

Μέρος 4^ο (*)

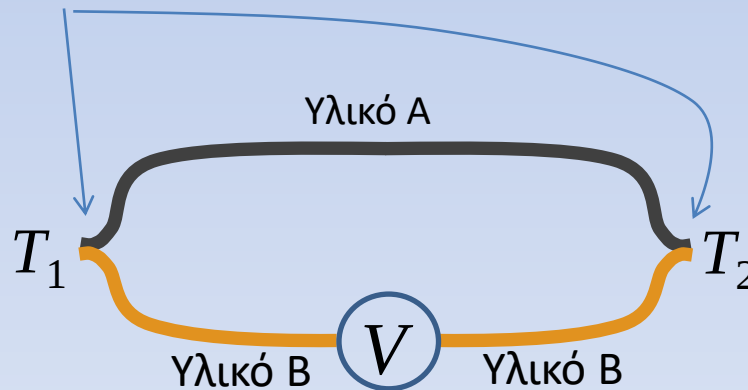
ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΖΕΥΓΟΣ

(*) Αντιστοιχεί στα κεφάλαια 3 (πργ. 3.5) του βιβλίου των Κ. Καλαϊτζάκη και Ε. Κουτρούλη
“Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες: Αρχές λειτουργίας και σχεδιασμός των
ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης”

Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο

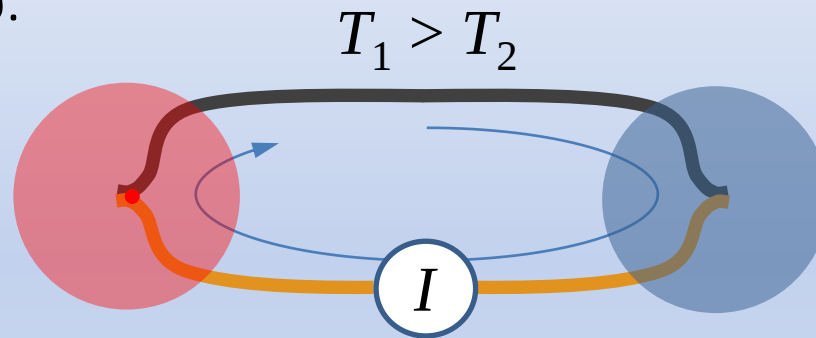
- Δύο σύρματα από διαφορετικά υλικά (μέταλλα ή κράματα μετάλλων), υλικό A και υλικό B, συνδέονται σε κύκλωμα, με τη μία επαφή τους (θερμοεπαφή) σε θερμοκρασία T_1 και την άλλη σε θερμοκρασία T_2
- Αν συνδέσουμε ένα βολτόμετρο (με πολύ μεγάλη αντίσταση), μετράμε μια ηλεκτρεγερτική δύναμη V (θερμοτάση)

Θερμοεπαφές
(Thermo junctions)



Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (συνέχεια)

- Αν συνδέσουμε ένα αμπερόμετρο θα μετρήσουμε ένα ρεύμα $I = \frac{V}{R_{ολ}}$ (θερμορεύμα)
- $R_{ολ}$ είναι η ολική αντίσταση του κυκλώματος των συρμάτων και του αμπερομέτρου.

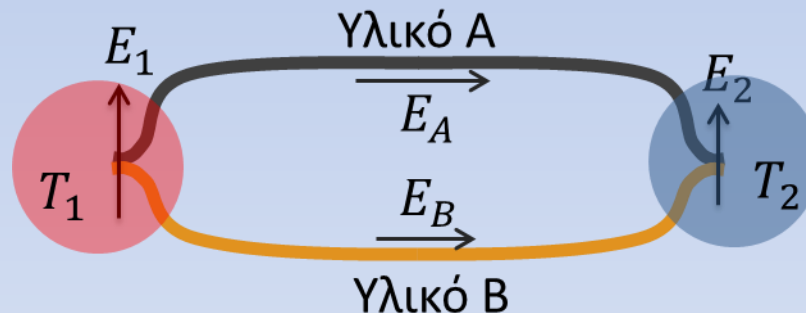


- Το θερμορεύμα είναι η ροή ηλεκτρονίων από τη θερμότερη επαφή T_1 προς την ψυχρότερη επαφή T_2 .
- Το θερμορεύμα οφείλεται στη συνεχή ροή θερμότητας από το περιβάλλον προς τα σύρματα.
- Τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζουμε **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (thermoelectric effect)**.

Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (συνέχεια)

Το θερμοηλεκτρικό ρεύμα οφείλεται σε μικρές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (ΗΕΔ) οι οποίες δημιουργούνται από δύο αρκετά διαφορετικά φαινόμενα, τα οποία προστίθενται αλγεβρικά:

- το **φαινόμενο Peltier (Peltier effect)**, ΗΕΔ στις επαφές των δύο υλικών (E_1 και E_2)
- το **φαινόμενο Thomson (Thomson effect)**, ΗΕΔ στα σύρματα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας των άκρων τους (E_A και E_B)



Η συνολική ΗΕΔ είναι
$$E = E_1 + E_A - E_2 - E_B$$

Επειδή το φαινόμενο Thomson είναι πολύ ασθενέστερο από το φαινόμενο Peltier, συνήθως το αγνοούμε.

Το Συνολικό Θερμοηλεκτρικό Φαινόμενο

Για ένα ορισμένο ζευγάρι μετάλλων, το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο εκφράζεται με την απλή σχέση

$$E = \theta_{12} \cdot \Delta T$$

Η σχέση μεταξύ τάσης (θερμοτάσης) E και της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT ονομάζεται **φαινόμενο Seebeck (Seebeck effect)**.

