



الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

تطوير أداء المزدوجات الحرارية عن طريق تحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الإلكترونيات التطبيقية

إعداد

الطالب حيدر رضوان

المشرف المشارك

أ.د.م عبد الكريم السالم

المشرف العلمي

أ.د.م عبد الرزاق البدوية

العام الدراسي

2023-2022

صفحة قرار الحكم مع توقيع اللجنة

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرّح بعلمي الكامل وقبولي :

1. أنّ كل ما ينتج عن البحث والرسالة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق ، وإنّني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتني بنشر البحث والأطروحة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع إلكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2. أنّه لا يوجد أي جزء من هذه الرسالة مقتبس عن عمل آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل الجمهورية العربية السورية أو خارجها.

الاسم والتوقيع

حيدر رضوان

كلمة شكر وتقدير

Gratitude

أَتَقَدِّمُ بِجَزِيلِ الشُّكْرِ وَعَظِيمِ الْاِمْتِنَانِ إِلَى الْأُسْتَاذِ الدُّكْتُورِ عَبْدِ الرَّزَّاقِ الْبَدْوِيِّ عَلَى اِهْتِمَامِهِ الْبَالِغِ وَمَعْلُومَاتِهِ الثَّمِينَةِ، وَارْشَادَاتِهِ الْمُسْتَمِرَّةِ لِإِنْجَاحِ هَذَا الْبَحْثِ.

وَأَتَوَجَّهُ بِجَزِيلِ الشُّكْرِ وَالْاِمْتِنَانِ إِلَى الْأُسْتَاذِ الْمَشَارِكِ الْأُسْتَاذِ الدُّكْتُورِ عَبْدِ الْكَرِيمِ السَّالِمِ لِدَعْمِهِ الْمُسْتَمِرِّ وَمُسَانَدَتِي دَائِمًا لِإِنْجَاحِ هَذَا الْبَحْثِ.

وَأَتَقَدِّمُ بِالشُّكْرِ الْكَبِيرِ إِلَى رَئِيسِ قِسْمِ الْإِلِكْتُرُونِيَّاتِ وَالْاِتِّصَالَاتِ الدُّكْتُورِ نَضَالِ زَيْدَانَ عَلَى الدَّعْمِ الْكَبِيرِ الَّذِي قَدَّمَهُ لِي.

وَأَوَجِّهُ جَزِيلَ الشُّكْرِ وَالتَّقْدِيرِ إِلَى الدُّكَاثِرَةِ الْعِظْمَاءِ كَافَّةً الَّذِينَ لَمْ يَتَوَانُوا فِي تَقْدِيمِ الْخَبْرَةِ وَالْمَعْرِفَةِ لِي أَثْنَاءَ دِرَاسَتِي.

الإهداء

إلى معلمي الأول الذي حصد الأشواك وجعل من جسده جسراً ليمهد لي طريق العلم، إلى أبي الذي تعب وبذل مجهوداً ورحل قبل أن يقطف ثمار الزرع ويعانق هذا النجاح.

والدي الغالي (رحمك الله)

إلى تلك الإنسانية العظيمة التي تمنّنت أن تفرح عينها في يوم تخرجني، إلى التي يحتضنها التراب قبل أن تتحقق أمنيتها إلى سر قوتي وعزيمتي إلى أمي رحمها الله أهدي تخرجني ونجاحي إليها.

والدتي الغالية (رحمك الله)

إلى رفيقة الدرب وشمعة الحياة وصديقة الأيام جميعاً بخلوها ومرّها، زوجتي الغالية أهديكي هذا البحث تعبيراً عن شكري لدعمك المستمر.

بتول علي طويشة

إلى الأعراء على قلبي الذين وقفوا إلى جانبي بكل محبة، إلى نجوم سمائي المتلألئة وسندي في الحياة للتغلب على الصعوبات....

إخوتي شادي - عيسى - زكريا

إلى أخواتي اللواتي لم تلدهم أمي، إلى اللواتي مضى العمر بي معهم وشاركوني لحظات فرح وحزن، إلى من وقفوا إلى جانبي حتى أحقق طموحي العلمي.

فايزة سرحان - شذى بشماني

إلى الإضافة الحلوة والرائعة إلى عائلتنا، إلى صاحبة الروح اللطيفة التي دخلت القلب دون لقاء، إلى التي أثبتت لي جمال هدايا القدر.

وداد محمد أبو الشملات

إلى أساتذتي الكرام إلى كل من ساهم ولو بكلمة بسيطة في وصولي إلى ما وصلت إليه.

إلى أصدقائي وزملائي كافة، وإلى من يحتاج إلى هذا العمل.....

فهرس المحتويات

2	 صفحة قرار الحكم مع توقيع اللجنة
3	 تصريح خطي
4	 صفحة شكر وتقدير
5	 الإهداء
6	 فهرس المحتويات
10	 فهرس الأشكال
12	 فهرس الجداول
13	 Terminology and Abbreviations List قائمة المصطلحات والاختصارات
15	 المستخلص
17	 Abstract المستخلص الإنكليزي
19	 General Framework of the Research الفصل الاول الإطار العام للبحث
20	 1.1 مقدمة
20	 2.1 بعض الدراسات السابقة
24	 3.1 مشكلة البحث
24	 4-1 هدف البحث
24	 5-1 أهمية البحث
25	 6-1 مسوغات البحث
25	 7-1 محدّدات البحث
25	 8-1 حدود البحث
26	 9-1 منهج البحث وأدواته
27	 10-1 بنية الرسالة
29	 Thermocouples الفصل الثاني المزدوجات الحرارية
30	 1.2 مقدمة
30	 Thermocouples 2.2 المزدوجات الحرارية

31	.....	3.2 مبدأ عمل المزدوجات الحرارية
33	.....	4.2 مزايا المزدوجات الحرارية
33	.....	1.4.2 مجال درجة الحرارة
34	.....	2.4.2 المتانة
34	.....	3.4.2 الاستجابة السريعة
34	.....	4.2.4 عدم التسخين الذاتي
34	.....	5.2 أنواع المزدوجات الحرارية
35	.....	6.2 خلاصة الفصل الثاني
36	.....	الفصل الثالث تعويض الوصلة الباردة Cold Junction Compensation
37	.....	1.3 مقدمة
40	.....	2.3 تعويض الوصلة الباردة كهربائياً
40	.....	3.3 طرائق تعويض الوصلة الباردة
40	.....	1.3.3 الثرمستورات Thermistors
41	.....	2.3.3 كاشف درجة حرارة المقاومة
42	.....	3.3.3 الثنائيات الحرارية Thermal Diodes
42	.....	4.3.3 حساس درجة الحرارة المتكامل
42	.....	4.3 صعوبات القياس بالمزدوجات الحرارية
43	.....	1.4.3 إشارة الجهد صغيرة
44	.....	2.4.3 إشارة الجهد غير خطية
47	.....	1.2.4.3 الشبكات العصبونية الصناعية
47	.....	2.2.4.3 النموذج الأول الشبكات العصبونية الصناعية (ANN)
49	.....	3.2.4.3 النموذج الثاني الشبكات العصبونية الصناعية (MLP)
52	.....	3.4.3 متطلّبات التأريض
54	.....	4.4.3 القابلية للتآكل
54	.....	5.4.3 التأثير بالضجيج
54	.....	5.3 خلاصة الفصل الثالث

55	 الفصل الرابع الدراسة العملية
56	 1.4 مقدمة
57	 2.4 الدارة المتكاملة IC MAX6675
57	 1.2.4 المواصفات العامة General Description
57	 2.2.4 التطبيقات Applications
57	 3.2.4 مكوّنات الأرجل Pin Configuration
58	 4.2.4 دارة التطبيق النموذجية
59	 5.2.4 توصيف الأرجل
59	 6.2.4 الوصف التفصيلي لدارة MAX6675
60	 7.2.4 تحويل درجة الحرارة
60	 8.2.4 تعويض الوصلة الباردة Cold Junction Compensation
61	 9.2.4 معلومات التطبيق
63	 10.2.4 مزدوجة حرارية مفتوحة Open Thermocouple
63	 11.2.4 اعتبارات الضجيج Noise Considerations
63	 12.2.4 اعتبارات حرارية Thermal Considerations
64	 13.2.4 تقليل تأثير ضجيج الالتقاط
64	 14.2.4 البنية الداخلية لدارة MAX6675
66	 3.4 المخطّط التفصيلي والتنفيذ العملي والنتائج
67	 1.3.4 منحنى جهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة
68	 2.3.4 الخطأ المطلق لجهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة
69	 3.3.4 جهد الخرج الناتج من عمليات القياس مقابل درجة الحرارة
70	 4.3.4 الخطأ المطلق لجهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة
71	 5.3.4 مقارنة الخطأ النسبي لجهد الخرج المعياري وعمليات القياس مقابل درجة الحرارة ..
73	 4.4 مناقشة النتائج
75	 5-4 الخاتمة
76	 الآفاق المستقبلية

77	 المراجع
80	 الملحق 1 العتاديات المستخدمة في عمليات القياس
81	 الملحق 2 الجدول المعياري ITS-90 للمزدوجة الحرارية من النوع K مع معاملات سيببك

فهرس الأشكال

31	.....	المزدوجة الحرارية	الشكل (1-2)
32	.....	أثر سيبيك Seebeck Effect	الشكل (2-2)
37	.....	دارة مزدوجة حرارية حديد - كونستنتان أساسية	الشكل (1-3)
41	.....	الترمستور NTC	الشكل (2-3)
41	.....	الترمستور PTC	الشكل (3-3)
41	.....	عناصر حساس درجة الحرارة RTD	الشكل (4-3)
42	.....	حساس درجة حرارة ورطوبة متكامل	الشكل (5-3)
45	.....	معامل سيبيك المزدوجة الحرارية مقابل درجة الحرارة	الشكل (6-3)
47	.....	مخطط تفصيلي لحساس درجة الحرارة المقترح	الشكل (7-3)
48	.....	بنية الشبكة العصبونية الصناعية ANN	الشكل (8-3)
		عناصر من المتجه F مقابل درجة حرارة الوصلة الساخنة من أجل	الشكل (9-3)
48	.....	$T_{ref} = 30^{\circ}C$	
		عناصر من المتجه F مقابل درجة حرارة الوصلة الباردة من أجل	الشكل (10-3)
49	.....	$T_{hot} = 100^{\circ}C$	
50	.....	تكييف إشارة المزدوجة الحرارية باستخدام الشبكة العصبونية NN	الشكل (11-3)
50	.....	بنية الشبكة العصبونية MLP	الشكل (12-3)
51	.....	بنية الشبكة العصبونية للمزدوجة الحرارية نوع ل	الشكل (13-3)
51	.....	خطأ تدريب الشبكة العصبونية للمزدوجة الحرارية نوع ل	الشكل (14-3)
		مخططات خطأ التعميم للمزدوجة الحرارية من النوع ل لأداء الشبكات	الشكل (15-3)
52	.....	العصبونية.....	
53	.....	أنواع وصلة القياس للمزدوجات الحرارية	الشكل (16-3)
53	.....	خيارات التأريض عند استخدام أنواع أطراف مختلفة	الشكل (17-3)

58	.....	مكونات أرجل MAX6675	الشكل (1-4)
58	.....	دارة التطبيق النموذجية ل MAX6675	الشكل (2-4)
62	.....	برتوكول الواجهة التسلسلية	الشكل (3-4)
63	.....	خرج SO	الشكل (4-4)
65	.....	البنية الداخلية ل MAX6675	الشكل (5-4)
66	.....	المخطط الصندوقي للدارة المقترحة	الشكل (6-4)
67	.....	منحني جهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة	الشكل (7-4)
68	.....	الخطأ المطلق لجهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة	الشكل (8-4)
69	.....	منحني جهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة	الشكل (9-4)
70	.....	الخطأ المطلق لجهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة	الشكل (10-4)
		مقارنة الخطأ النسبي لجهد الخرج المعياري وعملية القياس مقابل درجة الحرارة	الشكل (11-4)
71	.....	الحرارة	
74	.....	الخطأ المطلق لجهد خرج المزدوجة الحرارية مقابل درجة الحرارة	الشكل (12-4)
75		الخطأ المطلق لجهد خرج المزدوجة الحرارية الناتج مقابل درجة الحرارة	الشكل (13-4)

فهرس الجداول

الجدول (1-2)	أنواع المزدوجات الحرارية ومجال درجة الحرارة لكل نوع	33
الجدول (2-2)	أنواع المزدوجات الحرارية الأساسية ورموزها وتركيبها الكيميائي وأسمائها التجارية	35
الجدول (1-3)	العلاقة بين درجة الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية للمزدوجات المختلفة المستخدمة لتصحيح درجة حرارة الوصلة الباردة	39
الجدول (2-3)	تغيرات الجهد مقابل ارتفاع درجة الحرارة (معامل سيبيك) لأنواع عدّة من المزدوجات الحرارية عند درجة حرارة 25°C	43
الجدول (1-4)	النتائج والفرق بين جهد عمليات القياس والجهد المعياري لبعض درجات الحرارة المدروسة	72
الجدول (2-4)	مقارنة نتائج الدراسة المقترحة مع بعض الدراسات المرجعية	73

قائمة المصطلحات والاختصارات Terminology and Abbreviations List

المصطلح الإنكليزي	الاختصار	المترادف باللغة العربية
Thermocouples	TC	المزدوجات الحرارية
Cold Junction Compensation	CJC	تعويض الوصلة الباردة
Reference Junction Compensation	RJC	تعويض التقاطع المرجعي
National Institute of Standards and Technology	NIST	المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا
Negative Temperature Coefficient	NTC	معامل درجة الحرارة السالب
Positive Temperature Coefficient	PTC	معامل درجة الحرارة الموجب
Artificial Neural Network	ANN	الشبكة العصبونية الصناعية
Serial Peripheral Interface	SPI	الواجهة الطرفية التسلسلية
Thermo-Electromotive Force	EMF	القوة المحركة الكهروحرارية
Analog To Digital Converter	ADC	محول من تشابهي إلى رقمي
Least Significant Bit	LSB	البت الأقل علامة
Most Significant Bit	MSB	البت الأكثر علامة
Heating, Ventilating, and Air Conditioning	HVAC	التدفئة والتهوية وتكييف الهواء
Clock Pin	SCK	منفذ الساعة
Chip Select	CS	انتخاب الرقاقة
Serial Output	SO	خرج تسلسلي
Resistance Temperature Detector	RTD	كاشف درجة حرارة المقاومة
Temperature Ambient	TAMB	درجة حرارة البيئة المحيطة
Neural Network	NN	شبكة عصبونية
Multilayer Perceptron	MLP	بيرسيبترون متعدد الطبقات
Negative Side Input	T-	دخل الطرف السالب للمزدوجة

Positive Side Input	T+	دخل الطرف الموجب للمزدوجة
Internet of Things	IOT	إنترنت الأشياء
Hot Junction		الوصلة الساخنة
Reference Junction		النقاط المرجعي
Seebeck Effect		أثر سيبيك
Seebeck Coefficient		معامل سيبيك
Thermal Diode		ثنائي حراري
Robust		المتانة
Rapid response		الاستجابة السريعة
No self-heating		عدم التسخين الذاتي
Insulated Thermocouple		مزدوجة حرارية ذات وصلة قياس معزولة
Grounded Thermocouple		مزدوجة حرارية ذات وصلة قياس مؤرضة
Exposed Thermocouple		مزدوجة حرارية ذات وصلة قياس مكشوفة
Susceptibility to Corrosion		القابلية للتآكل
Susceptibility to Noise		التأثر بالضجيج
Appliances		الأجهزة المنزلية

المستخلص باللغة العربية Arabic Abstract

خلفية البحث:

تستخدم المزدوجات الحرارية على نطاق واسع كحساسات لدرجة الحرارة في الإعدادات الصناعية وكذلك المخبرية نظراً لتكلفتها المنخفضة وسهولة استخدامها واستقرارها على مجال واسع من درجات الحرارة. مع ذلك تنشأ القيود والتحديات في شكل تعويض الوصلة الباردة واللاخطية للقوة المحركة الكهروحرارية للمزدوجة الحرارية ودرجة الحرارة.

هدف البحث:

يقترح هذا البحث دائرة تكييف إشارة المزدوجة الحرارية بالاعتماد على دائرة MAX6675 التي تؤدي المهمة المزدوجة لتحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة.

المواد والطرائق:

يتم تحسين الخطية باستخدام الدائرة المتكاملة IC MAX6675، ويُجرى تعويض الوصلة الباردة باستخدام ثنائي حراري لمحاكاة الجهد الناتج عن المزدوجة الحرارية في درجات حرارة مختلفة عن 0°C . أُجريت عملية المحاكاة باستخدام برنامج محاكاة الدارة /Matlab/ .

أُعتمد في هذا البحث على المزدوجة الحرارية من النوع K {مكون من (نيكل-كروم) و(نيكل-ألومنيوم) } .
وضمن مجال درجة حرارة ($0-750^{\circ}\text{C}$).

النتائج العملية:

جرى فحص اللاخطية وتغير جهد الخرج لدارة تكييف الإشارة مع درجة الحرارة، وأظهرت النتائج باستخدام برمجية Matlab تحسناً واضحاً في الخطية والدقة، إذ بلغت قيمة الخطأ النسبي والانحراف عن الخطية في أسوأ حالة (0.33%) .

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:

اعتماداً على النتائج التي خرج بها هذا البحث تُعدّ الدارة المقترحة بالاعتماد على دارة MAX6675 دارة مناسبة لتكييف إشارة المزدوجة الحرارية من النوع K وتحسين خطيتها بعد تعويض الوصلة الباردة. ويمكن العمل على تطوير هذه الدارة من أجل تحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة لأنواع عدّة من المزدوجات الحرارية.

الكلمات المفتاحية:

المزدوجات الحرارية، حسّاسات درجة حرارة، تعويض الوصلة الباردة، دارة متكاملة MAX6675، الخطية، ثنائي حراري.

المستخلص باللغة الإنكليزية English Abstract

Research Background:

Thermocouples are widely used as temperature sensors in industrial as well as laboratory setting due to their low cost, ease of use, and stability over a wide temperature range. However limitations and challenges arise in the form of cold junction compensation and nonlinearity of the thermocouple's electromotive force (emf) and temperature.

Aim of Research:

This research proposes a thermocouple signal conditioning circuit based on the MAX6675 circuit that performs the dual task of improving linearity and cold junction compensation.

Materials and Methods:

Linearity is improved using the IC MAX6675, and cold junction compensation is performed using a thermal diode to simulate the voltage generated by the thermocouple at temperatures other than 0 °C.

The simulation process was carried out using MATLAB circuit simulation software.

In this research, a thermocouple of type K { consisting of (nickel – chromium) and (nickel – aluminum) has been worked on within a temperature range of (0–750 °C).

Practical Results:

The nonlinearity and output voltage changes of the signal conditioning circuit and temperature were investigated. The results using MATLAB software showed

a clear improvement in linearity and accuracy. The value of relative error and deviation from linearity in the worst case was (0.33%).

Conclusions from Researcher's point of view:

Based on the results of the research, the proposed circuit based on MAX6675 circuit is suitable for adapting the K-type thermocouple signal and improving its linearity after cold junction compensation. This circuit can be developed to improve linearity and cold junction compensation for several types of thermocouples.

Keywords:

Thermocouples, Temperature sensors, Cold junction compensation, IC MAX6675, Linearity, Thermal diode.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

General Framework of the Research

1-1 مقدمة:

تُعدّ درجة الحرارة من التغيرات المهمة في الصناعات الآلية والسلع الاستهلاكية والإنتاجية، إذ يشمل قياس درجة الحرارة في البيئة الصناعية والمختبرات مجموعة متنوعة من الاحتياجات والتطبيقات. وقد ابتكر العديد من الأدوات لقياس درجة الحرارة بدقة.

