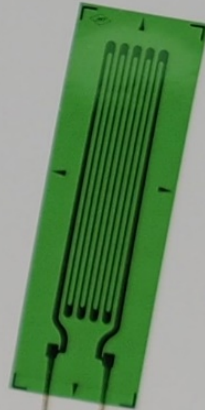


Uygulama Notu

Gerinim ölçer ile yapılan ölçümlerde yaşanan zorlukların çözümü

Yapısal test ve sağlık izleme projelerinde başarılı gerinim ölçümü için 5 temel bilgi



İçerik

Günümüzün her şeyi ölçen endüstrisinde gerinim ölçerler	3
Gerinim, gerinim ölçer ve gerinim ölçümü hakkında	4
Gerilim, Gerinim ve Hooke Yasası	5
Gerinim Ölçer	6
Wheatstone Köprüsü	6
3 telli çeyrek köprü devresi	9
Gerinim ölçer amplifikatörünün doğruluğu	10
Köprü besleme voltajının optimize edilmesi	11
DC besleme mi yoksa AC besleme mi ? Taşıyıcı frekans yükselticisinin faydaları	13
Gerinim ölçün! Sıcaklık değil :)	16
Gerinim ölçerlerin termal çıkışlarının kompanzasyonu	16
Kukla gerinim pulu ile gerinim ölçer sıcaklık kompanzasyonu	17
Gerinim pulu sıcaklığına dayalı hesaplama düzeltmesi	17
Düşük kaymalı köprü tamamlama direncinin önemi	19
Uzun kablo kullanımlarında ölçüm hatasını ortadan kaldırın	21
Şönt kalibrasyonu iyidir, ancak yeterince iyi değil	21
Sürekli tel direnci düzeltmesi	23
Sonuç	26

SORUMLULUK REDDİ

Bu tanıtım belgesi, bilgimiz ve düşüncelerimiz dahilinde hazırlanmıştır. Sağlanan bilgilerin tam veya doğru olduğunu iddia etmez ve yalnızca bilgi amaçlıdır. Bulunabilecek herhangi bir hata için sorumluluk kabul edilmez.

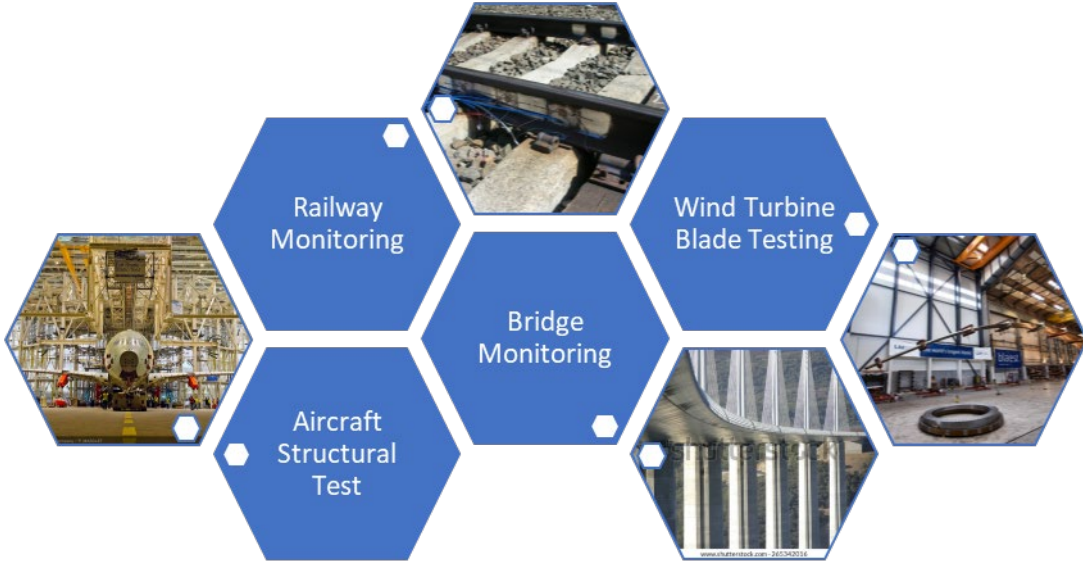
Baş Yazar: Stephan Ploegman
Schrüns, Avusturya, Temmuz 2021

Günümüzün her şeyi ölçen endüstrisinde gerinim ölçerler

“Gerinim ölçer” veya diğer adıyla “Birim Deformasyon Ölçer” (Strain Gage) teknolojisi, otomotiv ve demiryolu araçları endüstrisindeki yapısal bileşenlerin dayanıklılık testleri gibi, yapısal test ve izleme uygulamaları alanında neredeyse sınırsız kullanıma sahiptir. Gerinim ölçer teknolojisinin havacılık, askeri ve uzay uygulamalarında kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. Gerinim ölçerler, bileşenlerin ve alt grupların statik ve yorulma testleri için yapısal yük taşıyan bileşenlere doğrudan uygulanır. Yenilenebilir rüzgâr enerjisi endüstrisinde, rüzgâr türbini kanatlarının ve yataklarının yapısal performansını test etmek ve ayrıca rüzgâr türbinlerinin sahada yapısal sağlığını izlemek için gerinim ölçer teknolojisi uygulanmaktadır. Gerinim ölçerler ayrıca sivil altyapıyı (köprüler, tüneller, demiryolları, barajlar), petrol ve gaz boru hatlarını veya nükleer santralleri izlemek için kullanılır.

Gerinim ölçmenin en basit ve en popüler yolu, çeyrek köprü düzeninde Wheatstone köprüsüne bağlı tek bir gerinim ölçer kullanmaktır. Çeyrek köprü düzenlemesi, kurulum ve kablolama maliyeti açısından hassas ve ucuzdur. Olumsuz tarafı, bir çeyrek köprü uygulaması gürültüye ve hatalara daha meyillidir. Uygun bir sinyal koşullayıcı seçmek, çeyrek köprü düzenlemesinin eksikliklerinin üstesinden gelmeye yardımcı olur.

Bu teknik tanıtım belgesi, doğru sinyal koşullandırma için belirli zorluklar getiren bir çeyrek köprü uygulamasını kullanılarak gerinim ölçümüne odaklanan gerinim ölçer ölçüm tekniklerine genel bir bakış sunar. Gerinim ölçümünüzün sıcaklık ölçümüne dönüşmesi nasıl önlenir? Köprü uyarımını nasıl optimize edebilirsiniz? Uzun sensör kablolarından kaynaklanan ölçüm hataları nasıl telafi edilir? Zayıf bir köprü tamamlama direncinin etkisi nedir? Bir gerinim yükseltici seçerken dikkatli olmanın önemi küçümsenemez- yanlış bir seçim gelecekte daha fazla zaman ve paraya mal olabilir.



¹ Airbus A1350XWB Tam Ölçekli Statik Test (resim izni: P. Masclet, Airbus).

² Dikey tekerlek yükü ölçümü için gerinim ölçerlerle donatılmış ray (resim izni: Mike Tomas, Amtrak).

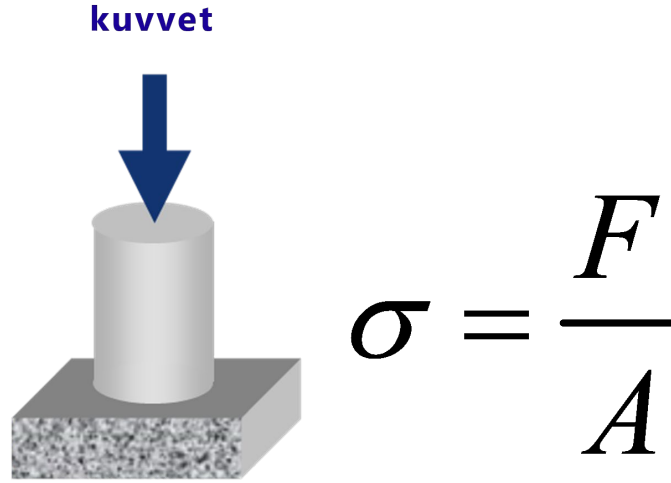
³ Millau Viyadüğü, dünyanın en yüksek köprüsü. Aveyron, Fransa (resim ortak)

⁴ Bir rüzgar türbini kanadının yapısal yorulma testi (resim izni: Blade Test Centre A/S)

Gerinim, gerinim ölçer ve gerinim ölçümü hakkında

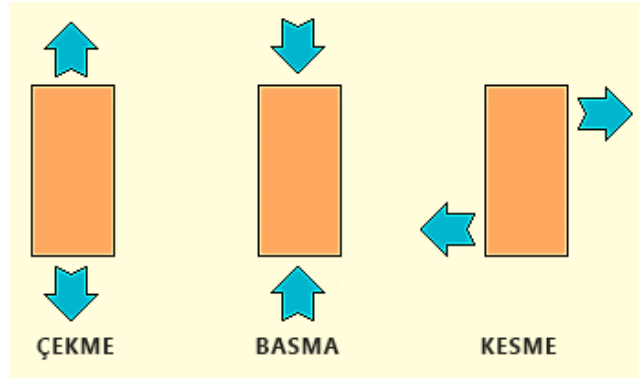
Gerilim, Gerinim ve Hooke Yasası

Bir malzeme bir kuvvetle yüklendiğinde, malzemenin deforme olmasına neden olan bir σ (sigma) gerilim üretir. Bu gerilim, yüke ve numunenin kesitine veya çapına bağlıdır. Kuvvet, Newton ve alan metrekare olarak ölçülür. Yani metrekare başına Newton veya N/m² olarak tanımlanır.



