

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ WHEATSTONE ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΤΙΜΗΣ ΑΠΟ 10 ΜΩ ΕΩΣ 1ΤΩ

Ε. ΦΛΟΥΔΑ, Μ. ΧΟΛΙΑΣΤΟΥ, Σ. ΣΔΡΑΚΑΣ, Α. ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ, Χ. ΣΑΡΑΦΙΔΗΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
Eirini.Flouda@eim.gr

Περίληψη: Περιγράφεται η εγκατάσταση και εφαρμογή μιας αυτοματοποιημένης θωρακισμένης γέφυρας για τη διακρίβωση πρότυπων αντιστάτων υψηλής τιμής. Η γέφυρα βασίζεται στην κλασική γέφυρα Wheatstone, όπου οι δύο κλάδοι των γνωστών αντιστάσεων έχουν αντικατασταθεί από δύο προγραμματιζόμενες πηγές τάσης (διακριβωτές). Με τον τρόπο αυτό επιτρέπονται μετρήσεις πολλαπλών λόγων και τάσεων. Για την μέτρηση της διαφοράς των ρευμάτων που διαρρέουν τους άλλους δύο κλάδους της γέφυρας που αποτελούνται από την πρότυπη και την προς διακρίβωση αντιστάσεις, χρησιμοποιείται ένα προγραμματιζόμενο ηλεκτρόμετρο με διακριτική ικανότητα ± 3 fA. Για τον προσδιορισμό των τάσεων εξόδου των διακριβωτών προκειμένου να επιτευχθεί η ισορροπία της γέφυρας, χρησιμοποιείται αλγόριθμος ο οποίος αυτοματοποιεί όλη την διαδικασία και εκτελεί όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέρχονται είτε από την χρήση της είτε από Μετρητή Υψηλών Τιμών Αντιστάσεων.

Λέξεις- Κλειδιά: Μετρήσεις Ηλεκτρικής Αντίστασης, Κυκλώματα Γέφυρας, Διακρίβωση Αντιστάσεων, 10ΜΩ έως 1 ΤΩ.

1. Εισαγωγή

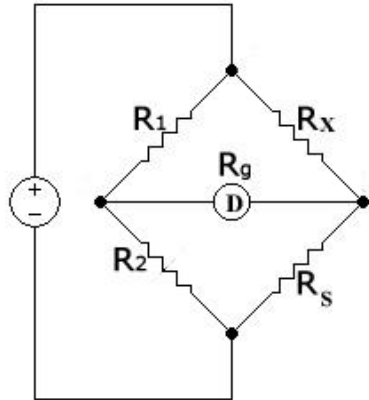
Η διακρίβωση αντιστάσεων υψηλής τιμής υπήρξε για χρόνια ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα. Ο κύριος λόγος για αυτή την δυσκολία είναι αφενός τα εξαιρετικά χαμηλά ρεύματα που διαρρέουν το οποιοδήποτε κύκλωμα μέτρησης, αφετέρου δε οι επιδράσεις των αντιστάσεων και των χωρητικοτήτων διαρροής.

Μέχρι το 2006 στο ΕΙΜ οι υψηλής τιμής αντιστάσεις διακριβώνονταν είτε με τη χρήση Γέφυρας Συγκριτή Αντιστάσεων Συνεχούς Ρεύματος (Direct Current Comparator- DCC), είτε με με Μετρητή Υψηλών Τιμών Αντιστάσεων (High Resistance Meter- HRM). Το 2006 εγκαταστάθηκε ένα νέο σύστημα μέτρησης που βασίζεται στην τροποποιημένη γέφυρα Wheatstone (Modified Wheatstone Bridge- MWB).