تُعدّ المزدوجات الحرارية إحدى هذه الأدوات التي تعمل كحساسات لدرجة الحرارة في المواقع الصناعية والمخبرية بالإضافة إلى كونها مكوناً بسيطاً وأساسياً وأكثر أنواع طرائق القياس استخداماً ضمن مجال واسع للتطبيقات الصناعية والحساسات وتطبيقات أجهزة ال IOT، وذلك لمتانتها وتكلفتها المنخفضة واستجابتها السريعة وعمر الخدمة الطويل وسهولة التركيب وعدم وجود تسخين ذاتي ويمكنها تقديم معظم مجالات درجة الحرارة العملية.

2-1 بعض الدراسات السابقة Literature Review:

كان التوجّه نحو تحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة للمزدوجات الحرارية أسلوباً اتبعه العديد من الباحثين في دراستهم وأبحاثهم إذ اقترح بعضهم دارات إلكترونية لتحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة معاً، ومنهم من قام بدراسة كل مشكلة على حدة.

اقترح Xu Chen وآخرون في الدراسة [1] طريقة معايرة جديدة تعتمد على تعويض الوصلة الباردة لمعايير درجة حرارة المزدوجة الحرارية والتي يمكنها الحصول على أخطاء جهاز المعايرة في درجات حرارة عمل مختلفة عن طريق قياس أخطاء تعويض الوصلة الباردة عند درجات حرارة مختلفة، وقاموا بحساب أخطاء الدخل والخرج للمعايير باستخدام الصيغ النظرية.

قدّم Sugata Munshi وآخرون في الدراسة [2] مخططاً خطياً منخفض التكلفة من مرحلتين لحساس درجة الحرارة المزدوجة الحرارية.

تتضمّن المرحلة الأولى هُزَازاً عديم الاستقرار يعتمد على الدارة IC555. واستُخدم الثرمستور NTC كمقاوم تفريغ لدارة متعدّد الاهتزاز لتسهيل تعويض الوصلة الباردة وكذلك قياس درجة الحرارة المحيطة. أمّا في المرحلة الثانية فاستُخدم لتحسين الخطية تركيب قائم على الشبكة العصبونية الصناعية ANN بين خرج IC555 ودرجة الحرارة الحقيقية.

يستخدم مخطط التحويل الخطي مفاضلة بين الاستجابة السريعة للترتيب المستند إلى IC555 والدقة العالية للترتيب القائم على الشبكات العصبونية لتحسين أداء الحساس.

أُجريت دراسة المحاكاة القائمة على PSpice باستخدام المزدوجة الحرارية النوع T لمجال درجة حرارة من 80 درجة مئوية إلى 125 درجة مئوية، في حين تتراوح درجة الحرارة المحيطة من 25 درجة مئوية إلى 40 درجة مئوية.

اقترح Matthew Duff و Joseph Towey في الدراسة [3] حلّين لتكييف إشارة المزدوجة الحرارية.

يجمع الحل الأول بين كل من تعويض الوصلة الباردة وتكييف الإشارة في دارة تماثلية واحدة لتوفير الاستخدام السهل، في حين يفصل الحل الثاني بين تعويض الوصلة الباردة وتكييف الإشارة لتوفير مرونة استخدام أنواع عديدة من المزدوجات الحرارية ودقة أكبر لقياس المزدوجات الحرارية.

يعتمد الحل الأول على مضخّم إشارة مزدوجة حرارية AD8495 المصمّم خصيصاً لقياس المزدوجات الحرارية من النوع K.

في حين يقدّم الحل الثاني مخططاً قائماً على البرمجة باحتوائها على محوّل تماثلي إلى رقمي ADC AD7793 عالي الدقة لقياس جهد المزدوجة الحرارية ذات الإشارة الصغيرة، وتحتوي أيضاً على حسّاس درجة حرارة ADT7320 عالي الحساسية لقياس درجة حرارة الوصلة الباردة.

يتم التحكم في كل من المحوّل ADC والحسّاس باستخدام الواجهة الطرفية التسلسلية SPI من متحكّم خارجي. وهذه الدراسة الأقرب للدراسة الحالية.

قدّم Anish Mukherjee وآخرون في الدراسة [4] دارة تكيف إشارة تماثلية تؤدي المهمة المزدوجة لتعويض الوصلة الباردة وتحسين الخطية للمزدوجة الحرارية. يُجرى تعويض الوصلة الباردة باستخدام دارة قائمة على الثرمستور لمحاكاة الفولتية الناتجة عن المزدوجات الحرارية في درجات حرارة محيطية مختلفة عن 0°C .

يتم تنفيذ الخطية عن طريق استخدام مضخّم لوغاريتمي ثنائي الدخل يعوّض عن درجة الحرارة. وتم التوصل إلى بارامترات الدارة المثلى من خلال أمثلة الدارة ومعايرتها.

أجريت عملية المحاكاة باستخدام برنامج محاكاة PSpice عن طريق تحليل خصائص الثرمستور ذي المقاومة $5\text{K}\Omega$ والمزدوجة الحرارية النحاسية من النوع T.

قدّم Dumitru Cristian Tranca وآخرون في الدراسة [5] طريقة لقياس درجة حرارة المزدوجات الحرارية من دون الحاجة إلى محوّل تماثلي إلى رقمي ADC عالي الدقة أو الحساب الرقمي المعقّد للتوابع كثيرة الحدود.

يقدم العمل الحالي مزيداً من التفاصيل حول طريقة التحويل الخطي وكيف يمكن أن تؤثر في الأخطاء في أثناء استخدام المزدوجات الحرارية كمحول طاقة. تم العمل على مزدوجة حرارية مصنوعة من التنجستين والرينيوم لقياس درجة الحرارة العالية جداً.

استُخدم حساس RTD لقياس درجة حرارة الوصلة الباردة، واستُخدم مرشح فعال Sallen key مع مقاومات بقيمة $100\text{ k}\Omega$ ومكثفات بقيمة $1\text{ }\mu\text{F}$ لإلغاء الضجيج الكهربائي الذي يحدث في الأسلاك الحرارية للمزدوجة الحرارية.

استُخدم مكبر عمليات INA128PA مع ربح من (1 - 10000). وجرى العمل على مجال درجات حرارة من $(-20\text{ to }80)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

أما الدراسة [6] فقد نفذ Ayman A. Aly وآخرون دائرة جديدة للتحويل الخطي لإشارات المزدوجة الحرارية باستخدام محول تشابهي إلى رقمي ADC مع استخدام خاصية النسب ل ADC. ويقوم المحول بإجراء التحويل التماثلي إلى رقمي بالإضافة إلى التحويل الخطي، وهي طريقة محسنة لطريقة مقترحة سابقة (Iglesias and Iglesias)، لكن مع استخدام ترتيبات خطية وقياس مستقلة.

جرى العمل على المزدوجات الحرارية نوع T (كونستانتان-النحاس) والنوع J (كونستانتان-الحديد).

قدم Moses L. Maseko وآخرون في الدراسة [7] بحثاً حول تحسين قياس درجة الحرارة باستخدام المزدوجات الحرارية من خلال استخدام جداول ITS-90 المعززة والتي هي تطوير للجداول القياسية لجداول المزدوجات الحرارية ITS-90، وبلاستفادة من معادلات كثيرة الحدود للمزدوجات الحرارية. وجرى البحث عن شبكات MLP (Multilayer Perceptron) المدربة على قبول جهد الخرج للمزدوجات الحرارية وقياسات درجة حرارة الوصلة الباردة أو المرجعية لإنتاج خرج درجة حرارة وصلة ساخنة محسنة.

تم التحقق التجريبي من نهج الدراسة المقترحة باستخدام مزدوجة حرارية ذات النوع J، وباستخدام بيانات من الجداول المرجعية المعززة.

3-1 مشكلة البحث:

تتميز المزدوجة الحرارية بالمتانة والاستجابة السريعة وعمر الخدمة الطويل وسهولة التركيب وعدم وجود تسخين ذاتي، ويمكن استخدامها في معظم مجالات درجة الحرارة العملية. لكن يترافق مع استخدام المزدوجات الحرارية بعض القيود والصعوبات المتعلقة بالعلاقة غير الخطية بين جهد الخرج ودرجة الحرارة المقاسة، بالإضافة إلى تعويض الوصلة الباردة إذ يعتمد جهد الخرج على درجات الحرارة للوصلة الباردة ووصلة القياس، ويفترض أن تكون درجة حرارة الوصلة الباردة معروفة للحصول على قراءة دقيقة لدرجة الحرارة. لذا كان ضرورياً العمل على تطوير دائرة إلكترونية لتصحيح الخطية وتعويض الوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية.

4-1 هدف البحث:

يهدف البحث إلى تطوير دائرة إلكترونية تعمل على تحسين خطية المزدوجات الحرارية وتعويض الوصلة الباردة، ومن هنا تم العمل على أحد أنواع المزدوجات الحرارية المناسبة وهو النوع K.

5-1 أهمية البحث:

- 1- تحسين دقة قياس درجة الحرارة للأنظمة المعتمدة على المزدوجات الحرارية في المواقع الصناعية ومواقع العمل والتطبيقات العديدة الأخرى.
- 2- دراسة إمكانية ربط استخدام المزدوجات الحرارية كعنصر أساسي للحساسات الحرارية المرتبطة ببعض التطبيقات الخاصة مثل IOT.

1-6 مسوغات البحث:

يتطلب استخدام المزدوجات الحرارية ضرورة دمجها مع دارات إلكترونية للقيام بمهام عدّة منها تكييف إشارتها وتحسين الخطية بين خرجها (جهد كهروحراري) ودخلها (درجة الحرارة المراد قياسها) وتعويض الوصلة الباردة في درجات حرارة مختلفة عن 0°C . لأنه عندما يتم معايرة المزدوجات الحرارية يُؤخذ بدرجة حرارة الوصلة الباردة على أنها 0°C وذلك بوضع أطراف الوصلة الباردة في وعاء جليدي بدرجة حرارة 0°C .

في الحياة العملية والبيئات الصناعية والمختبرات لا يوجد وعاء جليدي، ومن ثمّ يفضل استخدام تقنية تعويض الوصلة الباردة إما بشكل مدمج مع دارات التكييف أو بشكل منفصل معها.

1-7 محدّدات البحث:

صُمّمت دائرة إلكترونية لتكييف إشارة المزدوجة الحرارية من النوع K بغرض تحسين خطّيتها وتعويض الوصلة الباردة لها، وذلك بالاعتماد على الدارة المتكاملة MAX6675 المصمّمة خصيصاً لهذا النوع من المزدوجات الحرارية، إذ أُجريت العديد من عمليات القياس بهدف الحصول على النتائج والبيانات عن طريق استخدام برنامج المحاكاة Matlab. ومقارنتها مع بيانات المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا (NIST) الخاصة بهذا النوع من المزدوجات الحرارية.

1-8 حدود البحث:

1- الحد المكاني:

جرى تنفيذ هذا البحث في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات في كلية الهندسة بجامعة دمشق.

2- الحد التقني:

جرى تنفيذ عمليات القياس للدارة المقترحة والحصول على النتائج باستخدام برمجية ماتلاب MATLAB R2020a على حاسوب بالموصفات الآتية: (Cori i5, 8G Byte, Windows 10 vpro 64 Bit).

3- الحد الزمني: من الشهر الثامن للعام 2021 حتى الشهر الرابع للعام 2023.

4- الحد العلمي:

أتبع المنهج الاستقرائي من خلال الدراسة النظرية بالإضافة إلى المنهج التجريبي، فأُجريت العديد من عمليات القياس على المزدوجة الحرارية من النوع K للحصول على البيانات والنتائج باستخدام برمجية MATLAB ذات الإصدار R2020a.

1-9 منهجية البحث وأدواته Research Methodology and Tools:

أُجري البحث على مرحلتين، تناولت المرحلة الأولى الدراسات والأبحاث النظرية المتعلقة بموضوع الرسالة، وتناولت الثانية إجراء العديد من عمليات القياس على الدارة الإلكترونية المقترحة بهدف تحسين خطية المزدوجات الحرارية بعد تعويض الوصلة الباردة، وجرى البحث باستخدام برمجية MATLAB ذو الإصدار R202a بالإضافة إلى بعض العتاديات المستخدمة في عمليات القياس وتتضمن ما يأتي:

- مزدوجة حرارية من النوع K.

- دائرة متكاملة MAX6675.

- متحكم صغري Arduino.

- جهاز Vita6000 وهو عبارة عن فرن مضبوط حرارياً يستخدم كمرجع حراري.

10-1 بنية الرسالة:

رُتبت الرسالة في أربعة فصول:

- عرض الفصل الأول الإطار العام للبحث والذي يتضمن ما يأتي:

- مقدمة

- بعض الدراسات السابقة

- مشكلة البحث

- هدف البحث

- أهمية البحث

- مسوِّغات البحث

- محدّدات البحث

- حدود البحث

- منهج البحث وأدواته

- بنية الرسالة

- يتناول الفصل الثاني المزدوجات الحرارية ومبدأ عملها، والميزات الإيجابية لاستخدامها وأنواعها.

- يعرض الفصل الثالث دراسة لمشكلة تعويض الوصلة الباردة، وطرائق التعويض وكيفيته، والقيود المصاحبة لاستخدام المزدوجات الحرارية وعملها.
 - يتناول الفصل الرابع القسم العملي في هذه الدراسة.
- وأخيراً خلاصة النتائج والأعمال المستقبلية والمراجع العلمية المستخدمة.

الفصل الثاني

المزدوجات الحرارية Thermocouples

1-2 مقدمة:

لا يزال قياس درجة الحرارة موضع اهتمام رئيسي منذ التاريخ القديم، ودائماً ما سعى الناس إلى أن يكونوا على علم ودراية بقياس شدة درجة الحرارة وقيمتها. في الوقت الحالي تحتوي معظم التطبيقات على آلية قياس درجة الحرارة، بما في ذلك الأجهزة الطبية، والمرافق الصناعية، والمصانع الكيميائية، وأجهزة الحواسيب، ومحطات الأرصاد الجوية، ومصانع المياه وغيرها. يمكن القيام بذلك باستخدام أنواع عدة من محولات الطاقة سواء كانت تماثلية (خرج الجهد، خرج التيار، خرج المقاومة) أو رقمية (الحساسات التي تحتوي على آلية التحويل من تماثلي إلى رقمي). عادةً ما يُجرى قياس درجة الحرارة باستخدام حساسات التلامس التي تتلامس مع الشيء المراد قياس درجة حرارته [5]. في السنوات الأخيرة أصبحت الطرائق أكثر ابتكاراً لقياس درجة الحرارة وخصوصاً مع انتشار التطبيقات الحديثة والمتطورة.

يقدم البحث الحالي مزيداً من التفاصيل حول طريقة التحويل الخطي، وكيف يمكن أن تؤثر في الأخطاء في أثناء استخدام أحد حساسات التلامس الكهروحرارية المعروفة باسم المزدوجة الحرارية واستخدامها كمحول طاقة مناسب.

2-2 المزدوجات الحرارية Thermocouples:

تتكون المزدوجة الحرارية من سلكين من معادن غير متشابهة مرتبطين معاً في نهاية واحدة تسمى الوصلة الساخنة (تقاطع القياس)، ويتم توصيل الطرف الآخر حيث لا يتم ربط الأسلاك بآثار دارات تكييف الإشارة وعادة ما تكون مصنوعة من النحاس كما في الشكل (2-1)، يسمى هذا التقاطع بين المعادن الحرارية وآثار النحاس بالوصلة الباردة (التقاطع المرجعي) [3]. أي يتم توصيل السلكين المعدنيين اللذين يملكان خصائص كهروحرارية مختلفة معاً في جانب واحد، ويتعرض هذا الجانب إلى درجات حرارة أعلى بكثير من الجانب الآخر [10]. وتعزف المزدوجات الحرارية بأنها حساس درجة حرارة مستخدم في عدد كبير من

التطبيقات الصناعية [8]. وبمجرد أن تكون الوصلتان (الباردة والساخنة) في درجات حرارة مختلفة، يتدفق التيار عبر الدارة وهذا ينتج عنه قوة محرّكة كهروحرارية (EMF). ويمكن تمثيل معادلة القوة المحرّكة الكهروحرارية بما يأتي [7]:

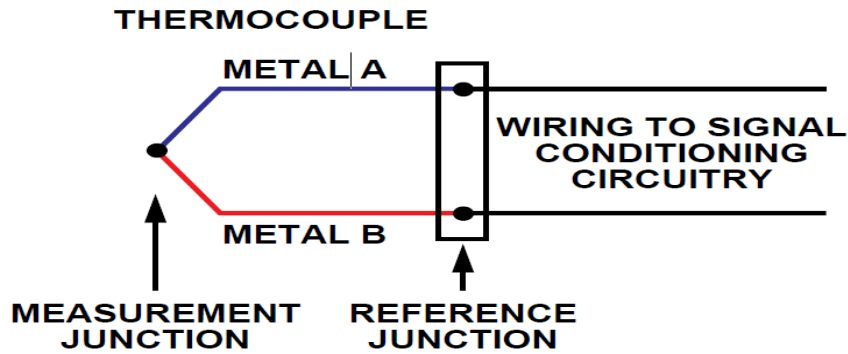
$$V = a_0 + a_1(T_H - T_{ref}) + a_2(T_H^2 - T_{ref}^2) \dots \dots \dots + a_n(T_H^n - T_{ref}^n) \quad (2-1)$$

V: الجهد الكهروحراري للمزدوجة الحرارية.

$a_n, \dots, a_2, a_1, a_0$: معاملات المزدوجات الحرارية (معاملات سيبيك) من النوع K, J, B, R أو S. وتختلف قيم هذه المعاملات بحسب نوع المزدوجة الحرارية، ويمكن العثور على قيم هذه المعاملات في جداول NIST لأنواع المزدوجات الحرارية.

T_H : درجة حرارة الوصلة الساخنة (وصلة القياس) بالدرجة المئوية.

T_{ref} : درجة حرارة الوصلة الباردة (المرجعية) بالدرجة المئوية.



الشكل (1-2) المزدوجة الحرارية [3].

3-2 مبدأ عمل المزدوجة الحرارية:

تعمل المزدوجة الحرارية باستخدام أثر سيبيك Seebeck Effect وهو العالم الذي اكتشف التأثير

الكهروحراري الذي هو الأساس النظري لتشغيل المزدوجة الحرارية [8].

