

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Λαμπρινή Ν. Πλατή & Τάσος Μανάρας
ALGOSYSTEMS S.A. – ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ,
Ν. ΠΛΑΣΤΗΡΑ 46, 171 21 Ν. ΣΜΥΡΝΗ, ΑΘΗΝΑ
e-mail: lpлатi@algosystems.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία περιγράφει τη διαδικασία, τις απαιτήσεις σε εξοπλισμό και τις μεθόδους διακρίβωσης ενδεικτικών θερμοκρασίας μέσω ηλεκτρικής προσομοίωσης από πρότυπη πηγή συνεχούς τάσης ή/και αντίστασης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα αναλυτικό παράδειγμα προσδιορισμού και υπολογισμού των παραγόντων αβεβαιότητας για ένα ενδεικτικό θερμοκρασίας θερμοστοιχείου τύπου K.

Ένα ενδεικτικό θερμοκρασίας λειτουργεί μέσω μετατροπής του ηλεκτρικού σήματος που λαμβάνεται από τον αισθητήρα του σε ανάλογη ένδειξη σε θερμοκρασιακές μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τους πίνακες της ITS-90 (IEC 584), αν πρόκειται για θερμοστοιχεία ή της DIN/IEC 60751, αν πρόκειται για θερμοαντιστάσεις Pt 100. Χρησιμοποιώντας πίνακες αναφοράς, καθορίζεται η ηλεκτρική έξοδος του θερμοκρασιακού αισθητήρα στο επιθυμητό σημείο διακρίβωσης και η έξοδος της ηλεκτρικής πηγής ορίζεται σε αυτό το επίπεδο. Αυτό το ηλεκτρικό σήμα εφαρμόζεται στο ενδεικτικό θερμοκρασίας και η ένδειξη του ενδεικτικού συγκρίνεται με την τιμή της θερμοκρασίας που δέχεται στην είσοδό του το ενδεικτικό από την πρότυπη πηγή. Έτσι, καθορίζεται το σφάλμα στην ένδειξη του ενδεικτικού θερμοκρασίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Προσομοίωση, Θερμοκρασία, Πίνακες Αναφοράς Θερμοκρασίας, Θερμοστοιχεία, ITS-90, Ενδεικτικά Θερμοκρασίας

Abstract

This work presents the procedure, the equipment needed and the calibration methods of temperature indicators through electrical simulation by a standard voltage generator and/or standard resistors. Moreover, a detailed example of a K-type thermocouple temperature indicator is presented with its uncertainty budget.

A temperature indicator operates by converting the electrical signal received from a sensor into an equivalent readout in temperature units, taking into account the ITS-90 tables (IEC 584) for thermocouples or the DIN/IEC 60751 tables for resistance thermometers. Using reference tables, the electrical output of the temperature sensor at the required calibration point is determined and the output of the electrical source set to this level. This electrical signal is applied to the temperature indicator and the indicator's reading compared with the simulated input temperature and the error of indication of the temperature indicator determined.

Keywords: Simulation, Temperature, Reference Tables, Thermocouples, ITS-90, Temperature indicators

1. Εισαγωγή

Η εργασία βασίζεται στον Οδηγό της Euramet “Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement” – EURAMET cg-11, Version 2.0.

Υπό κανονικές συνθήκες χρήσης, τα ενδεικτικά θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ώστε να μετρήσουν τη θερμοκρασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διακρίβωση μέσω ηλεκτρικής προσομοίωσης, όπως περιγράφεται στην εργασία αυτή, επιβεβαιώνει την ακρίβεια και σωστή λειτουργία μόνο του ενδεικτικού θερμοκρασίας και συνεπώς, δε λαμβάνει υπόψη τη μετρολογική συμπεριφορά του κάθε αισθητήρα θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται, κανονικά, με το ενδεικτικό. Άρα, αποτελεί προϋπόθεση η διακρίβωση του εκάστοτε αισθητήρα θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στη διαδικασία αυτή.

