

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ AC-DC ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ AC ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Μ. ΧΟΛΙΑΣΤΟΥ, Ε. ΦΛΟΥΔΑ, Σ. ΣΔΡΑΚΑΣ, Θ. ΤΟΔΗ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
holiastou@eim.gr

Περίληψη: Η διακρίβωση των εναλλασσόμενων μεγεθών (AC) στη μετρολογία παρουσιάζει ιδιαιτερότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα μεγέθη, καθώς δεν γίνεται απευθείας, αλλά βασίζεται στη μέτρηση των αντίστοιχων συνεχών (DC) μεγεθών [1]. Η λογική του συσχετισμού αυτού («Μεταφορά AC-DC») βασίζεται στη φυσική αρχή ότι ένα συνεχές ηλεκτρικό σήμα προκαλεί το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα με ένα εναλλασσόμενο, όταν το τελευταίο έχει ενεργό τιμή ίση με το συνεχές. Έτσι, το πρωτεύον πρότυπο για την AC τάση είναι ένας θερμικός μετατροπέας [2], ο οποίος είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να παρουσιάζει όσο το δυνατό μικρότερες διαφορές AC-DC. Κατ' επέκταση, ένα πολύμετρο ή πρότυπο μεταφοράς διακρίβωνεται στη μέτρηση AC τάσης, διεγείροντάς το διαδοχικά με AC και DC τάση και συγκρίνοντας την απόκρισή του με αυτή του πρότυπου θερμικού μετατροπέα στις ίδιες διεγέρσεις.

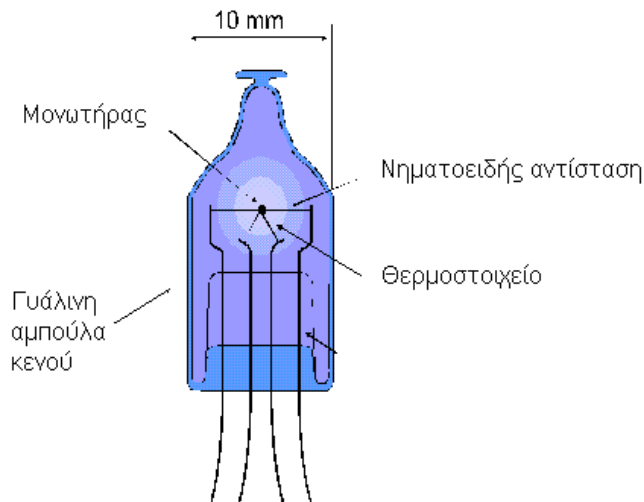
Λέξεις - Κλειδιά: μεταφορά ac-dc, θερμικός μετατροπέας, ac τάση

Εισαγωγή

Η κατασκευή οργάνων εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μεγεθών υψηλής ακρίβειας σε μια πληθώρα εφαρμογών (ηλεκτρονική μηχανική, αεροναυπηγική, σεισμολογία, αυτοκινητοβιομηχανία κ.α.), καθώς επίσης και οι απαιτήσεις τυποποίησης σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (ISO) έχει κινητοποιήσει τα εθνικά μετρολογικά ινστιτούτα προς την εξασφάλιση ιχνηλασιμότητας ως προς τα εναλλασσόμενα μεγέθη με όσο το δυνατό καλύτερη αβεβαιότητα.

Η ιχνηλασιμότητα στα εναλλασσόμενα μεγέθη σήμερα βασίζεται στην αντιστοίχιση του εναλλασσόμενου (ac) μεγέθους με το αντίστοιχο συνεχές (dc) μέγεθος, το οποίο να προκαλεί το ίδιο θερμικό αποτέλεσμα με το ac, έχει δηλαδή τιμή ίση με την ενεργό τιμή του μεγέθους ac. Αυτό αποτελεί τη βασική αρχή του κλάδου αυτού της μετρολογίας που ονομάζεται μεταφορά ac-dc.

Το πιο διαδεδομένο πρότυπο της μεταφοράς ac-dc είναι ο θερμικός μετατροπέας (thermal voltage converter). Αυτός στην απλούστερή του μορφή (σχήμα 1) αποτελείται από μία νηματοειδή ηλεκτρική αντίσταση με την οποία βρίσκεται σε θερμική επαφή ένα θερμοστοιχείο και το όλο σύστημα διατηρείται μέσα σε κενό. Με την εφαρμογή μιας τάσης ac στα άκρα της αντίστασης, αυτή θερμαίνεται και η θερμοκρασία της μετράται με το θερμοστοιχείο, του οποίου η έξοδος (της τάξης των mV) είναι ανάλογη προς αυτή. Αν στη συνέχεια εφαρμοστεί μια τάση dc, η οποία να προκαλεί την ίδια τάση εξόδου του θερμοστοιχείου, τότε η τιμή της dc τάσης θα είναι ίση με την ενεργό τιμή της ac τάσης που εφαρμόστηκε αρχικά. Επομένως, η υψηλή ακρίβεια με την οποία μετράται η dc τάση μεταφέρεται στην ac τάση μέσω της μεθόδου μεταφοράς ac-dc. Το πρότυπο θερμικού μετατροπέα που περιγράφηκε είναι της απλής μορφής του μετατροπέα μιας επαφής (single junction thermal converter).



