

ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Χ. Κώνστας, Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης και Β. Μπελεσιώτης
Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων – Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.

«Δημόκριτος»

15310 Αγ. Παρασκευή Αττικής
e-mail: ckonstas@ipta.demokritos.gr

Περίληψη

Η χρήση αισθητηρίων θερμοαντίστασης τύπου Pt100 αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους μέτρησης της θερμοκρασίας τόσο σε εργαστηριακό, όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, κυρίως λόγω της γραμμικής συμπεριφοράς και του εύρους λειτουργίας των αισθητηρίων αλλά και του πλήθους των κατασκευαστικών εκδοχών που προσφέρονται. Μία από τις συνήθεις πρακτικές διακρίβωσης των εν λόγω αισθητηρίων βασίζεται στην χρήση θερμοστατικού λουτρού και τη σύγκριση της ένδειξης του υπό διακρίβωση αισθητήρα με αυτήν ενός θερμομέτρου αναφοράς. Στην ποιότητα του αποτελέσματος της διακρίβωσης επιδρούν παράμετροι, όπως η χωρική και χρονική θερμοκρασιακή σταθερότητα του λουτρού, φαινόμενα αυτοθέρμανσης των υπό διακρίβωση αισθητηρίων, η μετρολογική ποιότητα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, ή ακόμη και η ίδια η διαδικασία. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτο στάδιο η βασιζόμενη στη σχετική βιβλιογραφία ανάλυση όλων εκείνων των παραμέτρων οι οποίες δύνανται να επιδράσουν στην ποιότητα του αποτελέσματος διακρίβωσης, ενώ σε δεύτερο στάδιο διερευνώνται πειραματικά οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν με απώτερο σκοπό την εκτίμηση της συνεισφοράς τους στο ισοζύγιο των αβεβαιοτήτων, δηλαδή στην ποιότητα του αποτελέσματος διακρίβωσης.

Λέξεις κλειδιά: Διακρίβωση, αβεβαιότητα, αισθητήρια θερμοκρασίας

Abstract

One of the most widespread temperature measurement methods in the laboratory and industrial practice is the one using type Pt100 temperature sensors. Its popularity could be mainly attributed to the linear behavior, as well as to the wide operating range of this type of sensors. The calibration of these sensors is usually performed by comparison, using a thermostatic bath and a reference sensor. Parameters such as the spatial and temporal temperature stability of the bath, self-heating effects of sensors, metrological quality of the equipment used or even the calibration process itself strongly affect the quality of the calibration results. The objective of this paper is to perform a detailed theoretical analysis, based on international literature, of all those parameters affecting the quality of the measurement, as well as an experimental investigation of the above mentioned parameters in order to assess the uncertainty of the final results.

Keywords: Calibration, uncertainty, temperature sensors

Χ. Κώνστας, Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης, ΕΗ-ΕΣ/ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014

1.Εισαγωγή

Η γνώση της αριθμητικής τιμής της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση ο έλεγχος της, αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για ένα μεγάλο εύρος διεργασιών στους τομείς της ιατρικής, της έρευνας και της βιομηχανίας. Μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους μέτρησης θερμοκρασίας, τόσο σε εργαστηριακό, όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, αποτελεί η χρήση αισθητηρίων θερμοαντίστασης κατασκευασμένης από Λευκόχρυσο, κυρίως λόγω της γραμμικής συμπεριφοράς και του εύρους λειτουργίας [1]. Στην ποιότητα του αποτελέσματος της διακρίβωσης επιδρούν παράμετροι, οι οποίες σχετίζονται με την κατασκευαστικές λεπτομέρειες του αισθητηρίου, την χρήση του, το περιβάλλον διακρίβωσης, την μετρολογική ποιότητα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού καθώς και με την ίδια την μέθοδο διακρίβωσης.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται αρχικά η καταγραφή και θεωρητική ανάλυση εκείνων των παραμέτρων, οι οποίες σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία δύνανται να επηρεάσουν την ποιότητα του αποτελέσματος της διακρίβωσης, και διερευνάται πειραματικά η ποσοτική συνεισφορά τους στο ισοζύγιο των αβεβαιοτήτων. Στη συνέχεια επιχειρείται, ως παράδειγμα εφαρμογής, η πειραματική διερεύνηση των πηγών σφάλματος. Για το σκοπό αυτό αξιοποιείται ο διακριβωμένος εξοπλισμός του διαπιστευμένου εργαστηρίου «Ηλιακών και άλλων ενεργειακών συστημάτων» του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», αποτελούμενος από αισθητήρια θερμοαντίστασης τύπου Pt₁₀₀, θερμοστατικό λουτρό, πολύμετρο υψηλών μετρολογικών επιδόσεων και αισθητήρες αναφοράς τύπου SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer).

Η μέθοδος διακρίβωσης που ακολουθείται συνίσταται στην σύγκριση της ένδειξης του υπό διακρίβωση θερμομέτρου με αυτήν ενός αισθητήρα αναφοράς (στην περίπτωση μας τύπου SPRT) και αποτελεί τη συνήθη πρακτική των εργαστηρίων στο θερμοκρασιακό εύρος 0 °C – 100 °C στο οποίο κινείται η παρούσα εργασία.