Η μετατροπή της θερμοκρασίας σε ηλεκτρικά μεγέθη (millivolts ή Ω) βασίζεται σε πίνακες αναφοράς. Οι πίνακες αναφοράς θερμοκρασίας για θερμοστοιχεία έχουν σαν αναφορά τη θερμοκρασία των 0 °C, η οποία αναφέρεται σαν ψυχρή επαφή (cold junction compensation-CJC).

Η απευθείας μετατροπή διαφορών θερμοκρασίας σε ηλεκτρική τάση προκύπτει από το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck, το οποίο συνίσταται στην παραγωγή μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης E λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο ακροδεκτών διαφορετικών μετάλλων, τα οποία βρίσκονται στο ίδιο κύκλωμα.

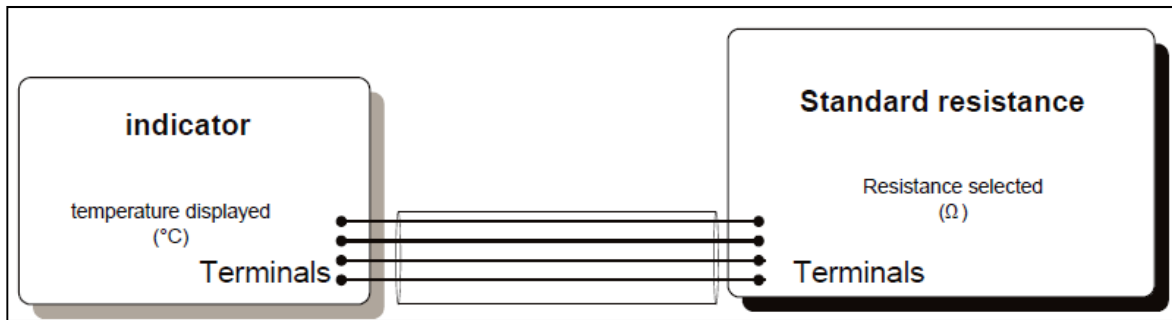
2. Μεθοδολογία

Οι απαιτήσεις κατά τη διακρίβωση ενός ενδεικτικού θερμοκρασίας εξαρτώνται από τον τύπο του ενδεικτικού υπό διακρίβωση. Περαιτέρω καθοδήγηση δίνεται στον κάτωθι πίνακα και στα σχήματα που ακολουθούν. Ο πίνακας δίνει πληροφορίες για το είδος των αισθητήρων, τις πρότυπες συσκευές και την πειραματική διάταξη.

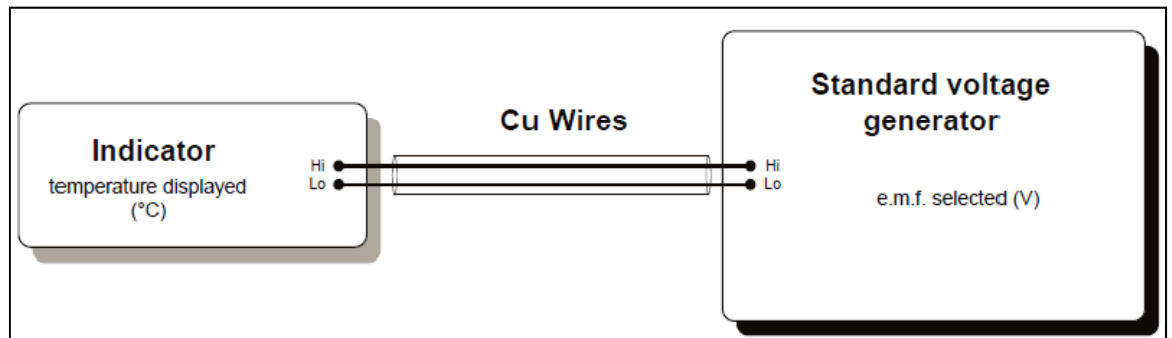
Πίνακας 1 Απαιτήσεις διακρίβωσης ενδεικτικών θερμοκρασίας