Σχήμα 1. Θερμικός μετατροπέας μιας επαφής

Άλλο πρότυπο μεταφοράς ac-dc, βελτιωμένο ως προς την θερμική ομοιομορφία και την εξάρτηση από τη συχνότητα είναι ο τρισδιάστατος θερμικός μετατροπέας πολλαπλών επαφών (3d-multijunction thermal converter) [3], ο οποίος περιλαμβάνει 250 θερμοστοιχεία διατεταγμένα κατά μήκος της νηματοειδούς αντίστασης. Το κόστος κατασκευής της διάταξης αυτής ωστόσο είναι μεγάλο, καθώς επίσης και η ευαισθησία του σε πιθανές φθορές. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας λεπτών υμενίων και της φωτολιθογραφίας έγινε εφικτή η ανάπτυξη αντίστοιχης δισδιάστατης διάταξης πάνω σε υπόστρωμα Si με μεγάλη επαναληψιμότητα και δυνατότητα μαζικής παραγωγής. Το νέο αυτό πρότυπο, ο **επίπεδος θερμικός μετατροπέας πολλαπλών επαφών** (planar multijunction thermal converter) [4] έχει τις υψηλότερες προδιαγραφές από αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα: υψηλή τάση εξόδου (1V στο φορτίο λειτουργίας), μεγάλη θερμική ομοιομορφία και μικρό χρόνο αποκατάστασης της θερμικής ισορροπίας.

Ειδικότερα, για τη μέτρηση χαμηλών τάσεων ac της τάξης των mV, χρησιμοποιούνται τα **μικροποτενσιόμετρα** τα οποία αποτελούνται από ένα θερμικό μετατροπέα με τον οποίο είναι συνδεδεμένη σε σειρά μία αντίσταση εξόδου. Η παράμετρος που ρυθμίζεται σε αυτήν την περίπτωση είναι το ρεύμα (ac ή dc) που διαρρέει το θερμικό μετατροπέα και η πτώση τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα της αντίστασης συνθέτει την πρότυπη τάση χαμηλής τιμής.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος μεταφοράς ac-dc στη διακρίβωση τάσης 100mV και 10mV, η οποία εφαρμόστηκε στα πλαίσια της διεργαστηριακής σύγκρισης Key comparison Euromet E.M-K11 «AC-DC voltage transfer difference at low voltages». Στη διεργαστηριακή αυτή σύγκριση, η οποία ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2007 έλαβαν μέρος Μετρολογικά Ινστιτούτα από 22 χώρες, με το Σουηδικό Ινστιτούτο (Swedish National Testing and Research Institute) ως πιλοτικό και το Γερμανικό (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, ή PTB), Ολλανδικό (Netherlands Meetinstituut) ως υποστηρικτικά. Σκοπός της σύγκρισης ήταν η διασφάλιση της ικανότητας μέτρησης ή παραγωγής χαμηλών τάσεων με μικρή αβεβαιότητα: 10ppm στα 100mV και συχνότητα 1kHz.

Διαφορά Ac-dc

Η διαφορά ac-dc ενός προτύπου αναφοράς ορίζεται ως:

$$\delta = \frac{U_{AC} - U_{DC}}{U_{DC}} \Big|_{out^{ac} - out^{dc}} \quad (1), \text{ όπου}$$

U_{AC} είναι η rms τιμή της ac τάσης εισόδου που δέχεται το πρότυπο

U_{DC} είναι η dc τάση εισόδου που πρέπει να εφαρμόσουμε στο πρότυπο, ώστε να δώσει την ίδια τάση εξόδου, όπως και στην U_{AC} .

Η σχέση απόκρισης της τάση εξόδου ως προς την τάση εισόδου ενός προτύπου μεταφοράς ac-dc είναι γνωστή. Για ένα θερμικό μετατροπέα για παράδειγμα, είναι τετραγωνική: η τάση που αναπτύσσει το θερμοστοιχείο είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, η οποία είναι ανάλογη της θερμότητας Joule που καταναλώνεται στην αντίσταση εισόδου, που με τη σειρά της είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης εισόδου. Στη γενική περίπτωση είναι:

$$V \propto U^k \quad (2),$$

όπου V είναι η τάση εξόδου και U η τάση εισόδου, ενώ ο εκθέτης k , περίπου ίσος με 2 για το θερμικό μετατροπέα, μπορεί επίσης να μετρηθεί με ακρίβεια. Εισάγοντας την προηγούμενη σχέση στον ορισμό (1), είναι δυνατό να εκφράσουμε τη διαφορά ac-dc εξολοκλήρου από τις τάσεις εξόδου του.

