ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΑΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ: Η ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

Χαράλαμπος Σαραφίδης και Χαρίτων Πολάτογλου
Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη
email: hsara@physics.auth.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει κατανοητή η σημασία της μετρολογίας σε πολλούς τομείς της σύγχρονης ζωής, στην έρευνα, στην οικονομία, στην τεχνολογία. Ταυτόχρονα η εφαρμογή συστημάτων ποιότητας και κοντά στον τελικό καταναλωτή φέρνει την μετρολογία και τα συστήματα ποιότητας κοντά στην καθημερινότητα. Η διδασκαλία της μετρολογίας στην τριτοβάθμια εκπαίδευση ειδικά σε συναφείς κλάδους των θετικών επιστημών καθίσταται ολοένα και περισσότερο σημαντική. Το τμήμα Φυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης προσφέρει τα τελευταία χρόνια ένα εργαστηριακό μάθημα με τίτλο «Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας» προσπαθώντας να ανταποκριθεί στις εκπαιδευτικές ανάγκες που έχουν δημιουργηθεί. Σκοπός είναι η εξοικείωση των φοιτητών με βασικές μετρολογικές έννοιες, ξεκινώντας από τους ορισμούς των θεμελιωδών όπως «μέγεθος», «μέτρηση» και σταδιακά φτάνοντας σε πιο εξειδικευμένες έννοιες, όπως η «αβεβαιότητα», η «απόκριση» ενός αισθητηρίου και άλλες. Χρησιμοποιούνται απλές και οικονομικές διατάξεις, από απλά δυαδικά μέτρα που κατασκευάζονται επιτόπου μέχρι απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα μετατροπής χωρητικότητας σε τάση για διακρίβωση πυκνωτών, ενώ γίνεται και χρήση τεχνολογιών πληροφορικής όπως η προσομοίωση διακρίβωσης μαζών με λογισμικό Η/Υ. Η προσπάθεια επικεντρώνεται στην χρήση των απλών πειραμάτων για την σωστή και αυστηρή κατανόηση των μετρολογικών εννοιών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά οι διδακτικές ακολουθίες που σχεδιάστηκαν και εφαρμόζονται καθώς και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους. Εξετάζεται επίσης η δυνατότητα παραγωγής μιας εργαλειοθήκης για την μεταφορά της διδακτικής ακολουθίας στις άλλες βαθμίδες της εκπαίδευσης.

Λέξεις-Κλειδιά: Εκπαίδευση, Μετρολογία γενικά.

Abstract

In recent years we acknowledge the increasing role of metrology in research, economy and technology but also in everyday life through the implementation of quality systems close to the consumer. Teaching metrology at university, especially in exact sciences is becoming more important. In the Department of Physics – Aristotle University of Thessaloniki an elective course entitled “Metrology and Quality Systems” is offered in the students of the 7th semester. Its main objectives are the comprehension of basic metrology aspects, beginning with the most fundamental ones like “physical quantity” and “measurement” to more advanced like “uncertainty” and “sensor response”. The laboratory part of the course is based in simple and inexpensive apparatuses, from simple, homemade, binary length meters to simple electronic circuits. Information technologies are also used for data analysis and simulations. All the experiments are designed to support the teaching of the metrological aspects. In this work the educational methodology and the course structure is

presented. A toolbox for transferring the educational sequence to other levels of education is proposed.

Keywords: education, metrology general

1. Εισαγωγή

Η Μετρολογία, η επιστήμη των μετρήσεων, είναι ένα συνεχώς εξελισσόμενο αντικείμενο με εφαρμογή σε πολλούς τομείς του σύγχρονου κόσμου, από την βιομηχανία μέχρι την καθημερινότητα του πολίτη. Η εξέλιξη στην τεχνολογία αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στο εργασιακό περιβάλλον που θα κληθούν να ανταπεξέλθουν οι σημερινοί φοιτητές των θετικών επιστημών και μηχανικής. Είναι σημαντικό μάλιστα να κατανοήσουμε ότι οι αλλαγές αυτές θα απαιτούν και μία διαφορετική νοοτροπία και φυσικά αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην κατάρτισή τους. Εκτός από τις προφανείς αλλαγές στην τεχνολογία των οργάνων και τις εξελίξεις στις μεθοδολογίες χρήσης τους, διαρκώς εισάγονται καινούργιες θεωρητικές έννοιες (Frota & Finkelstein, 2013; Mesch, 1985).

Η έννοια της μέτρησης είναι κοινή ακόμη και στην καθημερινή ζωή και οι περισσότεροι πολίτες έχουν κάποια εξοικείωση με αυτήν. Στην επιστήμη κι την τεχνολογία οι ορισμοί των σχετικών εννοιών είναι πιο αυστηροί, σύμφωνα με το διεθνές λεξικό της μετρολογίας του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (BIPM) η έννοια της μέτρησης ορίζεται ως «η πειραματική διαδικασία λήψης μιας ή περισσότερων αριθμητικών τιμών που αντιστοιχούν σε ένα φυσικό μέγεθος». Ο συγκεκριμένος ορισμός συνοδεύεται και από αρκετές διευκρινιστικές υποσημειώσεις ώστε να είναι τελείως ξεκάθαρο ότι οι ονομαστικές τιμές δεν αποτελούν μέτρηση ενώ πρακτικά η έννοια της μέτρησης συγκεκριμενοποιείται ως απαρίθμηση ή ως σύγκριση με κάποιο πρότυπο ενώ στο τελικό αποτέλεσμα αναφέρεται μαζί με την διαδικασία και το αποτέλεσμα (Joint Committee For Guides In Metrology, 2012). Αυτές οι βασικές έννοιες πρέπει να περιλαμβάνονται στους αντικειμενικούς σκοπούς ενός μαθήματος μετρολογίας και οι σχετικές δραστηριότητες να είναι ξεκάθαρες και καλά ορισμένες ώστε να επιτυγχάνεται αυτός ο στόχος (Fiok & Jaworski, 1988; Millea, Munteanu, & Marcus, 2003).