Resim 1: Gerilim formülü

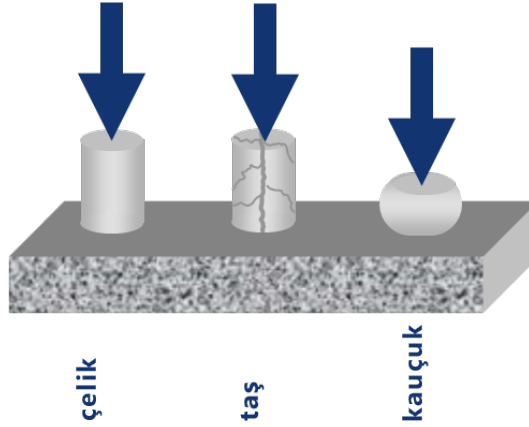
Numune üzerine uygulanan kuvvetin yönüne bağlı olarak, çekme, basma veya kesme gerilmesi oluşur. Çekme, malzemeyi geren, basma, malzemeyi sıkıştıran ve kesme gerilimi ise, numuneye enine etki eden kuvvettir.



Resim 2: Çekme, basma ve kesme yönlerinin şekilsel gösterimi

Gerinim ϵ (epsilon), malzemenin gerilmesinden kaynaklanan deformasyonudur. Malzemenin uzunluğunda yaşanan değişimin orijinal uzunluğa oranıdır. Gerilme miktarı malzemeye bağlıdır. Çelik numune üzerindeki bir kuvvet, aynı yükün kauçuğa uygulanmasına göre (kauçukta daha fazla deformasyon) daha düşük bir gerinim (çelikte daha az deformasyon) ile sonuçlanacaktır. Bu malzeme davranışını tanımlayan ölçü veya sertlik, Çekme modülü veya elastik modülü olarak da bilinen Young modülüdür (E). Düşük bir Young modülü değeri, numunenin elastik olduğu ve yüksek bir değer, numunenin sert olduğu anlamına gelir.

aynı kuvvet, farklı gerinim

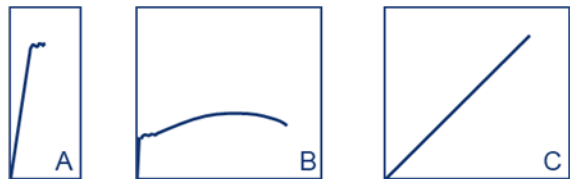
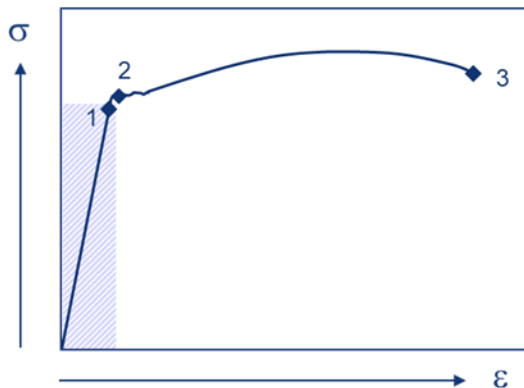


resim 3: Young's modülünün basit anlatımı

Hooke veya esneklik kanunu olarak bilinen yasa, malzemenin geriniminin, o malzemenin elastik limiti dahilinde uygulanan gerilimle orantılı olduğunu belirtir. Elastik malzeme gerildiğinde, atomlar ve moleküller bir gerilim uygulandığı sürece deforme olur ve gerilim kaldırıldığında ilk durumlarına geri dönerler. Bozulma yaşadktan sonra normal şekle dönme yeteneği, geri yükleme kuvveti olarak adlandırılabilir. Bu geri yükleme kuvveti genellikle yaşanan gerilme miktarı ile orantılıdır. Gerilmenin bir fonksiyonu olarak gerinim, Hooke Yasası grafiğinde gösterilebilir veya daha yaygın olarak gerilim-gerinim eğrisi olarak bilinir (bkz. Şekil 4).

Gerilim-gerinim eğrisinin üç farklı bölgesi vardır:

- Elastik davranış: Gerilim ve gerinim arasındaki ilişki doğrusal ve orantılıdır. Numune, örneğin bir yay gibi, boşaltıldığında ilk durumuna geri döner.
- Plastik davranış: Gerilim ve gerinim arasındaki ilişki artık orantılı değildir. Malzeme boşaltıldığında (büküldüğünde) yeni konumunda kalacaktır.
- Kırılma noktası: Bu noktada numune kırılacak ve gerilme ortadan kalkacaktır.

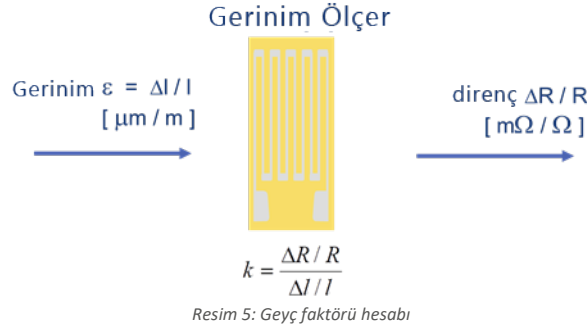


A Cam veya taş gibi kırılğan malzeme
B Plastik biçiminde pizza hamuru gibi malzeme
C Kauçuk gibi son derece esnek bir malzeme

Resim 4 gerilim-gerinim eğrisi

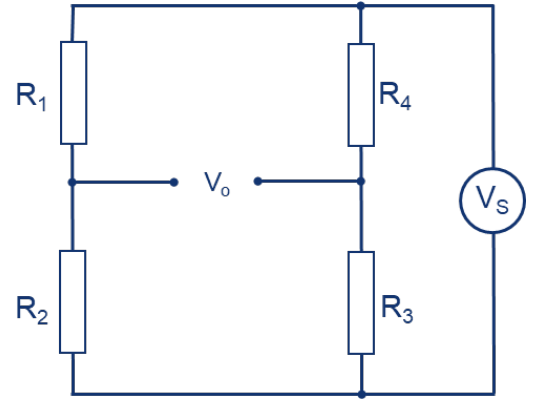
Gerinim Ölçer

Gerinim, bir gerinim ölçer (strain gage – birim deformasyon ölçer) ile ölçülebilir. Gerinim ölçer, 1938'de Arthur Claude Ruge ve Edward E. Simmons tarafından icat edilen bir piezodirençli sensördür. Gerinim ölçer, malzeme gerildiğinde veya sıkıştırıldığında direnci değişen bir yarı iletken malzemeden yapılır. Gerinim ölçerler, $m\Omega / \Omega$ cinsinden gösterilen elektrik direncindeki nispi değişimin $\mu m / m$ cinsinden gösterilen mekanik gerilime oranını belirten ölçüm faktörü (GF veya k-faktörü) ile sağlanır. Metal gerinim ölçerler tipik olarak 2 mertebesinde bir ölçüm faktörüne sahiptir, bu da numune $1000 \mu m / m$ 'de olduğunda dirençte $200 \mu \Omega / \Omega$ değişime neden olur. 350Ω gerinim ölçer için bu, $700 m\Omega$ (nominal değerin %0.2'si) dirençte bir değişiklik anlamına gelir.



Wheatstone köprüsü

Wheatstone köprü devresi, dirençteki değişikliği ölçmek için kullanılan bir devredir. Wheatstone köprüsü, mutlak direnci ortadan kaldırmak için paralel bağlanmış iki voltaj bölücüdür. Wheatstone köprü devresi, gerinim ölçer ile ölçülen gerinimi voltaj değişimine çevirir ve bu voltaj ADC (analog dijital dönüştürücü) tarafından okunur. Köprüdeki dört direncin tümü eşit olduğunda, köprü mükemmel bir şekilde dengelenir ve $V_O = 0 V$ olur. Ancak dirençlerden biri veya daha fazlası değerlerini yalnızca çok küçük bir miktarda değiştirdiğinde, çıkış voltajı duruma bağlı olarak pozitif veya negatif yönde değişir. Gerinim ölçer boyutsal değişikliklere uğradığında (bir numuneye bağlı-yapıştırılmış olduğu için), köprünün dengesini bozar ve gerinimle orantılı bir çıkış voltajı üretir.