Στην πράξη, για τη διακρίβωση ενός μετατροπέα ac-dc (X), χρησιμοποιούμε έναν πρότυπο μετατροπέα (S) του οποίου την τιμή δ_S της διαφοράς ac-dc γνωρίζουμε εκ των προτέρων. Τα δύο πρότυπα συνδέονται παράλληλα με την πηγή τάσης, εφαρμόζεται αρχικά τάση ac και καταγράφονται οι δύο τάσεις εξόδου. Στη συνέχεια εφαρμόζεται τάση dc και αυτή ρυθμίζεται με μικρές αλλαγές ώστε τελικά η τάση εξόδου του προτύπου αναφοράς να είναι ίδια όπως ήταν στην εφαρμογή της τάσης ac. Όταν επιτευχθεί αυτή η συνθήκη (ρύθμιση) τότε αποδεικνύεται ότι η διαφορά μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών δ_X, δ_S μπορεί να εκφραστεί ως

$$\delta_X - \delta_S = \frac{V_{DC}^X - V_{AC}^X}{k^X V_{DC}^X} - \frac{V_{DC}^S - V_{AC}^S}{k^S V_{DC}^S} \quad (3) \quad , \text{ όπου}$$

V_{DC}^S, V_{AC}^S είναι οι τάσεις εξόδου του προτύπου αναφοράς στην εφαρμογή dc και ac,

V_{DC}^X, V_{AC}^X είναι οι αντίστοιχες έξοδοι του προς μέτρηση προτύπου και

k^S, k^X είναι οι σταθερές της χαρακτηριστικής σχέσης απόκρισης (2) των δύο μετατροπέων.

Στην κατάσταση λοιπόν όπου η συνθήκη ρύθμισης που αναφέρθηκε πιο πάνω ισχύει, υπολογίζεται από τις τάσεις εξόδου η σχετική διαφορά (3). Ακολουθώντας, εφόσον η χαρακτηριστική τιμή της δ_S είναι γνωστή από το πιστοποιητικό του, η άγνωστη δ_X είναι

$$\delta_X = \delta_S + \frac{V_{DC}^X - V_{AC}^X}{k^X V_{DC}^X} - \frac{V_{DC}^S - V_{AC}^S}{k^S V_{DC}^S} \quad (4).$$

Ας σημειωθεί ότι για πιστότερη απεικόνιση της εναλλασσόμενης τάσης από τη συνεχή, παρεμβάλλεται ένα βήμα με αντεστραμμένη τη φορά της τάσης εισόδου dc και υπολογίζεται η μέση τιμή των τάσεων απόκρισης του θερμικού μετατροπέα στις dc^+ και dc^- .

Πειραματική διάταξη

Το πρότυπο μεταφοράς που διακριβώθηκε στη διεργαστηριακή αυτή σύγκριση ήταν το θερμικό πρότυπο μεταφοράς ac-dc Fluke 792A. Το πρότυπο αυτό διαθέτει 8 κλίμακες εισόδου από τις οποίες διακριβώθηκαν αυτές της χαμηλότερης τιμής, δηλαδή των 22mV και 220mV. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι η μετατροπή ac-dc που πραγματοποιείται εσωτερικά γίνεται με τη βοήθεια τρανζίστορ (αισθητήρας RMS) και είναι γραμμική, ενώ δίνει τάση εξόδου 2V στη μέγιστη είσοδο κάθε κλίμακας. Οι τιμές στις οποίες πραγματοποιήθηκε η διακρίβωση ήταν

Κλίμακα Fluke 792A 220mV:	100mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
Κλίμακα Fluke 792A 22mV:	10mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz

και ήταν κοινές για όλες τις συμμετέχουσες χώρες.

Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στο μισό περίπου της ονομαστικής τάσης εισόδου, οπότε η τάση εξόδου του προτύπου Fluke 792A ήταν και στις δύο περιπτώσεις της τάξης του 1V.

Στη διάρκεια των μετρήσεων οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας ήταν αυστηρά ελεγχόμενες και καταγράφηκαν ως εξής:

	Ελάχιστη	Μέγιστη
Θερμοκρασία (°C)	22,4	23,2
Υγρασία (%)	36	59

Για τη διακρίβωση των 100mV του Fluke 792A χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο αναφοράς ένας επίπεδος θερμικός μετατροπέας πολλών επαφών (planar multijunction thermal converter, ή PMJTC), ο οποίος κατασκευάστηκε στο Γερμανικό Εθνικό Μετρολογικό Ινστιτούτο PTB με αισθητήρα που παρασκευάστηκε στο κέντρο Τεχνολογίας Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V, Jena στη Γερμανία. Τα χαρακτηριστικά του PMJTC είναι:

PMJTC	
Αντίσταση	90 Ω
Υλικό αντίστασης	NiCrSi
Αριθμός θερμοστοιχείων	100
Ομαστική τάση εισόδου	1 V
Τάση εξόδου (στην ονομαστική είσοδο)	100 mV
Σφάλμα εξάρτησης από την αντιστροφή DC	1ppm