- Ο συντελεστής θ_{12} ονομάζεται **συντελεστής Seebeck** και εξαρτάται από τα δύο υλικά (μέταλλα) που σχηματίζουν την επαφή.
- Μονάδα συντελεστή Seebeck: $\frac{\text{Volts}}{\text{Kelvin}} \left(\frac{V}{K} \right)$ ή $\frac{\text{Volts}}{^{\circ}\text{C}} \left(\frac{V}{^{\circ}\text{C}} \right)$

Πίνακες Συντελεστών Seebeck διαφόρων υλικών στους 0°C

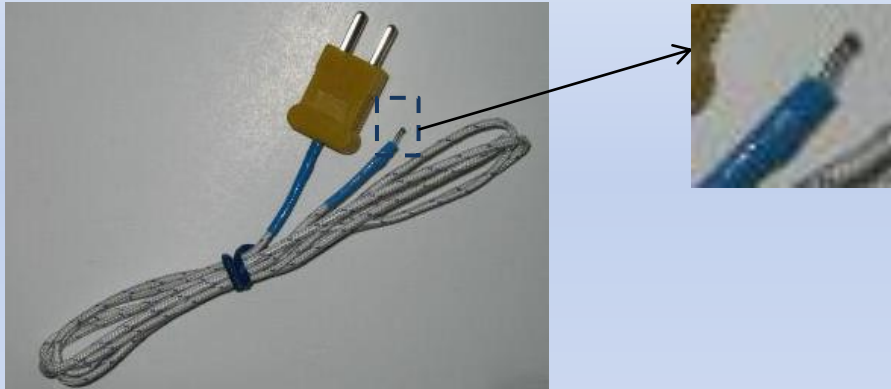
Metals	Seebeck Coefficient
	$\mu\text{V/K}$
Antimony	47
Nichrome	25
Molybdenum	10
Cadmium	7.5
Tungsten	7.5
Gold	6.5
Silver	6.5
Copper	6.5
Rhodium	6.0
Tantalum	4.5
Lead	4.0
Aluminum	3.5
Carbon	3.0
Mercury	0.6
Platinum	0
Sodium	-2.0
Potassium	-9.0
Nickel	-15
Constantan	-35
Bismuth	-72

Semiconductors	Seebeck Coefficient
	$\mu\text{V/K}$
Se	900
Te	500
Si	440
Ge	300
n-type Bi_2Te_3	-230
p-type $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$	300
p-type Sb_2Te_3	185
PbTe	-180
$\text{Pb}_{0.3}\text{Ge}_{3.9}\text{Se}_{5.8}$	1670
$\text{Pb}_{0.6}\text{Ge}_{3.6}\text{Se}_{5.8}$	1410
$\text{Pb}_{0.9}\text{Ge}_{3.3}\text{Se}_{5.8}$	-1360
$\text{Pb}_{1.3}\text{Ge}_{2.9}\text{Se}_{5.8}$	-1710
$\text{Pb}_{1.5}\text{Ge}_{3.7}\text{Se}_{5.8}$	-1990
SnSb_4Te_7	25
SnBi_4Te_7	120
$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
$\text{SnBi}_{2.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_7$	110
$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
PbBi_4Te_7	-53

Θερμοζεύγη

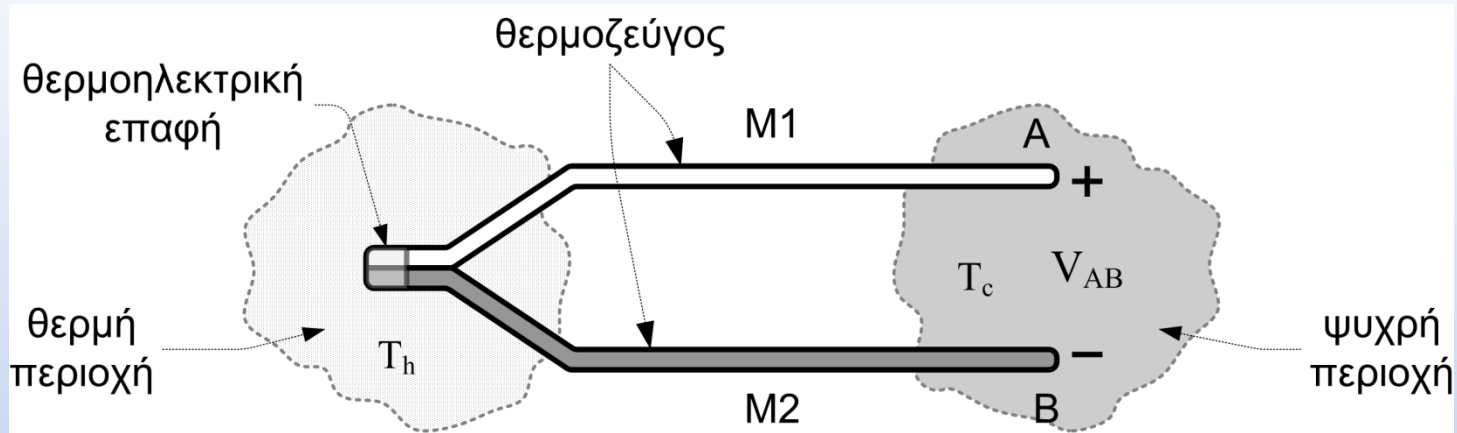
Τα **θερμοζεύγη (thermocouples)** είναι οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Αποτελούνται από δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα μετάλλων ή ημιαγωγούς, ενωμένα μεταξύ τους στο ένα τους άκρο.



Πηγή: <http://www.dubuque-forsale.com/OLD-ADS-FROM-PREVIOUS-YEARS/2004/September/K-type-thermocouple-temperature-sensor-hvac-tool-part.php>

ΗΕΔ του Θερμοζεύγους



$$V_{AB} = \theta_{12}(T_h - T_c)$$

- T_h είναι η θερμοκρασία της θερμοηλεκτρικής επαφής (θερμοκρασία που θέλουμε να μετρήσουμε)
- T_c είναι η θερμοκρασία της άλλης άκρης των αγωγών σύνδεσης και του βολτομέτρου και ονομάζεται **θερμοκρασία ψυχρής επαφής (cold junction)** ή **επαφή αναφοράς (reference junction)** και
- θ_{12} είναι ο συντελεστής Seebeck του θερμοζεύγους.
 - $\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$ η διαφορά των συντελεστών Seebeck των δύο μετάλλων M_1 και M_2 που αποτελούν το θερμοζεύγος