Είδος Αισθητήρα	Πρότυπα Αναφοράς	Διάταξη Μέτρησης
Θερμοαντίσταση	Πρότυπες Αντιστάσεις ή Κυτία Δεκαδικών Αντιστάσεων	Σχήμα 1
Θερμοστοιχείο (χωρίς CJC)	Πρότυπη Πηγή Συνεχούς Τάσης (μιλλιβόλτ)	Σχήμα 2
Θερμοστοιχείο (με CJC)	Πρότυπη Πηγή Συνεχούς Τάσης Θερμοστοιχείο Διάταξη ψυχρής επαφής	Σχήμα 3

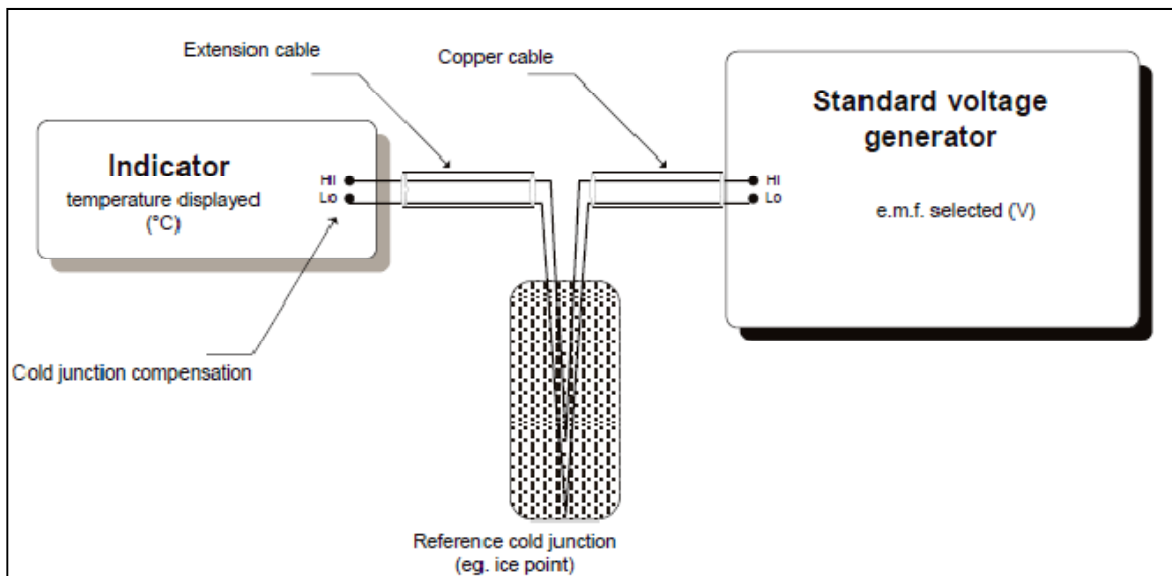
Οι πρότυπες συσκευές πρέπει να είναι διακριβωμένες. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η διάταξη για τη διακρίβωση ενός ενδεικτικού θερμοκρασίας τεσσάρων αγωγών που χρησιμοποιείται με θερμοαντίσταση (π.χ. Pt100). Να σημειωθεί ότι υπάρχουν αντίστοιχα ενδεικτικά δύο και τριών αγωγών, ανάλογα με τον τύπο θερμοαντίστασης που συνδέονται.



Σχήμα 1. Ενδεικτικό θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται με θερμοαντίσταση

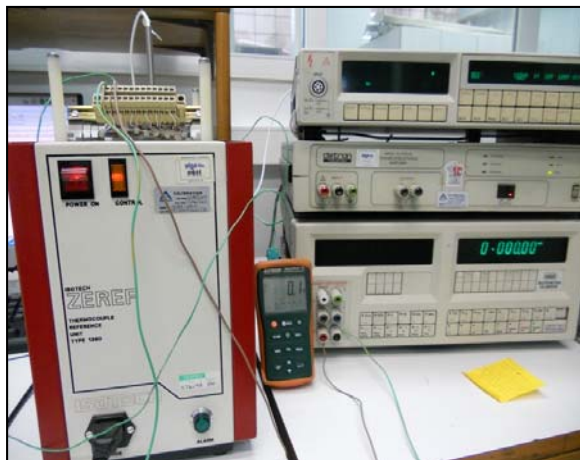


Σχήμα 2. Ενδεικτικό θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται με θερμοστοιχείο (χωρίς διάταξη ψυχρής επαφής)



