



ÖZEL ELEKTRİK MAKİNALARI DERSİ

DERS 3: YARDIMCI DERS NOTLARI

PWM (PULSE WIDTH MODULATION)

Tanımlar:

Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation-PWM) Elektrik enerjisinin verimli bir şekilde kullanımını sağlayan, yüksek hızda anahtarlama işlemidir (Bose,1997).

Bir Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) Sinyali, bir dijital kaynağı kullanarak bir analog sinyal üretmek için kullanılan bir yöntemdir.

Dijital cihazlar, 0'lar ve 1'ler (0V ve 5V, 3.3V) dışında çıkış olarak başka voltaj seviyeleri üretemezler. O halde 0V ile 5V arasında başka bir voltaj elde etmenin alternatifi nedir? **PWM** bunun cevabıdır. Darbelerin genişliklerini (duty cycle- görev oranı) ve frekanslarını değiştirerek, ara voltaj seviyelerini kolayca taklit edebiliriz. Saniyede yaklaşık 100 döngüde %50 genişliğe sahip bir pwm sinyali örneğini ele aldığımızda 2.5V çıkış elde etmiş oluruz.

Özetle:

PWM, bir dijital sinyal üzerinde belirli aralıklarla darbe üretme yöntemidir. Darbelerin süresi (darbe genişliği- Görev Oranı) değiştirilerek ortalama voltaj veya akım kontrol edilir. Darbenin süresi geniş olduğunda, ortalama voltaj veya akım yüksek olur; darbe süresi dar olduğunda ise ortalama voltaj veya akım düşük olur.

PWM elektrik ve elektronikte birçok alanda, farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Telekomünikasyon, güç, voltaj düzenleyiciler, DC ve servo motor kontrolü, ses üreticileri veya yükselteçler gibi çeşitli uygulama alanları ve farklı uygulamaları bulunmaktadır.

Amaç:

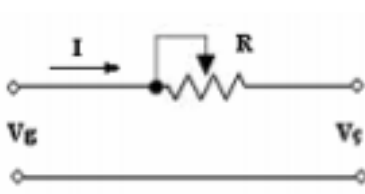
- Modülasyon işlemi gerçekleştiren bu tekniğin asıl amacı cihazlara verilen elektriğin gücünü kontrol altında tutmaktır.
- Bir yüke gönderilen gerilimin (voltajın) hızlı, verimli ve kolay yönetilebilir bir şekilde kontrolüdür.



Geleneksel gerilim ayarlama yöntemleri:

Seri direnç ile gerilim ayarlama

Bu yöntem kullanılmadan önce, gerilim değiştirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktaydı. Bu yöntemlere örnek olarak **seri direnç**, **oto transformatörü** ve **potansiyometre** verilebilir. Çıkış ile giriş arasına bağlanan seri bir direnç yardımıyla, elde edilecek gerilimin değiştirilmesi mümkündür. Şekil 1' deki devrede V_C gerilimi;



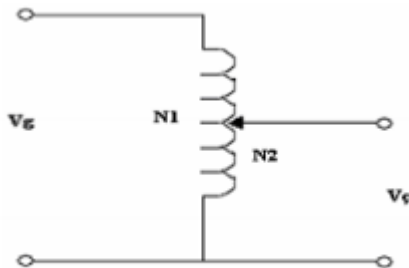
$$V_C = V_g - I \cdot R$$

Şekil 1: Seri ayarlı direnç ile gerilim ayarı

Bu eşitlikte görüldüğü gibi, gerilimin bir kısmı direnç üzerinde düşürülür. Verimi düşüren bir yöntem olduğu için kullanışlı bir yöntem değildir. Çünkü sistemin çektiği akım bu direnç üzerinden geçtiğinden, akım ve direnç değeriyle doğru orantılı bir kayıp oluşur.

Oto transformatör ile gerilim ayarlama

Diğer bir yöntem ise; şebekeye bağlanan değişken çıkışlı oto transformatörleridir. Elektrikğin değişken olduğu yerlerde, servo motorlar tarafından ayarlanarak kullanılan bu cihazlar, çıkışta elde edilen gerilimin sabitlenmesi veya farklı gerilim elde edebilmek için kullanılırlar. Şekil 2' de verilen V_C gerilimi;



$$V_C = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_g$$

şeklinde hesaplanır.

