

RTD SENSÖR KULLANILARAK HASSAS SICAKLIK ÖLÇÜM VE İZLEME SİSTEMİNİN TASARLANMASI

Ercan KURAK¹, Volkan ERDEMİR²

ÖZET

Sıcaklık ölçümünde, termokupul ve RTD 'ler yaygın olarak kullanılan sıcaklık algılayıcılarıdır. Bu algılayıcıları kullanan ölçme sistemleri gelişmekte, hassasiyetleri ve doğrulukları artmaktadır. Endüstriyel uygulamalara yönelik düşük hassasiyet, düşük doğruluk noktasından başlayarak çok yüksek doğruluk ve hassasiyet düzeyine kadar çok çeşitli ölçüm, kontrol ekipmanları üretilmektedir. Sıcaklık ölçüm ve kontrol sisteminin oluşturulmasında izlenecek yollar değerlendirilerek, mikro kontrolör ile RTD sensör kullanarak uygun maliyet ve yüksek hassasiyette sıcaklık ölçümüne sistemi oluşturulması hedeflenmiştir. Bu deneysel çalışmada 8 bit mikro kontrolör, opamp ve PT100 RTD ile $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ hassasiyete sahip donanım oluşturulmuş, istenilen kontrol yapılarının sisteme entegre edilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: RTD, PT100, sıcaklık ölçümü, mikro kontrolör, ADC

THE DESIGN OF PRECISION TEMPERATURE MEASUREMENT AND MONITORING SYSTEM USING RTD SENSOR

ABSTRACT

Thermocouples and RTD's are commonly used temperature sensors for measuring temperature. Developing measurement systems that use these sensors, sensitivity and increases its accuracy. Including high accuracy and precision level many various measurement control equipments are manufactured by starting from the low accuracy and precision level for industrial temperature measurement applications. In this study, cost-efficient and precision of the temperature measurement and monitoring system was aimed to design using micro controller and RTD sensor by evaluating the methods. In this experimental study, the hardware in precision (of) $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ with 8 bit micro controller, opamp and PT100 RTD was designed and the integration of control mechanisms to system was implemented.

Keywords: RTD, PT100, temperature measurement, microcontroller, ADC

¹ Öğretim Görevlisi, Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, ercan.kurak@klu.edu.tr

² Öğretim Görevlisi, Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, volkan.erdemir@klu.edu.tr

GİRİŞ

RTD Genel Bakış

Sıcaklık ölçümünün endüstriyel uygulamalarda geniş uygulama alanı vardır. Sıcaklık ölçümünde, RTD (Resistance Temperature Dedector-Direnç Sıcaklık Algılayıcısı), termistör ve diyot yaygın kullanılan elemanlar olup her birinin hassasiyeti ve sıcaklık aralıkları farklılıklar göstermektedir.

Sıcaklık, endüstriyel ve günlük uygulamalarda en fazla ölçülen fiziksel parametrelerden biridir. Termokupul ve direnç sıcaklık dedektörü (RTD) sensörleri, en yüksek sıcaklık ölçümleri için yeterli olmasına rağmen uygulamada en uygun özelliklere sahip bir sensörün seçilmesi gerekmektedir. Tablo 1'de sensör seçimi için genel kurallar gösterilmiştir.

Tablo 1: Sıcaklık Algılama Sensör Nitelikleri

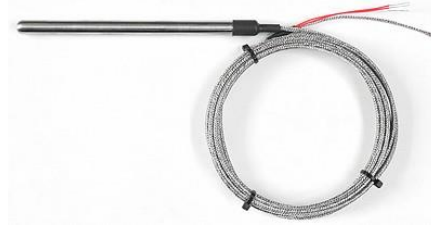
Özellik	Termokupul	RTD
Tepki Süresi	Daha iyi	Düşük
Maksimum Sıcaklık	Yüksek	Düşük
Dayanıklılık	Daha iyi	İyi
Maliyet	Daha iyi	İyi
Doğruluk	İyi	Daha iyi
Uzun Süreli Kararlılık	İyi	Daha iyi
Standardizasyon	Orta	Daha iyi

RTD'ler yüksek hassasiyet ve -200°C ile +850°C arasında bir ölçüm aralığı sağlamaktadır. RTD uçlarındaki elektriksel sinyal kolaylıkla iletilebilmekte, izlenebilen ve uygun veri işleme ekipmanı kullanılarak alınan değerler kaydedilebilmektedir. RTD direnci sıcaklık ile orantılı olduğu için, RTD devresine değeri bilinen bir akımın uygulanması, sıcaklıkla birlikte artan bir çıkış voltajı üretmektedir. RTD direnci ve sıcaklık arasındaki bu bağıntı, ölçülen sıcaklığın hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

PT100 RTD

RTD sınıfı içerisinde yer alan PT100 sıcaklık sensörünün uygulamada yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebebi, termistör sınıfı sensörlere göre doğrusal direnç değişim karakteristiğine sahip olmasıdır.