Σχήμα 3. Ενδεικτικό θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται με θερμοστοιχείο (με διάταξη ψυχρής επαφής)

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της διάταξης ψυχρής επαφής (cold junction compensation). Για παράδειγμα, το τριπλό σημείο του νερού (δηλαδή εκείνη η κατάσταση θερμοκρασίας και πίεσης στην οποία ο πάγος, το νερό και οι ατμοί του συνυπάρχουν σε ισορροπία) είναι μια πολύ καλή μέθοδος για την επίτευξη σταθερής θερμοκρασίας στους 0°C.



Σχήμα 3.1-Ice Point Reference Unit

Μια εναλλακτική μέθοδος είναι η χρήση μιας πρότυπης ηλεκτρονικής συσκευής ψυχρής επαφής (ice point reference unit), η οποία θα πρέπει, φυσικά, να είναι διακριβωμένη.

Επίσης, πρέπει τα καλώδια των θερμοστοιχείων να είναι διακριβωμένα και να ελεγχθεί η ορθή πολικότητα σύνδεσής τους.

3. Πειραματικό Μέρος

3.1 Διαδικασία Μέτρησης

Το υπό διακρίβωση ενδεικτικό θερμοκρασίας (Extech EA15) συνδέεται με διάταξη ψυχρής επαφής. Η διαδικασία διακρίβωσης ακολουθεί τη μέθοδο που φαίνεται στο Σχήμα 3. Η πρότυπη πηγή συνεχούς τάσης είναι διακριβωμένη και εντός ακρίβειας. Κατά τη διακρίβωση η θερμοκρασία στο χώρο του εργαστηρίου ήταν $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Το υπό διακρίβωση ενδεικτικό θερμοκρασίας χρησιμοποιείται με θερμοστοιχεία τύπου K και έχει ανάλυση $0,1^{\circ}\text{C}$.

3.2 Αποτελέσματα Μέτρησης

Πίνακας 2 Αποτελέσματα Μέτρησης

Θερμοκρασία Διακρίβωσης	Ισοδύναμη τάση πρότυπης πηγής (*)	Ένδειξη ενδεικτικού θερμοκρασίας
100 °C	4096,23 μV	100,0 °C

(*) Η ισοδύναμη τάση καθορίζεται από τους πίνακες αναφοράς θερμοκρασίας για θερμοστοιχείο τύπου K στους 100 °C. Στο σχήμα 4 γίνεται και επαλήθευση αυτής της τιμής της τάσης μέσω ενός διακριβωμένου υψηλής ακρίβειας πολυμέτρου (8,5 ψηφίων).

Η ακρίβεια του ενδεικτικού θερμοκρασίας στη θερμοκρασία αυτή είναι $0,8^{\circ}\text{C}$.

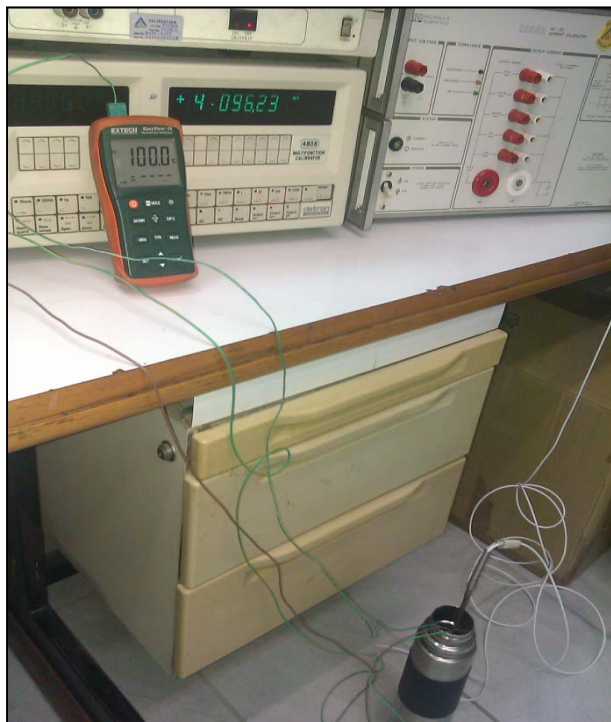
Στο Σχήμα 5 φαίνεται η ένδειξη του υπό διακρίβωση ενδεικτικού θερμοκρασίας, όταν δίνεται από την πρότυπη πηγή τάσης, τάση ίση με 4096,23 μV (που αντιστοιχεί σε 100 °C).