عندما يشكّل موصلان معدنيان مختلفان A,B حلقة مغلقة كما في الشكل (2-2) فسوف تتولد في الحلقة قوة محرّكة كهروحرارية $E_{AB}(t, t_0)$ (thermo-electromotive force) وذلك إذا كانت درجة الحرارة في الوصلة الساخنة t مختلفة عن درجة الحرارة في الوصلة الباردة (t_0) [1]. وتكون القوة المحرّكة الكهروحرارية الناتجة غير خطية لاختلاف درجة الحرارة بين الوصلتين الباردة والساخنة [8]. ويمكن التعبير عن قانون القوة المحركة الكهروحرارية:

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0) \quad \{2 - 2\}$$

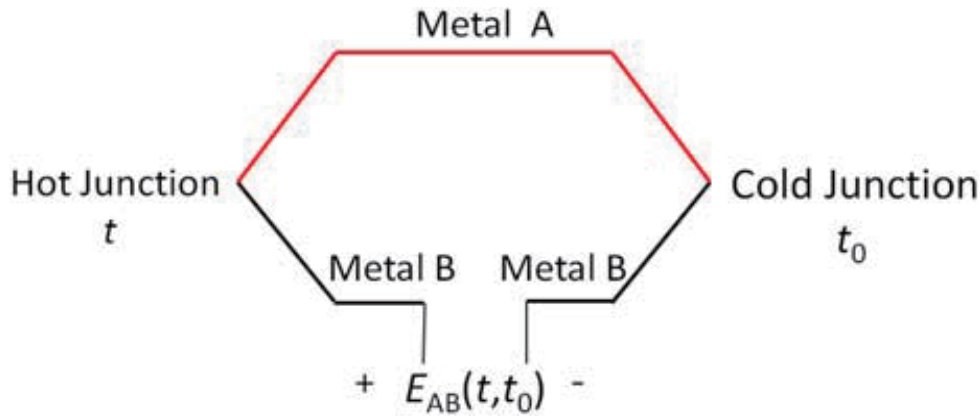
إذ يمثل $E_{AB}(t, t_0)$ القوة الدافعة الكهروحرارية للحلقة المغلقة والتي يمكن قياسها مباشرةً.

$E_{AB}(t, 0)$: تمثل القوة الدافعة الكهروحرارية المقابلة لدرجة حرارة الوصلة الساخنة في الحلقة.

$E_{AB}(t_0, 0)$: تمثل القوة الدافعة الكهروحرارية المقابلة لدرجة حرارة الوصلة الباردة في الحلقة.

إذا كانت $E_{AB}(t, 0)$ معروفة يمكن الحصول على درجة الحرارة (t) بالنظر إلى جدول فهرست المزدوجات

الحرارية NIST والعكس صحيح. والشيء نفسه بالنسبة لـ $E_{AB}(t_0, 0)$ و t_0 [1].



الشكل (2-2) أثر سيبك Seebeck Effect [1]

2-4 مزايا المزدوجات الحرارية:

تُعدّ المزدوجات الحرارية أهم أجهزة القياس استخداماً لقياس درجات الحرارة المحلية وتحديد معدّل نقل الحرارة [14]. نظراً لإمكانية تطبيقها على مجال واسع من درجات الحرارة واستقرارها على المدى الطويل وموثوقيتها العالية [11]. وسنذكر بعض أهم مزايا استخدام المزدوجات الحرارية:

2-4-1 مجال درجة الحرارة:

يمكن استخدام المزدوجات الحرارية في معظم مجالات درجات الحرارة العملية من المبرّدة إلى المحرّك النفّاس [3]. اعتماداً على الأسلاك المعدنية المستخدمة يمكن للمزدوجات الحرارية قياس درجة الحرارة في مجال $(-200 \text{ to } 2500^\circ\text{C})$ [10].

جدول (2-1) أنواع المزدوجات الحرارية ومجال درجة الحرارة لكل نوع [8].

نوع المزدوجة الحرارية	مجال درجة الحرارة ($^\circ\text{C}$)
E	-270 to 1000
J	-210 to 1200
K	-270 to 1372
N	-270 to 1300
T	-270 to 400
R	-50 to 1768
S	-50 to 1768
B	-50 to 1768

2-4-2 المتانة Robust:

المزدوجات الحرارية عبارة عن حساسات متينة محصنة ضد الصدمات والاهتزازات ومناسبة للاستخدام في البيئات القاسية.

2-4-3 الاستجابة السريعة:

تستجيب المزدوجات الحرارية بسرعة للتغيرات في درجة الحرارة وخاصةً إذا كان تقاطع الحساس مكشوفاً.

2-4-4 عدم التسخين الذاتي:

لا تتطلب المزدوجات الحرارية طاقة إثارة ومن ثم لا تتعرض للتسخين الذاتي وتبقى آمنة في عملها [3]. لذلك تُعدّ المزدوجات الحرارية أكثر الحساسات استخداماً لقياس درجة الحرارة نظراً للميزات الأنفة الذكر والتي جعلت استخدامها ليس فقط كحساس درجة حرارة بل تنوع استخدامها بشكل أوسع كتصميم مزدوجة حرارية لتعزيز قابلية الكشف مثل حساس الأشعة تحت الحمراء الكهروحراري، وذلك بتغيير أبعادها لتقليل الضجيج الحراري الذي يؤثر في جودة إشارة خرج الحساس TE IR [13].

2-5 أنواع المزدوجات الحرارية:

يوجد ثمانية أنواع أساسية من المزدوجات الحرارية محددة من مؤسسات المعايير والأنظمة وهي المدونة في الجدول (2-2) مع تركيبها الكيماوي والاسم التجاري لكل نوع من أنواع الأسلاك والحروف المميزة لكل مزدوجة طبقاً لتوصيات الجمعية الأمريكية للأجهزة Instrument Soc. of Am. ويرمز للطرف الموجب للمزدوجة بالرمز **P** والطرف السالب بالرمز **N**، كما اصطلح على ذكر الطرف الموجب قبل السالب [9]. ويجري تسمية أنواع المزدوجات الحرارية بالأحرف الآتية K, J, T, N, E, R, S, B لسهولة الرجوع إليها، وجرى

توحيد خصائصها الكهروحرارية. ويتجلى الاختلاف في مجال درجة حرارة العمل، والاستقرار في الاستخدام، والتوافق مع بيانات التشغيل، والتكلفة.

جدول (2-2) الأنواع الأساسية للمزدوجات الحرارية ورموزها وتركيبها الكيميائي وأسمائها التجارية:

نوع المزدوجة الحرارية	التركيب	الاسم التجاري
B	بلاتين-٣٠% روديوم / بلاتين-٦% روديوم	
S	بلاتين-١٠% روديوم / بلاتين	
R	بلاتين-١٣% روديوم / بلاتين	
K	نيكل-كروم / نيكل - ألومنيوم	كروميل / ألوميل
J	حديد / نحاس - نيكل	حديد / كونستنتان
T	نحاس / نحاس - نيكل	نحاس / كونستنتان
N	نيكل-كروم-سليكون / نيكل-سليكون-مغنسيوم	نيكروسيل / كونستنتان
E	نيكل - كروم / نحاس - نيكل	كروميل / كونستنتان

2-6 خلاصة الفصل الثاني:

تم في هذا الفصل التعريف بالمزدوجات الحرارية ومبدأ عملها وفق أثر سيبك ومزايا استخدامها بالإضافة إلى ذكر أنواعها الثمانية الأساسية وتركيبها الكيميائي. وسيعرض الفصل الثالث إحدى أهم التقنيات المتعلقة بالمزدوجات الحرارية وهي تعويض الوصلة الباردة، بالإضافة إلى أهم التحديات التي ترافق استخدامها في قياس درجة الحرارة.

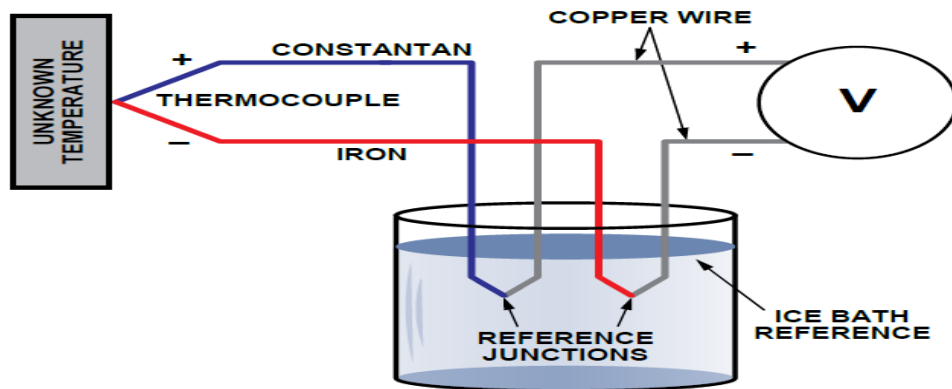
الفصل الثالث

تعويض الوصلة الباردة

Cold Junction Compensation

3-1 مقدمة:

عندما استُخدمت المزدوجات الحرارية كانت تتم معايرة الوصلة الباردة لأي نوع منها باستخدام الحمّام الجليدي المجروش كما نلاحظ في الشكل (3-1) دائرة مزدوجة حرارية حديد-كونستنتان أساسية تتم معايرة الوصلة الباردة فيها بوضع الوصلة الباردة في حوض جليدي [3]، إذ كانت أفضل وسيلة لحفظ الوصلة الباردة عند الدرجة صفر درجة مئوية.



الشكل (3-1) دائرة مزدوجة حرارية حديد - كونستنتان أساسية [3]

وفي هذه الحالة لا نحتاج إلى تصحيح للوصلة الباردة طالما هي عند درجة الصفر المئوية، إلا أننا نحتاج دائماً لمراقبة حمّام الجليد وإضافة كميات جديدة من الجليد المجروش وسحب المياه المتكونة والتأكد من أن الأنابيب المغموسة في الجليد وبها أسلاك المزدوجة وأسلاك التوصيل محاطة جيداً بالجليد وبالعمق الكافي لضمان أن تكون الوصلة الباردة للمزدوجة عند درجة الصفر. وفي الوقت الحالي توجد حمّامات أوتوماتيكية بها أنابيب تغمس فيها أسلاك المزدوجة الحرارية وتكون الأسلاك محاطة بالماء الذي يبرّد بواسطة مجموعة من وصلات بلتيه وعندما يتكوّن الجليد يزداد حجم الماء فيضغط على مفتاح كهربائي فيفصل التيار وهكذا يمكن التحكم في درجة الحمّام أوتوماتيكياً عند درجة الصفر، ويستمر الجهاز بالعمل مدة طويلة من دون حاجة إلى إضافة جليد أو غير ذلك. أما في الأماكن الصناعية والحياة العملية فيتعدّر إبقاء الوصلة المرجعية عند الصفر، لذا لا بدّ عند تكييف إشارة المزدوجات الحرارية من تعويض الوصلة الباردة

بالاستفادة من الجداول المعيارية لكل مزدوجة حرارية وحساب القوة المحركة الكهروحرارية وإضافتها إلى القيمة الصادرة عن المزدوجة ويتم حساب درجة حرارة الوصلة الساخنة للمزدوجة الحرارية كما في المثال الآتي:

استُخدمت مزدوجة حرارية من النوع K لقياس درجة حرارة الفرن وكانت قراءة الفولتметр $4096 \mu V$ والوصلة الباردة عند درجة حرارة $20^\circ C$ يطلب حساب درجة حرارة الوصلة الساخنة؟

في هذه الحالة يكون مقدار الجهد المناظر ل $20^\circ C$ للنوع K من الجداول المعيارية يساوي $800 \mu V$.

فيكون الجهد الموافق لدرجة حرارة الفرن

$$4096 + 800 = 4896 \mu V$$

من الجداول المعيارية درجة الحرارة الموافقة ل $4896 \mu V$ للنوع K هي $119.5^\circ C$ وهي الدرجة المطلوبة. ويمكن الاستفادة من الجدول (3-1) الذي يعبر عن العلاقة بين درجة الحرارة والقوة المحركة الكهروحرارية لعمل التصحيح اللازم للوصلة الباردة لمختلف أنواع المزدوجات الحرارية إذا عرفت درجة حرارتها [9]. وتوجد طرائق عديدة للتعامل مع تأثيرات اضطرابات الوصلة الباردة على جهد خرج المزدوجة الحرارية، وكانت إحدى الطرائق الحفاظ على الوصلة الباردة عند درجة صفر درجة مئوية في حمام جليدي. ولكن هذا النهج غير عملي وغير اقتصادي من حيث التكلفة واستخدام المكان، علاوة على ذلك لا يمكن تطبيق هذه الطريقة في حال عدم توفر حمام جليدي. يوجد طريقة فيزيائية أخرى لتصحيح التغيرات في درجة الوصلة الباردة يجري تنفيذها عن طريق قياس التغيرات في درجة حرارة الوصلة الباردة أو الجهد المقابل، ثم تُطرح القياسات من جهد المزدوجة الحرارية المقاس وفق المعادلة الآتية [7]:

$$V_{\text{meas}} = V_{H(\text{TH})} - V_{\text{ref}(\text{Tref})} \quad (3 - 1)$$

V_{meas} : جهد خرج المزدوجة الحرارية المقاس.

$V_{H(TH)}$: جهد الوصلة الساخنة.

$V_{ref(Tref)}$: جهد الوصلة الباردة.

جدول (3-1) العلاقة بين درجة الحرارة والقوة الدافعة الكهروحرارية للمزدوجات المختلفة المستخدمة

لتصحيح درجة حرارة الوصلة الباردة [9].

درجة الحرارة للوصلية الباردة (°C)	بلاتين/بلاتين - روديوم (mv)	كروميل/الوميل (mv)	حديد/كونستانتان (mv)	نحاس/كونستانتان (mv)
-20	-0.103	-0.77	-1	-0.75
-15	-0.070	-0.58	-0.75	-0.57
-10	-0.054	-0.39	-0.50	-0.38
-5	-0.027	-0.19	-0.24	-0.19
0	0	0	0	0
5	0.028	0.2	0.25	0.19
10	0.056	0.4	0.5	0.39
15	0.084	0.6	0.75	0.59
20	0.113	0.8	1.02	0.79
25	0.143	1	1.28	0.9
30	0.173	1.2	1.54	1.19
35	0.204	1.4	1.8	1.4
40	0.235	1.61	2.06	1.61
45	0.266	1.81	2.33	1.82
50	0.299	2.02	2.58	2.03

3-2 التعويض عن درجة حرارة الوصلة الباردة كهربائياً:

بعض مقاييس درجة الحرارة المستخدمة مع المزدوجات الحرارية تكون مزودة بدارة كهربائية تضيف قدراً من الجهد للقوة المحركة الكهروحرارية الآتية من المزدوجة لتعادل درجة حرارة الوصلة الباردة ومن ثم يظهر الجهاز درجة الحرارة مصححة كهربائياً للوصلة الباردة [9].

3-3 طرائق تعويض الوصلة الباردة:

كما ذكرنا سابقاً الاحتفاظ بالوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية ليس عملياً لمعظم أنظمة القياس، لذلك تُستخدم معظم الأنظمة تقنية تعويض الوصلة الباردة وذلك بقياس درجة حرارة الوصلة الباردة بجهاز آخر حسّاس لدرجة الحرارة، وعادةً ما يكون الثرمستورات أو الثنائي الحراري أو كاشف درجة حرارة المقاومة RTD أو حسّاس درجة حرارة متكامل IC. ثم يتم تعويض قراءة جهد المزدوجة الحرارية لتعكس درجة حرارة الوصلة الباردة [3].

من المهم جداً أن تتم قراءة الوصلة الباردة بأكبر قدر من الدقة باستخدام حسّاس درجة حرارة دقيق يتم الاحتفاظ به في درجة حرارة الوصلة الباردة نفسها، لأنّ أي خطأ في قراءة درجة حرارة الوصلة الباردة سيظهر مباشرة في القراءة الحرارية للوصلة الساخنة.

بمعنى آخر إن تعويض الوصلة الباردة هو تصحيح للقوة المحركة الكهروحرارية Emf للمزدوجة الحرارية فيما يتعلّق بدرجة الحرارة المحيطة. تتوفر مجموعة من الحساسات لقياس درجة حرارة الوصلة الباردة مثل:

3-3-1 الثرمستورات Thermistors:

تتميّز الثرمستورات بالاستجابة السريعة وبأنّها مجموعة صغيرة لكنّها تتطلّب خطية ودقتها محدودة خاصة على مجال واسع من درجات الحرارة. كما أنها تتطلّب تياراً للإثارة والذي يمكن أن ينتج تسخيناً ذاتياً يؤدي

إلى الانجراف. يمكن أن تكون دقة النظام الإجمالية ضعيفة عند دمجها مع تكييف الإشارة، وتستخدم الثرمستورات بنوعيتها الأول الثرمستور ذو معامل درجة الحرارة السالب NTC والنوع الآخر الثرمستور ذو معامل درجة الحرارة الموجب PTC مع دارات تكييف إشارة المزدوجة الحرارية بغرض تحسين خطيتها وتعويض الوصلة الباردة.



الشكل (3-3) الثرمستور PTC



الشكل (2-3) الثرمستور NTC

2-3-3 كاشف درجة حرارة المقاومة:

تُعدّ حسّاسات Resistance Temperature Detector RTD دقيقة ومستقرة وخطية بشكل مقبول، ومع ذلك فإن حجم العبوة والتكلفة تقيد استخدامها في تطبيقات عمليات التحكم.



الشكل (4-3) عناصر حسّاس درجة الحرارة RTD

3-3-3 الثنائيات الحرارية Thermal Diodes:

يستخدم الثنائي الحراري لتحسس درجة الحرارة بالقرب من الوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية إذ تقوم شريحة التكيف بتحويل جهد خرج الثنائي الذي يتناسب مع درجة الحرارة إلى خرج تشابهي أو رقمي، دقتها محدودة حوالي ± 1 درجة مئوية.

3-3-4 حساس درجة الحرارة المتكامل:

هو دائرة متكاملة مستقلة يحس درجة الحرارة محلياً بعناية بالقرب من موصل الوصلة الباردة ويمكنه الجمع بين تعويض الوصلة الباردة وتكليف الإشارة، ويمكن تحقيق الدقة في أجزاء صغيرة من 1 درجة مئوية [3].



الشكل (3-5) حساس درجة حرارة ورطوبة متكامل.

3-4 صعوبات القياس بالمزدوجات الحرارية:

كما ذكرنا سابقاً تتميز المزدوجة الحرارية بالمتانة والاستجابة السريعة وعمر الخدمة الطويل وسهولة التركيب وعدم وجود تسخين ذاتي، ويمكنها العمل ضمن مجالات واسعة ومختلفة لدرجة الحرارة العملية. لكن ليس من السهل تحويل الجهد المتولد من المزدوجات الحرارية إلى قراءة دقيقة لدرجة الحرارة، وذلك لأسباب عدة:

- 1- إشارة الجهد الصغيرة (تُقاس بالميكرو فولت أو أجزاء من الملي فولت).

2- العلاقة بين درجة الحرارة والجهد غير خطية.

3- تعويض الوصلة الباردة.

بالإضافة إلى بعض الصعوبات المتعلقة بالتأريض وتكييف الإشارة والدقة والقابلية للتآكل والضجيج.

سوف ننظر في هذه القضايا واحدة تلو الأخرى.

3-4-1 إشارة الجهد صغيرة:

أكثر أنواع المزدوجات الحرارية شيوعاً هي J, K, T في درجة حرارة الغرفة يختلف جهدها عند $41\mu V/^\circ C$ إلى $52\mu V/^\circ C$, على التوالي. تتطلب هذه الإشارة مرحلة كسب عالية قبل التحويل من تماثلي إلى رقمي.

جدول (3-2) تغيرات الجهد مقابل ارتفاع درجة الحرارة (معامل سيبك) لأنواع عدة من المزدوجات الحرارية عند درجة حرارة $25^\circ C$.

نوع المزدوجة الحرارية	معامل سيبك ($\mu V/^\circ C$)
E	61
J	52
K	41
N	27
T	41
R	9
S	6

3-4-2 إشارة الجهد غير خطية:

نظراً لأن محولات درجة الحرارة المستخدمة بشكل شائع (المزدوجات الحرارية والثرمستورات وغيرها...) لها خصائص تحويل غير خطية [2]، ومعظم خصائص محولات الطاقة تكاد تكون غير خطية في طبيعتها، حتى بالنسبة للمزدوجات الحرارية ذات الخطية المناسبة فإن اللاخطية ليست صغيرة جداً بحيث يمكن تجاهلها [6].