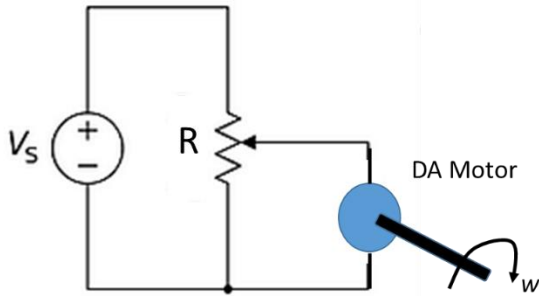
Şekil 2. Oto transformatörü ile gerilim değişimi

Bu eşitlikte görüldüğü gibi; N_2 değeri değişken ve ayarlanabilir. Bu sayede, çıkış gerilimi de ayarlanabilir. **Bu yöntem, %85–95 arasında verimle çalışır. Bu yöntemin tek dezavantajı, ağır ve yavaş**

olmasıdır. Bu nedenle, araştırmalar daha hızlı ve hafif çalışmayı sağlayacak yüksek verimli yeni yöntemlere yönelmiştir.

Potansiyometre ile gerilim ayarlama

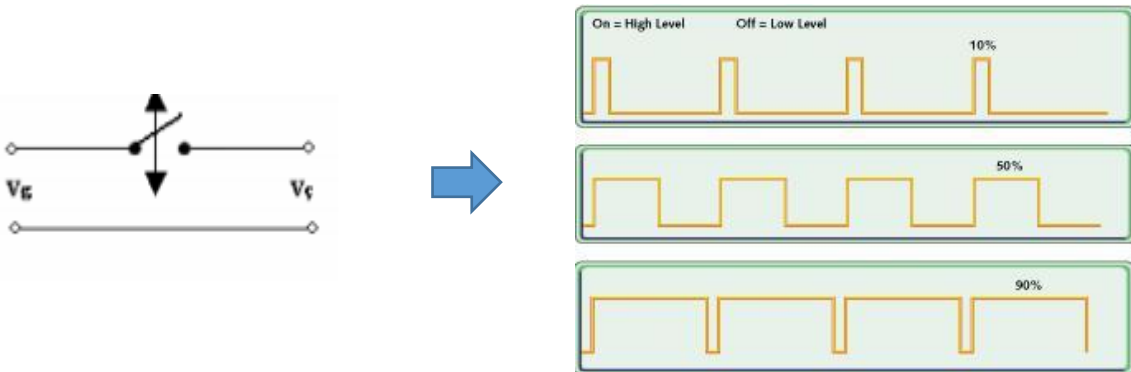
Potansiyometreler veya ayarlanabilir dirençler, gerilim bölücü devrelerde kullanılarak belirli bir gerilimi ayarlamamıza izin verir. Üç uçlu devre elemanlarıdır ve hassas kontrole izin verirler. Genelde düşük güç tüketimi yapan (düşük güçlü motorlar, ses, radyo iletimi vs.) sistemlerde kullanılırlar. Bu yöntem, ayarlanabilir güç kaynakları ve sinyal işleme devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Şekil 2.1'de bir örneğinin devre şeması verilmiştir.



Şekil 2.1. Potansiyometre ile DA motor Besleme

Hızlı Anahtarlama ile gerilim ayarlama

Bu yöntem PWM tekniğinin başlangıç noktasıdır. Ağır mekanik tasarımların veya güç kaybının yerini alacak ve bu sorunları çözecek yöntemin, yüksek hızda çalışan elektronik anahtarlarla mümkün olduğu görülmüştür. **Şekil 3' de görüldüğü gibi devreye bağlanan bir anahtarla çıkıştan elde edilen gerilimin ortalama değeri değiştirilebilir.** Seri bağlı yarı iletken anahtarın, anahtarlama hızının yüksek ve iletimdeyken iç direncinin düşük olması istenir.



Şekil 3. PWM yönteminin anahtar yapısı



AKÜ TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



Anahtarlama için kullanılan donanımlar:

Hızın önemli olduğu yerde **MOSFET**, kayıpların az olması istenen yerde **transistör (BJT)** veya her ikisinin de avantajlarına sahip **IGBT** kullanılır. (Insulated Gate Bipolar Transistor - İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör - IGBT) temel olarak 3 bacaklı bir yarı iletken cihazdır. 4 katmandan (P-N-P-N) oluşur ve metal oksit yarı iletken (MOS) ile kontrol edilir. Yalıtılmış transistör de denir.)