Η κλασική Γέφυρα Wheatstone παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Η εξίσωση ισορροπίας για την γέφυρα αυτή είναι :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_X}{R_S} \quad (1)$$

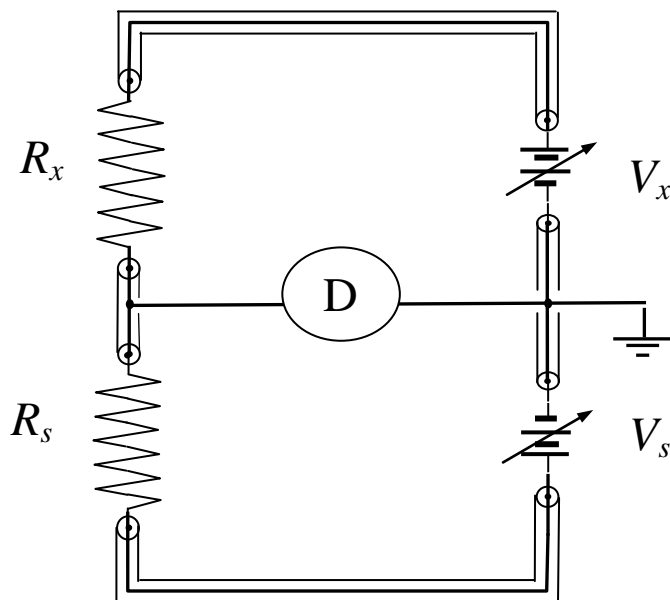
όπου R_1 και R_2 είναι οι (γνωστές) τιμές των αντιστάσεων των δύο κλάδων της γέφυρας, R_S είναι η τιμή της πρότυπης αντίστασης και R_X είναι η τιμή της άγνωστης αντίστασης. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από την πηγή τάσης V και ο ανιχνευτής μηδενός D μετρά την διαφορά των ρευμάτων στους δύο κλάδους της γέφυρας.



Σχήμα 1. Η κλασική Γέφυρα Wheatstone

2. Τροποποιημένη Γέφυρα Wheatstone

Στην τροποποιημένη Γέφυρα Wheatstone οι δύο, χαμηλής τιμής, αντιστάσεις R_1 και R_2 καθώς και η πηγή τάσης V , αντικαθίστανται από δυο προγραμματιζόμενες πηγές τάσης V_x και V_s , οι οποίες μπορούν να παράγουν μεταβαλλόμενες τιμές τάσης E_x και E_s , αντίστοιχα, και ταυτόχρονα αντικαθιστούν την πηγή τάσης του σχήματος 1. Οι πηγές αυτές είναι δυο διακριβωτές πολύ χαμηλής σύνθετης αντίστασης εξόδου. Το τελικό κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 2. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και το κύκλωμα θωράκισης της γέφυρας (λεπτές γραμμές).



Σχήμα 2. Η τροποποιημένη Γέφυρα Wheatstone

Κατά την ισορροπία της γέφυρας ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{V_X}{V_S} = \frac{R_X}{R_S} \quad (2)$$

Τα ρεύματα διαρροής, που είναι και το σημαντικότερο πρόβλημα αυτών των κυκλωμάτων, ελαχιστοποιούνται εξαιτίας της χαμηλής σύνθετης αντίστασης των πηγών τάσης. Για την περαιτέρω μείωση των ρευμάτων αυτών χρησιμοποιείται το κύκλωμα θωράκισης [4]. Ο ακροδέκτης υψηλής τάσης του ανιχνευτή μηδενός (ηλεκτρόμετρο) θωρακίζεται ενεργά στο ίδιο δυναμικό με αυτό του σημείου σύνδεσης της R_X και της R_S . Ο ακροδέκτης χαμηλής τάσης συνδέεται στο σημείο σύνδεσης των V_X και V_S .

Το επόμενο σημαντικό πρόβλημα της γέφυρας είναι οι ανεπιθύμητες χωρητικότητες οι οποίες μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την σταθερά χρόνου του κυκλώματος και κατά συνέπεια και το χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια μέτρηση. Για τον λόγο αυτό έγιναν αρχικές μετρήσεις του χρόνου σταθεροποίησης του ρεύματος που μετράται από το ηλεκτρόμετρο μετά την ενεργοποίηση των τάσεων των δύο διακριβωτών. Ο χρόνος αυτός για τις υψηλότερες τιμές αντιστάσεων (1 GΩ) ήταν μικρότερος από 15 sec. Υποθέτοντας εκθετική μείωση της τιμής του ρεύματος, ο χρόνος αναμονής μεταξύ της ενεργοποίησης των τάσεων και της λήψης της μέτρησης πρέπει να είναι περίπου 15πλάσιος της σταθεράς χρόνου για μια σταθερή ένδειξη ρεύματος.