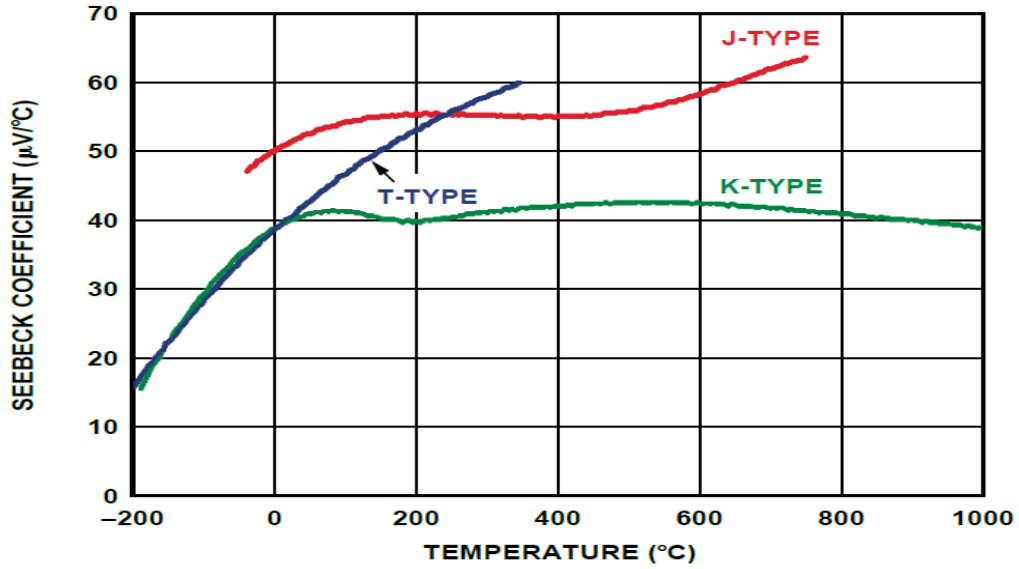
يتغير منحنى الاستجابة للمزدوجة الحرارية عبر درجة الحرارة بشكل غير خطي، وهذا أحد الأسباب في عدم خطية جهد المزدوجة الحرارية بالنسبة لدرجة الحرارة. على سبيل المثال من الشكل (3-6) نجد عند 0°C معدل تغير خرج المزدوجة الحرارية من النوع T هو $39 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. ولكن عند درجة حرارة 100°C يزيد معدل تغير خرج المزدوجة الحرارية إلى $47 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.

هناك طرائق عدة شائعة تستخدم للتعويض عن اللاخطية للمزدوجات الحرارية:

- يتم اختيار جزء من المنحنى يكون مسطحاً نسبياً وتقريب الميل لكونه خطياً في هذه المنطقة وهو أسلوب يعمل جيداً خاصة في القياسات على نطاق محدود من درجات الحرارة، بالإضافة إلى عدم الحاجة إلى حسابات معقدة. ويلاحظ من الشكل (3-6) أيضاً توضيحاً لماذا تُعدّ مزدوجات J, K أكثر أنواع المزدوجات الحرارية شيوعاً، إذ يمتلك كلاهما امتدادات كبيرة من درجة الحرارة التي يظل فيها الميل (معامل سيببك) ثابتاً إلى حد ما (أي إنها أكثر خطية).

- الطريقة الثانية تتمثل في تخزين جدول في الذاكرة يطابق كل مجموعة من جهود المزدوجة الحرارية إلى درجة الحرارة الخاصة بها، ويستخدم الاستيفاء الخطي بين أقرب نقطتين في الجدول للحصول على قيم درجة الحرارة الأخرى.

- تتمثل الطريقة الثالثة في الاستخدام للمعادلات ذات الترتيب الأعلى التي تمثل نموذجاً لسلوك المزدوجات الحرارية، في حين أن هذه الطريقة هي الأكثر دقة فهي الأكثر كلفة وتعقيداً من الناحية الحسابية. هناك مجموعتان من المعادلات لكل مزدوجة حرارية تقوم مجموعة واحدة بتحويل درجة الحرارة إلى جهد مزدوجة حرارية (مفيد لتعويض الوصلة الباردة). والمجموعة الأخرى تحوّل جهد المزدوجة الحرارية إلى درجة حرارة.



الشكل (3-6) معامل سيبك المزدوجة الحرارية مقابل درجة الحرارة [8].

يمكن العثور على جداول المزدوجات الحرارية والمعادلات الحرارية ذات الترتيب الأعلى في المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا NIST. تستند جميع الجداول والمعادلات إلى درجة حرارة تقاطع مرجعية ($0^{\circ}C$)، لذلك يجب استخدام تعويض الوصلة الباردة إذا كان التقاطع المرجعي في أي درجة حرارة أخرى.

- اقترح المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا NIST مجموعة من المعادلات متعددة الحدود للحصول على درجة الحرارة من جهد المزدوجات الحرارية الكهربائي ودرجة حرارة الوصلة الباردة.

$$V_m = E(T_{meas}) - E(T_{ref}) \quad (3 - 2)$$

إذ V_m : الجهد المقاس.

$E(T)$: هو تابع خصائص المزدوجة الحرارية وهو متعدّد الحدود وعالي الترتيب.

$$E(T) = \sum_{i=0}^n c_i T^i + a_0 e^{a_1(t-a_2)^2} \quad (3-3)$$

إذ c_i و a_0 , a_1 , a_2 هي المعاملات التي قدّمها المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا NIST.

E : هي الجهد الكهروحراري.

T : هي درجة الحرارة مقدّرة بالدرجة $^{\circ}\text{C}$.

وتوجد معاملات المصطلح الثاني في معادلة درجة الحرارة فوق 0°C .

وقدّم أيضاً مجموعة من المعاملات (d_i) للتابع العكسي الذي يعطي درجة الحرارة كتابع من الجهد.

$$t_{(E)} = d_0 + d_1 E + d_2 E^2 + \dots + d_n E^n \quad (3-4)$$

للحصول على درجة الحرارة من الجهد للمزدوجة الحرارية من الأنظمة الرقمية تُقاس درجة حرارة الوصلة الباردة ويتم تحويلها إلى جهد مزدوجة حرارية، وتضاف إلى الجهد المقاس الفعلي، وأخيراً يتم إرجاعها إلى درجة حرارة، ومن ثمّ يتم معرفة درجة حرارة الوصلة الساخنة [5].

حالياً مع تطوّر التكنولوجيا وتقدّم الأبحاث يتم استخدام دارات تكييف تعالج موضوع خطية المزدوجات الحرارية كالمكبرات اللوغاريتمية أحادية الدخل أو ثنائية الدخل [4]، بالإضافة إلى بعض الدارات الإلكترونية الخاصة التي تهدف إلى تحسين خطية المزدوجات الحرارية. كما اقترح مؤخراً الشبكات العصبونية الصناعية ANN كطريقة خطية في العديد من الأبحاث [2,7,8,10,12]. وسنذكر أهم النماذج التي تم تحسين خطية المزدوجات الحرارية باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية، بالإضافة إلى تعويض الوصلة الباردة للمزدوجات الحرارية.

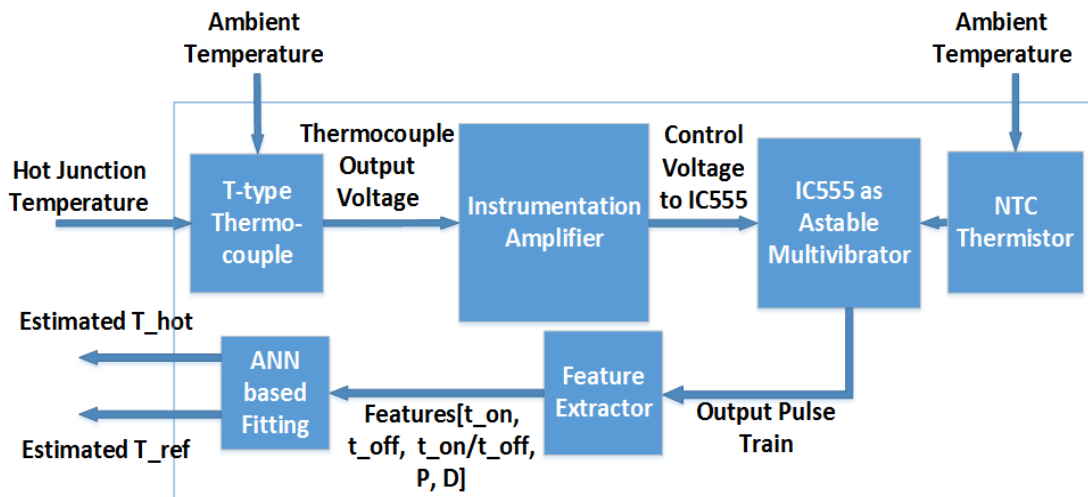
3-4-2-1 الشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Network):

تتكوّن الشبكة العصبونية الصناعية من عدد كبير من الوحدات المترابطة تسمى الخلايا العصبية neurons التي لديها ميل طبيعي معين لتعلّم المعلومات من العالم الخارجي. وتُعدّ الشبكات العصبونية هي الأفضل في تقريب أو تقدير التوابع التي تعتمد على العديد من المتغيرات، وتقريب التوابع غير الخطية. وبما أنّ المزدوجات الحرارية هي حسّاسات قياس درجة حرارة غير خطية، فقد استُخدمت الشبكات العصبونية لتحسين خطية المزدوجات الحرارية في العديد من الأبحاث والدراسات.

استُخدمت نماذج عدّة للشبكات العصبونية من أجل تحسين خطية المزدوجات الحرارية، سنذكر منها أهم نموذجين:

3-4-2-2 النموذج الأول للشبكات العصبونية الصناعية (ANN):

استُخدم هذا النموذج مع المزدوجات الحرارية من النوع T بسبب الدقة العالية للترتيب القائم على الشبكات العصبونية الصناعية لتحسين أداء الحساس، وجرى تحسين الخطية على مرحلتين المرحلة الأولى تعتمد على الدارة المتكاملة IC555، والمرحلة الثانية على الشبكة العصبونية الصناعية ANN. كما في الشكل (7-3).

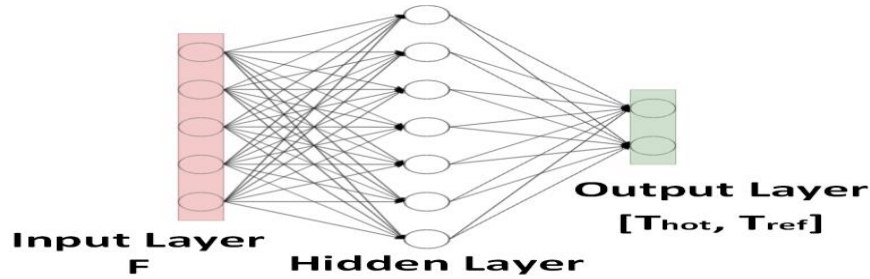


الشكل (7-3) مخطط تفصيلي لحساس درجة الحرارة المقترح [2]

إذ جرى استخراج متجه الميزة F (زمن التشغيل، زمن الإيقاف، دور العمل، زمن التشغيل/زمن الإيقاف، الفترة الزمنية) من قطار النبضات قبل معالجتها عن طريق الشبكة العصبونية.

- في هذا النموذج استُخدمت الشبكات ANN لتعيين F إلى T_{hot} و T_{ref} . عناصر من متجه الحالة F مقابل درجة حرارة الوصلة الساخنة والوصلة المرجعية على التوالي. إذ يشكّل F طبقة الدخل، وتتكوّن طبقة الخرج من T_{hot} و T_{ref} .

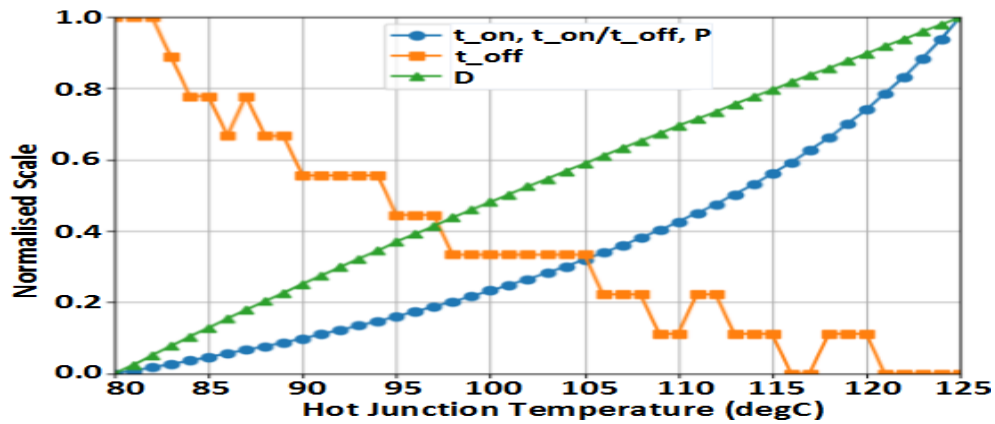
بالإضافة إلى طبقة مخفية واحدة تتكون من 7 خلايا عصبونية كما في الشكل (8-3).



الشكل (8-3) بنية الشبكة العصبونية الصناعية ANN [2]

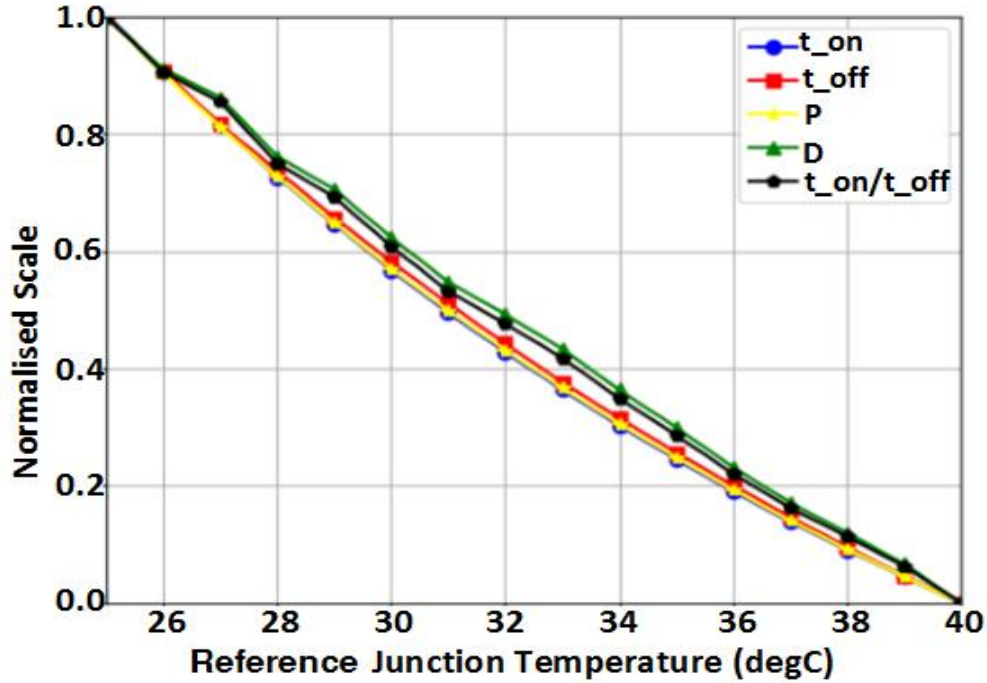
بعد المرحلة الأولى من الخطية تظهر الخصائص بين عناصر F وكل من T_{hot} و T_{ref} .

كما نلاحظ أن D (فترة العمل) مقابل T_{hot} أصبح خطياً مقارنة بالآخرين كما في الشكل (9-3).



الشكل (9-3) عناصر من المتجه F مقابل درجة حرارة الوصلة الساخنة من أجل $T_{ref} = 30^{\circ}\text{C}$ [2]

ويبين الشكل (10-3) خصائص F مقابل T_{ref} إذ أظهرت جميع العناصر تقريباً خطية جيدة مع T_{ref} .



الشكل (10-3) عناصر من المتجه F مقابل درجة حرارة الوصلة الباردة من أجل $T_{hot} = 100^{\circ}\text{C}$ [2]

- أنتجت المرحلة الأولى من الخطية 736 عينة من متجه الدخل، F ومتجه الخرج T_{hot} و T_{ref} .

- في المرحلة الثانية من بين 736 عينة من الدخل والخرج، تستخدم نصف العينات لتدريب الشبكة

العصبونية الصناعية ويستخدم النصف المتبقي لاختبار الأداء باستخدام صندوق أدوات الشبكة العصبونية

في MATLAB [2] .

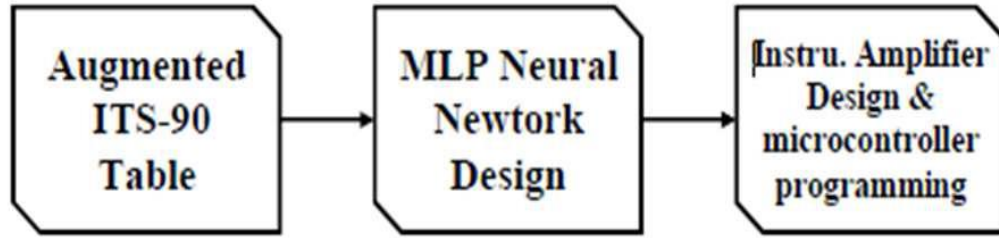
3-2-4-3 النموذج الثاني الشبكات العصبونية متعددة الطبقات Multilayer Perceptron MLP:

استُخدمت الشبكات العصبونية MLP لتكييف إشارة المزدوجة الحرارية من النوع L وتحسين خطيتها. إذ

يجري تدريب الشبكة العصبونية على فهم العلاقة بين الجهد الكهروحراري الذي تنتجه المزدوجات الحرارية

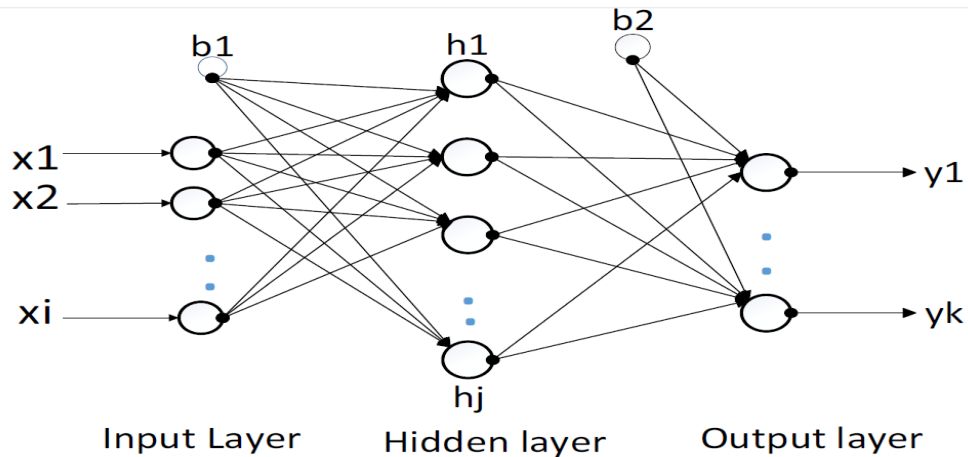
مع درجة الحرارة. وتمتاز الشبكات العصبونية MLP بأنها مدربة على قبول جهد الخرج للمزدوجات الحرارية

وقياسات درجة حرارة الوصلة الباردة لإنتاج خرج درجة حرارة وصلة ساخنة محسنة. وتتضمن التقنية المقترحة إنشاء جداول ITS-90 معززة ومرجعية توفر بيانات التدريب للشبكات العصبونية MLP، بهدف تحسين دقة قياس درجة الحرارة باستخدام المزدوجات الحرارية كما في الشكل (3-11).