2. Παράμετροι αβεβαιότητας

2.1 Χωρική ανομοιογένεια λουτρού

Σε μια ιδεατή σύγκριση των ενδείξεων δύο θερμομέτρων η θερμοκρασία του μέσου στο οποίο διεξάγεται η σύγκριση είναι ομοιογενής και παραμένει αμετάβλητη στον χρόνο. Στην πραγματικότητα η θερμοκρασία εντός του θερμοστατικού λουτρού εμφανίζει διακυμάνσεις τόσο χωρικές όσο και χρονικές. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της χωρικής ανομοιογένειας συνίσταται στον προσδιορισμό της μέγιστης απόκλισης των θερμοκρασιών οι οποίες λαμβάνονται μέσω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων καθ' ύψος και πλάτος, εντός του λουτρού. Στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται μεταλλικό ισοθερμικό μπλοκ η διερεύνηση της χωρικής ανομοιογένειας περιορίζεται στον προσδιορισμό της επίδρασης της θέσης (οπής) στην οποία έχει τοποθετηθεί το κάθε θερμομέτρο, με την επίδραση της καθ' ύψος χωρικής ανομοιογένειας να εξαλείφεται καθότι όλα τα θερμομέτρα βρίσκονται εμβαπτισμένα στο ίδιο ακριβώς βάθος.

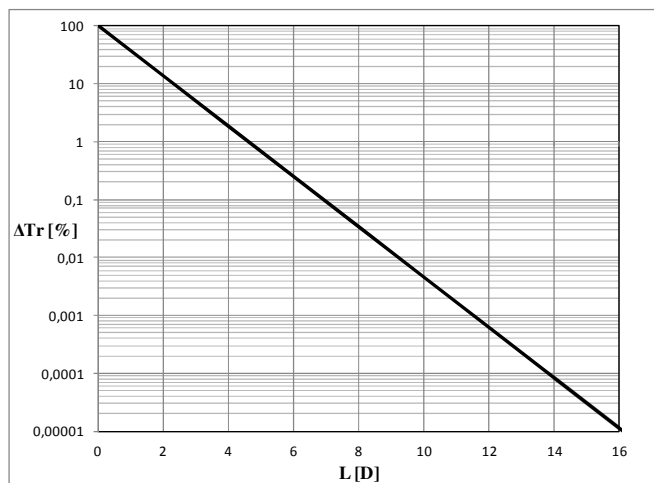
2.2 Βάθος εμβάπτισης

Κατά την προσπάθεια ελαχιστοποίησης της επίδρασης της θερμοκρασιακής ανομοιογένειας του λουτρού είτε με τη χρήση ισοθερμικού μπλοκ είτε με την εμβάπτιση των θερμομέτρων στο ίδιο βάθος, κάποιο από αυτά πιθανόν να μην εμβαπτίζεται πλήρως (συνήθως το θερμοόμετρο τύπου SPRT, λόγω του μήκους του). Η μερική εμβάπτιση ενός αισθητηρίου στο θερμοστατικό λουτρό προκαλεί, λόγω φαινομένων μετάδοσης θερμότητας δια μέσου του στελέχους του, ένα σφάλμα ΔT_{im} στην μέτρηση της θερμοκρασίας του λουτρού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο ποσοτικός προσδιορισμός του εν λόγω σφάλματος δύναται να πραγματοποιηθεί με την χρήση της σχέσης 1, η οποία λαμβάνει υπόψη την θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο περιβάλλον και το λουτρό, το βάθος εμβάπτισης L (mm), την ενεργό διάμετρο του αισθητήρα D_{eff} (mm) καθώς και την αδιάστατη παράμετρο K . Τόσο η ενεργός διάμετρος του αισθητήρα όσο και η παράμετρος K , εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες του αισθητήρα και από τις συνθήκες κατά τις οποίες λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας, γεγονός που καθιστά δυσχερή τον ακριβή προσδιορισμό τους. Συνήθως, για λόγους ευκολίας, η τιμή της ενεργού διαμέτρου ισούται με αυτήν της διαμέτρου του αισθητήρα και η παράμετρος K λαμβάνει την τιμή 1 [5].

$$\Delta T_{im} = (T_{amb} - T_{bath}) * K * \exp\left(\frac{-L}{D_{eff}}\right) \quad (1)$$

Η πρακτική χρήση της σχέσης 1 συνίσταται στον προσδιορισμό του ελαχίστου βάθους εμβάπτισης του αισθητήρα, συναρτήσει του επιθυμητού σχετικού σφάλματος της σχέσης 2 με χρήση λογαριθμικών διαγραμμάτων όπως αυτό του σχήματος 1.

$$\Delta Tr = \left| \frac{\Delta T_{im}}{T_{amb} - T_{bath}} \right| \quad (2)$$



Σχήμα 1: Σχετικό σφάλμα μέτρησης θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους εμβάπτισης του αισθητήρα

Μια προτεινόμενη στην βιβλιογραφία πειραματική μέθοδος προσδιορισμού της επίδρασης της μερικής εμβάπτισης ενός θερμομέτρου συνίσταται σε δυο διαδοχικές

μετρήσεις κάτω από τις ίδιες σταθερές συνθήκες. Στην πρώτη μέτρηση ο αισθητήρας βρίσκεται στο μέγιστο επιτρεπτό βάθος εμβάπτισης, ενώ στη δεύτερη ανυψώνεται κατά 10 εκατοστά. Είναι η διαφορά των δύο προαναφερόμενων μετρήσεων μικρότερη από το 10% του επιθυμητού επιπέδου αβεβαιότητας, η επίδραση της μερικής εμβάπτισης δύναται να αγνοηθεί, σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να εκτιμηθεί μια επιπλέον συνιστώσα αβεβαιότητας [4].

2.3 Ολίσθηση αισθητήρα

Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα μετρολογικά χαρακτηριστικά ενός θερμομέτρου, όπως αυτά προκύπτουν από την διακρίβωσή του δεν παραμένουν αμετάβλητα στον χρόνο έως ότου επαναδιακριβωθεί. Μηχανικές καταπονήσεις, δονήσεις, διείδυση υγρασίας, επιμόλυνση και οξειδωση προκαλούν παραμόρφωση και αλλοιώσεις στο στοιχείο Λευκόχρυσου του θερμομέτρου, προσθέτοντας καταυτόν τον τρόπο μια παράμετρο αβεβαιότητας, την λεγόμενη ολίσθηση του αισθητήρα. Μια ιδιαίτερη περίπτωση ολίσθησης αποτελεί η υστέρηση, η οποία σχετίζεται με τις ελαστικές παραμορφώσεις του στοιχείου Λευκόχρυσου λόγω θερμικής καταπόνησης του θερμομέτρου και εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί το θερμομέτρο. Οι συγκεκριμένες ελαστικές παραμορφώσεις εξαλείφονται μέσω της διαδικασίας ανόπτησης του θερμομέτρου. Για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας η οποία οφείλεται στην ολίσθηση του αισθητήρα αξιοποιείται το ιστορικό διακρίβώσεων του οργάνου και συγκεκριμένα η απόκλιση την οποία εμφανίζει στο τριπλό σημείο του νερού.

