ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΣΚΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΦΟΙΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ: ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Χ. Μ. ΠΟΛΑΤΟΓΛΟΥ, Ν. ΣΚΟΥΛΙΔΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ, ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, Α.Π.Θ., 54124
Email: hariton@auth.gr, nskoulid@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει τη σχεδίαση και την εφαρμογή ενός εργαστηριακού μαθήματος για την βαθμονόμηση οργάνων με τη χρήση προτύπων μεταφοράς ηλεκτρικής αντίστασης στο μάθημα επιλογής Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας του τμήματος Φυσικής, και να αναδείξει την εφικτότητα εφαρμογής του στο Γενικό Εργαστήριο του πρώτου έτους. Επίσης να εισαγάγει τους φοιτητές στην έννοια της ιχνηλασιμότητας και στη μεθοδολογία του ISO GUM για την εκτίμηση της αβεβαιότητας και ενός διαστήματος εμπιστοσύνης των βαθμονομούμενων οργάνων. Κάποιοι από τους λόγους επιλογής του μεγέθους είναι η ευκολία εύρεσης στο ελεύθερο εμπόριο πληθώρας αντιστατών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν πρότυπα μεταφοράς με μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών και μεγάλου εύρους τιμών. Κατά την εφαρμογή της άσκησης πάρθηκαν υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις, όπως η θερμοκρασία και οι αντιστάσεις παρεμβολής για την σύνδεση προτύπων – οργάνων. Με την μέθοδο που εφαρμόσθηκε, δεν έγινε επαναρύθμιση των οργάνων, αλλά προσδιορίσθηκε ένας συντελεστής για κάθε κλίμακα μέτρησης, η αβεβαιότητα αυτού του συντελεστή και η μη - γραμμικότητα των οργάνων. Έτσι για οποιαδήποτε μέτρηση γίνεται με αυτά τα όργανα είναι να δυνατόν να εκτιμηθεί η αναμενόμενη τιμή από τον συντελεστή κλίμακας και η αβεβαιότητα από την αβεβαιότητα του συντελεστή κλίμακας και από την μη γραμμικότητα.

Λέξεις κλειδιά: Πρότυπα μεταφοράς, διδακτική, προπτυχιακοί φοιτητές, ιχνηλασιμότητα, ISO GUM.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
Όσοι ασχολούνται με την Φυσική γνωρίζουν πολύ καλά ότι μια από τις κυριότερες δραστηριότητές τους είναι η λήψη μετρήσεων για διάφορα φυσικά μεγέθη. Φυσικά και οι ασχολούμενοι με όλες σχεδόν τις επιστήμες βασίζουν τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματά τους σε μετρήσεις. Υπάρχει όμως κάποιες σημαντικές διαφορές που πρέπει να επισημάνουμε.

- Στις άλλες επιστήμες οι μετρήσεις αφορούν σε ένα περιορισμένο αριθμό μεγεθών ενώ για την Φυσική γίνονται μετρήσεις σε όλα σχεδόν τα φυσικά μεγέθη – ποσότητες.
- Επιπλέον, και αυτό είναι ίσως το πιο σημαντικό, είναι το εύρος τιμών που έχει να μετρήσει κάθε επιστημονικό πεδίο. Στο πεδίο της Φυσικής, μετριέται το ίδιο φυσικό μέγεθος σε μια τεράστια κλίμακα τιμών, για παράδειγμα μετριούνται μήκη που ξεκινούν από την περιοχή των nm (νανόμετρων), στην περιοχή δηλαδή της υφής της ύλης, μέχρι εκατομμύρια έτη φωτός, στην περιοχή του μεγέθους του σύμπαντος. Παρόμοια θα μπορούσαμε να πούμε για τον χρόνο, τη μάζα κλπ. Ευτυχώς όμως σπάνια το ίδιο άτομο μετρά σε όλη αυτή την κλίμακα, αλλά πάλι παραμένει ένα εύρος τιμών που μπορεί να έχει αρκετές τάξεις μεγέθους (10^8).

Βεβαίως οι όποιες μετρήσεις πραγματοποιούνται πάντα με την χρήση οργάνων που σπάνια έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν τόσο μεγάλα εύρη τιμών χωρίς διαφορετικές εσωτερικές ή εξωτερικές παρεμβάσεις. Έτσι τα όργανα μπορεί να έχουν περισσότερες από μία κλίμακες μέτρησης που για λόγους πρακτικούς διαφέρουν συνήθως η μία από την επόμενη ή την προηγούμενη κατά λόγο του 10. Οι κυριότεροι λόγοι αυτής της διαίρεσης σε κλίμακες είναι α) η βελτίωση της αναλυτικότητας για μια περιοχή μετρήσεων, β) η βελτίωση την γραμμικότητας, γ) η βελτίωση της αναγνωσιμότητας (κυρίως για αναλογικά όργανα). Επιπλέον, ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο γίνονται οι μετρήσεις, τα όργανα που χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, π.χ. ακρίβεια (αβεβαιότητα), αναλυτικότητα, συνθήκες περιβάλλοντος κλπ πέρα από την διαφορετική δομή τους που σχετίζεται κυρίως με το μέγεθος που μετρούν.