Στο κύκλωμα μέτρησης που εγκαταστάθηκε στο EIM ως πηγές χρησιμοποιούνται δύο πανομοιότυποι διακριβωτές Wavetek 4808. Η γραμμικότητα αυτών των πηγών μετρήθηκε και βρέθηκε ότι η διαφορά μεταξύ της τιμής εξόδου που μετρείται και της τιμής ένδειξης είναι της τάξης των 5 ppm. Για την μέτρηση της διαφοράς ΔI των ρευμάτων που διαρρέουν τις R_X και R_S χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής το ηλεκτρόμετρο Keithley 6430. Το ηλεκτρόμετρο μπορεί να μετρά ρεύματα της τάξεως του 1 pA με διακριτική ικανότητα της τάξης των 10 aA και ρεύματα της τάξης των 10 pA με διακριτική ικανότητα 100 aA. Οι λόγοι που μπορούν να μετρηθούν είναι έως 1000:1. Για την παρούσα εργασία οι λόγοι που μετρήθηκαν είναι έως 10:1.

Προκειμένου να ελαττωθεί η χρονική διάρκεια μιας μέτρησης τόσο οι δύο διακριβωτές όσο και το ηλεκτρόμετρο οδηγούνται από H/Y μέσω κάρτας IEEE 488 (GPIB). Για τον έλεγχο των συσκευών αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό στο περιβάλλον της γραφικής γλώσσας Labview. Με το λογισμικό αυτό αυτοματοποιείται η διαδικασία μέτρησης και ελαχιστοποιείται ο χρόνος μέτρησης. Επίσης, αποφεύγονται τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν κατά την χειροκίνητη κλιμάκωση των τάσεων εξόδου των διακριβωτών έως την τελική τους τιμή, όταν, π.χ. δεν διατηρείται σε όλη την διαδικασία ο λόγος $\frac{V_X}{V_S}$ σταθερός. Τέλος,

όλοι οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί γίνονται ταυτόχρονα με την μέτρηση με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται γρήγορα και εύκολα πιθανά σφάλματα.

3. Διαδικασία Μέτρησης.

Οι δύο πηγές τίθενται αρχικά σε μηδενική έξοδο και καταγράφεται η ένδειξη ΔI_{01} του ηλεκτρόμετρου. Η ένδειξη αυτή αντιστοιχεί στο μηδενικό σημείο του κυκλώματος.

Όλες οι ενδείξεις είναι ο μέσος όρος 300 σημείων μέτρησης σε διάστημα περίπου 30 sec.

Στη συνέχεια οι δύο πηγές οδηγούνται βηματικά στις ονομαστικές τιμές E_S και E_{X1est} (E_S :αρνητική, E_X : θετική). Στην διάρκεια των βημάτων οι έξοδοι των δύο πηγών είναι συνεχώς ενεργοποιημένες και έχουν συνεχώς τον ίδιο λόγο R_X/R_S . Οι τελικές τιμές E_S και E_X επιλέγονται έτσι ώστε να ικανοποιούν την σχέση (2) για την απαιτούμενη τιμή της E_X . Στο σημείο αυτό καταγράφεται η ένδειξη του ηλεκτρομέτρου ΔI_1 (μέσος όρος 300 σημείων) και λαμβάνεται το πρώτο ζεύγος τιμών ($\Delta I_1, E_{X1est}$). Διατηρώντας σταθερή την τιμή της τάσης E_S που εφαρμόζεται στην R_S υπολογίζεται η τιμή της E_X που απαιτείται για να ισορροπήσει η γέφυρα, ως