Bilindiği gibi, doğru akım devrelerinde gerilim değeri olarak ortalama gerilim değeri ele alınır. Bu nedenle anahtarın kapalı kalma süresi ve/veya açık kalma süresi değiştirilerek, elde edilen gerilimin alacağı ortalama gerilim değeri değiştirilir. **Anahtarlama ne kadar hızlı yapılırsa, PWM ile aktarılan sinyalin ortalama gerilimi ve gücü o kadar da artar.** PWM yönteminde çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasındaki oran görev oranı (D) olan bir değer ile ifade edilir. Görev oranı değeri; (Duty Cycle)

$$D = \frac{V_c}{V_g} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Bağıntısı ile elde edilir. Anahtarın iletimde kalma süresinin iletimde ve kesimde kalma süresine oranı olarak da ifade edilebilir.

Bir PWM sinyali, davranışını tanımlayan üç ana bileşenden oluşur: **bir görev oranı (duty cycle), Yükselme Süresi/İniş Süresi** ve **frekans**. Görev oranı, sinyalin yüksek (açık) durumda olduğu süreyi, bir döngüyü tamamlamak için gereken toplam sürenin yüzdesi olarak tanımlar. Frekans, PWM'nin bir devri ne kadar hızlı tamamladığını belirler (yani 1000 Hz, saniyede 1000 periyot gerçekleştiğini ifade eder). PWM sinyallerinin yükselme süresi ve iniş süresi, sinyalin yüksek seviyeden düşük seviyeye veya tam tersine geçiş sürelerini belirtir. Daha hızlı yükselme ve iniş süreleri, daha hızlı geçiş ve daha keskin kenarlar sağlar.

Örnek: 5V'ta yüksek (açık) veya 0V'da düşük (kapalı) olabilen bir dijital kaynak verilen 3V sinyali oluşturmak için, %60'lık bir duty cycle ile PWM'i kullanabilirsiniz. Dijital sinyal yeterince hızlı çevrilirse, çıkışta görülen voltaj ortalama voltaj olarak görünür. Eğer dijital düşük 0V ise o zaman ortalama gerilim, duty cycle tarafından çarpılan dijital yüksek voltaj veya $5V \times 0.6 = 3V$ alınarak hesaplanabilir. %80'lik bir görev çevriminin seçilmesi 4V, %20'si 1V vb.



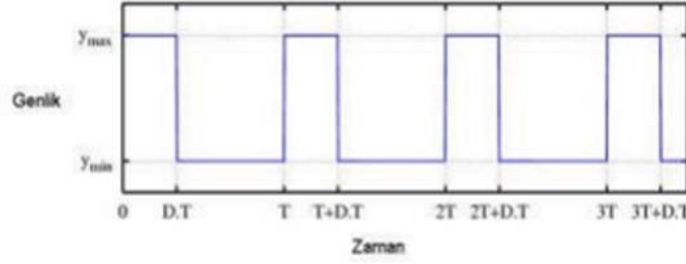
PWM Sinyalinin Matematiksel Eşdeğeri

Üretilen kare dalga darbe sinyallerinin genişliklerinin ortalaması, çıkışta üretilecek olan analog değer elde edilmesini sağlar. Şekil 1'de kare dalga gösterilmiştir. Bu şekil üzerinden açıklamak istersek;

Ortalama sinyal,

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1)$$

- $f(t)$: Kare Dalga'nın Frekansı (Hz)
 y_{min} : En düşük genliğin değeri
 y_{max} : En yüksek genliğin değeri
 D : Sinyal Oranı (Duty Cycle)



$f(t)$ kare dalga olduğundan $f(t)$, y_{max} için

$$0 < t < D \cdot T \quad (2)$$

ve y_{min} için

$$D \cdot T < t < T \quad (3)$$

değerlerini alabilir.

Buradan,

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \\ &= \frac{D \cdot T \cdot y_{max} + T(1-D)y_{min}}{T} \\ &= D \cdot y_{max} + (1 - D) y_{min} \end{aligned} \quad (4)$$

elde edilir.