Στην εκπαίδευση των φοιτητών της Φυσικής, περιλαμβάνεται ένα μεγάλο μέρος με εργαστηριακές ασκήσεις όπου για την διεκπεραίωσή τους απαιτείται να χρησιμοποιηθούν όργανα και να γίνουν μετρήσεις. Ακολουθεί συνήθως μια στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αλλά σχεδόν ποτέ δεν λαμβάνονται υπόψη οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των οργάνων που χρησιμοποιούνται. Βέβαια για αυτό το επίπεδο της ενασχόλησης με τις μετρήσεις δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όργανα, διατάξεις και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε μετρολογικά εργαστήρια ή σε ερευνητικά ιδρύματα όπου εφαρμόζονται κατά γράμμα μετρολογικές διαδικασίες έτσι ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι τεκμηριωμένα.

Όσον αφορά στα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στα φοιτητικά εργαστήρια είναι συνήθως κοινά με την έννοια της δυνατότητας εύρεσής τους, χρήσης τους και επιδόσεων. Και καθόσον τα επιτεύγματα της ηλεκτρονικής έχουν διεισδύσει ισχυρότατα και σε αυτόν τον τομέα, τα περισσότερα όργανα βασίζονται πλέον στην ηλεκτρονική και συχνά ενσωματώνουν τη δυνατότητα μέτρησης περισσότερων του ενός μεγέθους, κυρίως σχετιζόμενων μεταξύ τους. Έτσι παρόλο που μπορεί να είναι πολύ πιο φθηνά, εύχρηστα και ανθεκτικά σε σχέση με άλλα παλιότερων εποχών είναι και πιο αξιόπιστα, καθώς με την χρήση της ηλεκτρονικής, και τις τελευταίες δυο δεκαετίες και των μικροεπεξεργαστών που ενσωματώνονται σε αυτά, έχουν δυνατότητες αυτό-ρύθμισης και αυτό-διάγνωσης.

Δυστυχώς όμως και αυτού του τύπου όργανα μετρήσεων, όσο εξελιγμένα και αν είναι, δεν είναι απόλυτα σταθερά μετά από μακροχρόνια χρήση και απαιτείται η περιοδική διακρίβωσή τους. Διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως υγρασία και θερμοκρασία, αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, η παρέλευση του χρόνου επιδρά στα εξαρτήματά τους , π.χ. με την γήρανση των υλικών, αλλά και άλλοι παράγοντες όπως ο τρόπος χρήσης, η υπέρβαση των ορίων τους τελικά υποβιβάζουν την αξιοπιστία τους και αυξάνουν την αβεβαιότητα των ενδείξεών τους. Ακόμη, είναι δυνατόν και τα πιο «ταλαιπωρημένα» όργανα να αποκτήσουν και πάλι την αξιοπιστία τους, είτε επαναρυθμίζοντάς τα είτε βρίσκοντας συντελεστές διόρθωσης των μετρήσεων που δίνουν.

Απαιτείται δηλαδή μια επαναβαθμονόμησή τους. Για αυτό τον σκοπό και στα πλαίσια του μαθήματος «Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας» που διδάσκεται σε φοιτητές του Φυσικού τμήματος του ΑΠΘ, σχεδιάσθηκε μια άσκηση εύρεσης βασικών χαρακτηριστικών οργάνων μέτρησης με την χρήση προτύπων μεταφοράς [1] και με μετρολογικές μεθόδους [2, 3]. Η χρήση των προτύπων μεταφοράς είναι μια κοινή πρακτική στην μετρολογία για την βαθμονόμηση οργάνων ή μέτρων. Επίσης εκτός από την ίδια την βαθμονόμηση των συγκεκριμένων οργάνων που χρησιμοποιούνται για την άσκηση διδάσκεται ταυτόχρονα και η έννοια της διακρίβωσης οργάνων αλλά και της ιχνηλασιμότητας [4] στη μετρητική αλυσίδα. Φυσικά για το σύνολο της άσκησης ακολουθούνται οι μέθοδοι της μετρολογίας.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Σκοπός της άσκησης είναι η βαθμονόμηση διάφορων κλιμάκων μέτρησης αντίστασης του πολυμέτρου. Η επιλογή του συγκεκριμένου μεγέθους έγινε για τους εξής λόγους:

- Από τα διαθέσιμα όργανα για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας άσκησης, είναι το μέγεθος που μετράται σε μεγάλο εύρος τιμών (10^8).
- Η ευκολία εύρεσης αντιστατών για να χρησιμοποιηθούν σαν πρότυπα μεταφοράς.
- Η δυνατότητα προσδιορισμού σε ικανό βαθμό της τιμής των προτύπων.
- Η δυνατότητα χρήσης των προτύπων μέσα σε κοινή εργαστηριακή αίθουσα.
- Η μηδενική επικινδυνότητα.
- Η γνώση χρήσης των οργάνων
- Το χαμηλό κόστος.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε σαν πρότυπα κάποιους αντιστάτες που έχουν μετρηθεί με όργανο πολύ μικρότερης αβεβαιότητας (2 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τα προς βαθμονόμηση όργανα) και έχει προσδιορισθεί η αβεβαιότητα των τιμών τους. Αυτά τα πρότυπα ονομάζονται πρότυπα μεταφοράς. Για τον σκοπό και μόνο της άσκησης, θεωρούμε ότι το προηγούμενο όργανο είναι ήδη βαθμονομημένο από μετρολογικό εργαστήριο και έχει διακριβωθεί η λειτουργία του και τα χαρακτηριστικά του. Με βάση λοιπόν αυτή την διακρίβωση γίνονται οι μετρήσεις των προτύπων μεταφοράς. Έτσι υπάρχει η απαραίτητη ιχνηλασιμότητα μέχρι τα παγκόσμια πρότυπα μέσω του εργαστηρίου που διακρίβωσε το προηγούμενο όργανο. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τις μετρήσεις δίνονται και πρέπει να τηρηθούν με αυστηρότητα, να ακολουθηθεί δηλαδή ένα μετρητικό πρωτόκολλο.