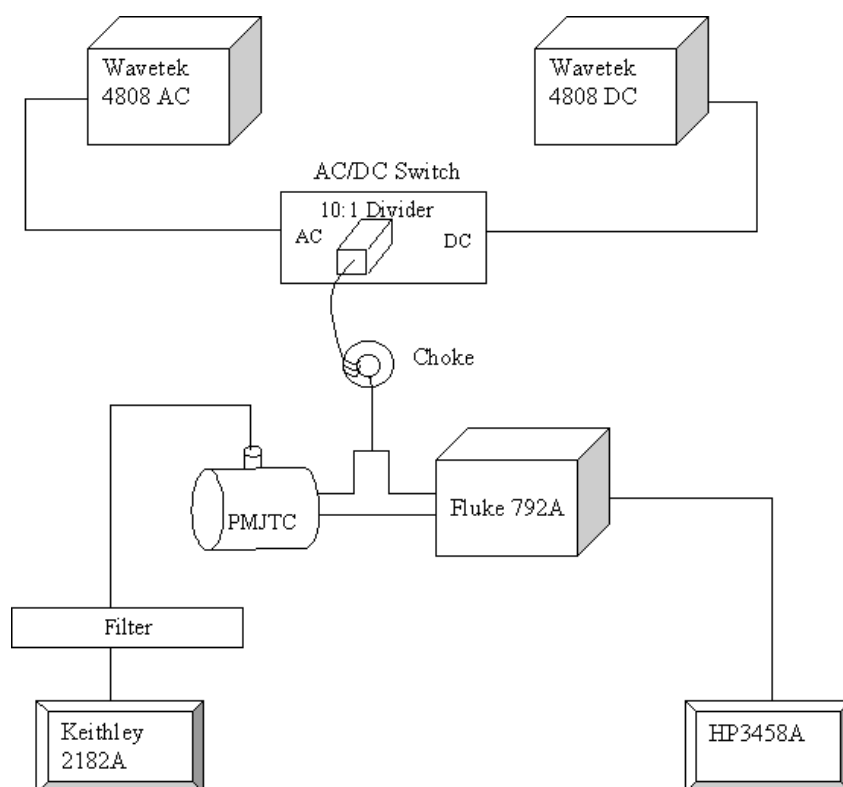
Η σχέση της τάσης εισόδου με την τάση εξόδου του PMJTC είναι τετραγωνική, βάσει της αρχής λειτουργίας που αναφέρθηκε νωρίτερα, επομένως στην είσοδο των 100mV, που αποτελεί το 1/10 της ονομαστικής τιμής εισόδου παράγεται έξοδος 1mV, το 1/100 της μέγιστης εξόδου.

Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των 100mV παρουσιάζεται στο σχήμα 2.

Ως πηγές dc και ac τάσης χρησιμοποιούνται δύο πρότυποι διακριβωτές του τύπου Wavetek 4808. Η τάση dc και ac διοχετεύεται εναλλάξ μέσω διακόπτη ac/dc, ο οποίος κατασκευάστηκε από τον Δρ. M.Kampik, Πανεπιστήμιο Gliwice, Πολωνία, ειδικά για μετρήσεις μεταφοράς ac-dc και έχει νεκρό χρόνο 5msec. Η έξοδος του Fluke 792A, της τάξης του 1V, μετράται με πρότυπο πολύμετρο HP3458A 8,5

ψηφίων, ενώ η έξοδος του PMJTC, της τάξης του 1mV μετράται με πρότυπο νανοβολτόμετρο τύπου Keithley 182A, αφού διέλθει από ένα φίλτρο που εμποδίζει τυχόν θόρυβο από την τροφοδοσία του δικτύου. Μεγάλης σημασίας για τα τέσσερα όργανα παροχής/ μέτρησης τάσης είναι η γραμμικότητά τους στην περιοχή των τιμών όπου χρησιμοποιήθηκαν, καθώς επίσης και η σταθερότητα της πηγής ac στη συχνότητα.

Ειδικά για τη μέτρηση των 100mV, επειδή η αντίσταση εξόδου της πηγής Wavetek 4808 στην κλίμακα των 100mV είναι μικρή (30Ω), χρησιμοποιείται αντί αυτής, η κλίμακα του 1V στην ονομαστική τιμή της και παρεμβάλλεται διαιρέτης τάσης 10:1.



Σχήμα 2 Πειραματική διάταξη μέτρησης 100mV

Η τάση μετά τη διαιρεσή της διατρέχει μερικούς έλικες γύρω από ένα πηνίο σιδήρου (choke), ώστε να παρεμποδίζονται τυχόν ανακλώμενα σήματα, ειδικά στις υψηλές συχνότητες και διοχετεύεται παράλληλα στα δύο πρότυπα, μέσω ενός συνδέσμου τύπου «T». Να σημειωθεί ότι όλα τα δυναμικά guard του κυκλώματος έχουν οδηγηθεί σε ένα κοινό σημείο γείωσης, ενώ κατά προτροπή των διοργανωτών της διεργαστηριακής σύγκρισης, ο αρνητικός ακροδέκτης (LO) των τάσεων εξόδου συνδέεται επίσης με την κοινή αυτή γείωση. Έτσι υπάρχει κοινή αναφορά για όλα τα εργαστήρια που λαμβάνουν μέρος στη σύγκριση.

