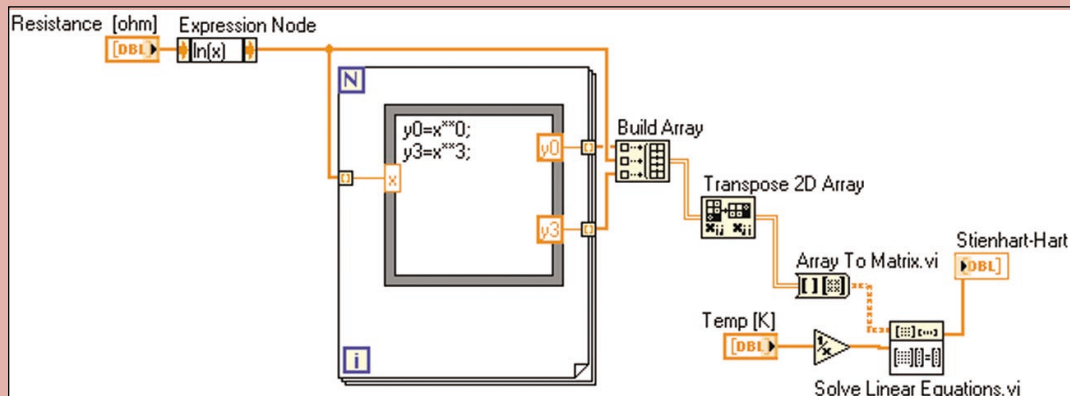


5.10.2 Εργαστηριακή Εφαρμογή 2: Ανάπτυξη κώδικα υπολογισμού συντελεστών Steinhart & Hart για άγνωστο στοιχείο θερμίστορ

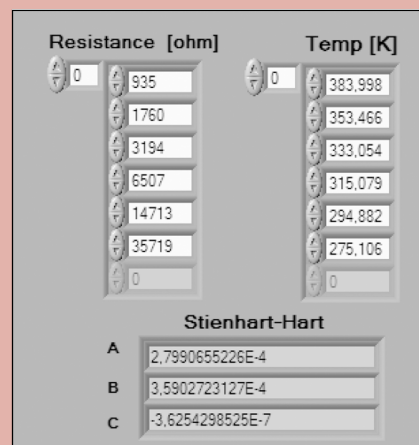
Στην εργαστηριακή εφαρμογή δημιουργούμε κώδικα για την εύρεση των συντελεστών Steinhart & Hart για άγνωστο στοιχείο θερμίστορ.

Εργασίες

1. Για την εξαγωγή των τιμών μετράμε την τιμή της αντίστασης του θερμίστορ για διαφορετικές τιμές θερμοκρασιών. Το πλήθος των μετρήσεων αυξάνει την ακρίβεια του υπολογισμού των συντελεστών.
2. Κατασκευάζουμε τον κώδικα στο περιβάλλον LabVIEW όπως αυτό απεικονίζεται:



3. Εισάγουμε τις τιμές του βήματος 1 σε μορφή πίνακα στο front panel του κώδικα.



4. Εκκινούμε το εικονικό όργανο και λαμβάνουμε του συντελεστές A,B και C του άγνωστου στοιχείου θερμίστορ.

5.11 Θερμοζεύγος

5.11.1 Φαινόμενο Seebeck

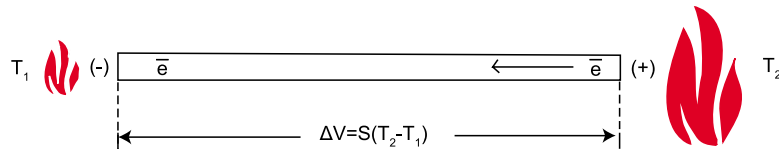
Το 1821 ο T.J. Seebeck ανακάλυψε ότι θερμαίνοντας ένα μέταλλο που οι δύο άκρες του βρίσκονται σε διαφορετικά θερμικά περιβάλλοντα $T_2 > T_1$ αναπτύσσεται μικρή διαφορά δυναμικού dV λόγω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου (thermoelectricity), ή αλλιώς του φαινομένου Seebeck. Κατά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, τα ηλεκτρόνια του μεταλλικού αγωγού που βρίσκονται στο υψηλό θερμοκρασιακό περιβάλλον T_2 διαχέονται προς την περιοχή η οποία εκτίθεται στη θερμοκρασία T_1 λόγω της υψηλής τους ενεργειακής στάθμης (Σχ.5.30). Η διαφορά δυναμικού που δίνεται από τη σχέση:

$$dV = S(T) \cdot (T_2 - T_1)$$

όπου,

$S(T)$: θερμοηλεκτρικός συντελεστής του υλικού (Volts / K).