2.4 Αυτοθέρμανση Αισθητήρα

Για την μέτρηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης του θερμομέτρου είναι απαραίτητη η τροφοδότηση του με ηλεκτρικό ρεύμα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα από τον αισθητήρα. Το αισθητήριο «βλέπει» στην συγκεκριμένη περίπτωση μια θερμοκρασία κατά ΔT_{sh} υψηλότερη από την αληθή τιμή λόγω της αυτοθέρμανσής του, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας, και τον συντελεστή αυτοθέρμανσης K [K/mW]. Η τιμή που λαμβάνει ο εν λόγω συντελεστής εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες μέτρησης (είδος και ταχύτητα κίνησης του μετρούμενου μέσου), αλλά και από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητηρίου και συνήθως λαμβάνεται από πίνακες στην βιβλιογραφία ή προσδιορίζεται πειραματικά. Ο πειραματικός προσδιορισμός συνίσταται στην διενέργεια διαδοχικών μετρήσεων με διαφορετικές εντάσεις ρεύματος τροφοδοσίας και γραμμική προβολή για ρεύμα τροφοδοσίας ίσο με το μηδέν [1]. Για μέτρηση με ένα σύνηθες θερμομέτρο τύπου Pt₁₀₀, σε κινούμενο νερό, ο συντελεστής K λαμβάνει τιμές από 0,001 έως 0,1 K/mW , ενώ το αναμενόμενο σφάλμα μέτρησης ΔT_{sh} ανέρχεται σε 0,1 έως 10 mK [5].

2.5 Συνδεσμολογία Αισθητήρα

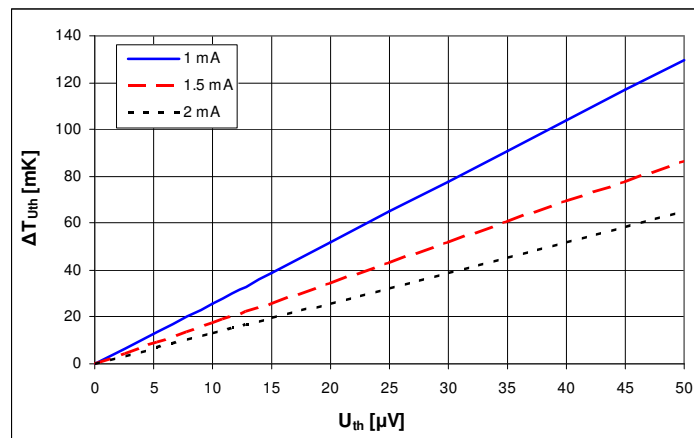
Στην περίπτωση κατά την οποία η τροφοδοσία και η ανάγνωση του σήματος του αισθητήρα πραγματοποιείται με το ίδιο ζεύγος καλωδίων (συνδεσμολογία δύο συρμάτων) στην τιμή της μετρούμενης ωμικής αντίστασης προστίθενται σε σειρά οι

Χ. Κώνστας, Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης, ΕΗ-ΕΣ/ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

ωμικές αντιστάσεις των καλωδίων, έχοντας ως αποτέλεσμα την ένδειξη μιας κατά ΔT_{RL} υψηλότερης θερμοκρασίας. Το σφάλμα ΔT_{RL} σε θερμοκρασία μέτρησης $20\text{ }^\circ\text{C}$ (για χάλκινες καλωδιώσεις συνολικού μήκους $2,5\text{m}$ και διαμέτρου $0,25\text{ mm}^2$) ανέρχεται στα $1,06\text{ K}$ και είναι άμεσα εξαρτημένο από την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση. Για μέση θερμοκρασία των καλωδιώσεων $70\text{ }^\circ\text{C}$ το σφάλμα ΔT_{RL} ανέρχεται σε $1,29\text{ K}$, αυξάνει δηλαδή κατά $0,23\text{ K}$ [4]. Το εν λόγω σφάλμα καθώς και η εξάρτησή του από την θερμοκρασία, εξαλείφεται πρακτικά χρησιμοποιώντας δύο ξεχωριστά ζεύγη αγωγών για την τροφοδοσία και την ανάγνωση του σήματος του αισθητήρα (συνδεσμολογία τεσσάρων συρμάτων).