Α/Α Κλίμακας	Περιοχή μέτρησης
Α	0 - 400 Ω
Β	0 - 4 ΚΩ
Γ	0 - 40 ΚΩ
Δ	0 - 400 ΚΩ
Ε	0 - 4 ΜΩ
Ζ	0 - 40ΜΩ

Πίνακας 1. Κλίμακες πολυμέτρου.

Συγκεκριμένα βαθμονομούνται σε 8 πολύμετρα οι τρεις από τις έξι συνολικά κλίμακες τους. Οι κλίμακες αυτές φαίνονται στον πίνακα 1. Η βαθμονόμηση γίνεται για τις κλίμακες Α, Ε και μία από τις Β, Γ, Δ, έτσι ώστε να αναδειχθούν οι κατά περίπτωση δυσκολίες και ειδικές διαδικασίες που πρέπει να τηρηθούν για την κάθε κλίμακα. Η κλίμακα Ζ, δεν χρησιμοποιήθηκε για την άσκηση, παρόλο που προσφέρονταν περισσότερο από την Ε για την ανάδειξη των δυσκολιών μέτρησης, γιατί δεν έγινε δυνατόν να βρεθούν αντιστάτες – πρότυπα μεταφοράς κατάλληλων τιμών.

2.1 Πρότυπα μεταφοράς

Συνολικά δημιουργήθηκαν 8 κύριες ομάδες προτύπων μεταφοράς, που η κάθε μια αποτελείται από 5 υποομάδες, μια για κάθε κλίμακα του οργάνου. Για κάθε κλίμακα δίνονται 4 πρότυπα μεταφοράς. Οι λόγοι της επιλογής και δημιουργίας τόσων πολλών προτύπων μεταφοράς είναι:

- Να μπορέσουμε να δείξουμε τελικά στους φοιτητές ότι δεν απαραίτητο να έχουμε πάντα τα ίδια πρότυπα για την βαθμονόμηση πολλών οργάνων,
- Ότι δεν επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα από τις τιμές των συγκεκριμένων προτύπων μεταφοράς αλλά μόνο από την προσεκτική επιλογή της περιοχής τιμών τους και
- Για να έχει η κάθε ομάδα φοιτητών ένα μοναδικό σύνολο από πρότυπα.

Οι ονομαστικές ή τυπικές τιμές των προτύπων έχουν επιλεγεί έτσι ώστε με διάφορους σε σειρά συνδυασμούς τους να μπορούμε να δημιουργήσουμε γνωστές τιμές αντιστάσεων για το ¼, ½, ¾ περίπου της πλήρους κλίμακας του οργάνου και την πλήρη κλίμακα. Σαν πλήρη κλίμακα διαλέξαμε το 90% περίπου της ονομαστικής πλήρους κλίμακας του οργάνου. Ο λόγος αυτής της επιλογής είναι ότι, καθώς περιμένουμε κάποια απόκλιση στις μετρήσεις που δίνει το όργανο, θα μπορούσε μια τιμή προτύπου πολύ κοντά στην ονομαστική πλήρη κλίμακα του οργάνου να έδειχνε υπερχείλιση (Over range), με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μέτρηση σ' αυτή την περιοχή. Επίσης και τα τέσσερα πρότυπα έχουν διαφορετικές ονομαστικές τιμές. Έτσι για παράδειγμα φαίνονται στον πίνακα 2 οι τιμές των προτύπων που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε για την κλίμακα Α. Η αβεβαιότητα δίνεται με συντελεστή κάλυψης k = 2. Ο τύπος των αντιστατών επιλέχθηκε να είναι υμενίου μετάλλου (metal film), που σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή τους διαθέτουν την απαραίτητη σταθερότητα στον χρόνο για την διεκπεραίωση της άσκησης από τους φοιτητές [5, 6, 7]. Επίσης μετρήθηκε η εξάρτηση από την θερμοκρασία των αντιστάσεων που ήταν της τάξης των u_T=50 ppm/^{o}C. Οι φοιτητές βρήκαν τις αναμενόμενες (πιθανές) τιμές και τις αβεβαιότητες, καθώς και την θερμοκρασία διακρίβωσης κάθε ομάδας των αντιστατών – προτύπων μεταφοράς σε πίνακες που αναρτήθηκαν στο διαδίκτυο κατά κύρια ομάδα (τους δόθηκε ο αριθμός της ομάδας προτύπων που ο καθένας χρησιμοποίησε) μετά το πέρας των μετρήσεών τους. Επίσης και οι αβεβαιότητες για την θερμοκρασιακή εξάρτηση δόθηκαν με συντελεστή κάλυψης 2.

Α/Α	Ονομαστική τιμή (σε Ω)	Πιθανή τιμή (σε Ω)	Αβεβαιότητα (σε Ω)	Θερμοκρασία μέτρησης (C)
1	68	67.870	0.010	20
2	82	82.374	0.021	20
3	100	99.371	0.016	20
4	120	119.108	0.033	20

Πίνακας 2. Πρότυπα για την Α κλίμακα μιας ομάδα προτύπων.

Ανάμεσα στους πολλούς δυνατούς συνδυασμούς που μπορούμε να κάνουμε με το παραπάνω σύνολο προτύπων επιλέγουμε αυτούς που μας δίνουν τιμές για τις περιοχές μέτρησης του οργάνου που επιθυμούμε. Στον πίνακα 3 παρουσιάζεται ένα σύνολο από αυτούς τους συνδυασμούς που θα χρησιμοποιήσουμε. Προφανώς ο συνδυασμός 1+4 θα μπορούσε να αντικατασταθεί από τον συνδυασμό 2+3.