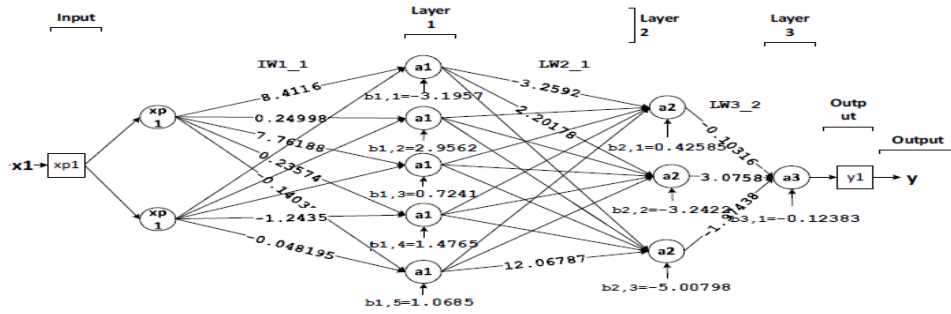
الشكل (3-11) تكييف إشارة المزدوجة الحرارية باستخدام الشبكة العصبونية NN [7]

بعد مرحلة إنشاء الجداول المعززة يجري تصميم الشبكة العصبونية للمزدوجات الحرارية من النوع L وتدريبها باستخدام مجموعة أدوات الشبكة العصبونية MATLAB. وتحدد بنية الشبكة العصبونية المعينة للاستخدام في الخطية وتعويض الوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية من النوع L. وتتكون بنية الشبكة العصبونية المقترحة من طبقة دخل (جهد المزدوجة الحرارية-درجة حرارة الوصلة الباردة) وطبقتين مخفيتين وطبقة الخرج (درجة حرارة الوصلة الساخنة) كما في الشكل (3-12).



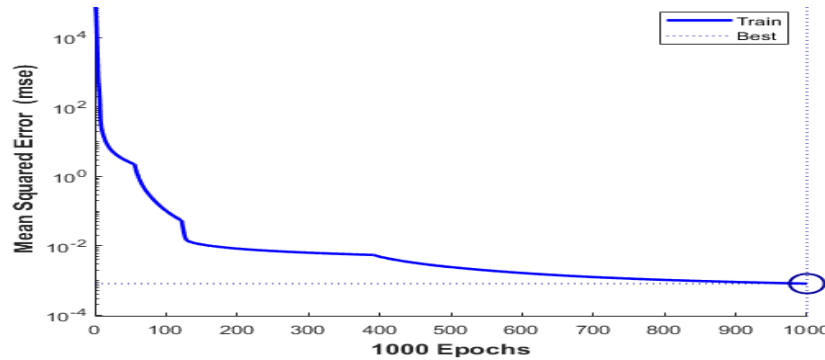
الشكل (3-12) بنية الشبكة العصبونية MLP [7]

تمتاز هذه الشبكة بقدرتها على التنبؤ بدرجة حرارة الوصلة الساخنة وفقاً لدرجة حرارة الوصلة الباردة والجهد الكهروحراري المقاس. وجرى العمل على العثور على أصغر بنية MLP لديها قدرة تعميم كافية من دون خسارة كبيرة في دقة التعميم. وتم القيام بتقليم الشبكة العصبونية MLP لتقليل الجهود الحسابية المطلوبة في أثناء تنفيذ المتحكم الصغري لنظام التكيف. ويتم تقييم بنية MLP عن طريق تغيير بارامترات ANN (الأوزان والانحيازات) باستخدام طرائق التقليم لحجم الشبكة العصبونية. وعُثر على شبكة عصبونية ذات قدرة تعميم عالية مع بنية الشبكة العصبونية النهائية المصممة لتقريب خصائص المزدوجة الحرارية لـ كما في الشكل (3-13).



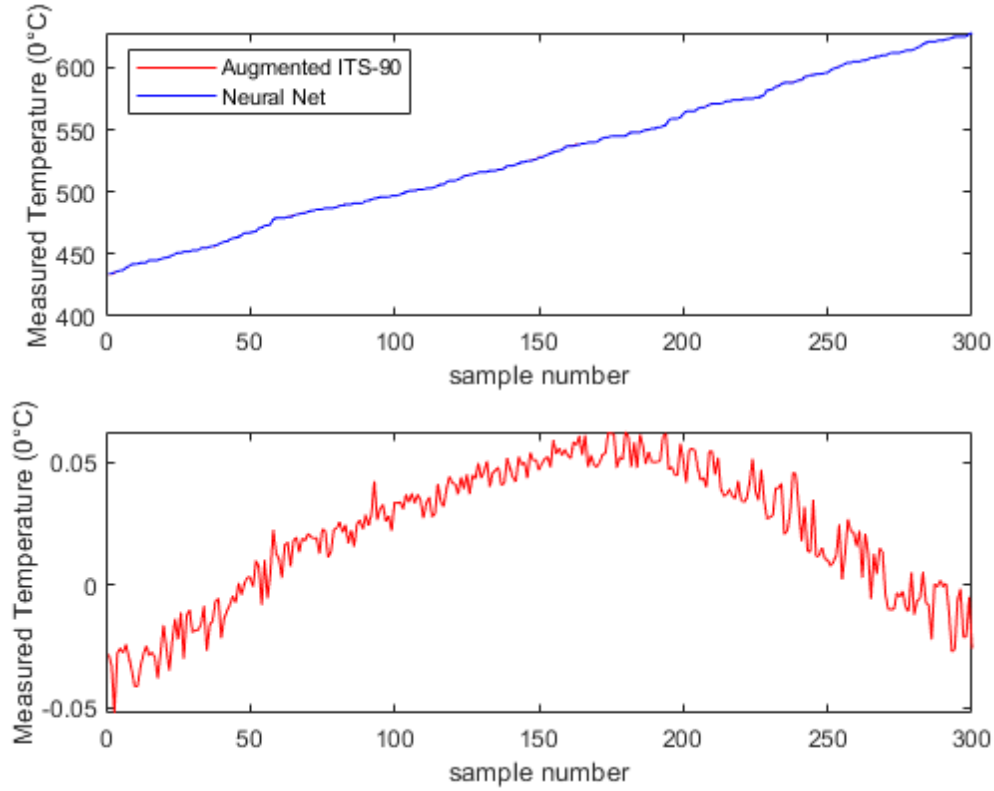
الشكل (3-13) بنية الشبكة العصبونية للمزدوجة الحرارية نوع J [7]

وبعد الاستمرار بتدريب الشبكة العصبونية يبين الشكل (3-14) أفضل أداء تدريبي تم الوصول إليه [7].



الشكل (3-14) خطأ تدريب الشبكة العصبونية للمزدوجة الحرارية نوع J [7]

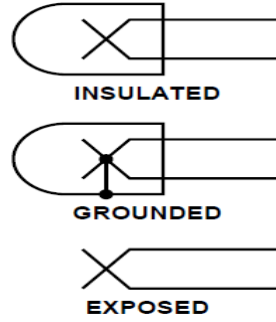
بعد تصميم الشبكة العصبونية للمزدوجة الحرارية نوع J واختبار أداء الشبكة العصبونية MLP باستخدام متجهات دخل غير معروفة. يوضح الشكل (3-15) مخططات خطأ التعميم للمزدوجة الحرارية من النوع J لأداء الشبكات العصبونية في التنبؤ بدرجة الحرارة المقاسة للمزدوجة الحرارية مع متجه دخل لدرجة حرارة الوصلة الباردة والجهد الكهروحراري [7].



الشكل (3-15) مخططات خطأ التعميم للمزدوجة الحرارية من النوع J لأداء الشبكات العصبونية [7]

3-4-3 متطلبات التأريض:

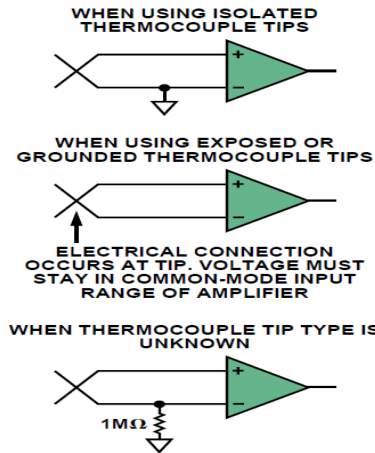
تقوم الشركات المصنّعة للمزدوجات الحرارية بجعل أطراف تقاطع القياس معزولة أو مؤرضة كما في الشكل (3-16). إذ يوجد ثلاثة أنواع اتصال لأطراف الوصلة الساخنة للمزدوجات الحرارية معزولة ومؤرضة ومكشوفة.



الشكل (3-16) أنواع وصلة القياس للمزدوجات الحرارية [3]

يجب تصميم دارات تكييف إشارة المزدوجات الحرارية بحيث يتم تجنب الحلقات الأرضية عند قياس مزدوجة حرارية مؤرضة. ومع ذلك يكون له أيضاً مسار لتيارات انحياز دخل المكبر (المضخم) عند قياس مزدوجة حرارية معزولة، بالإضافة إلى ذلك إذا تم تأريض طرف المزدوجة الحرارية فيجب تصميم مجال دخل المكبر للتعامل مع أي اختلافات في جهد التأريض بين طرف المزدوجة الحرارية وتأريض نظام القياس كما في الشكل (3-17). بالنسبة للأنظمة غير المعزولة، عادةً ما يكون نظام تكييف الإشارة ثنائي الدخل، ويكون أكثر قوة للأطراف المؤرضة وأنواع الأطراف المكشوفة. نظراً لمجال الدخل الواسع للوضع المشترك، يمكن للمضخم ثنائي الدخل التعامل مع فرق جهد كبير بين أرضي الدارة المطبوعة PCB

printed-circuit board والأرض عند طرف المزدوجة الحرارية.



الشكل (3-17) خيارات التأريض عند استخدام أنواع أطراف مختلفة [3].

4-4-3 القابلية للتآكل :Susceptibility to corrosion

نظراً لأن المزدوجات الحرارية تتكوّن من معادن غير متشابهة، فقد يؤدي التآكل بمرور الوقت إلى تدهور الدقة، ومن ثمّ يجب تقديم الحماية والرعاية والصيانة الضرورية (المعايرة الدورية).

5-4-3 التأثير بالضجيج : Susceptibility to noise

عند قياس تغييرات الإشارة على مستوى ميكروفولت يمكن أن يسبب الضجيج من الحقول الكهربائية والمغناطيسية بعض المشاكل، لذلك يجب أن يوفّر جهاز القياس ترشيح إشارة الضجيج وحجبها سواء في الأجهزة أو عن طريق البرمجيات المناسبة مع رفض لتردد الخط (50 هرتز، 60 هرتز) وتوافقياته [3].

5-3 خلاصة الفصل الثالث:

في هذا الفصل عُرض مفهوم تعويض الوصلة الباردة وطرائق تعويض الوصلة الباردة مع ذكر أهم العوائق والتحديات وصعوبات القياس بالمزدوجات الحرارية، وسيعرض الفصل الرابع الدراسة العملية والدارة المقترحة للتغلب على الصعوبات (الخطية- تعويض الوصلة الباردة) التي تواجهنا عند استخدام المزدوجات الحرارية.

الفصل الرابع

الدراسة العملية

4-1 مقدمة:

تمتاز المزدوجات الحرارية بسهولة استخدامها وتركيبها واستقرارها على مجال واسع من درجات الحرارة، إضافةً إلى العديد من الميزات التي تجعل منها متعددة الاستخدام في مختلف التطبيقات الصناعية والمخبرية.....الخ.

ولكن تنشأ القيود والتحديات التي ترافق استخدامها بسبب الخاصية اللاخطية بين جهد الخرج ودرجة الحرارة وبسبب متطلبات تعويض الوصلة الباردة.

لذلك جرى العمل على تصميم دائرة تعالج جميع الصعوبات والقيود التي تواجهنا عند استخدام المزدوجات الحرارية بالاعتماد على الدارة المتكاملة MAX6675 التي سوف يتم دراستها لاحقاً بالتفصيل. وهذه الدارة مصممة من أجل تحسين خطية المزدوجات الحرارية من النوع K، بالإضافة إلى قيامها بالمهمة الثانية وهي تعويض الوصلة الباردة عن طريق ثنائي حراري موجود في دارتها الداخلية وتعالج جميع الصعوبات المذكورة سابقاً (التأريض، إشارة الجهد الصغيرة، الضجيج).

تعمل هذه الدارة على مجال درجة حرارة ($0-1024^{\circ}\text{C}$) جنباً إلى جنب مع متحكم خارجي الذي يقوم بتشغيل الدارة المتكاملة MAX6675 ومعالجة إشارات المزدوجة الحرارية وإشارة جهد خرج حساس الوصلة الباردة وفي هذه الدارة المقترحة استُفيد من المتحكم الصغري Arduino، وأُجريت الاختبارات وعمليات القياس اللازمة وتم الحصول على النتائج التي عُرضت في آخر الفصل باستخدام برنامج MATLAB.

2-4 الدارة المتكاملة IC MAX6675:

تمتاز هذه الدارة بخواصها وعملها في تعويض الوصلة الباردة وتحويل إشارة خرج المزدوجة الحرارية من تماثلي إلى رقمي ضمن مجال واسع لدرجة الحرارة.

1-2-4 المواصفات العامة General Description:

يمكن تلخيص عمل هذه الدارة بما يأتي:

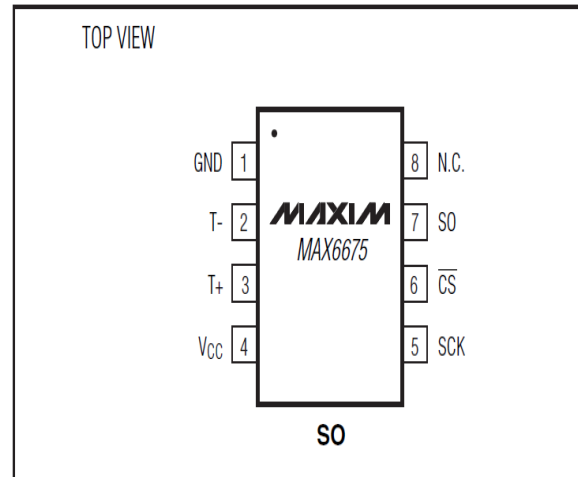
- تقوم دارة MAX6675 بتعويض الوصلة الباردة ورقمنة الإشارة من المزدوجة الحرارية من النوع K.
- يتم إخراج البيانات بدقة 12 bit.
- متوافقة مع Serial Peripheral Interface SPI.
- يمكن لهذا الدارة أن تحس بتغيرات درجة الحرارة بدقة 0.25°C ، ويسمح بقراءات تصل إلى 1024°C .
- تتوفر MAX6675 في شريحة صغيرة ذات ثمانية أرجل (8-pin So package)، وكلفتها مناسبة.

2-2-4 التطبيقات Application:

تُستخدم دارة MAX6675 في مجالات واسعة مثل التطبيقات الصناعية والأجهزة المنزلية Appliances و HVAC التدفئة والتهوية وتكييف الهواء والسيارات.

3-2-4 مكونات الأرجل Pin Configuration:

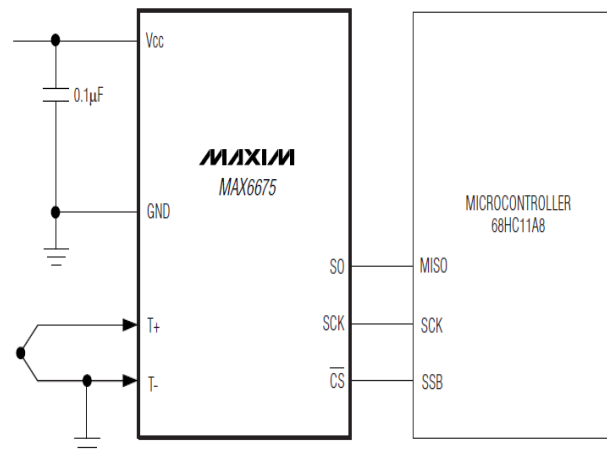
إن دارة MAX6675 عبارة عن دارة متكاملة ذات ثمانية أرجل (8-pin So package). يتم توصيل الرجل (1) بالأرضي، ويكون دخل المزدوجة الحرارية موصول بالرجل (2,3)، ويتم توصيل مصدر التغذية بالرجل (4) كما هو موضح في الشكل (1-4).



الشكل (4-1) مكونات أرجل MAX6675

4-2-4 دائرة التطبيق النموذجية:

تُوضع مكثفة بقيمة $0.1\mu F$ بين مصدر التغذية والأرضي لتقليل تأثير الضجيج المقترن بمصدر التغذية ويتصل سلكاً المزدوجة الحرارية بالدخل $T+$, $T-$. ويتم اتصال الأرجل (SCK , $\overline{CS}$, SO) مع الأرجل الموافقة للتحكم كما هو موضح في الشكل (4-2).



الشكل (4-2) دائرة التطبيق النموذجية لـ MAX6675

4-2-5 توصيف الأرجل:

الوظيفة (FUNCTION)	الاسم (NAME)	الرجل (PIN)
أرضي	GND	1
السلك السالب للمزدوجة الحرارية نوع K ويتكون من الألوميل ويجب أن يتصل بالأرض خارجياً	T-	2
السلك الموجب للمزدوجة الحرارية نوع K ويتكون من الكروميل	T+	3
جهد التغذية ومتصل عن طريق مكثفة 0.1 ميكروفاراد إلى الأرض	VCC	4
Serial Clock Input	SCK	5
Chip Select	$\overline{CS}$	6
Serial Data Output	SO	7
No Connection	NC	8

4-2-6 الوصف التفصيلي لدارة MAX6675:

تعد دارة MAX6675 محولاً متطوراً لإشارة المزدوجة الحرارية إلى إشارات رقمية، وهي محوّل (ADC) من تشابهي إلى رقمي 12 bit.

تحتوي دارة MAX6675 على حسّاس ومصحّح لتعويض الوصلة الباردة، وعلى وحدة تحكّم رقمية وواجهة متوافقة مع SPI ومنطق التحكم المرتبط.

صُمّمت دارة ال MAX6675 للعمل جنباً إلى جنب مع متحكّم خارجي Microcontroller في التطبيقات الحرارية أو التحكم في العمليات والمراقبة.

4-2-7 تحويل درجة الحرارة:

تشتمل الدارة المتكاملة MAX6675 على دارات تكيف إشارة المزدوجة الحرارية لتحويلها إلى جهد كهربائي متوافق مع قنوات الدخل الخاصة ب ADC.

يتصل الدخلان T+ و T- بالدارات الداخلية التي تقلل من أخطاء الضجيج من الأسلاك الكهربائية.

قبل تحويل الجهد الكهروحراري إلى قيم درجة حرارة مكافئة، من الضروري تعويض الفرق بين جانب الوصلة الباردة للمزدوجة الحرارية (درجة الحرارة المحيطة ب MAX6675).

يتغير الجهد بمقدار $41\mu V/^{\circ}C$ والذي يقارب خاصية المزدوجة الحرارية نوع K بالمعادلة الخطية الآتية:

$$V_{out} = (41\mu V/^{\circ}C) * (T_R - T_{AMB})$$

إذ V_{out} هو جهد خرج المزدوجة الحرارية.

T_R هي درجة حرارة الوصلة الساخنة للمزدوجة الحرارية،

T_{AMB} هي درجة حرارة البيئة المحيطة (الوصلة الباردة) للمزدوجة الحرارية.