Ο συντελεστής Seebeck αποτελεί έκφραση των ενεργειακών μεταβολών των ηλεκτρονίων και δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα 5.30: Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ($T_2 > T_1$).

$$S \approx - \frac{2\pi^2 k \left(\frac{1}{2} kT \right)}{3eE_f}$$

όπου,

E_f : η ενέργεια Fermi.

Στον Πίνακα 5.10 που ακολουθεί αναγράφεται ο συντελεστής Seebeck για τυπικά υλικά σε θερμοκρασία 0°C. Για την αξιοποίηση του θερμοηλεκτρικού φαινομένου προκειμένου της ανάπτυξης τεχνικής μέτρησης της θερμοκρασίας, φέρουμε τη μια άκρη δυο ανόμοιων μετάλλων σε επαφή. Η συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων λόγω διαφορετικής πυκνότητας των ελευθέρων ηλεκτρονίων δημιουργεί διαφορά δυναμικού η οποία είναι πλέον δυνατόν να μετρηθεί. Το ζεύγος των δύο μεταλλικών αγωγών καλείται *θερμοζεύγος*. Στην περίπτωση που φέρουμε σε επαφή δύο ίδια μέταλλα, η διαφορά δυναμικό που θα μετρήσουμε με ιδανικό βολτόμετρο θα είναι μηδενική λόγω των ίδιων τιμών συντελεστών Seebeck των υλικών (Σχ. 5.31).

Πίνακας 5.10: Συντελεστής Seebeck τυπικών υλικών σε θερμοκρασία 0°C.

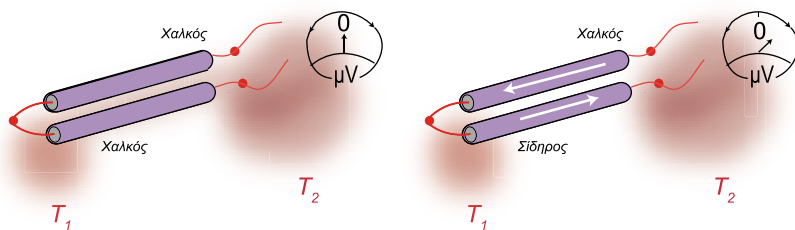
Υλικό	Seebeck
Αλουμίνιο	3,5
Χαλκός	6,5
Κονσταντάνη	-35
Ρόδιο	6,0
Σίδηρος	19
Αργυρος	6,5
Λευκόχρυσος	0
Νικέλιο	-15
Χρωμιονικελίνη	25
Ταντάλιο	4,5

Ένα τροφοδοτήσουμε με πηγή τάσης τα άκρα ενός θερμοζεύγους όπως στο Σχήμα 5.32, τότε στο άκρο της θερμής επαφής θα εμφανιστεί θερμική ενέργεια, ενώ στο άκρο της ψυχρής επαφής θα απορροφηθεί θερμότητα σύμφωνα με το φαινόμενο Peltier. Η επίδραση του φαινομένου Peltier δίνεται από τη σχέση:

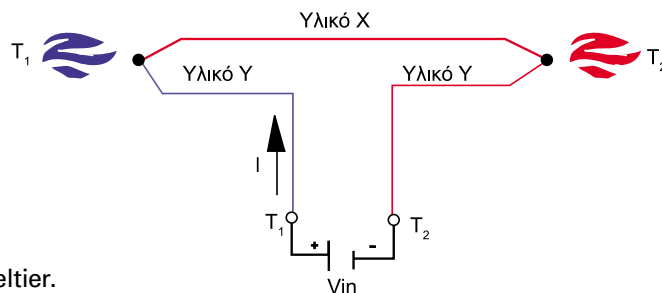
$$Q = \Pi_{xy} \cdot I$$

όπου,

Π_{xy} : ο συντελεστής Peltier για το θερμοζεύγος x,y και
 I : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το θερμοζεύγος.