Platin PT100 RTD, uzun süreli kararlılık, kısa tepki süresi ve geniş sıcaklık aralığı nedeni ile birçok uygulamada tercih edilmektedir. Platin PT100 RTD Şekil 1'de görülmektedir. Sıcaklık ölçümü için en güvenilir standart olarak kabul edilmektedir (Tablo 2).



Şekil 1: Platin PT100 RTD

Tablo2: PT100 RTD Standartları

Organizasyon	Standart	α :Direnç sıcaklık katsayısı (1/°C)	0°C daki direnç değeri (Ω)
İngiliz Standartları	BS 1904: 1984	0.003850	100
Almanya Standartlar Enstitüsü Standartları	DIN 43760: 1980	0.003850	100
Uluslararası Elektroteknik Komisyonu Standartları	IEC 751: 1995	0.00385055	100
Amerika Bilimsel Araştırma Ekipman Standartları	SAMA RC-4-1966	0.003923	98,129
Japon Standartları	JIS C1604-1981	0.003916	100
Amerikan Test ve Ekipmanları Birliği	ASTM E1137	0.00385055	100

*Sensing Devices, Inc. Platin üreticisi verilerine göre

PT100, 0°C de 100Ω dirence sahiptir, direnç-sıcaklık ilişkisi en düşük ve en yüksek limitler arasında hemen hemen doğrusal kabul edilebilir. PT100 için direnç-sıcaklık ilişkisi Denklem1'e verilmiştir.

$$R_T = R_0(AT + BT^2 + C(T - 100)T^3)$$

Denklem 1

Denklem 1 de ifade edilen;

R_T = Ölçüm sıcaklığındaki PT100 direnci (Ω)

R_0 = 0°C' daki direnç değeri (100Ω)

T= Ölçüm sıcaklığı (°C)

A= $3,9083 \cdot 10^{-3}$

B= $-5,775 \cdot 10^{-7}$

C= $-4,183 \cdot 10^{-12}$ (sadece 0°C altında)

T≥ 0°C için C katsayısı değişimi çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.

Aşağıdaki Tablo3' te Platin 385 PT100 için direnç-sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.

Tablo3: -100°C ile +200°C sıcaklık aralığında, 385 Platin PT100 RTD için direnç-sıcaklık değerleri

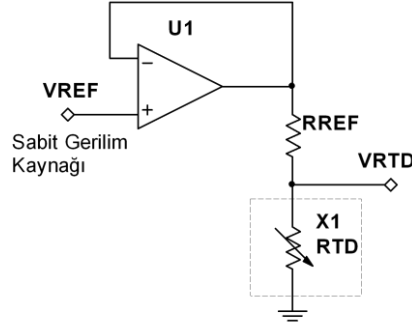
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-100	60,26									
-90	64.3	63.89	63.49	63.08	62.68	62.28	61.87	61.46	61.06	60.66
-80	68.32	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.1	64.7
-70	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73
-60	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73
-50	80.31	79.91	79.51	79.12	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73
-40	84.27	83.88	83.48	83.08	82.69	82.29	81.9	81.5	81.1	80.7
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.8	89.4	89.01	88.62
-10	96.09	95.69	95.3	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55
0	100	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48
0	100	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.9	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.4
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.34	109.73	110.12	110.51	110.9	111.28
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.92	116.31	116.7	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01
50	119.4	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.7	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.6	128.98	129.36	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.8	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.7	135.08	135.46	135.84	136.22	136.6	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.5	138.88	139.26	139.64	140.02	140.4	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.66	143.04	143.42	143.8	144.18	144.55	144.93	145.31	145.68
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.94	148.32	148.7	149.07	149.44
130	149.82	150.2	150.70	150.95	151.33	151.7	152.08	152.45	152.83	153.2
140	153.70	153.95	154.32	154.7	155.07	155.45	155.82	156.2	156.57	156.94
150	157.32	157.69	170.06	170.44	170.81	159.18	159.56	159.93	160.3	160.67
160	161.04	161.42	161.79	162.16	162.53	162.9	163.28	163.65	164.02	164.39
170	164.76	165.13	165.5	165.88	166.24	166.62	166.99	167.32	167.73	168.1
180	168.47	168.84	169.21	169.70	169.95	170.32	170.68	171.05	171.42	171.79
190	172.16	172.53	172.9	173.27	173.64	174	174.37	174.74	175.11	175.48
200	175.84									

T °C Sıcaklığında RTD Direnç Değerinin Bulunması

Tablo 3 'te görüldüğü gibi PT100 uçları arasında ölçülen direnç değişimi çok küçük oranlarda olmaktadır. PT100 direnç değişimi katsayılarından yararlanılarak bilinen herhangi bir T °C sıcaklığında PT100'ün sahip olduğu direnç değeri Denklem 1'den hesaplanabilir. Ancak T °C sıcaklığın bulunması söz konusu ise, PT100'ün sahip olduğu R_T direnci ölçülerek veya hesaplanarak bulunmalıdır.

RTD'nin T °C da sahip olduğu R_T direncini değerini bulmak için iki yöntem kullanılmaktadır.