Yukarıda verilen formül genellikle $y_{min} = 0$ iken

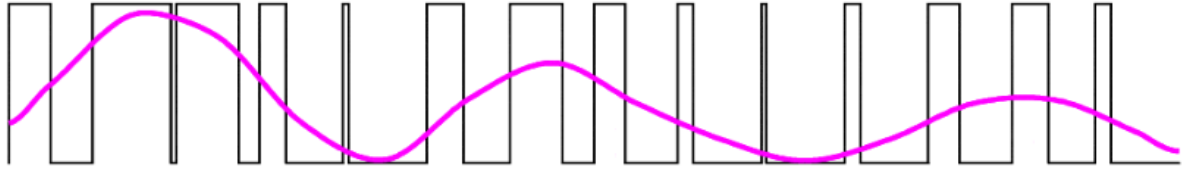


Yukarıda verilen formül genellikle $y_{\min} = 0$ iken

$$\bar{y} = D \cdot y_{\max} \quad (5)$$

olarak kullanılır. Görüldüğü gibi elde edilecek ortalama değer direk sinyal oranına (duty cycle) bağlıdır [2].

Bir analog sinyal ve eşdeğeri olan PWM sinyali



Şekil 5: Analog sinyal vs. PWM sinyali (<https://www.hbmacit.com/2020/01/07/arduino-dersleri-servo-kontrolu/>)

Sinyalin genliğini anahtarın on durumunun miktarını (duty cycle) değiştirerek dijital sinyalle simüle ediliyor. **Eğer sinyalin genliği yüksekse anahtarın on kaldığı süre de yüksek oluyor.**

PWM FREKANSLARI

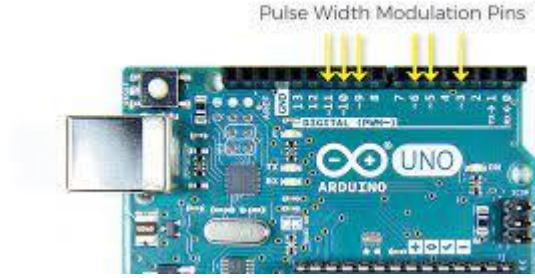
Çok çeşitli kontrol uygulamaları için PWM sinyalleri kullanılır. Başlıca kullanım nedenleri **DC motorları kontrol etmek** içindir, aynı zamanda **vanaları, servo motorları, pompaları, hidrolik sistemleri ve diğer mekanik parçaları** kontrol etmek için de kullanılabilir. PWM sinyalinin ayarlanması gereken frekans, uygulamaya ve enerji verilen sistemin **yanıt süresine** bağlı olacaktır. Yanıt süresi yavaş olan sistemlerde (mekanik kollar ve kaldıraçlar, hidrolik pistonlar, ısıtma sistemleri vs.) çok yüksek frekanslar kullanılmaması gerekir. Aşağıda birkaç uygulama ve bazı tipik minimum PWM frekansları verilmiştir:

- Yavaş tepki süreleri olan ısıtma elemanları veya sistemler: 10-100 Hz veya daha yüksek
- Aydınlatma kontrolü ve radyo vericileri, bazı DA motorlar: 1-10 kHz veya daha yüksek
- DA motorlar, güç kaynakları veya ses yükselticileri: 10-200 kHz veya daha yüksek

PWM frekansının seçimi, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine bağlıdır. Yüksek frekansta PWM, daha hassas kontrol sağlar, ancak işlemci yükünü artırabilir ve enerji kaynaklarını daha fazla tüketebilir. Düşük frekansta PWM, daha az işlemci kaynağı gerektirir, ancak daha düşük çözünürlüğe sahip olabilir.

MİKRODENETLEYİCİLERDE PWM:

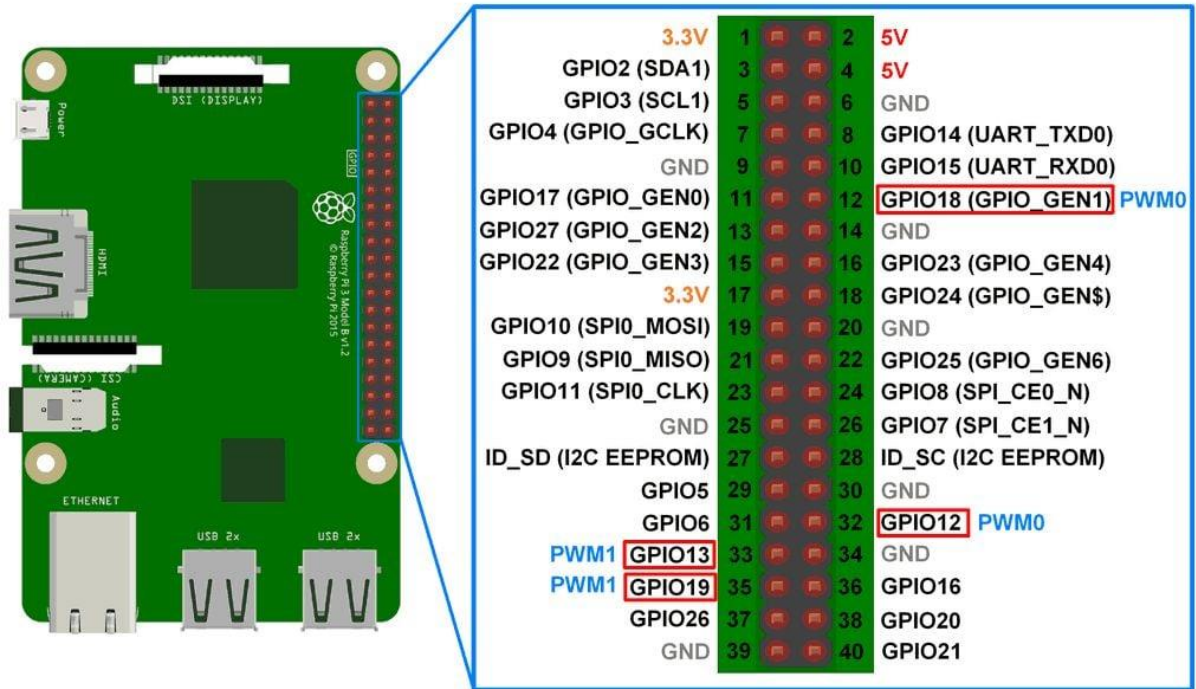
Arduino PWM Pinleri



BOARD	PWM PINS	PWM FREQUENCY
Uno, Nano, Mini	3, 5, 6, 9, 10, 11	490 Hz (pins 5 and 6: 980 Hz)
Mega	2 - 13, 44 - 46	490 Hz (pins 4 and 13: 980 Hz)

Şekil 4. Arduino tiplerine göre pwm pinleri ve frekansları

Raspberry Pi PWM Pinleri



Raspberry Pi'larda PWM0 ve PWM1 pinleri arasında iki temel fark vardır:



AKÜ TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



- PWM frekansı: PWM0 pinleri, PWM1 pinlerine göre daha yüksek PWM frekansı sağlar. PWM0 pinleri, 1 MHz'e kadar PWM frekansı sağlarken, PWM1 pinleri 500 kHz'e kadar PWM frekansı sağlar.
- PWM çözünürlüğü: PWM1 pinleri, PWM0 pinlerine göre daha yüksek PWM çözünürlüğü sağlar. PWM1 pinleri, 12 bit PWM çözünürlüğü sağlarken, PWM0 pinleri 8 bit PWM çözünürlüğü sağlar.

Özellik	PWM0	PWM1
PWM frekansı	1 MHz'e kadar	500 kHz'e kadar
PWM çözünürlüğü	8 bit	12 bit
Uygulamalar	Yüksek hız, düşük gürültü	Yüksek hassasiyet

PWM frekansı, PWM çıkışının ne kadar hızlı açılıp kapanacağını belirler. Daha yüksek PWM frekansı, daha yumuşak ve daha az gürültülü bir PWM çıkışı sağlar. PWM çözünürlüğü, PWM çıkışının ne kadar hassas olacağını belirler. Daha yüksek PWM çözünürlüğü, daha hassas bir PWM çıkışı sağlar.

Genel olarak, PWM0 pinleri, yüksek hız ve düşük gürültü gerektiren uygulamalar için daha iyidir. PWM1 pinleri, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalar için daha iyidir.