Στον πίνακα 3 οι στήλες Αναμενόμενη τιμή και Τυπική Αβεβαιότητα συμπληρώνονται από τους φοιτητές. Ακολουθώντας την μεθοδολογία του ISO GUM, η πιθανή τιμή είναι το άθροισμα των πιθανών τιμών των επιμέρους προτύπων και η Τυπική Αβεβαιότητα για κάθε συνδυασμό υπολογίζεται από την σχέση 1. Όπου ο δείκτης i αναφέρεται σε κάθε πρότυπο που μετέχει στον συνδυασμό. Εδώ θεωρούμε μοναδιαίους τους συντελεστές ευαισθησίας α_i οπότε και μπορούν να παραληφθούν.

$$u = \sqrt{\sum_i (\alpha_i u_i)^2} \qquad \text{Σχέση 1.}$$

Συνδυασμός	Περιοχή μέτρησης	Ονομαστική τιμή	Αναμενόμενη τιμή R	Τυπική Αβεβαιότητα
1	-----	68		
2	-----	82		
3	-----	100		
4	-----	120		
1+4	½	188		
1+3+4	¾	270		
1+2+3+4	Πλήρης	370		
3	¼	100		

Πίνακας 3. Συνδυασμοί προτύπων μιας ομάδας προτύπων για την Α κλίμακα.

2.2 Διαδικασία

2.2.1 Λήψη μετρήσεων

Για κάθε κλίμακα λαμβάνονται 3 (τρεις) σειρές μετρήσεων για όλους τους επιλεγμένους συνδυασμούς. Προφανώς η σειρά των μετρήσεων πρέπει να είναι πάντα η ίδια ακολουθώντας το μετρητικό πρωτόκολλο. Επίσης πριν και μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων μετράται και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος η οποία θα ληφθεί υπόψη για τον προσδιορισμό των ζητούμενων ποσοτήτων.

Συνδυα-σμός	Μετ $1^η$	Μετ $2^η$	Μετ $3^η$	Μέση τιμή	Διόρ-θωση	Αβεβαι-ότητα διόρθω-σης	Αναμε-νόμενη ένδειξη I	Αβεβαι-ότητα ένδ.	Συντελ. Ένδειξης κλίμακας c
1					1	.5			
2					1	.5			
3					1	.5			
4					1	.5			
1+4					1.5	.8			
1+3+4					2	1			
1+2+3+4					2.5	1.3			
3					1	.5			

Πίνακας 4. Μετρήσεις για κάθε κλίμακα του οργάνου.

Επιπλέον λαμβάνονται μετρήσεις και των άλλων παραγόντων που πιθανόν να επηρεάζουν τις μετρήσεις (αντίσταση χρησιμοποιούμενων αγωγών κλπ) ώστε να γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις. Με τα δεδομένα των μετρήσεων συμπληρώνεται ο πίνακας 4. Η αναμενόμενη ένδειξη προκύπτει από τη (Μέση Τιμή – Διόρθωση). Από αυτές τις μετρήσεις, υπολογίζονται οι μέσες τιμές και γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις. Για την αβεβαιότητα των διορθώσεων σε κάθε γραμμή του παραπάνω πίνακα, θεωρούμε ότι είναι ορθογώνιας κατανομής και ότι είναι ίση το μισό της διόρθωσης.

2.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή κλίμακας του οργάνου (κλίση)

Έχοντας πλέον τις μετρήσεις μας μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή κλίμακας **c** του οργάνου, δηλαδή τον συντελεστή με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιάζουμε τις ενδείξεις του ώστε να βρίσκουμε σωστά την αναμενόμενη τιμή μιας τυχαίας αντίστασης που μετράμε. Αυτός είναι ο μέσος όρος των συντελεστών που βρίσκουμε για κάθε συνδυασμό. Ο συντελεστής κάθε συνδυασμού βρίσκεται από τη σχέση 2.

$$c_j = R_j / I_j \qquad \text{Σχέση 2.}$$

Όπου R_j είναι η αναμενόμενη τιμή του συνδυασμού j και I_j η αναμενόμενη ένδειξη του οργάνου για τον ίδιο συνδυασμό. Η αβεβαιότητα του κάθε συντελεστή μπορεί να υπολογιστεί από την αβεβαιότητα του προτύπου (από τη δοσμένη και λόγω θερμοκρασίας $u_R = \sqrt{u_r^2 + u_t^2}$, όπου u_r είναι η αβεβαιότητα της τιμής του προτύπου και $u_r = u_T * |\theta - \theta_0|$ είναι η αβεβαιότητα λόγω θερμοκρασίας) και την αβεβαιότητα της αναμενόμενης ένδειξης, από την σχέση 3. Οι συντελεστές ευαισθησίας s_R και s_I θα υπολογισθούν από τις μερικές παραγώγους της σχέσης 2 για R και I. Η u_I θα υπολογισθεί σαν ορθογώνια από τις τρεις μετρήσεις.

$$u_j = \sqrt{(s_R \cdot u_R)^2 + (s_I \cdot u_I)^2} \qquad \text{Σχέση 3.}$$

Τέλος η αβεβαιότητα του συντελεστή κλίμακας θα υπολογισθεί από τη σχέση 4, όπου n ο αριθμός των συνδυασμών.

$$u_c = \frac{\sum_{j=1}^{n} u_j}{n} \qquad \text{Σχέση 4.}$$

2.2.3 Υπολογισμός της μη γραμμικότητας του οργάνου

Για να υπολογίσουμε τη μη γραμμικότητα του οργάνου μπορούμε να δουλέψουμε με δύο τρόπους [8].