Birinci yöntem; RTD uçlarına sabit bir gerilim uygulamaktır. Bu yöntemde Hassas Gerilim Kaynağı (*Precision Voltage Source*) devre elemanları ile 1,25V, 2,5V 4,096V sabit gerilim kaynakları kullanılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2: Sabit Gerilim Kaynağı ve RTD Bağlantısı

Oluşturulan devrede R_{REF} , değeri bilinen sabit bir dirençtir. U_1 opamp elemanı gerilim izleyici olarak kullanılmakta ve gerekli akımı sağlayıp, V_{REF} üzerindeki güç tüketimini ortadan kaldırarak referans gerilimindeki değişimlerin önlenmesini sağlamaktadır. Şekil 2' deki devrede R_{REF} ile RTD gerilim bölücü devreyi meydana getirir ve V_{RTD} gerilimi Denklem 2 ile hesaplanır.

$$V_{RTD} = V_{REF} \cdot \frac{R_T}{(R_{REF} + R_T)}$$

Denklem 2

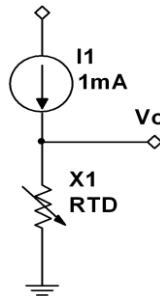
PT100'ün T °C daki R_T direnci;

$$R_T = R_{REF} \cdot \frac{V_{RTD}}{V_{REF} - V_{RTD}}$$

Denklem 3

Bu yöntemin kullanımının kolay olması en büyük avantajıdır. R_{REF} direncinin sıcaklık - direnç değişimi çok az olmalıdır. Aynı zamanda RTD üzerinden geçecek akımın iç ısınma (Self Heating) etkisinin de en aza indirgenmiş olması gerekmektedir. Üreticiler, RTD için iç ısınmayı en aza indirmek için maksimum akım değerlerini belirtmektedir.

RTD üzerinde sıcaklık sonucu meydana gelen küçük direnç değişimini hassas bir şekilde algılanması için kullanılan ikinci yöntem ise, sabit akım kaynağı kullanarak RTD uçlarındaki gerilim değişimini ölçmektir (Şekil 3). Bu yöntemde, akımın sabit olması ve bilinen bir değerde olması R_T direncinin elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Akım değeri metrik (0,1, 1, 10, 100...) alınırsa R_T direnci ölçülen gerilimin yine katları şeklinde doğrudan bulunabilmektedir.



Şekil 3: RTD Sabit Akım Kaynağı İle Kullanım Prensibi

RTD sisteminde meydana gelen en büyük hatalardan biri de sensör üzerinden geçen akımın oluşturduğu iç ısınma etkisidir (Self Heating). Deneysel çalışmada, pozitif tek bir kaynak üzerinde sabit akım kaynağı yardımıyla PT100 RTD üzerinden 1 mA sabit akım geçişi sağlanmıştır. RTD üzerinden geçen akımın 1 mA ile sabit olması bu etkiyi en aza indirmektedir. Ayrıca sabit akım kaynağı yöntemi ile RTD direnci ne olursa olsun akım değeri sabit olduğundan, RTD direnç değeri hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Şekil 3' de oluşturulan gerilim bölücü devrede, V_0 RTD uçlarındaki çıkış gerilimidir. Akım 1 mA sabit olduğuna göre çıkış gerilimi Denklem 4'teki gibi yazılabilir.

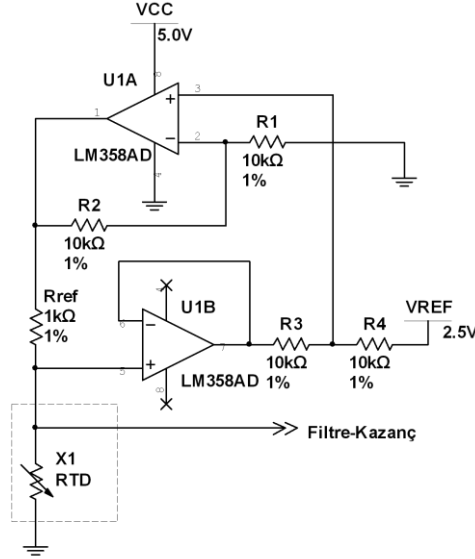
$$V_0 = 1mA \cdot R_T \quad \text{Denklem 4}$$

Denklem 4' teki ifadeden RTD uçlarındaki direnç Denklem 5 ile gösterilir.

$$R_T = \frac{V_0}{1mA} \quad \text{Denklem 5}$$

PT100 RTD 'nin 0°C 'de direnci 100Ω olduğuna göre ölçülecek çıkış gerilimi $V_0=100\text{mV}$ olacaktır. Pozitif sıcaklık değişimlerinde RTD uçlarındaki gerilim değeri de artacaktır.