Σχήμα 5.31: Επίδραση φαινομένου Seebeck α) σε δύο και β) διαφορετικά υλικά μετάλλων.



Σχήμα 5.32: Φαινόμενο Peltier.

5.11.2 Τύποι θερμοζευγών

Διάφορα μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός θερμοζεύγους. Οι φυσικές τους ιδιότητες προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά των θερμοζευγών. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ISA (Instrument Society of America) κατασκευάζονται θερμοζεύγη τα οποία χαρακτηρίζονται από τα υλικά κατασκευής τους και από τον κατά σύμβαση τύπο τους.

- **Τύπος T, Χαλκός – Κωνσταντάνη:** Κατάλληλο για χρήση σε θερμοκρασίες και κάτω από τους 0°C. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στις διαβρώσεις και συνιστάται για τη μέτρηση θερμοκρασιών από -200°C έως +350°C. Παράγει δυναμικό περίπου 40 mV/°C.
- **Τύπος J, Σίδηρος – Κωνσταντάνη:** Χρησιμοποιείται συνήθως για μέτρηση θερμοκρασιών 95°C έως 760°C. Ευαίσθητο στις διαβρώσεις λόγω οξείδωσης του σιδήρου, και για το λόγο αυτό το θερμοζεύγος θα πρέπει να εσωκλείεται σε κατάλληλο κέλυφος προστασίας. Ο προστατευόμενος τύπος J προτείνεται για θερμοκρασίες άνω των 1600 °F. Παράγει δυναμικό περίπου 50 μV/°C.
- **Τύπος K, Chromel – Alumel:** Χρησιμοποιείται συνήθως για μέτρηση θερμοκρασιών 95°C - 1260°C. Παράγει δυναμικό περίπου 40 μV/°C (*Chromel*: νικελιοχρωμιούχο κράμα, *Alumel*: νικελιοαργιλιούχο κράμα).
- **Τύπος E, Chromel – Κωνσταντάνη:** Χρησιμοποιείται συνήθως για μέτρηση θερμοκρασιών 95°C - 900°C. Παράγει δυναμικό περίπου 68 μV/°C.
- **Τύπος R, (Ρόδιο 13%+ Πλατίνα 87%) – (Πλατίνα)** Χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες από 870°C - 1450°C. Το θερμοζεύγος πρέπει πάντοτε να βρίσκεται σε υψηλής θερμοκρασίας κεραμικό περίβλημα προστασίας.
- **Τύπος S, (Ρόδιο 10%+Πλατίνα 90%) – (Πλατίνα):** Χρησιμοποιείται συνήθως για μέτρηση θερμοκρασιών 980°C - 1450°C. Η μικρή ευαισθησία τους (10 μV/°C) και το υψηλό κόστος είναι οι λόγοι που δεν χρησιμοποιούνται ευρέως.

Στον Πίνακα 5.11 παρουσιάζεται ο χρωματικός κώδικα των αγωγών για τους παραπάνω τύπους θερμοζευγών σύμφωνα με διεθνή πρότυπα.

Πίνακας 5.11: Πρότυπος χρωματικός κώδικας για θερμοζεύγη T, J, K, E, R και S.

Τύπος θερμοζεύγους	Πολικότητα	Διεθνές πρότυπο IEC 584	Αμερικάνικο πρότυπο ANSI MC 96.1	Αγγλικό πρότυπο BS1843:1952	Γερμανικό πρότυπο DIN 43714	Ιαπωνικό πρότυπο JIC 1610-1981	Γαλλικό πρότυπο NFE-18001	
T	+	Χαλκός						
	-	Κωνσταντάνη						
J	+	Σίδηρος						
	-	Κωνσταντάνη						
K	+	Chromel						
	-	Alumel						
E	+	Chromel						
	-	Κωνσταντάνη						
R	+	Πλατίνα/Ρόδιο						
	-	Πλατίνα						
S	+	Πλατίνα/ Ρόδιο						
	-	Πλατίνα						