Στο Σχήμα 6(α) φαίνεται η διάταξη ψυχρής επαφής (τριπλό σημείο νερού) με το πρότυπο Pt100 εντός, το οποίο εξυπηρετεί στη μέτρηση-διασφάλιση μηδενικής θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 6(β) έχουν τοποθετηθεί εντός του δοχείου (με την κατάλληλη μόνωση) οι χάλκινοι ακροδέκτες, καθώς και οι ακροδέκτες του θερμοστοιχείου K (όπως στο Σχήμα 3).

Στο Σχήμα 7 φαίνεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας εντός του δοχείου ψυχρής διάταξης μέσω πρότυπης διακριβωμένης θερμοαντίστασης (Pt100). Η τιμή 99,9773 Ω που φαίνεται στο πρότυπο πολύμετρο αντιστοιχεί (για τη συγκεκριμένη θερμοαντίσταση) σε 0,0046 °C.



Σχήμα 4. Συμφωνία πρότυπης πηγής τάσης και πρότυπου πολυμέτρου στους 100 °C



Σχήμα 5. Διακρίβωση ενδεικτικού θερμοκρασίας στους 100 °C



(α)

(β)

Σχήμα 6. Διάταξη ψυχρής επαφής



Σχήμα 7. Έλεγχος θερμοκρασίας (0°C) εντός της ψυχρής διάταξης με πρότυπη θερμοαντίσταση

Να σημειωθεί ότι στο Σχήμα 7 οι ακροδέκτες του ενδεικτικού είναι βραχυκυκλωμένοι.

3.3 Μοντέλο Μέτρησης

Η ποσότητα που ενδιαφέρει στη διακρίβωση είναι η διόρθωση c που πρέπει να εφαρμοστεί στην ένδειξη (t_i) του υπό διακρίβωση ενδεικτικού θερμοκρασίας, όταν ο ακροδέκτης μέτρησης του τυποποιημένου θερμοστοιχείου (του οποίου ο ακροδέκτης αναφοράς συνδέεται στους ακροδέκτες εισόδου του ενδεικτικού) βρίσκεται στη θερμοκρασία διακρίβωσης t' .

$$c = t' - (t_i + \delta t_i) \quad (1)$$

όπου δt_i είναι η πιθανή απόκλιση λόγω της πεπερασμένης ανάλυσης του υπό διακρίβωση ενδεικτικού θερμοκρασίας.

Ένα τέτοιο τυποποιημένο θερμοστοιχείο θα παράγει emf στους ακροδέκτες εισόδου του ενδεικτικού:

$$V = E(0^\circ C, t') - E(0^\circ C, t'') \quad (2)$$

όπου t'' είναι η θερμοκρασία στους ακροδέκτες του ενδεικτικού και ο παράγοντας E αντιπροσωπεύει τις emf τιμές που δίνονται στους τυποποιημένους πίνακες για τις θερμοκρασίες t' και t'' .

Στην παρούσα διακρίβωση, αντικαθιστούμε την είσοδο του θερμοστοιχείου από τα emf που παράγονται από την πρότυπη πηγή παραγωγής τάσης (μιλλιβόλτ) και τη διάταξη ψυχρής επαφής. Έτσι, έχουμε:

$$V = V_x + \delta V_{x2} + \delta V_{x3} + \delta V_p - [E(0^\circ C, t'') + \delta E_{c1}(0^\circ C, t'') + \delta E_{c2}(0^\circ C, t'')] + \delta t_{T3} \cdot S_0 \quad (3)$$