Πίνακας Συντελεστών Seebeck διαφόρων θερμοζευγών

Type	Couples	Seebeck Coefficient
		$\mu\text{V/K}$
E	Chromel-Constantan	60
J	Iron-Constantan	51
T	Copper-Constantan	40
K	Chromel-Alumel	40
N	Nicrosil-Nisil	38
S	Pt (10% Rh)-Pt	11
B	Pt (30% Rh)-Pt (6% Rh)	8
R	Pt (13% Rh)-Pt	12

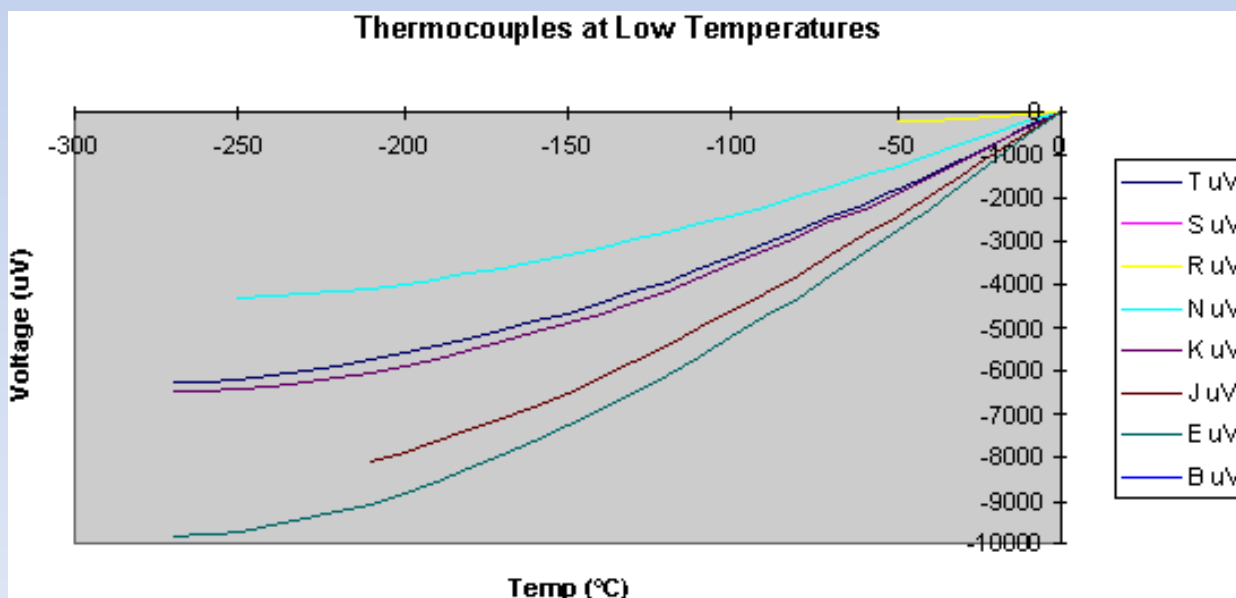
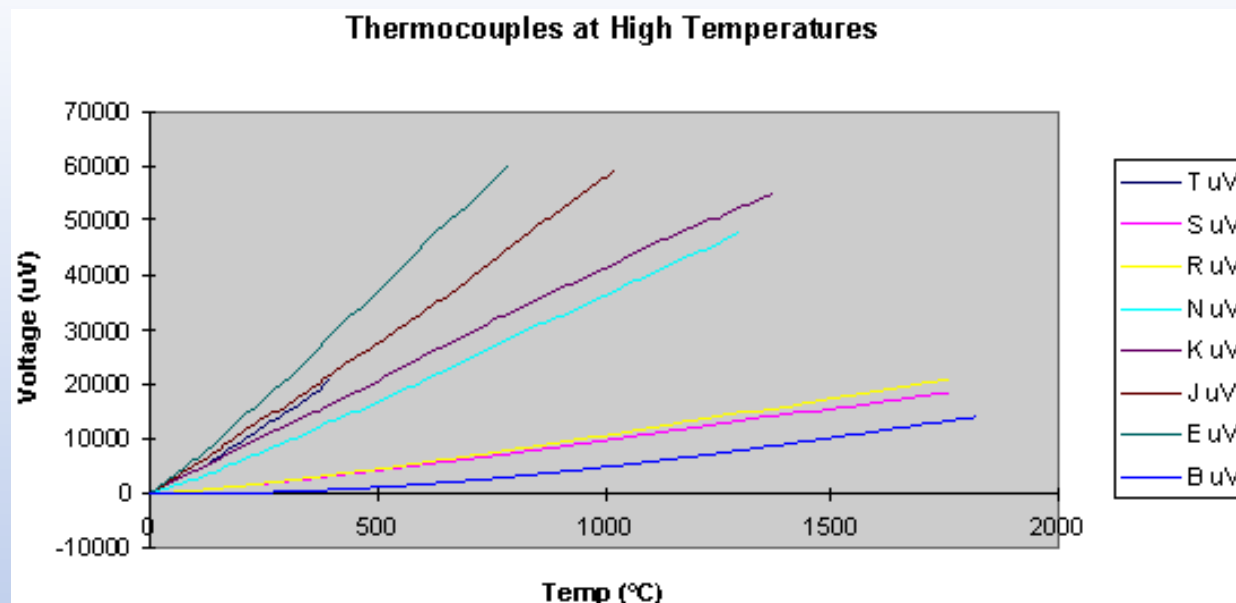
Πηγή: <http://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>

Θερμοκρασιακές κλίμακες (temperature ranges) και ακρίβεια των συνηθέστερων τύπων θερμοζευγών

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temp Range	Std. Limits of Error	Spec. Limits of Error
J	0°C to 750°C (32°F to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200°C to 1250°C (-328°F to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200°C to 900°C (-328°F to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250°C to 350°C (-328°F to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