2.2.3.1 Υπολογισμός της μη γραμμικότητας του οργάνου γραφικά.

Σε αυτή την περίπτωση κάνουμε το διάγραμμα της διαφοράς (αναμενόμενων ενδείξεων (από τον πίνακα 4) – (αναμενόμενη τιμή προτύπου (από τον πίνακα 3) / c)) σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή προτύπου, δηλαδή το διάγραμμα I_j – R_j/c, R_j. Από αυτό το διάγραμμα βρίσκουμε την απόλυτα μέγιστη τιμή, και αυτή η τιμή είναι η μη γραμμικότητα (u_{nl}) του οργάνου.

2.2.3.2 Υπολογισμός της μη γραμμικότητας του οργάνου αναλυτικά.

Για τον αναλυτικό υπολογισμό βρίσκουμε τις παραπάνω διαφορές (I_j – R_j/c) και από αυτές επίσης την απόλυτα μέγιστη.

2.3 Έκφραση των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που πρέπει να εκφράσουμε τελικά είναι ο συντελεστής κλίμακας, η αβεβαιότητά του και η μη γραμμικότητα. Τα αποτελέσματα θα εκφρασθούν με συντελεστή κάλυψης 2, δηλ. διάστημα εμπιστοσύνης 95% [9]. Προφανώς ο συντελεστής κλίμακας πρέπει να είναι ένας αριθμός κοντά στη μονάδα. Επίσης μπορεί να εκφραστεί και σε ποσοστό %, όπως και η αβεβαιότητά του, π.χ. 0.995 ± 0.003 ή 99.5% ± 0.3%. Η μη γραμμικότητα πρέπει να εκφραστεί σε διαστάσεις του τελευταίου ψηφίου της ένδειξης του οργάνου, π.χ. ±2 του τελευταίου ψηφίου (στην περίπτωση της A κλίμακας ±0.2Ω, γιατί το τελευταίο ψηφίο αντιστοιχεί σε 0.1Ω).

Έτσι αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε το όργανο αυτό για να μετρήσουμε κάποια αντίσταση, για να βρούμε την αναμενόμενη τιμή της θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την ένδειξη που θα πάρουμε στο όργανο με τον συντελεστή κλίμακας (σχέση 5α). Η αβεβαιότητά της θα είναι τώρα μόνο ότι βρήκαμε σαν μη γραμμικότητα του οργάνου συν την αβεβαιότητα του συντελεστή κλίμακας επί την αναμενόμενη τιμή (σχέση 5β).

$R = I \cdot c$ Σχέση 5α.

$u_R = R \cdot u_c + u_{nl}$ Σχέση 5β.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές που υποθέσαμε ότι βρήκαμε πιο πάνω, και έστω ότι μετράμε κάποια αντίσταση και παίρνουμε την ένδειξη 272.3 Ω. Τότε η αναμενόμενη τιμή της θα είναι 270.9 Ω και η αβεβαιότητά της θα είναι 1.1 Ω.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Δείγμα φοιτητών – πρωτόκολλο εργασίας

Η άσκηση εφαρμόσθηκε σε φοιτητές του Φυσικού τμήματος του ΑΠΘ, του $8^{ου}$ εξαμήνου στα πλαίσια του μαθήματος Μετρολογία και Συστήματα Ποιότητας. Οι φοιτητές που συμμετείχαν στην άσκηση ήταν δύο τμήματα των 16 και εργάσθηκαν σε ομάδες των δύο ατόμων. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της άσκησης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην συμμετοχή και των δυο φοιτητών της ομάδας σε όλες τις διαδικασίες, (μέτρησης – καταγραφής αποτελεσμάτων). Χρησιμοποιήθηκαν 8 πολύμετρα με αυτόματη επιλογή κλίμακας και αποδείχθηκε στην πράξη ότι η χειροκίνητη επιλογή ήταν σαφώς λειτουργικότερη. Η κάθε ομάδα σημείωσε τον αριθμό σειράς του πολυμέτρου για να γίνει σύγκριση με μελλοντικές εφαρμογές της άσκησης. Για την σύνδεση μεταξύ των αντιστατών χρησιμοποιήθηκαν κοινά καλώδια του εμπορίου (κροκοδειλάκια) για την μεγιστοποίηση των επιδράσεων των εξωτερικών παραγόντων (αντιστάσεις διόρθωσης) και την ανάδειξη της σημασίας τους.