Η τεχνολογική εξέλιξη επιδρά και στις εκπαιδευτικές μεθοδολογίες, τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Ο εκπαιδευτικός έχει στην διάθεσή του καινούργια εκπαιδευτικά εργαλεία αλλά ταυτόχρονα και επιπλέον απαιτήσεις όσον αφορά το αντικείμενο της εκπαίδευσης. Οι μελλοντικοί ειδικευμένοι επιστήμονες θα πρέπει να κατανοούν τις βασικές θεωρητικές έννοιες και να κατέχουν τις πρακτικές δεξιότητες αξιοποίησης σύγχρονου εργαστηριακού εξοπλισμού όχι μόνο όσον αφορά τον χειρισμό αλλά και την ολοκλήρωση σύνθετων εργαστηριακών διατάξεων οι οποίες πλέον χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ψηφιοποίησης (Winiecki, 1996). Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται και τα εργαλεία λογισμικού με τα οποία γίνεται η επεξεργασία των μετρήσεων. Η ψηφιοποίηση έχει σημαντική επίδραση τόσο στις μετρήσεις αλλά και στις σχετικές μεθοδολογίες, κυρίως μέσω της δυνατότητας για αυτοματοποιημένη λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων. Επίσης, ευνοεί αριθμητικές μεθοδολογίες και επιτρέπει αυτοματοποιημένες δειγματοληψίες και παρεμβολές οι οποίες μπορούν να αντικαταστήσουν αναλυτικές μεθόδους (E. Casleton, Beyler, Genschel, & Wilson, 2014; Fiok, Jaworski, Morawski, Oledzki, & Urban, 1988; Mesch, 1985). Αυτές οι συνθήκες οδηγούν με την σειρά τους σε αλλαγές στην εκπαιδευτική διαδικασία. Μία κλασική διάταξη μετρήσεων, αποτελούμενη από γέφυρες, ενισχυτές και αντίστοιχες αναλογικές ηλεκτρονικές βαθμίδες απαιτούν πολύ προσεκτικό σχεδιασμό και προσαρμογή μεταξύ των επιμέρους τμημάτων. Τέτοιες διατάξεις είναι επίσης ευαίσθητες

στις περιβαλλοντικές συνθήκες και σε διάφορα άλλα ανθρώπινα λάθη, συνεπώς οι εκπαιδευτικές διαδικασίες θα έπρεπε να εστιάσουν ιδιαίτερα σε αυτά τα σημεία. Πλέον με την ψηφιοποίηση, οι ανάγκες για προσεκτικό σχεδιασμό αναλογικών μετρητικών διατάξεων οι οποίες να χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή στην χρήση και καλή βαθμονόμηση μειώνονται. Η σημαντική αυτή αλλαγή στην φιλοσοφία των μετρητικών διατάξεων, η πιο εύκολη λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων, πρέπει να ληφθεί υπόψη και στην εκπαίδευση και αυτή είναι μία πρακτική που κερδίζει έδαφος διεθνώς, μιας και η ύπαρξη μαθημάτων με έμφαση και σαφή αναφορά στην επιστήμη της μετρολογίας δεν ήταν συνηθισμένη στην τριτοβάθμια εκπαίδευση (Barwicz, 1997; E. M. Casleton & Genschel, 2015; Finkelstein, 1994; Fiok et al., 1988; Frota & Finkelstein, 2013; Pukharenko & Norin, 2017; Rocha & Landim, 2012; Zangl & Hoermaier, 2017).

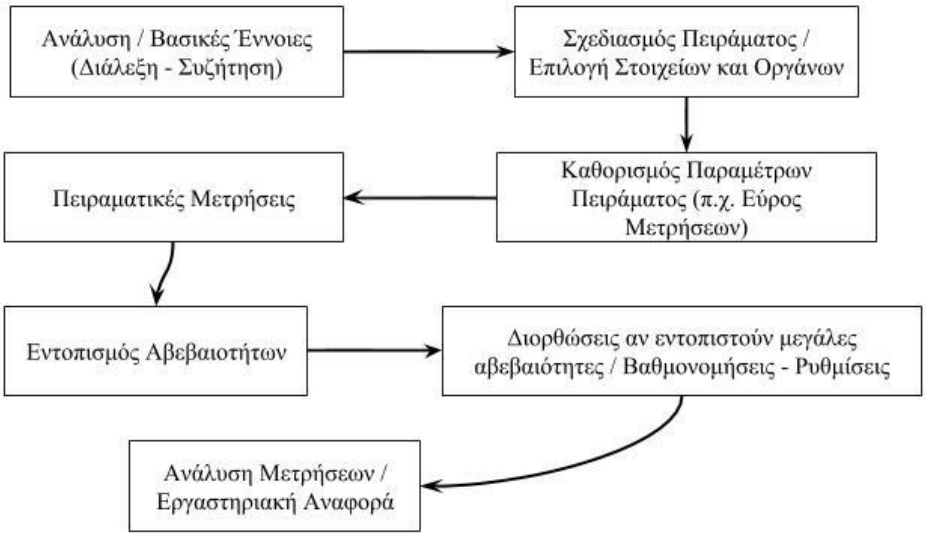
Στην παρούσα εργασία περιγράφεται ένα προπτυχιακό μάθημα με τίτλο «Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας» το οποίο προσφέρεται σαν γενική επιλογή στο 7^{ο} εξάμηνο του προγράμματος σπουδών του τμήματος Φυσικής στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και χρεώνεται με 4 μονάδες ECTS. Βασικοί στόχοι του μαθήματος είναι να μπορούν οι φοιτητές να εφαρμόζουν τις αρχές της μετρολογίας, να μπορούν να προσδιορίζουν βασικές μετρολογικές ποσότητες και να σχεδιάζουν μετρητικές διατάξεις, να διακρίνουν τη χρήση της ποιότητας στην καθημερινή ζωή και την επιστημονική έρευνα, να μπορούν να αναλύουν τις σχετικές διαδικασίες, να μπορούν να σχεδιάζουν μια εφαρμογή συστήματος ποιότητας σε συγκεκριμένη δραστηριότητα, και να ενσωματώνουν μετρητικά όργανα και διατάξεις. Να αποκτήσουν δηλαδή τόσο τις γνώσεις και τις δεξιότητες όσο και την αυτοπεποίθηση ότι μπορούν να ανταπεξέλθουν στο απαιτητικό μελλοντικό τους εργασιακό περιβάλλον. Δίνεται έμφαση στην χρήση εύκολα υλοποιήσιμων πειραματικών εφαρμογών ως μέσο για την επίτευξη των διδακτικών στόχων. Στην συνέχεια θα περιγράψουμε πιο αναλυτικά το σχέδιο του μαθήματος και τους επιμέρους διδακτικούς στόχους.