PWM SİNYALİNİN ÜRETİLMESİ

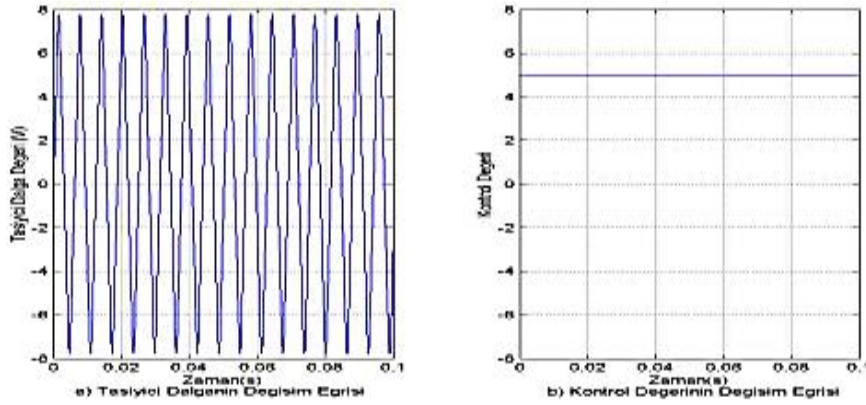
PWM yöntemi ile çok geniş aralıkta gerilim kontrolü sağlanabilir. Bu işlem, bir yarı iletken anahtar ve anahtarlama süresini değiştiren birkaç elektronik devre elemanı ile gerçekleştirilir. Bu, uygulamacılara oldukça hafif ve hızlı bir tasarım olanağı verir. PWM sinyali, çok çeşitli şekillerde elde edilebilir. Aşağıdaki örnekte iki gerilim karşılaştırılarak, PWM dalga şekilleri oluşturulmaktadır. Bu iki gerilimden biri, kontrol işlemini sağlayan kontrol sinyali (VC) diğeri ise, darbe üreten taşıyıcı sinyal olan testere dişi veya üçgen dalga sinyalidir (VT). **Taşıyıcı sinyalin genliği ve frekansı sabit tutulur. Kontrol geriliminin genliği değiştirilerek görev oranı ayarlanır.** Anahtarların açık ve kapalı olma sürelerinin ölçümü zordur. Bu yüzden görev oranı (Duty Cycle), değişken ve ölçülebilen kontrol sinyalinin, taşıyıcı sinyalin en yüksek değerine oranı olan;

$$D = \frac{V_C}{V_{T \max}} \quad (3.18)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.

Bu karşılaştırma işlemi yapıldıktan sonra oluşan darbe yapısı *Şekil 6'da* görülmektedir. Kontrol sinyalinin değeri (V_C), taşıyıcı sinyalin en yüksek ve en düşük değeri arasında değiştirilir.

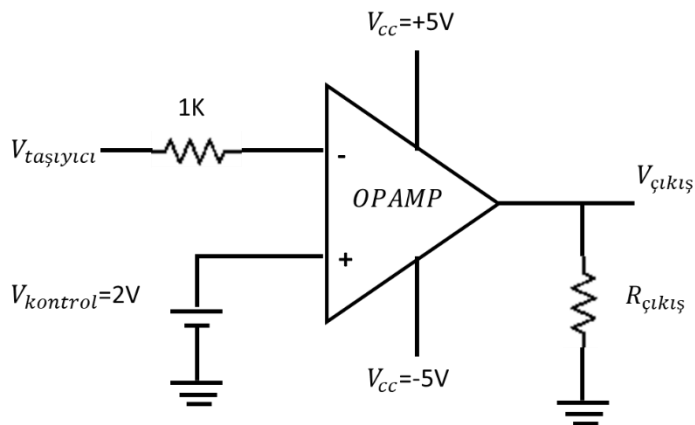
$$V_{T \min} \leq V_C \leq V_{T \max} \quad (3.19)$$



Şekil 6. Taşıyıcı sinyal ile kontrol sinyalinin değişimi

Karşılaştırma Devreleri ile PWM Sinyali Üretilmesi:

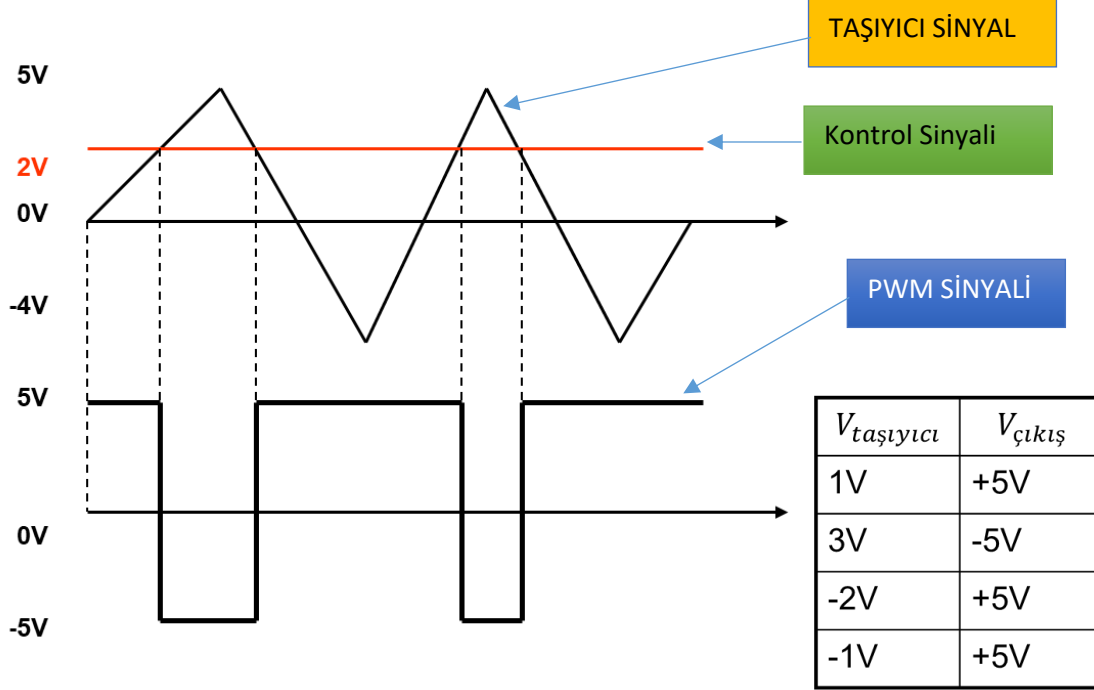
Burada da kontrol sinyali ve taşıyıcı sinyal mantığı bulunmaktadır. Karşılaştırma devrelerinde Opamp (Operational Amplificator) devre elemanları kullanılmaktadır. Şekil 8'de bir örneği verilmiştir.



Şekil 8. Opamp ile karşılaştırma devresi



Taşıyıcı ve kontrol girişlerine Şekil 9'daki gibi bir sinyal uygulanırsa;



Şekil 9. Karşılaştırma grafiği (<https://www.edutecnica.it/elettronica/aonl/aonl.htm>) (Yrd.Doç. Dr.Alper Doğanalp)

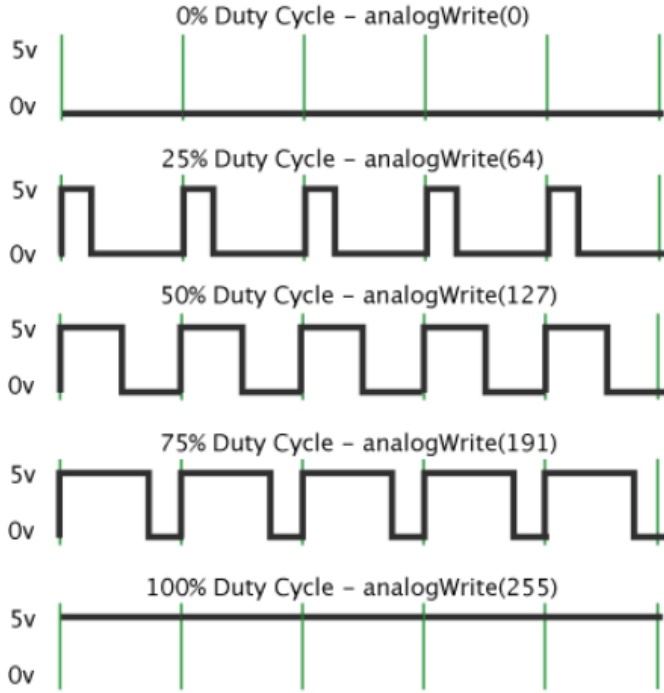
PWM sinyali elde edilecektir. Bu Sinyalin giriş-çıkış tablosu da yukarıdaki gibi oluşacaktır.