όπου

V_x	είναι τα emf από την πρότυπη πηγή συνεχούς τάσης (όταν τίθεται στα x mV)
δV_{x2}	είναι η διόρθωση στην έξοδο της πρότυπης πηγής συνεχούς τάσης, όταν τίθεται σε τάση x , όπως προκύπτει από την τελευταία διακρίβωσή της
δV_{x3}	είναι η διόρθωση στην έξοδο της πρότυπης πηγής συνεχούς τάσης, όταν τίθεται σε τάση x , λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως π.χ. θερμοκρασία περιβάλλοντος, μεταβολές παροχής κ.ά.
δV_p	είναι η διόρθωση λόγω της παρουσίας παρασιτικών τάσεων στο κύκλωμα μέτρησης
$E(0^\circ C, t'')$	είναι τα ισοδύναμα emf σύμφωνα με τους πίνακες αναφοράς θερμοκρασίας στη θερμοκρασία t''
$\delta E_{c1}(0^\circ C, t'')$	είναι η διαφορά των ακροδεκτών του θερμοστοιχείου στη θερμοκρασία t'' , όπως προκύπτει από την τελευταία του διακρίβωση
$\delta E_{c2}(0^\circ C, t'')$	είναι η διαφορά των ακροδεκτών του θερμοστοιχείου στη θερμοκρασία t'' , λόγω του drift από την τελευταία του διακρίβωση
δt_{T3}	είναι η απόκλιση από τους $0^\circ C$ της θερμοκρασίας της ψυχρής επαφής
S_0	είναι ο συντελεστής Seebeck για θερμοστοιχεία τύπου K στους $0^\circ C$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (2) και (3) και αντικαθιστώντας τη θερμοκρασία t' από τη σχέση (1), βρίσκουμε την έκφραση της μετρηθείσας ποσότητας c συναρτήσει πολλών παραγόντων, όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση (4):

$$c = P(V_x) + [\delta V_{x2} - \delta E_{c1}(0^\circ C, t'') + \delta V_{x3} + \delta V_p - \delta E_{c2}(0^\circ C, t'') - \delta t_{T3} \cdot S_0] / S_{100} - (t_i + \delta t_i) \quad (4)$$

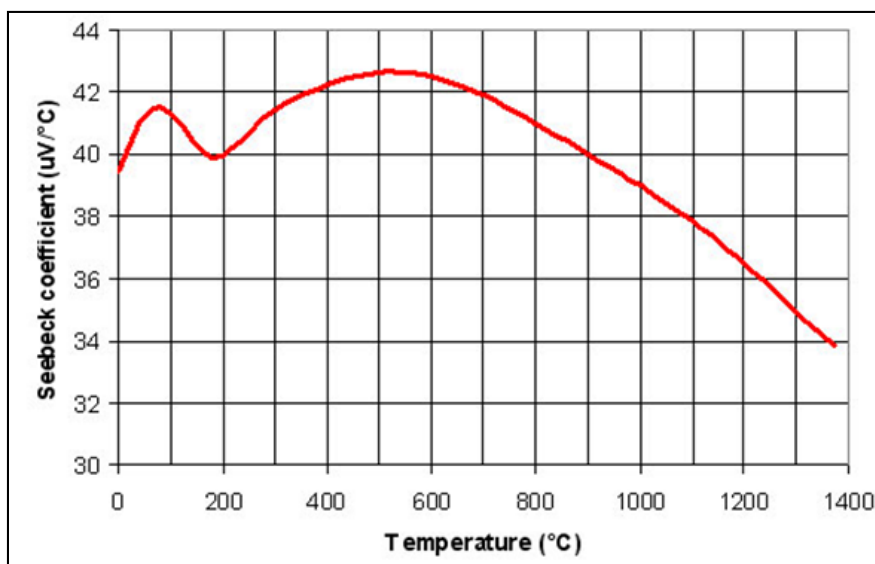
όπου

- P είναι η αντίστροφη συνάρτηση αναφοράς από το πρότυπο IEC 584 για τα θερμοστοιχεία τύπου K
- $P(V_X)$ είναι η ισοδύναμη θερμοκρασία σύμφωνα με τον πρότυπο πίνακα αναφοράς στα emf που δίνονται από την πρότυπη πηγή μιλλιβόλτ, όταν αυτή τίθεται στα x mV
- S_{100} είναι ο συντελεστής Seebeck για θερμοστοιχεία τύπου K στους 100°C