2. Η δομή και το περιεχόμενο του μαθήματος

Το εισαγωγικό μάθημα στην Μετρολογία και τα Συστήματα Ποιότητας εκτείνεται σε όλη την διάρκεια ενός διδακτικού πανεπιστημιακού εξαμήνου και περιλαμβάνει 13 διδακτικά εβδομαδιαία τρίωρα. Λόγω της έμφασης στην χρήση εργαστηριακών μεθόδων ως μέσο για την κατανόηση των σχετικών εννοιών οι τρεις διδακτικές ώρες ανά εβδομάδα είναι συνεχόμενες. Η τυπική δομή ενός τρίωρου μαθήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 1.

Οι διδακτικές ακολουθίες μπορούν να χωριστούν νοητικά σε τρεις βασικές ενότητες. Στην πρώτη ενότητα διδάσκονται οι βασικές έννοιες της μετρολογίας και των συστημάτων ποιότητας με υποστηρικτική χρήση απλών πειραμάτων όπου λαμβάνονται απευθείας κάποιες σειρές μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την καλύτερη εμπέδωση των εννοιών. Στην δεύτερη ενότητα εισάγονται πιο ειδικές έννοιες, κυρίως όσον αφορά τους αισθητήρες και τις ολοκληρωμένες ψηφιακές διατάξεις μετρήσεων. Τα υποστηρικτικά πειράματα περιλαμβάνουν την κατασκευή απλών κυκλωμάτων ώστε να υποδειχθούν στους φοιτητές σημαντικές λεπτομέρειες για την ψηφιακή οργανολογία, τους παράγοντες αβεβαιότητας που υπεισέρχονται στις μετρήσεις και μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα όπως επίσης και την κατανόηση των αρχών λειτουργίας των ψηφιακών οργάνων μέτρησης. Τέλος, στην τρίτη ενότητα εισάγονται οι έννοιες του υπολογισμού ισοζυγίου αβεβαιοτήτων στην γενική περίπτωση, όπου υπάρχει μία συναρτησιακή συσχέτιση μεταξύ ανεξάρτητων μετρήσεων (διάδοση αβεβαιοτήτων) και σαν εργαστηριακό διδακτικό εργαλείο αξιοποιείται η διακρίβωση μαζών μέσω ενός εξομοιωτή ζυγού. Στο

πλαίσιο του μαθήματος περιλαμβάνεται επίσκεψη και ξενάγηση στους χώρους του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας (ΕΙΜ), στην Σίνδο Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 1: Τυπική διδακτική ακολουθία του εργαστηριακού μαθήματος μετρολογίας

2.1 Πρώτη Ενότητα: Βασικές έννοιες

Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει όπως αναφέραμε τις βασικές έννοιες της Μετρολογίας και των Συστημάτων Ποιότητας. Αντικειμενικός στόχος είναι αρχικά η εμπέδωση από τους φοιτητές των βασικών εννοιών των συστημάτων ποιότητας όπως «σύστημα ποιότητας» και «πρότυπο ποιότητας». Γίνεται μία θεωρητική παρουσίαση του αντικειμένου από τους διδάσκοντες και στην συνέχεια ακολουθεί μία παρουσίαση ενός απλού διεθνούς προτύπου, του ISO216 (ISO Organization, 2007). Το συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρεται στα τυποποιημένα μεγέθη των χαρτιών γραφείου. Είναι απλό, αφορά ένα φυσικό μέγεθος που είναι ήδη οικείο στους φοιτητές και περιλαμβάνει ενδιαφέροντα ιστορικά και αριθμητικά στοιχεία με συνέπεια να αποτελεί καλό υπόδειγμα διδασκαλίας των συγκεκριμένων εννοιών.

