγκρίνεται με 6 V (στα μισά του εύρους μεταξύ 4 και 8 V). Ο συγκριτής αναφέρει η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από 6 V, και το εύρος αναζήτησης γίνεται 6-8 V. Τα βήματα συνεχίζονται έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή ανάλυση.

### Ramp-compare ADC

Ένας ramp-compare μετατροπέας παράγει ένα πριονωτό σήμα το οποίο πηγαίνει προς τα πάνω ή προς τα κάτω και στη συνέχεια, γρήγορα επιστρέφει στο μηδέν. Όταν ξεκινά η κλίση, ένα χρονόμετρο αρχίζει να μετρά. Όταν η τάση ράμπας αντιστοιχιστεί με την είσοδο, ένας συγκριτής πυροδοτείται και η τιμή χρονομέτρου καταγράφεται. Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς απαιτούν το λιγότερο αριθμό των τρανζίστορ. Ο χρόνος της ράμπας είναι ευαίσθητος ως προς τη θερμοκρασία, επειδή το κύκλωμα πυροδότησης συχνά αποτελείται από έναν απλό ταλαντωτή. Υπάρχουν δύο λύσεις ως προς αυτό. Πρώτον, η χρησιμοποίηση ένα χρονισμένου μετρητή ο οποίος θα οδηγεί έναν D/A μετατροπέα και στη συνέχεια ένας συγκριτής θα διατηρεί την τιμή του μετρητή και δεύτερον, η βαθμονόμηση της χρονομετρημένης ράμπας. Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου είναι ότι συγκρίνοντας ένα δεύτερο σήμα απαιτείται απλά ένας ακόμα συγκριτής και ένας καταχωρητής για αποθήκευση της τιμής της τάσης. Ένα πολύ απλό παράδειγμα (μη γραμμικό) μπορεί να υλοποιηθεί με ένα μικροελεγκτή και μια αντίσταση και έναν πυκνωτή.

### Wilkinson ADC

Οι μετατροπείς Wilkinson βασίζονται στη σύγκριση της τάσης εισόδου με την τάση που παράγεται από έναν πυκνωτή φόρτισης. Ο πυκνωτής επιτρέπεται να φορτιστεί μέχρι τάση του είναι ίση με το πλάτος του παλμού εισόδου. Ένας συγκριτής καθορίζει πότε έχει φτάσει αυτή η κατάσταση. Στη συνέχεια, ο πυκνωτής αφήνεται να αποφορτιστεί γραμμικά και παράγει μία τάση ράμπας. Στο σημείο όπου ο πυκνωτής αρχίζει να εκφορτίζεται, ένας παλμός πύλης εκκινείται. Ο παλμός πύλης παραμένει έως ότου ο πυκνωτής αποφορτιστεί πλήρως. Έτσι, η διάρκεια του παλμού πύλης είναι ευθέως ανάλογη με το πλάτος του παλμού εισόδου. Ο παλμός οδηγεί μία γραμμική πύλη που δέχεται παλμούς από έναν ταλαντωτή υψηλών συχνοτήτων. Ενώ η πύλη είναι ανοικτή, ένας διακριτός αριθμός παλμών ρολογιού περνούν μέσω της πύλης και υπολογίζονται από τον καταχωρητή διευθύνσεων. Ο χρόνος για τον οποίο η πύλη είναι ανοικτή είναι ανάλογος με το πλάτος του παλμού εισόδου, έτσι ο αριθμός των παλμών ρολογιού που καταχωρείται στον καταχωρητή είναι επίσης ανάλογο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να παρακολουθείται η φόρτιση του πυκνωτή αντί για την απόρριψη.

### Σ-Δ ADC

Ένας Σ-Δ μετατροπέας πραγματοποιεί υπερδειγματοληψία στο επιθυμητό σήμα και φιλτράρει την επιθυμητή ζώνη του σήματος. Γενικά, μετατρέπεται μικρότερος αριθμός ψηφίων από τον απαιτούμενο, χρησιμοποιώντας έναν flash μετατροπέα μετά το φίλτρο. Το σήμα εξόδου, μαζί με το σφάλμα που παράγεται από τα διακριτά επίπεδα του flash μετατροπέα, ανατροφοδοτείται και αφαιρείται από την είσοδο του φίλτρου. Αυτή η αρνητική ανάδραση έχει

ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση θορύβου στο σφάλμα λόγω του flash μετατροπέα έτσι ώστε να μην εμφανίζεται στις επιθυμητές συχνότητες σήματος. Ένα ψηφιακό φίλτρο (φίλτρο αποδεκατισμού) χρησιμοποιείται μετά τον μετατροπέα ώστε να μειώσει το ρυθμό δειγματοληψίας, να φιλτράρει το ανεπιθύμητο σήμα θορύβου και να αυξήσει την ανάλυση της εξόδου.

### **Pipeline ADC**

Ένας pipeline μετατροπέας χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερα στάδια μετατροπών. Πρώτα, πραγματοποιείται μία βασική μετατροπή. Σε ένα δεύτερο στάδιο, η διαφορά στο σήμα εισόδου προσδιορίζεται με ένα D/A μετατροπέα. Αυτή η διαφορά στη συνέχεια μετατρέπεται λεπτομερέστερα, και τα αποτελέσματα συνδυάζονται σε ένα τελευταίο βήμα. Αυτού του τύπου οι μετατροπές μπορούν να θεωρηθούν ως βελτίωση της SAR, όπου η ανάδραση αναφοράς αποτελείται από την ενδιάμεση μετατροπή μιας ολόκληρης σειράς των ψηφίων και όχι μόνο το επόμενο MSB. Με το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των SAR και flash μετατροπέων αυτός ο τύπος είναι γρήγορος, διαθέτει υψηλή ανάλυση, και απαιτεί μόνο ένα μικρό μέγεθος ολοκληρωμένου κυκλώματος.

### **Τρόποι χρησιμοποίησης των ADCs**

Ο μικροελεγκτής έχει ενσωματωμένους τρεις μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό. Κάθε ένας έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε 16 κανάλια τα οποία και μετατρέπει σειριακά. Υπάρχουν διαθέσιμοι αρκετοί τρόποι διασύνδεσης και χρησιμοποίησης τους οι οποίοι αναφέρονται περιγραφικά στη συνέχεια [26]. Οι πρώτες πέντε λειτουργίες αφορούν χρήση ενός μετατροπέα ενώ οι υπόλοιπες, πολλαπλών.

#### **Single channel, single conversion mode**

Αυτή είναι η απλούστερη λειτουργία του μετατροπέα. Χρησιμοποιείται μόνο ο ένας από τους τρεις και μετατρέπει μόνο ένα κανάλι. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όταν θέλουμε να μετρήσουμε το επίπεδο της τάσης μιας μπαταρίας και αν είναι χαμηλό, εμφανίζεται η ένδειξη "Low level" και δεν εκκινεί το σύστημα.

#### **Multichannel, single conversion mode**

Με αυτή τη λειτουργία μπορεί ο ADC να μετατρέπει μέχρι 16 κανάλια διαδοχικά με διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας για κάθε κανάλι. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να μετρήσουμε διάφορα μεγέθη (τάση, πίεση, θερμοκρασία) για να αποφασίσουμε αν θα είναι ασφαλές να εκκινήσουμε ένα σύστημα.

#### **Single channel, continuous conversion mode**

Ένα κανάλι μετατρέπεται συνεχόμενα και για αόριστο χρόνο. Ο ADC δουλεύει στο παρασκήνιο χωρίς να επεμβαίνει η CPU. Αυτό γίνεται εφικτό με τη χρήση DMA (Direct Memory

Access) αποφορτίζοντας τη CPU. Για παράδειγμα, παρακολουθείται η θερμοκρασία ενός φορτίου. Όταν ξεπεράσει την θερμοκρασία που έχει ορίσει ο χρήστης, κλείνει ο αντιστάτης θερμοκρασίας.

### **Multichannel, continuous conversion mode**

Παρόμοια με την προηγούμενη λειτουργία, εδώ μετατρέπονται μέχρι 16 κανάλια συνεχόμενα και σειριακά. Πρώτα το πρώτο, μετά το δεύτερο κ.ο.κ. Όταν μετατραπεί και το τελευταίο, η διαδικασία δεν τερματίζεται αλλά συνεχίζει ασταμάτητα. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση του επιπέδου της τάσης μιας συστοιχίας μπαταριών σε έναν φορτιστή πολλαπλής φόρτισης. Όταν μια μπαταρία φτάσει το μέγιστο όριο, αποσυνδέεται από τον φορτιστή.

### **Injected conversion mode**

Χρήση αυτής της λειτουργίας γίνεται όταν η μετατροπή θέλουμε να προκαλείται από ένα εξωτερικό ερέθισμα ή από το λογισμικό.

### **Dual regular simultaneous mode**

Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται δυο μετατροπές ταυτόχρονα χάρη στον συγχρονισμό των ADC1 και ADC2. Κάθε ADC μετατρέπει μια ακολουθία από κανάλια ή ένα μόνο κανάλι. Η μετατροπή μπορεί να ξεκινήσει από κάποιο εξωτερικό ερέθισμα ή από το λογισμικό. Το αποτέλεσμα της μετατροπής και των δύο αποθηκεύεται στον 32-bit καταχωρητή του ADC1.

Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να μετατρέψουμε δύο κανάλια την ίδια στιγμή. Έτσι, αν θέλουμε να μετρήσουμε την ισχύ ενός συστήματος, πρέπει να μετρήσουμε ταυτόχρονα το ρεύμα και τη τάση και στη συνέχεια να κάνουμε τον υπολογισμό  $p_n(t) = u_n(t)i_n(t)$ . Σε περίπτωση που θέλουμε να κάνουμε μονοφασική μέτρηση, θα χρησιμοποιήσουμε τους δύο ADCs με ένα κανάλι στον καθένα. Ο ένας θα μετράει την τάση και ο άλλος το ρεύμα. Αν θέλουμε να κάνουμε πολυφασική μέτρηση, θα έχουμε 3 κανάλια στον καθένα, οι τρεις φάσεις της τάσης στον έναν και οι τρεις φάσεις του ρεύματος στον άλλον.

### **Dual fast interleaved mode**

Προορίζεται για χρήση ενός καναλιού. Ο ADC1 και ο ADC2 μετατρέπουν το επιλεγμένο κανάλι διαδοχικά με μια περίοδο των 7 κύκλων ρολογιού. Έτσι, το κανάλι μετατρέπεται κάθε 7 κύκλους ρολογιού. Ο κάθε ADC μετατρέπει το κανάλι κάθε 14 κύκλους ρολογιού. Με ρολόι ADC των 14 MHz, είναι εφικτό να φτάσουμε τα 2 Mδείγματα ανά δευτερόλεπτο. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να αυξήσουμε τη συχνότητα δειγματοληψίας του ADC όταν χρειάζονται 2 Mδείγματα/δευτερόλεπτο μέσα σε 1.5 κύκλους του χρόνου δειγματοληψίας. Ο ADC1 και ο ADC2 μετατρέπουν το κανάλι διαδοχικά για να μειώσουν τον χρόνο μετατροπής.

### Dual slow interleaved mode

Το ίδιο με το προηγούμενο με τη διαφορά ότι οι ADC1 και ADC2 μετατρέπουν το κανάλι διαδοχικά με μια περίοδο των 14 κύκλων ρολογιού.

### Dual alternate trigger mode

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο όταν έχουμε κανάλια η μετατροπή των οποίων προκαλείται από εξωτερικά ερεθίσματα. Στο πρώτο ερέθισμα γίνονται όλες οι μετατροπές του ADC1, στο δεύτερο όλες του ADC2 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο. Ο μέγιστος αριθμός καναλιών για τον κάθε ADC περιορίζεται στα τέσσερα.

### Dual combined regular/injected simultaneous mode

Κατά βάση λαμβάνει μέρος η μέθοδος dual regular simultaneous mode με τη διαφορά ότι επιτρέπεται να έχουμε ταυτόχρονα injected κανάλια τα οποία πυροδοτούνται από εξωτερικό ερέθισμα και τα οποία επίσης μετατρέπονται ταυτόχρονα.

### Dual compined: injected simultaneous + interleaved mode

Αυτή η λειτουργία είναι συνδιασμός του dual interleaved mode και του dual injected simultaneous mode. Όταν πυροδοτηθεί ένα κανάλι, ξεκινάει η μετατροπή σε dual interleaved mode: ο ADC2 αναλαμβάνει τη πρώτη μετατροπή, συνεχίζει ο ADC1 κ.ο.κ. Όταν πυροδοτηθεί το injected κανάλι, στέλνει διακόπτει τη μετατροπή του interleaved καναλιού και οι δύο ADCs αρχίζουν τη μετατροπή των injected καναλιών. Όταν τελειώσουν, συνεχίζουν με τη προηγούμενη μετατροπή. Ένα παράδειγμα είναι ένα σύστημα UPS. Η τάση της μπαταρίας παρακολουθείται από κανάλι που μετατρέπεται στην λειτουργία dual interleaved. Ο ADC επίσης παρακολουθεί την ισχύ που καταναλώνεται από το φορτίο μετρώντας τη τάση και το ρεύμα σε dual injected simultaneous mode.



## Κεφάλαιο 4

# Επεξεργασία και παρουσίαση των μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνει μέρος ύστερα από την έναρξη της διαδικασίας της μέτρησης. Αυτή η επεξεργασία πρέπει να είναι συμβατή με τα διεθνή πρότυπα IEC 61400-12-1 με τίτλο: *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. Επισημαίνεται, πως υπάρχουν κάποιες παρεκκλίσεις σε κάποια σημεία με αυτά καθώς αναγκαστήκαμε να τα προσαρμόσουμε στην περίπτωση των μικρών ανεμογεννητριών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, στο τέλος του κεφαλαίου αναγράφονται οι διαφορές της υλοποίησής μας και οι λόγοι που συντέλεσαν σε αυτές [7].

### Βασική επεξεργασία

Όπως έχει προειπωθεί, τα δεδομένα συλλέγονται με συχνότητα 1 Hz, που πρακτικά σημαίνει πως κάθε ένα δευτερόλεπτο προστίθεται και μια νέα γραμμή στη βάση δεδομένων. Με βάση αυτές τα δεδομένα λοιπόν, διαλέγουμε σύνολα από δεδομένα (datasets) βασισμένα σε περιόδους τους ενός λεπτού. Για κάθε ένα από τα σύνολα, κρατάμε στατιστικά δεδομένα:

- Μέση τιμή
- Τυπική απόκλιση
- Μέγιστη τιμή
- Ελάχιστη τιμή

Στον κώδικα, ο χωρισμός σε datasets γίνεται ως εξής: Όλη η βάση δεδομένων διατρέχεται σε έναν επαναληπτικό βρόγχο με έναν μετρητή ο οποίος μετράει τις επαναλήψεις (τον αριθμό των μετρήσεων). Μέσα στον βρόγχο υπάρχει ο έλεγχος συνθήκης:  $i \bmod 60 = 0$  Με άλλα λόγια, κάθε εξήντα επαναλήψεις (όπου οι επαναλήψεις είναι στην ουσία τα δευτερόλεπτα), επαληθεύεται η συνθήκη και εκτελούνται οι εντολές της οι οποίες εκτελούν την αποθήκευση

σε κατάλληλες δομές τα δεδομένα του ενός λεπτού και δημιουργώντας έτσι τα απαραίτητα datasets.

Σύμφωνα με τα πρότυπα, στην περίπτωση όπου η ταχύτητα ανέμου έχει ξεπεράσει την ταχύτητα αποκοπής και έχει προβεί σε αποκοπή η ανεμογεννήτρια, λαμβάνει μέρος η εξής διαδικασία: παρουσιάζονται δύο ομάδες από datasets. Η πρώτη, θα περιλαμβάνει όλα τα datasets από τη βάση δεδομένων (database A). Η δεύτερη, θα αποκλείει εκείνα τα datasets στα οποία έχει παρουσιαστεί αποκοπή της ανεμογεννήτριας, δηλαδή δεν παράγει πλέον ισχύ λόγω ταχύτητας ανέμου μεγαλύτερης από την ταχύτητα αποκοπής (database B).

Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται λόγω του ότι μια καμπύλη ισχύος βασισμένη στην βάση δεδομένων A, χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η επίδραση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας σε περιόδους αποκοπής της, ενώ μια καμπύλη ισχύος βασισμένη στην βάση δεδομένων B, η οποία δεν περιλαμβάνει απώλειες ισχύος λόγω της υστέρησης αποκοπής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση ή για την επαλήθευση της καμπύλης με έναν πιο γενικό τρόπο.

Εν συνεχεία, τα datasets χωρίζονται και ταξινομούνται σε bins ταχύτητας ανέμου με εύρος 0.5 m/s. Το εύρος της καμπύλης ισχύος, πρέπει να κυμαίνεται τουλάχιστον από 1 m/s κάτω από την ταχύτητα ένταξης, μέχρι 1,5 φορές την ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Επίσης, για να θεωρηθεί επαρκής η βάση δεδομένων, πρέπει το κάθε bin ταχύτητας ανέμου να περιλαμβάνει τουλάχιστον 10 λεπτά μετρήσεων και η συνολική βάση δεδομένων να έχει καταγράψει περισσότερες από 60 ώρες.

Αν κάποιο bin ανέμου έχει λιγότερα από 10 λεπτά δεδομένων και τα δύο γειτονικά του bins έχουν επαρκή δεδομένα, τότε η τιμή του bin αυτού προκύπτει με γραμμική παρεμβολή από τα δύο αυτά γειτονικά του.

## Κανονικοποίηση δεδομένων

Τα επιλεγμένα datasets, πρέπει να κανονικοποιηθούν ως προς μια πυκνότητα αέρα αναφοράς. Αυτή είναι η πυκνότητα αέρα στο επίπεδο της θάλασσας (1.225kg/m<sup>3</sup> )

Η κανονικοποίηση της ισχύος γίνεται με τον εξής τύπο:

$$P_n = P_{1min} \frac{\rho_0}{\rho_{1min}} \quad (4.1)$$

όπου:

- $P_n$  είναι η κανονικοποιημένη ισχύς εξόδου
- $P_{1min}$  είναι ο μέσος όρος της μετρούμενης ισχύος σε περίοδο ενός λεπτού
- $\rho_0$  είναι η πυκνότητα αέρα αναφοράς
- $\rho_{1min}$  είναι η μέση πυκνότητα αέρα σε περίοδο ενός λεπτού

Η κανονικοποιημένη τιμή της ταχύτητας αέρα προκύπτει από:

$$V_n = V_{1min} \left( \frac{\rho_{1min}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.2)$$

όπου:

$V_n$  είναι η κανονικοποιημένη τιμή ταχύτητας ανέμου

$V_{1min}$  είναι η μέση τιμή της μετρούμενης ταχύτητας ανέμου σε διάστημα ενός λεπτού

## Προσδιορισμός της καμπύλης ισχύος

Η μέτρηση της καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας και της ταχύτητας του ανέμου. Η μετρούμενη καμπύλη ισχύος, προσδιορίζεται εφαρμόζοντας την μέθοδο των bins για τα κανονικοποιημένα datasets, χρησιμοποιώντας bins των 0.5 m/s όπως προαναφέρθηκε και υπολογίζοντας τις μέσες τιμές της κανονικοποιημένης ταχύτητας ανέμου και ισχύος εξόδου για κάθε bin ταχύτητας ανέμου σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (4.3)$$

όπου:

$V_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ταχύτητα ανέμου στο bin i

$V_{n,i,j}$  είναι η κανονικοποιημένη ταχύτητα ανέμου του dataset j στο bin i

$P_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ισχύς εξόδου στο bin i

$P_{n,i,j}$  είναι η κανονικοποιημένη ισχύς εξόδου του dataset j στο bin i

$N_i$  είναι ο αριθμός των ενός λεπτού datasets στο bin i

## Ετήσια ενεργειακή παραγωγή (AEP)

Η AEP υπολογίζεται εφαρμόζοντας τη μετρούμενη καμπύλη ισχύος σε διαφορετικές κατανομές συχνότητας της ταχύτητας ανέμου. Η κατανομή Rayleigh, η οποία προκύπτει από την κατανομή Weibull για παράμετρο μορφής ίση με 2, χρησιμοποιείται ως η κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας ανέμου αναφοράς. Η AEP, υπολογίζεται τελικά για μέσες ταχύτητες ανέμου στο ύψος της ανεμογεννήτριας με τιμές 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 και 11 m/s σύμφωνα με την εξίσωση:

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (4.4)$$

όπου:

$AEP$  είναι η ετήσια παραγωγή ενέργειας

$N_h$  είναι ο αριθμός των ωρών σε έναν χρόνο = 8760

$N$  είναι ο αριθμός των bins

$V_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ταχύτητα ανέμου στο bin i

$P_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ισχύς εξόδου στο bin i

και

$$F(V) = 1 - \exp\left(\frac{-\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}}\right)^2\right) \quad (4.5)$$

όπου:

$F(V)$  είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Rayleigh για την ταχύτητα ανέμου  
 $V_{ave}$  είναι η ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος του κόμβου της ανεμογεννήτριας  
 $V$  είναι η ταχύτητα ανέμου

Επισημαίνεται πως η άθροιση αρχικοποιείται θέτοντας  $V_{i-1} = 0.5 \text{ m/s}$  και  $P_{i-1} = 0.0 \text{ kW}$   
 Η AEP υπολογίζεται με δύο τρόπους:

- *AEP-measured*: Υπολογίζεται από τη μετρούμενη καμπύλη ισχύος, υποθέτοντας μηδέν ισχύ για όλες τις ταχύτητες ανέμου πάνω και κάτω από το εύρος αυτής.
- *AEP-extrapolated*: Υπολογίζεται από τη μετρούμενη καμπύλη ισχύος υποθέτοντας μηδέν ισχύ για όλες τις ταχύτητες ανέμου κάτω από τη χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου σε αυτήν και σταθερή ισχύ για άνεμο μεταξύ της υψηλότερης ταχύτητας ανέμου στην μετρούμενη καμπύλη ισχύος και της ταχύτητας αποκοπής. Η σταθερή αυτή ισχύς, θα είναι η ισχύς του bin με την υψηλότερη ταχύτητα ανέμου στη μετρούμενη καμπύλη ισχύος.