2.6 Παρασιτική Θερμοηλεκτρική Τάση

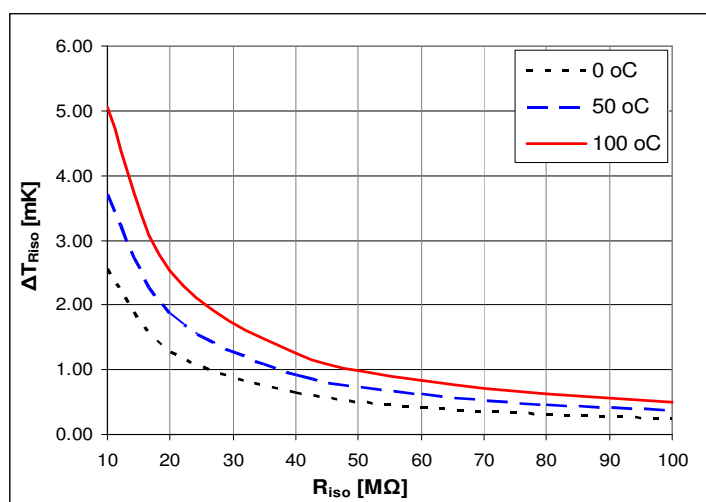
Μία επιπλέον, σχετική με τις καλωδιώσεις παράμετρος αβεβαιότητας, προκύπτει όταν το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ωμικής αντίστασης του αισθητηρίου αποτελείται από διαφορετικά, συνδεδεμένα μεταξύ τους υλικά (καλώδια, ακροδέκτες κτλ). Η εμφάνιση θερμοκρασιακής ανομοιογένειας κατά μήκος του εν λόγω ηλεκτρικού κυκλώματος προκαλεί την δημιουργία μιας παρασιτικής θερμοηλεκτρικής τάσης, η οποία προστίθεται ή αφαιρείται, ανάλογα με την πολικότητα του συνεχούς ρεύματος τροφοδοσίας, στην πτώση τάσης στα άκρα της μετρούμενης αντίστασης. Η τιμή της θερμοηλεκτρικής τάσης δύναται να προσδιοριστεί πειραματικά μετρώντας την τιμή της αντίστασης του αισθητήρα κάτω από τις ίδιες σταθερές συνθήκες και αντιστρέφοντας την πολικότητα του ρεύματος τροφοδοσίας. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι τιμές που λαμβάνει το σφάλμα $\Delta T_{V_{th}}$ συναρτήσει της θερμοηλεκτρικής τάσης V_{th} για διάφορες τιμές του συνεχούς ρεύματος τροφοδοσίας (υπολογισμός σε θερμοκρασία αισθητήρα $T_s=50\text{ }^\circ\text{C}$). Σύνηθες τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου φαινομένου είναι η χρήση ενός μόνο μετάλλου, ως επί τω πλείστον χαλκού, σε όλο το μήκος του ηλεκτρικού κυκλώματος, ενώ στην περίπτωση που η τροφοδοσία του αισθητήρα πραγματοποιείται με συνεχές ρεύμα, το σφάλμα αυτό παραμένει αμελητέο [1].



Σχήμα 2: Σφάλμα μέτρησης θερμοκρασίας συναρτήσει της παρασιτικής θερμοηλεκτρικής τάσης για διάφορες τιμές του ρεύματος τροφοδοσίας

2.7 Αντίσταση μόνωσης

Λόγω της πεπερασμένης τιμής που λαμβάνει η ηλεκτρική αντίσταση του μονωτικού υλικού πλήρωσης των αισθητηρίων (τάξη μεγέθους $M\Omega$), υφίσταται θεωρητικά η πιθανότητα διαρροής ηλεκτρικού ρεύματος προς το μονωτικό αυτό υλικό, πιθανότητα η οποία αυξάνεται με την εισροή υγρασίας στο εσωτερικό του αισθητηρίου. Σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται μια επιπλέον ηλεκτρική αντίσταση R_{iso} σε παράλληλη σύνδεση με αυτήν του αισθητήρα $R_{(T)}$, με αποτέλεσμα την μέτρηση μιας συνεχώς χαμηλότερης από την αληθή τιμή θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η αντίσταση R_{iso} θα πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από $70 M\Omega$ ώστε να ελαχιστοποιεί το μετρούμενο σφάλμα, το οποίο για την περίπτωση που η αντίσταση R_{iso} λάβει την τιμή των $10 M\Omega$ ανέρχεται στα $5mK$ για την θερμοκρασία μέτρησης $100\text{ }^{\circ}C$. Το σχήμα 3 παρουσιάζει τη μεταβολή του σφάλματος μέτρησης $\Delta T_{R_{iso}}$ συναρτήσει τιμών της αντίστασης αυτής. Στις οδηγίες του Γερμανικού φορέα διαπίστευσης DAKKS-DKD [4] αναφέρεται ότι η τιμή της αντίστασης R_{iso} θα πρέπει να μετράται από τα εργαστήρια διακρίβωσης τόσο κατά την αρχική εξέταση του θερμομέτρου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και στην μέγιστη θερμοκρασία διακρίβωσης.



Σχήμα 3: Σφάλμα μέτρησης $\Delta T_{R_{iso}}$ συναρτήσει της R_{iso} για διάφορες θερμοκρασίες του αισθητήρα

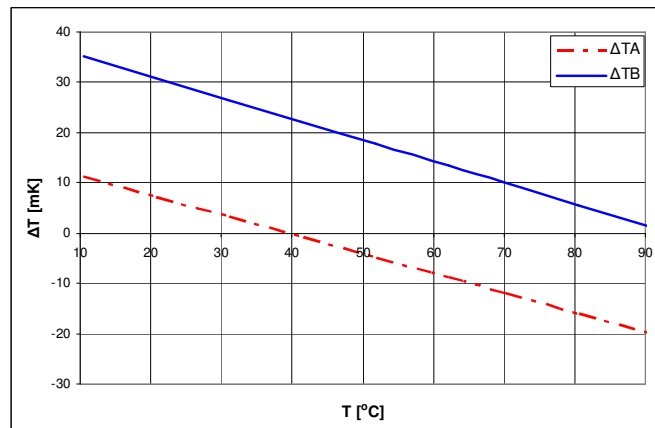
3. Πειραματική διερεύνηση πηγών αβεβαιότητας

3.1 Χωρική ανομοιογένεια

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της θέσης (οπής) στην οποία τοποθετείται το υπό διακρίβωση θερμοόμετρο στο τελικό αποτέλεσμα της διακρίβωσης. Για τον λόγο αυτό διενεργήθηκαν δύο διαδοχικές καμπάνιες διακρίβωσης σε δύο θερμοόμετρα A και B, τύπου Pt_{100} , διατηρώντας την ίδια ακριβώς συνδεσμολογία και με μόνη διαφορά την εναλλαγή οπών μεταξύ των θερμομέτρων. Σκοπός κάθε διακρίβωσης ήταν ο προσδιορισμός των συντελεστών της χαρακτηριστικής τριτοβάθμιας εξίσωσης έκαστου θερμομέτρου. Χρησιμοποιώντας