$$E_{X2est} = (\Delta I_1 + \frac{E_2}{R_S}) R_X \quad (3)$$

Θέτοντας την τιμή $E_X = E_{X2est}$ η γέφυρα οδηγείται σε ένα σημείο πλησιέστερο στο σημείο ισορροπίας της. Στο σημείο αυτό καταγράφεται η ένδειξη του ηλεκτρομέτρου και λαμβάνεται το δεύτερο ζεύγος τιμών ($\Delta I_2, E_{X2est}$). Από την σχέση (3) αναμένεται ότι η συνάρτηση $\Delta I=f(E_X)$ θα είναι γραμμική. Από τα δύο ζεύγη τιμών ($\Delta I_1, E_{X1est}$), ($\Delta I_2, E_{X2est}$), υπολογίζονται οι συντελεστές α_{est} και β_{est} της ευθείας :

$$\Delta I = f(E_X) \Rightarrow \Delta I = \alpha_{est} + \beta_{est} E_X \quad (4)$$

ως:

$$\alpha_{est} = \frac{\Delta I_2 E_{X1est} - \Delta I_1 E_{X2est}}{E_{X1est} - E_{X2est}}, \quad \beta_{est} = \frac{\Delta I_1 - \Delta I_2}{E_{X1est} - E_{X2est}} \quad (4a)$$

Από τις σχέσεις (4) και (4a) υπολογίζονται οι ενδιάμεσες τιμές E_{X3}, E_{X4}, E_{X5} , της E_X στις οποίες αναμένονται τιμές ρευμάτων $\Delta I=0, \Delta I= \Delta I_{01}, \Delta I=- \Delta I_{01}$, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας αυτές τις τιμές τάσης και μετρώντας τα αντίστοιχα ρεύματα καταγράφονται ακόμα τρία ζεύγη τιμών ($E_{X3}, \Delta I_3$), ($E_{X4}, \Delta I_4$), και ($E_{X5}, \Delta I_5$). Τέλος, οι έξοδοι των πηγών οδηγούνται στην μηδενική τιμή και μια δεύτερη μέτρηση μηδενός, ΔI_{02} , λαμβάνεται.

Προσομοιώνοντας τα 5 πειραματικά σημεία ($E_{Xi}, \Delta I_i$), $i=1...5$ σε ευθεία με την μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων καθορίζονται οι πειραματικοί, πλέον, συντελεστές α και β της γραμμικής σχέσης $\Delta I=\alpha + \beta E_X$, η οποία συνδέει την εφαρμοζόμενη τάση στην άγνωστη αντίσταση και το μετρούμενο ρεύμα. Ο συντελεστής βαρύτητας για το κάθε πειραματικό σημείο είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος των 300 μετρήσεων που αντιστοιχούν στο κάθε σημείο. Η τυπική απόκλιση της προσομοίωσης είναι ένα μέτρο της ποιότητας της ευθείας. Το ακριβές σημείο ισορροπίας της γέφυρας λαμβάνεται σε εκείνη την τιμή του E_X που αντιστοιχεί στην τιμή ρεύματος $\Delta I=\Delta I_0$:

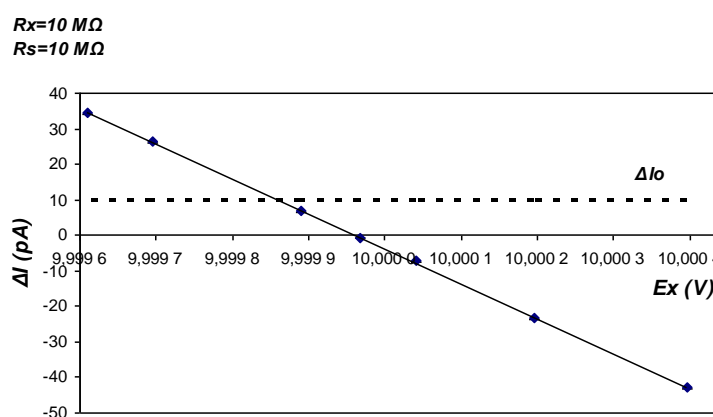
$$E_X = \frac{\Delta I_0 - \alpha}{\beta} \quad (4)$$

όπου ΔI_0 είναι η μέση τιμή των δύο μετρήσεων ΔI_{01} και ΔI_{02} : $\Delta I_0 = \text{Average}(\Delta I_{01}, \Delta I_{02})$.