## Συντελεστής ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος ( $C_p$ ), είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της ανεμογεννήτριας. Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από αυτήν, προς την συνολική ισχύ του ανέμου που εισέρχεται στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Στην ουσία, απεικονίζει τη συνδυασμένη απόδοση των διάφορων στοιχείων του συστήματος αιολικής ενέργειας περιλαμβανομένου τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα μηχανικά στοιχεία της (άξονας, κιβώτιο ταχυτήτων), τη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος.

Γενικά ο συντελεστής ισχύος ορίζεται ως:

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.6)$$

Στην πράξη, με βάση και τον παραπάνω τύπο, ο συντελεστής ισχύος ( $C_p$ ), προσδιορίζεται από τη μετρούμενη καμπύλη ισχύος σύμφωνα με την εξής εξίσωση:

$$C_{P,i} = \frac{P_i}{0.5\rho_0AV_i^3} \quad (4.7)$$

όπου:

$C_{P,i}$  είναι ο συντελεστής ισχύος στο bin  $i$   
 $V_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ταχύτητα ανέμου στο bin  $i$   
 $P_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ισχύς εξόδου στο bin  $i$   
 $A$  είναι η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας  
 $\rho_0$  είναι η πυκνότητα αέρα αναφοράς

## Προσδιορισμός αβεβαιοτήτων

Όπως υποδεικνύουν τα πρότυπα, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν και να παρουσιαστούν οι αβεβαιότητες των μετρήσεων της καμπύλης ισχύος αλλά και του AEP. Αυτές εκφράζονται σαν τυπικές αποκλίσεις και άρα ονομάζονται τυπικές αβεβαιότητες. Υπάρχουν δύο ειδών αβεβαιότητες: Κατηγορίας A, που εξάγονται απευθείας από τις μετρήσεις και κατηγορίας B, οι οποίες λαμβάνουν υπ'όψην τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος.

### Αβεβαιότητες κατηγορίας A

Η μόνη αβεβαιότητα που πρέπει να υπολογιστεί στην κατηγορία A, είναι αυτή της μετρούμενης και κανονικοποιημένης ηλεκτρικής ισχύος σε κάθε βιν ταχύτητας ανέμου. Η τυπική απόκλιση της κατανομής της κανονικοποιημένης ισχύος σε κάθε bin, υπολογίζεται με τον τύπο:

$$\sigma_{P,i} = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (P_i - P_{n,i,j})^2} \quad (4.8)$$

όπου:

- $\sigma_{P,i}$  είναι η τυπική απόκλιση της κανονικοποιημένης ισχύος στο bin i
- $N_i$  είναι το πλήθος των 1 λεπτού datasets στο bin i
- $P_i$  είναι η κανονικοποιημένη και μέση ισχύς εξόδου στο bin i
- $P_{n,i,j}$  είναι η κανονικοποιημένη ισχύς εξόδου του dataset j στο bin i

Στη συνέχεια, η τυπική αβεβαιότητα της κανονικοποιημένης και μέσης ισχύος σε κάθε bin, υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$s_i = s_{P,i} = \frac{\sigma_{P,i}}{\sqrt{N_i}} \quad (4.9)$$

όπου:

- $s_{P,i}$  είναι η τυπική αβεβαιότητα κατηγορίας A της ισχύος στο bin i
- $\sigma_{P,i}$  είναι η τυπική απόκλιση της κανονικοποιημένης ισχύος στο bin i
- $N_i$  είναι το πλήθος των ενός λεπτού datasets στο bin i

### Αβεβαιότητες κατηγορίας B

Οι αβεβαιότητες κατηγορίας B, σχετίζονται με τα όργανα (μετασχηματιστές τάσης, ρεύματος κ.α.), το σύστημα συλλογής δεδομένων (αναλογικοί σε ψηφιακοί μετατροπείς, σύστημα αποθήκευσης κ.α.) και την ευρύτερη περιοχή της τοποθεσίας όπου βρίσκεται η ανεμογεννήτρια.

### Αβεβαιότητες στην ηλεκτρική ισχύ

Οι αβεβαιότητες στην ισχύ, έχει συνισφορές από τους μετασχηματιστές τάσης και ρεύματος καθώς και από τους μετατροπείς ισχύος. Οι αβεβαιότητες σε αυτά τα στοιχεία, συνήθως δηλώνονται από τις προδιαγραφές τους.

Η τυπική αβεβαιότητα της ηλεκτρικής ισχύος σε κάθε bin, υπολογίζεται συνδυάζοντας τις τυπικές αβεβαιότητες του μετατροπέα ισχύος, των μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης και του συστήματος συλλογής δεδομένων:

$$u_{P,i} = \sqrt{u_{P1,i}^2 + u_{P2,i}^2 + u_{P3,i}^2 + u_{dP,i}^2} \quad (4.10)$$

όπου:

- $u_{P1,i}$  είναι η αβεβαιότητα των μετασχηματιστών ρεύματος στο bin i
- $u_{P2,i}$  είναι η αβεβαιότητα των μετασχηματιστών τάσης στο bin i
- $u_{P3,i}$  είναι η αβεβαιότητα του μετατροπέα ισχύος στο bin i
- $u_{dP,i}$  είναι η αβεβαιότητα στο σύστημα συλλογής δεδομένων στο bin i

### Αβεβαιότητες στην ταχύτητα ανέμου

Η αβεβαιότητα στη μέτρηση της ταχύτητας ανέμου είναι συνδυασμός διαφόρων παραμέτρων αβεβαιοτήτων. Συνήθως, οι πιο σημαντικές είναι η διαταραχή της ροής του ανέμου λόγω του σχηματισμού του εδάφους, λειτουργικά χαρακτηριστικά του ανεμομέτρου, οι επιδράσεις της στήριξης του (mounting) και η αβεβαιότητα στη βαθμονόμηση του.

Η τυπική αβεβαιότητα της ταχύτητας του ανέμου στο bin i, εκφράζεται ως:

$$u_{V,i} = \sqrt{u_{V1,i}^2 + u_{V2,i}^2 + u_{V3,i}^2 + u_{V4,i}^2 + u_{dV,i}^2} \quad (4.11)$$

όπου:

- $u_{V1,i}$  είναι η αβεβαιότητα της βαθμονόμησης του ανεμομέτρου στο bin i
- $u_{V2,i}$  είναι η αβεβαιότητα λόγω λειτουργικών χαρακτηριστικών του ανεμομέτρου στο bin i
- $u_{V3,i}$  είναι η αβεβαιότητα του μετατροπέα ισχύος στο bin i
- $u_{V4,i}$  είναι η αβεβαιότητα της διαταραχής της ροής του ανέμου λόγω των επιδράσεων στήριξης του ανεμομέτρου στο bin i
- $u_{dV,i}$  είναι η αβεβαιότητα στο σύστημα συλλογής δεδομένων στο bin i

Ο συντελεστής ευαισθησίας προσδιορίζεται από τη τοπική κλίση της μετρούμενης καμπύλης ισχύος:

$$c_{V,i} = \left| \frac{P_i - P_{i-1}}{V_i - V_{i-1}} \right| \quad (4.12)$$

### Αβεβαιότητες στη πυκνότητα του αέρα

Η πυκνότητα του αέρα υπολογίζεται ύστερα από μετρήσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης του.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας, περιέχει παραμέτρους αβεβαιότητας που έχουν να κάνουν με τη βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης, με την ατελή προστασία του από τις ακτινοβολίες και με τις επιδράσεις της στήριξης του.

Έτσι, η τυπική αβεβαιότητα στη μετρούμενη θερμοκρασία για κάθε bin, είναι:

$$u_{T,i} = \sqrt{u_{T1,i}^2 + u_{T2,i}^2 + u_{T3,i}^2 + u_{dT,i}^2} \quad (4.13)$$

όπου:

- $u_{T1,i}$  είναι η αβεβαιότητα της βαθμονόμησης του αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας στο bin i
- $u_{T2,i}$  είναι η αβεβαιότητα λόγω ατελής προστασίας από τις ακτινοβολίες του αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας στο bin i
- $u_{T3,i}$  είναι η αβεβαιότητα λόγω των επιδράσεων στήριξης του αισθητήρα στο bin i
- $u_{T4,i}$  είναι η αβεβαιότητα στο σύστημα συλλογής δεδομένων για τη θερμοκρασία του αέρα στο bin i
- $u_{dT,i}$  είναι η αβεβαιότητα στο σύστημα συλλογής δεδομένων για τη θερμοκρασία στο bin i

Ο συντελεστής ευαισθησίας της θερμοκρασίας του αέρα για το κάθε bin, υπολογίζεται με τον τύπο:

$$c_{T,i} = \frac{P_i}{288.15} \left[ \frac{kW}{K} \right] \quad (4.14)$$

Η τυπική αβεβαιότητα της μετρούμενης πίεσης του αέρα για το κάθε bin υπολογίζεται με τον τύπο:

$$u_{B,i} = \sqrt{u_{B1,i}^2 + u_{B2,i}^2 + u_{dB,i}^2} \quad (4.15)$$

όπου:

- $u_{B1,i}$  είναι η αβεβαιότητα της βαθμονόμησης του αισθητήρα της πίεσης του αέρα στο bin i
- $u_{B2,i}$  είναι η αβεβαιότητα λόγω των επιδράσεων στήριξης του αισθητήρα της πίεσης του αέρα στο bin i
- $u_{dB,i}$  είναι η αβεβαιότητα του συστήματος συλλογής δεδομένων για την πίεση του αέρα στο bin i

Ο συντελεστής ευαισθησίας της θερμοκρασίας του αέρα για το κάθε bin, υπολογίζεται με τον τύπο:

$$c_{B,i} = \frac{P_i}{1013} \left[ \frac{kW}{hPa} \right] \quad (4.16)$$

### Τελικοί υπολογισμοί αβεβαιοτήτων

Τελικά, η συνολική αβεβαιότητα κατηγορίας B υπολογίζεται:

$$u_i = \sqrt{u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} \quad (4.17)$$

Οι συνδυασμένες τυπικές αβεβαιότητες για κάθε bin της καμπύλης ισχύος, υπολογίζονται συνδυάζοντας την αβεβαιότητα κατηγορίας A με όλες τις αβεβαιότητες κατηγορίας B:

$$u_{c,i} = \sqrt{s_i^2 + u_i^2} = \sqrt{s_{P,i}^2 + u_{P,i}^2 + c_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + c_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + c_{B,i}^2 u_{B,i}^2} \quad (4.18)$$

### Αβεβαιότητα στην ετήσια παραγωγή ενέργειας

Η συνδυαστική τυπική αβεβαιότητα στο AEP, υπολογίζεται συνδυάζοντας ατομικά τις κατηγορίας A και κατηγορίας B αβεβαιότητες ανά bin:

$$u_{AEP} = N_h \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i^2 + \left( \sum_{i=1}^N f_i u_i \right)^2} \quad (4.19)$$

όπου:  $f_i = \frac{(F_{i+1}-F_i)+(F_i-F_{i-1})}{2}$  είναι η μέση πιθανότητα της ταχύτητας ανέμου στο bin i.

### Αποκλίσεις από τα πρότυπα

Στις μικρές ανεμογεννήτριες δεν ορίζεται αυστηρά ο όρος «ταχύτητα αποκοπής». Οι περισσότερες, δεν φέρουν αυτό το χαρακτηριστικό στις προδιαγραφές τους. Αυτό γιατί, συνεχίζουν να παράγουν ισχύ ακόμα και σε μεγάλους ανέμους. Συνήθως, έχουν ενσωματωμένο σύστημα furling, σε αντίθεση με τις μεγάλες που έχουν pitch control. Αυτό έχει σημασία γιατί η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με pitch control, όπως είχαμε δει και στο σχήμα 1.2, κρατάει σταθερή την ισχύ εξόδου της από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου μέχρι και την ταχύτητα αποκοπής όπου εκεί, αποκόπεται ακαριαία. Αν δρα σύστημα furling από την άλλη, από μια ταχύτητα ανέμου και μετά, η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας μειώνεται σταδιακά χωρίς να έχουμε ακαριαία αποκοπή και άρα μια συγκεκριμένη ταχύτητα αποκοπής.

Επίσης, δεν ορίζεται αυστηρά ονομαστική ισχύς στις μικρές ανεμογεννήτριες. Αυτό γιατί, ονομαστική ισχύς εξόδου προκύπτει στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο όμως για το ποια είναι η ονομαστική ταχύτητα ανέμου στις μικρές ανεμογεννήτριες κατασκευαστικά. Τα μεγέθη αυτά προκύπτουν μόνο ύστερα από επεξεργασία των μετρήσεων και υπολογισμό της καμπύλης ισχύος.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω:

- Τα δεδομένα, δεν υπόκεινται σε χωρισμό δύο βάσεων δεδομένων, database A και database B. Υπενθυμίζεται πως η database A περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα στη βάση ενώ η database B περιλαμβάνει δεδομένα μέχρι την ταχύτητα αποκοπής.



- Σχετικά με το εύρος της καμπύλης ισχύος, συλλέγονται δεδομένα μέχρι και το τελευταίο έγκυρο bin (τουλάχιστον 10 λεπτά μετρήσεων). Υπενθυμίζεται πως το εύρος της καμπύλης ισχύος σύμφωνα με τα πρότυπα (και την ύπαρξη ονομαστικής ισχύος), ήταν από 1 m/s κάτω από την ταχύτητα ένταξης, μέχρι μιάμιση φορές την ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.
- Δεν ορίζεται AEP-extrapolated. Υπενθυμίζεται πως ο υπολογισμός αυτής απαιτούσε την υπόθεση σταθερής ισχύς από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου μέχρι και την ταχύτητα αποκοπής.



## Κεφάλαιο 5

# Προγραμματιστικά εργαλεία

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα βασικά προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να καταστήσουν δυνατή την παρουσίαση και επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από το μετρητικό σύστημα.

Τονίζεται, πως η υλοποίηση έγινε κατά βάση στη γλώσσα προγραμματισμού Python και φυσικά έγινε χρήση HTML και Javascript, εργαλεία απαραίτητα σε ένα γραφικό web περιβάλλον.

## Περιγραφή των βασικών γλωσσών προγραμματισμού

Γλώσσα προγραμματισμού λέγεται μια τεχνητή γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μιας μηχανής και συνήθως ενός υπολογιστή. Οι γλώσσες προγραμματισμού (όπως άλλωστε και οι ανθρώπινες γλώσσες) ορίζονται από ένα σύνολο συντακτικών και εννοιολογικών κανόνων, που ορίζουν τη δομή και το νόημα, αντίστοιχα, των προτάσεων της γλώσσας [13].

Οι γλώσσες προγραμματισμού χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν την οργάνωση και διαχείριση πληροφοριών, αλλά και για την ακριβή διατύπωση αλγορίθμων. Ορισμένοι ειδικοί χρησιμοποιούν τον όρο γλώσσα προγραμματισμού μόνο για τυπικές γλώσσες που μπορούν να εκφράσουν όλους τους πιθανούς αλγορίθμους. Μη-υπολογιστικές γλώσσες όπως η HTML δεν λέγονται συνήθως γλώσσες προγραμματισμού αλλά "markup languages".

## Python

Η Python, είναι μια ευραίως γνωστή γλώσσα προγραμματισμού και είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα γενικού σκοπού που έκανε την εμφάνιση της το 1991. Αυτό που την ξεχωρίζει, είναι η φιλοσοφία σχεδιασμού της. Αυτή είναι να δίνει έμφαση στο να είναι ευανάγνωστος ο κώδικας, αφού ο συμβολομεταφραστής της δεν χρησιμοποιεί κάποιο σύμβολο για να ξεχωρίσει τις εντολές (στρατηγική που υιοθετούν οι περισσότερες γλώσσες), αλλά τις ξεχωρίζει με τα λεγόμενα *indents*, δηλαδή με τα περιθώρια που υπάρχουν σε κάθε εντολή. Αυτό, υποχρεώνει τον προγραμματιστή να γράφει έναν καλά δομημένο κώδικα και άρα ευανάγνωστο. Η σύνταξη

της επίσης της επιτρέπει να εκφράσει πιο πολύπλοκες έννοιες σε λίγες γραμμές κώδικα σε αντίθεση με τις περισσότερες.

Ενσωματώνει ένα δυναμικό σύστημα και αυτόματη διαχείριση μνήμης. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι μια «αυστηρή» γλώσσα αλλά απεναντίας είναι πλήρως επεκτάσιμη και μπορεί να διαχειριστεί ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών. Υπάρχουν διαθέσιμες επεκτάσεις ικανές να διευκολύνουν τον προγραμματιστή σε πληθώρα καταστάσεων.

Υπάρχουν μεταγλωτιστές της για πολλά λειτουργικά συστήματα [15], δίνοντας της έτσι τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα αυτών. Ο πυρήνας φιλοσοφίας της αναδεικνύεται συνοπτικά στους παρακάτω απλούς αλλά σημαντικούς αφορισμούς:

- Το όμορφο είναι καλύτερο απο το άσχημο
- Το σαφές είναι καλύτερο από το διφορούμενο
- Το απλό είναι καλύτερο από το πολύπλοκο
- Το πολύπλοκο είναι καλύτερο από το περίπλοκο
- Η ευανάγνωσιμότητα είναι σημαντική

## HTML, Javascript και CSS

”HyperText Markup Language” ή αλλιώς HTML είναι η βασική γλώσσα μορφοποίησης του παγκόσμιου ιστού. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ιστοσελίδων και συγκεκριμένα για το τι αυτές οι ιστοσελίδες παρουσιάζουν στον χρήστη. Οι περιηγητές του παγκόσμιου ιστού, λαμβάνουν HTML αρχεία από τον εξυπηρετητή και αναλαμβάνουν να τα παρουσιάσουν στην οθόνη. Στα HTML αρχεία, ορίζονται στοιχεία όπως κουμπιά, κείμενο, εικόνες, φόρμες κ.α.

Javascript, είναι η βασική γλώσσα προγραμματίσμου που χρησιμοποιείται στην πλευρά του *client* ή «πελάτη». Αυτό σημαίνει ότι κώδικας Javascript είναι γραμμένος στα αρχεία HTML και εκτελείται στον φυλλομετρητή και όχι στον εξυπηρετητή. Είναι γλώσσα υψηλού επιπέδου και υποστηρίζεται από όλους τους σύγχρονους φυλλομετρητές καθώς χρησιμοποιείται κατά κόρον στον παγκόσμιο ιστό [16].