Χ. Κώνστας, Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης, ΕΗ-ΕΣ/ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

τους συντελεστές της πρώτης και της δεύτερης διακρίβωσης, υπολογίστηκε για κάθε θερμόμετρο η διαφορά στην ένδειξη της θερμοκρασίας για δεδομένες τιμές αντίστασης (θερμοκρασίες). Από τα αποτελέσματα της εν λόγω διερεύνησης, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 4, προκύπτει ότι η απόκλιση λόγω της θέσης του ισοθερμικού μπλοκ στην οποία τοποθετείται στο υπό διακρίβωση θερμόμετρο, είναι της τάξης των ± 15 mK. Η συνιστώσα αβεβαιότητας εκτιμάται για ορθογώνια κατανομή σε 8.7 mK και είναι ενδεχομένως υπερτιμημένη, δεδομένου ότι συμπεριλαμβάνει και την επαναληψιμότητα της διακρίβωσης.

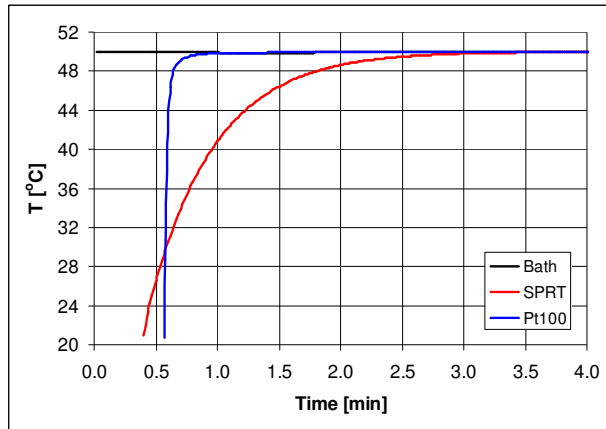


Σχήμα 4: Διαφορά στην ένδειξη της θερμοκρασίας η οποία οφείλεται στην αλλαγή οπής κατά τη διακρίβωση, για δύο διαφορετικά θερμόμετρα A και B.

3.2 Χρονική ανομοιογένεια

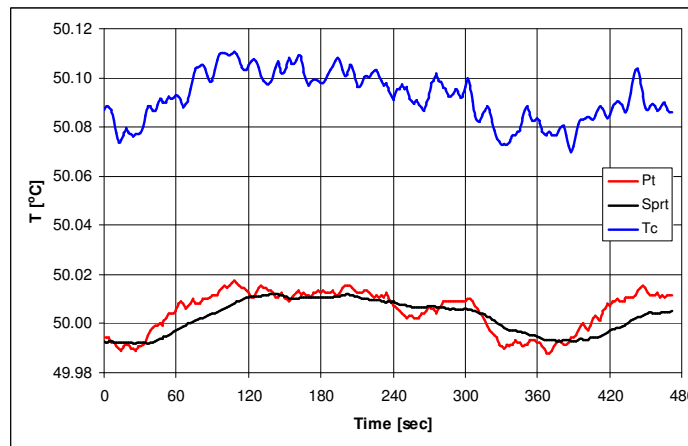
Παρόλο που η επίδραση της χρονικής αστάθειας της θερμοκρασίας του λουτρού συμπεριλαμβάνεται στην τύπου A (στατιστική) συνιστώσα αβεβαιότητας των μετρούμενων θερμοκρασιών, η διερεύνησή της αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της μετρολογικής ποιότητας του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, ειδικότερα σε συνάρτηση με τις σταθερές χρόνου των χρησιμοποιούμενων θερμομέτρων. Για το λόγο αυτό αρχικά προσδιορίστηκαν πειραματικά οι σταθερές χρόνου του θερμομέτρου αναφοράς (SPRT) και ενός τυπικού θερμομέτρου Pt₁₀₀ που χρησιμοποιεί το εργαστήριο. Οι σταθερές χρόνου εκτιμήθηκε, στη συγκεκριμένη περίπτωση, ότι ανέρχονται σε 31.1 sec και 1.7 sec για το SPRT και το Pt₁₀₀ αντίστοιχα.

Με δεδομένο ότι η απόκριση του θερμόμετρο αναφοράς διαφοροποιείται σημαντικά από αυτή του υπό διακρίβωση θερμομέτρου διερευνήθηκε και η χρονική σταθερότητα του λουτρού χρησιμοποιώντας ως ένδειξη για αυτήν ένα θερμοζεύγος τύπου T, το οποίο διακρίνεται για την γρήγορη απόκρισή του. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5, η διακύμανση της θερμοκρασίας του λουτρού είναι πολύ αργή, συγκρινόμενη με τις σταθερές χρόνου των θερμομέτρων, εμφανίζοντας μια διακύμανση της τάξεως των 12 mK, η οποία για ορθογώνια κατανομή αντιστοιχεί σε μία συνιστώσα αβεβαιότητας της τάξης των 7 mK.



Σχήμα 5: Καμπύλες απόκρισης θερμομέτρου SPRT και Pt₁₀₀.

Η συγκεκριμένη συνιστώσα αβεβαιότητας θα μπορούσε να απαλειφθεί στην περίπτωση κατά την οποία το χρονικό διάστημα της δειγματοληψίας υπερβαίνει κατά δύο με τρεις φορές τη σταθερά χρόνου του SPRT, το οποίο έχει και τη μεγαλύτερη σταθερά χρόνου.