Sabit Akım Kaynağı ve Analog Çıkışın Oluşturulması



Şekil 4: RTD Sisteminde Sabit Akım Kaynağının İki Opamp Kullanılarak Oluşturulması

RTD sıcaklık ölçüm sisteminde en iyi doğrusalılık, RTD üzerinden sabit bir akım değerinin geçirilmesi ile elde edilmektedir. Şekil 4'deki devrede U1A opamp kazancı, AU1A 1V/V dur ve evirmeyen yükselteç olarak kullanılmaktadır. U1A opampı VREF ile VRTD gerilimleri farkına bağlı olarak çıkış gerilimini değiştirecektir.

$$V_{U1A} = V_{REF} \cdot A_{U1A} + V_{U1B} \quad \text{Denklem 6}$$

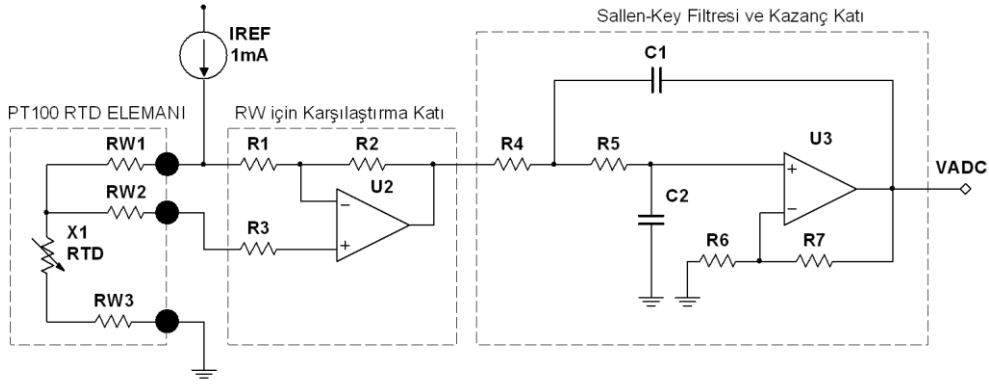
Devrede U1B opampı, gerilim izleyici olarak yer almaktadır. U1B çıkış gerilimi RTD uçları arasındaki gerilim değerindedir. Rref direnci uçları arasındaki gerilim VRref ve direnç üzerinden geçen akım IRref Denklem 7 ve Denklem 8 de verilmiştir.

$$V_{Rref} = V_{U1A} - V_{RTD} \quad \text{Denklem 7}$$

$$I_{Rref} = \frac{V_{Rref}}{R_{Rref}} \quad I_{Rref} = 1mA \quad \text{Denklem 8}$$

Alçak Geçiren Filtre ve Kazanç Katının Uygulanması

PT100 RTD'ler üç uçlu veya dört uçlu kablo yapısında kullanıma sunulmaktadır. Bu uygulamanın başlıca amacı, iletkenlerin direncinden kaynaklanan hata değerinin en aza indirilmesidir. Bu amaçla Şekil 5'de gösterilen devre üç uçlu bir RTD için uygulanabilir.



Şekil 5: İkinci Dereceden Alçak Geçiren Filtre Ve Kazanç Katı Uygulaması

Şekil 5'de RW1, RW2 ve RW3 RTD kablolarının iletken dirençlerini ifade etmektedir. Sıcaklığın yükselmesi ile artan iletken direnci hata değerini artıracak ve ölçüm sonuçlarını etkileyecektir. Bu etkinin en aza indirilmesi için U2 opampı ile RW1 ile RW3 arasındaki denge ölçümlenir. Kısacası iletken kablonun direnç değerleri eşit olduğu durumda, RTD üzerindeki gerilim V_{RTD} U2 opamp çıkışında elde edilmiş olacaktır. R1 ve R2 dirençleri değeri yeterince yüksek ve eşit seçilir. U2 opampı çıkış gerilimi Denklem 9'da verildiği gibidir.

$$V_{U2} = [(V_{RW1} + V_{RTD} + V_{RW3}) - V_{RW1}] \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \left[(V_{RW1} + V_{RTD} + V_{RW3}) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right] \quad \text{Denklem 9}$$

R₁=R₂ ve R_{W1}= R_{W3} olduğunda; V_{U2}= V_{RTD} olacaktır.

İkinci dereceden alçak geçiren Sallen-Key filtresi kullanılarak oluşabilecek yüksek frekanslı sinyallerin bastırılması sağlanır. Filtrenin kesim frekansı f_C=10Hz gibi düşük bir frekans değerine ayarlanarak çıkıştaki daha yüksek frekanslı değişimler ortadan kaldırılmış olacaktır. Dolayısı ile çıkış kararlılığı yükseltilmesi sağlanmaktadır (Microchip - Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits).

İkinci dereceden alçak geçiren Sallen-Key filtresi için kesim frekansı f_C Denklem 10'da belirtilmiştir.