CSS (Cascading Style Sheets), είναι η γλώσσα μορφοποίησης η οποία χρησιμοποιείται επίσης κατά κόρον στον παγκόσμιο ιστό. Στην ουσία, είναι αυτή που αναλαμβάνει να παρουσιάσει στην οθόνη τα συστατικά μιας ιστοσελίδας επιτρέποντας μορφοποιήσεις σε επίπεδο διάταξης, χρωμάτων, γραμματοσειρών κ.α. [17]

Η HTML, η Javascript και η CSS χρησιμοποιούνται συνδυαστικά σχεδόν σε κάθε σύγχρονη ιστοσελίδα καθώς η κάθε μία αναλαμβάνει ένα μοναδικό έργο το οποίο συμπληρώνει αυτό της άλλης. Έτσι, η HTML είναι αυτή που θα ορίσει ποια στοιχεία θα περιλαμβάνονται στην ιστοσελίδα. Η CSS είναι αυτή που θα ορίσει που θα οριοθετούνται αυτά στην οθόνη και η Javascript είναι αυτή που θα ορίσει τις ενέργειές τους, δηλαδή το πως αλληλεπιδρούν αυτά με τον χρήστη.

## Στοιχειώδη προγραμματιστικά εργαλεία

### Flask

Το Flask, είναι το βασικό εργαλείο ανάπτυξης της web εφαρμογής. Είναι ένα δομή εργαλείων για ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών βασισμένο στην Python. Ξεχωρίζει από άλλες παρόμοιες δομές, γιατί προσφέρει μεγάλη ελευθερία στην δημιουργία και στον έλεγχο της εφαρμογής και είναι πλήρως διαμορφώσιμο και ευέλικτο ως προς τη συνεργασία με άλλα εργαλεία [14].

Το κλειδί για την ελευθερία αυτή, είναι ότι εξ'αρχής σχεδιάστηκε για να επεκτείνεται. Δεν τίθεται λόγος δηλαδή για ένα «κλειστό» framework, αλλά για έναν πυρήνα ο οποίος περιλαμβάνει τις πολύ βασικές λειτουργίες που όλες οι web εφαρμογές χρειάζονται ενώ όλα τα υπόλοιπα παρέχονται από εξωτερικές επεκτάσεις και εργαλεία, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τον προγραμματιστή.

### Βασική λειτουργία

Παρακάτω φαίνεται μια πολύ βασική λειτουργία του Flask, ώστε να γίνει εμφανής ο τρόπος που αυτό χειρίζεται τα αιτήματα του χρήστη. Εκτελώντας το παρακάτω κομμάτι κώδικα, η μετάβαση στο URL που βρίσκεται μέσα στην παρένθεση του decorator `@app.route`, (στην προκειμένη περίπτωση `«/»`), θα προκαλέσει εκτέλεση της συνάρτησης που αυτός ορίζει (στην προκειμένη περίπτωση `"index"`) και στην οθόνη θα εμφανιστεί το HTML tag `h1`.

```
@app.route("/")
def index():
    return "<h1>Hello _World!</h1>"
```

Η τιμή που έχει σαν όρισμα η εντολή `return`, ονομάζεται `response` (απόκριση) και είναι αυτό που λαμβάνει ο πελάτης. Αν ο πελάτης είναι ένας φυλλομετρητής, η απόκριση εμφανίζεται σε αυτόν.

Συνάρτησεις σαν την `index()`, ονομάζονται `view functions`. Όπως ειπώθηκε, καλούνται όταν μεταβεί ο χρήστης στο URL που ορίζει ο decorator της και η απόκρισή τους θα είναι είτε μια απλή γραμματοσειρά HTML είτε κάτι πιο σύνθετο όπως φαίνεται στη συνέχεια.

### Templates

Το πλέον σημαντικό στην ανάπτυξη εφαρμογών, είναι ο κώδικας να είναι καλά δομημένος. Το παραπάνω παράδειγμα είναι αρκετά απλό για να φανεί κάποιο πρόβλημα, αλλά για πιο σύνθετες εφαρμογές, είναι απαραίτητη η χρήση των `templates`.

Το `template`, είναι ένα αρχείο που περιλαμβάνει το κείμενο μιας απόκρισης. Κατά βάση περιλαμβάνει HTML, Javascript και CSS styling. Επίσης, εξυπηρετεί και άλλες λειτουργίες όπως προγραμματιστικές δομές (π.χ. `if`, `for`) καθώς και μεταβλητές που στέλνονται σε αυτό από τις `view functions`.

Στην εφαρμογή μας, σε καμία περίπτωση δεν είχαμε σαν όρισμα στο return, καθαρό HTML κώδικα όπως στο προηγούμενο παράδειγμα. Απεναντίας, γράφτηκε κώδικας σε templates και αυτά καλούνταν σαν responses από τις view functions, οπότε και προβαλλόταν το περιεχόμενο στον φυλλομετρητή. Το Flask, χρησιμοποιεί την Jinja2 template engine, η οποία αναλαμβάνει να προβάλλει με συνέπεια τα templates σε αυτόν. Ένα πολύ λιτό παράδειγμα φαίνεται παρακάτω:

```
<h1>Hello {{ name }}!</h1>
```

```
@app.route("/")
def index():
    name = "Dim"
    return render_template("index.html", name=name)
```

Φαίνονται οι βασικές λειτουργίες των templates. Εκτέλεση του αρχείου web\_gui.py και μετάβαση στο URL: localhost:5000/, συνεπάγεται προβολή του "Hello Dim". Οπότε φαίνεται πώς γίνεται η χρήση των templates καθώς και πώς μεταβιβάζονται παραμέτροι σε αυτά προς παρουσίασή τους.

## Bootstrap

Το Bootstrap είναι από τα πιο δημοφιλή HTML, CSS και javascript framework για την ανάπτυξη αποκρισιμων περιβάλλοντων ιστού. Στην ουσία είναι ο πυρήνας των γραφικών της εφαρμογής μας. Περιλαμβάνει γραφικά για κουμπιά, templates, modals, και ότι άλλο είναι απαραίτητο ώστε η εφαρμογή να είναι αισθητικά όμορφη. Η ενσωμάτωσή του στην εφαρμογή έγινε ορίζοντας ένα Bootstrap αντικείμενο:

```
app = Flask(__name__)
bootstrap = Bootstrap(app)
```

Στην πρώτη γραμμή ορίζεται η Flask εφαρμογή και στη δεύτερη ενσωματώνεται το Bootstrap. Τα γραφικά που θα χρησιμοποιηθούν γράφηκαν στα διάφορα templates με χρήση HTML, CSS και Javascript.

## Γραφήματα

Η δημιουργία γραφικών παραστάσεων, είναι ένα σημαντικό και απαραίτητο στοιχείο στην ανάπτυξη της εφαρμογής. Αυτό γιατί πρέπει να είναι σύμφωνη με τα διεθνή πρότυπα ως προς τη παρουσίαση των μετρήσεων ύστερα από την επεξεργασία τους. Η εφαρμογή οφείλει να δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να έχει πρόσβαση και εποπτεία αυτών. Επίσης, τα γραφήματα είναι

απαραίτητα και στην υλοποίηση βοηθητικών δυνατοτήτων χρήσιμων για τον χρήστη. Οι δυνατότητες αυτές έχουν να κάνουν με την κατασκευή γραφικών παραστάσεων των μετρήσεων που ανακτώνται από τη βάση δεδομένων χωρίς κάποια επεξεργασία τους. Υπάρχει η δυνατότητα για κατασκευή και προβολή οποιουδήποτε μεγέθους που μετρήθηκε από το μετρητικό σύστημα ως προς κάποιο άλλο για ένα χρονικό διάστημα που ορίζεται από τον χρήστη. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής και προβολής της γραφική παράσταση ενός μεγέθους για πάνω από μία ανεμογεννήτρια στο ίδιο γράφημα.

## Matplotlib

Η Matplotlib είναι μία από τις πολλές αλλά η πιο διαδεδομένη βιβλιοθήκη της Python για δημιουργία και προβολή γραφημάτων.

Στην εφαρμογή μας, η Matplotlib χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα είδη γραφημάτων που οφείλουν να παρουσιαστούν καθ' ύποδειξη των διεθνών προτύπων, εκτός από τα γραφήματα που κατασκευάζονται με βάση τα raw δεδομένα της βάσης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζει τις καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών, την καμπύλη ταχύτητας ανέμου-Cp, το διαγράμμα διασποράς με δεδομένα τα στατιστικά της ισχύος σε κάθε dataset και τα διαγράμματα διασποράς της έντασης της τύρβης του ανέμου (turbulence intensity) εναντίον της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου.

Παρακάτω φαίνεται ένα απλό παράδειγμα δημιουργίας της γραφικής παράστασης δύο μεγεθών (list1, list2):

```
def plot(list1 , list2 ):
    fig , ax = plt.subplots()
    ax.plot(list1 , list2 )
    plt.show()
```

## Mpld3

Με τις προηγούμενες εντολές θα εμφανίζεται τοπικά ένα παράθυρο στον υπολογιστή το οποίο θα εμφανίσει το γράφημα. Αυτό δεν είναι αρκετό όμως για τις ανάγκες της εφαρμογής η οποία είναι web εφαρμογή και ο σκοπός είναι να εμφανιστεί στον φυλλομετρητή, δηλαδή να γίνει HTML κώδικας. Αυτή τη δουλειά αναλαμβάνει η ανοικτού κώδικα επέκταση, mpld3.

Το mpld3, δρα ως γέφυρα μεταξύ της Matplotlib και του D3.js, της δημοφιλούς βιβλιοθήκης Javascript για τη δημιουργία διαδραστικών γραφημάτων στον ιστό. Περιλαμβάνει ένα απλό API που διευκολύνει την εξαγωγή των matplotlib γραφημάτων σε έναν HTML κώδικα και έτσι επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση στον φυλλομετρητή.

Ο παραπάνω κώδικας μεταβάλλεται λόγω χρήσης του mpld3 ως εξής:

```

def plot(list1 , list2 ):
    fig , ax = plt.subplots ()
    ax.plot ( list1 , list2 )
    html_text = mpld3.fig_to_html ( fig )
    return html_text

```

Γίνεται φανερό λοιπόν, πως το mpld3 αναλαμβάνει να μετατρέψει το γράφημα σε κείμενο HTML. Αυτό με τη σειρά του θα επιστραφεί από την παραπάνω συνάρτηση στο template και τελικά θα εμφανιστεί στον φυλλομετρητή.

## Bokeh

Το Bokeh είναι ένα εργαλείο το οποίο κάνει ότι η matplotlib σε συνδυασμό με το mpld3. Χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή μας μόνο για την κατασκευή γραφημάτων από τα raw δεδομένα, δηλαδή από τις μετρήσεις στην βάση δεδομένων άνευ επεξεργασίας. Αυτό γιατί διαπιστώθηκε πως το mpld3 αδυνατεί εξόριστου στο να προβάλλει ημερομηνίες σαν ετικέτες στον άξονα με τη σωστή μορφή. Αντιθέτως, εμφανίζονταν σε unix time μορφή, πρόβλημα που λύθηκε με τη χρήση του bokeh. Ένα απλό παράδειγμα χρήσης του με έμφαση στη σωστή εμφάνιση των ημερομηνιών φαίνεται παρακάτω:

```

def plot_prev ( list1 , list2 ):
    p = figure ( x_axis_label='Date' ,
                y_axis_label='Mean_Voltage (V)' )
    p.line ( list1 , list2 )
    p.xaxis.formatter=DatetimeTickFormatter (
        hours=["%d_%B_%Y" ] ,
        days=["%d_%B_%Y" ] ,
        months=["%d_%B_%Y" ] ,
        years=["%d_%B_%Y" ] ,
    )
    p.xaxis.major_label_orientation = pi/4
    html = file_html ( p , CDN , "my_plot" )
    return html

```

Όπως είναι φανερό, το γράφημα επιστρέφεται σε μορφή HTML κώδικα, όπως συμβαίνει με το mpld3.

## Βάση δεδομένων

Μία βάση δεδομένων, αποθηκεύει τα δεδομένα της εφαρμογής ιστού με οργάνωση και συνέπεια. Η εφαρμογή με τη σειρά της, στέλνει αιτήματα στη βάση ώστε να ανακτήσει τα



δεδομένα που ορίζονται από αυτά. Κατά κύριο λόγο, για τις εφαρμογές ιστού χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων βασισμένες στο *σχεσιακό μοντέλο* (relational databases), γνωστές και ως *SQL* (structured query language). Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν εξελιχθεί και οι *document-oriented* ή *key value databases* ή αλλιώς *NoSQL*.

### SQL βάσεις δεδομένων

Οι σχεσιακές βάσεις δεδομένων, αποθηκεύουν τα δεδομένα σε *πίνακες*. Κάθε πίνακας, έχει συγκεκριμένο αριθμό στηλών και μεταβλητό αριθμό γραμμών. Μία από τις στήλες ενός πίνακα ονομάζεται *primary key* και περιέχει έναν μοναδικό αναγνωριστικό αριθμό για κάθε γραμμή του πίνακα. Οι πίνακες, μπορούν να έχουν επίσης στήλη που ονομάζεται *foreign key*, η οποία είναι αναφορά σε κάποια γραμμή κάποιου άλλου πίνακα. Αυτές οι συνδέσεις μεταξύ των γραμμών ονομάζονται *relationships* και είναι τα θεμέλια του μοντέλου των sql βάσεων δεδομένων.

### NoSQL βάσεις δεδομένων

Οι βάσεις που δεν ακολουθούν το σχεσιακό μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα ονομάζονται NoSQL databases. Ένας βασικός τρόπος οργάνωσης μιας NoSQL βάσης δεδομένων είναι ότι χρησιμοποιεί *collections* (συλλογές) αντί για πίνακες και *documents* (έγγραφα) αντί για εγγραφές. Σε κάθε έγγραφο, ορίζεται πάντα από την αρχή ο τίτλος του κάθε πεδίου με αποτέλεσμα να υπάρχουν διπλοτυπίες αλλά να αυξάνεται ο χρόνος των queries.

### SQL ή NoSQL;

Οι SQL βάσεις υπερτερούν στο να αποθηκεύουν δομημένα τα δεδομένα σε αποτελεσματική και «συμπαγή» μορφή. Το πρώτο μέλημα τους είναι να παρέχουν την απαιτούμενη συνέπεια. Από την άλλη, οι NoSQL, είναι πιο ελαστικές στο θέμα της συνέπειας με αποτέλεσμα κάποιες φορές να έχουν ένα προβάδισμα στην απόδοση. Ο πίνακας 5.1 συγκρίνει συνοπτικά τις δύο μορφές.

Τα δεδομένα προς αποθήκευση στη βάση δεδομένων, είναι οι μετρήσεις από τις ανεμογεννήτριες. Κάθε πίνακας, θα αποθηκεύει δεδομένα για κάθε ανεμογεννήτρια. Οι πίνακες αυτοί, θα έχουν συγκεκριμένη δομή, π.χ. τρεις στήλες για τις τρεις φάσεις του ρεύματος και τρεις στήλες για τις τρεις φάσεις της τάσης. Θα υπάρχει επίσης και ένας πίνακας ο οποίος θα αποθηκεύει τις μετεωρολογικές μετρήσεις με επίσης συγκεκριμένη δομή.

Λαμβάνοντας υπ'όψη λοιπόν και τον πίνακα 5.1, καταλαβαίνουμε πως οι SQL databases είναι πιο κατάλληλες για την εφαρμογή μας. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η βάση δεδομένων SQLite. Είναι μια πιο «ελαφριά» έκδοση της πλέον δημοφιλούς MySQL. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η πρώτη είναι "Serverless", δηλαδή δεν απαιτεί τη δικιά της διεργασία ούτε δεσμεύει κάποιον κόμβο σε ένα δίκτυο για να λειτουργήσει. «Τρέχει» στον χώρο διευθύνσεων της εφαρμογής που τη χρησιμοποιεί και χρησιμοποιείται ευρέως για μικρές και φορητές εφαρμογές. Επίσης είναι εξόλοκληρου ανοικτού κώδικα, πράγμα που παίζει σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή μας.

	NoSQL	SQL
Μοντέλο	Μη-σχεσιακό Αποθηκεύει τα δεδομένα σε JSON έγγραφα, ζευγάρια κλειδιού/τιμής	Σχεσιακό Αποθηκεύει τα δεδομένα σε πίνακες
Δεδομένα	Προσφέρει ευελιξία αφού η κάθε εγγραφή δεν χρειάζεται να έχει τις ίδιες ιδιότητες Νέες ιδιότητες μπορούν να προστεθούν ανά πάσα στιγμή	Ιδανική για εφαρμογές όπου κάθε εγγραφή έχει τις ίδιες ιδιότητες Πρόσθεση νέας ιδιότητας μπορεί να χρειαστεί αλλαγή των schemas ή επίχωση δεδομένων
	Οι σχέσεις συχνά «συλλαμβάνονται» αποκανονικοποιώντας τα δεδομένα και παρουσιάζοντας τα σε μια μονή εγγραφή για ένα αντικείμενο Καλή για ημι-δομημένα, περίπλοκα ή εμφωλευμένα δεδομένα	Οι σχέσεις συχνά «συλλαμβάνονται» σε ένα κανονικοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιεί συνδέσεις για να βρει τις αναφορές μεταξύ των πινάκων Καλή για δομημένα δεδομένα
Δομή	Δυναμική ή ευέλικτη δομή Η βάση δεδομένων δεν γνωρίζει τη δομή της η οποία υπαγορεύεται από την εφαρμογή	Αυστηρή δομή Η δομή πρέπει να συντηρείται και να υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ εφαρμογής και βάσης δεδομένων
Συναλλαγές	Η υποστήριξη συναλλαγών ACID ποικίλλει ανάλογα με τη περίπτωση	Υποστηρίζονται συναλλαγές ACID
Συνέπεια και διαθεσιμότητα	Υπάρχει δυνατότητα αυστηρής συνέπειας, ανάλογα με την εφαρμογή	Η αυστηρή συνέπεια είναι υποχρεωτική
	Μπορεί να δωθεί έμφαση σε κάποιο από τη συνέπεια, τη διαθεσιμότητα και την απόδοση, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής	Η συνέπεια έχει προτεραιότητα έναντι της διαθεσιμότητας και της απόδοσης
Απόδοση	Η απόδοση μπορεί να μεγιστοποιηθεί μειώνοντας τη συνέπεια, αν χρειάζεται  Όλες οι πληροφορίες για μια οντότητα είναι τυπικά σε μία μόνο εγγραφή, συνεπώς ενημέρωση μπορεί να γίνει σε ένα «πέρασμα»	Η εισαγωγή και η ενημέρωση δεδομένων εξαρτάται από το πόσο γρήγορα διαπράττεται μια εγγραφή, αφού η αυστηρή συνέπεια είναι υποχρεωτική. Η απόδοση μπορεί να μεγιστοποιηθεί αναβαθμίζοντας τους διαθέσιμους πόρους και χρησιμοποιώντας δομές εντός μνήμης Πληροφορίες για μια οντότητα μπορούν να είναι απλωμένες μεταξύ αρκετών πινάκων ή γραμμών και έτσι απαιτούνται αρκετές συνδέσεις για να ολοκληρωθεί μια ενημέρωση

Πίνακας 5.1: Σύγκριση SQL με NoSQL βάσεων δεδομένων

Wind Turbine ID	Blade Length	Rated Power	Topic/database
1	1.2	440.0	datalogger01
2	1.3	450.0	datalogger02
3	1.5	460.0	datalogger03

Wind Turbine ID number

Submit

Σχήμα 5.1: Αρχική σελίδα της εφαρμογής

## Παρουσίαση γραφικού περιβάλλοντος ιστού

Η ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος μεταεπεξεργασίας δεδομένων έγινε με γνώμονα την απλότητα, την ευκολία στη χρήση αλλά και την πληρότητα όσον αφορά τις απαιτήσεις των προτύπων IEC 61400-12-1.

Η πρώτη επαφή με την εφαρμογή γίνεται με την εικόνα 5.1. Εμφανίζονται οι ανεμογεννήτριες που υπάρχουν στο αιολικό πάρκο με τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Η επιλογή μίας εξ'αυτών οδηγεί στη βασική σελίδα της εφαρμογής όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Τονίζεται πως σε αυτή τη σελίδα, ανάλογα με τις αποθηκευμένες ώρες μετρήσεων στη βάση δεδομένων και αν αυτές είναι λιγότερες από όσες απαιτούν τα πρότυπα IEC, εμφανίζεται μήνυμα που προειδοποιεί τον χρήστη πως η εξαγωγή των διάφορων μεγεθών δεν θα είναι έγκυρη λόγω μικρού αριθμού δεδομένων, καθώς και εμφανίζει πόσες ώρες πρέπει να αποθηκευτούν ακόμα.