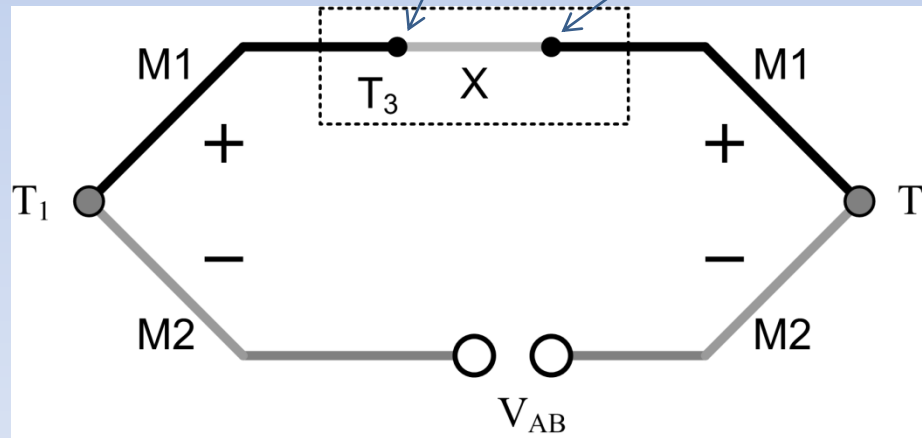
Πηγή: <http://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>

Τάση εξόδου θερμοζευγών ως προς τη θερμοκρασία



Οι θερμοηλεκτρικοί νόμοι

Νόμος των Ενδιάμεσων Μετάλλων (Law of Intermediate Metals). Η παρεμβολή ενός ενδιάμεσου μετάλλου (X) σε ένα κύκλωμα θερμοζεύγους των μετάλλων M1 και M2 δεν θα επηρεάσει τη συνολική ΗΕΔ με την προϋπόθεση οι δύο επαφές που εισάγονται από το τρίτο μέταλλο (επαφή X-M1 και επαφή X-M2) είναι στην ίδια θερμοκρασία (T_3)



Οι θερμοηλεκτρικοί νόμοι (συνέχεια)

Νόμος των Ενδιάμεσων Θερμοκρασιών (Law of Intermediate Temperatures). Αν ένα απλό κύκλωμα θερμοζεύγους αναπτύσσει μια ΗΕΔ E_1 , όταν οι επαφές του είναι σε θερμοκρασίες T_1 και T_2 και μια ΗΕΔ E_2 , όταν οι επαφές του είναι σε θερμοκρασίες T_2 και T_3 , θα αναπτύσσει μια ΗΕΔ $E_1 + E_2$ όταν οι επαφές του είναι σε θερμοκρασίες T_1 και T_3 .

Αυτό μας επιτρέπει

- να χρησιμοποιούμε πίνακες τιμών θερμοζευγών βασισμένους σε μια 'στάνταρ' θερμοκρασία (π.χ., 0°C) έστω και αν καμία επαφή δεν είναι σε αυτή την 'στάνταρ' θερμοκρασία (βλ. παράδειγμα παρακάτω)
- την άμεση διόρθωση της τιμής ενός θερμοζεύγους όταν η ψυχρή επαφή είναι σε μια γνωστή αλλά μη άμεσα ρυθμιζόμενη θερμοκρασία.

Θερμοηλεκτρική τάση θερμοζεύγους τύπου T σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας (°C), επαφή αναφοράς στους 0 °C (συνεχίζεται . . .)

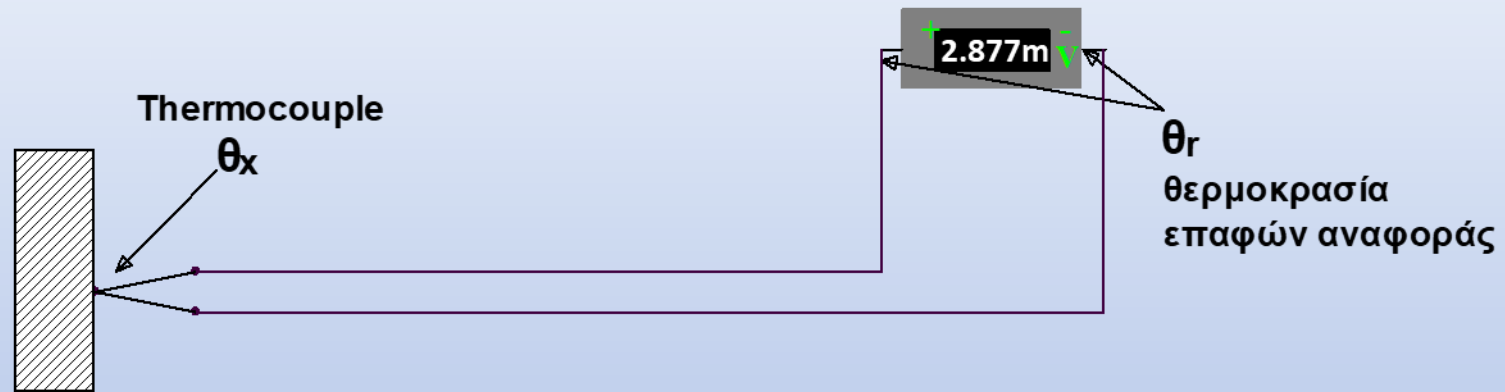
<https://digicoll.manoa.hawaii.edu/techreports/PDF/NBS125.pdf>

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.181	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.224	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.181
-230	-6.007	-6.018	-6.028	-6.039	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.889	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.889
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.522	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.315	-5.333	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.069	-5.089	-5.109	-5.128	-5.147	-5.167	-5.186	-5.205	-5.223	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.948	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.069
-150	-4.648	-4.670	-4.693	-4.715	-4.737	-4.758	-4.780	-4.801	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.442	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.603	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.299	-4.323	-4.347	-4.371	-4.395	-4.419
-120	-3.923	-3.949	-3.974	-4.000	-4.026	-4.051	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.656	-3.684	-3.711	-3.737	-3.764	-3.791	-3.818	-3.844	-3.870	-3.897	-3.923
-100	-3.378	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.656
-90	-3.089	-3.118	-3.147	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.321	-3.350	-3.378
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.909	-2.939	-2.970	-2.999	-3.029	-3.059	-3.089
-70	-2.475	-2.507	-2.539	-2.570	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.152	-2.185	-2.218	-2.250	-2.283	-2.315	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.475
-50	-1.819	-1.853	-1.886	-1.920	-1.953	-1.987	-2.020	-2.053	-2.087	-2.120	-2.152
-40	-1.475	-1.510	-1.544	-1.579	-1.614	-1.648	-1.682	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.263	-1.299	-1.334	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.903	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.458	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
- 0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383