Για την επιλογή του κατάλληλου θερμοζεύγους που θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημα μέτρησης κύριο παράγοντα αποτελεί το πεδίο τιμών της θερμοκρασίας της εφαρμογής μας. Επίσης λαμβάνουμε υπόψη μας και τις συνθήκες στις οποίες το θερμοζεύγος θα λειτουργεί, όπως για παράδειγμα: εάν στην περιοχή λειτουργίας του στοιχείου υπάρχουν διαβρωτικά ρευστά, εάν το θερμοζεύγος θα υπόκειται σε κάθε είδους μηχανικές καταπονήσεις ώστε να επιλέξουμε την κατάλληλη προστατευτική θήκη, το είδος του αγωγού επέκτασης όταν ο μεταδότης ή το μετρητικό όργανο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, κ.ά..

Όπως αναφέραμε στην αρχή της ενότητας, ο συντελεστής Seebeck μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας γεγονός που χαρακτηρίζει το θερμοζεύγος ως μη γραμμικό στοιχείο. Στο Σχήμα 5.33 απεικονίζεται σε διάγραμμα η μεταβολή του συντελεστή Seebeck ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) με τη θερμοκρασία για τα θερμοζεύγη τύπου E, T, J, K, R, και S.

Από το γράφημα παρατηρούμε ότι μόνο ο τύπος K παρουσιάζει μεταξύ 0°C και 1000°C μια σχετικά σταθερή τιμή σε σχέση με τους υπόλοιπους. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας μέσω του συντελεστή Seebeck και της παραγόμενης τιμής τάσης του θερμοζεύγους απαιτείται από τον κώδικα του συστήματος μέτρησης ο υπολογισμός της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου μέσω ανάπτυξης πολωνύμου με σταθερούς συντελεστές:

$$T = a_0 + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n$$

όπου,

- n : η τάξη του πολωνύμου,
- a : σταθερός συντελεστής, και
- u : η μετρήσιμη τιμή τάσης.

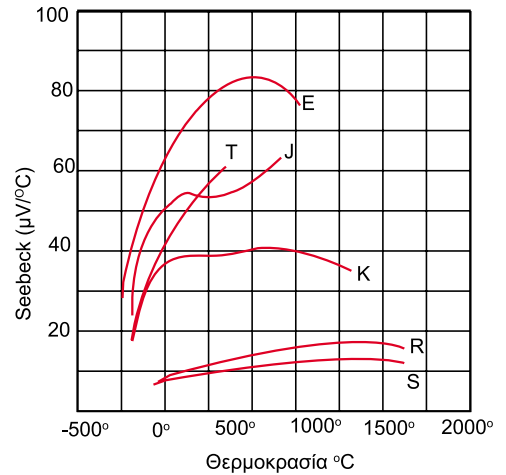
Ο Πίνακας 5.12 παρουσιάζει τους σταθερούς συντελεστές για τα συνήθη θερμοζεύγη τύπου E, T, J, K, R, και S.

Πίνακας 5.12: Συντελεστής πολωνύμων για θερμοζεύγη τύπου E, T, J, K, R, και S.