4-2-8 تعويض الوصلة الباردة (Cold Junction Compensation):

- تتمثل وظيفة المزدوجة الحرارية في الشعور باختلاف في درجة الحرارة بين نهاية طرفي سلكيها.

- يمكن قراءة درجة حرارة الوصلة الساخنة للمزدوجة الحرارية من $(0-1024^{\circ}C)$.

- يمكن أن تتراوح درجة حرارة الوصلة الباردة (درجة حرارة الوسط المحيط بالدارة (اللوحة) التي تم تركيب

دارة ال MAX6675 عليها) من $(-20 \text{ to } 85^{\circ}C)$ فقط.

- بينما تتقلب درجة الحرارة عند الوصلة الباردة تستمر دارة ال MAX6675 في تحسّس اختلاف درجة الحرارة في الطرف الآخر.

- تستشعر دارة MAX6675 بالتغيرات في درجة الحرارة المحيطة وتصححها من خلال تعويض الوصلة الباردة.

- يتم تحويل قراءة درجة الحرارة المحيطة إلى جهد باستخدام ثنائي حراري وهو عبارة عن حسّاس لدرجة الحرارة. لإجراء قياس درجة حرارة المزدوجة الحرارية الفعلية، تقيس دارة ال MAX6675 الجهد من خرج المزدوجة الحرارية ومن الثنائي المعوّض لدرجة حرارة البيئة (الوصلة الباردة). ثم تمرّر الدارة الداخلية لدارة MAX6675 الجهد الكهروحراري للثنائي الحراري (حسّاس درجة حرارة الوصلة الباردة) والجهد الكهروحراري للمزدوجة الحرارية (درجة الحرارة الفعلية - درجة الحرارة المحيطة) إلى وظيفة التحويل المخزنة في المحوّل من تماثلي إلى رقمي ADC لحساب درجة حرارة الوصلة الساخنة للمزدوجة الحرارية.

- يتم تحقيق الأداء الأمثل من MAX6675 عندما تكون الوصلة الحرارية الباردة و MAX6675 في درجة الحرارة نفسها.

- يجب تجنّب وضع الأجهزة أو المكونات المولّدة للحرارة بالقرب من دارة MAX6675 لأن ذلك قد يضيف أخطاء متعلقة بالوصلة الباردة.

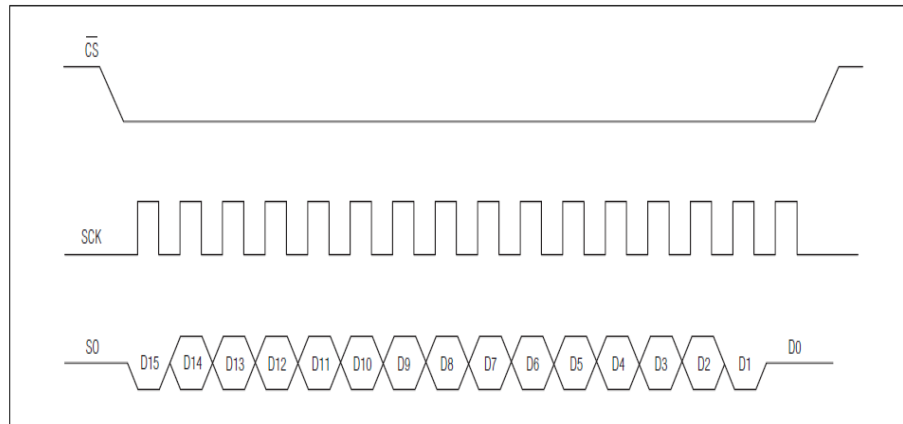
4-2-9 معلومات التطبيق:

الواجهة التسلسلية Serial interface:

تظهر دارة التطبيق النموذجية دارة ال MAX6675 متداخلة مع متحكّم دقيق، وتعالج دارة ال MAX6675 القراءة من المزدوجة الحرارية وتنقل البيانات عبر واجهة تسلسلية.

- يتم فرض $\overline{CS}$ منخفضاً ويتم تطبيق إشارة SCK لقراءة النتائج في SO. يؤدي فرض $\overline{CS}$ منخفض إلى إيقاف أي عملية تحويل على الفور.

- تبدأ عملية التحويل الجديدة بفرض $\overline{CS}$ عالٍ كما هو موضح في الشكل (3-4).



الشكل (3-4) بروتوكول الواجهة التسلسلية

- يتم فرض $\overline{CS}$ منخفضاً لإخراج البت الأول على الرجل SO.

- يكون البت الأول D15 عبارة عن بت إشارة وهمية ودائماً ما يكون صفراً، وتحتوي البتات D14 إلى

D3 على درجة الحرارة المحولة بالترتيب من MSB إلى LSB.

- عادةً ما يكون البت D2 منخفضاً ويرتفع عند فتح دخل المزدوجة الحرارية.

- D1 منخفض لتوفير معرّف دائرة MAX6675.

- البت D0 عبارة عن ثلاث حالات كما في الشكل (4-4).

BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING												THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE
Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	MSB											LSB		0	Three- state

الشكل (4-4) خرج SO

10-2-4 مزدوجة حرارية مفتوحة Open Thermocouple:

البت D2 عادةً يكون منخفضاً ويرتفع إذا كان دخل المزدوجة الحرارية مفتوحاً. للسماح بتشغيل كاشف المزدوجة الحرارية المفتوحة يجب تأريض T-. وجعل التوصيل الأرضي أقرب قدر الإمكان إلى الرجل (GND).

11-2-4 اعتبارات الضجيج Noise Considerations:

تُعدّ دقة دائرة MAX6675 عرضة للضجيج الحراري، ويمكن تقليل تأثير هذا الضجيج عن طريق وضع مكثف (0.1) ميكروفاراد بالقرب من مصدر التغذية للدائرة (VCC).

12-2-4 اعتبارات حرارية Thermal Considerations:

- 1- يقلّل التسخين الذاتي من دقة قياس درجة الحرارة لدائرة MAX6675 في بعض التطبيقات.
- 2- يتعلّق خطأ قياس درجة الحرارة بالتوصيل الحراري وتقنية تركيب MAX6675، وتأثيرات تدفق الهواء.
- 3- يجب استخدام مستوى أرضي كبير لتحسين دقة قياس درجة الحرارة بواسطة MAX6675.
- 4- في حال الحاجة إلى سلك صغير، يجب استخدامه فقط في منطقة القياس، واستخدام سلك التمديد للمنطقة التي لا يوجد فيها تدرّج في درجة الحرارة.
- 5- يجب تجنب الإجهاد والاهتزازات الميكانيكية وهذا قد يسبب فصل الأسلاك.

6- تجنّب التدرّجات الحادة في درجات الحرارة.

7- محاولة استخدام سلك المزدوجة الحرارية ضمن تصنيف درجة الحرارة الخاصة به.

8- يجب استخدام مواد التغليف المناسبة في بيئات صعبة وقاسية لحماية أسلاك المزدوجة الحرارية.

9- الاحتفاظ بسجل الأحداث وتسجيل مستمر لمقاومة المزدوجة الحرارية.

4-2-13 تقليل تأثير ضجيج الالتقاط:

مضخّم الدخل (A1) هو مضخّم منخفض الضجيج مصمّم لتمكين استشعار الدخل بدقة عالية.

يتم الاحتفاظ بالمزدوجة الحرارية وأسلاك التوصيل بعيداً عن مصادر الضجيج الكهربائي.

4-2-14 البنية الداخلية لدارة MAX6675:

تحتوي الدارة الداخلية لدارة MAX6675 كما في الشكل (4-5) على المكونات والوحدات الآتية:

1- مكبر عملياتي لإشارة المزدوجة الحرارية بمعامل تضخيم (10)، وذلك مهم جداً من أجل إمكانية

التعامل معها من قبل المتحكم الصغري Arduino.

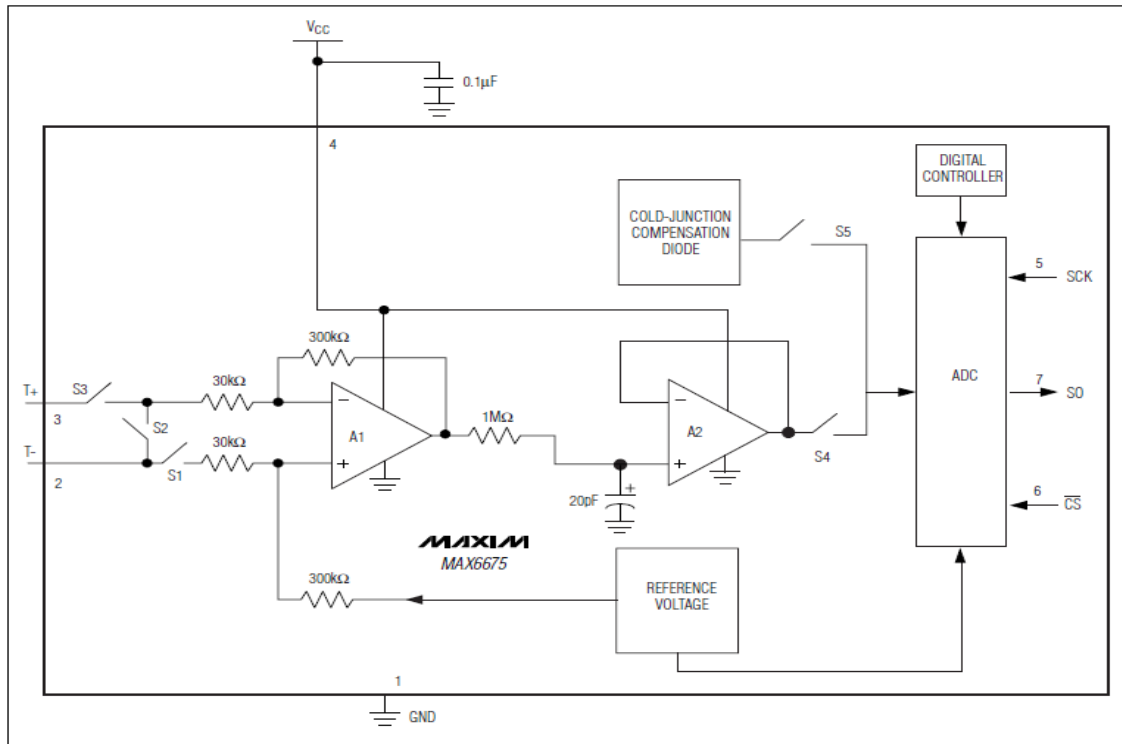
2- ADC محوّل من تماثلي إلى رقمي.

3- ثنائي حراري لتعويض الوصلة الباردة.

4- A2 وهو عبارة عن Buffer.

- تنتج المزدوجات الحرارية جهداً كهروحرارياً في حدود الملي فولت (mv)، لذلك من الضروري جداً تضخيم إشارة المزدوجات الحرارية قبل إرسال الإشارة إلى المتحكم الصغيري لإجراء المعالجة. وعادةً يستخدم في دارات تكييف إشارة المزدوجات الحرارية مضخمات عملياتية عدّة، هنا في الدارة الداخلية يُستخدم مضخم عمليّتي تفاضلي بمعامل كسب (10) عن طريق التحكم في قيم المقاومتين الكهربائيتين ($30K\Omega, 300K\Omega$)، ومضخم آخر يعمل ك Buffer.

- تُعدّ المزدوجات الحرارية حسّاسات ذات خرج تماثلي، لذلك من الضروري أن يكون لدى النظام متحكم صغيري يقوم بتشغيل دارة ال MAX6675 ومعالجة إشارات المزدوجة الحرارية وإشارة جهد خرج حسّاس الوصلة الباردة.

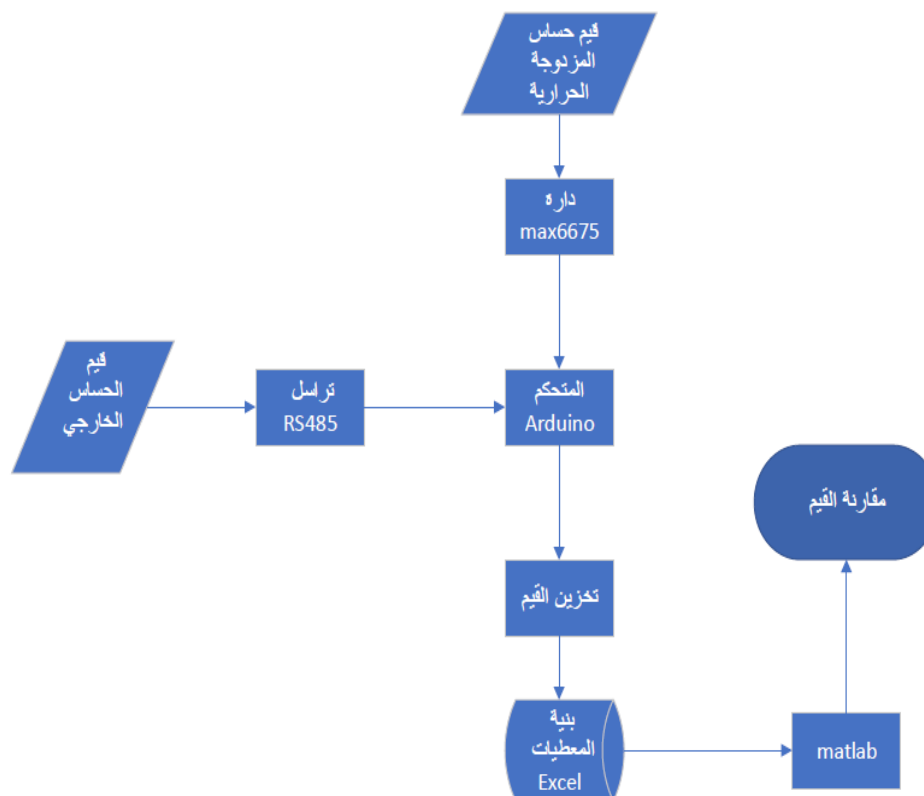


الشكل (4-5) البنية الداخلية لدارة MAX6675

3-4 المخطط التفصيلي والتنفيذ العملي والنتائج:

صُمِّمت دائرة إلكترونية بالاعتماد على مزدوجة حرارية من النوع K، ودائرة MAX6675 المصمَّمة خصيصاً لهذا النوع من المزدوجات الحرارية، والمتحكم الصغري Arduino ، وبالاعتماد على الفرن الحراري (VITA6000) الذي يمكننا ضبطه حرارياً للحصول على درجة حرارة مرجعية. ولكن كما ذكرنا سابقاً إنّ مجال عمل المزدوجة الحرارية من النوع K بين $(-270 - 1372^{\circ}\text{C})$ ، وإنّ مجال عمل دائرة MAX6675 يتراوح بين $(0 \rightarrow 1024^{\circ}\text{C})$ ، ولكن بسبب أنّ مجال عمل الفرن الحراري (VITA6000) يتراوح بين $(0 \rightarrow 750^{\circ}\text{C})$ ، اقتصرت عمليات القياس على المجال الخاص بالفرن الحراري فقط.

وبيّن الشكل (4-6) المخطط التفصيلي للدائرة المقترحة.



الشكل (4-6) المخطط التفصيلي للدائرة المقترحة [عمل الباحث].

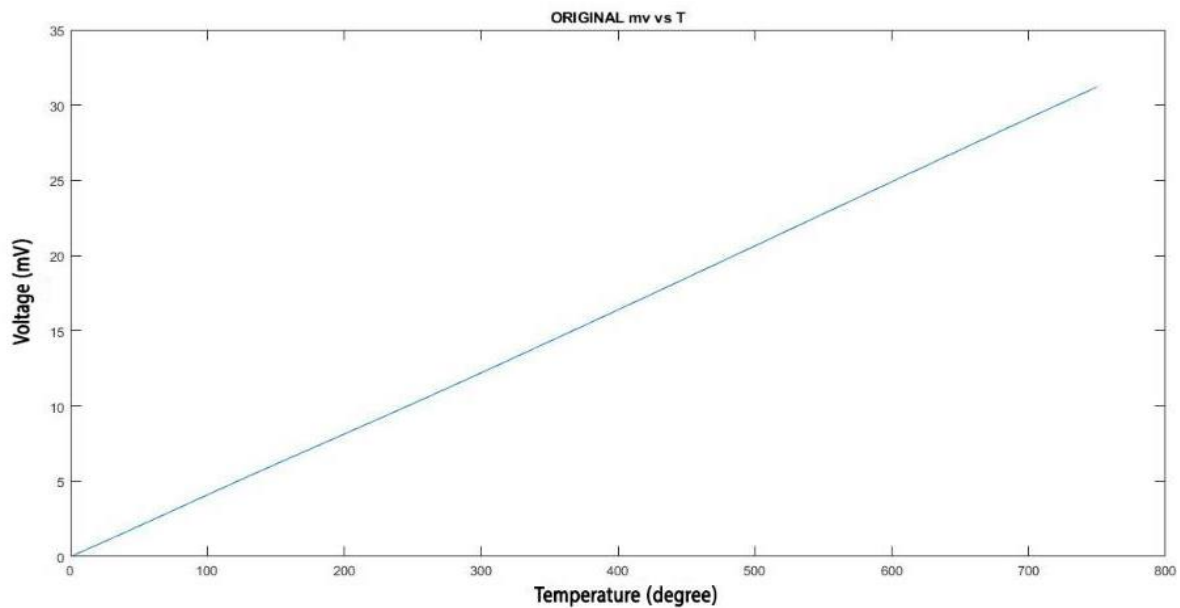
ويتم إجراء هذا العمل على مراحل عدّة:

أولاً: تنظيم جدول يتضمن قيم درجة حرارة للمزدوجة الحرارية K وما يقابلها من جهد الخرج وفقاً لمعايير وقيم المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا NIST وهي قيم معيارية أُخذت عند معايرة هذا النوع من المزدوجات الحرارية (حيث تتم معايرة المزدوجات مع الاحتفاظ بالوصلة الباردة عند الدرجة 0°C) على مجال درجة حرارة من $(0 \rightarrow 750^{\circ}\text{C})$.

ثانياً: تُؤخذ البيانات من المزدوجة الحرارية الموضوعة داخل الفرن الحراري ثم إلى دارة MAX6675 الموصولة مع المتحكم الصغيري Arduino الذي قام بمعالجتها وتسجيل هذه المعلومات في قاعدة بيانات، ثم عن طريق وصلة USB تم توصيل برنامج الماتلاب مع Arduino. وتم الحصول على جدول بيانات يتضمن درجات حرارة $(0 \rightarrow 750^{\circ}\text{C})$ و ما يقابلها من جهد خرج ناتج عن عمليات القياس التي تم إجراؤها. وأجريت المقارنة بين الجدولين وتم الحصول على النتائج الآتية:

1-3-4 منحنى جهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة:

رُسمت العلاقة بين جهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة كما في الشكل (4-7).