Θερμοηλεκτρική τάση θερμοζεύγους τύπου T σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας (°C), επαφή αναφοράς στους 0 °C (... συνέχεια)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351	0.391
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.789
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569	1.611
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992	2.035
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424	2.467
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864	2.908
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312	3.357
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767	3.813
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231	4.277
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701	4.749
110	4.749	4.796	4.844	4.891	4.939	4.987	5.035	5.083	5.131	5.179	5.227
120	5.227	5.275	5.324	5.372	5.420	5.469	5.517	5.566	5.615	5.663	5.712
130	5.712	5.761	5.810	5.859	5.908	5.957	6.007	6.056	6.105	6.155	6.204
140	6.204	6.254	6.303	6.353	6.403	6.452	6.502	6.552	6.602	6.652	6.702
150	6.702	6.753	6.803	6.853	6.903	6.954	7.004	7.055	7.106	7.156	7.207
160	7.207	7.258	7.309	7.360	7.411	7.462	7.513	7.564	7.615	7.666	7.718
170	7.718	7.769	7.821	7.872	7.924	7.975	8.027	8.079	8.131	8.183	8.235
180	8.235	8.287	8.339	8.391	8.443	8.495	8.548	8.600	8.652	8.705	8.757
190	8.757	8.810	8.863	8.915	8.968	9.021	9.074	9.127	9.180	9.233	9.286
200	9.286	9.339	9.392	9.446	9.499	9.553	9.606	9.659	9.713	9.767	9.820
210	9.820	9.874	9.928	9.982	10.036	10.090	10.144	10.198	10.252	10.306	10.360
220	10.360	10.414	10.469	10.523	10.578	10.632	10.687	10.741	10.796	10.851	10.905
230	10.905	10.960	11.015	11.070	11.125	11.180	11.235	11.290	11.345	11.401	11.456
240	11.456	11.511	11.566	11.622	11.677	11.733	11.788	11.844	11.900	11.956	12.011
250	12.011	12.067	12.123	12.179	12.235	12.291	12.347	12.403	12.459	12.515	12.572
260	12.572	12.628	12.684	12.741	12.797	12.854	12.910	12.967	13.024	13.080	13.137
270	13.137	13.194	13.251	13.307	13.364	13.421	13.478	13.535	13.592	13.650	13.707

Πρόβλημα 4α.1: Ας υποθέσουμε μια διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας με χρήση ενός θερμοζεύγους (thermocouple) τύπου T (χαλκός-κονσταντάνη) συνδεδεμένου σε ένα βολτόμετρο το οποίο δίνει μια ένδειξη 2.877 mV. Η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το βολτόμετρο είναι η θερμοκρασία δωματίου, 20°C. Ποια είναι η άγνωστη θερμοκρασία θ_x που μετρά το θερμοζεύγος.



Απάντηση

Η ένδειξη του βολτομέτρου δείχνει την τάση του θερμοζεύγους με αναφορά στους 20°C. Ας την πούμε E_{20} . Είναι $E_{20} = 2.877 \text{ mV}$

Ο πίνακας τιμών του θερμοζεύγους μας δίνει την τάση του με αναφορά στους 0°C. Ας την πούμε E_0 .

Χρησιμοποιώντας το νόμο των ενδιάμεσων θερμοκρασιών, έχουμε

$$E_0 = E_{20} + E_{20_0}$$

όπου, E_{20_0} η τάση του θερμοζεύγους στους 20°C με αναφορά στους 0°C. (συνεχίζεται ...)

Απάντηση (... συνέχεια)

Έχουμε $E_0 = E_{20} + E_{20_0}$

όπου, $E_{20} = 2.877 \text{ mV}$

οπότε: $E_0 = 2.877 \text{ mV} + E_{20_0}$

Από τον πίνακες για το θερμοζεύγος (βλ. προηγ. σελίδες),

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS											
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351	0.391
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.789
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569	1.611
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.865	1.907	1.950	1.992	2.035
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424	2.467
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864	2.908
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312	3.357
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767	3.813
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231	4.277