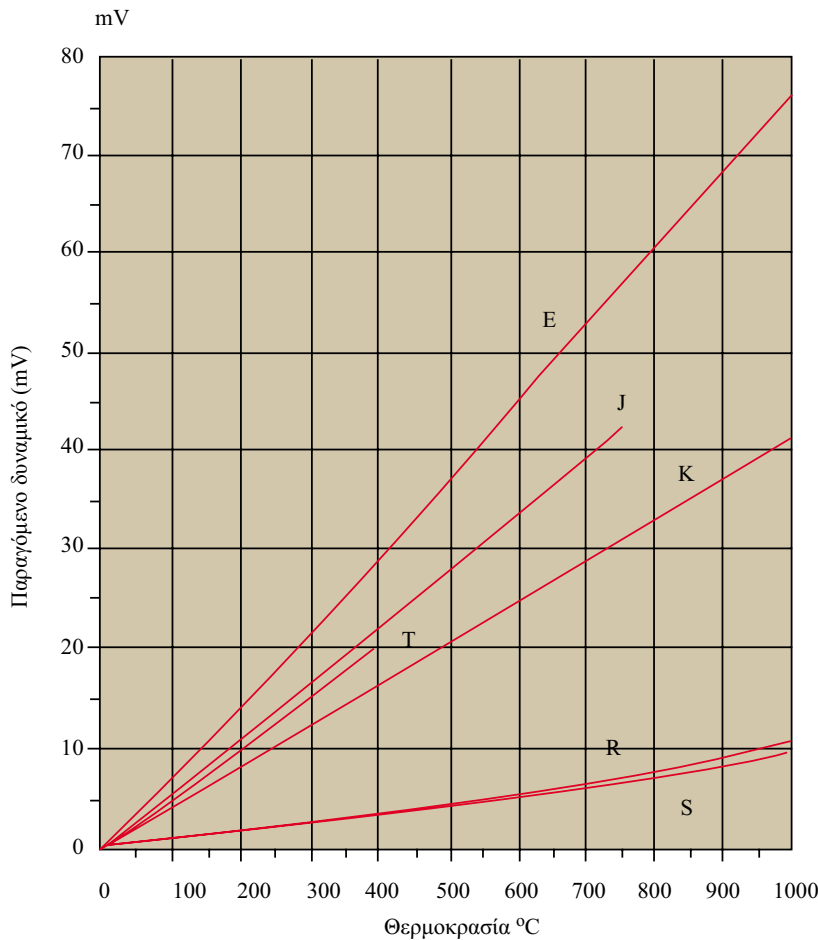
	Τύπος E	Τύπος J	Τύπος K	Τύπος R	Τύπος S	Τύπος T
	9 ^η τάξη	5 ^η τάξη	8 ^η τάξη	8 ^η τάξη	9 ^η τάξη	7 ^η τάξη
α_0	0,104967248	-0,048868252	0,226584602	0,263632917	0,927763167	0,10086091
α_1	17189,45282	19873,14503	24152,10900	179075,491	169526,5150	25727,94369
α_2	-282639,0850	-218614,5353	67233,4248	-48840341,37	-31568363,94	-767345,8295
α_3	12695339,5	11569199,78	2210340,682	1,90002E+10	8990730663	78025595,81
α_4	-448703084,6	-264917531,4	-860963914,9	-4,82704E+12	-1,63565E+12	-9247486589
α_5	1,10866E+10	2018441314	4,83506E+10	7,62091E+14	1,88027E+14	6,97688E+11
α_6	-1,76807E+11		-1,18452E+12	-7,20026E+16	-1,37241E+16	-2,66192E+13
α_7	1,71842E+12		1,38690E+13	3,71496E+18	6,17501E+17	3,94078E+14
α_8	-9,19278E+12		-6,33708E+13	-8,03104E+19	-1,56105E+19	
α_9	2,06132E+13				1,69535E+20	

Στο Σχήμα 5.34 παρουσιάζονται σε διάγραμμα οι χαρακτηριστικές τάσης εξόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας για τους παραπάνω τύπους θερμοζευγών.

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι τιμές της τάσης εξόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας με επαφή αναφοράς στους 0°C για τους συνήθεις τύπους θερμοζεύγους E, T, J, K, R, και S (εταιρεία OMEGA).



Σχήμα 5.33: Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή Seebeck και θερμοκρασίας για τύπο θερμοζεύγους E, T, J, K, R, και S.



Αντιστοιχίστε τους παρακάτω τύπους θερμοζεύγους σύμφωνα με το υλικό κατασκευής τους.

T	+	Πλατίνα 13%/ Ρόδιο 87%
	-	Πλατίνα
J	+	Cromel
	-	Κονσταντάνη
K	+	Πλατίνα 10%/ Ρόδιο 90%
	-	Πλατίνα
E	+	Σίδηρος
	-	Κονσταντάνη
R	+	Cromel
	-	Alumel
S	+	Χαλκός
	-	Κονσταντάνη

Κυκλώστε τη σωστή απάντηση. Ποιο θερμοζεύγος από τα παρακάτω παρουσιάζει καλύτερη γραμμικότητα;

E T J R S K

Σχήμα 5.34: Διάγραμμα μεταβολής δυναμικού συναρτήσει της θερμοκρασίας για τύπο θερμοζεύγους E, T, J, K, R, και S.