Resim 6: Wheatstone köprü devresi

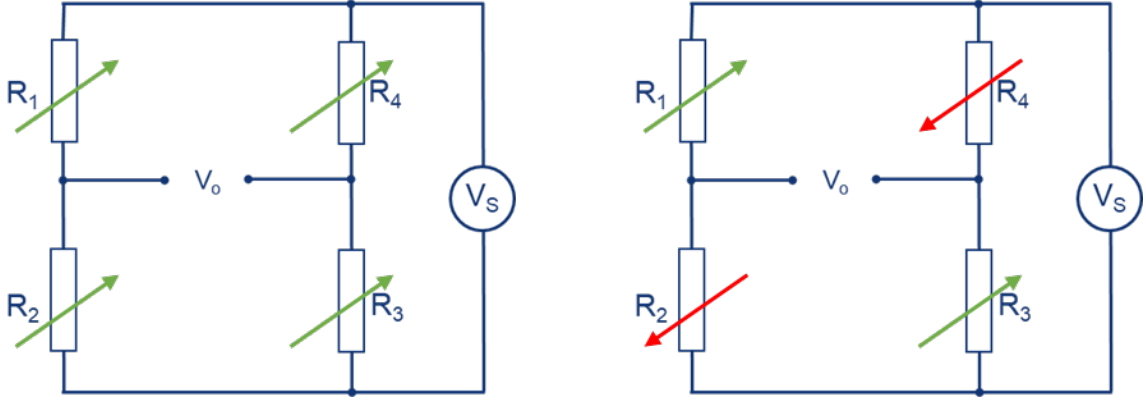
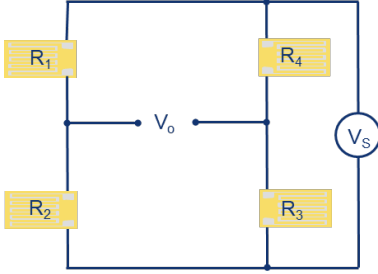


Figure 7: Dengeli ve dengesiz wheatstone köprüsü

Özetle, Wheatstone köprü devresinin avantajları şunlardır:

- Basit bir voltaj bölücü gibi cihazlarla karşılaştırıldığında bilinmeyen (elektriksel direnç) değerini bulmadaki doğruluğu.
- Mutlak bir referansa karşı single-ended bir ölçümün aksine diferansiyel bir ölçüm olduğu için daha kararlı bir okuma sağlaması.
- Dengelendiğinde çıkış voltajı 0 V'tur, bu da daha yüksek sinyal çözünürlüğü elde etmek için daha fazla amplifikatör kazancına izin verir.
- Köprü uyarma ve sıcaklık hataları dahil olmak üzere potansiyel hatalar iptal edilebilir.

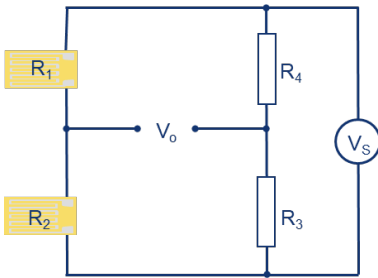
Köprüye bağlanması gereken aktif gerinim ölçer sayısı uygulamaya bağlıdır. Örneğin, numunenin karşılıklı yüzeylerinin, birine basma (compression), diğeri çekme (tension) yönünde uygulama yapmak faydalı olabilir. Böyle bir uygulamada, aynı gerinim için köprü çıktısı etkin bir şekilde ikiye katlanabilir. Tüm kollara gerinim sensörleri bağlı olduğu kurulumlarda, sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan direnç değişimi Wheatstone köprüsünün tüm kolları için aynı olacağından gerinim ölçerlerin sıcaklık kompanzasyonu otomatik gerçekleşecektir.



Tam köprü tipi devre

Tam köprü devresi, gerinim ölçerler için idealdir. Ölçülecek malzeme üzerine dört aktif gerinim ölçer yerleştirilir. Bu devre en yüksek hassasiyete, en az hata bileşenine ve en yüksek çıkışa sahiptir, bu da gürültünün ölçümler üzerindeki etkilerini azaltır.

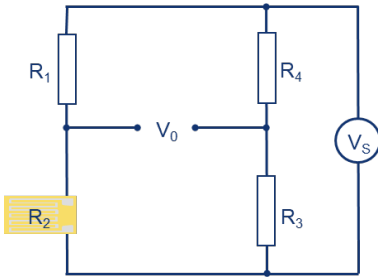
- + Yüksek sinyal kararlılığı
- + Düşük sıcaklık kayması
- Kurulumu zaman ve emek ister



Yarım köprü tipi devre

Fiziksel koşullar tam köprü montajına izin vermediğinde, yarım köprü takılabilir. İki aktif gerinim ölçer, gerinim yükselticinin içindeki iki pasif dirençle desteklenir.

- + Düşük sıcaklık kayması
- + Ortalama kurulum süresi
- Orta uzun vadeli sinyal kararlılığı



Çeyrek köprü tipi devre

Ölçülecek malzeme üzerine tek bir gerinim ölçer yerleştirilir. Aktif gerinim ölçer, gerinim yükselticinin içindeki üç pasif dirençle tamamlanır.

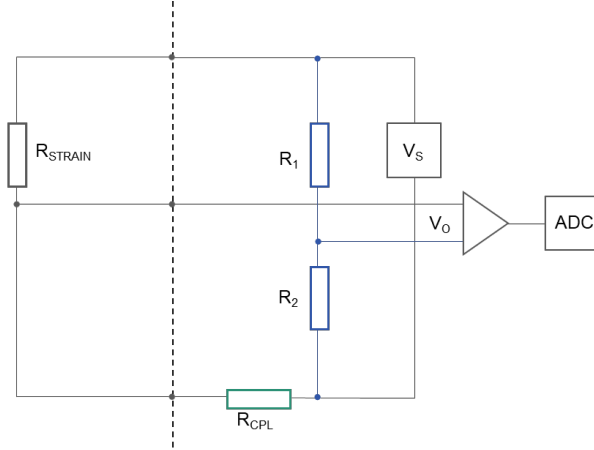
- + Düşük efor
- Sıcaklık kaymasına karşı yetersiz
- Uzun dönem kararlılığı düşük
- Gürültüye duyarlı

Çeyrek köprü ölçüm performansını olumsuz yönde birkaç faktör etkileyebilse de, yapısal test ve sağlık izleme uygulamalarında gerilim analizi için en yaygın kullanılan devredir. Bu nedenle, gerinim yükselticisini ve veri toplama sistemini dikkatli bir şekilde seçmeniz gerekir. Çeyrek köprü devresi ile doğru gerinim ölçümleri sağlamak için aşağıdakileri göz önünde bulundurun:

1. Daha iyi sinyal-gürültü oranı için doğru amplifikasyon ve gürültüyü en aza indirme
2. Sıcaklık kayması kompanzasyonu ve düşük kaymalı köprü tamamlama direnci
3. Wheatstone köprü devresine güç sağlamak için optimum köprü uyarımı
4. Uzun kablolardan kaynaklanan ölçüm hatalarının telafi edilmesi
5. Tüm ölçüm zincirini doğrulamak için şönt kalibrasyonu

3 telli çeyrek köprü devresi

Çeyrek köprü konfigürasyonu için önerilen devre, Şekil 8'de gösterilen üç telli devredir. Üç telli devrenin faydaları arasında içsel köprü dengesi, kablo/tel sıcaklık değişikliklerinin köprü dengesi üzerindeki etkileri için otomatik kompanzasyon ve iki telli konfigürasyon ile karşılaştırıldığında artan hassasiyet bulunur.



Şekil 8: 3 telli çeyrek köprü devresi

Üç telli devrede, ilk tel, gerinim ölçer ile seri olarak bağlanır. İkinci tel, köprünün negatif giriş ve çıkış köşeleri arasında köprü tamamlama direnci olarak da bilinen pasif direnç RCPL ile seri olarak bağlanır. Köprü dengesini korumak için köprü tamamlama direncinin direnci, gerinim ölçer direncinin kendisiyle aynı olmalıdır. Ticari gerinim ölçerlerin en yaygın nominal direnç değerleri 120 Ω , 350 Ω ve 1.000 Ω 'dur. Bu iki tel aynı tip ve uzunlukta ve aynı sıcaklığa maruz kalırsa dirençleri eşit olur ve tel sıcaklık değişimlerinden bağımsız olarak köprü dengede kalır. Ayrıca, gerinim ölçer ile seri olarak yalnızca bir tel olduğundan, tel duyarsızlaşması iki telli konfigürasyona kıyasla yaklaşık %50 oranında azaltılır. Şekil 8'deki üçüncü tel sadece voltaj algılayan bir teldir ve herhangi bir köprü kolu ile seri halinde değildir, bu nedenle köprü dengesini veya sıcaklık kararlılığını etkilemez.