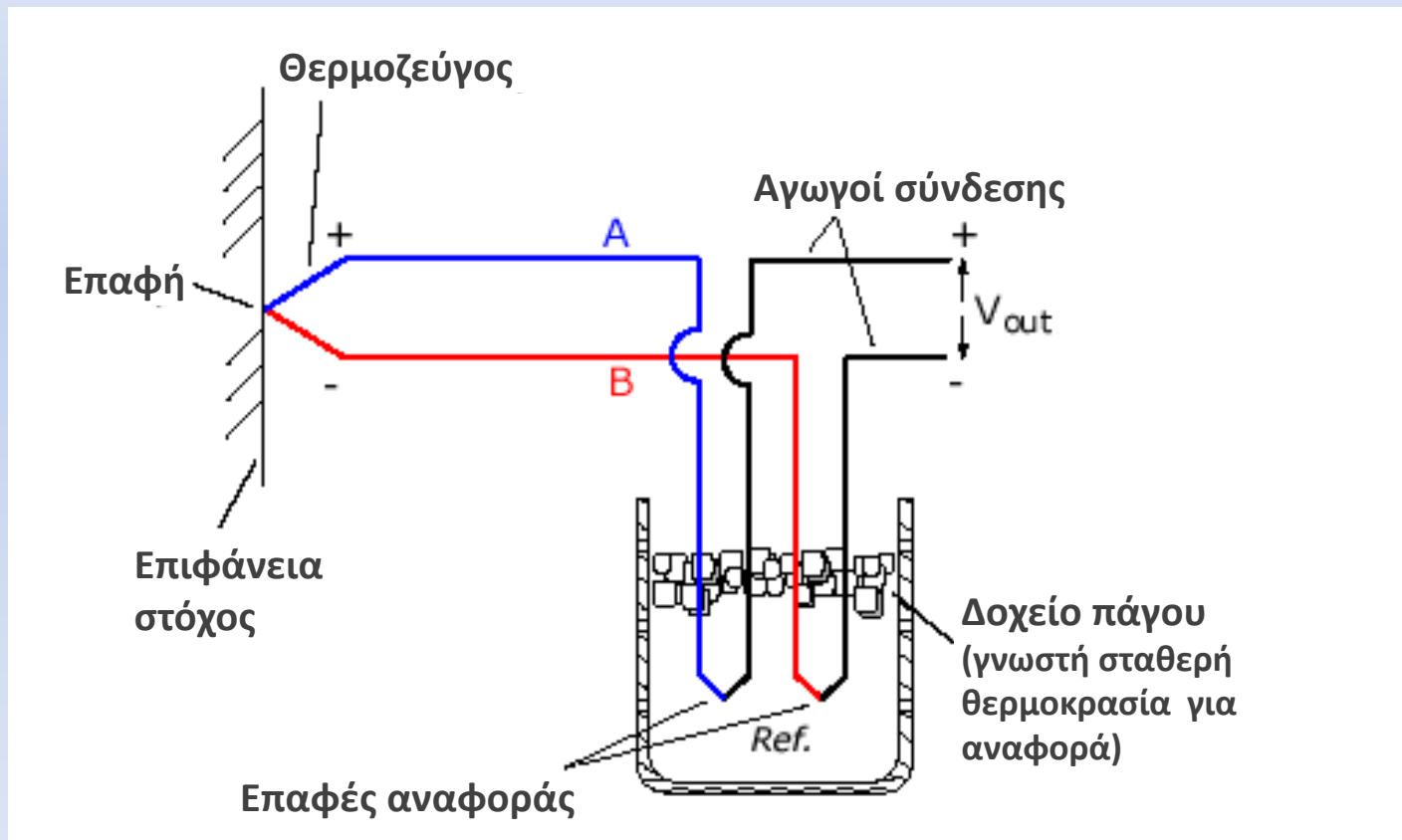
βρίσκουμε $E_{20_0} = 0.789 \text{ mV}$

Οπότε, $E_0 = 2.877 + 0.789 = 3.666 \text{ mV}$ που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία $\theta_x \cong 86^\circ\text{C}$

Θερμοκρασία Αναφοράς

Για να πάρουμε την ένδειξη της απόλυτης θερμοκρασίας T_x , χρειάζεται μια γνωστή **θερμοκρασία αναφοράς (reference temperature)** στην ψυχρή επαφή T_c

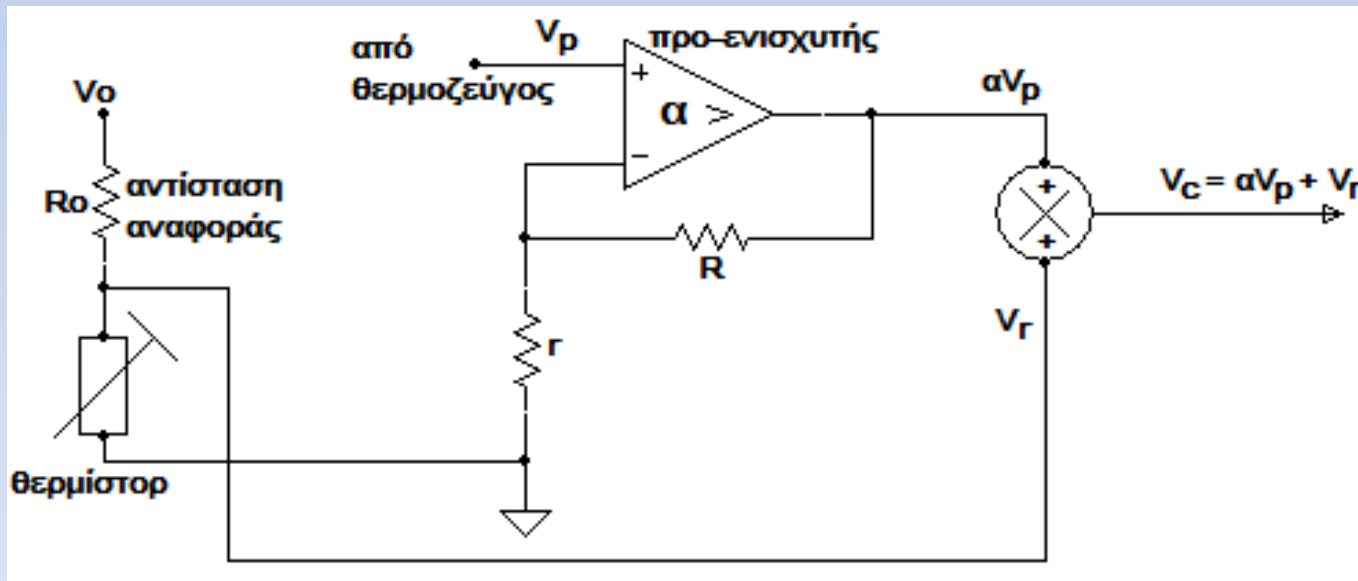
$$V_{out} = \theta_{12} \cdot (T_x - T_{Ref})$$