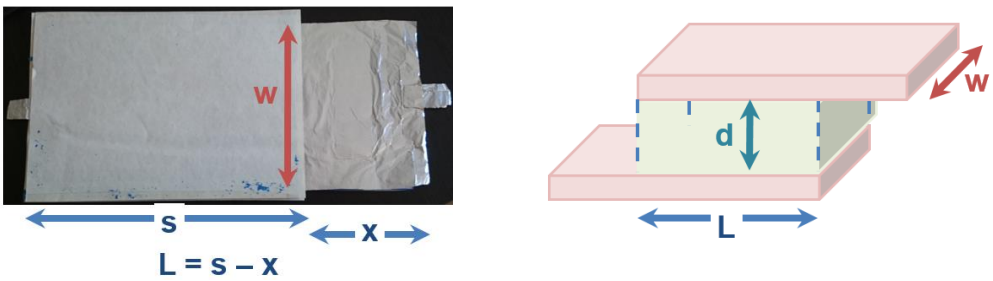
Οι επόμενες έννοιες που διδάσκονται αφορούν βασικές έννοιες της μετρολογίας όπως τα «πρότυπα φυσικών μεγεθών», «πρωτεύοντα πρότυπα», «δευτερεύοντα πρότυπα» και «πρότυπα μεταφοράς». Εισάγεται επίσης και η έννοια της «διακρίβωσης» ως διαδικασίας η οποία περιλαμβάνει μετρήσεις. Για την εμπέδωση των εννοιών αυτών αξιοποιούνται μια σειρά από απλά πειράματα. Στο πρώτο από αυτά, οι διδασκόμενοι κατασκευάζουν ένα δυαδικό μέτρο από χαρτί μεγέθους Α4 με διαδοχικές διαιρέσεις στην μέση και αφού το βαθμονομήσουν σε 64 υποδιαιρέσεις το χρησιμοποιούν για να μετρήσουν το πάχος του φύλλου κάποιων βιβλίων. Γνωρίζοντας την αντιστοιχία, ότι η μία υποδιαίρεση του δυαδικού μέτρου είναι το 1/64 των 297 mm ή 4,64 mm και διαιρώντας με τον αριθμό των σελίδων μπορούν να προσδιορίσουν το πάχος της μιας σελίδας του κάθε βιβλίου με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχες μετρήσεις που λαμβάνονται με παχύμετρο. Με λίγη προσοχή μπορεί να βρεθούν αποκλίσεις μεταξύ των δύο μετρήσεων της τάξης των 0,002 mm. Αν ληφθεί υπόψη η απλότητα της κατασκευής του δυαδικού μέτρου το αποτέλεσμα είναι εντυπωσιακό και εκτός από την εμπέδωση των σχετικών εννοιών αυξάνει και το ενδιαφέρον των διδασκόμενων για το αντικείμενο. Εκτός από τα παραπάνω, κάποιες γενικές γνώσεις και λειτουργικές δεξιότητες όπως για παράδειγμα η σωστή χρήση των δεκαδικών ψηφίων αποτελούν συνεχές αντικείμενο της διδασκαλίας.

Τα επόμενα απλά πειράματα για την εμπέδωση των βασικών εννοιών της μετρολογίας αφορούν την απευθείας μέτρηση με ψηφιακό πολύμετρο χειρός αλλά και ψηφιακό πολύμετρο πάγκου Agilent 34410A τιμών αντίστασης και χωρητικότητας από κιβώτια αντιστατών και πυκνωτών. Σε αυτό το στάδιο γίνονται απλές παρατηρήσεις μέσω συγκρίσεων των μετρήσεων με τις ονομαστικές τιμές και των αντίστοιχων μετρήσεων με τα δύο όργανα. Οι διδασκόμενοι παρακινούνται επίσης να κάνουν διάφορες απλές παρατηρήσεις σχετικά με την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Σε όλη την διαδικασία δίνεται επίσης έμφαση στην αναλυτική καταγραφή διαδικασιών, χαρακτηριστικών των οργάνων και των περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς, η συγκεκριμένη αρχή τηρείται σε όλα τα πειράματα καθώς αποτελεί διδακτικό στόχο. Οι διδασκόμενοι κατέχουν αρκετές από τις σχετικές δεξιότητες, η διδακτική έμφαση δίνεται στις μετρολογικές έννοιες και μεθοδολογίες.

Αντίστοιχα, οι διδασκόμενοι κατέχουν τις βασικές έννοιες της στατιστικής όπως οι κατανομές και τα βασικά τους μεγέθη. Για λόγους πληρότητας αυτές οι έννοιες διδάσκονται, εμπλουτισμένες με επιπλέον μετρολογικά στοιχεία. Το σχετικό πειραματικό υπόδειγμα είναι απλές σειρές μετρήσεων με τα πολύμετρα σε διαφορετικές αντιστάσεις και πυκνωτές ίδιας ονομαστικής τιμής. Οι διδασκόμενοι καλούνται να υπολογίσουν τα σχετικά μεγέθη και να επιβεβαιώσουν τις προδιαγραφές των απλών παθητικών στοιχείων, κάνοντας τη νοητική σύνδεση με τις διδασκόμενες έννοιες και την σημασία τους.