Wheatstone köprü devresi denklemini uygulayarak ölçülecek köprü sinyali hesaplanabilir:

$$V_o = \frac{R_{CPL}}{R_{CPL} + R_{STRAIN}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{STRAIN} = \frac{R_{NOM}}{1 + \epsilon \times \frac{k}{1000000}}$$

- V_o = Köprü çıkış sinyali [V]
- R_{CPL} = Köprü Tamamlama direnci [Ω]
- R_{STRAIN} = Aktif geyç direnci [Ω]
- R_1 = Dahili yarım köprü direnci [Ω]
- R_2 = Dahili yarım köprü direnci [Ω]
- R_{nom} = Nominal gage(geyç) direnci (gerinim sıfır iken ölçülen) [Ω]
- k = Gage(Geyç) faktörü
- ϵ = Strain [$\mu m/m$]

Sonraki örnekte, 350 Ω aktif geyçli, 2 geyç faktörlü ve uygulanan gerinim 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ olan bir çeyrek köprü gerinim ölçer devresini varsayıyoruz. Köprü sinyali şu şekilde hesaplanabilir:

$$R_{\text{STRAIN}} = \frac{350 \Omega}{1 + 500 \times \frac{2}{1000000}} = 349.650 \Omega$$

$$V_o = \frac{350 \Omega}{350 \Omega + 349.650 \Omega} - \frac{1000 \Omega}{1000 \Omega + 1000 \Omega} = 0.25 \text{ mV}$$

mV seviyesindeki köprü sinyali nedeniyle, voltajı ADC aracılığıyla dijital bir sinyale dönüştürmeden önce bir kazanç aşaması gereklidir. Doğru yapılırsa, amplifikasyon, büyük bir sinyal-gürültü oranını (SNR) korurken ölçüm çözünürlüğünü artıracaktır.

Gerinim ölçer amplifikatör doğruluğu

Gerinim ölçer amplifikatörleri, sinyal koşullandırma işlemine hem doğruluk hem de kararlılık sağlar. Gerinim ölçerler, düşük seviyeli ölçüm sinyallerini ADC'lere beslemeden önce güçlendirmek için gerinim amplifikatörlerine ihtiyaç duyar. Amplifikatör kazancı, ADC'nin tüm aralığı boyunca gerinim ölçerin tam ölçekli çıkışını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Doğruluk, ölçüm aralığından ve amplifikatörün kazanç doğruluğundan etkilenir. Örneğin, tahribatsız yapısal test uygulamalarında, gerinim ölçümü genellikle $\pm 2.000 \mu\text{m}/\text{m}$ aralığındadır. Çatlak tespiti için gerekli ölçüm aralığı 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'ye hatta 20.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'ye kadar çıkabilir. Örneğin, geleneksel gerinim amplifikatörleri, $\pm 0,1\%$ 'lik bir kazanç doğruluğu ile $\pm 46,500 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik sabit bir ölçüm aralığı sağlar ve bu da tam ölçekte 46 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir hataya neden olur. Daha modern gerinim yükselticileri, $\pm 0,05\%$ kazanç doğruluğu ile ayarlanabilir ölçüm aralıkları sağlar. $\pm 2.000 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir ölçüm aralığı, yalnızca 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir tam ölçekli hata ile sonuçlanacaktır. Karşılaştırıldığında, çatlak tespiti için $\pm 20.000 \mu\text{m}/\text{m}$ 'lik geniş bir ölçüm aralığı, yalnızca 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik tam ölçekli bir hataya sahip olacaktır. Bu nedenle, ayarlanabilir bir ölçüm aralığı ile birlikte kazanç doğruluğu, bir gerinim yükseltici seçerken dikkat edilmesi gereken özelliklerden biridir.

SNR (signal to noise ratio), istenen sinyalin seviyesini gürültü seviyesiyle karşılaştırmak için kullanılan bir terimdir. Daha büyük bir SNR, daha az gürültülü bir sinyal anlamına gelir. Gerinim ölçümlerindeki gürültü, gerinim ölçümlerinde zaten küçük sinyaller ölçülmesi nedeniyle özellikle sorun yaratır. Çeyrek köprü devresi gibi single-ended girişler, sinyali taşıyan telin elektriksel arka plan gürültüsüne maruz kalması ile çok ciddi sorun yaşayabilir. Single-ended bir girişteki sinyal ayrıca toprak döngülerine (ground loop) maruz kalabilir. Tüm ölçüm sistemi boyunca gürültüyü mümkün olduğunca en aza indirmek önemlidir. Analog giriş sinyalinden filtrelenmesi gereken belirli gürültü kaynakları da olabilir. Gürültü kaynaklarının bazı örnekleri arasında şebeke frekansı (50 veya 60 Hz), statik elektrik veya harici elektrik paraziti sayılabilir.

Sinyal-gürültü oranını iyileştirme yöntemleri şunlardır:

- Gerinim ölçerin kablosunun uzunluğunu azaltın ve olası gürültü kaynaklarından uzak tutun.
- Gürültü karışmasını en aza indirmek için gerinim ölçere giden kabloları ekran korumalı, bükümlü çift kablo kullanın.
- 24 bit ADC'ye sahip, yani 16 bit ADC'nin 256 katı çözünürlüğe sahip, düşük veya bant geçişli filtre teknikleriyle gürültüyü hassas bir şekilde filtrelemeye izin veren bir gerinim amplifikatörü seçin
- Uyarma voltajının genliğini artırın, ancak uyarı voltajının genliğini artırmanın bazı dezavantajlar yarattığı bilinmelidir, bunlar bu yazıda daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır.
- DC uyarımı yerine, yüksek performanslı bir bant geçiren filtre görevi gören bir taşıyıcı frekans yükselticisi ile gerinim ölçere AC uyarımı uygulayın. AC uyarma/taşıyıcı frekans yükselteçleri hakkında daha fazla teknik ayrıntı bu makalenin ayrı bir bölümünde daha ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Köprü besleme voltajının optimize edilmesi

Uygun bir köprü uyarma gerilimi seviyesi seçerken iki karşıt düşünce vardır; 1) daha yüksek bir köprü uyarma gerilimi, geycin sinyal-gürültü oranını iyileştirir, 2) daha düşük bir köprü uyarma gerilimi, geyç ölçümünde termal olarak indüklenen (kendi kendini ısıtması) hataları azaltır. Uyarma voltajı, geyç ve bağlı olduğu malzeme ile uygun belirlenmelidir. Çoğu mühendislik çalışması gibi, gerinim ölçümü de taviz vermeyi gerektirir ,bu durumda, kendi kendine ısınmaya karşı sinyal-gürültü oranına bağlı olacak hatalardan birini seçmek durumundasınız.

Gerinim ölçerin kendi kendine ısınmasından kaynaklanan termal sürüklenme, gerinimde, gerçekte numunenin deformasyonundan kaynaklanmayan belirgin bir değişikliğe neden olur. Gerinim ölçere sağlanan uyarma voltajı ne kadar yüksek olursa, güç o kadar fazla olur, kablolardan geçen akım tarafından o kadar fazla ısı üretilir. Gerinim ölçer tarafından harcanan elektrik gücü (W) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = \frac{V_s^2}{n \times R}$$

V_s = Köprü uyarım gerilimi* [V]
 R = Geyç direnci [Ω]
 n = Devredeki aktif direnç sayısı

** Köprü uyarımının (V_s), aktif koldaki voltajın toplam uyarım voltajının yarısı olduğu, eşit kollu köprü devresine dayandığını unutmayın.*

Bu nedenle, 5 V köprü uyarımlı 120 Ω çeyrek köprü devresi için harcanan güç:

$$P = \frac{V_s^2}{n \times R} = \frac{2.5^2}{1 \times 120} = 52 \text{ mW}$$

Gerinim ölçerin sıcaklığı, malzeme sıcaklığının sadece bir kelvin üzerindeyse, -11 µm/m (ferritik çelik) veya -23 µm/m (alüminyum) görünür bir gerilim oluşumuna neden olur. Daha düşük bir uyarma voltajı bir çare sağlar! Örneğin, 2 V'luk bir köprü uyarma gerilimi yalnızca 2 mW üretecektir.

Tablo 1, farklı köprü uyarma gerilimi seviyeleri için bir çeyrek köprü devresi tarafından harcanan gücü göstermektedir.

Table 1: çeyrek köprü strain gage güç harcaması

Besleme Voltajı	mW olarak geyç üzerinde harcanan enerji		
	120 Ω	350 Ω	1000 Ω
0.1	0.02	0.01	0.00
0.2	0.08	0.03	0.01
0.5	0.52	0.18	0.06
1.0	2.08	0.71	0.25
2.0	8.33	2.86	1.00
3.0	18.75	6.43	2.25
4.0	33.33	11.43	4.00
5.0	52.08	17.86	6.25
10.0	208.33	71.43	25.00

Kompozit malzemeler gibi zayıf ısı iletkenliğine sahip numuneler için veya çok küçük gerinim ölçerler kullanıldığında, uyarma voltajını düşürmek veya daha yüksek dirençli bir gerinim ölçer kullanmak çok önemli bir noktadır.

Optimum uyarma voltajını belirlemek için iyi bir başlangıç noktası, kaba bir teorik limit belirlemektir. Önerilen güç yoğunluğu seviyeleri için aşağıdaki formüllere göre hesaplamalar yapılabilir:

$$P_G = \frac{P}{A_G}$$

- P_G = Izgara (grid) güç yoğunluğu [kW/m²]
 P = Geyç tarafından harcanan güç [kW]
 A_G = Izgara alanı (aktif geyç uzunluğu × ızgara genişliği) [m²]

Izgara alanı, geyç direnci ve ızgara güç yoğunluğu bilindiğinde, en düşük termal sapmaya sahip optimum köprü uyarma gerilimi şu şekilde hesaplanır:

$$V_S = 2 \sqrt{R \times A_G \times P_G}$$

DC besleme mi yoksa AC besleme mi? Taşıyıcı frekans yükselticisinin faydaları

Hesaplanan değer, sabit güç yoğunluğu seviyelerine sahip ızgara alanları için optimum uyarma seviyelerini belirlemek için genel bir öneriyi veya başlangıç noktasını temsil eder.