Ηλεκτρονική Αντιστάθμιση της Θερμοκρασίας Αναφοράς

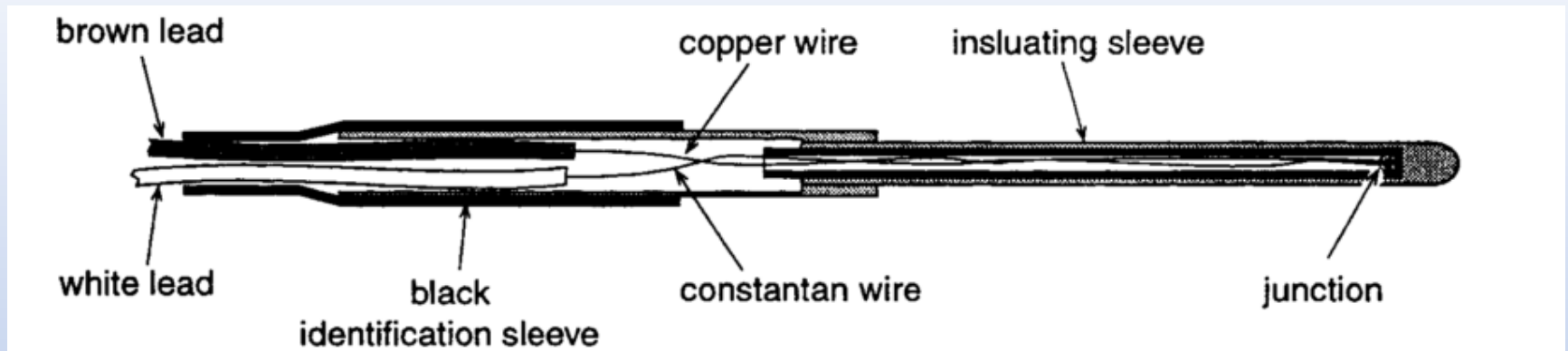
- Η χρήση δοχείου πάγου είναι κατάλληλη μόνο μέσα στο εργαστήριο.
- Σε βιομηχανικό περιβάλλον, η θερμοκρασία αναφοράς είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετριέται με ένα αισθητήριο αναφοράς (π.χ., θερμίστορ).
- Η τάση από το θερμοζεύγος (V_p) και η τάση του θερμίστορ (V_r) προστίθενται για να πάρουμε μια συνδιασμένη τάση εξόδου V_c .
- Το κέρδος (α) του ενισχυτή του θερμοζεύγους επιλέγεται ώστε να εξισώνονται οι ευαισθησίες των τάσεων εξόδου V_p και V_r .

Κύκλωμα ηλεκτρονικής αντιστάθμισης θερμοκρασίας αναφοράς*



Η Συσκευασία του Θερμοζεύγους τύπου T (Χρώμιο-Κωνσταντάνη*)

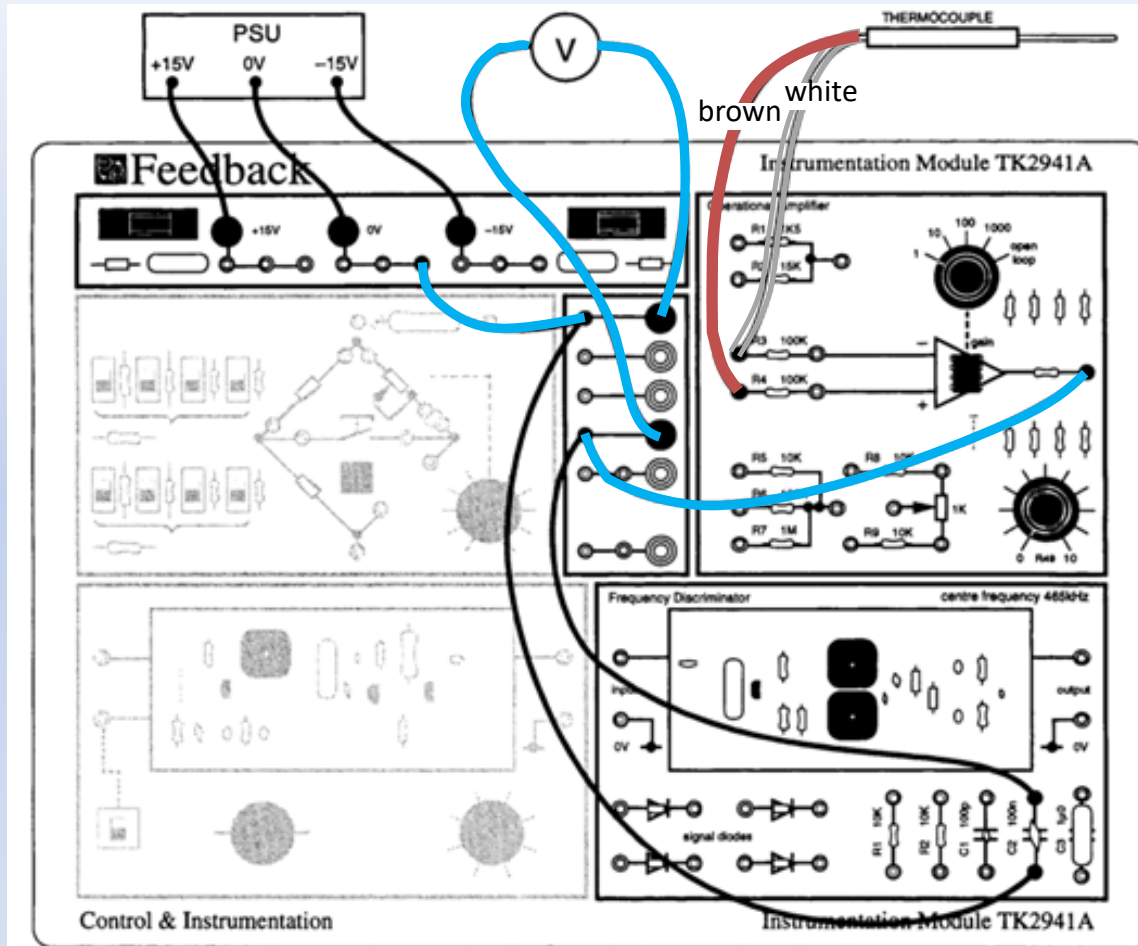
(Εργαστηριακή Άσκηση 19)