2.2 Δεύτερη Ενότητα: ειδικές έννοιες

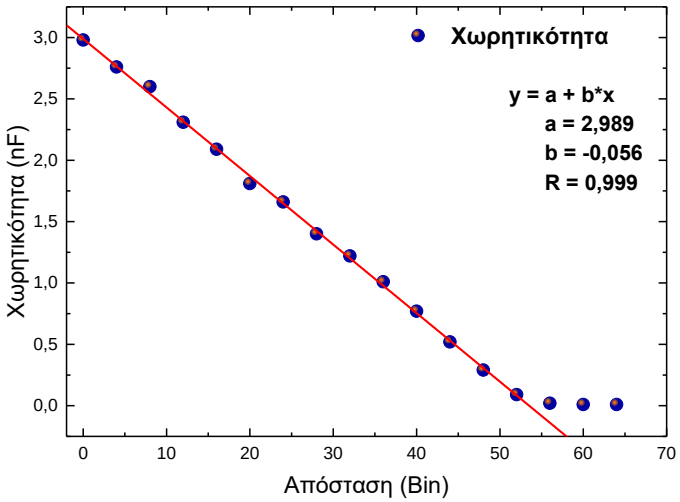
Στην δεύτερη ενότητα του μαθήματος εισάγονται πιο ειδικά θέματα μετρολογίας και στοιχεία οργανολογίας. Η πρώτη ομάδα εννοιών αυτής της ενότητας έχει να κάνει με τους αισθητήρες και τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη. Όπως «διέγερση», «απόκριση», «νεκρή ζώνη», «ευαισθησία», «εύρος λειτουργίας», «καθυστέρηση», «γραμμικότητα», «βαθμονόμηση», «ακρίβεια». Επίσης, βασική επιδίωξη αυτής της ενότητας είναι η κατανόηση της διαφοράς στην φύση μεταξύ διέγερσης και απόκρισης, καθώς οι ανάγκες της ψηφιοποίησης και της ηλεκτρονικής επεξεργασίας προκρίνουν συχνά την χρήση αισθητήρων με απόκριση η οποία να μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρονικά μέσα.



Σχήμα 2: Εικόνα (αριστερά) και σχηματική παράσταση (δεξιά) αυτοσχέδιου επίπεδου πυκνωτή για χρήση ως αισθητήρα μέτρησης μήκους

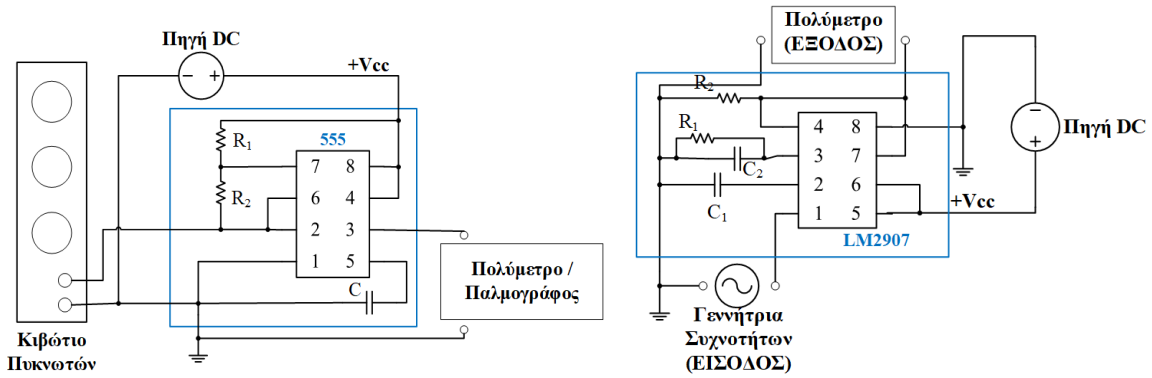
Η πειραματική υποστήριξη βασίζεται σε έναν απλό αισθητήρα, που κατασκευάζουν μόνοι τους οι διδασκόμενοι. Ο αισθητήρας αυτός είναι ένας απλός επίπεδος πυκνωτής και αποτελείται από δύο φύλλα αλουμινόχαρτου που διαχωρίζονται από ένα ή περισσότερα φύλλα χαρτιού μεγέθους Α4. Η σχετική αλληλοεπικάλυψη των φύλλων αλουμινόχαρτου μπορεί να μεταβληθεί μετακινώντας το ένα φύλλο σε σχέση με το άλλο, κατά συνέπεια αλλάζει η χωρητικότητα αφού μεταβάλλεται πρακτικά το εμβαδόν των οπλισμών του επίπεδου πυκνωτή (Σχ. 2 – εξίσωση 1).

$$C = \kappa\epsilon_0 \left(\frac{w}{d}\right) L \qquad (1)$$



Σχήμα 3: Μετρήσεις χωρητικότητας με απλό πολύμετρο συναρτήσει απόστασης με χρήση αυτοσχέδιου αισθητήρα και προσαρμογή για τον προσδιορισμό της γραμμικότητάς του

Οι διδασκόμενοι καλούνται να παρατηρήσουν ότι η μεταβολή αυτή μάλιστα είναι γραμμική με την απόσταση, με συνέπεια η μέτρηση μήκους να ανάγεται σε μέτρηση χωρητικότητας, με τα πλεονεκτήματα που έχουν ήδη αναλυθεί. Για την μέτρηση του μήκους ο ένας «οπλισμός» του πυκνωτή χωρίζεται σε υποδιαιρέσεις με την μεθοδολογία του δυαδικού μέτρου. Οι μετρήσεις απόστασης – χωρητικότητας αποτελούν μία διαδικασία που μπορεί να συμβάλλει στην επιζητούμενη εμπέδωση όλων των σχετικών εννοιών που περιγράψαμε, για παράδειγμα ο αισθητήρας απαιτεί βαθμονόμηση, η ευαισθησία, όπως επίσης και πρέπει να προσδιοριστεί το εύρος λειτουργίας του. Το τελευταίο γίνεται μαζί με τον προσδιορισμό της γραμμικότητας (Σχ. 3). Το συγκεκριμένο πείραμα παρά τα πολύ απλά μέσα του υποστηρίζει την εμπέδωση όλων των επιδιωκόμενων εννοιών.