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_4 \cdot R_5 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad \text{Denklem 10}$$

Filtre kalite faktörü ise Denklem 11 'de olduğu gibidir.

$$Q = \frac{\sqrt{R_4 \cdot R_5 \cdot C_1 \cdot C_2}}{C_2 \cdot (R_4 + R_5)} \quad \text{Denklem 11}$$

Filtre tasarımında öncelikle f_C ve Q parametreleri belirlenir. Q ≤ 1/√2 değerinde olmalıdır. Dirençlerin oranı m ve kapasitörlerin oranı n ile ifade edilirse R₄, R₅, C₁ ve C₂ ile f_C ve Q parametreleri, Denklem 12 ve Denklem 13 kullanılarak hesaplanır.

$$R_4 = m \cdot R \quad R_5 = R \quad C_1 = n \cdot C \quad C_2 = C \quad \text{Denklem 12}$$

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{mn}} \quad Q = \frac{\sqrt{mn}}{m+1} \quad \text{Denklem 13}$$

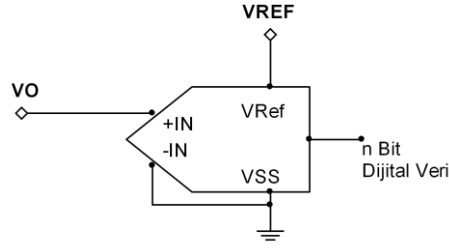
U3 opamp kazancı Denklem 14'de verilmiştir.

$$A_{U3} = 1 + \frac{R_7}{R_6} \quad \text{Denklem 14}$$

Analog-Dijital Dönüşüm (ADC) Uygulamak

Filtre çıkışındaki gerilim kazancı belirlenmiş çıkış gerilimi, ADC birimine uygulanıp işlemlerde kullanılmak üzere tam sayı değerine dönüştürülmektedir. ADC birimince üretilen bu değer kullanılan sıcaklık ölçme sisteminin hassasiyetini belirlemektedir.

ADC birimine uygulanan gerilimin en düşük değeri ile en yüksek değeri arası, kullanılacak ADC birimi için dönüşüm değerini oluşturmaktadır. V_{REF} gerilimi ADC n bit çevrimi için en büyük tam sayıyı ifade etmektedir. Bu nedenle ADC girişine uygulanan gerilim V_{REF} değerinden daima küçük olmalıdır. Kazanç katının kazancı bu ölçüt göz önünde bulundurularak belirlenmelidir.



Şekil 6: ADC Birimi Genel Yapısı

Oluşturulacak ölçüm sisteminde harici ADC birimi kullanılabileceği gibi mikro kontrolör dahili ADC birimi kullanılmaktadır. Mikro kontrolör içerisinde yer alan ADC birimi genellikle 8 Bit, 10 Bit çözünürlüğe sahip olmaktadır.

Ölçme sisteminin hassasiyeti;

$$S = \frac{V_{Omax}}{T_{max}} \left(\frac{mV}{^{\circ}C} \right) \quad \text{Denklem 15}$$

$$RES_{VOLT} = \frac{V_{REF}}{2^{n \text{ bit}} - 1} \left(\frac{mV}{\text{bit}} \right) \quad \text{Denklem 16}$$

$$RES_{^{\circ}C} = \frac{(RES_{VOLT})}{(S)} \left(\frac{^{\circ}C}{\text{bit}} \right) \quad \text{Denklem 17}$$

Örneğin RTD ile ölçülecek 0 - +200°C aralığında ölçüm alınacak ve filtre çıkış kazancı $A_0 = 10$ olduğu kabul edilirse;

$$V_{Omin} = 100mV \cdot 10 = 1000mV$$

$$V_{Omax} = 175,84mV \cdot 10 = 1758,4mV$$

$$V_{REF} = 2,5V$$

$$S = \frac{1758,4mV}{200^{\circ}C} = 8,792mV/^{\circ}C. \text{ Her } 1^{\circ}C \text{ başına } 8,792mV \text{ adım düşmektedir.}$$

n_bit=8 bit ADC olması durumunda;

$$RES_{VOLT} = \frac{2500mV}{2^8 - 1} = 9,803921 \frac{mV}{\text{bit}}$$

$$RES_{^{\circ}C} = \frac{9,803921mV/\text{bit}}{8,792mV/^{\circ}C} = 1,115^{\circ}C/\text{bit} \text{ bulunur.}$$

Eğer 8 bit ADC kullanılarak işlem gerçekleştirilirse; ADC değerinin 1 artması 1,115°C değişim oluşturacaktır.

Aynı işlem 10 bit ADC kullanılarak yapılsaydı;

n_bit= 10 Bit

$$RES_{VOLT} = \frac{2500mV}{2^{10} - 1} = 2,443792 \left(\frac{mV}{\text{bit}} \right)$$

$$RES_{^{\circ}C} = \frac{2,443792mV/\text{bit}}{8,792mV/^{\circ}C} = 0,2779^{\circ}C/\text{bit} \text{ bulunur.}$$

12 bit ADC kullanılması durumunda ise; 0,06943°C/bit değerine sahip olunacaktır.

Ölçüm sınırı RTD uçlarındaki VRTD gerilimini belirlerken, filtre ve kazanç katından alınacak maksimum çıkış gerilimi, ADC için maksimum gerilim değeri VREF gerilim değerini geçmemelidir. Ancak VREF değerine yakın olması, sistem için çözünürlük parametresini belirlemektedir. Bundan dolayı kazanç katının gerilim kazancının en iyi şekilde tanımlanması ölçme sisteminin çözünürlüğü açısından önem taşımaktadır.

Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi

DeneySEL olarak gerçekleştirilen çalışmada Tablo 4'de belirtilen özellikler içerisinde PT100 ile sıcaklık ölçüm sistemi oluşturulmuştur.

Tablo 4: Uygulanan Ölçme Sistemi Özellikleri

Ölçüm Aralığı	-50°C / +150°C		
RTD	Platin PT100		
Mikro Kontrolör	PIC16F873A 8 Bit		
Referans Gerilim	2,465V		
Sabit Akım Kaynağı	1 mA		
Gerilim Kazancı	10 V/V		
ADC	Mikro Kontrolör 10 bit		
Hassasiyet	0,3°C/bit		
Sıcaklık Hesaplama Yöntemi	Doğrusallaştırma (Linearization)		
R=A.T _x + B	A=0,385075324	B=99,931471861	r ² =0,9999338

PT100 RTD için iki adet LM358 opamp tümdevresi kullanılmıştır. LM358 dual opamp yapısındadır ve tek pozitif kaynak ile kullanılabilir. İki opamp RTD için 1mA sabit akım kaynağını oluştururken, bir opamp kablo ileten direnci dengelemesi katı ve bir opamp ise alçak geçiren filtre ve kazanç katında kullanılmıştır. Opamp devrelerinde %1 toleransta dirençler kullanılmıştır.

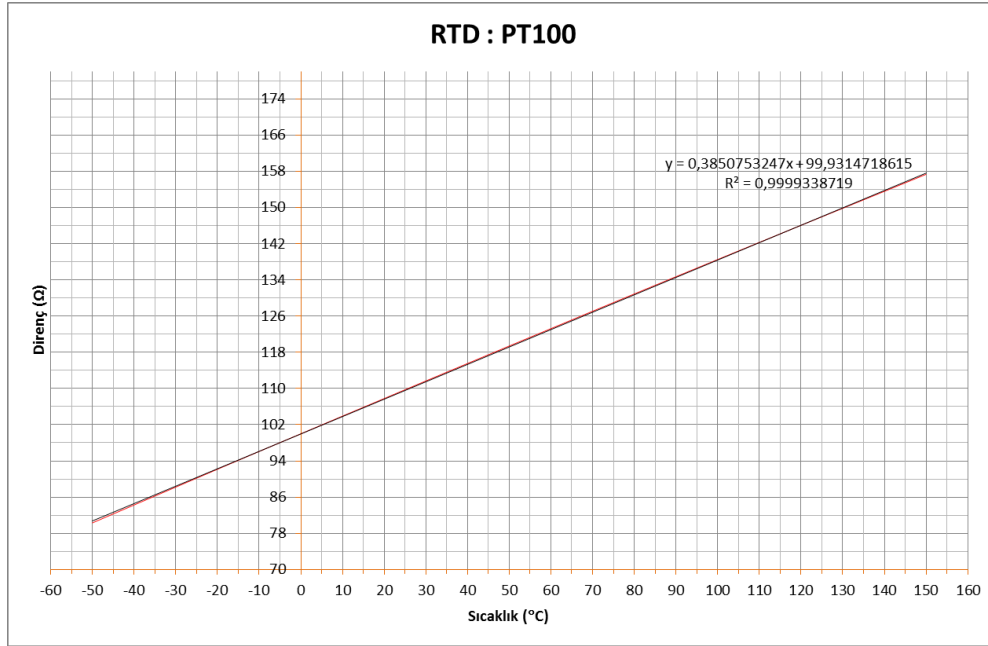
Uygulamada mikro kontrolör olarak PIC16F673A ve 4x20 karakter LDC kullanılmıştır. Mikro kontrolör içerisinde yer alan ADC birimi 10 bit çözünürlüğe ayarlanmıştır. Burada TMR0 zamanlayıcı birimi ADC okuma çevrimi için 100ms zamanlamayı sağlamaktadır. Ayrıca TMR1 zamanlayıcı birimi 5s periyoduna ayarlanarak alınan sıcaklık bilgilerinin ortalama değerlerinin hesaplanması çevrimini sağlamaktadır.

PT100 üretici bilgileri direnç değişimleri gösterir tablodan doğrusallaştırma yöntemi ile;