- Η πραγματική θερμή επαφή (junction) του θερμοζεύγους συνήθως δεν φαίνεται διότι είναι κλεισμένη σε μια προστατευτική μονωτική θήκη (insulating sleeve), αλλά, σχηματίζεται από σύρμα χαλκού (copper wire) και σύρμα κωνσταντάνης (constantan wire).
- Ο εύκαμπτος αγωγός, που βγαίνει από το θερμοζεύγος, συνδέεται με τα άκρα των δύο συρμάτων του ζεύγους μέσα σε μια λαστιχένια θήκη που έχει ενδεικτικά μαύρο χρώμα (black identification sleeve).
- Το λευκό καλώδιο (white lead) και το καφέ καλώδιο (brown lead), που βγαίνουν, έχουν χρώματα σύμφωνα με τους Πρότυπους Βρετανικούς Χρωματικούς Κώδικες (British Standard Colour Codes, BS4937/1993) και δείχνουν ότι είναι, αντίστοιχα:
 - +Ve: Καφέ (Brown): Χαλκός (Copper)
 - Ve: Λευκό (White): Κωνσταντάνη (Constantan)

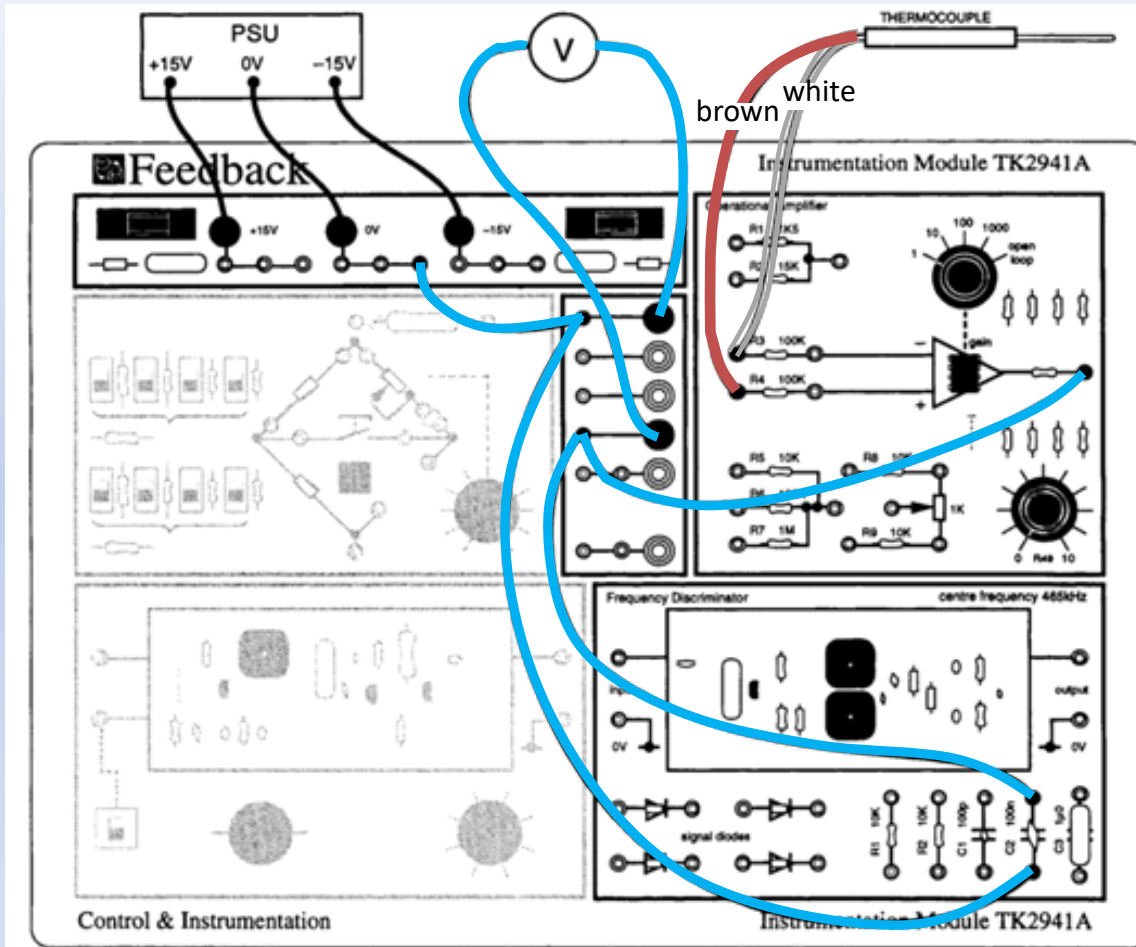
* Κωνσταντάνη (Constantan): είναι κράμα χαλκού (copper)-νικελίου (nickel)

Μέρος 1: Θερμοζεύγος – Η συνδεσμολογία



1. Συνδέστε το θερμοζεύγος (THERMOCOUPLE) στον τελεστικό ενισχυτή μέσω των 100kΩ αντιστάσεων R3 και R4. Τον λευκό αγωγό (white) στην αναστρέφουσα (-) και τον καφέ(brown) στη μη-αναστρέφουσα είσοδο (+).
2. Συνδέστε ένα βολτόμετρο μεταξύ της εξόδου του ενισχυτή και των 0 V.
3. Ανοίγουμε το τροφοδοτικό (PSU) και φέρνουμε το θερμοζεύγος δίπλα την είσοδο του τελεστικού ενισχυτή ώστε να είναι στην ίδια θερμοκρασία.

Μέρος 1: Θερμοζεύγος – Η συνδεσμολογία



4. Για να αποφύγουμε πιθανό θόρυβο λόγω της εγγύτητας των αγωγών του θερμοζεύγους (white, brown) στον ταλαντωτή TK2941A, παρεμβάλουμε μεταξύ της μη-αναστρέφουσας εισόδου (+) του τελεστικού ενισχυτή και της γείωσης του τροφοδοτικού (0 V) τον πυκνωτή C2 των 100pF

Με αυτή τη 'γέφυρα', ο θόρυβος της εξόδου του ενισχυτή (είναι υψηλής συχνότητας τάση/ρεύμα) βραχυκυκλώνεται μέσω του πυκνωτή και επιστρέφει στη γείωση (δεν περνάει στο βολτόμετρο)