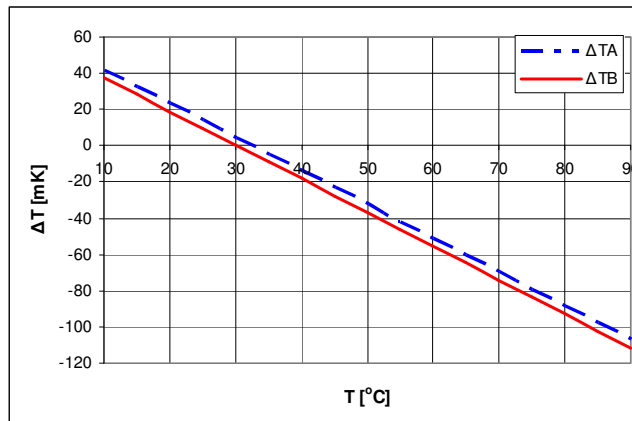
Σχήμα 6: Χρονική ανομοιογένεια λουτρού

3.3 Μερική εμβάπτιση αισθητήρα

Βασιζόμενοι σε προαναφερόμενη μεθοδολογία [4], διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της μερικής εμβάπτισης του αισθητήρα αναφοράς στην μέτρηση της θερμοκρασίας του λουτρού. Για να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή της θερμοκρασιακής ανομοιογένειας του λουτρού χρησιμοποιήθηκε ισοθερμικό μπλοκ καθώς και δύο θερμομέτρα Pt₁₀₀ τα οποία παρέμειναν πλήρως εμβαπτισμένα κατά τις δύο διαδοχικές, διαφοροποιημένου βάθους εμβάπτισης, μετρήσεις. Ως χαρακτηριστικό για την αξιολόγηση της επίδρασης μέγεθος επιλέχθηκε η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις ενδείξεις των αισθητήρων αναφοράς και των θερμομέτρων Pt₁₀₀. Από τη διερεύνηση προέκυψε ένα σφάλμα το οποίο οφείλεται στην μερική εμβάπτιση του

θερμομέτρου αναφοράς ΔT_{im} της τάξεως των 1.5 mK για θερμοκρασία λουτρού κοντά στο περιβάλλον (20 °C) και της τάξεως των 30 mK για την μέγιστη θερμοκρασία διακρίβωσης (90 °C).

Σε ένα δεύτερο στάδιο διερευνήθηκε η επίδραση της μερικής εμβάπτισης του θερμομέτρου αναφοράς στο τελικό αποτέλεσμα της διακρίβωσης. Για τον λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν δύο καμπάνιες διακρίβωσης σε δύο θερμομέτρα A και B τύπου Pt₁₀₀, με τον αισθητήρα αναφοράς να βρίσκεται στην πρώτη περίπτωση μερικώς εμβαπτισμένος, ενώ κατά την δεύτερη πλήρως εμβαπτισμένος. Κατά τη διάρκεια των δύο διακρίβώσεων τα θερμομέτρα A και B παρέμεναν πλήρως εμβαπτισμένα και συνεπώς οι χαρακτηριστικοί συντελεστές οι οποίοι προέκυψαν από κάθε διακρίβωση για ένα θερμομέτρο επηρεάστηκαν μόνο από το βάθος εμβάπτισης του αισθητήρα αναφοράς. Με χρήση των προαναφερόμενων συντελεστών και για δεδομένες τιμές της αντίστασης υπολογίστηκαν οι διαφορές στις ενδείξεις της θερμοκρασίας για κάθε θερμομέτρο και οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 7.

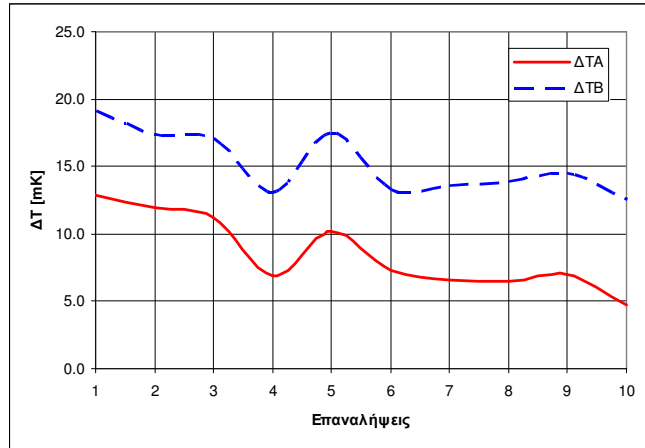


Σχήμα 7: Διαφορά στην ένδειξη της θερμοκρασίας για διαφορετικά μήκη εμβάπτισης του αισθητήρα αναφοράς κατά τη διακρίβωση και για δύο διαφορετικά θερμομέτρα A και B.

3.4 Υστέρηση αισθητήρα

Λόγω έλλειψης κυψέλης αναπαραγωγής του τριπλού σημείου του νερού, η διερεύνηση για την επίδραση της υστέρησης στην επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων της διακρίβωσης ακολουθήθηκε μια έμμεση διαδικασία. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια καμπάνια διακρίβωσης για δύο θερμομέτρα τύπου Pt₁₀₀, από την οποία προέκυψαν οι χαρακτηριστικοί συντελεστές τους. Την επόμενη ημέρα και χωρίς να αλλαχθεί η χωροθέτηση ή η συνδεσμολογία των θερμομέτρων κατεγράφησαν οι τιμές των αντιστάσεων τους στους 10 °C.

Με χρήση των χαρακτηριστικών συντελεστών της διακρίβωσης, υπολογίστηκε η πραγματική τιμή των ενδείξεών τους και συγκρίθηκε με την θερμοκρασία αναφοράς. Από τις αποκλίσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 8 εκτιμάται ότι η συνιστώσα αβεβαιότητας που οφείλεται στην επαναληψιμότητα λόγω υστέρησης $u_{(h)}$ δεν είναι μεγαλύτερη από 20 mK.