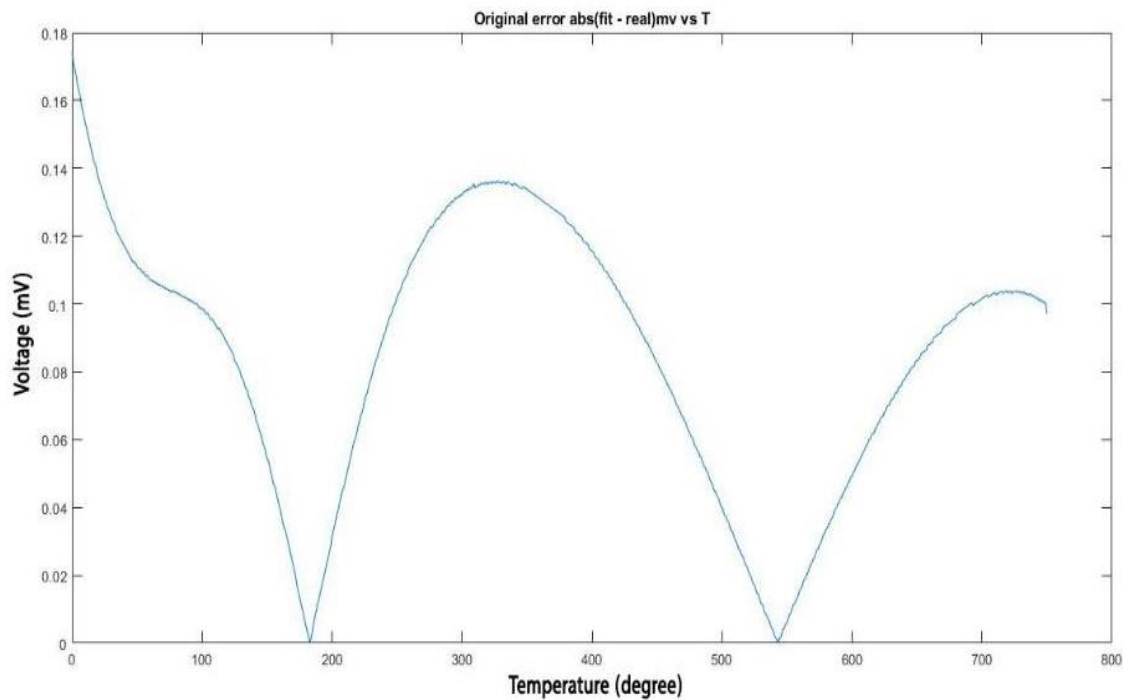


الشكل (4-7) منحنى جهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

يبين الشكل (4-7) جهد الخرج للمزدوجة الحرارية نوع K مقابل درجة الحرارة على مجال درجة حرارة $(0 \rightarrow 750^\circ\text{C})$ ، وكما ذكر سابقاً هنا أخذ بالحسبان درجة الحرارة للوصلة الباردة (0°C) . وينتج هذا الشكل من قيم درجات الحرارة للمزدوجة الحرارية من النوع K وما يقابلها من جهد الخرج من الجداول القياسية للمعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا NIST.

4-3-2 الخطأ المطلق لجهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة:

رُسمت علاقة الخطأ المطلق (mv) لجهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة



الشكل (4-8) الخطأ المطلق لجهد الخرج المعياري مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

يلاحظ من الشكل (4-8) أن قيمة الخطأ المطلق لجهد الخرج المعياري من NIST يتراوح بين

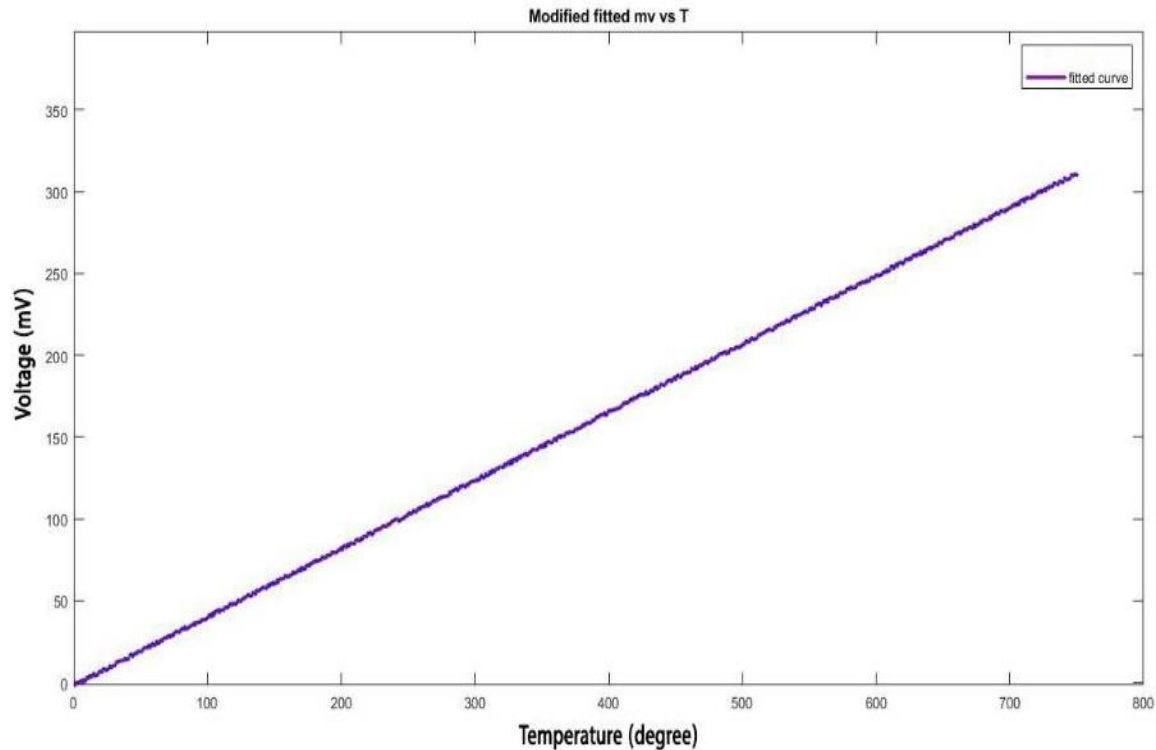
$(0 \rightarrow 0.18 \text{ mv})$. وهذا الخطأ ناتج عن تغيّر معامل سيبك أو الحساسية الكهروحرارية الذي يعبر عنه

بالتغيّر في القوة المحركة الكهروحرارية EMF فيما يتعلّق بالتغيّر في درجة الحرارة. بمعنى آخر تظهر

اللاخطية بمعاملات سيبك بالنسبة لأنظمة قياس المزدوجات الحرارية.

3-3-4 منحنى جهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة:

رُسم منحنى جهد الخرج الناتج عن عمليات القياس مقابل درجة الحرارة، وتم تعويض الوصلة الباردة. يظهر الشكل (9-4) جهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة بعد تعويض الوصلة الباردة واستخدام الدارة المتكاملة MAX6675.



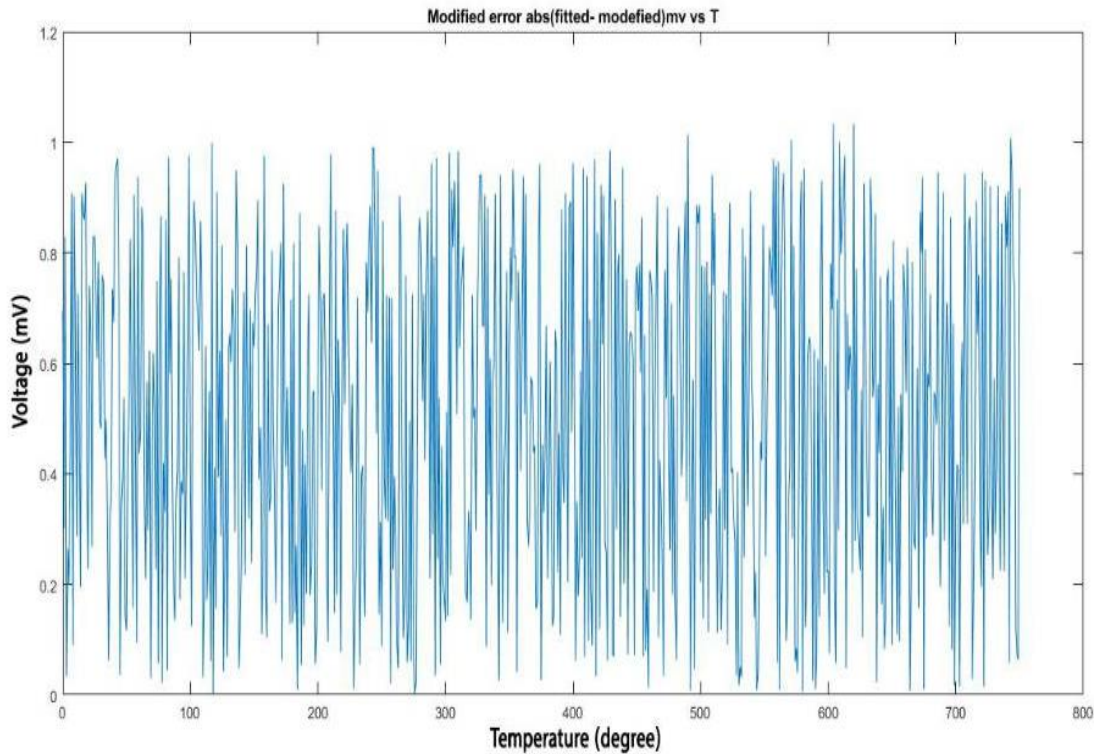
الشكل (9-4) منحنى جهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

أُخذت بيانات الشكل (9-4) من جدول جهد خرج المزدوجة الحرارية بعد تكييف إشارة المزدوجة الحرارية باستخدام دارة MAX6675، وتعويض الوصلة الباردة بوساطة الحساس الثنائي الحراري الموجود داخلها. ولأغراض تحسين الحساسية والدقة جرى تضخيم جهد خرج المزدوجة الحرارية إلى مستوى يمكن معالجته باستخدام المتحكم الصغري Arduino، لذلك نلاحظ أن الجهد الناتج من عملية القياس يتراوح بين (0 to 310.28 mv). ونلاحظ من الشكل (9-4) تحسين الخطية للمزدوجة الحرارية المستخدمة.

4-3-4 الخطأ المطلق لجهد الخرج الناتج مقابل درجة الحرارة:

رُسمت علاقة الخطأ المطلق (mv) لجهد الخرج الناتج عن عمليات القياس مقابل درجة الحرارة.

يظهر الشكل (10-4) الخطأ المطلق لجهد خرج عمليات القياس مقابل درجة الحرارة.



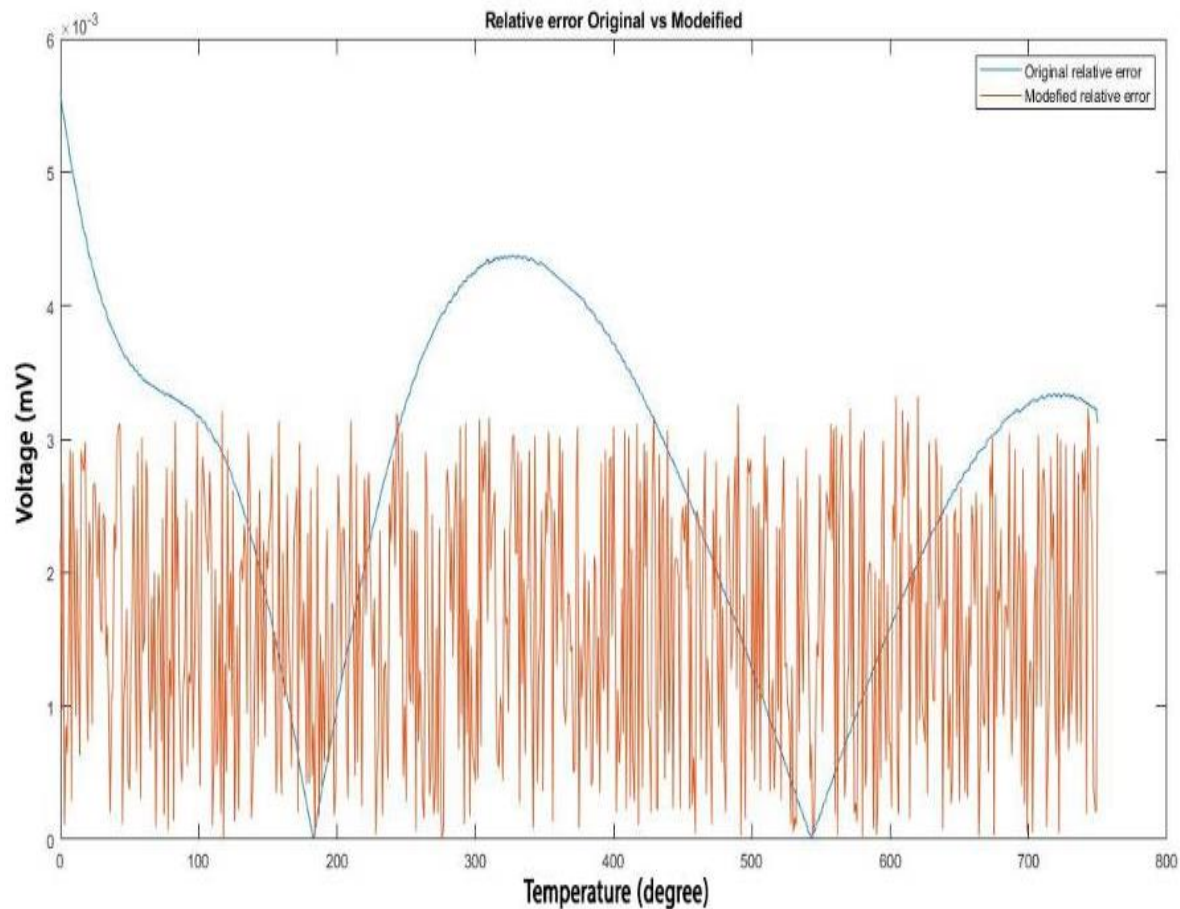
الشكل (10-4) الخطأ المطلق لجهد خرج عمليات القياس مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

ينتج هذا الخطأ بسبب عوامل عدة:

- خطأ الارتياح الناتج بسبب استخدام الفرن الحراري والمقدّر بحوالي (0.75°C) .
 - خطأ قراءة الثنائي الحراري المستخدم لتعويض الوصلة الباردة.
 - عوامل عدة أخرى متعلقة بآلية تحصيل النتائج ووضعيات الدارة المصمّمة.
- نلاحظ أنّ قيمة الخطأ المطلق من الشكل (10-4) تتراوح في حدود (0 to 1.2 mv) .

4-3-5 مقارنة الخطأ النسبي لجهد الخرج المعياري وعمليات القياس مقابل درجة الحرارة:

يوضح الشكل (4-11) الخطأ النسبي لجهد الخرج المعياري من NIST وجهد خرج عمليات القياس مقابل درجة الحرارة، ونلاحظ أن نسبة الخطأ النسبي للدائرة المصممة أقل في معظم نقاط درجات الحرارة المستخدمة في عملية القياس (0 to 750 °C). نلاحظ من الشكل (4-11) أن قيمة الخطأ النسبي لخرج الجهد المعياري مقابل درجة الحرارة تتراوح بين (0 to 0.006 mv). في حين قيمة الخطأ النسبي لجهد خرج عملية القياس مقابل درجة الحرارة تتراوح بين (0 to 0.0033 mv)، أي بلغت قيمة الخطأ النسبي في أسوأ حالة (0.33 %).



الشكل (4-11) مقارنة الخطأ النسبي لجهد الخرج المعياري وعمليات القياس مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

جدول (4-1) النتائج والفرق بين جهد عمليات القياس والجهد المعياري لبعض درجات الحرارة المدروسة:

درجة الحرارة (°C)	الجهد الأصلي من (mv) NIST	الجهد الناتج من عملية القياس (mv)	قيمة الخطأ (mv)
10	0.397	0.308	0.089
20	0.758	0.679	0.079
30	1.163	1.039	0.124
40	1.612	1.423	0.189
50	2.023	1.897	0.126
60	2.436	2.282	0.154
70	2.851	2.776	0.075
80	3.267	3.193	0.074
90	3.682	3.619	0.063
100	4.096	3.954	0.142
150	6.138	6.018	0.120
200	8.138	8.217	-0.079
250	10.153	10.263	-0.11
300	12.209	12.328	-0.119
350	14.293	14.490	-0.197
400	16.397	16.610	-0.213
450	18.516	18.523	-0.007
500	20.644	20.667	-0.023
550	22.776	22.896	-0.12
600	24.905	24.883	0.022
650	27.025	26.956	0.069
700	29.129	29	0.129
750	31.213	31.028	0.185

4-4 مناقشة النتائج:

يظهر الجدول (2-4) مقارنة نتائج الدراسة المقترحة مع بعض الدراسات المرجعية، وتتم المقارنة من حيث نسبة الخطأ والانحراف عن الخطية ومجال درجة الحرارة المدروس.

جدول (2-4) مقارنة نتائج الدراسة المقترحة مع بعض الدراسات المرجعية

الدراسة المرجعية	نوع المزودة الحرارية	مجال درجة الحرارة °C	نسبة الخطأ والانحراف عن الخطية (%)
Anish Mukherjee et al [4]	T	0 – 100	0.8
Ayman A. Aly et al [6]	T	0 – 300	0.447
	J	0 – 300	0.29
	J	0 – 760	0.48
المزودة الحرارية المعيارية (NIST)	K	0 – 750	0.6
الدراسة المقترحة	K	0 – 750	0.33

أولاً:

- بمقارنة أداء الدارة المقترحة مع الدراسة المرجعية التي قام بها Anish Mukherjee وآخرون [4] بلغت نسبة الخطأ والانحراف عن الخطية (0.8 %) ضمن مجال درجة حرارة (0 to 100°C)، في حين بلغت نسبة دقة القياس والانحراف عن الخطية في الدراسة المقترحة (0.33%) ضمن مجال درجة حرارة (0 to 750 °C).

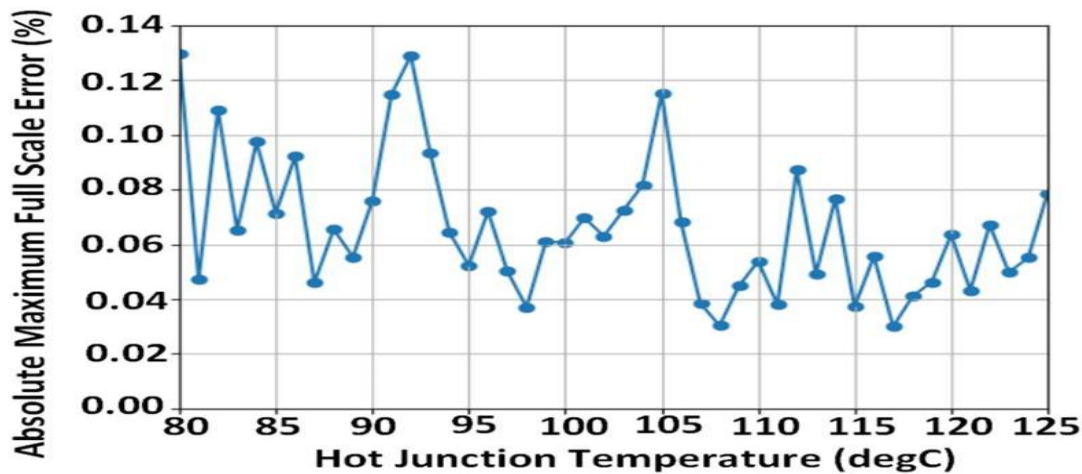
- بمقارنة أداء الدارة المقترحة مع الدراسة المرجعية التي قام بها Ayman A. Aly وآخرون [6] بلغت نسبة الخطأ والانحراف عن الخطية (0.447%) للمزودة الحرارية من النوع (T) ضمن مجال درجة حرارة

(0 to 300 °C). وبلغت نسبة الخطأ والانحراف عن الخطية (0.29%) للمزدوجة الحرارية من النوع (J) ضمن مجال درجة حرارة (0 to 300 °C). و (0.48%) ضمن مجال درجة حرارة (0 to 760°C).