Ölçüm bölgenizin yakınında elektriksel gürültü var mı, belki bir elektrik hattı veya AC motor? Bu tip nesneler, gerinim ölçerler veya gerinim tabanlı sensörler (yük, basınç, ivme) gibi düşük voltajlı sinyalleri ölçerken karşılaşılabileceğiniz başlıca elektrik gürültüsü kaynaklarıdır. Gerinim ölçer ölçümleri, ölçüm süreniz arttıkça artan gürültü ve ofset kayması ile boğuşur.

Bir test veya izleme sistemi için bir amplifikatör kurmayı düşünürken, birincil amaç bir köprü devresi çıkışını bir mikrovolt veya milivolt aralığından bir volt veya birkaç volt aralığına yükseltmektir. Uyarma miktarını belirlerken, belirli bir devreyi veya çeşitli ölçüm konumlarında birden fazla farklı devreyi uyarmak için gereken nominal voltajı düşünürsünüz. Bu uyarım, bir elektrik devresinden geçerek bir manyetik alan oluşturan bir süreçtir ve bizim durumumuzda devre tek bir gerinim ölçer veya bütün bir Wheatstone köprü devresidir. En yaygın amplifikatörler, bir gerinim ölçere bağlanırken DC uyarımı sağlar. Daha yüksek bir besleme voltajıyla çalışırken yüksek dirençli gerinim ölçerlerin kullanılması, bir amplifikatörün sıfır kaymasını sınırlamaya yardımcı olur, fakat aynı zamanda devrenin antenler gibi çalışmasına ve sinyalle gürültü girişimini önemli ölçüde artırmasına izin verir. Çoğu ölçüm ortamının yakınında birçok gürültü kaynağı bulunduğu ve günlük ortamımız elektrik prizlerinden, aydınlatmadan ve basit motorlardan gelen elektrik gürültüsünü içerdiğinden, DC amplifikatörler bu gürültüyü sinyal çıkışımıza yayar. Bu, en önemli ölçüm hatası kaynaklarından biridir ve kurulumun mükemmel olması için daha da fazla baskı yaratır. Bu nedenle, bazen ölçümü finansal olarak olanaksız, zaman alıcı ve mükemmele ulaşmayı imkansız hale getiren mükemmel ekranlama teknikleri ile maliyetli kablolama kullanmak gerekir.

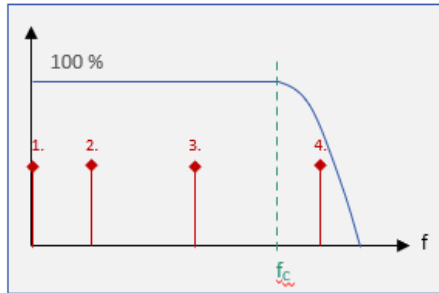
Taşıyıcı frekans yükselteçleri bu senaryolarda birçok fayda sağlar. Doğrudan voltaj yükselteçlerine göre avantajı, tüm frekansların ve ardından taşıyıcı frekans bant genişliği dışındaki harmoniklerin ortadan kaldırılmasıdır. Bu, termoelektrik voltaj gürültüsünü, güç hattı frekanslarını ve yakındaki motorların rezonans frekanslarını ortadan kaldırır. Bunların tümü, ölçüm mühendislerinin analiz başlamadan önce veri kümelerinden filtrelediği birincil gürültü sinyalleridir. Verileri gerçek zamanlı olarak yakalarken bu sinyalleri ortadan kaldırmak, ölçüm sırasında sinyallerin görüntülenme kalitesini iyileştirir ve bir kontrol sinyali için kullanıldığında sinyal bütünlüğünü iyileştirir (örnek: analog çıkış, dijital çıkış, EtherCAT, PROFINET).

Tipik olarak, Wheatstone köprüleri iki farklı voltaj türü tarafından uyarılır:



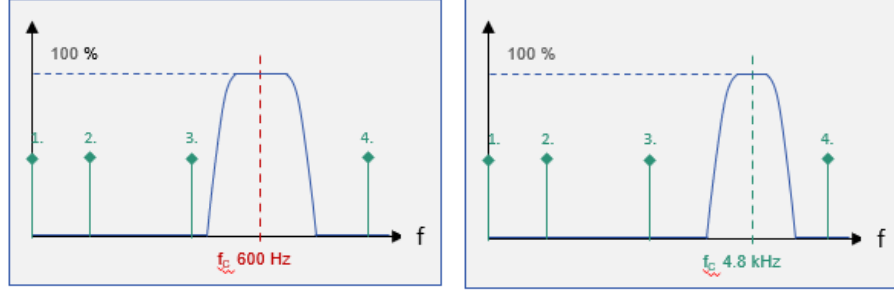
Şekil 9: DC'ye karşı frekans uyarıtımı

Şimdi farklı amplifikatör türlerini karşılaştıralım. DC uyarma yükselteçlerini kullanırken, bir besleme kaynağı, bir Wheatstone köprü devresini beslemek için sabit bir kararlı voltaj sağlar. Bu DC uyarma yükselticisi her zaman doğrudan bir voltaj sağladığından, her zaman bir çıkış voltajı sinyali okuması üretir. Bu çıkış voltajı sinyali, ölçüm sinyalinin yüksek bir bant genişliğini sağlayan statik ve dinamik sinyallerin yüksek frekanslara yükseltilmesidir. Bunun destekleyebileceği maksimum bant genişliği için kesin bir üst sınır yoktur, ancak çoğu köprü tabanlı sensör 10 kHz'in üzerinde çalışamaz çünkü mekanik bir nesnenin başka bir ayırık değer yaratacak kadar hızlı değişen sonlu bir sınırı vardır. Daha yüksek frekanslardaki çıkış yanıtlarının çoğuna, belirli yüksek frekanslarda meydana gelen ancak ölçüm çıkışında aslında istenmeyen gürültü girişim darbeleri neden olur. Bu nedenle çoğu mekanik büyüklük (%80-90) 1 kHz'in altında istenen sinyal frekansına sahiptir. DC uyarma amplifikatörünün avantajı, geniş bant iletim aralığı nedeniyle amplifikatörün çok yüksek bir ölçüm frekans aralığına sahip olabilmesidir.



Şekil 10: Geniş bantlı bir DC amplifikatörün iletim özellikleri

Bir taşıyıcı frekans amplifikatör üretici, köprü devresini beslemek için hem frekansta hem de voltajda stabilize olan simetrik bir alternatif voltaj sağlar. Çıkış voltajı, doğrudan voltaj uyarımına benzer, ancak köprü dengesizliği ile orantılı genliğe sahip alternatif bir voltaj çıkışı ile. Bu tip amplifikatörler, yalnızca AC uyarım köprüye voltaj sağladığında (yani 600 veya 4800 Hz) sinyali yükseltmek için tasarlanmıştır. Bu, genlik modülasyon hızı üzerinde nispeten küçük bir tolerans yan bandı ile AC taşıyıcı frekans hızının frekans aralığında meydana gelecektir, bu nedenle diğer tüm frekanslar yükseltilmez. Bu yöntem daha sonra yukarıda tartışıldığı gibi tüm doğrudan voltaj girişimlerini ortadan kaldırır.



Şekil 11: Bir frekans bandı seçici taşıyıcı frekans yükselticisinin iletim özellikleri (f_c : 600 Hz, 4,8 kHz)

Ölçüm frekansı aralığını belirlemek için iki tip amplifikatör karşılaştırıldığında, DC amplifikatör, geniş bant DC güçlendirilmiş sinyale uygulanan low-pass filtresini temel alır. AC taşıyıcı frekansı, maksimum kesme frekansı, taşıyıcı frekansı AC voltaj modülasyon hızına bağlı olduğundan biraz farklıdır. Test ve ölçüm dünyasındaki genel inanış, ölçüm frekansının yaklaşık taşıyıcı modülasyon hızının 3'te 1'ine eşit olduğu yönündedir, bu da low pass filtresine bağımlı değildir.

Köprü Uyarıtımı	DC	600 Hz CF	4.8 kHz CF
Dinamik Ölçüm	↑	↓	↗
Yüksek dirençli sensörler	↑	↑	↓
Kararlı & EMC direçli	↓	↑	↗
Uzun sensör kablosu	↑	↑	↓
İndüktif sensörler	↓	↓	↑
1/4 çayrek Köprü Uygunluk	↑	↑	↓

Şekil 12: DC ve AC köprü uyarıtımı arasındaki karşılaştırma

Gerinim ölçün, sıcaklık değil

Bir yorulma testi veya yapısal sağlık izleme sistemi olsun, gerinim ölçümleri birkaç haftadan birkaç yıla kadar sürebilir. Gündüz ve gece boyunca. Ortam sıcaklığındaki değişiklikler, çeyrek köprü gerinim ölçer devreleri kullanılırken en yaygın ölçüm hatası nedenleri arasındadır. Köprü direncinde sıcaklıkla ilgili %0,1 kadar küçük bir değişiklik, 500 µm/m'lik bir uzamaya neden olabilir. Gerinim ölçümünüzün bir sıcaklık ölçümüne dönüşmesini önlemek istersiniz.