Σχήμα 8: Απόκλιση της θερμοκρασίας λόγω υστέρησης στους 10 °C, για δύο διαφορετικά θερμομέτρα A και B.

4. Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων

Η διαδικασία διακρίβωσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία έγκειται στην σύγκριση των ενδείξεων των υπό διακρίβωση θερμομέτρων με αυτές του αισθητήρα αναφοράς. Οι ενδείξεις των υπό διακρίβωση θερμομέτρων προκύπτουν από την μετατροπή της μετρούμενης ωμικής αντίστασης χρησιμοποιώντας το πολώνυμο και τους συντελεστές που αναφέρονται στο πρότυπο DIN 43760 [6].

$$T_{in} = a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3 \quad (3)$$

όπου $a_0=246,998$ $a_1=2,3892576$ $a_2=0,000725465$ και $a_3=0,000000817152$

Σκοπός της διακρίβωσης είναι η εύρεση κατάλληλων συντελεστών διόρθωσης των συντελεστών της εξίσωσης (3) με την μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων [7].

Η πραγματική τιμή της ένδειξης των διακριβωμένων θερμομέτρων θα είναι

$$T_{real} = O + E * T_{in} \quad (4)$$

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς TR με το θερμομέτρο SPRT ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στο κείμενο της διεθνούς θερμοκρασιακής κλίμακας ITS 90 [8].

Αρχικά μετράται η τιμή της αντίστασης $R_R(T)$ και υπολογίζεται ο συντελεστής W_T

$$W_T = \frac{R_{R(T)}}{R_{273.16K}} \quad (5)$$

$$\text{και ακολουθώς ο συντελεστής } W_{RT} \quad W_{RT} = W_T - a[W_T - 1] \quad (6)$$

όπου a είναι ένας χαρακτηριστικός συντελεστής του αισθητήρα αναφοράς ο οποίος λαμβάνεται από το πιστοποιητικό διακρίβωσης του.

Η θερμοκρασία αναφοράς υπολογίζεται από την σχέση χρησιμοποιώντας τους χαρακτηριστικούς συντελεστές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία [3].

$$T = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{W_{rT} - 2,64}{1,64} \right)^i \quad (7)$$

Κάθε σημείο διακρίβωσης αποτελείται από 30 μετρήσεις και η καμπύλη διακρίβωσης αποτελείται από 9 ισοκατανεμημένα σημεία στο θερμοκρασιακό διάστημα 10 °C - 90 °C.

4.1 Αβεβαιότητες θερμοκρασίας αναφοράς T_R

Από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (N=30) σε κάθε σημείο της καμπύλης διακρίβωσης υπολογίζονται ο μέσος όρος της θερμοκρασίας αναφοράς και η τύπου A αβεβαιότητα

$$\bar{T}_R = \frac{\sum_{i=1}^n T_{R,i}}{n} \quad (8) \quad u_A(T_R) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{R,i} - \bar{T}_R)^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

Σύμφωνα με τον “Guide to the expression of uncertainty in measurements” (GUM)[9], εκτός από την τύπου A αβεβαιότητα της θερμοκρασίας αναφοράς θα πρέπει να εκτιμηθούν και οι πιθανές τύπου B συνιστώσες αβεβαιότητας, οι οποίες αναφέρονται ακολούθως.

α) Η αβεβαιότητα του θερμομέτρου αναφοράς $u_{(SPRT)}$, η οποία λαμβάνεται από το πιστοποιητικό διακρίβωσης του οργάνου και η οποία είναι ίση με 2,5 mK

β) Η αβεβαιότητα $u_{(DL)}$ η οποία οφείλεται σε πιθανά σφάλματα του πολυμέτρου κατά την μέτρηση της τιμής της αντίστασης R_R

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του πολυμέτρου το μέγιστο σφάλμα ΔR που προκύπτει από την μέτρηση της τιμής της αντίστασης ισούται με

$$\Delta R = 10^{-5} * R + 0.0005 \quad (10)$$

Για ορθογώνια κατανομή του σφάλματος η αβεβαιότητα $u_{(DL)}$ προκύπτει από την παρακάτω σχέση

$$u_{(DL)} = \frac{\Delta R}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

Ακολουθώντας τον νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων, η αβεβαιότητα $u_{(T_{DL})}$ υπολογίζεται από την αβεβαιότητα $u_{(DL)}$ πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή βαρύτητας που προκύπτει τις σχέσεις (5), (6), (6) και είναι ίση με 3 mK.

$$u_{(T_{DL})} = 0,609756 \left[D_1 + \sum_{i=1}^8 D_{i+1} \left(\frac{W_{rT} - 2,64}{1,64} \right)^i \right] (1 - \alpha) \frac{u_{(DL)}}{R_{273.16K}} \quad (12)$$

γ) Η συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω αυτοθέρμανσης του θερμομέτρου $u_{(sh)}$ δεν συμπεριλαμβάνεται στο ισοζύγιο καθότι ο αισθητήρας αναφοράς έχει διακριβωθεί για ένταση ρεύματος ίση με 1mA, την ίδια δηλαδή ένταση ρεύματος με την οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις.

δ) Η συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία οφείλεται στην χρονική ανομοιογένεια του λουτρού $u_{(bt)}$ εκτιμάται σύμφωνα με την διερεύνηση που προαναφέρθηκε ότι δεν υπερβαίνει τα 7 mK, ενώ η αντίστοιχη συνιστώσα χωρικής ανομοιογένειας $u_{(bs)}$ τα 8.7 mK.

ε) Η συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω της ολίσθησης του αισθητήρα $u_{(drift)}$ εκτιμάται από το ιστορικό του οργάνου ότι είναι της τάξεως των 5 mK.