$$R_y = A.T_x + B$$

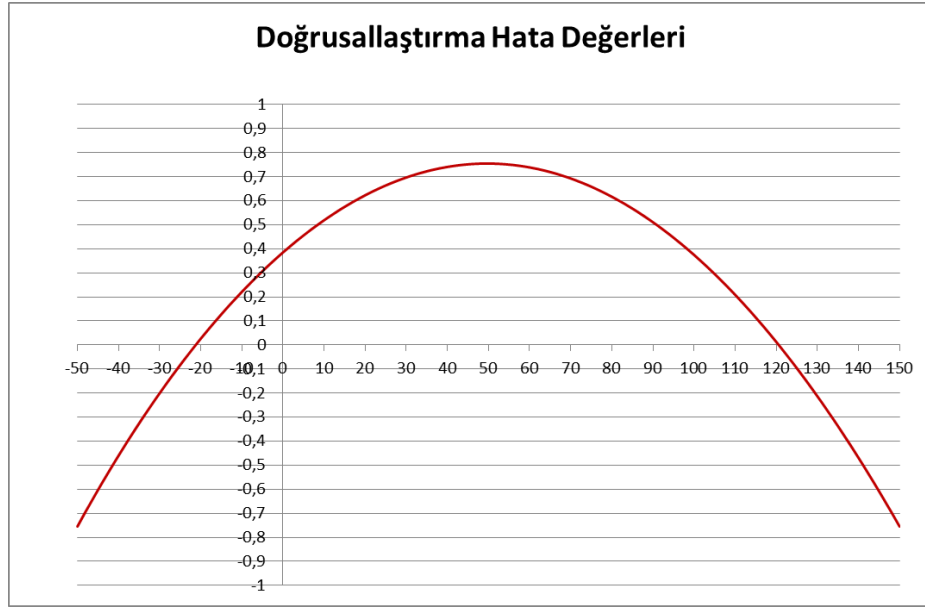
Denklem 18

ifadesinde yer alan A ve B katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 7).



Şekil 7: PT100 doğrusallaştırma grafiği ve elde edilen katsayılar

ADC birimi için donanımsal konfigürasyon yapılırken Precision Voltage Source elemanından alınan VREF geriliminin mikro kontrolör için ADC_VREF+ ucuna bağlanarak, ADC portundaki analog gerilim değerinin referans gerilime göre sayısal değerinin elde edilmesi gerekmektedir.



Şekil 8: Doğrusallaştırma işleminde sıcaklık hata değerleri

Doğrusallaştırma işleminde en oluşan yüksek hata değeri $\pm 0,75491^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır (Şekil 8). ADC çevriminden alınan 10 bit uzunluğundaki (0-1023) tam sayı değeri VREF değerine göre belirlenen kazanç değeri ile çarpılarak RRTD değeri elde edilmektedir.

$$A_{ADC} = V_{REF} / (2^n - 1)$$

Denklem 19

Mikro kontrolörün ADC birimi 10 bit kullanıldığında mikro kontrolör için ADC kazancı;

$$A_{ADC} = \frac{2,465}{1023} = 2,409579667 \cdot 10^{-3} \text{ olarak bulunur.}$$

Örneğin; $T=0^\circ\text{C}$ için $V_{RTD}=100\text{mV}$ olacaktır. Filtre Çıkışında $V_0 = 100\text{mV}$. $10 = 1000\text{mV}$ ADC girişine uygulanacaktır. Mikro kontrolör ADC çevrimi sonucu 415,01 olması gerekirken tam sayı olarak bu gerilim değerini 415 değeri olarak dönüştürecektir. Hesaplanan direnç değeri; $R_{RTD} = 415 \cdot 2,409579667 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 99,99756$ bulunur. Denklem 18'de belirtilen doğrusallaştırma katsayıları kullanılarak hesaplanan sıcaklık değeri;

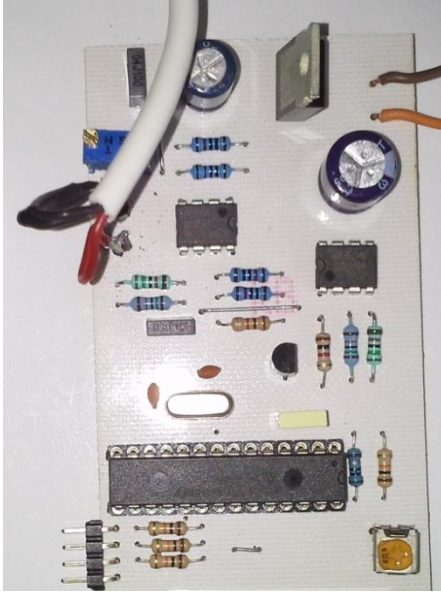
$$T_x = \frac{R_{RTD}-B}{A} = \frac{99,99755621-99,93147186}{0,385075324} = 0,171637^\circ\text{C} \text{ olarak bulunacaktır.}$$

Sıcaklık değerinin onda bir çözünürlük ile ölçüm sonucunun gösterimi durumunda $0,1^\circ\text{C}$ sonucu elde edilmiş olacaktır. Burada meydana gelen hata PT100 için doğrusallaştırma katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bu katsayıların elde edilmesinde PT100 sıcaklık-direnç değişim değerlerinin daha sık aralıkta incelenmesi daha iyi sonuçlar verecektir.

Şekil 11'de görülen değerlerde $RRTD=106,503$ ve de ADC değeri 442 görülmektedir;

$$T_x = \frac{106,5034213-99,93147186}{0,385075324} = 17,0666^\circ\text{C} \text{ değeri elde edilecektir.}$$

Şekil 9, 10, 11'da oluşturulan devre ve bilgilerin görüntülenmesi verilmiştir.