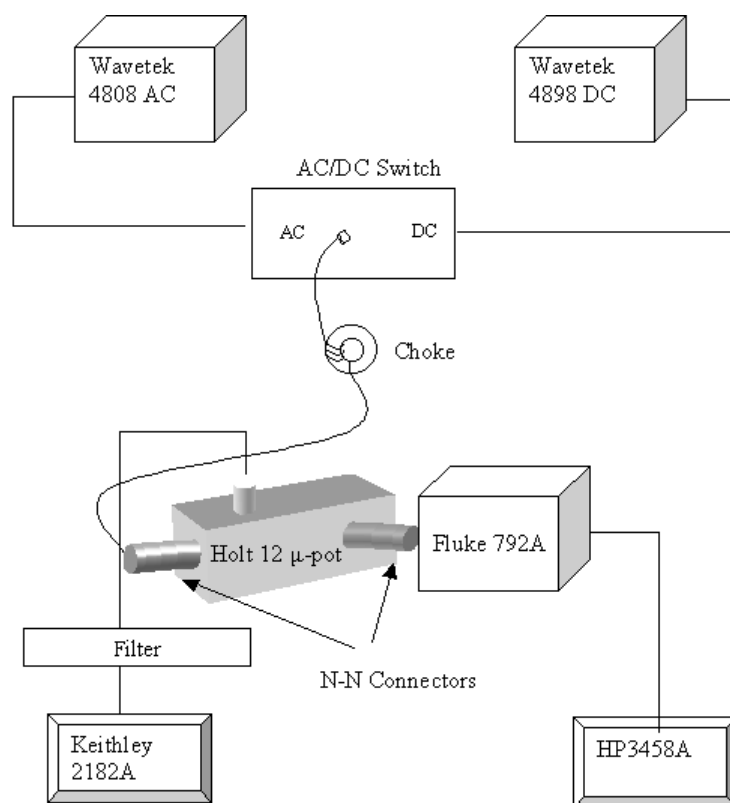
Ως επίπεδο αναφοράς της μέτρησης ορίζεται το κέντρο του συνδετήρα «T», με ακροδέκτες τύπου N.

Για τη διακρίβωση των 10mV του Fluke 792A χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο αναφοράς ένα μικροποτενσιόμετρο του εμπορικού τύπου Holt 12, με χαρακτηριστικά:

Holt 12	
Αντίσταση εισόδου	2 kΩ
Αριθμός θερμοστοιχείων	1
Ονομαστική τάση εισόδου	10 V
Τάσεις εξόδου (στην ονομαστική είσοδο)	2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 mV
Σφάλμα εξάρτησης από την αντιστροφή DC	50 ppm

Το πρότυπο αυτό δέχεται μέγιστη τάση εισόδου 10V και διαθέτει 7 ξεχωριστές εξόδους, από τις οποίες χρησιμοποιήθηκε η έξοδος των 10 mV. Η τάση του θερμοστοιχείου στην ονομαστική είσοδο είναι 7mV.

Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση των 10mV παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 Πειραματική διάταξη μέτρησης 10mV

Στη διάταξη αυτή η τάση εισόδου προερχόμενη από τις πηγές Wavetek 4808 οδηγείται μέσω του διακόπτη AC/DC στην είσοδο του μικροποτενσιόμετρου (μ-pot) και είναι 10V. Η έξοδος 10mV του μ-pot συνδέεται στην είσοδο του Fluke 792A. Για τη σύνδεση των ακροδεκτών μεταξύ τους, στις δύο αυτές επαφές απαιτείται η παρεμβολή συνδέσμων τύπου N-N. Η έξοδος του Fluke 792A, της τάξης του 1V, μετράται όπως και στην πειραματική διάταξη των 100mV με πρότυπο πολύμετρο

HP3458A και η έξοδος θερμοστοιχείου του μ-rot, που είναι της τάξης των 7mV μετράται πάλι με νανοβολτόμετρο Keithley 182A. Ως επίπεδο αναφοράς της μέτρησης ορίζεται το κέντρο του συνδέσμου τύπου N-N.

Οι δύο πειραματικές διατάξεις των 100mV και 10mV ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω ενός προγράμματος που έχει αναπτυχθεί σε λογισμικό Labview. Με το πρόγραμμα αυτό καθορίζονται η τάση των πηγών, η εναλλαγή του διακόπτη από ac σε dc και αντίστροφα, η λήψη και καταγραφή των σημάτων εξόδου από τα δύο βολτόμετρα, το αριθμητικό κριτήριο για την επίτευξη της συνθήκης ρύθμισης και επίσης εκτελούνται όλοι οι απαιτούμενοι αριθμητικοί υπολογισμοί.