ζ) Η συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία οφείλεται στην μερική εμφύσηση του αισθητήρα $u_{(th)}$ εκτιμήθηκε από τη σχετική διερεύνηση που προαναφέρθηκε ίση με 17,3 mK (για μέγιστο σφάλμα 30 mK και ορθογώνια κατανομή).

η) Η συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω εμφάνισης παρασιτικής θερμοτάσης στο κύκλωμα μέτρησης $u_{(vth)}$ λαμβάνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ίση με μηδέν, καθότι όλα τα εξαρτήματα και καλώδια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατασκευασμένα από χαλκό.

θ) Η συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω της ωμικής αντίστασης των καλωδιώσεων $u_{(RL)}$ θεωρείται αμελητέα καθότι το αισθητήριο διαθέτει σύνδεση τεσσάρων συρμάτων.

ι) Η συνιστώσα αβεβαιότητας η οποία οφείλεται στην αντίσταση της μόνωσης του θερμομέτρου $u_{(Riso)}$ θεωρείται αμελητέα καθότι τα θερμομέτρα τα οποία χρησιμοποιεί το εργαστήριο είναι στεγανά και δεν επιτρέπουν την διείσδυση υγρασίας στο εσωτερικό τους.

Συνολική τύπου Β αβεβαιότητα της θερμοκρασίας αναφοράς προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα όλων των προαναφερομένων συνιστωσών αβεβαιότητας.

Η συνολική αβεβαιότητα της θερμοκρασίας αναφοράς προκύπτει από την σχέση 13

$$u(T_R) = \sqrt{u_A(T_R)^2 + u_B(T_R)^2} \quad (13)$$

4.2 Αβεβαιότητες θερμοκρασίας υπό διακρίβωση θερμομέτρων

Η τύπου Α συνιστώσα αβεβαιότητα των ενδείξεων των υπό διακρίβωση θερμομέτρων υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (8). Στη συνολική αβεβαιότητα θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η τύπου Β αβεβαιότητα, η οποία στην προκειμένη περίπτωση αποτελείται πρακτικά μόνο από την συνιστώσα αυτοθέρμανσης του θερμομέτρου.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα θερμομέτρα βρίσκονται εμφύσηση σε βεβαιωμένη ροή ρευστού με την ένταση του ρεύματος μέτρησης να είναι 1mA, εκτιμάται ότι δεν υπερβαίνει τα 5 mK

Η αβεβαιότητα που προκύπτει για την διορθωμένη τιμή της ένδειξης του υπό διακρίβωση θερμομέτρου από τη εφαρμογή της μεθόδου των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων δίνεται από την σχέση 14

$$u(T) = \sqrt{[T_{in} * u(E)]^2 + [u(O)]^2 + 2T_{in} * \text{cov}(E, O)} \quad (14)$$

Η τελική αβεβαιότητα της διαδικασίας διακρίβωσης περιλαμβάνει και την συνιστώσα αβεβαιότητας λόγω υστέρησης $u_{(h)}$,

$$u_{(T)f} = \sqrt{u_{(T)}^2 + u_{(h)}^2} \quad (15)$$

Η αριθμητική τιμή της υπολογιζόμενης αβεβαιότητας στο παραπάνω παράδειγμα ανέρχεται σε 91 mK για διάστημα εμπιστοσύνης 95% και συντελεστή κάλυψης $k=2$.

5. Συμπεράσματα

Η ποιότητα του αποτελέσματος διακρίβωσης εξαρτάται από την μετρολογική ποιότητα του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, την διαδικασία διακρίβωσης αυτή κάθε αυτή καθώς και τον μεταξύ τους συνδυασμό. Σε κάθε περίπτωση η επιλογή εξοπλισμού και η διαμόρφωση της διαδικασίας διακρίβωσης καθορίζονται από το επιθυμητό επίπεδο αβεβαιότητας.

Σημαντικές συνιστώσες αβεβαιότητας δύναται να απαλειφθούν με τη λήψη κατάλληλων (και όχι ιδιαίτερα δαπανηρών) μέτρων όπως στην περίπτωση της παρασιτικής θερμοηλεκτρικής τάσης και της τύπου δύο συρμάτων συνδεσμολογίας του θερμομέτρου.

Η διερεύνηση των μετρολογικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, όπως η ανομοιογένεια του λουτρού, οι σταθερές χρόνου των θερμομέτρων και η εξάρτηση της ένδειξης τους από το βάθος εμβάπτισης προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα για την εκτίμηση των αβεβαιοτήτων. Παράλληλα τα αποτελέσματα των διερευνήσεων δύναται να αξιοποιηθούν για την κατάλληλη διαμόρφωση της διαδικασίας διακρίβωσης, ώστε να ληφθούν κατάλληλα μέτρα, (όπως πχ. η πλήρης εμβάπτιση του θερμομέτρου αναφοράς ή η αύξηση του χρονικού διαστήματος δειγματοληψίας) ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Frank Bernhard, «Technische Temperaturmessung», Springer 2004
- [2] BIMP (1997), «Techniques for approximating the international temperature scale of 1990»
- [3] BIMP (1997), «Supplementary Information for the international temperature scale of 1990»
- [4] DAkks-DKD «R 5-1 - Kalibrierung von Widerstandsthermometern»
- [5] J. V. Nicholas, D. R. White «Traceable Temperatures», John Wiley & Sons Ltd., 2001
- [6] DIN 43760, «References nickel precision»
- [7] Mathioulakis, E., Belessiotis V., (2000). «Uncertainty and traceability in calibration by comparison». Meas. Sci. Technol. 11, 771–775.
- [8] CIPM (1990), «International Temperature Scale of 1990»
- [9] ISO (1995), «Guide to the expression of uncertainty in measurements»

Χ. Κώνστας, Σ. Μπαμπαλής, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης, ΕΗ-ΕΣ/ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ
ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ ΘΕΡΜΟΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

5ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, Αθήνα, 9-10 Μαΐου 2014