Gerinim ölçerlerin termal çıkışının kompanzasyonu

Oda sıcaklığında bir ölçümden elde edilen gerinim, değişmeyen çevre koşullarında gerçekleştirilirse doğru olarak kabul edilir. Ancak sıcaklık değiştiğinde, numune malzemesi genişleyecek ve bu da istenmeyen bir gerinim okumasına neden olacaktır. Sıcaklık değişimi ayrıca metal ızgarayı ve gerinim ölçerin kendisinin termal katsayısını da etkiler. Buna termal çıktı veya sıcaklığa bağlı görünen gerilme denir. Gerinim birimlerinde ifade edilen termal çıktı, aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\varepsilon_{TO} = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_S - \alpha_G \right) \Delta T$$

ε_{TO}	= Gerinim biriminde termal çıktı
α_R	= Geyç direncinin termal katsayısı
α_S	= Numune malzemenin termal katsayısı
α_G	= Strain gage ızgarasının termal katsayısı
k	= Strain gage , geyç faktörü
ΔT	= Başlangıçtaki referans sıcaklıktan sapma sıcaklığı

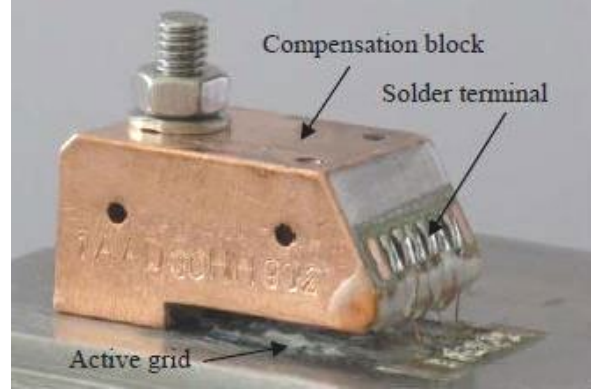
Ölçünün termal katsayısını numunenin malzemesinin genleşme katsayısına uyacak şekilde ayarlamak üzere tasarlanmış kendi kendine sıcaklık telafili (STC) bir gerinim ölçerin seçilmesi, tamamen olmasa da büyük ölçüde termal çıktıyı telafi eder. Gerinim ofseti şeklinde artık bir görünür gerilim kalır. Geyç sıcaklığı ve görünen gerinim özellikleri biliniyorsa, bu kayma hesaplanabilir ve gerinim değeri buna göre telafi edilebilir.

Termal çıktıdan kaynaklanan hataları düzeltmek veya telafi etmek için yaygın olarak kullanılan iki teknik, (a) kompanzasyon için gerilme olmayan bir noktaya dummy(kukla) bir geyç yapıştırmak veya (b) ölçülen geyç sıcaklığına dayalı bir hesaplama düzeltmesi uygulamaktır.

Kukla gerinim pulu ile gerinim ölçer sıcaklık kompanzasyonu

Teorik olarak, termal çıktıdan kaynaklanan hata, aynı malzeme üzerine yapıştırılmış ve aktif geyç ile aynı sıcaklığa maruz bırakılmış ve bir gerilme uygulanmamış kukla (dummy) geyç kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Dummy geyç, aktif geyce bitişik bir köprü kolunda kullanılabilir, etkin bir şekilde bir aktif ve bir pasif geyç ile bir yarım köprü oluşturularak ve böylece görünen gerilmenin elektriksel olarak yok edilmesini sağlar. Durumun tam olarak böyle olmasını sağlamak için, aktif ve pasif geyce giden besleme hatları aynı uzunlukta olmalı ve sıcaklığa bağlı direnç değişiklikleri de aynı olacak şekilde birlikte yönlendirilmelidir.

Tek tip sıcaklıktaki bir alana birçok geycin monte edildiği çok kanallı sistemler için, dummy geyci doğrudan okumak daha verimlidir. Aktif geyçlerden gelen gerinim okumaları, daha sonra, kukla geyç'ten okunan gerinim değeri çıkarılarak düzeltilebilir.



Kukla geyç kullanırken karşılaşılabilecek zorluklar, gerekli koşulların oluşturulması ve sürdürülmesinde dikkat edilecek hususlar;

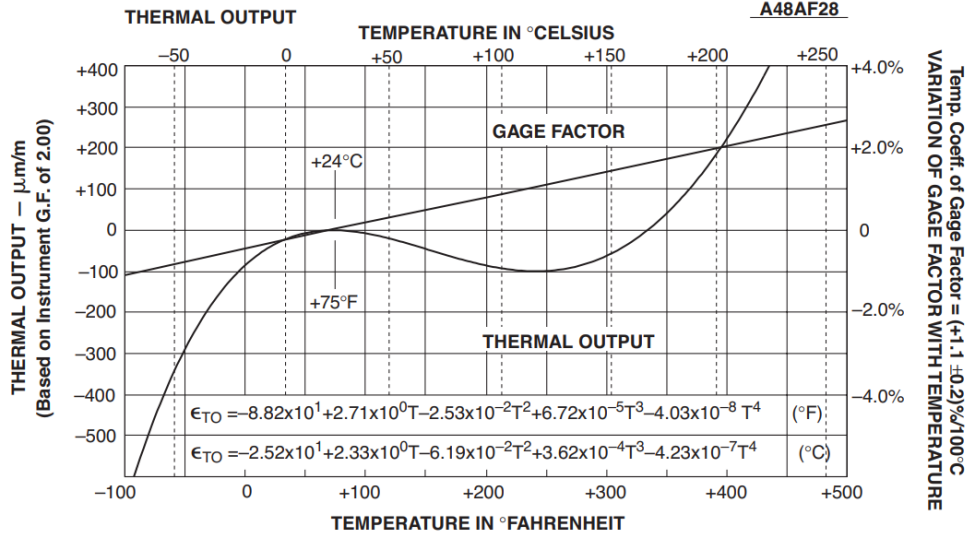
- + Kukla geycin takıldığı numune, tüm yük koşullarında gerilmeye maruz kalmamalıdır.
- + Gerilmemiş numune üzerindeki kukla geycin (kurşun teller dahil) sıcaklığı her zaman aktif geycin sıcaklığı ile aynı olmalıdır.
- + Hem aktif hem de kukla geycin termal çıkışı neredeyse aynı olmalıdır.

Üç kriter iyi bir şekilde karşılanabildiğinde, bir kukla geyç ile kompanzasyon yöntemi, termal çıktı hatasını kompanze etmek için etkili bir tekniktir.

Gerinim pulu (strain gage) sıcaklığına dayalı hesaplama düzeltmesi

Bazı durumlarda numune üzerine monte edilen belirli bir gerinim ölçer (geyç) için bir termal gerinim eğrisi oluşturmak istenebilir. Bu, numunenin malzemesinin termal katsayısına uygun kendi kendine sıcaklık kompanzasyonlu bir geyç mevcut değilse veya gerdirilmemiş bir kukla geyç kullanmak için gerekli koşulların sağlanması mümkün olmadığında söz konusu olacaktır.

Üreticiler, ofset hatasını hesaplamak için kullanılabilecek, her bir geyç (gerinim ölçer -gerinim pulu) paketi ile, sıcaklığa karşı bir termal çıktı grafiği sağlar. Geyç sıcaklığı biliniyorsa, termal çıktıdan kaynaklanan ofset hatası verilen bu grafikten okunabilir. Gerilme varken geyç üzerinden sıcaklık ölçülmelidir. Bu, termokupllar, termistörler veya PT100 (RTD'ler) gibi çeşitli sıcaklık sensörleri ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 13: Termal çıkış eğrisi örneği

Tipik olarak, termal çıktı eğrisi 2'lik bir geyç faktörü kullanılarak çizilir. Gerçek geyç faktörü farklı olabileceğinden ve sıcaklığa bağlı olabileceğinden, bu grafik kullanılırken dikkat edilmelidir. Termal çıktı eğrisini tanımlamak için dördüncü veya beşinci dereceden bir polinom kullanılabilir.