Σχήμα 4: Κύκλωμα μετατροπής χωρητικότητας σε συχνότητα (αριστερά) και κύκλωμα μετατροπής συχνότητας σε τάση (δεξιά)

Ένας από τους βασικούς διδακτικούς στόχους της συγκεκριμένης ενότητας είναι και η εμπέδωση βασικών εννοιών οργανολογίας ώστε οι διδασκόμενοι να έχουν μια εικόνα των αρχών λειτουργίας των ψηφιακών οργάνων και των παραμέτρων που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μελέτη δύο κλασικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ένα απλό κύκλωμα μετατροπής χωρητικότητας σε συχνότητα με χρήση του ολοκληρωμένου 555 και ενός τυπικού κυκλώματος μετατροπής συχνότητας

σε τάση, αντίστοιχο με αυτά που χρησιμοποιούνται στα ταχύμετρα, με βασικό στοιχείο το ολοκληρωμένο LM2907 (Σχ. 4).

Τα δύο αυτά κυκλώματα είναι κατάλληλα για τους σκοπούς του μαθήματος καθώς παρουσιάζουν επιθυμητά μετρολογικά χαρακτηριστικά, είναι αξιόπιστα με μικρή περιβαλλοντική ευαισθησία, εύκολα υλοποιήσιμα και αρκετά διαδεδομένα σε εφαρμογές κάτι επίσης επιθυμητό από εκπαιδευτικής άποψης. Οι μετρήσεις γίνονται απευθείας χωρίς διαδικασίες ρυθμίσεων και αποφεύγεται η σπατάλη χρόνου. Η ανάλυση της λειτουργίας των συγκεκριμένων κυκλωμάτων είναι εύκολη για τους διδασκόμενους που έχουν διδαχθεί βασικά ηλεκτρονικά.

Η συχνότητα της εξόδου του πρώτου κυκλώματος δίνεται από την εξίσωση 2:

$$f_{out} = (\ln 2 \cdot C \cdot (R_1 + 2R_2))^{-1} \qquad (2)$$

Οι μετρήσεις συχνότητας για διάφορες τιμές χωρητικότητας γίνονται με δύο όργανα, τόσο με ψηφιακό πολύμετρο όσο και με παλμογράφο, με τα διδακτικά πλεονεκτήματα που προαναφέραμε. Οι διδασκόμενοι καλούνται να παρατηρήσουν ότι η συχνότητα εξόδου είναι γραμμική συνάρτηση της αντίστροφης χωρητικότητας κάτι που διαπιστώνουν και γραφικά, επιβεβαιώνοντας τις τιμές των αντιστάσεων R_1 και R_2 μετά από γραμμική προσαρμογή (επιλέγονται αντιστάτες ίδιας ονομαστικής τιμής 1 kΩ). Αντίστοιχα, η τάση εξόδου του δεύτερου κυκλώματος δίνεται από την εξίσωση 3:

$$V_{out} = \kappa \cdot V_{CC} \cdot f_{in} \cdot C_1 \cdot R_1 \qquad (3)$$

Και εδώ πληρείται το κριτήριο της γραμμικότητας, απαραίτητο βήμα για την ψηφιοποίηση όπως έχουμε προαναφέρει, μιας και η τάση εξόδου είναι ανάλογη της συχνότητας του σήματος εισόδου. Με μία τυπική επιλογή των στοιχείων του κυκλώματος (V_{CC} = 15 V, R_1 = 100 kΩ = 10R_2, C_2 = 1.0 μF = 100C_1) η κλίση της ευθείας είναι περίπου 67 Hz/V και μπορεί να παρατηρηθεί σχετικά εύκολα με ένα πολύμετρο.

Στα συγκεκριμένα μαθήματα δίνεται επίσης έμφαση και στον υπολογισμό ενός απλού ισοζυγίου αβεβαιοτήτων. Οι διδασκόμενοι έχουν την ευκαιρία να μελετήσουν τον τρόπο με τον οποίο υλοποιείται ηλεκτρονικά η μετατροπή του ενός φυσικού μεγέθους σε ένα άλλο (χωρητικότητα – συχνότητα, συχνότητα – τάση) και να εξετάσουν τις πιθανές πηγές αβεβαιότητας. Η μελέτη και πειραματική υλοποίηση των δύο αυτών κυκλωμάτων υποστηρίζει την εμπέδωση αρκετών από τις έννοιες που αποτελούν, όπως περιγράψαμε, τον στόχο του μαθήματος,.

Επίσης, στην συγκεκριμένη ενότητα περιλαμβάνεται ως ειδικό θέμα και το φυσικό μέγεθος του χρόνου, μαζί με τις σχετικές διδακτικές έννοιες όπως αυτή της σταθερότητας ενός σήματος, συχνοτικού ή αλληλουχίας διαφορών φάσης, τόσο σε μικρή χρονική κλίμακα (θόρυβος) όσο και σε μεγάλη χρονική κλίμακα παρατήρησης. Το συνοδευτικό πείραμα συνίσταται σε μετρήσεις συγχρονισμού μέσω του διαδικτυακού πρωτοκόλλου μεταφοράς χρόνου (NTP – Network Transfer Protocol) όπου μετρήσεις από διάφορους διακομιστές χρόνου συγκρίνονται με το εσωτερικό ρολόι ενός προσωπικού υπολογιστή. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις αναλύονται στην συνέχεια και αξιοποιούνται για την διδασκαλία μετρολογικών εννοιών όπως η σταθερότητα της απόκρισης ενός συστήματος μετρήσεων, η γραμμική μετατόπιση (drift) και απότομες, βηματικές αλλαγές στην απόκριση (steps). Οι διδασκόμενοι καλούνται να εκτιμήσουν πειραματικά αλλά και να υποδεικνύουν την διαφορά μεταξύ του πειραματικού θορύβου στις μετρήσεις και της γραμμικής μετατόπισης ενός ταλαντωτή και τις διαφορετικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει κάθε περίπτωση στην αξιοπιστία μιας μετρητικής διάταξης. Για την κατάδειξη του τελευταίου αναλύονται συγκεκριμένα παραδείγματα όπως τα συστήματα μέτρησης ταχύτητας με χρήση πηγών LASER (LIDARs) που χρησιμοποιεί η τροχαία σε αρκετά κράτη για την επιβολή των ορίων