3.2 Διάρκεια άσκησης

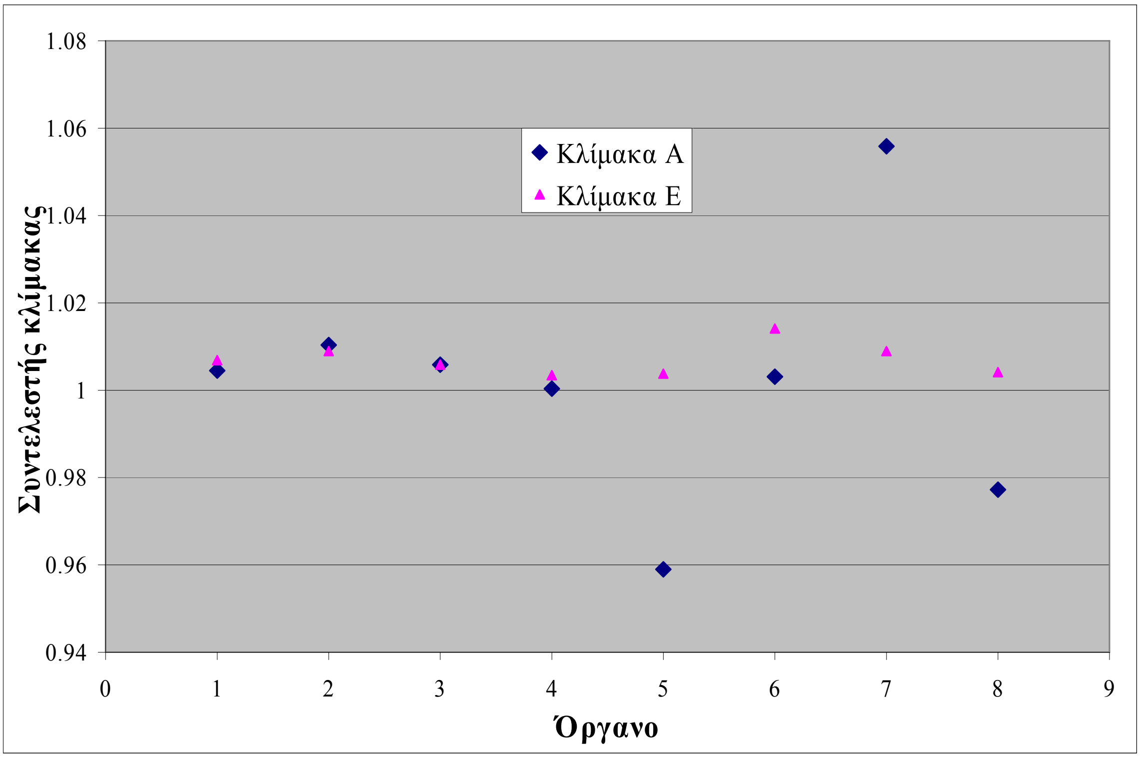
Για την πραγματοποίηση της άσκησης διατέθηκαν 3 ώρες, που ήταν επαρκής χρόνος για το σύνολο των μετρήσεων. Μια ομάδα μόνο χρειάσθηκε περίπου 15’ περισσότερο χρόνο, εξαιτίας δυσλειτουργίας που προέκυψε με το όργανο που χρησιμοποιούσε.
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος πάρθηκε σαν ο μέσος όρος αυτής που υπήρχε πριν την άσκηση και μετά. Η συνολική μεταβολή ήταν περίπου 3 ^{o}C, αλλά η μέγιστη μεταβολή κατά την μέτρηση μιας ομάδας προτύπων δεν ήταν μεγαλύτερη από 1 ^{o}C.

3.3 Αποτελέσματα

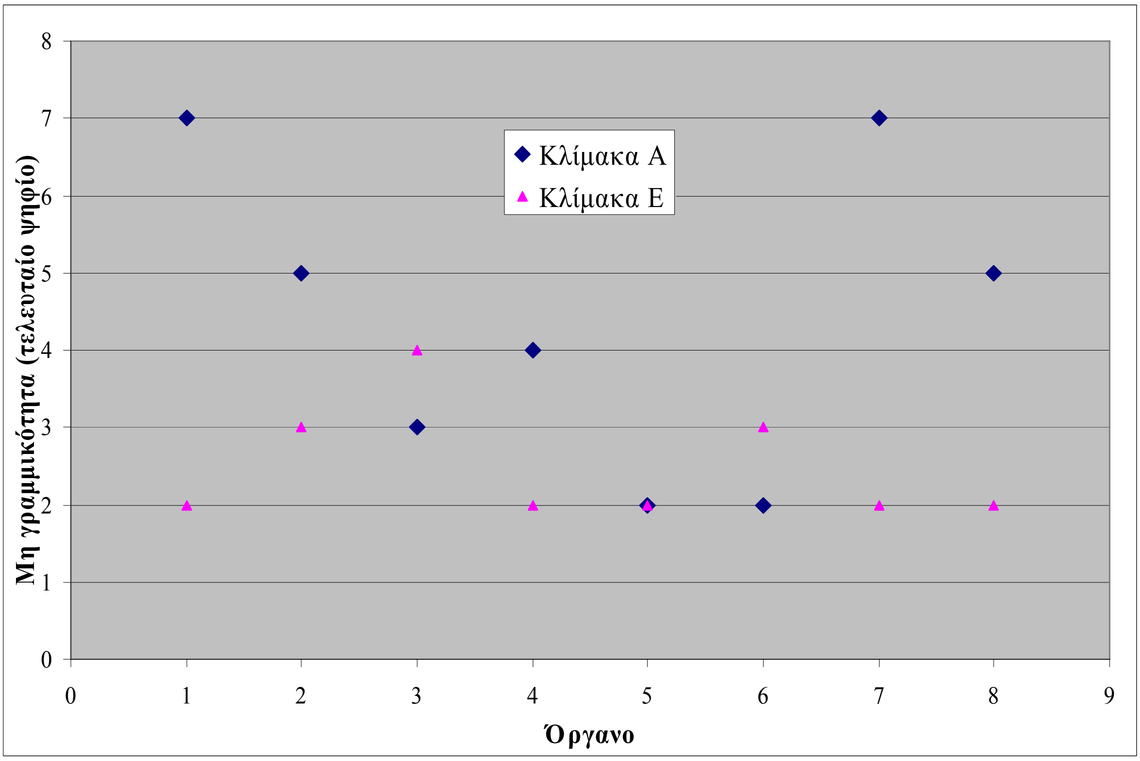
Η παράδοση των αποτελεσμάτων έγινε είτε μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (που ήταν και η προτεινόμενη) είτε λόγω αδυναμίας χρήσης του σε τυπωμένο χαρτί. Στην Εικ. 1 βλέπουμε την κατανομή των συντελεστών κλίμακας για όλα τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρούμε μια κανονικότητα στην κατανομή αλλά καθώς το δείγμα είναι μικρό δεν μπορούμε να διατυπώσουμε με βεβαιότητα ότι υπάρχει αυτή η κατανομή. Όσον αφορά στην μη γραμμικότητα των οργάνων, εκφρασμένη σε μονάδες του λιγότερο σημαντικού ψηφίου του οργάνου, φαίνεται στην Εικ. 2. Τέλος, στην Εικ. 3 φαίνεται η μη γραμμικότητα του οργάνου για διάφορες περιοχές των κλιμάκων μέτρηση ενός από τα όργανα.
Πάντως ο σκοπός δεν είναι η εύρεση ή όχι αν τα όργανα είναι καλής ή όχι ποιότητας αλλά η εφαρμογή στην πράξη ενός πρωτοκόλλου μετρήσεων με σκοπό την βαθμονόμηση οργάνων που αρχικά είχαν άγνωστα χαρακτηριστικά.