Şekil 9: Ölçüm Sistemi Donanımı



Şekil 10: PT100 bağlı sistemin test edilmesi



Şekil 11: PT100'e ait değerler için örnek değerlendirme

SONUÇLAR

Uygulama devresinden alınan sonuçlar ile matematiksel hesaplama sonuçları karşılaştırıldığında; alınan analog sinyal 10 bit ADC kullanılarak 0-1023 arasında R_{ADC} değerine dönüştürülmüştür. Şekil 11'de VRTD olarak görünen değer PT100 uçları arasındaki gerilim değeridir. Mikro kontrolör analog portuna uygulanan gerilim ölçümleri sonucunda filtre ve kazanç katının hesaplamalar çerçevesinde çıkış gerilimi sağladığı gözlemlenmiştir.

Doğrusallaştırma yöntemi ile sıcaklık denklemi katsayıları mikro kontrolör ile işlenerek, ani değerler ve ortalama değerler olarak ortam sıcaklığı veri kümesi olarak saklanmıştır. Elde edilen ölçüm verileri, kullanılan karakter LCD ile izlenilmesi sağlanarak değerlendirilmiştir. Doğrusallaştırma için PT100 üretici veri tablolarında belirtilen direnç değerleri kullanılmıştır.

100ms ADC çevrimi ile sıcaklık değerleri 10s periyot ortalaması için girdi oluşturulmuş ve 10s ortalaması LCD üzerinde gösterilmiştir.

Mikro kontrolör üzerinde oluşturulan yazılım 2KB program bellek alanı içerisinde kalmaktadır. Bu bakımdan 2KB program bellek alanı ve analog dijital dönüşüm birimi olan her mikro kontrolör ile deneysel bu

sistemin oluşturulabileceği görülmektedir. Ayrıca sisteme seri haberleşme protokolü eklenerek bilgisayar bağlantısı oluşturulabileceği gibi kullanılan mikro kontrolör üzerinden doğrudan çoklu kontrol veya uyarı sistemi oluşturulabilmektedir.

Oluşturulan deneysel donanım ile dört PT100 kullanım imkanı vardır. Bunun için mikro kontrolün sahip olduğu diğer ADC girişlerinin tanımlanması yeterlidir.

Kullanılan ADC biriminin bit uzunluğu, ölçme sisteminin hassasiyetini belirlemektedir. Harici 12 bit ADC kullanılarak $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ hassasiyet sağlanabileceği gibi maliyet artışı sınırlandırılabilir.

ÖNERİLER

Analog yapıdaki termistör, termokupul ve RTD sensörleri basit sinyal koşullandırma yapısından daha fazla devre yapısını gerektirmektedir. Çok yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlanması ancak bu sayede mümkün olmaktadır. Yüksek hassasiyet ve doğrulukta sıcaklık ölçüm sistemlerinin maliyetleri dikkate alındığında, bu yöntem düşük maliyet ve uygulanabilirlik açısından genel ölçümler ve izleme yapısı için kullanılabilir olduğu görülmüştür.

RTD karakteristiğinden elde edilen doğrusallaştırma parametreleri ile ölçme hatalarını azaltma açısından yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

PT100 ile $+600^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar ölçüm yapılabilir. Bununla birlikte karakteristiği -100°C ile $+200^{\circ}\text{C}$ arasında en doğrusal bölümdür. Bu geniş sıcaklık aralığı PT100 ün geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır.

Çok yüksek doğrulukta sıcaklık ölçümü için 20-24 bit Delta/Sigma ADC entegre devre sitemlerin maliyetlerinin düşmesi ile kullanımı yaygınlaşmaktadır. Programlanabilir yapıdaki bu tümdevre elemanlar için uygulamalar geliştirmek önem kazanmaktadır.

KAYNAKÇA

- Madhu Mohan, N. ve Jagadeesh Kumar, V. (2009), "Direct Digital Converter for a Single Active Element Resistive Sensor", International Instrumentation and Measurement Technology Conference Singapore
- Witt, T. ve Mena R. ve Cornell, E. (2014), "Single Chip, 2-wire, 4-20mA Current Loop RTD Temperature Transmitter Design", Page 2380-2383
- Mirza, S. ve Shtargot, J. EDN Voice of Engineer, (2011) "High-Accuracy Temperature Measurements Call for Platinum Resistance Temperature Detectors (PRTDs) and Precision Delta-Sigma ADCs", Page 41-46 Issue 16/2011
- Sachin Gupta, Umanath R Kamath, (October 2010) "Using Precision Temperature Sensing in Industrial Monitoring Systems", Time Design EE
- King, G. ve Fukushima, T., Analog Devices, Application Note, , "RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC8xx MicroConverter".
- Baker, Bonnie C., Microchip Application Note, (2008) "Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits"
- Maxim Integrated, Application Note, (2005) "Positive Analog Feedback Compensates PT100 Transducer"
- Agilent Technologies, Inc. "Practical Temperature Measurements".
- WIKA Instrument Corporation, "Pressure & Temperature Measurement".