ταχύτητας, ένα τέτοιο σύστημα βασίζεται στην χρονική βάση που περιλαμβάνει και οι παράμετροί της (σταθερότητα, αξιοπιστία) καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία του οργάνου. Επίσης, οι διδασκόμενοι καλούνται να μελετήσουν δεδομένα από τις αναφορές Circular T του διεθνούς γραφείου μέτρων και σταθμών, την υλοποίηση δηλαδή του παγκόσμιου χρόνου UTC, σε συνδυασμό με την διδασκαλία της έννοιας των διεργαστηριακών μετρήσεων, καθώς η μηνιαία ανακοίνωση του χρόνου UTC, στην ουσία είναι μία διαρκής διεργαστηριακή σύγκριση μεταξύ των συμμετεχόντων εθνικών ινστιτούτων.

2.3 Τρίτη Ενότητα: διάδοση αβεβαιοτήτων

Στην τρίτη ενότητα του μαθήματος διδακτικός στόχος είναι η παρουσίαση των εννοιών της διάδοσης των αβεβαιοτήτων καθώς και η υλοποίηση ενός όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικού σεναρίου πραγματικής διακρίβωσης. Το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο βασίζεται στην γνωστή εξίσωση της διάδοσης αβεβαιοτήτων με συντελεστές ευαισθησίας (εξίσωση 4):

$$u^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 u^2(x_1) + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_N}\right)^2 u^2(x_N) \qquad (4)$$

Η πειραματική υλοποίηση για την καλύτερη εμπέδωση των ζητούμενων εννοιών βασίζεται σε έναν αναλυτικό και ιδιαίτερα ρεαλιστικό προσομοιωτή διακρίβωσης μαζών, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Διδακτικής του τμήματος Φυσικής (Σκουλίδης, 2005). Η συγκεκριμένη εφαρμογή δημιουργεί για κάθε διδασκόμενο ένα διαφορετικό σύνολο προτύπων βαρών, διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και διαφορετικά χαρακτηριστικά στον ζυγό που χρησιμοποιείται για την διακρίβωση. Η πειραματική διαδικασία που υλοποιείται με τον προσομοιωτή είναι αυτή της συγκριτικής ζύγισης με αντικατάσταση, όπου η διακρίβωση κάθε υπό διακρίβωση μάζας Τ υλοποιείται με τυποποιημένους κύκλους ζύγισης σε συνδυασμό με αντίστοιχη μάζα αναφοράς R. Κάθε διακρίβωση μάζας ακολουθούσε την απαίτηση Ε1, δηλαδή τρεις κύκλους ζύγισης RTR (αναφορά – υπό διακρίβωση μάζα – αναφορά) και ο προσομοιωτής μπορεί να προσομοιώσει όλες τις σχετικές λεπτομέρειες της διαδικασίας, για παράδειγμα την απαίτηση της σταθερότητας μεταξύ των χρονικών διαστημάτων των ζυγίσεων κάθε κύκλου. Οι διδασκόμενοι έπρεπε να τηρήσουν όλες τις διαδικασίες που θα ακολουθούσαν και σε ένα σωστό εργαστήριο διακριβώσεων, όπως για παράδειγμα την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών οι οποίες μάλιστα υπεισέρχονται στο ισοζύγιο των αβεβαιοτήτων. Η λήψη των μετρήσεων με την χρήση του προσομοιωτή ακολουθείται από αναλυτικό υπολογισμό των αβεβαιοτήτων σε πρόγραμμα λογιστικών φύλλων εργασίας, τα οποία διαμορφώνονται κατάλληλα με χρήση κατάλληλων μεθοδολογιών οργάνωσης πληροφορίας και αποφυγής λαθών. Ο τελικός σκοπός είναι η παρουσίαση ενός «πιστοποιητικού διακρίβωσης», το οποίο θα περιέχει όλα τα στοιχεία που περιέχονται σε ένα τυπικό πιστοποιητικό διακρίβωσης μετρολογικού εργαστηρίου. Η αυστηρότητα και η περιπλοκότητα του υποδείγματος, εκτός από τις επιμέρους μετρολογικές έννοιες τις οποίες υποστηρίζει, δίνει στους διδασκόμενους μία αίσθηση της πραγματικής μετρολογικής εργασίας και της διαδικαστικής αυστηρότητας που απαιτεί. Ταυτόχρονα παρέχει την αίσθηση στους διδασκόμενους ότι αντιμετώπισαν ένα αρκετά ρεαλιστικό σενάριο και παρέχει αυτοπεποίθηση ότι μπορούν να ανταπεξέλθουν σε ένα κανονικό εργασιακό περιβάλλον.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, το παράδειγμα των συστημάτων μέτρησης ταχύτητας που προαναφέραμε είναι χαρακτηριστικό. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία μας δίνει την ευκαιρία να αναφέρουμε