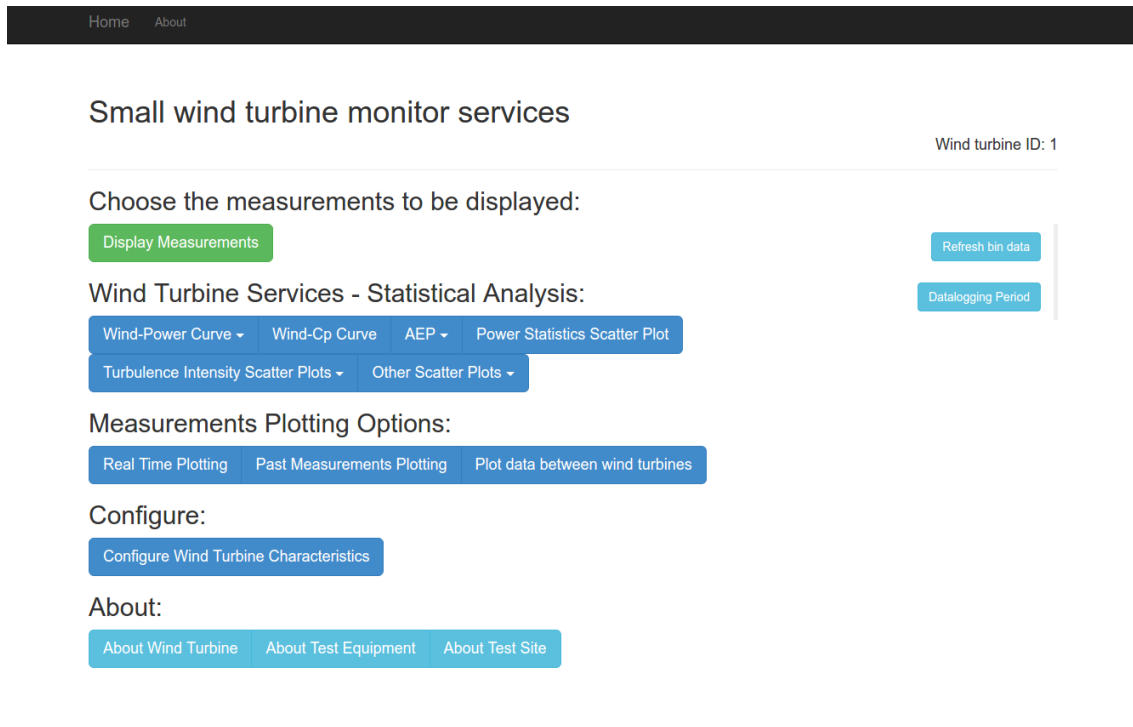
## Προβολή μετρήσεων

Το πρώτο κουμπί είναι το Display Measurements. Αυτό προβάλλει όλες τις μετρήσεις σε μη επεξεργασμένη μορφή, όπως αυτές έχουν σταλθεί από τον μικροελεγκτή και αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων. Πάτημα του κουμπιού εμφανίζει το modal<sup>1</sup> της εικόνας 5.3.

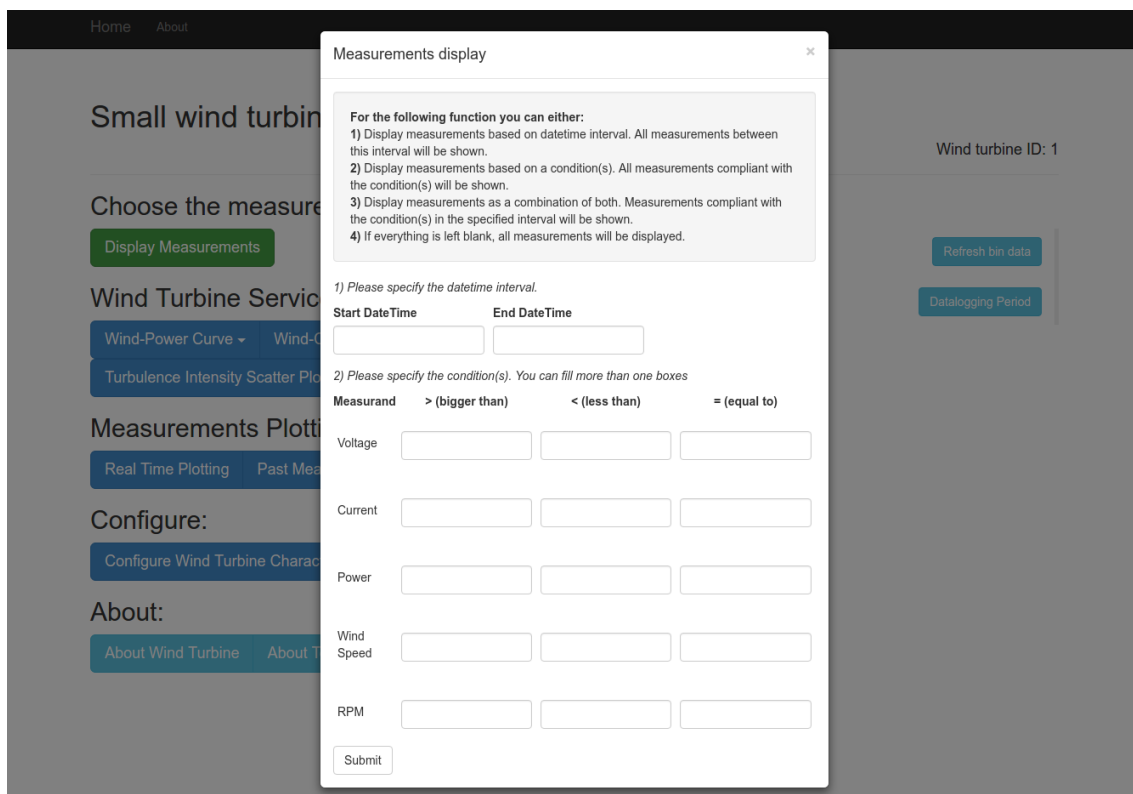
Βλέπουμε πως υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες:

- Προβολή μετρήσεων μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Τα πεδία της συνθήκης αφήνονται κενά
- Προβολή μετρήσεων με βάση κάποια συνθήκη. Τα πεδία του χρόνου αφήνονται κενά. Οι συνθήκες φαίνονται στο πλέγμα του modal. Υπάρχει και δυνατότητα συναλήθευσης των
- Προβολή μετρήσεων με βάση κάποια συνθήκη μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα

<sup>1</sup>Το παράθυρο modal είναι ένα γραφικό στοιχείο ελέγχου υφιστάμενο του βασικού παραθύρου. Δημιουργεί μια λειτουργία που απενεργοποιεί το βασικό παράθυρο αλλά το κρατάει ορατό, και το παράθυρο modal βρίσκεται σαν «παιδί» του κυρίου παραθύρου μπροστά από αυτό εμφανίζοντας επιπλέον πληροφορίες



Σχήμα 5.2: Κύρια σελίδα της εφαρμογής που δίνει πρόσβαση στις υπηρεσίες



Σχήμα 5.3: Modal που εμφανίζεται με το πάτημα του Display Measurements

Home Wind Turbine Home

Download data as .csv Show data statistics

Info! There are approximately 285 hours logged with the specified query.

All measurements

1 2 3 4 5 ... 51415 51416 Next »

Time	Mean Current	Vapour Pressure	Mean Voltage	Temperature	Humidity	Bar Pressure	RPM	Wind Sector	Wind Speed	Air Density	DC Voltage	Power Sector	Furling Angle	Yaw angle
2015-04-22 20:28:24	0.05133	1664.85976	0.672	15.244	0.40932	1018.384	0.0	0	6.421	1.2277	3.1752	0.05974	-0.05667070292	0.0
2015-04-22 20:28:25	0.05133	1664.54421	0.66933	15.241	0.40785	1018.412	0.0	0	6.28	1.22776	3.16258	0.05951	-0.02833535034	0.0
2015-04-22 20:28:26	0.05167	1664.01842	0.456	15.236	0.40487	1018.423	0.0	0	6.36	1.22782	2.1546	0.04081	-0.34002422872	0.0
2015-04-22 20:28:27	0.05133	1663.70303	0.67233	15.233	0.40451	1018.432	0.0	0	6.05	1.22785	3.17676	0.05977	-0.34002422872	0.0
2015-04-22 20:28:28	0.05167	1663.59792	0.66933	15.232	0.40726	1018.445	0.0	0	6.063	1.22785	3.16258	0.0599	-0.3683595813	0.0
2015-04-22 20:28:29	0.05133	1663.3877	0.673	15.23	0.41068	1018.482	0.0	0	5.969	1.22788	3.17993	0.05983	-0.39669493388	0.0
2015-04-22 20:28:30	0.05133	1663.17751	0.66933	15.228	0.41359	1018.433	499.726	0	6.49	1.2278	3.16258	0.05951	-0.11334140808	0.0
2015-04-22 20:28:31	0.05133	1663.2826	0.67133	15.229	0.41455	1018.445	0.0	0	6.403	1.22781	3.17203	0.05969	-0.39669493388	0.0
2015-04-22 20:28:32	0.05167	1663.2826	0.67067	15.229	0.42335	1018.458	0.0	0	6.174	1.22775	3.16892	0.06002	-0.19834746582	0.0
2015-04-22 20:28:33	0.052	1663.3877	0.67067	15.23	0.42784	1018.453	0.0	0	5.718	1.22771	3.16892	0.0604	-0.0850060555	0.0
2015-04-22 20:28:34	0.05167	1663.2826	0.672	15.229	0.42505	1018.454	0.0	0	5.853	1.22774	3.1752	0.06014	-0.42503028646	0.0
2015-04-22 20:28:35	0.052	1663.49281	0.671	15.231	0.42378	1018.404	499.731	0	6.092	1.22768	3.17048	0.06043	-0.14167676066	0.0
2015-04-22 20:28:36	0.052	1663.49281	0.67	15.231	0.41596	1018.435	499.702	0	6.273	1.22777	3.16575	0.06034	-0.34002422872	0.0

Σχήμα 5.4: Προβολή μετρήσεων

- Προβολή όλων των μετρήσεων στη βάση. Σε αυτή τη περίπτωση, όλα τα πεδία πρέπει να υποβληθούν κενά

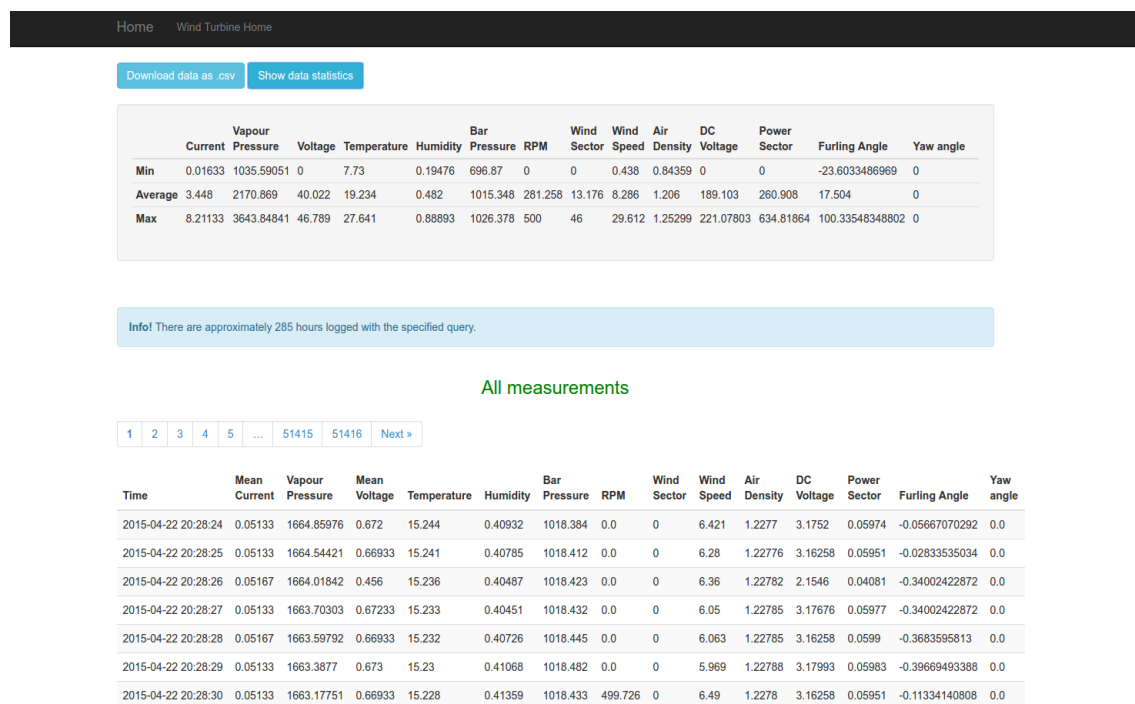
Μετά την υποβολή της φόρμας, εμφανίζεται η σελίδα της εικόνας 5.4.

Φαίνονται οι μετρήσεις καθώς και η δυνατότητα να γίνει κατέβασμα αυτών σε αρχείο .csv<sup>2</sup>. Το κουμπί Show data statistics κάνει ανάλυση των δεδομένων που εμφανίζονται και εμφανίζει τον πίνακα που φαίνεται στην εικόνα 5.5.

Επισημαίνεται, πως για την εμφάνιση των μετρήσεων έχει υλοποιηθεί σελιδοποίηση στη μεριά του εξυπηρετητή (server-side pagination). Χωρίς αυτήν την υλοποίηση, με την υποβολή της φόρμας που φαίνεται στην εικόνα 5.3, στέλνονται όλα τα δεδομένα από τον εξυπηρετητή στον πελάτη και ο φυλλομετρητής του πελάτη αναλαμβάνει να σελιδοποιήσει και να προβάλλει όλον τον όγκο δεδομένων. Στην περίπτωση μας όμως, ο όγκος αυτών των δεδομένων μπορεί να είναι τεράστιος και η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει ιδιαίτερα χρονοβόρα και πολύ απαιτητική ως προς τους υπολογιστικούς πόρους που πρέπει να διαθέσει ο πελάτης.

Με τη σελιδοποίηση στη μεριά του εξυπηρετητή, κάθε φορά στέλνονται μόνο τα δεδομένα για τη σελίδα που ζητείται και κάθε φορά ο πελάτης έχει να διαχειριστεί έναν πολύ μικρό όγκο δεδομένων. Έτσι, όταν γίνεται υποβολή της φόρμας, εμφανίζεται ο αριθμός των σελίδων και τα δεδομένα για την πρώτη σελίδα. Όταν ο χρήστης ζητήσει δεδομένα για κάποια άλλη

<sup>2</sup>Στην υπολογιστική, ένα comma-separated values (CSV) αρχείο αποθηκεύει δεδομένα σε μορφή πίνακα (αριθμούς και κείμενο) σε μορφοποίηση απλού κειμένου. Κάθε γραμμή του αρχείου είναι μια εγγραφή δεδομένων και κάθε εγγραφή αποτελείται από ένα ή περισσότερα πεδία χωρισμένα με κόμμα, εξ' ου και το όνομα.



Σχήμα 5.5: Στατιστική ανάλυση των δεδομένων που ζητήθηκαν

σελίδα, ο εξυπηρετητής αναλαμβάνει να βρει τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτήν και τα στέλνει στον χρήστη.

Τέλος, φαίνεται πως εμφανίζεται σε μήνυμα πόσες ώρες μετρήσεων υπάρχουν στη βάση δεδομένων με τις συνθήκες που επιλέχθηκαν.

## Γραφήματα

Τα γραφήματα που εμφανίζονται στην κατηγορία Wind Turbine Services υπαγορεύονται από τα πρότυπα IEC καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων για την εξαγωγή τους, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η βασική ανάλυση γίνεται για την εξαγωγή της καμπύλης ισχύος. Αυτή πρέπει να εμφανίζεται σε μορφή γραφήματος αλλά και σε μορφή πίνακα όπου θα αναγράφονται και μεγέθη όπως οι αβεβαιότητες, η ένταση της τύρβης κ.α. Στις εικόνες 5.6 και 5.7 φαίνονται αυτές οι δύο μορφές.

Στις εικόνες 5.8 έως και 5.13 φαίνονται τα υπόλοιπα γραφήματα όπως προκύπτουν από δεδομένα για μια ανεμογεννήτρια.

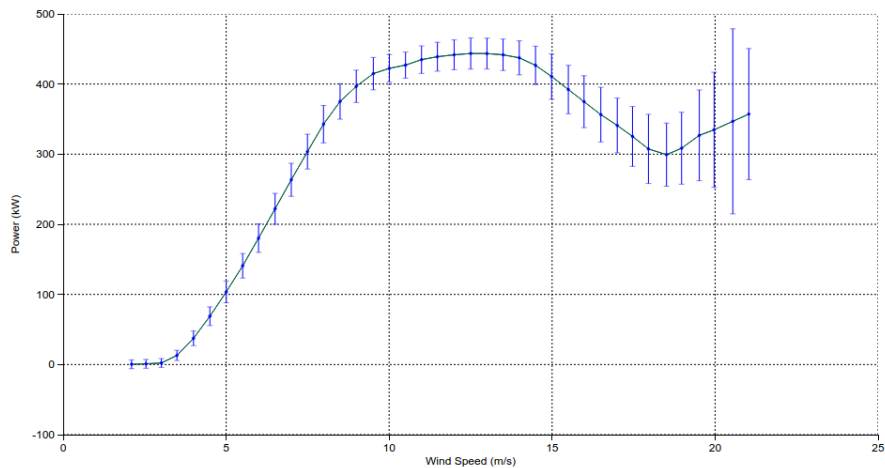
## Γραφικοποίηση μετρήσεων

Στη συνέχεια, στην κατηγορία Measurements Plotting Options, υπάρχουν επιλογές για την εξαγωγή γραφημάτων από τις μετρήσεις άνευ επεξεργασίας. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από την εικόνα 5.2, υπάρχουν οι εξής επιλογές:

Home

## Wind-Power Graph

Measured power curve corrected to sea level air density 1,225 kg/m



Σχήμα 5.6: Γραφική αναπαράσταση της καμπύλης ισχύος

Home

## Power Curve Table

Measured power curve

Reference air density: 1.225kg/m<sup>3</sup>

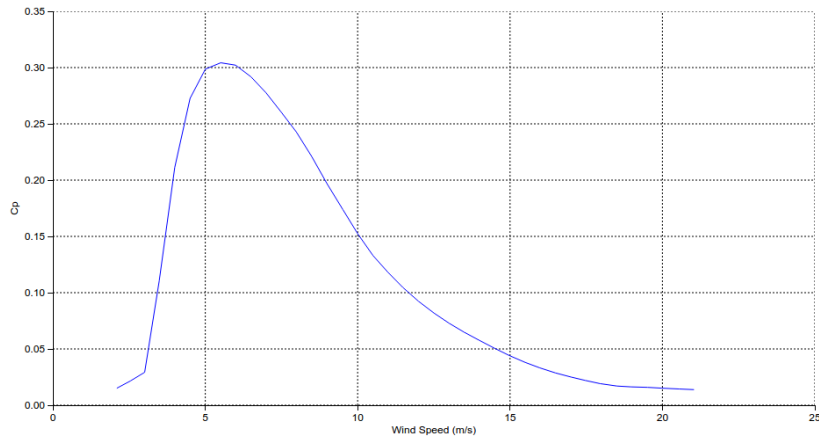
Bin no.	Hub height wind speed [m/s]	Power output [kW]	Cp	No. of data sets(1 min. avg.)	Category A standard uncertainty [kW]	Category B standard uncertainty [kW]	Combined standard uncertainty [kW]	Turbulence intensity [%]
3	2.1	0.39	0.015	76	0.11	6.32	6.32	7.72
4	2.5	0.98	0.022	416	0.11	6.32	6.32	7.45
5	3.0	2.21	0.029	949	0.1	6.33	6.33	7.1
6	3.5	13.0	0.11	823	0.43	7.26	7.27	8.5
7	4.0	37.4	0.211	776	1.32	10.35	10.43	9.05
8	4.5	68.87	0.273	763	2.47	13.11	13.34	9.3
9	5.0	103.61	0.299	803	3.63	15.01	15.44	9.22
10	5.5	140.79	0.304	824	4.87	16.77	17.46	9.17
11	6.0	180.27	0.302	746	6.58	19.24	20.33	9.16
12	6.5	222.09	0.292	810	7.77	20.67	22.08	7.79
13	7.0	263.42	0.277	956	8.48	21.99	23.57	7.22
14	7.5	303.6	0.26	854	10.35	22.58	24.84	6.65
15	8.0	342.75	0.243	698	12.95	23.38	26.72	6.65
16	8.5	375.21	0.221	599	15.3	20.15	25.3	6.57
17	9.0	396.74	0.197	527	17.24	15.31	23.06	6.89
18	9.5	414.84	0.174	488	18.74	13.49	23.09	6.87
19	10.0	422.38	0.152	593	17.31	9.11	19.56	7.01