Şekil 13'te gösterilen örneği kullanarak, veri sayfasında verilen termal çıktı polinom denklemi:

$$\epsilon_{TO} = 25.2 + 2.33 \times T - 0.0619 \times T^2 + 0.000362 \times T^3 + 0.000000423 \times T^4$$

Düzeltilmiş gerinim değeri aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\epsilon_C = \epsilon_U - \left(\epsilon_{TO} \times \frac{k_{TO-Curve}}{k_{Datasheet}} \right)$$

- ϵ_C = Termal çıkış hatası düzeltilmiş gerinim değeri
- ϵ_U = Düzeltilmemiş gerinim değeri
- ϵ_{TO} = Gerinim biriminde termal çıktı
- $k_{TO-Curve}$ = Termal çıktı eğrisi için kullanılan geyç faktörü
- $k_{Datasheet}$ = Teknik katalog sayfasında belirtilen Geyç faktörü

Bu örnek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

$$\begin{aligned}\varepsilon_U &= 1000 \mu\text{m/m} \\ T &= 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ k_{\text{TO-curve}} &= 2 \\ k_{\text{Datasheet}} &= 2.1\end{aligned}$$

Bu varsayımlar ile formül kullanılarak, aşağıdaki düzeltilmiş gerinim değeri hesaplanır

$$\begin{aligned}\varepsilon_C &= 1000 - \left(25.2 + 2.33 \times 50 - 0.0619 \times 50^2 + 0.000362 \times 50^3 + 0.000000423 \times 50^4 \times \frac{2}{2.1} \right) \\ &= 965 \mu\text{m/m}\end{aligned}$$

Normalde yukarıdaki hesaplamanın, termal çıktıdan kaynaklanan ofset hatasını düzeltmek için yeterli olduğu kabul edilir. Belirli ızgara(grid) metalleri için veri sayfasında sağlanan geç faktörünün de sıcaklığa göre değiştiğine dikkat edilmelidir. Düzeltilmemiş gerinim ölçümüne ek bir düzeltme faktörü uygulanabilir.

Düşük kaymalı köprü tamamlama direncinin önemi

Aktif gerinim ölçer ve pasif köprü tamamlama direnci seri olarak bağlandığından, direnç kayması ölçüm doğruluğu üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Direnç Sıcaklık Katsayısı veya TCR (Temperature Coefficient of Resistance), bir direncin kararlılığını karakterize etmek için kullanılan ana parametrelerden biridir. TCR, dirençteki değişikliği ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlar. TCR'yi ifade etmenin yaygın yolu, sıcaklıktaki 1 kelvin değişim başına milyonda parça anlamına gelen ppm/K cinsindendir.

Piyasada, köprü tamamlama direncinin değişen özellikleri nedeniyle çeşitli gerinim yükselteçleri bulunmaktadır. Aşağıdaki formülde gösterildiği gibi, 350 Ω köprü tamamlama direncinin TCR'si 5 ppm/K olarak belirtilirse, bu, sıcaklıkta 10 kelvinlik bir değişiklikle %2,5'lik bir ölçüm hatasına neden olabilir. Bu, normal olarak %0,5 olarak belirtilen gerinim ölçerin kendisinin tipik doğruluğunu aşmaktadır.

$$350 \Omega \times 5 \frac{\text{ppm}}{\text{K}} = 1.75 \frac{\text{m}\Omega}{\text{K}} \text{ or } 17.5 \frac{\text{m}\Omega}{10 \text{ K}}$$

$$\text{Ölçüm hatası} = \frac{17.5 \text{ m}\Omega}{700 \text{ m}\Omega} = 2.5\% \text{ (10 kelvin başına)}$$

Genel bir kural olarak, sıcaklıktaki 10 kelvinlik değişimle ölçüm hatasını hızlı bir şekilde hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılabilir:

$$\text{Ölçüm hatası [\%]} = \frac{\text{TCR} \left[\frac{\text{ppm}}{\text{K}} \right]}{2}$$

Aşağıdaki tablo, yaygın olarak kullanılan köprü tamamlama dirençleri için ortaya çıkan ölçüm hatasına genel bir bakış sağlar.

Tablo 2: Köprü tamamlama direnci kararlılığından kaynaklanan ölçüm hatası

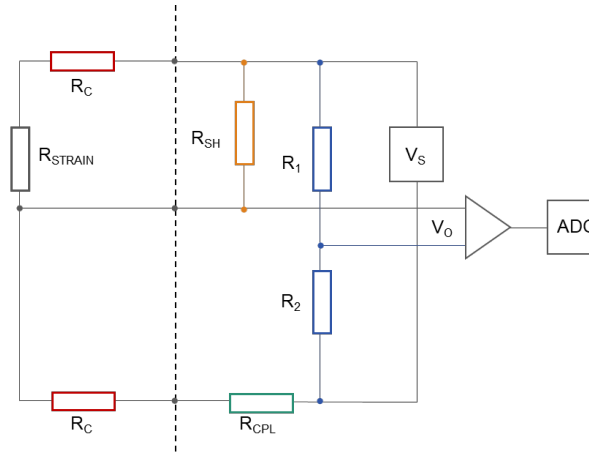
Direnç TCR	10 kelvin değişimdeki hata yüzdesi
5.0 ppm/K	2.5%
1.0 ppm/K	0.5%
0.5 ppm/K	0.25%
0.1 ppm/K	0.05%
0.05 ppm/K	0.025%

Uzun kablo kullanımlarında ölçüm hatasını ortadan kaldırın

Çeyrek köprü gerinim ölçümünün gerekli olduğu birçok durumda, enstrümantasyon (ölçüm elektroniği/veri toplama sistemi) aktif gerinim ölçerden oldukça uzak bir noktada bulunur. Bir gerinim ölçeri Wheatstone köprüsüne bağlayan köprü tellerinin direnci, köprü çıkışını zayıflatır veya geyci "duyarsızlaştırır". Zayıflama, köprü tellerinin uzunluğunun bir fonksiyonu olduğundan, artan kablo uzunluğu ile daha büyük bir etkiye sahip olacaktır.

Şönt kalibrasyonu iyidir, ancak yeterince iyi değil

Geleneksel enstrümantasyon ile ölçüme başlamadan önce manuel bir şönt kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmelidir. Şönt kalibrasyon işlemi, tel direncini ve sonradan gelen düzeltme faktörünü belirler. Şönt direnci (R_{SH}), Şekil 14'te gösterildiği gibi aktif gerinim ölçere (R_{STRAIN}) paralel olarak yerleştirilir. Şönt dirençsiz (V_{O1}) ve R_{CPL} (V_{O2}) boyunca şönt dirençli köprü sinyalinin ölçülmesi gerekir. Aşağıdaki formül kullanılarak kablo (veya tel) direnci hesaplanabilir.



Şekil 14: Şönt dirençli üç telli çeyrek köprü devresi

$$R_C = R_{CPL} \times \frac{\left(\frac{V_{O2}}{V_S} + \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{V_{O1}}{V_S} - \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{R_{SH}}{R_{CPL} + R_{SH}}\right) - \left(\frac{V_{O1}}{V_S} + \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{V_{O2}}{V_S} - \frac{1}{2}\right)}{\frac{V_{O2} - V_{O1}}{V_S}}$$

- V_{O1} = Şönt direnci olmadan köprü sinyali [V]
- V_{O2} = Şönt direnci varken köprü sinyali [V]
- V_S = Uyarım gerilimi [V]
- R_{STRAIN} = Aktif geyç direnci (genelde 120 Ω veya 350 Ω)
- R_C = Tel (kablo) direnci [Ω]
- R_{CPL} = Tamamlama direnci [Ω]
- R_{SH} = Dahili şönt direnci [Ω]
- k = Geyç faktörü
- ϵ = Gerinim (strain) [$\mu m/m$]

Hesaplanan tel direnci daha sonra aşağıdaki formülde gösterildiği gibi gerinim hesaplamasına uygulanan bir düzeltme faktörüne dönüştürülür:

$$\varepsilon = \frac{V_O}{V_S} \times \frac{4}{k} \times \left(1 + \frac{R_C}{R_{\text{STRAIN}}}\right)$$

100 metre (328 ft.) uzunluğundaki bir kablounun 10 Ω dirence sahip olduğunu varsayarsak, hesaplanan düzeltme faktörü:

$$\left(1 + \frac{10 \Omega}{350 \Omega}\right) = 1.0286$$

Tel direncini belirlemek için manuel şönt kalibrasyonunun kullanılması, tüm ölçüm döngüsü boyunca sabitlenen bir düzeltme faktörü ile sonuçlanır. Kablo direncindeki değişiklikler, örn. ortam sıcaklığındaki dalgalanmalar nedeniyle, ölçüm sırasında telafi edilmeyecektir. Bu, ölçümün tekrarlanabilirliğini etkileyen uzun vadeli kaymaya neden olacaktır. Özellikle yorulma/dayanıklılık testi ve yapısal sağlık izleme gibi uzun süre devam eden ölçüm uygulamaları için.