Η τιμή της άγνωστης αντίστασης υπολογίζεται ως:

$$R_X = \left(\frac{E_X}{E_S}\right)R_S \quad (5)$$

Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις μιας ημέρας για λόγο 1:1 και για την θετική πολικότητα. Σε κάθε πειραματικό σημείο περιλαμβάνεται και η τυπική απόκλιση της αντίστοιχης μέτρησης του ΔI . Οι τυπικές αποκλίσεις είναι της τάξης του 0,3 pA. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση της γραμμικής προσομοίωσης, ενώ με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η τιμή του ΔI_0 . Από τις μετρήσεις και την γραμμική προσομοίωση παρατηρείται ότι η γραμμικότητα της γέφυρας είναι καλύτερη από 0,06%.



Σχήμα 3. Το ρεύμα που μετράται από τον ανιχνευτή σαν συνάρτηση της τάσης του διακριβωτή.

Μετά τον καθορισμό του σημείου ισορροπίας της γέφυρας με την συγκεκριμένη πολικότητα των διακριβωτών-πηγών τάσης (E_S : θετική, E_X : αρνητική), η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται αντιστρέφοντας την πολικότητα των πηγών (E_X : θετική, E_S : αρνητική), έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν όλες οι πιθανές θερμοτάσεις του κυκλώματος. Η άγνωστη αντίσταση υπολογίζεται από την μέση τιμή των δύο σειρών μετρήσεων (με τις δυο πολικότητες).

4. Αποτελέσματα

Οι λόγοι που μετρήθηκαν με την γέφυρα ήταν 1:1 και 10:1. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στα πλαίσια της διεργαστηριακής σύγκρισης **EUROMET.EM-K2- Key Comparison «Comparison of Resistance Standards at 10 MΩ and 1 GΩ»**. Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως R_X ήταν 3 αντιστάσεις ονομαστικής τιμής 10 MΩ και 3 αντιστάσεις ονομαστικής τιμής 1 GΩ. Τα χαρακτηριστικά τους είναι τα ακόλουθα:

10 MΩ

Χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις δύο διαφορετικών τύπων:

1. Μία αντίσταση κατασκευασμένη από το NIST τύπου περιέλιξης σύρματος. Τα στοιχεία της αντίστασης ήταν ερμητικά σφραγισμένα σε μεταλλικό κλωβό. Η αντίσταση είχε δύο ακροδέκτες τύπου ομοαξονικού BPO. Το εσωτερικό της

αντίστασης ήταν ηλεκτρικά μονωμένο από τον κλωβό και συνδεδεμένο στην θωράκιση ενός από τους ομοαξονικούς ακροδέκτες. Με τον τρόπο αυτό το εσωτερικό της αντίστασης μπορεί να λειτουργήσει είτε σε ελεύθερη κατάσταση, συνδεδεμένο σε γείωση, είτε συνδεδεμένο σε ένα δυναμικό θωράκισης.

2. Δύο πρότυπες αντιστάσεις της Measurements International (CA), Μοντέλο 9331. Τα στοιχεία των αντιστάσεων είναι ερμητικά σφραγισμένα σε μεταλλικό κλωβό. Οι αντιστάσεις είχαν τέσσερις ακροδέκτες σύνδεσης και ένα χωριστό ακροδέκτη γείωσης για την θωράκιση.

1 GΩ

Χρησιμοποιήθηκαν αντιστάσεις δύο διαφορετικών τύπων:

1. Δύο αντιστάσεις κατασκευασμένες από το NIST τύπου υμενίου. Η κατασκευή των αντιστάσεων είναι ίδια με αυτή της 1 MΩ.
2. Μία πρότυπη αντίσταση της Measurements International (CA), Μοντέλο 9331S . Τα στοιχεία των αντιστάσεων είναι τοποθετημένα σε ένα διπλά θωρακισμένο περίβλημα. Οι δύο ακροδέκτες είναι ομοαξονικοί τύπου BPO, τοποθετημένοι κατευθείαν στο εξωτερικό περίβλημα. Το εσωτερικό περίβλημα που περιέχει και τα στοιχεία της αντίστασης είναι μονωμένο από το αντίστοιχο εξωτερικό και συνδεόταν στον ακροδέκτη θωράκισης έτσι ώστε να λειτουργεί είτε σε ελεύθερη κατάσταση, συνδεδεμένο σε γείωση, είτε συνδεδεμένο σε ένα δυναμικό θωράκισης.