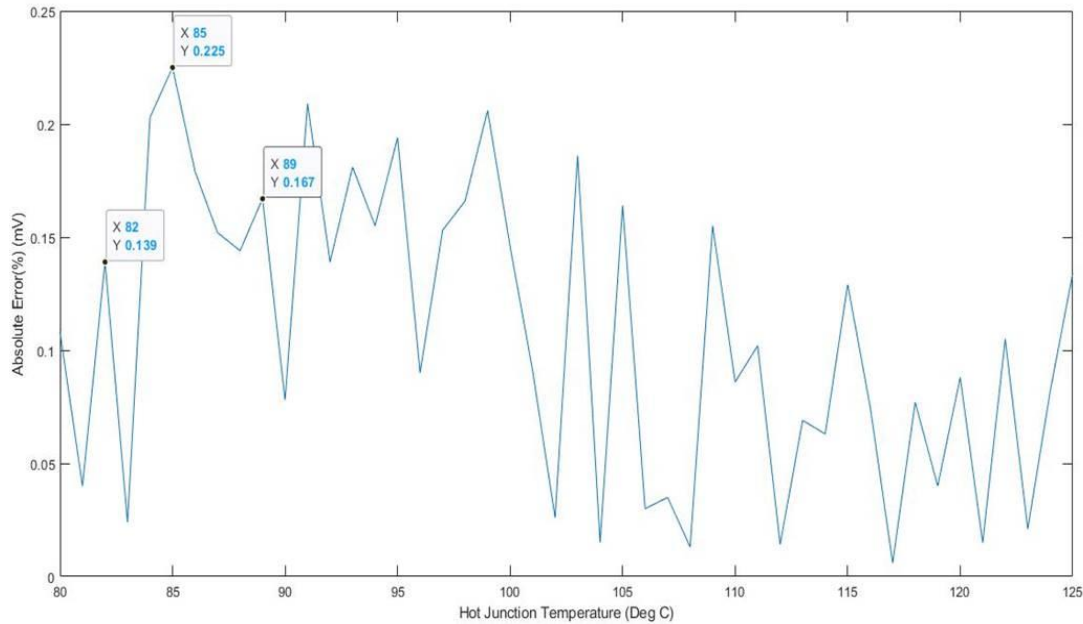
- بمقارنة أداء الدارة المقترحة مع بيانات وقيم المزدوجة الحرارية المعيارية نوع K (NIST) قبل تطبيق الدارة المقترحة. إذ بلغت نسبة دقة القياس والانحراف عن الخطية (0.6 %) قبل تطبيق الدارة المقترحة، ضمن مجال درجة حرارة (0 to 750 °C). في حين بلغت نسبة دقة القياس والانحراف عن الخطية (0.33%)، ضمن مجال درجة حرارة (0 to 750 °C).

ثانياً: مقارنة نتائج الدراسة المقترحة مع بعض الدراسة المرجعية ب Sugata Munshi وآخرون [2] :

بمقارنة أداء الدارة المقترحة مع الدراسة المرجعية التي قام بها Sugata Munshi وآخرون [2] إذ بلغت نسبة الخطأ المطلق لهذه الدراسة المرجعية في أسوأ حالة (0.13 %)، ضمن مجال درجة حرارة (80 to 125 °C) كما هو موضح في الشكل (4-12). في حين بلغت نسبة الخطأ المطلق للدارة المقترحة في أسوأ حالة (0.225%)، ضمن مجال درجة حرارة (80 to 125 °C) كما هو موضح في الشكل (4-13).



الشكل (4-12) الخطأ المطلق لجهد خرج المزدوجة الحرارية مقابل درجة الحرارة [2]



الشكل (4-12) الخطأ المطلق لجهد خرج المزدوجة الحرارية الناتج مقابل درجة الحرارة [عمل الباحث].

يبين الشكل (4-13) الخطأ المطلق لجهد خرج المزدوجة الحرارية الناتج عن عمليات القياس، وبحساب متوسط هذا الخطأ المطلق نجده في حدود (0.105%).

5-4 الخاتمة:

تم تصميم دائرة تكيف إشارة المزدوجة الحرارية من النوع K وتنفيذها من أجل تحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة، بالاعتماد على IC MAX6675 التي تؤدي المهمة المزدوجة للخطية وتعويض الوصلة الباردة. أُجريت المحاكاة في (Matlab) وتظهر الدائرة المقترحة خطية جيدة جداً ضمن مجال درجة حرارة (0-750) درجة مئوية. إذ بلغت نسبة دقة القياس والانحراف عن الخطية (0.33%). وتُعدّ هذه النسبة جيدة جداً وهي ضمن الحدود التي حدّتها خوارزمية بولك واستيفاء لاغرانج بالنسبة لأنظمة قياس درجة الحرارة باستخدام المزدوجات الحرارية.

الآفاق المستقبلية:

- تطوير هذه الدارة من أجل تحسين الخطية وتعويض الوصلة الباردة لأنواع عدّة أخرى من المزدوجات الحرارية.

- الاستفادة من الشبكات العصبونية الصناعية في تحسين خطية المزدوجات الحرارية وتعويض الوصلة الباردة عن طريق تدريب شبكة عصبونية مناسبة، واستخدام جهد خرج المزدوجة الحرارية، ودرجات حرارة الوصلة الباردة كدخل للشبكة العصبونية، واستخدام درجات حرارة الوصلة الساخنة كخرج للشبكة العصبونية.

- استخدام المزدوجة الحرارية المدروسة في حسّاسات إنترنت الأشياء IOT ودراسة أدائها.

المراجع

- [1]– Chen, X., Sun, L., & Ling, Y. (2018, July). A Calibration Method for Thermocouple-temperature Calibrator Based on Cold Junction Compensation. In *2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)* (pp. 1118-1121). IEEE.
- [2]– Bhattacharya, D., Chandra, P. P., Bhattacharyya, B., & Munshi, S. (2020, February). Optimized thermocouple temperature sensor using 555 timer and ann based linearization. In *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON)* (pp. 288-291). IEEE.
- [3]– Duff, M., & Towey, J. (2010). Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity, accuracy, and flexibility. *Analog dialogue*, 44(10), 1-6.
- [4]– Mukherjee, A., Sarkar, D., Sen, A., Dey, D., & Munshi, S. (2013, December). An analog signal conditioning circuit for thermocouple temperature sensor employing thermistor for cold junction compensation. In *2013 international conference on control, automation, robotics and embedded systems (care)* (pp. 1-5). IEEE.
- [5]– Trancă, D. C., Rosner, D., Surpăţeanu, A., & Pešić, M. T. (2016, September). A compact size signal conditioning circuit for thermocouple linearization and amplification for industrial IoT devices. In *2016 15th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research* (pp. 1-5). IEEE.

- [6] – Aly, A. A., & El-Lail, A. S. A. (2013). A novel circuit for thermocouple signals linearization using AD converter. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, 5(3), 56-60.
- [7]– Maseko, M. L., Agee, J. T., & Davidson, I. (2022, January). Thermocouple signal conditioning using augmented device tables and table look-up neural networks, with validation in J-Thermocouples. In *2022 30th Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [8]– Maseko, M. L. (2022). *Thermocouple signal conditioning using artificial neural networks* (Doctoral dissertation).
- [9]– عمار، محمد. (1997). قياس درجات الحرارة (ط 2). القاهرة: مطبعة المعرفة. ص: ٣٨٩.
- (رئيس المعهد القومي للمعايرة ، تم طباعة الكتاب بإشراف المعهد القومي للمعايرة ووزارة الدولة للبحث العلمي)
- [10]– Živanović, D., & Simić, M. (2021). Two-stage segment linearization as part of the thermocouple measurement chain. *Measurement and Control*, 54(1-2), 141-151.
- [11]– Chen, A., & Chen, C. (2013). Evaluation of piecewise polynomial equations for two types of thermocouples. *Sensors*, 13(12), 17084-17097.
- [12]– Danisman, K. E. N. A. N., Dalkiran, I., & Celebi, F. V. (2006). Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. *Measurement*, 39(8), 695-700.
- [13]– Huang, Y. C., Lin, P. S., Chen, Y. L., Hu, C. F., & Fang, W. (2021, January). Detectivity Enhancement for CMOS-MEMS IR Sensor by

Thermocouple Arrangement. In *2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (pp. 927-928). IEEE.

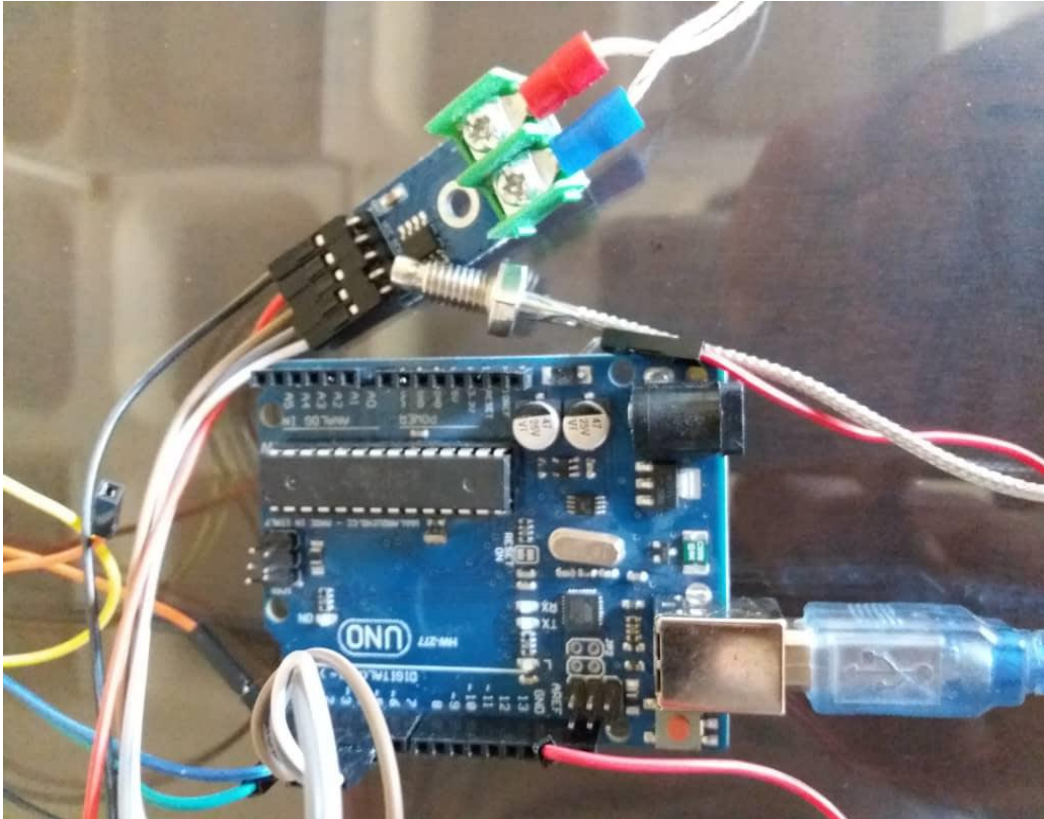
[14]– Duff, M. and Towey, J. (2017). Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility Analog Devices. [online] Analog.com. Available at: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/measuring-temp-using-thermocouples.html> [Accessed 2 May. 2017].

[15]– NIST ITS–90 Thermocouple Database. Available from:

<http://srdata.nist.gov/its90/main/>.

الملحق (1) العتاديات المستخدمة في عمليات القياس:

- 1- مزدوجة حرارية من النوع K.
 - 2- دائرة MAX6675.
 - 3- متحكم صغيري Arduino.
 - 4- برنامج المحاكاة MATLAB R2020a.
 - 5- الجهاز عن فرن Vita6000 وهو عبارة مضبوط حرارياً يستخدم كمرجع حراري.
- ويبين الشكل الدارة المستخدمة في عملية القياس بعد تجميعها.



الدائرة المصممة المستخدمة في عملية القياس.

الملحق 2 الجدول المعياري ITS-90 للمزدوجة الحرارية من النوع K مع معاملات سيبك

ITS-90 Table for type K thermocouple

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Thermoelectric Voltage in mV											
-270	-6.458										
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392

ITS–90 Table for type K thermocouple

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermoelectric Voltage in mV											
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382

280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644

°C 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

ITS-90 Table for type K thermocouple

°C 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Thermoelectric Voltage in mV

500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203

560 23.203 23.245 23.288 23.331 23.373 23.416 23.458 23.501 23.544 23.586 23.629
570 23.629 23.671 23.714 23.757 23.799 23.842 23.884 23.927 23.970 24.012 24.055
580 24.055 24.097 24.140 24.182 24.225 24.267 24.310 24.353 24.395 24.438 24.480
590 24.480 24.523 24.565 24.608 24.650 24.693 24.735 24.778 24.820 24.863 24.905
600 24.905 24.948 24.990 25.033 25.075 25.118 25.160 25.203 25.245 25.288 25.330
610 25.330 25.373 25.415 25.458 25.500 25.543 25.585 25.627 25.670 25.712 25.755
620 25.755 25.797 25.840 25.882 25.924 25.967 26.009 26.052 26.094 26.136 26.179
630 26.179 26.221 26.263 26.306 26.348 26.390 26.433 26.475 26.517 26.560 26.602
640 26.602 26.644 26.687 26.729 26.771 26.814 26.856 26.898 26.940 26.983 27.025
650 27.025 27.067 27.109 27.152 27.194 27.236 27.278 27.320 27.363 27.405 27.447
660 27.447 27.489 27.531 27.574 27.616 27.658 27.700 27.742 27.784 27.826 27.869
670 27.869 27.911 27.953 27.995 28.037 28.079 28.121 28.163 28.205 28.247 28.289
680 28.289 28.332 28.374 28.416 28.458 28.500 28.542 28.584 28.626 28.668 28.710
690 28.710 28.752 28.794 28.835 28.877 28.919 28.961 29.003 29.045 29.087 29.129
700 29.129 29.171 29.213 29.255 29.297 29.338 29.380 29.422 29.464 29.506 29.548
710 29.548 29.589 29.631 29.673 29.715 29.757 29.798 29.840 29.882 29.924 29.965
720 29.965 30.007 30.049 30.090 30.132 30.174 30.216 30.257 30.299 30.341 30.382
730 30.382 30.424 30.466 30.507 30.549 30.590 30.632 30.674 30.715 30.757 30.798
740 30.798 30.840 30.881 30.923 30.964 31.006 31.047 31.089 31.130 31.172 31.213
750 31.213 31.255 31.296 31.338 31.379 31.421 31.462 31.504 31.545 31.586 31.628
760 31.628 31.669 31.710 31.752 31.793 31.834 31.876 31.917 31.958 32.000 32.041
770 32.041 32.082 32.124 32.165 32.206 32.247 32.289 32.330 32.371 32.412 32.453
780 32.453 32.495 32.536 32.577 32.618 32.659 32.700 32.742 32.783 32.824 32.865
790 32.865 32.906 32.947 32.988 33.029 33.070 33.111 33.152 33.193 33.234 33.275
800 33.275 33.316 33.357 33.398 33.439 33.480 33.521 33.562 33.603 33.644 33.685
810 33.685 33.726 33.767 33.808 33.848 33.889 33.930 33.971 34.012 34.053 34.093
820 34.093 34.134 34.175 34.216 34.257 34.297 34.338 34.379 34.420 34.460 34.501
830 34.501 34.542 34.582 34.623 34.664 34.704 34.745 34.786 34.826 34.867 34.908
840 34.908 34.948 34.989 35.029 35.070 35.110 35.151 35.192 35.232 35.273 35.313
850 35.313 35.354 35.394 35.435 35.475 35.516 35.556 35.596 35.637 35.677 35.718
860 35.718 35.758 35.798 35.839 35.879 35.920 35.960 36.000 36.041 36.081 36.121
870 36.121 36.162 36.202 36.242 36.282 36.323 36.363 36.403 36.443 36.484 36.524
880 36.524 36.564 36.604 36.644 36.685 36.725 36.765 36.805 36.845 36.885 36.925
890 36.925 36.965 37.006 37.046 37.086 37.126 37.166 37.206 37.246 37.286 37.326
900 37.326 37.366 37.406 37.446 37.486 37.526 37.566 37.606 37.646 37.686 37.725

910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

ITS-90 Table for type K thermocouple

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Thermoelectric Voltage in mV

1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473

1190 48.473 48.509 48.546 48.582 48.619 48.656 48.692 48.729 48.765 48.802 48.838
 1200 48.838 48.875 48.911 48.948 48.984 49.021 49.057 49.093 49.130 49.166 49.202
 1210 49.202 49.239 49.275 49.311 49.348 49.384 49.420 49.456 49.493 49.529 49.565
 1220 49.565 49.601 49.637 49.674 49.710 49.746 49.782 49.818 49.854 49.890 49.926
 1230 49.926 49.962 49.998 50.034 50.070 50.106 50.142 50.178 50.214 50.250 50.286
 1240 50.286 50.322 50.358 50.393 50.429 50.465 50.501 50.537 50.572 50.608 50.644
 1250 50.644 50.680 50.715 50.751 50.787 50.822 50.858 50.894 50.929 50.965 51.000
 1260 51.000 51.036 51.071 51.107 51.142 51.178 51.213 51.249 51.284 51.320 51.355
 1270 51.355 51.391 51.426 51.461 51.497 51.532 51.567 51.603 51.638 51.673 51.708
 1280 51.708 51.744 51.779 51.814 51.849 51.885 51.920 51.955 51.990 52.025 52.060
 1290 52.060 52.095 52.130 52.165 52.200 52.235 52.270 52.305 52.340 52.375 52.410
 1300 52.410 52.445 52.480 52.515 52.550 52.585 52.620 52.654 52.689 52.724 52.759
 1310 52.759 52.794 52.828 52.863 52.898 52.932 52.967 53.002 53.037 53.071 53.106
 1320 53.106 53.140 53.175 53.210 53.244 53.279 53.313 53.348 53.382 53.417 53.451
 1330 53.451 53.486 53.520 53.555 53.589 53.623 53.658 53.692 53.727 53.761 53.795
 1340 53.795 53.830 53.864 53.898 53.932 53.967 54.001 54.035 54.069 54.104 54.138
 1350 54.138 54.172 54.206 54.240 54.274 54.308 54.343 54.377 54.411 54.445 54.479
 1360 54.479 54.513 54.547 54.581 54.615 54.649 54.683 54.717 54.751 54.785 54.819
 1370 54.819 54.852 54.886

name: reference function on ITS-90

type: K

temperature units: °C

emf units: mV

range: -270.000, 0.000, 10

0.000000000000E+00

0.394501280250E-01

0.236223735980E-04

-0.328589067840E-06

-0.499048287770E-08

-0.675090591730E-10

-0.574103274280E-12

-0.310888728940E-14

-0.104516093650E-16

-0.198892668780E-19

-0.163226974860E-22

range: 0.000, 1372.000, 9

-0.176004136860E-01

0.389212049750E-01

0.185587700320E-04

-0.994575928740E-07

0.318409457190E-09

-0.560728448890E-12

0.560750590590E-15

-0.320207200030E-18

0.971511471520E-22

-0.121047212750E-25

exponential:

a0 = 0.118597600000E+00

a1 = -0.118343200000E-03

a2 = 0.126968600000E+03

Syrian Arab Republic

Ministry of Higher Education & Scientific Research

Damascus University

Mechanical and Electrical Engineering

Electronics and Communication Engineering



Developing the Thermocouples Performance by Enhancing the Linearity and Cold Junction Compensation

A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree
of Master in Applied Electronics

By

Eng. Haidar Redwan

Scientific Supervisor

Prof. Abd.Alrazzak Albadawia

Co. Supervisor

Prof. Abdualkarim Assalem

Academic Year

2023–2022