Μετρητική διαδικασία

Όλα τα όργανα, πηγές και βολτόμετρα προθερμαίνονται για περισσότερο από 2 ώρες, ενώ οι συνδέσεις μεταξύ τους και με τα πρότυπα πραγματοποιούνται τουλάχιστο 15 λεπτά πριν την έναρξη της μέτρησης ώστε να επιτυγχάνεται θερμική ισορροπία. Η διαδικασία της μέτρησης είναι ίδια για τις δύο διατάξεις.

Στο πρόγραμμα Labview τίθενται οι παράμετροι των σημάτων εισόδου, δηλαδή οι τιμές τάσης dc, ac και η συχνότητα και όλες οι παράμετροι που αφορούν τη μέτρηση των σημάτων εξόδου, όπως οι κλίμακες των βολτομέτρων και ο αριθμός των σημείων που θα λαμβάνονται για κάθε μία μέτρηση. Επίσης ορίζεται συγκεκριμένη χρονοκαθυστέρηση που θα μεσολαβήσει από την εφαρμογή της τάσης εισόδου έως τη μέτρηση της τάσης εξόδου ώστε να επιτευχθεί θερμική ισορροπία.

Η τάση εισόδου εφαρμόζεται σε κύκλους, καθένας από τους οποίους έχει την αλληλουχία: ac, dc⁺, ac, dc⁻, ac, όπου ένα επιπλέον βήμα ac έχει παρεμβληθεί ανάμεσα στην εφαρμογή των τάσεων dc⁺ και dc⁻ για να αποφευχθεί θερμική αποσταθεροποίηση των θερμικών μετατροπέων κατά το νεκρό χρόνο της αλλαγής από dc⁺ σε dc⁻. Σε κάθε βήμα, την εφαρμογή της τάσης εισόδου ακολουθεί χρονοκαθυστέρηση 60sec και στη συνέχεια λαμβάνονται μετρήσεις των τάσεων εξόδου των δύο προτύπων. Στο τέλος κάθε κύκλου υπολογίζεται η σχετική διαφορά

$$\frac{V_{DC}^S - V_{AC}^S}{k^S V_{DC}^S} \quad (5), \text{ όπου}$$

V_{DC}^S είναι η μέση τιμή των βημάτων dc⁺, dc⁻ και V_{AC}^S η μέση τιμή των τριών βημάτων ac. Αν η διαφορά αυτή είναι μεγάλη, η τάση εισόδου dc διορθώνεται και ο επόμενος κύκλος εκτελείται με τη νέα τιμή. Όταν επιτευχθεί η συνθήκη ρύθμισης του προγράμματος (στην πράξη, αυτή ήταν η σχετική διαφορά (5) να είναι μικρότερη από 10ppm, δηλαδή $10 \cdot 10^{-6}$), τότε εκτελούνται 12 τελευταίοι κύκλοι, σε καθέναν από τους οποίους υπολογίζεται η διαφορά (3) μεταξύ των χαρακτηριστικών δ_X , δ_S . Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή των 12 κύκλων, τίθεται η γνωστή τιμή δ_S του προτύπου αναφοράς και υπολογίζεται από την (4) η ζητούμενη διαφορά ac-dc του προς μέτρηση προτύπου Fluke 792A. Να σημειωθεί ότι στη σχέση (4) ο συντελεστής k^X είναι 1 (Fluke 792A: γραμμικό), ενώ ο συντελεστής k^S είναι 2 (PMJTC και μ-rot: τετραγωνικά).

Αποτελέσματα Μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα 100mV και στα 10mV στις συχνότητες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Για κάθε συχνότητα οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν σε διαφορετικές ημερομηνίες και τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Κάθε τιμή που εμφανίζεται είναι το αποτέλεσμα μιας ολοκληρωμένης

μέτρησης 12 κύκλων όπως περιγράφηκε πιο πάνω, στην οποία έχει προστεθεί η αντίστοιχη τιμή του προτύπου αναφοράς.

Κλίμακα 220mV 100mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)
	3	-10.5	21.1	22.4
	8.3	-2.7	17.9	24.7
	0.7	-1.6	17.2	20.7
	2.8	-5.8	10.4	19.6
	11.9	-0.9	14.9	23.2
	7.5	-11.8	9.5	10.6
	12.2	-10.8	19.8	26.7
	4.9	-0.7	12.4	
	12.6		22.3	
	2.5			

Κλίμακα 22mV 10mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)
	17.1	-13.9	34.2	15.1
	18.1	-10.9	26.4	26.8
	17	-10.6	28.4	37.2
	13.7	-6.6	21.4	83.6
	14.3	-12.1	24.7	21.7
	3.7	-8.4	25.7	33.0
	9.1	-9.9	26.5	
	7.7	-9.1		
	14.3	-12.4		
	17.3			

Οι τιμές δ_S των προτύπων αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του $\delta_{Fluke\ 792A}$ ήταν (δίνονται και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες):