3.4 Δυσκολίες και παρανοήσεις

Δυσκολίες προέκυψαν στον υπολογισμό των αντιστάσεων διορθώσεων, καθώς η μέτρησή τους έγινε με τα ίδια όργανα και οι τιμές τους ήταν της τάξης του 1 Ω, όπου τα συγκεκριμένα όργανα δεν είχαν την ζητούμενη αναλυτικότητα. Επίσης,

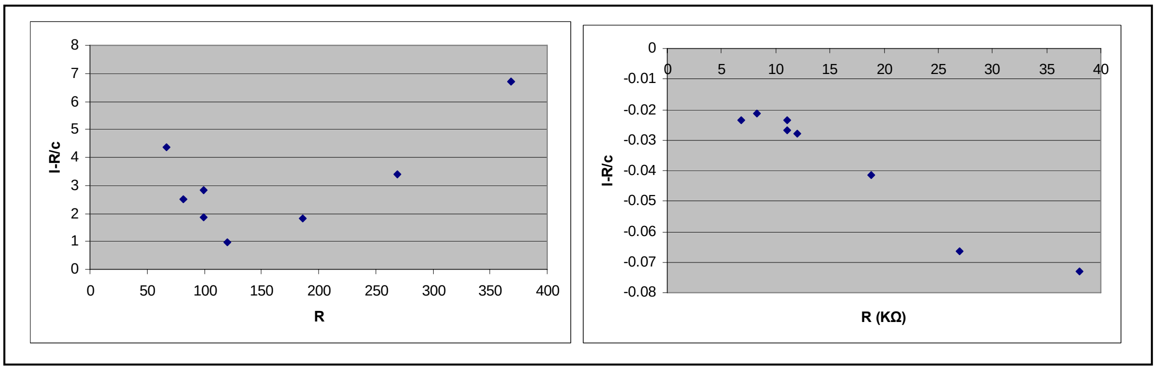


Εικόνα 1. Συντελεστές κλίμακας για 2 κλίμακες των οργάνων.



Εικόνα 2. Μη γραμμικότητα των οργάνων σε μονάδες τελευταίου ψηφίου.

Μια παρανόηση που παρατηρήθηκε ήταν η μη αναγωγή σε σωστές μονάδες για τις διαφορετικές κλίμακες των αντιστάσεων διόρθωσης. Για παράδειγμα, οι αντιστάσεις διόρθωσης ήταν της τάξης του 1 Ω και μερικοί φοιτητές χρησιμοποιούσαν την ίδια αριθμητική τιμή για όλες τις κλίμακες του πολυμέτρου. Έτσι σε κλίμακες 40 kΩ ή 4 MΩ που οι ενδείξεις ήταν εκφρασμένες σε kΩ ή MΩ χρησιμοποιούσαν τιμές διόρθωσης πάλι 1 αντί για 10^{-3} ή 10^{-6}. Αποτέλεσμα ήταν να βρίσκονται συντελεστές κλίμακας πολύ μακριά από την αναμενόμενη μονάδα. Μετά όμως από την συζήτηση με τον διδάσκοντα γίνονταν οι διορθώσεις.



Εικόνα 3 Μη γραμμικότητα ενός οργάνου για τις κλίμακες Α (αριστερά) και Ε (δεξιά).

Μια άλλη παρανόηση ήταν η χρήση υπερβολικά μεγάλου αριθμού δεκαδικών ψηφίων στην έκφραση των αποτελεσμάτων, θεωρώντας ότι όσο πιο πολλά τόσο πιο «ακριβείς» είναι οι υπολογισμοί. Προς στιγμή ξέχασαν τους κανόνες έκφρασης της αβεβαιότητας που δεν πρέπει να ξεπερνά σε δεκαδικά (ή στα λιγότερο σημαντικά) ψηφία αυτά με τα οποία εκφράζεται το προσδιοριζόμενο μέγεθος. Επίσης στις στρογγυλοποιήσεις των αβεβαιοτήτων συχνά χρησιμοποίησαν τους κανόνες της στρογγυλοποίησης στον εγγύτερο αριθμό και όχι ότι προτείνεται από το ISO GUM της στρογγυλοποίησης στον αμέσως μεγαλύτερο. Πάντως και για αυτές τις περιπτώσεις, μετά από παρατήρηση του διδάσκοντα έγιναν οι διορθώσεις.