Σχήμα 5.7: Καμπύλη ισχύος και διάφορα μεγέθη σε μορφή πίνακα

Home

## Wind-Cp Graph

Cp at sea level air density 1.225 kg/m



Σχήμα 5.8: Καμπύλη ταχύτητας ανέμου-αεροδυναμικού συντελεστή

Home

## AEP Table

Estimated annual energy production

Reference air density: 1.225kg/m<sup>3</sup>

Cut out wind speed : 21.0 m/s

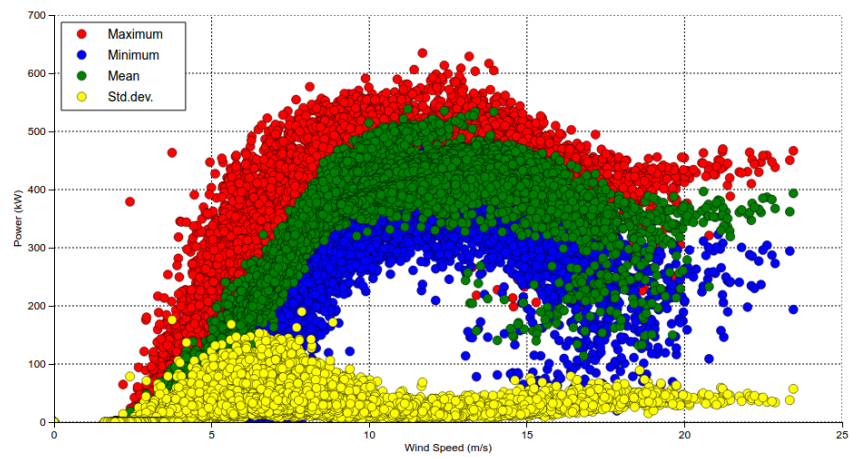
Hub height annual average wind speed (Rayleigh) [m/s]	AEP-measured (measured power curve) [MWh]	Standard uncertainty in AEP [MWh]	Standard uncertainty in AEP [%]
4	703.52	98.8	14.04
5	1171.35	113.24	9.67
6	1604.25	119.67	7.46
7	1960.17	121.85	6.22
8	2225.91	122.37	5.5
9	2402.55	122.11	5.08
10	2499.0	121.12	4.85
11	2528.65	119.28	4.72

Σχήμα 5.9: Πίνακας της ετήσιας παραγωγής ενέργειας για ετήσιες μέσες ταχύτητες ανέμου από 4 έως 11 m/s κατανομής Rayleigh



Home

## Power Statistics Scatter Plot

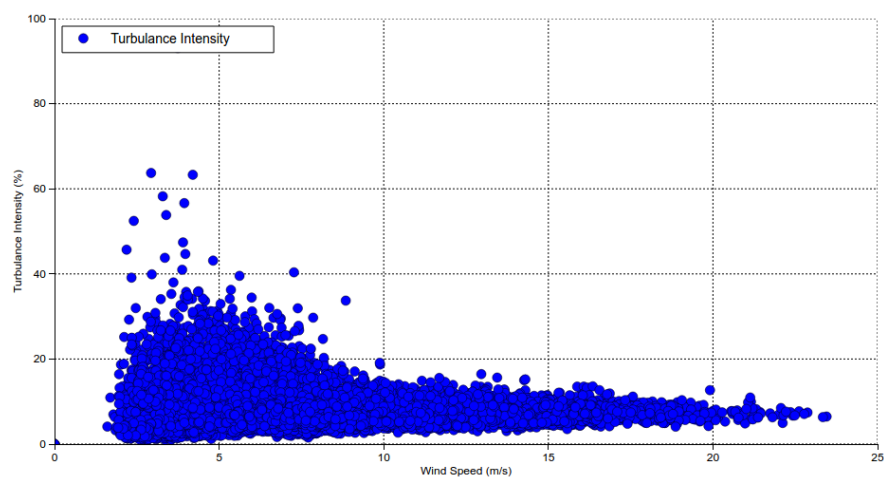


power performance test scatter plots sampled at 1 Hz (mean values averaged over 1 min)

Σχήμα 5.10: Διάγραμμα διασποράς στατιστικών μεγεθών της ισχύος εξόδου

Home

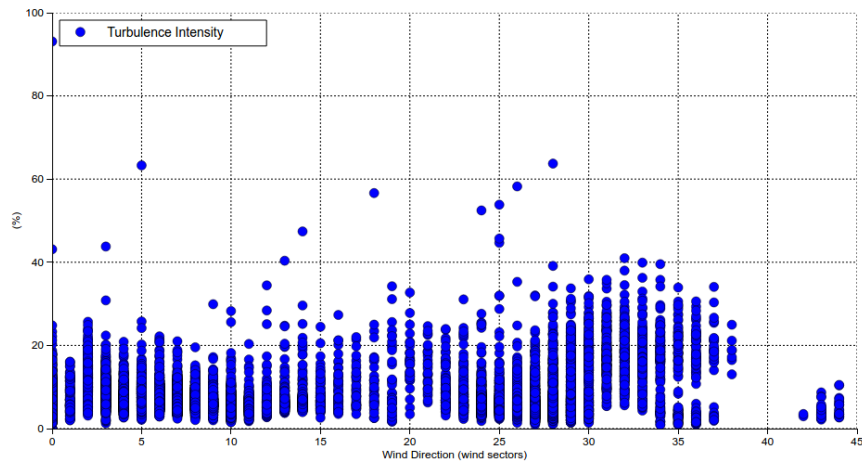
## Turbulence intensity versus wind speed scatter plot



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα διασποράς της έντασης της τύρβης συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

Home

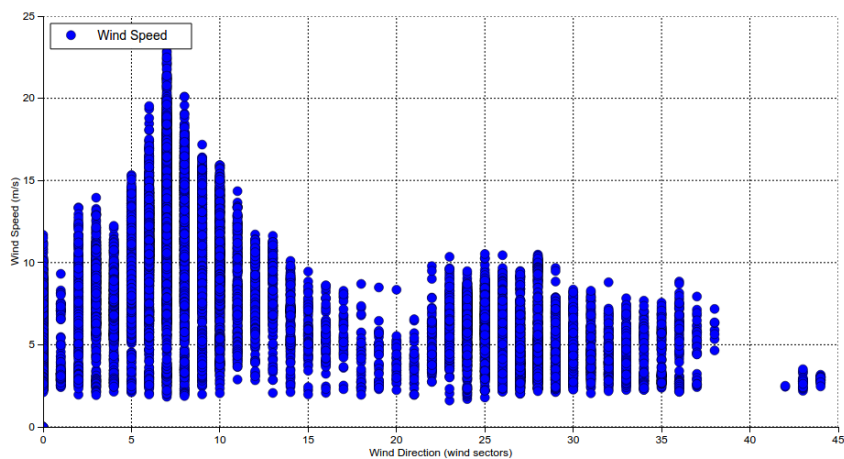
Turbulence intensity versus wind direction scatter plot



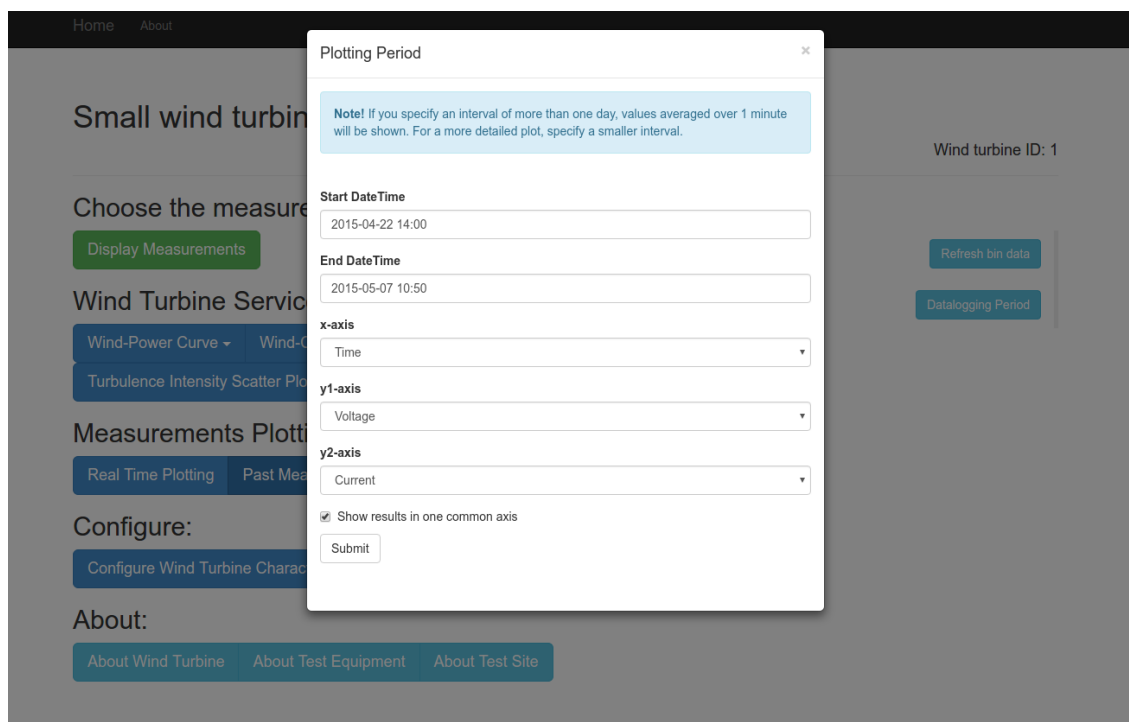
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα διασποράς της έντασης της τύρβης συναρτήσει της διεύθυνσης του ανέμου

Home

Wind speed versus wind direction scatter plot



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα διασποράς της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει της διεύθυνσης του



Σχήμα 5.14: Επιλογές για την εξαγωγή του γραφήματος

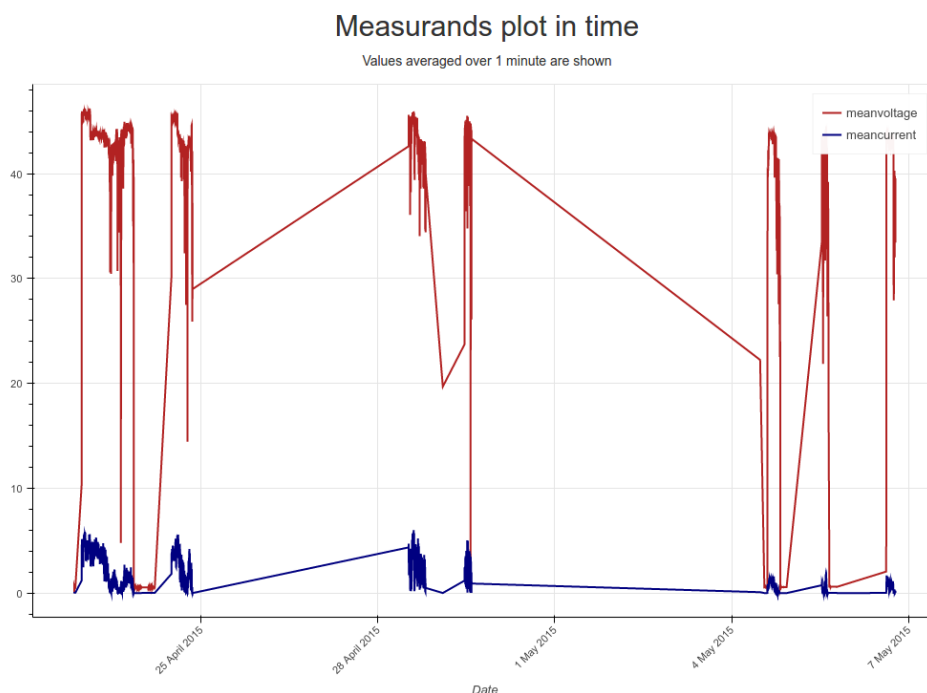
- Γραφικοποίηση πραγματικού χρόνου. Εμφανίζονται γραφικά οι μετρήσεις όπως εισάγονται στη βάση δεδομένων
- Γραφικοποίηση μετρήσεων που υπάρχουν ήδη στη βάση δεδομένων
- Γραφικοποίηση ενός μεγέθους από μια ανεμογεννήτρια, συναρτήσει του ίδιου μεγέθους από μια άλλη ανεμογεννήτρια

Ενδεικτικά, παρατίθενται εικόνες του γραφήματος του ρεύματος και της τάσης συναρτήσει του χρόνου για μια ανεμογεννήτρια όπως φαίνεται από τις εικόνες 5.14 και 5.15. Φαίνεται πως αν ορισθεί χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της μίας ημέρας, το λογισμικό βρίσκει τις μέσες τιμές για διαστήματα του ενός λεπτού, και κατασκευάζει το γράφημα με βάση αυτές. Αυτό γίνεται γιατί στην αντίθετη περίπτωση, θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα η διαδικασία κατασκευής του με υπέρογκο αριθμό μετρήσεων. Επίσης τα μεγέθη που μπορούν να κατασκευαστούν γραφικά είναι όλα αυτά που είναι αποθηκευμένα στη βάση και φαίνονται στην εικόνα 5.4. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής του γραφήματος σε έναν κοινό άξονα ή σε δύο άξονες, έναν για το κάθε μέγεθος. Εννοείται πως αν το πεδίο του δεύτερου μεγέθους (y2-axis) αφεθεί κενό, κατασκευάζεται γράφημα για ένα μέγεθος.

### Λοιπές πληροφορίες και δυνατότητες

Με το κουμπί Configure wind turbine characteristics, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των βασικών στοιχείων (εικόνα 5.1) μιας ανεμογεννήτριας όπως αυτά βρίσκονται στη βάση δεδομένων και τα οποία είναι απαραίτητα σε κάποιους υπολογισμούς.

Home



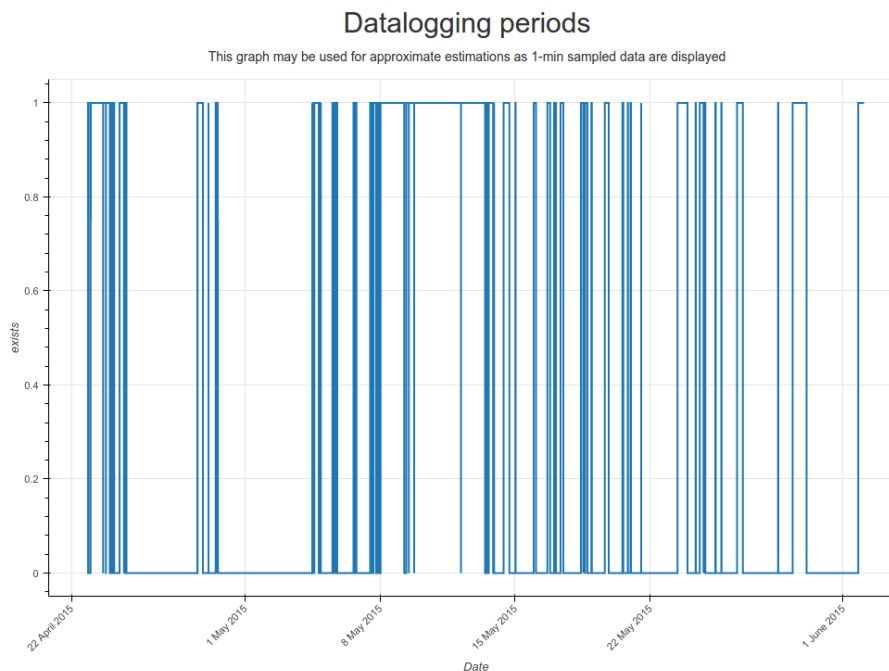
Σχήμα 5.15: Γράφημα τάσης και ρεύματος εξόδου συναρτήσει του χρόνου

Στην κατηγορία "About", φαίνονται πληροφορίες σχετικά με την ανεμογεννήτρια, τον εξοπλισμό και τον χώρο δοκιμών.

### Ανανέωση επεξεργασμένων δεδομένων

Όταν ζητηθεί κάποια από τις υπηρεσίες που βρίσκονται στην κατηγορία "Wind turbine services", λαμβάνει μέρος μία επεξεργασία δεδομένων όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να κρατήσει και αρκετά δευτερόλεπτα, ανάλογα με τον όγκο των δεδομένων που υπάρχουν στη βάση. Έτσι, αν ζητηθεί παραδείγματος χάρη η καμπύλη ισχύος, θα λάβει μέρος η επεξεργασία και θα γίνει εμφάνιση αυτής. Αν αμέσως μετά ο χρήστης θέλει να δει την καμπύλη Cp-ταχύτητας ανέμου ή την ετήσια παραγωγή ενέργειας, κάθε φορά θα γίνεται η επεξεργασία από την αρχή, πράγμα αρκετά χρονοβόρο και χωρίς κάποιο ουσιαστικό κέρδος.

Γι' αυτόν τον λόγο, το σύστημα αυτόματα κρατάει τα στοιχεία που έχουν εξαχθεί μετά την επεξεργασία για χρόνο 10 λεπτών. Με άλλα λόγια, όποια υπηρεσία ζητηθεί, θα εμφανιστεί με τα στοιχεία που έχουν υπολογιστεί μέσα στα προηγούμενα 10 λεπτά. Είναι ένας χρόνος που δεν μεταβάλλει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων καθώς γίνεται λόγος για μέρες μετρήσεων αποθηκευμένων στη βάση. Αν ο χρήστης ζητήσει μια υπηρεσία και η τελευταία επεξεργασία έγινε σε χρόνο μεγαλύτερο από 10 λεπτά στο παρελθόν, τα δεδομένα υφίστανται την ίδια επεξεργασία εξ' αρχής.



Σχήμα 5.16: Δυαδικό γράφημα ύπαρξης μετρήσεων στη βάση δεδομένων

Το κουμπί "Refresh bin data" (εικόνα 5.2) εκτελεί την επεξεργασία των δεδομένων χειροκίνητα, αν για κάποιον λόγο ο χρήστης θελήσει να δει κάποια υπηρεσία με τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί μέχρι τώρα στη βάση και όχι μέχρι πριν το πολύ 10 λεπτά.

### Περίοδος συλλογής δεδομένων

Πάτημα του κουμπιού "Datalogging period", προβάλλει ένα απλό γράφημα με τιμές 0 και 1 στον άξονα y και τον χρόνο στον άξονα x. Στην ουσία δείχνει για ποια χρονικά διαστήματα έχουμε μετρήσεις στη βάση δεδομένων. Είναι μια χρήσιμη λειτουργία, καθώς για κάποιες περιόδους η ανεμογεννήτρια μπορεί να αναστείλει τη λειτουργία της λόγω κάποιας επιδιόρθωσης ή λόγω χαμηλών ταχυτήτων ανέμου ή απλά λόγω βλάβης στο μετρητικό σύστημα. Με αυτό το γράφημα λοιπόν, ο χρήστης γνωρίζει για ποιες ημερομηνίες μπορεί να κάνει αναζήτηση ή να εξάγει αποτελέσματα και γραφήματα. Στην εικόνα 5.16, φαίνονται οι περίοδοι μέτρησεων για μια ανεμογεννήτρια.

Σημειώνεται πως και στη συγκεκριμένη επεξεργασία, υπολογίζεται κατά προσέγγιση η ύπαρξη σε διαστήματα ενός λεπτού καθώς στην αντίθετη περίπτωση η διαδικασία θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα.



## Κεφάλαιο 6

# Καταγραφέας δεδομένων ανοικτού κώδικα και επιλογή υλικού

Όπως προειπώθηκε, ο στόχος ήταν η σχεδίαση ενός χαμηλού κόστους datalogger για μικρές ανεμογεννήτριες. Πιο συγκεκριμένα, να δημιουργηθούν όλα τα απαραίτητα συστατικά από τα οποία αποτελείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής δεδομένων και στη συνέχεια αυτά να συνδυαστούν ώστε να προκύψει ένας datalogger συμβατός με τα διεθνή πρότυπα IEC 61400-12-1.

Η βασική ιδέα πίσω από τη σχεδίαση, ήταν ο datalogger να είναι όσο το δυνατόν πιο παραμετροποιήσιμος. Η σχεδίαση του έγινε με το σκεπτικό να μπορεί να λειτουργήσει είτε με αυξημένες είτε με μειωμένες δυνατότητες, ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Με αυτή τη λογική, δεν σχεδιάστηκε σαν ένα ενιαίο σύστημα, αλλά σχεδιάστηκαν επιμέρους τα συστατικά του (modules) ώστε να είναι δυνατή η επιλογή κάποιων εξ'αυτών ή και όλων, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Επίσης, αυτή η φιλοσοφία καθιστά δυνατή την αντικατάσταση, αν κριθεί απαραίτητο, κάποιων εξ'αυτών.