5.11.3 Τεχνικές μέτρησης με θερμοζεύγος

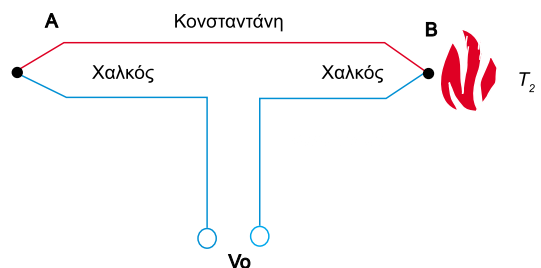
5.11.3.1 Μέτρηση θερμοκρασίας με δύο θερμικές επαφές

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτείται πάντοτε ένα σημείο με θερμοκρασία αναφοράς η τιμή της οποίας θα πρέπει να δίνεται με υψηλή ακρίβεια. Εξετάζοντας τη διάταξη του Σχήματος 5.35, δύο μεταλλικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα χαλκός και κονσταντάνη δημιουργούν δύο επαφές: την επαφή A σε θερμοκρασία T_1 και την επαφή B σε θερμοκρασία $T_2 > T_1$. Η επαφή A καλείται επαφή αναφοράς (reference junction) ή ψυχρή επαφή (cold junction) ενώ η επαφή B στην οποία μετράμε καλείται θερμή επαφή (hot junction) ή επαφή μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή η μετρήσιμη θερμοηλεκτρική τάση ή δυναμικό επαφής (contact potential) δίνεται από τη σχέση:

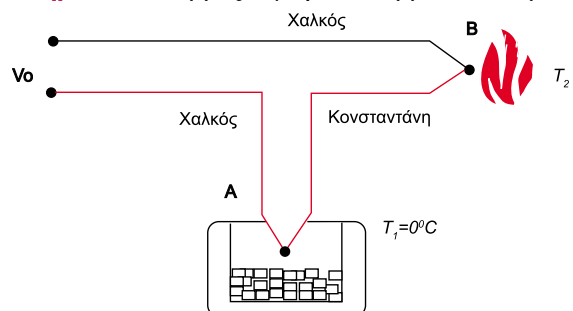
$$dV = (S_{Con}(T) - S_{Cu}(T)) \cdot (T_2 - T_1)$$

Από την παραπάνω σχέση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση της θερμοκρασίας T_2 όταν η θερμοκρασία T_1 έχει τιμή μηδέν ($T_1 = 0^\circ\text{C}$). Για τη δημιουργία ενός θερμοκρασιακού περιβάλλοντος μηδέν βαθμών Κελσίου, βυθίζουμε την άκρη της επαφής A σε δοχείο με πάγο, όπως στο Σχήμα 5.36.

Η χρήση χαλκού και κονσταντάνης ως στοιχεία του θερμοζεύγους πλεονεκτεί έναντι άλλων συνδυασμών με-



Σχήμα 5.35: Θερμοζεύγος δύο θερμικών επαφών.

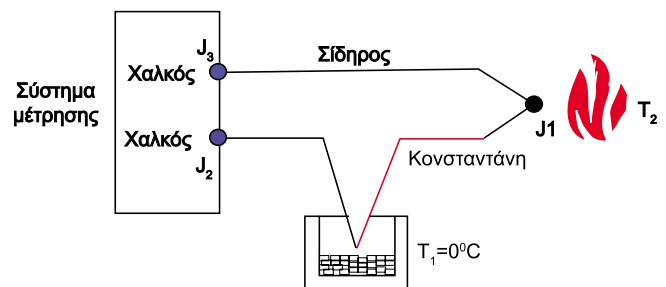


Σχήμα 5.36: Θερμοζεύγος με λουτρό πάγου στη επαφή αναφοράς.