Η ευαισθησία (συντελεστής Seebeck) ενός θερμοστοιχείου τύπου K φαίνεται στον Πίνακα 3 και, διαγραμματικά, στο Σχήμα 8:

Πίνακας 3 Συντελεστής Seebeck θερμοστοιχείου τύπου K

t [°C]	S_t [$\mu\text{V}\cdot\text{C}^{-1}$]
0	$S_0=39,4$
23	$S_{23}=40,0$
100	$S_{100}=41,2$



Σχήμα 8. Συντελεστής Seebeck συναρτήσει της θερμοκρασίας για θερμοστοιχεία τύπου K

3.4 Ισοζύγιο Αβεβαιότητων

Οι παράγοντες που συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 Ισοζύγιο Αβεβαιότητων

				Output Value:	4.09623	mV	
					4096.23 μV	100 °C	
Quantity	Symbol	Estimate	Expanded Uncertainty	Probability distribution	Divisor	Sensitivity Coefficient	Uncertainty Contribution
Resolution of mV source output	V_x	4096.23 μV (=100°C)	0.005 μV	Rectangular	1.732	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.00007 °C
Calibration of mV source	δV_{x2}	0.00 μV	0.02 μV	Normal	2	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.00024 °C
Influence Factors	δV_{x3}	0.00 μV	3.0 μV	Rectangular	1.732	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.04204 °C
Parasitic Voltages	δV_P	0.00 μV	2.0 μV	Rectangular	1.732	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.02803 °C
Calibration of thermocouple wires	$\delta E_{c1}(0^{\circ}C, t^{\circ})$	-7.9248 μV (=0.2°C)	19.74 μV	Normal	2	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.23956 °C
Drift of thermocouple wires	$\delta E_{c2}(0^{\circ}C, t^{\circ})$	0.00 μV	2.4 μV	Rectangular	1.732	41.2 ($\mu V^{\circ C^{-1}}$)-1	0.03363 °C
Deviation of ice point	δt_{I3}	0.00 °C	0.06 °C	Normal	2	0.956	0.03138 °C
Resolution of UUT	δt_i	0.0 °C	0.05 °C	Rectangular	1.732	1	0.02887 °C
Expected indication of indicator		100.2 °C					
Indication of the UUT	t_i	100.0 °C	insignificant				insignificant
Correction to apply to indication of temperature indicator	c	0.2 °C					0.25078 °C
EXPANDED UNCERTAINTY: $U = k \times u(V_x) = 2 \times u(V_x)$							0.502 °C

3.5 Παρουσίαση του αποτελέσματος διακρίβωσης

Η διόρθωση του ενδεικτικού θερμοκρασίας στους 100,0 °C και με τη χρήση διάταξης ψυχρής επαφής είναι (+0,2±0,5) °C.

Αυτή η διόρθωση καθορίστηκε μέσω προσομοίωσης χρησιμοποιώντας μόνο ηλεκτρικές πρότυπες συσκευές.

Η αναφερόμενη αβεβαιότητα μέτρησης βασίστηκε σε κανονική αβεβαιότητα, πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή κάλυψης $k=2$, παρέχοντας ένα επίπεδο εμπιστοσύνης 95 % περίπου.

4. Βιβλιογραφία (διαθέσιμη στο διαδίκτυο)

- **EURAMET cg-11, Version 2.0 (03/2011)**, “Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement. Σύνδεσμος: <http://www.euramet.org/index.php?id=calibration-guides>
- **University of Cambridge**, Department of Materials Science and Metallurgy, “Thermoelectric Materials For Thermocouples”. Σύνδεσμος: <http://www.msm.cam.ac.uk/utc/thermocouple/pages/ThermocouplesOperatingPrinciples.html>
- **JUMO**, “Electrical Temperature Measurement, with thermocouples and resistance thermometers” by Matthias Nau. Σύνδεσμος: www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=4033