### Επισκόπηση του datalogger

Ο datalogger, διαιρείται στα ακόλουθα δομοστοιχεία:

- Τροφοδοσία
- Μετρητικά και περιφερειακά:
  1. ηλεκτρικών μετρήσεων
  2. μετεωρολογικών μετρήσεων
- Κεντρική Μονάδα επεξεργασίας
- Εξωτερικές συσκευές διεπαφής

- Λογισμικό μεταεπεξεργασίας δεδομένων

## Περιγραφή του συστήματος συλλογής δεδομένων

Το μετρητικό σύστημα, σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί και σε αιολικά πάρκα με παραπάνω από μία ανεμογεννήτριες. Η φιλοσοφία λειτουργίας του περιγράφεται γραφικά με το σχήμα 6.2

Οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι στις ανεμογεννήτριες και λαμβάνουν τα αναλογικά σήματα από αυτές όπως τιμές ρεύματος, τάσης κ.α. Τα σήματα αυτά ύστερα δειγματοληπτούνται από έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (analog to digital converter) ο οποίος μετατρέπει τις αναλογικές τιμές σε ψηφιακές. Οι ψηφιακές πλέον τιμές επεξεργάζονται από έναν μικροελεγκτή ο οποίος δρομολογεί τα πακέτα μετρήσεων μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας mqtt στον εξυπηρετητή. Αυτός αποκωδικοποιεί τα πακέτα και τα αποθηκεύει με την κατάλληλη διαμόρφωση στη βάση δεδομένων. Ο εξυπηρετητής επίσης, αναλαμβάνει τη λειτουργία του λογισμικού μεταεπεξεργασίας των δεδομένων, το λογισμικό δηλαδή που αναλαμβάνει όλη τη διεπαφή του μετρητικού συστήματος (ουσιαστικά της βάσης δεδομένων) με τον χρήστη. Με το πρωτόκολλο http, καθίσταται δυνατή η επικοινωνία του χρήστη με τον εξυπηρετητή και του δίνει τη δυνατότητα να έχει πρόσβαση στις διάφορες υπηρεσίες.

Πέρα από το λογισμικό μεταεπεξεργασίας δεδομένων το οποίο αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα διαιρείται σε δυο υποσυστήματα όσον αφορά το υλικό:

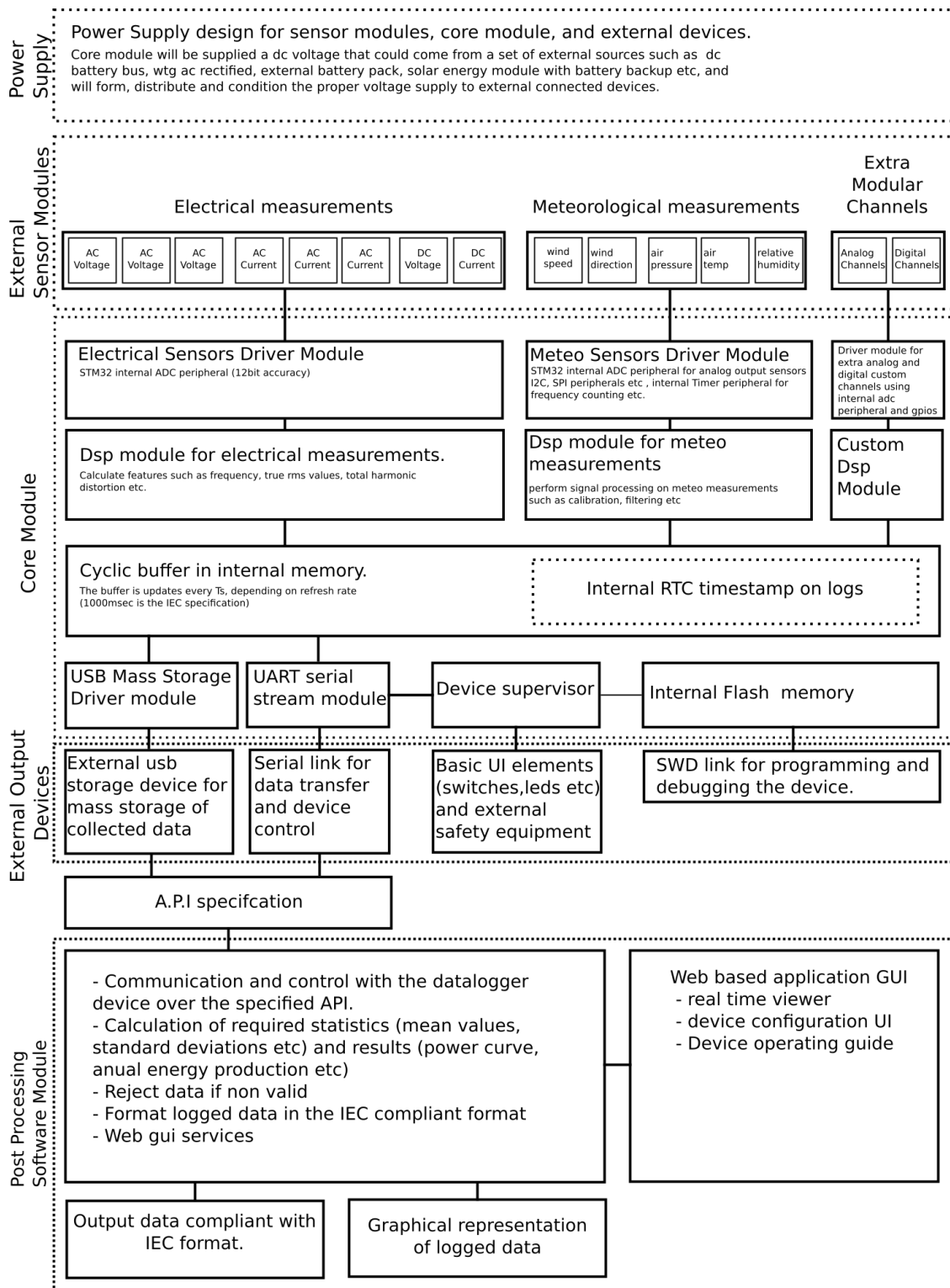
- Τη μετρητική μονάδα ηλεκτρικών μεγεθών που θα περιέχει τους αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά στοιχεία που θα συλλέγουν τα σήματα από τις ανεμογεννήτριες.
- Τον μικροελεγκτή ο οποίος έχει ενσωματωμένους τους αναλογικούς σε ψηφιακούς μετατροπείς και καθιστά τα σήματα κατάλληλα προς καταγραφή και αποθήκευση.

Τα αναλογικά μεγέθη που συλλέγονται από τους αισθητήρες είναι:

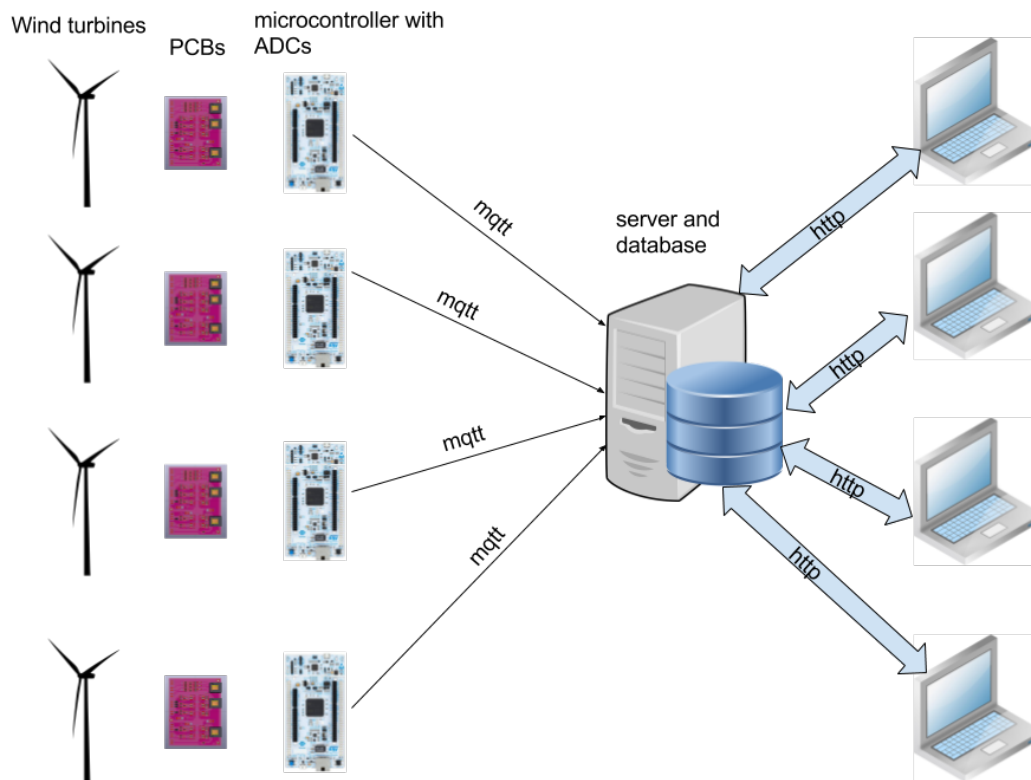
- Εναλλασσόμενο ρεύμα
- Εναλλασσόμενη τάση
- DC ρεύμα
- DC τάση
- Ταχύτητα ανέμου

Σημειώνεται πως ο καταγραφέας προορίζεται για χρήση σε μικρές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 600 W, 1 kW και 1,8 kW και για σύνδεση σε συσσωρευτές των 24 V και των 48 V. Οι αισθητήρες επιλέχθηκαν με βάση τις προδιαγραφές και τους περιορισμούς της σχεδίασης.





Σχήμα 6.1: Σχεδίαση του συστήματος συλλογής δεδομένων στα επιμέρους του στοιχεία



Σχήμα 6.2: Τρόπος λειτουργίας του datalogger

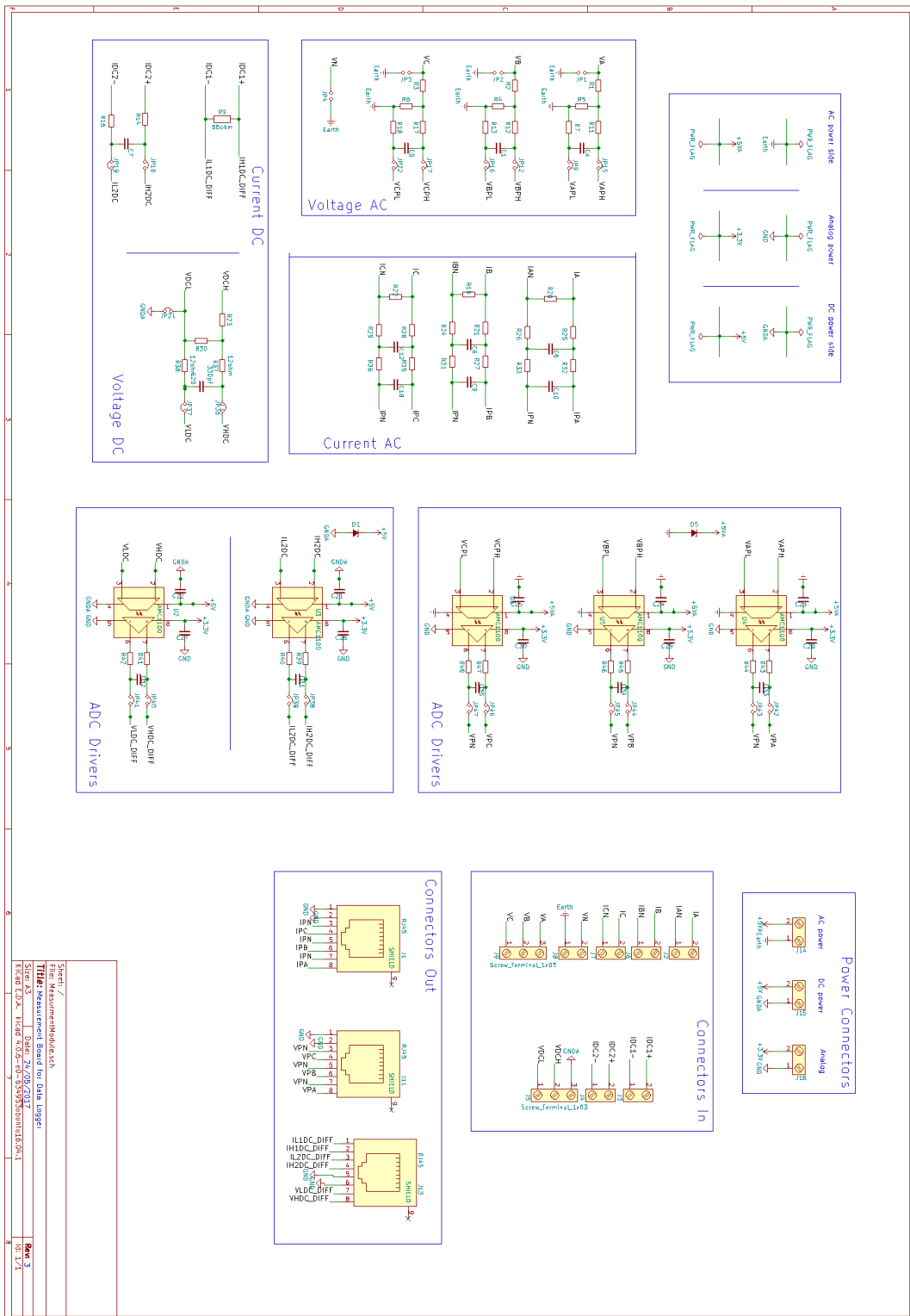
## Μετρητική μονάδα ηλεκτρικών μεγεθών

Η μετρητική πλακέτα είναι αυτή η οποία θα βρίσκεται πάνω στις ανεμογεννήτριες και θα αναλαμβάνει τη συλλογή των μεγεθών από αυτές. Πάνω στο PCB<sup>1</sup> βρίσκονται τα κυκλώματα για τη μέτρηση του εναλλασσομένου ρεύματος και τάσης, του DC ρεύματος και τάσης καθώς και της ταχύτητας του ανέμου. Παρακάτω επεξηγούνται τα κυκλώματα αυτά.

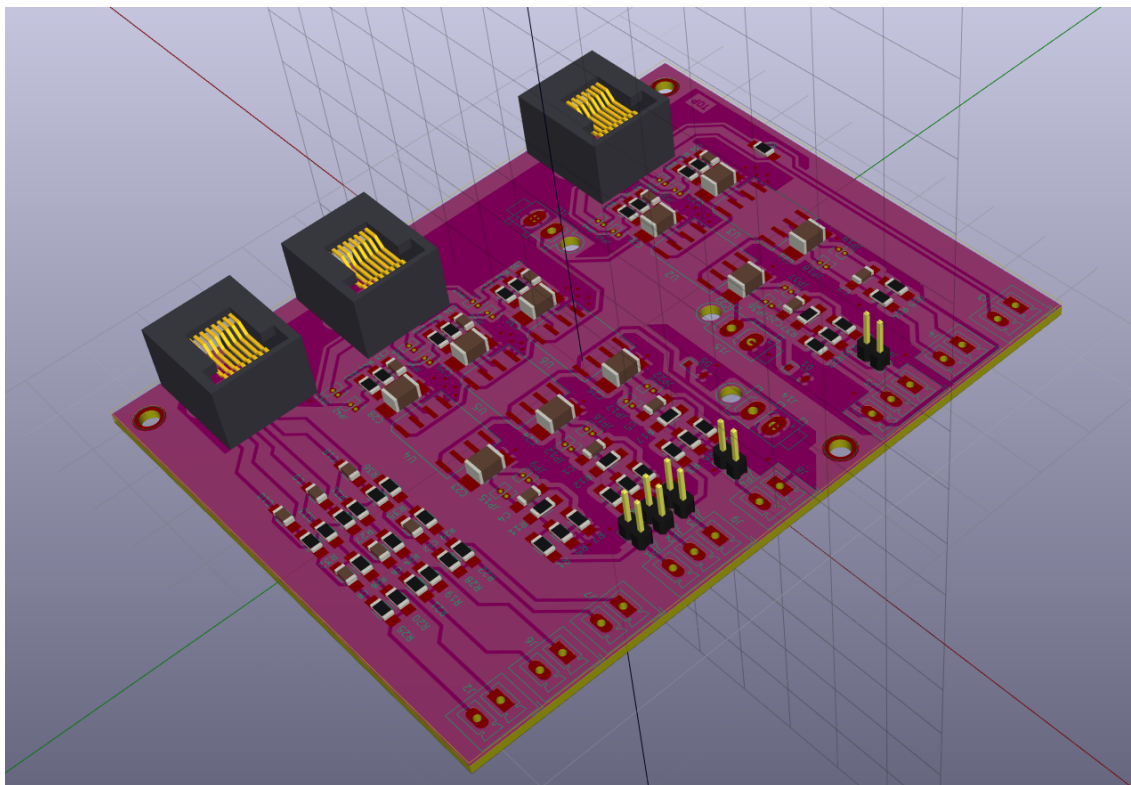
### Γαλβανική απομόνωση

Η σωστή απομόνωση των διάφορων μερών του κυκλώματος είναι απαραίτητη. Αυτό γιατί, στην αντίθετη περίπτωση, προκύπτουν ζητήματα που προκαλούν δυσλειτουργία του κυκλώματος με την αύξηση παρασιτικών ρευμάτων, θορύβου αλλά και με την εμφάνιση βρόχων γειώσεων (ground loops). Συνοπτικά, τα ground loops εμφανίζονται όταν υπάρχουν πολλές διαδρομές για το ρεύμα προς τη γείωση. Αυτές οι διαδρομές μπορούν να συλλάβουν ρεύματα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που δεν θα έπρεπε με αποτέλεσμα την ύπαρξη

<sup>1</sup>Το PCB προέρχεται από το Printed Circuit Board (πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος). Υποστηρίζει μηχανικά και συνδέει ηλεκτρικά ηλεκτρονικά στοιχεία χρησιμοποιώντας αγωγίσιμους δρόμους, τρύπες και άλλα χαρακτηριστικά χαραγμένα από στρώματα χαλκού πάνω σε ένα μη αγωγίσιμο υλικό. Στοιχεία όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, ολοκληρωμένα κυκλώματα κ.α. βρίσκονται συνήθως σε ένα PCB.



Σχήμα 6.3: Το schematic του PCB



Σχήμα 6.4: Η τρισδιάστατη προβολή της πλακέτας όπως φαίνεται από το πρόγραμμα Kicad

ανεπιθύμητου ρεύματος σε έναν αγωγό δύο σημεία του οποίου θα έπρεπε να βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό αλλά τελικά βρίσκονται σε διαφορετικό. Έτσι, προκαλείται θόρυβος αλλά και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο κύκλωμα [18].

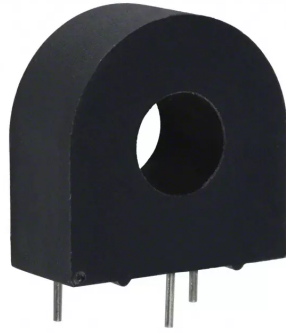
Η διάταξη της πλακέτας σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να είναι γαλβανικά απομονωμένα τα τρία κύρια μέρη του συστήματος. Αυτά είναι το κομμάτι των εναλλασσομένων σημάτων, το κομμάτι των σταθερών σημάτων και το κομμάτι μετά τους απομονωτές. Όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.3, τα τρία αυτά μέρη έχουν τη δική τους ξεχωριστή τροφοδοσία αλλά και γείωση.

### Μέτρηση εναλλασσομένου ρεύματος

Για τη μέτρηση του AC ρεύματος, επιλέχθηκε η χρήση μετασχηματιστών ρεύματος. Πρόκειται για έναν τρόπο μέτρηση χαμηλού κόστους. Σε σχέση με τις αντιστάσεις shunt, οι οποίες έχουν το χαμηλότερο κόστος, οι μετασχηματιστές προσφέρουν γραμμικότητα για ένα μεγάλο εύρος ρεύματος και θερμοκρασίας. Επίσης, καταναλώνουν λιγότερη ισχύ και προσφέρουν μεγάλη ευκολία στη σύνδεση της ανεμογεννήτριας.