Ως πρότυπες αντιστάσεις (R_S) χρησιμοποιήθηκαν 2 πρότυπες αντιστάσεις του εργαστηρίου κατασκευασμένες από την Guildline, Μοντέλο 6334 και ονομαστικής τιμής 10 MΩ (λόγος 1:1) και 100 MΩ (λόγος 10:1).

Και οι 6 αντιστάσεις διακριβώνονταν μια φορά την ημέρα για ένα διάστημα 20 περίπου ημερών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της τελικής τιμής της αντίστασης είναι η ακόλουθη:

Για την κάθε ημέρα υπολογιζόταν ο μέσος όρος της τιμής της για τις δύο πολικότητες και με την αντίστοιχη αβεβαιότητα, όπως περιγράφεται παρακάτω. Τέλος, ως μέση τιμή της αντίστασης λαμβάνεται ο μέσος όρος των 20 περίπου μετρήσεων.

Ως αβεβαιότητα Τύπου A κάθε μετρητικού αποτελέσματος για μια ημέρα υποθέτουμε την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων (root squared sum- RSS) των παραμένων σφαλμάτων της γραμμικής προσομοίωσης και της τυπικής απόκλισης των ενδείξεων μηδενός ΔI_{01} , ΔI_{02} του ανιχνευτή. Τα παραμένοντα σφάλματα της γραμμικής προσομοίωσης λαμβάνονται ως:

$$\sigma_{\Delta I} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\Delta I_i - a - bE_{xi})^2}, \quad n = \text{αριθμός μετρήσεων}$$

για τα ζεύγη (E_{xi} , ΔI_i).

Το τελικό αποτέλεσμα για την κάθε αντίσταση λαμβάνεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των μετρήσεων:

Σταθμισμένος Μέσος όρος μετρήσεων: $\bar{R}_x = \frac{\sum_{j=1}^N w_j R_{xj}}{\sum_{j=1}^N w_j}$, $w_j = \frac{1}{u_{R_{xj}}^2}$ (6)

όπου u_j είναι η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα των ανεξάρτητων μετρήσεων R_{xj} , N είναι ο αριθμός όλων των μετρήσεων και w_j είναι η συνάρτηση βάρους της κάθε μέτρησης R_{xj} .

Ισοζύγιο Αβεβαιότητων

Η αντίσταση της κάθε μέτρησης (μια ημέρα) υπολογίζεται ως:

$$R_x = \frac{R_x^+ + R_x^-}{2} \quad (7)$$

όπου R_x^+ and R_x^- είναι η τιμή της άγνωστης αντίστασης για τις δύο πολικότητες. Οι R_x^+ , R_x^- υπολογίζονται από την σχέση (5) ως:

$$R_x^+ = R_s \frac{E_x^+}{E_s} \quad (5\alpha)$$

και

$$R_x^- = R_s \frac{E_x^-}{E_s} \quad (5\beta)$$

όπου E_x^+ και E_x^- είναι οι τάσεις για την ισορροπία της γέφυρας για τις δύο πολικότητες, όπως υπολογίζονται από την σχέση (4):

$$E_x^+ = \frac{\Delta I_0^+ - a^+}{b^+} \quad (4\alpha)$$

και

$$E_x^- = \frac{\Delta I_0^- - a^-}{b^-} \quad (4\beta)$$

ΔI_0^+ , ΔI_0^- και a^+ , b^+ , a^- , b^- είναι αντίστοιχα, οι μέσες τιμές των δύο μετρήσεων μηδενός και οι συντελεστές της γραμμικής προσομοίωσης για τις δύο πολικότητες. Από την σχέση (7) προκύπτει η τιμή της αντίστασης για την κάθε μέτρηση ως:

$$R_x = \frac{(\Delta I_0^+ - a^+)R_s}{2b^+E_s} + \frac{(\Delta I_0^- - a^-)R_s}{2b^-E_s} \quad (8)$$

Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα καθεμιάς από τις μετρήσεις υπολογίζεται ως:

$$u_{R_x} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_x}{\partial R_s}\right)^2 u_{R_s}^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial \Delta I_0^+}\right)^2 u_{\Delta I_0^+}^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial \Delta I_0^-}\right)^2 u_{\Delta I_0^-}^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial E_s}\right)^2 u_{E_s}^2} \quad (8)$$

όπου

u_{R_s} : η αβεβαιότητα της πρότυπης αντίστασης αναφοράς.

Αποτελείται από την αβεβαιότητα:

- της αντίστασης των 10kΩ έναντι του Πρωτεύοντος Προτύπου της Αντίστασης (Quantized Hall Resistance-QHR),

- των ενδιάμεσων βημάτων των διακριβώσεων κλιμάκωσης 10kΩ-10MΩ (ή 10kΩ-100MΩ),
- εξαιτίας του θερμοκρασιακού συντελεστή της R_S
- εξαιτίας της ολίσθησης της τιμής της R_S από την τελευταία της διακρίβωση.

$u_{\Delta_0^+}$, $u_{\Delta_0^-}$: η αβεβαιότητα του ρεύματος ισορροπίας της γέφυρας.

Αποτελείται από την αβεβαιότητα:

- διακρίβωσης του ηλεκτρόμετρου,
- λόγω της διακριτικής ικανότητας του ηλεκτρόμετρου,
- εξαιτίας των ρευμάτων διαρροής
- εξαιτίας της γραμμικότητας της γέφυρας.

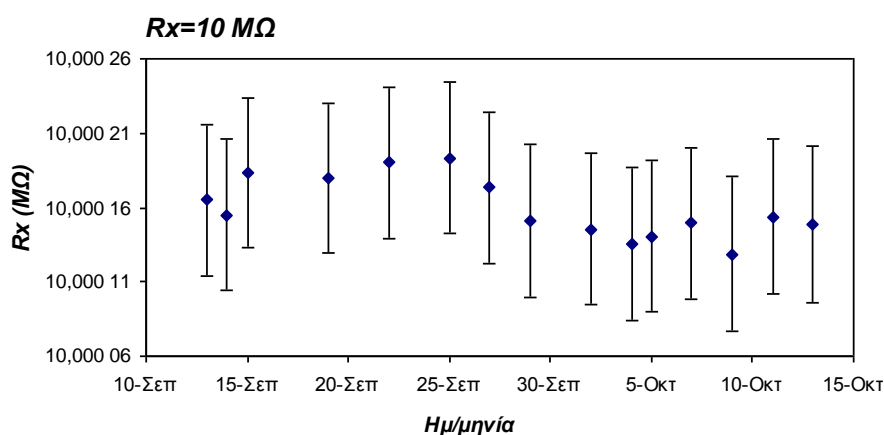
u_{E_s} : η αβεβαιότητα της τάσης οδήγησης της αντίστασης αναφοράς, η οποία είναι η αβεβαιότητα του διακριβωτή.

Οι αβεβαιότητες u_{R_x} για τις 20 περίπου μετρήσεις είναι περίπου ίσες. Για το λόγο αυτό, κατά τον υπολογισμό της τελικής μέσης τιμής της αντίστασης υπολογίζεται ο απλός μέσος όρος των 20 μετρήσεων και ως αβεβαιότητα Τύπου A για το σύνολο των μετρήσεων (αναπαραγωγιμότητα) λαμβάνεται η τυπική απόκλιση του μέσου όρου των μετρήσεων αυτών (σχέση 6).

Ενδεικτικά, στο σχήμα 4 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι της τιμής μιας αντίστασης 10 MΩ για την κάθε μέρα, καθώς και η αντιστοιχη αβεβαιότητα.