PMJTC	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	δ_{PMJTC} (ppm)	δ_{PMJTC} (ppm)	δ_{PMJTC} (ppm)	δ_{PMJTC} (ppm)
	0.03	0.03	3.6	36.3
	u_{PMJTC} (ppm)	u_{PMJTC} (ppm)	u_{PMJTC} (ppm)	u_{PMJTC} (ppm)
	3.5	3.5	4.5	10.0

Holt 12	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	$\delta_{Holt\ 12}$ (ppm)	$\delta_{Holt\ 12}$ (ppm)	$\delta_{Holt\ 12}$ (ppm)	$\delta_{Holt\ 12}$ (ppm)
	-20	3	122	1053
	$u_{Holt\ 12}$ (ppm)	$u_{Holt\ 12}$ (ppm)	$u_{Holt\ 12}$ (ppm)	$u_{Holt\ 12}$ (ppm)
	43	40	43	80

Η διακρίβωση του μετατροπέα PMJTC πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο και προηγήθηκε της έναρξης της διεργασιολογικής σύγκρισης. Η μέθοδος ήταν παρόμοια με αυτή της μέτρησης των 100mV και ως πρότυπο χρησιμοποιήθηκε θερμικός μετατροπέας μίας επαφής του εμπορικού τύπου Holt 11, με πιστοποιητικό διακρίβωσης από το Γερμανικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας PTB.

Το μικροποτενσιόμετρο Holt 12 διακριβώθηκε στο Γερμανικό Ινστιτούτο Μετρολογίας PTB και οι τιμές $\delta_{Holt\ 12}$ προήλθαν από το συνοδευόμενο πιστοποιητικό του.

Από τα αποτελέσματα $\delta_{Fluke\ 792A}$ του παραπάνω πίνακα προκύπτει η μέση τιμή της χαρακτηριστικής διαφοράς ac-dc του Fluke 792A σε κάθε τάση και συχνότητα. Ωστόσο, από αυτή, πρέπει να αφαιρεθούν τυχόν οι διορθώσεις που συνίστανται σε διαφορές ac-dc οι οποίες δεν προέρχονταν από το Fluke 792A, αλλά από άλλους παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Επιφόρτιση του μικροποτενσιόμετρου από την πεπερασμένη αντίσταση εισόδου του Fluke 792A (μόνο στην περίπτωση της μέτρησης 10mV)
- Σύνδεσμοι που παρεμβάλλονται στην είσοδο των προτύπων: ο σύνδεσμος τύπου «T» στην περίπτωση των 100mV και ο μετατροπέας N-N στην περίπτωση των 10mV.
- Απόκλιση της μέσης θερμοκρασίας περισσότερο από 1°C από την τιμή 23°C, στην οποία οφείλουν να αναφέρονται τα αποτελέσματα σύμφωνα με το πρωτόκολλο της διεργαστηριακής σύγκρισης.

Η μέση θερμοκρασία δωματίου σε όλες τις μετρήσεις όπως αναφέρθηκε πιο πάνω ήταν μέσα στα απαιτούμενα όρια, ενώ η επίδραση των συνδέσμων είναι αμελητέα. Ο παράγοντας που πρέπει να συνυπολογιστεί είναι η επιφόρτιση του μικροποτενσιόμετρου από την πεπερασμένη αντίσταση εισόδου του Fluke 792A, η οποία έχει ως αποτέλεσμα η τάση εισόδου στο Fluke 792A να είναι στην πραγματικότητα ελαττωμένη. Αυτό έχει σα συνέπεια η διαφορά ac-dc που μετράται πειραματικά για το Fluke792A να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι αν η αντίσταση και η χωρητικότητα εισόδου του Fluke 792A είναι R_i , c_i αντίστοιχα, ενώ η αντίσταση εξόδου του μικροποτενσιόμετρου είναι R_0 , τότε η σχετιζόμενη με τα στοιχεία αυτά διαφορά ac-dc είναι

$$\delta_{Zi} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_0}{R_i}\right)^2 + \omega^2 c_i^2 R_0^2}} - 1 \quad (5)$$

και πρέπει να αφαιρεθεί από την πειραματικά υπολογισμένη μέση τιμή της $\delta_{Fluke\ 792A}$. Μετρήσαμε την εμπέδηση της εισόδου 22mV του Fluke792A με μετρητή LCR (μοντέλο HP4284A) και βρήκαμε $R_i=150k\Omega$ και $c_i=40pF$, οπότε η διόρθωση (5) υπολογίζεται ότι είναι $\delta_{Zi}=13ppm$ για τη συχνότητα 1MHz και ασήμαντη στις άλλες συχνότητες. Με την αφαίρεση του όρου αυτού, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η τελική χαρακτηριστική διαφορά ac-dc του προτύπου Fluke 792A.