Matlab-Arduino ikilisini kullanarak PWM Sinyali ile DA Motor sürülmesi:

```
clear;clc;close all;  
a = arduino('COM10', 'Mega2560', 'Libraries', 'rotaryEncoder');  
encoder = rotaryEncoder(a, 'D2', 'D3', 192);  
  
writeDigitalPin(a, 'D6', 1);  
writeDigitalPin(a, 'D7', 0);  
duty=0;  
for i=1:100  
    rpm(i)=readSpeed(encoder);  
    writePWMDutyCycle(a, 'D4', duty);  
    duty=duty+0.01;  
    fprintf('Sayaç=%d Hız=%.2f Duty=%.2f\n', i, rpm(i), duty)  
    pause(0.4)  
end  
writeDigitalPin(a, 'D6', 0);  
writeDigitalPin(a, 'D7', 0);
```



Sadece Arduino kullanılarak Şekil 10'da görüldüğü gibi özel pinlerinden kodlar yardımıyla bir kısım yazılımlar ile PWM üretilebilir.



Şekil 10: Arduino ile PWM sinyali elde edilmesi (<https://sigma.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1636020409-en.pdf>)

PWM Tekniğinin Avantajları/Dezavantajları

Öncelikle anahtarlama kaybı düşük seviyededir. Anahtar kapalı olduğunda pratik olarak hiç akım akıyor iken, anahtar açık olduğunda anahtar üzerindeki gerilim düşümü yok denecek kadar azdır. Bu sayede **güç kaybının az**, verimin yüksek olmasının yanı sıra, **PWM tekniği dijital kontrol üniteleri** ile büyük bir uyum içerisinde. Sistem, açık-kapalı anahtarlama değişimlerine bu sayede çok daha rahat uyum sağlayabilmektedir. Bunun yanında, ayarlı transformatörlere nazaran daha hafif ve **daha az yer kaplaması** gibi avantajlara da sahiptir.

PWM yönteminin bilinen en önemli **dezavantajları**;

- Kablolar üzerinde emk (elektro motor kuvvet) nedeniyle harmoniklere neden olmasıdır. Bu harmonikler, kablo üzerinde yüksek frekanslı dalgalanmalar oluşmasına neden olur. Çıktıdaki gerilim ve akımda da buna bağlı yüksek frekanslı gürültü oluşur. **(Filtre tasarımı)**
- Sürücü 100 Hz frekansın altında çalıştırılırsa büyük çaptaki motorda görünür düzeyde titremeler olabilir.
- Nispeten daha pahalıdır.
- PWM üretici kaynak ile hedef arasında mesafe uzun ise performans sorunları oluşabilir.

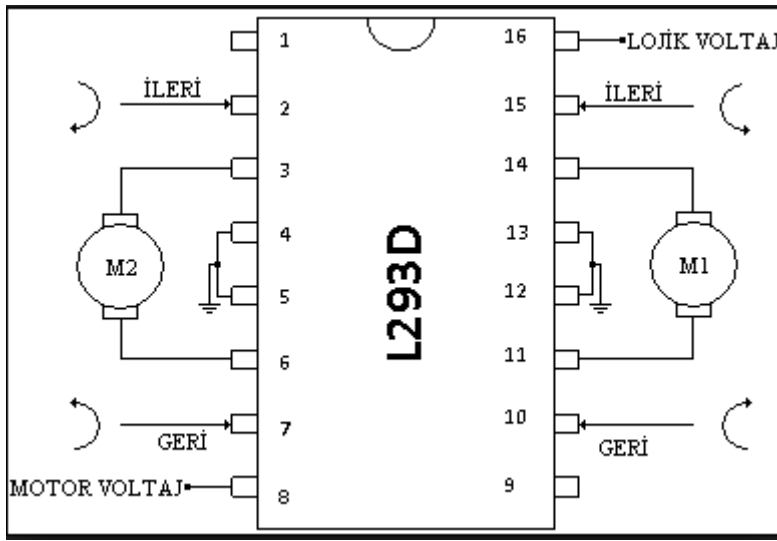


AKÜ TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



Günümüzde PWM'in en çok kullanıldığı yer, güç kaynaklarıdır. SMPS (Switched mode power supply) güç kaynakları çıkış voltajını bu teknikten yararlanarak elde etmektedirler. Bu sayede, yüksek akım ve düşük voltajlı güç edinmeleri için, transformatörlerden çok daha etkin ve çok daha küçüklerdir. Bilgisayarların kasasındaki güç kaynağını düşündüğünüzde, 350 Wattlık çıkış gücüne sahip olan bir güç kaynağının nasıl bu kadar küçük ve etkin tasarlandığının cevabı SMPS olmasıdır.

<https://antrak.org.tr/genel/pwm-nedir/>



Bir DA Motor Sürücüsü