επιγραμματικά και άλλα ζητήματα που άπτονται του αντικειμένου του μαθήματος όπως στοιχεία νομικής μετρολογίας.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε αναλυτικά η δομή και η διδακτική ακολουθία ενός προπτυχιακού μαθήματος με τίτλο «Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας», που απευθύνεται σε τελειόφοιτους του τμήματος Φυσικής ΑΠΘ. Το συγκεκριμένο μάθημα καλύπτει τόσο τις βασικές έννοιες της μετρολογίας και των συστημάτων ποιότητας όσο και εξειδικευμένα θέματα στο αντικείμενο μαζί με στοιχεία οργανολογίας. Τα θεωρητικά αντικείμενα όπως οι αρχές των συστημάτων ποιότητας καλύπτονται τόσο με διάλεξη όσο και με εργασίες βιβλιογραφικής έρευνας από τους διδασκόμενους. Ειδικά σχεδιασμένα πειράματα χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση και εμπέδωση των εννοιών που αποτελούν τους διδακτικούς στόχους. Τα πειράματα είναι εύκολα υλοποιήσιμα με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος αλλά υψηλή διδακτική αξία. Οι επιδόσεις των διδασκόμενων και το ενδιαφέρον τους για το αντικείμενο κυμαίνεται σε αρκετά υψηλό επίπεδο, κάτι που αποδεικνύει την χρησιμότητα του συγκεκριμένου μαθήματος και την επαρκή διασύνδεσή του με τον καθημερινό κόσμο. Με την ολοκλήρωση του μαθήματος οι διδασκόμενοι θα πρέπει να έχουν αποκτήσει γνώσεις, δεξιότητες αλλά και στάσεις στο αντικείμενο που θα μπορούσε να περιγραφεί με μία φράση ως «με ποιο όργανο ή συνδυασμό οργάνων και ποια μεθοδολογία μπορούμε να μετρήσουμε το φυσικό μέγεθος Χ υπό τις συνθήκες Υ με την μικρότερη δυνατή αβεβαιότητα»;

Η ύλη ενός μαθήματος μετρολογίας πρέπει να αξιολογείται διαρκώς σε συνάρτηση με τις εξελίξεις στο αντικείμενο και να τροποποιείται ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης. Μελλοντική προσθήκη στο μάθημα που περιγράψαμε θα μπορεί να αποτελεί κάποια ενότητα διδασκαλίας βέλτιστων εργαστηριακών πρακτικών και γενικότερων ζητημάτων ασφαλείας, τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο. Επίσης εξετάζονται η προσθήκη στην ύλη περισσότερων θεμάτων σχετικά με τα συστήματα ποιότητας αλλά και θέματα διαπίστευσης εργαστηρίων και νομικής μετρολογίας.

4. Βιβλιογραφία

Σκουλίδης, Ν., Μήτσας, Χρ., Πολάτογλου, Χ.: «Παραθυρική εφαρμογή εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρήσεων με τη μέθοδο MONTE CARLO». 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μετρολογίας, 22-24 Σεπτεμβρίου 2005, Αθήνα.

Barwicz, A. (1997). A system approach to electrical measurements. *Measurement*, *19*(3), 131–138.

Casleton, E., Beyler, A., Genschel, U., & Wilson, A. (2014). A Pilot Study Teaching Metrology in an Introductory Statistics Course. *Journal of Statistics Education*, *22*(3), 1–42.

Casleton, E. M., & Genschel, U. (2015). Metrology in Introductory Statistics Courses. Retrieved January 24, 2018, from http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-15-22690

Finkelstein, L. (1994). Measurement and instrumentation science — An analytical review. *Measurement*, *14*(1), 3–14. http://doi.org/10.1016/0263-2241(94)90038-8

Fiok, A. J., & Jaworski, J. M. (1988). What to teach in measurement and instrumentation. *Measurement*, *6*(2), 59–62. http://doi.org/10.1016/0263-2241(88)90003-6

Fiok, A. J., Jaworski, J. M., Morawski, R. Z., Oledzki, J. S., & Urban, A. C. (1988). Theory of measurement in teaching metrology in engineering faculties. *Measurement*, *6*(2), 63–68. http://doi.org/10.1016/0263-2241(88)90004-8

Frota, M. N., & Finkelstein, L. (2013). Thoughts on the education in measurement and

instrumentation: A review of requirements. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *46*(8), 2978–2982. http://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.051

ISO Organization. (2007). ISO 216:2007 Writing paper and certain classes of printed matter -- Trimmed sizes -- A and B series, and indication of machine direction. Retrieved February 25, 2018, from https://www.iso.org/standard/36631.html

Joint Committee For Guides In Metrology. (2012). Vocabulaire international de métrologie. *VIM3: International Vocabulary of Metrology*, *3*(third), 104. http://doi.org/10.1016/0263-2241(85)90006-5

Mesch, I. F. (1985). Impact of new technology on measurement education. *Measurement*, *3*(1), 44–48. http://doi.org/10.1016/0263-2241(85)90042-9

Millea, A., Munteanu, R., & Marcus, I. U. (2003). Teaching General Metrology : Why , What , How ? In *XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium* (p. 64). Dubrovnik. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.620.3042&rep=rep1&type=pdf

Pukharenko, Y. V., & Norin, V. A. (2017). Issues of teaching metrology in higher education institutions of civil engineering in Russia. *Education and Information Technologies*, *22*(3), 1217–1230. http://doi.org/10.1007/s10639-016-9486-9

Rocha, G. M., & Landim, R. P. (2012). Inmetro's Metrology Executive Master's Degree Course. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *46*, 4928–4932. http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.361

Winiecki, W. (1996). Methodology for teaching measuring systems. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *18*(4), 237–244. http://doi.org/10.1016/S0263-2241(96)00063-2

Zangl, H., & Hoermaier, K. (2017). Educational aspects of uncertainty calculation with software tools. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *101*, 257–264. http://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.005