Πίνακας 5.13: Τάσεις εξόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας με επαφή αναφοράς στους 0 °C για τύπο θερμοζεύγους E, T, J, K, R, και S.

Θερμοκρασία (°C)	T	E	J	K	R	S
-250	-6,181	-9,719		-6,404		
-200	-5,603	-8,824	-7,890	-5,891		
-150	-4,648	-7,279	-6,499	-4,912		
-100	-3,378	-5,237	-4,632	-3,553		
-50	-1,819	-2,787	-2,431	-1,889		
0	0	0	0	0	0	0
20	0,789	1,192	1,019	0,798	0,111	0,113
40	1,611	2,419	2,058	1,611	0,232	0,235
60	2,467	3,683	3,115	2,436	0,363	0,365
80	3,357	4,983	4,186	3,266	0,501	0,502
100	4,277	6,317	5,268	4,095	0,647	0,645
120	5,227	7,683	6,359	4,919	0,8	0,795
140	6,204	9,078	7,457	5,733	0,959	0,95
160	7,207	10,501	8,56	6,539	1,124	1,109
180	8,235	11,949	9,667	7,338	1,294	1,273
200	9,286	13,419	10,777	8,137	1,468	1,44
220	10,36	14,909	11,887	8,938	1,647	1,611
240	11,456	16,417	12,998	9,745	1,83	1,785
260	12,572	17,942	14,108	10,56	2,017	1,962
280	13,707	19,481	15,217	11,381	2,207	2,141
300	14,86	21,033	16,325	12,207	2,4	2,323
350	17,816	24,961	19,089	14,292	2,896	2,786
400	20,869	28,943	21,846	16,395	3,407 3	0,26
450		32,96	24,607	18,513	3,933	3,743
500		36,999	27,388	20,64	4,471	4,234
600		45,085	33,096	24,902	5,582	5,237
700		53,11	39,13	29,218	6,741	6,274
800		61,022	33,277	7,949	7,345	
900		68,873	37,325	9,203	8,448	
1000		76,358	41,269	10,503	9,585	
1100		45,108	11,846	10,754		
1200		48,828	13,224	11,947		
1300		52,398	14,624	13,155		
1400		16,035	14,368			
1500		17,445	15,576			
1600		18,842	16,771			
1700		0,215	17,942			

τάλλων γιατί επιτρέπει τη σύνδεση του αισθητήρα απευθείας με το σύστημα μέτρησης που φέρει χάλκινους ακροδέκτες ή με τους ακροδέκτες ενός βολτομέτρου. Στην περίπτωση όμως που ένα από τα δύο στοιχεία του θερμοζεύγους δεν είναι από υλικό χαλκού, όπως για παράδειγμα στο θερμοζεύγος σιδήρου - κωνσταντάνης, τότε δεν είναι επιτρεπτή η σύνδεση του αισθητήρα απευθείας με το σύστημα μέτρησης γιατί τα σημεία επαφής των χάλκινων ακροδεκτών με το υλικό του σιδήρου και της κον-

**Σχήμα 5.37:** Θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης.

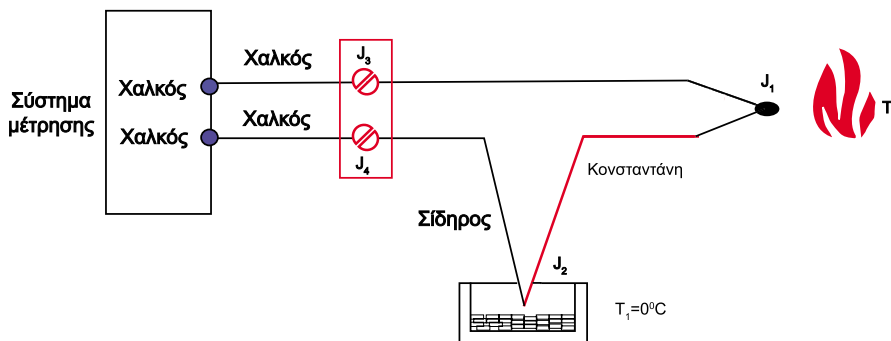
σταντάνης δημιουργούν νέες θερμοηλεκτρικές επαφές (Σχ. 5.37). Η ύπαρξη αυτών των θερμοηλεκτρικών επαφών μεταξύ χαλκού-σιδήρου J_3 και χαλκού-κωνσταντάνης J_2 στα σημεία σύνδεσης με το σύστημα μέτρησης ή με το βολτόμετρο δημιουργούν πηγές δυναμικού που προκαλούν σφάλμα στην πραγματική μέτρηση της θερμής επαφής.