3.5 Επαναληψιμότητα

Σε κάθε τμήμα δόθηκαν τυχαία τα πολύμετρα και τα πρότυπα, προσέχοντας μόνο να μην δοθεί το ίδιο πολύμετρο που δόθηκε στο πρώτο τμήμα με την ίδια ομάδα προτύπων, για τους προφανείς λόγους που αναφέρουμε στην παράγραφο «πρότυπα μεταφοράς». Παρατηρήθηκε ότι εκτός από πολύ μικρές, σχεδόν ασήμαντες, διαφορές στα αριθμητικά αποτελέσματα, επαληθεύτηκε η μη εξάρτησης της εύρεσης των χαρακτηριστικών των οργάνων από τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν.

3.6 Βαθμός κατανόησης άσκησης

Έγινε γενικά κατανοητός ο μεγάλος αριθμός παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν μια μέτρηση. Ενδεικτικά να αναφέρουμε μόνο την περίπτωση της παράλληλης παρεμβολής στα μετρούμενα πρότυπα μεγάλων τιμών αντίστασης και της αντίστασης του σώματος των φοιτητών.

Έγινε η εφαρμογή της μεθοδολογίας του ISO GUM που είχαν διδαχθεί σε άλλη ενότητα, και διαπιστώθηκε η χρησιμότητα της. Έγινε δηλαδή ιδιαίτερα κατανοητή η χρήση του πρωτοκόλλου της μέτρησης όχι μόνο όσον αφορά στη σειρά των μετρήσεων, αλλά και στη χρονική διάρκειά τους και στον τρόπο λήψης τους. Για την χρονική διάρκεια, φάνηκε καθαρά το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης των προτύπων από το ρεύμα μέτρησης του οργάνου και διαπιστώθηκε η ανάγκη χρήσης αυστηρών χρονικών συγχρονισμών. Για τον τρόπο λήψης των μετρήσεων έγινε κατανοητός ο τρόπος σύνδεσης που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί και τις ιδιαιτερότητες για την κάθε περιοχή μετρήσεων.

Τέλος έγινε γενικά κατανοητή η έννοια της ιχνηλασιμότητας, καθώς με το πέρας της άσκησης είχε βρεθεί ένας τρόπος έκφρασης των μετρούμενων αντιστάσεων που σχετίζονταν με τα διεθνή πρότυπα. Έτσι, μετά την εύρεση του συντελεστή κλίμακας, μετρώντας την αντίσταση οποιουδήποτε αντιστάτη μπορούσαν να υπολογίσουν την αναμενόμενη τιμή της, που τελικά ήταν ίδια, άσχετα με ποιο όργανο έγινε η μέτρηση, παρόλο που οι ενδείξεις διαφορετικών πολύμετρων ήταν διαφορετικές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάσαμε μια προσπάθεια διδασκαλίας μετρολογικών μεθόδων σε φοιτητές του Φυσικού Τμήματος του ΑΠΘ, και πιο συγκεκριμένα την χρήση των προτύπων μεταφοράς αντίστασης για την βαθμονόμηση οργάνων – πολύμετρων σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος τιμών. Με την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, έγινε κατανοητό από τους φοιτητές ότι υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αβεβαιότητα των μετρήσεων και ότι υπάρχει τρόπος παίρνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες σύμφωνα με το πρότυπο ISO-GUM να καταλήξουμε σε υπολογισμούς των αβεβαιοτήτων. Για την εφαρμογή που μελετήσαμε λάβαμε υπόψη τη θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει την αντίσταση των προτύπων μεταφοράς και τις αντιστάσεις παρεμβολής από τις ηλεκτρικές συνδέσεις των προτύπων μεταφοράς με το προς βαθμονόμηση όργανο. Μέσα από την όλη διαδικασία φάνηκε ότι είναι εφικτή η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων και η κατανόηση της ανάγκης χρήσης διάφορων παραλλαγών της διαδικασίας για τις διάφορες περιοχές του μεγέθους. Η έννοια της ιχνηλασιμότητας και η σημασία της στις μετρήσεις έγιναν επίσης κατανοητές από τους φοιτητές. Από την ανταπόκριση των φοιτητών, την χρονική έκταση της άσκησης και τις προαπαιτούμενες γνώσεις φαίνεται ότι είναι εφικτή και η εισαγωγή της στο Εισαγωγικό Εργαστήριο.

Βιβλιογραφία

[1] R. E. Elmquist, D. G. Jarrett, G. R. Jones Jr., M. E. Kraft, S. H. Shields and R. F. Dziuba, *NIST Measurement Service for DC Standard Resistors*, NIST Technical Note 1458 (2003)

[2] ISO, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, *2nd ed.*, 1995.

[3] B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, *Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results,* NIST Technical Note 1297 (1992)

[4] L. B. Cronin, *Measurement accreditation*, Engineering Science and Education Journal **6** (1997) 9 -16

[5] K. von Klitzing, *The quantized Hall effect*, Rev. Mod. Phys. **58** (1986) 519

[6] M. E. Cage, R. F. Dziuba, C. T. Van Degrift, and D. Yu, *Determination of the time dependence of Ω(NBS) using the quantized Hall resistance,* IEEE Trans. Instrum. Meas. **38** (1989) 263-269

[7] http://www.faithfullink.com/htm/pdf/resistor/R6_MFU.pdf

[8] A. A. Danilov, *A Theoretical-Experimental Method of Estimating the Nonlinearity of Precision Digital-Analog Converters*, Measurement Techniques, **43** (2000) 800-803

[9] *EA-4/02 Expression of the uncertainty of measurement and calibration*, 1999.