Το μοντέλο μετασχηματιστή που επιλέχθηκε είναι το AC-1020. Η κατασκευαστική του εταιρία είναι η Acme Electric και πρόκειται για έναν χαμηλού κόστους μετασχηματιστή ρεύματος του οποίου οι εφαρμογές μπορεί να είναι από υπόδειξη ρεύματος σφάλματος μέχρι μετρητικά στοιχεία αλλά και σε εφαρμογές αναλογικής σε ψηφιακής μετατροπής [33]. Έχει ονομαστικό ρεύμα 20 A, μέγιστο ρεύμα 60 A και λόγο μετασχηματισμού 1000:1.

Οι μετασχηματιστές δεν θα είναι ενσωματωμένοι πάνω στην πλακέτα. Αυτό για λόγους



Σχήμα 6.5: Ο μετασχηματιστής ρεύματος AC-1020

οικονομίας χώρου σε αυτήν αλλά και γιατί η σύνδεση τους εξωτερικά πέρα από το ότι είναι εύκολη, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα καθώς υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης του μετασχηματιστή με κάποιον διαφορετικών προδιαγραφών. Επίσης, όπως φαίνεται από το σχήμα 6.3, τα AC ρεύματα δεν περνάνε από απομονωτή αλλά εισέρχονται απευθείας στον επεξεργαστή. Αυτό γιατί ο μετασχηματιστής ρεύματος προσφέρει τη δική του απομόνωση από το υπόλοιπο κύκλωμα.

### Μέτρηση τάσης

Για την μέτρηση της τάσης, DC και AC επιλέχθηκε η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες εφαρμογές ψηφιακών μετρητικών, δηλαδή ένας διαιρέτης τάσης. Ο λόγος της επιλογής είναι το πολύ χαμηλό κόστος και ο απλός σχεδιασμός του κυκλώματος και της πλακέτας. Ο διαιρέτης, μας δίνει τη δυνατότητα να υποβιβάσουμε τη τάση της ανεμογεννήτριας σε επίπεδα εντός του εύρους της τάσης εισόδου του μικροελεγκτή και κατά συνέπεια των ADCs του. Στην αναλογική πλευρά και μετά τον διαιρέτη, χρησιμοποιούμε διαφορικούς απομονωτές καθώς, σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές που προσφέρουν απομόνωση για τη μέτρηση του ρεύματος, ο διαιρέτης τάσης δεν απομονώνει το κύκλωμα.

Σαν διαφορικός απομονωτής, επιλέχθηκε το AMC1100 της Texas Instruments. Το εύρος της τάσης εισόδου του είναι  $\pm 250mV$ . Το εύρος της AC τάσης της ανεμογεννήτριας είναι 3-70 V rms. Όπως έχει ειπωθεί, η τάση εξόδου στον διαιρέτη υπολογίζεται από τη σχέση 2.13. Για την επιλογή των τιμών των αντιστάσεων όμως, πρέπει να γίνει και ένας ακόμα συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας και της κατανάλωσης ισχύος του διαιρέτη. Η συνολική ακρίβεια, δίνεται από την εξίσωση:

$$Acc_{total} = Acc_{component} + \frac{R_2}{R_s} \quad (6.1)$$

Από την εξίσωση αυτή, γίνεται κατανοητό πως μικρότερη τιμή της  $R_2$  συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Από την άλλη, μικρότερες τιμές των  $R_1$ ,  $R_2$  συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις αντιστάσεις λοιπόν και προσφέρουν ακρίβεια της τάξης του 2% είναι  $R_1 = 499\Omega$  και  $R_2 = 196k\Omega$ .

## Μέτρηση συνεχούς ρεύματος

Σε σχέση με τις μεθόδους μέτρησης του εναλλασσόμενου ρεύματος, οι τρόποι μέτρησης του συνεχούς ρεύματος είναι πιο περιορισμένοι. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μετατροπές ρεύματος κλειστού βρόχου με χρήση του φαινομένου Hall. Αυτός προσφέρει πολύ καλή ακρίβεια, γραμμικότητα και ευκολία στη σύνδεση. Επίσης, προτιμήθηκε έναντι των ανοιχτού βρόχου μετατροπών, λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν στην επιλογή εύρους της τάσης εξόδου, λόγω της αντίστασης μέτρησης. Επομένως, θα ήταν εύκολη η χρήση όλου του εύρους πλήρους κλίμακας του μετρητικού μας, με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη αξιοπιστία μετρήσεων.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο LA 55-P [19].

Το συγκεκριμένο μοντέλο κατασκευάζεται από την εταιρία LEM και τα βασικότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος 50 A, μέγιστο ρεύμα πρωτεύοντος 70 A
- Ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος 70 mA
- Λόγος μετατροπής 1:1000
- Τάση τροφοδοσίας  $\pm 12$  έως  $\pm 15V$
- Εύρος συχνοτήτων έως 200 kHz
- Εύρος θερμοκρασίας  $-40$  έως  $85$  °C

## Λογισμικό σχεδίασης πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος

Η διαδικασία παραγωγής ενός PCB απαιτεί αρχικά από τον μηχανικό τη σχεδίαση του σε κάποιο λογισμικό και στη συνέχεια την αποστολή των αρχείων σχεδίασης (Gerber files) σε κάποια μονάδα παραγωγής η οποία διαθέτει τα ρομποτικά μέσα που τυπώνουν τη πλακέτα αυτή. Ειδικά αν γίνεται λόγος για πιο πολύπλοκα κυκλώματα που απαιτούν μεγάλο αριθμό στοιχείων στην ίδια πλακέτα, αυτή η διαδικασία είναι αναπόφευκτη και αποτελεί τη μοναδική λύση.

Σαν λογισμικό σχεδίασης της μετρητικής πλακέτας της εφαρμογής μας επιλέχθηκε το KiCad. Το KiCad είναι δωρεάν λογισμικό ανοικτού κώδικα που επιτελεί αυτόν τον σκοπό. Η γενική διαδικασία σχεδίασης ενός PCB αποτελείται από κάποια καθιερωμένα βήματα:

1. Σχεδίαση του κυκλώματος (schematic) που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Αυτό περιλαμβάνει τη γραφική αναπαράσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος που χρησιμοποιεί τις πρότυπες αναπαραστάσεις των ηλεκτρικών στοιχείων (αντιστάσεις, διόδους, πυκνωτές κ.α.) καθώς και τις συνδέσεις μεταξύ αυτών με απλές γραμμές. Το schematic της πλακέτας της εφαρμογής μας φαίνεται στην εικόνα 6.3.
2. Συσχέτιση των στοιχείων που υπάρχουν στο schematic με τα πραγματικά «ίχνη» (footprints) αυτών, τα οποία ορίζουν τις διαστάσεις που θέλουμε να έχουν στην πραγματική πλακέτα.

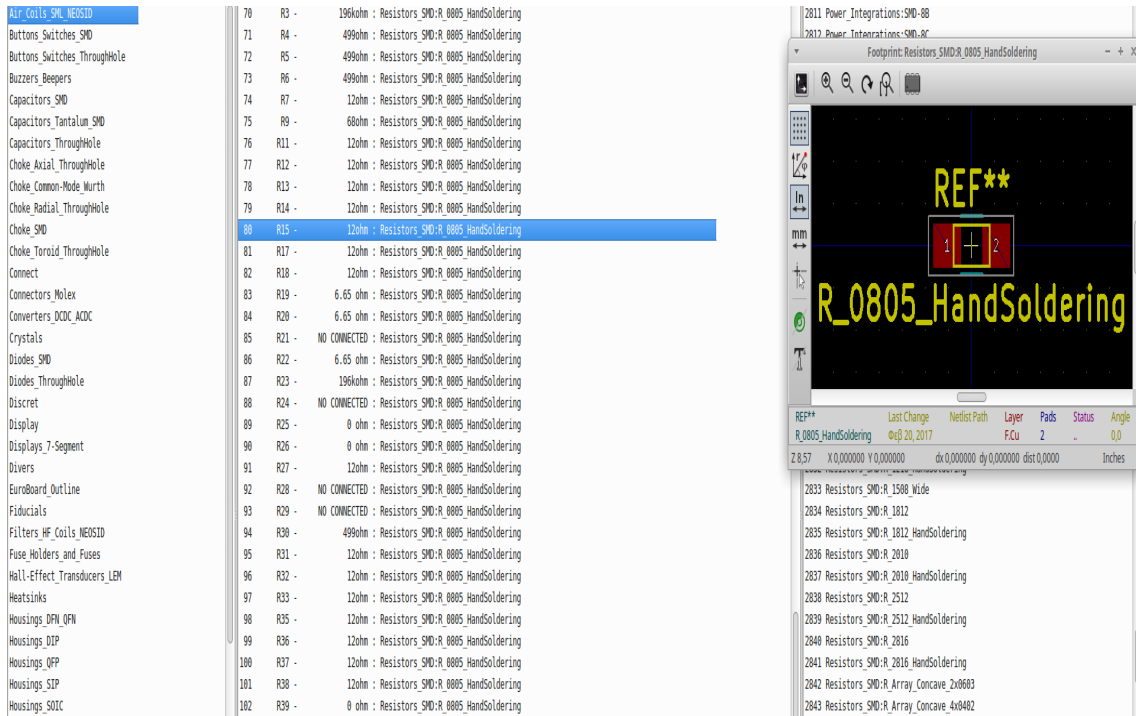
Το εργαλείο του KiCad που αναλαμβάνει αυτό το έργο ονομάζεται Cnrcb και παρέχει μια πληθώρα επιλογών για όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Στην εικόνα 6.6 φαίνεται ένα δείγμα από την εφαρμογή μας. Στη μεσαία στήλη βρίσκονται όλα τα στοιχεία που έχουν προστεθεί στο schematic. Στη δεξιά στήλη βρίσκονται όλα τα διαθέσιμα ίχνη για το κάθε στοιχείο. Αν είναι αντίσταση, όλες οι αντιστάσεις, αν είναι πυκνωτής, όλοι οι πυκνωτές κ.ο.κ. Υπάρχει και η δυνατότητα προβολής ενός ίχνους όπως φαίνεται στο ανοιχτό παράθυρο της εικόνας 6.6 όπου φαίνεται το ίχνος της αντίστασης καθώς και οι πραγματικές διαστάσεις του, όπως θα τυπωθεί στην τελική πλακέτα.

3. Το τελικό στάδιο το αναλαμβάνει το εργαλείο Pcbnew. Αρχικά, εμφανίζονται όλα τα footprints που έχουν οριστεί στο προηγούμενο στάδιο σε τυχαία διάταξη. Είναι έργο του μηχανικού να ορίσει τη θέση που θα έχει το καθένα στη τελική πλακέτα καθώς και να σχεδιάσει τους αγωγίσιμους δρόμους που θα ενώνουν ηλεκτρικά αυτά, σύμφωνα πάντα με το schematic. Αυτή είναι μια διόλου εύκολη διαδικασία, ιδιαίτερα όταν γίνεται λόγος για πολύπλοκη πλακέτα αρκετών στοιχείων. Αυτό γιατί οι αγωγίσιμοι δρόμοι δεν πρέπει προφανώς να υπερκαλύπτουν ο ένας τον άλλον για να μη δημιουργηθούν βραχυκυκλώματα. Πρέπει να δωθεί προσοχή στις αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων και των δρόμων ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές, στη γωνία που διαγράφουν αυτοί πάνω στη πλακέτα (ειδικά όταν πρόκειται για σήματα υψηλών συχνοτήτων), ή πού θα τοποθετηθούν οι γειώσεις και οι τροφοδοσίες. Επίσης, επιλέγονται οι «στρώσεις» (layers) που επιθυμούμε να έχει η πλακέτα. Στην εφαρμογή μας, η πλακέτα είναι δύο στρώσεων, δηλαδή υπάρχουν αγωγίσιμοι δρόμοι και από τις δύο πλευρές της. Υπάρχει η δυνατότητα για περισσότερες από δύο στρώσεις με χρήση διαφορετικών υλικών αλλά κάτι τέτοιο αυξάνει σημαντικά το κόστος και πέραν αυτού δεν κρίθηκε απαραίτητο στην εφαρμογή μας. Η ολοκληρωμένη έκδοση της πλακέτας φαίνεται στην εικόνα 6.7.

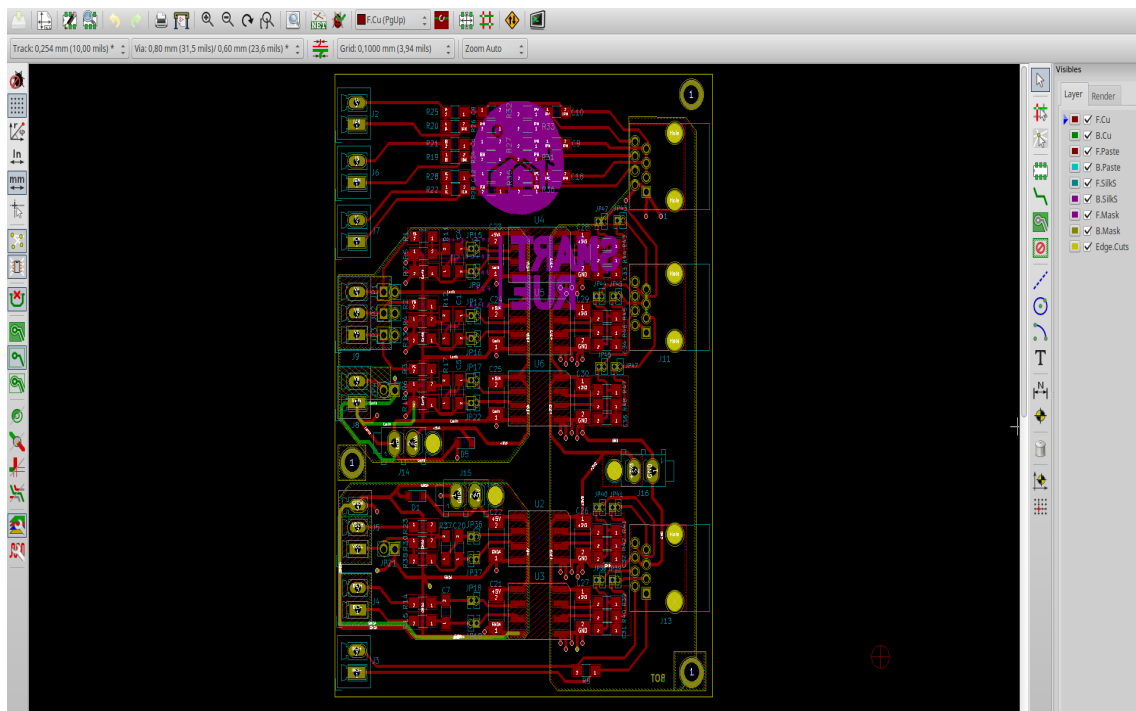
## Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε έρχεται πάνω στην πλακέτα ανάπτυξης STM32 Nucleo-144 της STMicroelectronics και φέρει την STM32F429ZI MCU. Προσφέρει μια πληθώρα επιλογών ως προς τη σχεδίαση της εφαρμογής όσον αφορά την απόδοση, την κατανάλωση ισχύος και τις δυνατότητες που προσφέρει. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

- STM32 μικροελεγκτής στο πακέτο LQFP144
- 3 LEDs για τον χρήστη
- 2 push-buttons: USER και RESET
- 32.768 kHz κρύσταλλος LSE (Low Speed External)
- Υποδοχή για Ethernet συμβατή με το πρότυπο IEEE-802.3-2002
- 5 V τροφοδοσία

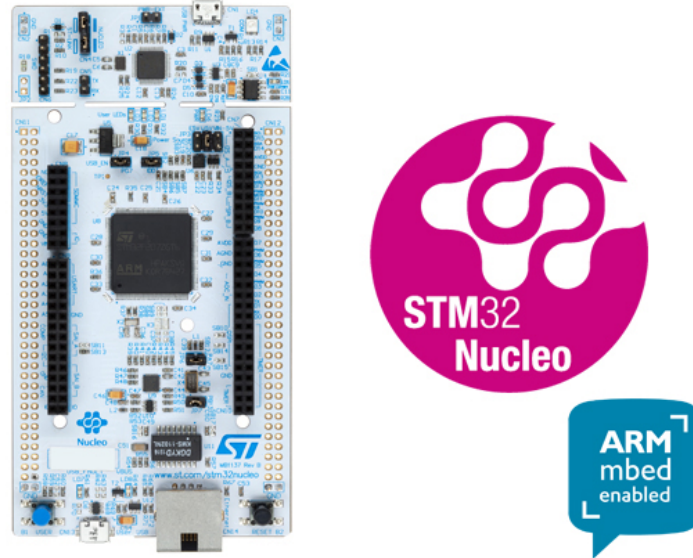


Σχήμα 6.6: Συσχέτιση των στοιχείων με τα ίχνη τους με χρήση του εργαλείου Connect του KiCad



Σχήμα 6.7: Η ολοκληρωμένη έκδοση της πλακέτας όπως φαίνεται από το εργαλείο Pcbnew του KiCad





Σχήμα 6.8: Η αναπτυξιακή πλακέτα Nucleo-144 με STM32F429ZI MCU

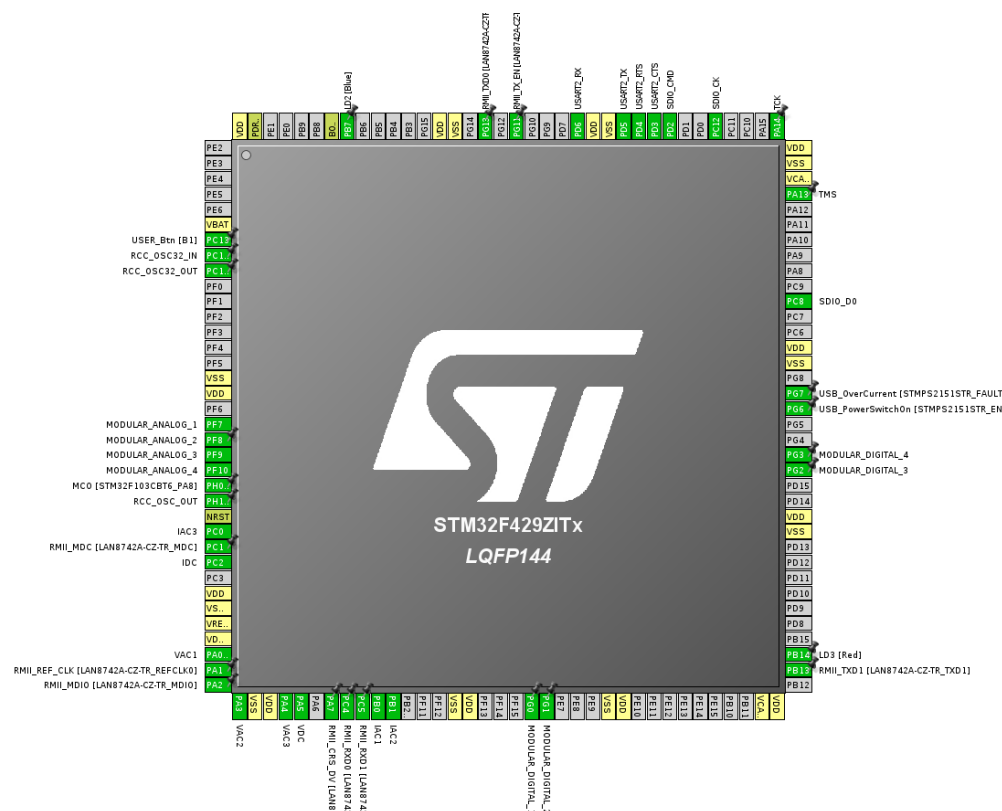
- Ενσωματωμένος debugger ST-LINK/V2-1
- Βιβλιοθήκες HAL για τον προγραμματισμό του

Ο επεξεργαστής είναι 32-bit, αρχιτεκτονικής ARM και ανήκει στη σειρά Cortex-M. Είναι υψηλής απόδοσης MCU με προχωρημένα χαρακτηριστικά όπως εντολές για DSP (Digital Signal Processor) και FPU (Floating Point Unit). Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή για την εφαρμογή μας έγινε εξόλοκληρου στη γλώσσα προγραμματισμού C.