Για τη βελτίωση του σφάλματος απαιτείται η απομάκρυνση των επαφών σύνδεσης J_2 και J_3 όπως στο Σχήμα 5.38. Το ισοδύναμο διάγραμμα των θερμοηλεκτρικών επαφών του Σχήματος 5.38 απεικονίζεται στο Σχήμα 5.39. Καθώς οι επαφές βρίσκονται μέσα σε ισοθερμική επαφή, για την οποία ισχύει ότι:

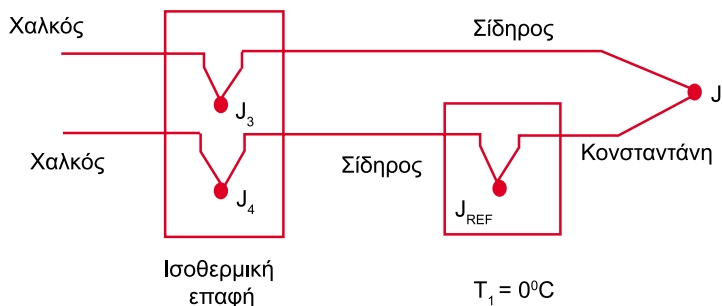
$$\frac{dT}{dx} = 0$$

δεν εμφανίζεται τάση Seebeck στα άκρα της, όποτε και η τάση στην είσοδο του συστήματος μέτρησης είναι:

$$dV = S \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{και επειδή} \quad T_1 = 0^\circ \text{C} \Rightarrow dV = S \cdot (T_2)$$



Σχήμα 5.38: Θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης με ισοθερμική επαφή και λουτρό πάγου.

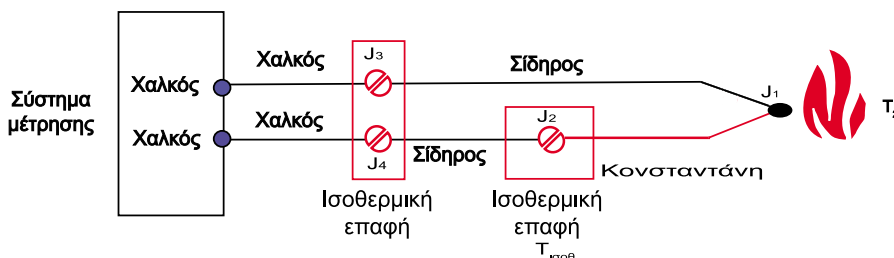


Σχήμα 5.39: Θερμοηλεκτρικό ισοδύναμο επαφών σιδήρου-κωνσταντάνης με ισοθερμική επαφή και λουτρό πάγου.

Στην πράξη για το λόγο ότι δεν είναι δυνατή η χρήση λουτρού πάγου για τη δημιουργία θερμοκρασίας αναφοράς του θερμοζεύγους, χρησιμοποιείται ισοθερμική επαφή αντί αυτού, όπως στο Σχήμα 5.40. Η χρήση της δεύτερης ισοθερμικής βάσης δημιουργεί τάση Seebeck στην είσοδο του συστήματος μέτρησης, η οποία από τη θερμοκρασία στο σημείο μέτρησης και τη θερμοκρασία της ισοθερμικής επαφής είναι:

$$dV = S \cdot (T_2 - T_{ισοθ.})$$

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.41 η χρήση πολλαπλών μεταλλικών στοιχείων (χαλκός-σίδηρος-κωνσταντάνη) μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης σφαλμάτων λόγω των πολλαπλών συνδέσεων. Η λύση



Σχήμα 5.40: Θερμοζεύγος σιδήρου-κωνσταντάνης με δύο ισοθερμικές επαφές.