Η αβεβαιότητα για τις αντιστάσεις ονομαστικής τιμής 10 MΩ (λόγος Γέφυρας 1:1) είναι της τάξης των 53 Ω ενώ για αυτές ονομαστικής τιμής 1 GΩ είναι της τάξης των 10 kΩ. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τόσο η συνολική αβεβαιότητα όσο και οι επιμέρους όροι της, έτσι όπως υπολογίστηκαν σύμφωνα με τα παραπάνω.

Οι τιμές της αβεβαιότητας που υπολογίζονται με την μέθοδο αυτή είναι 3 τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις αντίστοιχες κατά την διακρίβωση υψηλών τιμών αντιστάσεων με Μετρητή Υψηλών Τιμών Αντιστάσεων (High Resistance Meter), για την αντίσταση του 1 GΩ, ή με την Γέφυρα Συγκριτή Αντιστάσεων Συνεχούς Ρεύματος (Direct Current Comparator) για την αντίσταση των 10 MΩ.



Σχήμα 4. Μεταβολή της τιμής της άγνωστης αντίστασης σε συνάρτηση με το χρόνο. Οι ράβδοι σφαλμάτων στον άξονα y αντιστοιχούν στην συνολική αβεβαιότητα της κάθε μέτρησης.

Πίνακας 1: Συνιστώσες αβεβαιότητας κατά την διακρίβωση αντιστάσεων ονομαστικής τιμής 10 ΜΩ και 1 GΩ

Ονομαστική Τιμή Αντίστασης προς Διακρίβωση	10 ΜΩ	1GΩ
	Συνεισφορά στην Αβεβαιότητα	
	Ω	kΩ
Τιμή Πρότυπης Αντίστασης	41	7
Αβεβαιότητα Ηλεκτρόμετρου	0,4	0,07
Γραμμικότητα Γέφυρας	6	0,6
Διαρροές	4	0,4
Διακριβωτής	20	2
Αναπαραγωγιμότητα	25	6,7
Συνδυασμένη Τυπική Αβεβαιότητα	53 Ω	10 kΩ

5. Συμπεράσματα

Παρουσιάζεται μια αυτοματοποιημένη μέθοδος για την διακρίβωση υψηλών τιμών αντιστάσεων, βασισμένη στην τροποποιημένη γέφυρα Wheatstone. Στην γέφυρα οι δύο γνωστές αντιστάσεις της κλασικής γέφυρας Wheatstone έχουν αντικατασταθεί από δύο εξαιρετικά σταθερές πηγές συνεχούς τάσεις, οι οποίες οδηγούν την πρότυπη και την προς διακρίβωση αντίσταση, αντίστοιχα. Το λογισμικό ελέγχου της γέφυρας αναπτύχθηκε στην γραφική γλώσσα Labview. Με την αυτοματοποίηση της γέφυρας μειώθηκε σημαντικά η χρονική διάρκεια των μετρήσεων με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά και η αβεβαιότητά τους. Επίσης, με την χρήση των διακριβωτών ως πηγές τάσης ελαχιστοποιούνται τόσο η σύνθετη αντίσταση της συνδεσμολογίας όσο και τα ρεύματα διαρροής.

6. Αναφορές

1. “NIST measurement services for dc standard resistors,” R. F. Dziuba., P. A. Boynton, R. E. Elmquist, D. G. Jarrett, T. P. Moore, and J. D. Neal, *Nat. Inst. Standards Technol. Tech. Note 1298*, pp. 20–28, 1992.
2. “A new technique for the automated measurement of high valued resistors,” L. C. A. Henderson, *J. Phys., Electron., Sci. Instrum.*, vol. 20, pp. 492–495, Sept. 1987.
3. “Automated guarded bridge for calibration of multimegohm standard resistors from 10M to 1 T,” D. G. Jarrett, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, pp. 325–328, 1997.
4. “Evaluation of guarded high resistance Hamon transfer standards,” D. G. Jarrett, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, pp. 324–328, Apr. 1999.

5. “Measurement Errors and Uncertainties- Theory and Practice”, S. G. Rabinovich, 2nd Edit., *Springer*, 2000.
6. “An Introduction to Error Analysis- The study of Uncertainties in Physical Measurements”, J. R. Taylor, 2nd Edit., *University Science Books*, 1997.