Σαν τρόπος λειτουργίας για τους ADCs του επιλέχθηκε ο Dual regular simultaneous. Με αυτόν τον τρόπο, όπως εξηγήθηκε και στο κεφάλαιο 4, οι δύο ADCs λειτουργούν παράλληλα. Ο ADC1 θα μετατρέπει τις 3 φάσεις του ρεύματος, ο ADC2 τις 3 φάσεις της τάσης και από αυτούς θα εξάγεται η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας. Τέλος, ο ADC3 θα αναλάβει τις μετατροπές των DC σημάτων καθώς και των μετεωρολογικών. Επίσης, παραμετροποιήθηκαν έτσι ώστε να κάνουν χρήση DMA (Direct Memory Access). Αυτό γιατί η τεχνική DMA ξαλαφρώνει πολύ τον επεξεργαστή κατά τη συνεχόμενη μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό αφού ο ADC επικοινωνεί απευθείας με τη μνήμη στην οποία έχουμε πρόσβαση για να αποκτήσουμε τα μετρούμενα μεγέθη.

Σαν λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου επιλέχθηκε το FreeRTOS. Αυτό είναι από τα πιο δημοφιλή στην κατηγορία του για ενσωματωμένα συστήματα. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του είναι [29]:

- Υποστηρίζεται από πολλές διαφορετικές αρχιτεκτονικές
- Αξιοπιστία
- Παρέχει πληθώρα χαρακτηριστικών



Σχήμα 6.9: Η διαμόρφωση των pins του επεξεργαστή του μικροελεγκτή

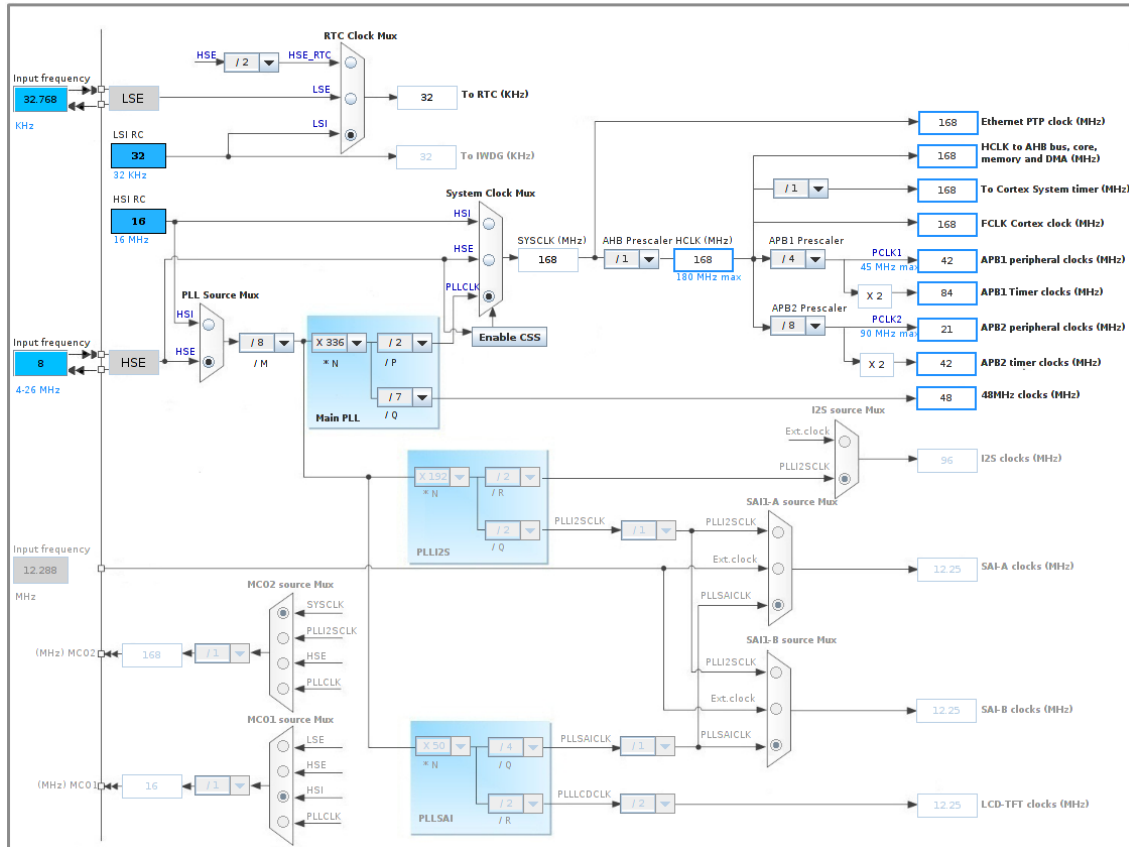
- Χρησιμοποιεί την ελάχιστη ROM και RAM και τις ελάχιστες επεξεργαστικές δυνατότητες. Τυπικά, η δυαδική εικόνα του πυρήνα του FreeRTOS θα είναι από 6 έως 12 kBytes
- Απλουστευμένο. Ο πυρήνας του περιέχεται σε μόλις 3 αρχεία γραμμένα σε C με δυνατότητα επέκτασης σε πιο σύνθετες λειτουργίες με τη προσθήκη άλλων.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμο, απλό και εύκολο στη χρήση

Για την παραγωγή του κώδικα HAL<sup>2</sup> του μικροελεγκτή αλλά και του κώδικα διαμόρφωσης των περιφερειακών του, έγινε χρήση του STM32CubeMX με τη χρήση των βιβλιοθηκών STM32CubeF4. Παρατίθενται οι δύο βασικές εικόνες του περιβάλλοντος STM32CubeMX όπου φαίνεται η διαμόρφωση των pins του επεξεργαστή αλλά και των ρολογιών του:

Από την εικόνα 6.9, φαίνονται τα pins που έχουν οριστεί σαν εισόδοι για τα σήματα που θέλουμε να μετατρέψουμε σε ψηφιακά. Αυτά είναι τα σήματα εναλασσομένου ρεύματος (IAC1 - IAC3) συν το DC ρεύμα (IDC), τα σήματα εναλασσομένης τάσης (VAC1 - VAC3) συν τη DC τάση (VDC) καθώς και τα μετεωρολογικά σήματα (MODULAR\_ANALOG\_1 - MODULAR\_ANALOG\_4). Υπάρχουν επίσης εξόδοι για τη σύνδεση εξωτερικού ρολογιού, για τη σύνδεση USART καθώς και για USB.

<sup>2</sup>HAL, προέρχεται από το Hardware Abstraction Layer. Είναι ένα υποσύστημα λογισμικού για λειτουργικά συστήματα τύπου UNIX και στην ουσία επιτρέπει στις εφαρμογές να μπορούν να κάνουν χρήση του υλικού ενός υπολογιστικού συστήματος μέσω ενός απλού, φορητού και αφηρημένου API.

Στην εικόνα 6.10, φαίνεται η διαμόρφωση των ρολογιών του μικροελεγκτή. Όπως προειπώθηκε, το κύριο ρολόι του συστήματος έρχεται από εξωτερικό κρύσταλλο και είναι συγχρονισμένο στα 168 MHz. Στη συνέχεια υπάρχουν κάποιοι διαιρέτες οι οποίοι ορίζουν τη συχνότητα των ρολογιών των λοιπών περιφερειακών του μικροελεγκτή. Η συχνότητα για τα περιφερειακά όπως οι τρεις ADCs, ορίζεται από το APB2 peripheral clock στα 21 MHz.

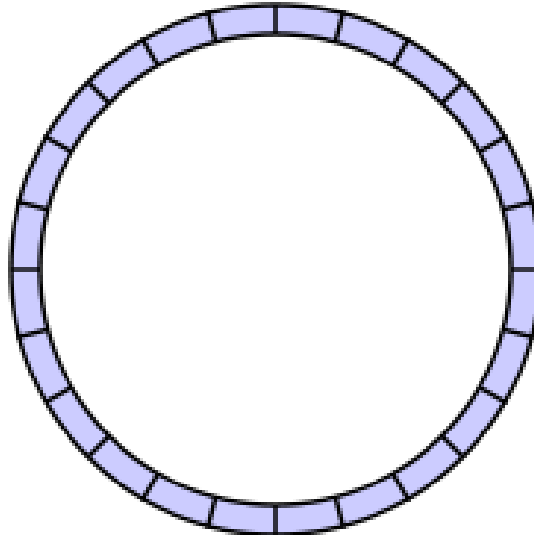


Σχήμα 6.10: Η διαμόρφωση των ρολογιών του μικροελεγκτή

Υπάρχει η δυνατότητα να τροποποιήσουμε περαιτέρω το ρολόι των ADCs καθώς έχουν δικό τους clock prescaler ο οποίος διαιρεί το παραπάνω ρολόι. Έχουμε λοιπόν ορίσει τους prescalers στην επιλογή /8 που σημαίνει ότι εντέλλει, η συχνότητα των ADCs θα είναι  $21/8 = 2.625\text{MHz}$ . Κάθε κανάλι των ADCs έχει οριστεί να δειγματοληπτεί για 480 κύκλους ρολογιού, οπότε τα 4 κανάλια για  $(12 + 480)4 = 1984$  κύκλους (όπου 12 κύκλοι είναι μια προδιαγεγραμμένη καθυστέρηση των μετατροπών). Οι 1984 κύκλοι αντιστοιχούν σε χρόνο  $\frac{1}{2.625}1984 = 756\mu\text{s}$ . Έτσι, σε χρόνο ενός δευτερολέπτου - κάθε ένα δευτερόλεπτο στέλνουμε τις μετρήσεις - έχουμε  $\frac{1\text{sec}}{756\mu\text{s}}4 = 5291$  δείγματα.

### Ring buffer

Κάθε ένα δευτερόλεπτο οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μια δομή δεδομένων και στη συνέχεια στέλνονται προς αποθήκευση στη βάση δεδομένων. Σαν δομή δεδομένων για προσωρινή αποθήκευση των μετρήσεων αμέσως πριν την αποστολή τους, επιλέχθηκε ο ring buffer



Σχήμα 6.11: Δακτύλιος που δείχνει εννοιολογικά τη δομή ενός ring buffer

(καταχωρητής δακτύλιος).

Ο ring buffer είναι μια δομή δεδομένων ορισμένου μεγέθους και της οποίας τα άκρα ενώνονται. Χρησιμοποιείται για «χειμάρρους» δεδομένων (streams) και μπορούμε να τον φανταστούμε όπως φαίνεται στην εικόνα 6.11. Φαίνεται πως ο καταχωρητής δεν έχει πραγματικό τέλος και ο δείκτης μπορεί να κάνει συνεχόμενες επαναλήψεις γύρω από αυτόν.

Η χρησιμότητα του έγκειται στο γεγονός ότι δεν τίθεται ολίσθηση των δεδομένων του όταν καταναλωθεί ένα από αυτά. Στην περίπτωση ενός κανονικού καταχωρητή, υπάρχει ολίσθηση όλων των δεδομένων όταν καταναλώνεται ένα. Με άλλα λόγια, ένας ring buffer είναι μια καλά προσαρμοσμένη ουρά FIFO ενώ ένας συμβατικός buffer, LIFO.

Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή μας για την αποθήκευση των μετρήσεων διότι καθιστά αδύνατη την απώλεια δεδομένων. Ο δείκτης ανάγνωσης θα διαβάζει συνεχώς τα αδιάβαστα δεδομένα και ο δείκτης εγγραφής θα γράφει πάνω στα πιο παλιά, διαβασμένα δεδομένα. Οπότε, δεν τίθεται ούτε θέμα υπερχείλισης αλλά ούτε και θέμα επανεγγραφής δεδομένων πάνω σε μη διαβασμένα ή διπλής ανάγνωσης τους.

## Λογισμικό

Όλο το λογισμικό που έχει γραφτεί για το σύστημα, δηλαδή ο κωδικας για τον μικροελεγκτή, για το σύστημα μεταεπεξεργασίας δεδομένων αλλά και τα αρχεία σχεδιασμού της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος, βρίσκονται στο gitlab:

<https://gitlab.com/smartRUE-wtg-datalogger/datalogger-Core-Module>

<https://gitlab.com/smartRUE-wtg-datalogger/datalogger-Postprocessing-Software-Module>

<https://gitlab.com/smartRUE-wtg-datalogger/datalogger-External-Sensor-Module-Electrical>

# Κεφάλαιο 7

## Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθεί η σύνοψη της μελέτης που εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής.

### Σύνοψη και συμπεράσματα

Η μέτρηση ενέργειας είναι από τα βασικά στοιχεία που αποτελούν ένα ΣΗΕ, καθώς μέσω της μέτρησης μπορεί ο άνθρωπος να αντιληφθεί και να εξάγει αποτελέσματα και συμπεράσματα ή να εκτελέσει διορθωτικές κινήσεις αν τα αποτελέσματα της μέτρησης δεν είναι επιθυμητά. Κατανοούμε λοιπόν πως ένα μετρητικό σύστημα είναι υποχρεωτικό κομμάτι ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα μετρητικό σύστημα ανοικτού κώδικα καθώς και το σύστημα καταγραφής, αποθήκευσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Αναπτύχθηκε αρχικά η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος η οποία έχει σαν εισόδους τα αναλογικά ηλεκτρικά μεγέθη. Κατά δεύτερον, προγραμματίστηκε ο μικροελεγκτής και οι ενσωματωμένοι ADCs του ώστε να έχουν σαν εισόδους τα μεγέθη αυτά, να τα μετατρέπουν σε ψηφιακά και να τα στέλνουν κάθε ένα δευτερόλεπτο μέσω του πρωτοκόλλου MQTT στο σύστημα μεταεπεξεργασίας δεδομένων. Αυτό αναλαμβάνει την αποθήκευση και την επεξεργασία τους σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 61400-12-1 και την εξαγωγή χρήσιμων στατιστικών μεγεθών.

Η σημασία του είναι μεγάλη καθώς είναι εξαιρετικά χαμηλού κόστους σε σχέση με τα «κλειστά» μετρητικά συστήματα. Κινείται μέσα στα πλαίσια των νέων τεχνολογικών εξελίξεων και συγκεκριμένα των "smart grids" και του "Internet of Things", αφού επιτρέπει την εποπτεία των μεγεθών ενός αιολικού πάρκου απομακρυσμένα. Επίσης, προορίζεται για χρήση σε εφαρμογές ανεμογεννητριών οι οποίες αυτή τη στιγμή είναι οι κύριες εκπρόσωποι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συντελούν σε μεγάλο βαθμό στη μετάβαση προς μια «καθαρότερη» και «πράσινη» λύση στην παραγωγή ενέργειας.

Η φιλοσοφία του ανοικτού κώδικα γύρω από την οποία σχεδιάστηκε δίνει την ευκαιρία αναδιανομής του, μελέτης του αλλά και τροποποίησης του ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Το πλέον σημαντικό είναι ότι μπορεί να υπάρξει συνεχής εξέλιξη του από οποιονδήποτε είναι προθυμος, γεγονός που βοηθάει στην πρόοδο και στην σταδιακή βελτίωση μιας μελέτης.

## Μελλοντικές επεκτάσεις

Ορισμένες προτάσεις που αφορούν τις βελτιώσεις σχετικά με τους υπάρχοντες περιορισμούς που είχαμε καθώς και την περαιτέρω ανάπτυξη τη εφαρμογής είναι:

1. Εκτέλεση πειραματικών δοκιμών τόσο σε επίπεδο εργαστηριακό όσο και σε πραγματικές ανεμογεννήτριες. Υπήρξε μια επιπλοκή με την αποστολή της πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος από το εργοστάσιο κατασκευής της με αποτέλεσμα να μην έχει καταφτάσει και να έχει καταστήσει τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων αδύνατη. Τη στιγμή συγγραφής του παρόντος το διάστημα μέχρι τη παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας είναι ανεπαρκές και δεν υπάρχει χρόνος για κατασκευή και αποστολή νέας πλακέτας. Οι πειραματικές δοκιμές θα διεξαχθούν μετά τη παρουσίαση και όταν η πλακέτα καταφθάσει.
2. Η σύνδεση των αισθητήρων θερμοκρασίας, διεύθυνσης ανέμου και ατμοσφαιρικής πίεσης και η δοκιμή τους σε πραγματικές συνθήκες.
3. Η επέκταση του γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής ώστε να υποστηρίζει επιπλέον λειτουργίες ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Πέρα από το να λαμβάνει δεδομένα, θα μπορούσε και να στέλνει σήματα ελέγχου. Επίσης, είναι δυνατόν να εμφανίζει και σήματα κατάστασης (status signals) αυτής.
4. Ολοκλήρωση όλων των επιμέρους κομματιών που αναγράφονται στη σχήμα 6.1 και δεν αναφέρονται στη παρούσα διπλωματική.

# Βιβλιογραφία

- [1] Κωνσταντίνος Καραίσκος, *Σχεδίαση και κατασκευή ψηφιακού καταγραφέα στις πλατφόρμες Raspberry Pi και Arduino για σύνδεση σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών*, ΕΜΠ 2016.
- [2] David J. Griffiths, *Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυναμική, Τόμος 1*, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ 2010.
- [3] Bryan Yarborough, *Components and Methods for Current Measurement*, VISHAY DALE 2015.
- [4] Anon, *Protective Relays Application Guide Second Edition*, The General Electric Company Limited of England 1975.
- [5] Ljubomir Kojovic and Martin Bishop, *Rogowski Coil Designs*, PAC World 2007.
- [6] R. S. Popović, *Hall effect devices (2, illustrated ed.)*, CRC Press 2014.
- [7] IEC, *INTERNATIONAL STANDARD 61400-12-1 First edition*, IEC 2005.
- [8] Αθανάσιος Ι. Γκράβας, *Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους*, ΕΜΠ 2011.
- [9] John G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press 1998.
- [10] Slawomir Tumanski, *Principles of Electrical Measurement (Sensors Series.)*, Taylor & Francis, 2006.
- [11] Agarwal & Anant, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits*, MIT, 2005.
- [12] Lundquist Julie & Clifton Andrew, *North American Windpower*, 2012.
- [13] Christopher Strachey, *Fundamental Concepts in Programming Languages*, Notes for International Summer School in Computer Programming, Copenhagen, August, 1967.
- [14] Miguel Grinberg, *Flask Web Development-Developing Web Applications*, O'Reilly Media, 2014.

- [15] Peters Tim, *PEP 20 – The Zen of Python, Python Enhancement Proposals*, Python Software Foundation, 2008.
- [16] Flanagan David, *JavaScript - The definitive guide*, O'Reilly Media, 2011.
- [17] *CSS developer guide*, Mozilla Developer Network, 2015.
- [18] Hank Zumbahlen, *Staying Well Grounded*, AnalogDialogue, JUN 2012.
- [19] LEM, *Current Transducer LA 55-P datasheet*, LEM Corp, JUN 2015.
- [20] Osborne, Adam, *An Introduction to Microcomputers. Volume 1: Basic Concepts (2nd ed.)*, Berkeley, California: Osborne-McGraw Hill., 1980.
- [21] Κ.Πεχμεστζή, *Συστήματα Μικροπολογιστών, Τόμος Α*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2009.
- [22] Wayne Wolf, *Οι Υπολογιστές ως Συστατικά Στοιχεία*, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα 2008.
- [23] *Reduced instruction set computer*, Department of Computer Science, Northern Illinois University.
- [24] Andrew S. Tanenbaum, *Δίκτυα Υπολογιστών*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011.
- [25] Marcel J.M.Pelgrom, *Analog to Digital Conversion*, Spinger, New York, 2013.
- [26] STMicroelectronics, *STM32™'s ADC modes and their applications*, [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/c4/63/a9/f4/ae/f2/48/5d/CD00258017.pdf/files/CD00258017.pdf/jcr:content/translations/en.CD00258017.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/c4/63/a9/f4/ae/f2/48/5d/CD00258017.pdf/files/CD00258017.pdf/jcr:content/translations/en.CD00258017.pdf).
- [27] STMicroelectronics, *STM32™ Cube*, <http://www.st.com/en/embedded-software/stm32cubef4.html>.
- [28] Silbetschatz, Galvin, Gagne, *Λειτουργικά συστήματα*, Εκδόσεις Ίων, Δεύτερη Ελληνική Έκδοση, Αθήνα 2009.
- [29] FreeRTOS, <http://www.freertos.org/>.
- [30] LEM, *Isolated Current and Voltage Transducers Characteristics - Applications – Calculation*, LEM Corp, 1996.
- [31] A.S. Sedra, K.C. Smith, *Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα*, Παπασωτηρίου, 2010, 5η έκδοση.
- [32] Marcus O'Sullivan, *Optimize High-Current Sensing Accuracy by Improving Pad Layout of Low-Value Shunt Resistors*, AnalogDialogue, <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/optimize-high-current-sensingaccuracy.html>.



- 
- [33] Acme Electric, *AC-1020 current transformer datasheet*, <http://uk.farnell.com/acme-electric/ac-1020/current-sense-transformer/dp/1707839>.