Kablounun sıcaklık katsayısından kaynaklanan direnç değişimi aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$R_{C(T1)} = R_{C(T0)} \times (1 + \alpha \times \Delta T)$$

$R_{C(T0)}$ = T₀ da ki kablo direnci (ölçüme başlama anı)

$R_{C(T1)}$ = T₁ de ki kablo direnci (ölçüm boyunca)

ΔT = T₀ ve T₁ arasındaki sıcaklık farkı

α = Kablo direncinin sıcaklık katsayısı (bakır = 4000 ppm/K)

Örneğin, sıcaklık gündüz 40 °C ve gece 10 °C arasında dalgalansın. 100 metrelik bir kablo için T₁'deki tel direnci:

$$R_{C(T1)} = 10 \Omega \times (1 + 0.004 \times 30 \text{ kelvins}) = 11.2 \Omega$$

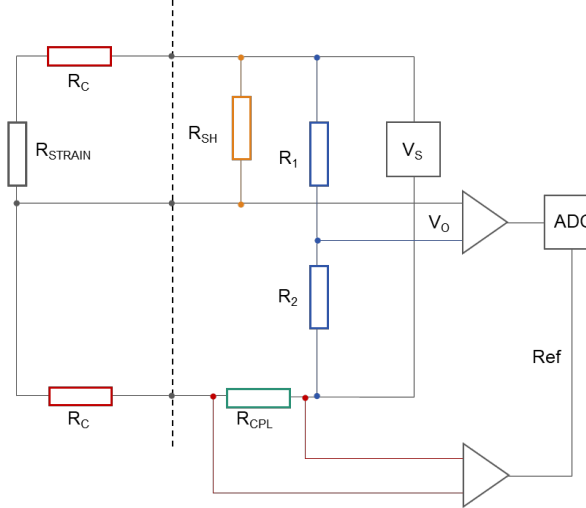
T₁'de şönt kalibrasyonu ile belirlenen düzeltme faktörü bu nedenle 1.0286 olmamalı ve aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$\left(1 + \frac{11.2 \Omega}{350 \Omega}\right) = \mathbf{1.0320}$$

Bu, giriş kazanç doğruluğu ve kayması nedeniyle halihazırda var olan ölçüm hatasına ek olarak %0,34'lük ek bir hata anlamına gelir. Bu nedenle, ölçüm sırasında tel direncindeki değişiklikleri düzeltmek için şönt kalibrasyon yönteminin tek başına yeterli olmadığı sonucuna varılabilir.

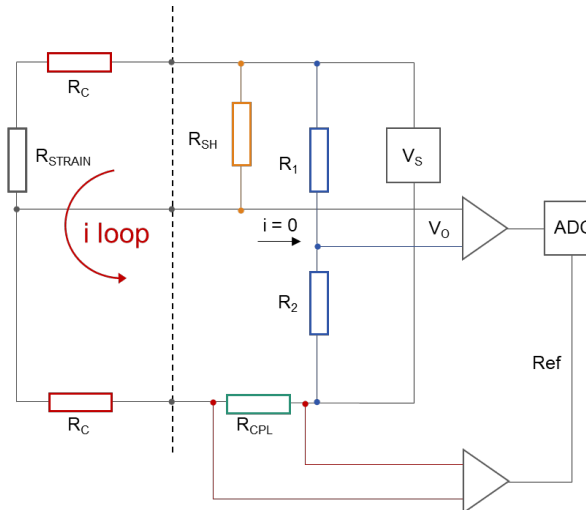
Sürekli tel direnci düzeltmesi

Tel direncinin sürekli düzeltilmesi için kanıtlanmış bir yöntem, Şekil 15'te gösterildiği gibi köprü tamamlama direncinin oransal (ratiometric) olarak algılanmasıdır.



Şekil 15: Oransal (Rasyometrik) algılamalı üç telli devre

Bu rasyometrik algılama yönteminin bir ön koşulu, yüksek empedanslı bir yükselticiye sahip bir gerinim yükselticisidir. Bu yüksek empedans nedeniyle, amplifikatöre akım akışı 0 mA'dır. Bu nedenle R_{C1} , R_{STRAIN} , R_{C2} ve R_{CPL} 'den geçen akım sabittir.



Şekil 16: Yüksek empedans girişi ile sabit akım akışı

Sabit akım akışı nedeniyle, R_{CPL} üzerinden sürekli olarak bir referans voltajı (V_{REF}) ölçmek mümkündür. Gerinim yükseltici (strain amplifier), tel direncindeki değişiklikler için ölçüm sinyalini sürekli olarak telafi etmek için bu referans voltajını kullanır.

Devreden geçen akım (i_{loop}) aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$i_{loop} = \frac{V_S}{R_{STRAIN} + R_{C1} + R_{CPL} + R_{C2}}$$

R_{STRAIN}	= Aktif gerinim ölçer direnci [Ω]
R_{CPL}	= Köprü tamamlama direnci [Ω]
R_{C1}	= Tel direnci [Ω]
R_{C2}	= Tel direnci [Ω]
R_1	= Dahili yarım köprü direnci [Ω]
R_2	= Dahili yarım köprü direnci [Ω]
V_S	= Köprü uyarım gerilimi [V]

Bu örnekte, geyç faktörü 2, uygulanan gerinim 500 $\mu\text{m/m}$, $V_S = 4\text{ V}$ ve kablo uzunluğu 100 metre olan 350 Ω aktif geyçli bir çeyrek köprü gerinim ölçer devresini varsayıyoruz. Devreden geçen akım daha sonra aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$i_{loop} = \frac{4\text{ V}}{350.35\ \Omega + 10\ \Omega + 350\ \Omega + 10\ \Omega} = 5.55286\text{ mA}$$

Daha sonra köprü sinyali hesaplanır :

$$V_O = i_{loop} \times (R_{CPL} + R_{C2}) - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_S$$

$$V_O = 5.55286\text{ mA} \times (350\ \Omega + 10\ \Omega) - \frac{1000\ \Omega}{1000\ \Omega + 1000\ \Omega} \times 4\text{ V} = -0.97175\text{ mV}$$

Gerinim hesaplanırken kablo uzunluğundan kaynaklanan ölçüm hatası 14.125 $\mu\text{m/m}$ 'dir.

$$\varepsilon = \frac{V_O}{V_S} \times \frac{4}{k}$$

$$\varepsilon = -\frac{-0.97175\text{ mV}}{4\text{ V}} \times \frac{4}{2} = 485.875\ \mu\text{m/m}$$

R_{CPL} üzerindeki referans gerilim aşağıdaki gibi hesaplanır :

$$V_{REF} = i_{loop} \times V_{CPL}$$

$$V_{REF} = 5.55286 \text{ mA} \times 350 \Omega = 1.9435 \text{ mV}$$

V_{REF} bilinerek, kompanze edilen ölçüm değeri hesaplanabilir:

$$\varepsilon = -\frac{V_0}{V_{REF}} \times 1000$$

$$\varepsilon = -\frac{-0.97175 \text{ mV}}{1.9435 \text{ mV}} \times 1000 = \mathbf{500 \mu m/m}$$

Sonuç

Çeyrek köprü devresi, basitliği ve maliyet etkinliği nedeniyle gerinim ölçmek için en popüler yöntemdir. Ancak devre, güvenilir ve tekrarlanabilir ölçüm verileri sağlamak için sinyal koşullandırıcılar için belirli zorluklar doğurur.

Çeyrek köprü ölçümü için bir gerinim yükseltici (strain amplifier) seçmenin beş temel ilkesi şunlardır:

1. Yüksek çözünürlük ve doğruluk için yüksek kazanç doğruluğuna ve ayarlanabilir giriş aralıklarına sahip en az 24 bitlik bir amplifikatör seçin.
2. Kompozit malzemeler üzerindeki gerinim ölçerin kendi kendine ısınmasını önlemek için daha düşük bir köprü uyarma voltajı veya metal üzerindeki uygulamalarda daha iyi bir sinyal-gürültü oranı için daha yüksek bir köprü uyarımı seçebildiğinizden emin olun.
3. Aşırı elektrik gürültüsü olan ortamlarda gerinim ölçümü için bir taşıyıcı frekans yükselticisi kullanın.
4. Ucuz fiyalı köprü tamamlama dirençleri ile tasarruf etmeye çalışmayın, ortam sıcaklığındaki değişikliklerden kaynaklanan önemli ölçüm hatalarını önlemek için düşük TCR'ye sahip dahili köprü tamamlama dirençleri kullanan bir amplifikatör seçin.
5. Uzun vadeli bir gerinim ölçüm testi için, ön ölçüm şönt kalibrasyonu yerine sürekli tel hata kompanzasyonu sağlayın.

Gantner Instrument'ın son teknoloji ürünü Q.series X veri toplama sistemleri, çeyrek köprü gerinim ölçümlerinde uzun vadeli gerinim ölçümü için zorlu gereksinimleri karşılamak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bu tür işlevsellik, nihai olarak, yapısal test veya sistem durumu izleme uygulamanız için güvenilir veriler üretmek için gereklidir.

Gantner Instruments uzmanları, sınıfının en iyisi, kişiselleştirilmiş satış ve teknik uygulama desteği sağlamaya becerisindedir. Gantner Instruments uygulama desteği ücretsizdir ve mevcut ve potansiyel müşteriler için herhangi bir engel yoktur. Mümkün olan en iyi gerinim ölçüm sonuçlarını elde etmenize yardımcı olalım!

Her türlü ürün ve uygulama desteği için Gantner Instruments Türkiye distribütörü Marmatek ile iletişime geçebilirsiniz.

Gantner Instruments GmbH

Montafonerstrasse 4
6780 Schruns
Austria

T +43 5556 77 463-0
info@gantner-instruments.com

www.gantner-instruments.com

Austria | Germany | France | Sweden | India | USA | China | Singapore



Test and Measurement Technology.
Designed for You.



Europe