Αβεβαιότητα μετρήσεων

Ο γενικός τύπος ο οποίος εκφράζει τη διαφορά ac-dc του Fluke 792A, και συμπεριλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διορθώσεις μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\delta_{Fluke792A} = \delta_s + \delta - \delta_{Zi} - \delta_c - \delta_{\theta_{ερμ}} \quad (6), \text{ όπου}$$

$$\delta = \frac{V_{DC}^X - V_{AC}^X}{V_{DC}^X} - \frac{V_{DC}^S - V_{AC}^S}{2V_{DC}^S} \text{ είναι το πειραματικό αποτέλεσμα της διαφοράς (3) μεταξύ}$$

των δύο προτύπων, όπου έχουν τεθεί οι τιμές των συντελεστών k^X και k^S ,

δ_{Zi} είναι η διόρθωση εξαιτίας της αντίστασης εισόδου του Fluke792A που υπολογίστηκε από την (5) και

δ_c , $\delta_{\theta_{ερμ}}$ είναι οι διορθώσεις λόγω των συνδέσμων και της απόκλισης της θερμοκρασίας, οι οποίες θεωρήθηκαν μηδενικές.

Η αβεβαιότητα που συνοδεύει το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται από τον τύπο (6) βάση του «ISO Guide to the expression of Uncertainty in Measurement» (GUM) και είναι:

$$u_{tot} = \sqrt{u_{\delta_s}^2 + u_{\delta}^2 + u_{\delta_{Zi}}^2 + u_{\delta_c}^2 + u_{\delta_{\theta_{ερμ}}}^2} \quad (7), \text{ όπου}$$

1. u_{δ_s} είναι η αβεβαιότητα του προτύπου αναφοράς, η οποία δίνεται στο πιστοποιητικό του
2. u_{δ} είναι η αβεβαιότητα του δ που προέρχεται από τη μέτρηση των τάσεων εξόδου και περιλαμβάνει την τυπική απόκλιση των μετρήσεων και τις αβεβαιότητες των βολτομέτρων
3. $u_{\delta_{Zi}}$ είναι η αβεβαιότητα μέτρησης της αντίστασης εισόδου του Fluke 792A
4. u_{δ_c} είναι η αβεβαιότητα εκτίμησης της διαφοράς δ_c των συνδέσμων και
5. $u_{\delta_{\theta_{ερμ}}}$ η αβεβαιότητα λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας η οποία υπολογίζεται βάση του θερμοκρασιακού συντελεστή του Fluke 792A που είναι της τάξης του 1ppm/°C.

Τα τελικά αποτελέσματα της διαφοράς ac-dc του Fluke 792A με τη διόρθωση δ_{Zi} και η αντίστοιχη διευρυμένη αβεβαιότητα (για συντελεστή k=2) είναι:

Fluke 792A Κλίμακα 220mV 100mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)
Μέση τιμή	7	-5	16	23
Διευρυμένη αβεβαιότητα	9	9	11	21
Fluke 792A Κλίμακα 22mV 10mV	1kHz	20kHz	100kHz	1MHz
	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)	$\delta_{Fluke\ 792A}$ (ppm)
Μέση τιμή	13	-10	27	23
Διευρυμένη αβεβαιότητα	86	81	86	160

Παρατηρούμε ότι η αβεβαιότητα αυξάνει με τη συχνότητα και είναι δραματικά μεγάλη στη συχνότητα των 10MHz. Ωστόσο, στη χαμηλή συχνότητα του 1kHz και στην τάση των 100mV είναι μικρότερη από 10ppm και πληρεί το στόχο της διεργαστηριακής σύγκρισης.

Συμπεράσματα

Για τη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας στη χαμηλή τάση (mV) του εργαστηρίου των χαμηλών συχνοτήτων μετρήθηκε η διαφορά ac-dc του πρότυπου θερμικού μετατροπέα Fluke 792A στο πλαίσιο της διεργαστηριακής σύγκρισης Key comparison Euromet E.M-K11 «AC-DC voltage transfer difference at low voltages». Χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα αναφοράς του εργαστηρίου και εφαρμόστηκε πλήρως

αυτοματοποιημένο μετρητικό σύστημα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κρίνονται ικανοποιητικά, καθώς επιτυγχάνεται ο στόχος των 10ppm για την αβεβαιότητα της τάσης των 100mV στη συχνότητα του 1kHz.

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον Αργύρη Χατζόπουλο, συνεργάτη-μελετητή του εργαστηρίου υψηλών συχνοτήτων της Διεύθυνσης Ηλεκτρικών μεγεθών του Ινστιτούτου μας, για τη δημιουργία του προγράμματος και την υποστήριξη αυτού σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων

Αναφορές

- [1] M. Klonz, "AC-DC transfer difference of the PTB-multijunction thermal converter in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 36, pp. 320-329, 1987
- [2] B. D. Inglis, "Standards for AC-DC Transfer," *Metrologia*, vol. 29, number 2, pp. 191-199, May 1992.
- [3] F.J. Wilkins, "Theoretical analysis of the ac-dc difference of the NPL multijunction thermal converter in the frequency range of dc-100 kHz," *IEEE trans. Instrum. Meas.*, vol. 21, pp. 334-340, 1972.
- [4] M. Klonz, T. Weimann, "Accurate thin film multijunction thermal converter on a Silicon chip" *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, pp. 335-337, 1989.