

TRANSİSTÖRLERİN DC ANALİZİ

Konular:

- 5.1 Transistörde DC çalışma noktası
- 5.2 Transistörde temel polarlama
- 5.3 Beyz polarlama
- 5.4 Gerilim bölücülü polarlama devresi
- 5.5 Geribeslemeli polarlama devresi
- 5.6 Onarım

Amaçlar:

- Yükselteç tasarımında dc çalışma noktasının önemi
- Yükselteçlerde dc polarlama ve analizi
- Yükselteçlerde kararlı çalışma için çeşitli polarlama yöntemleri

Bu bölümde transistörün yükselteç olarak nasıl çalıştırılacağını öğreneceksiniz. Yükselteç tasarımında dc polarlama akım ve gerilimlerinin analizini yapacak ve kararlı bir çalışma için yöntemler geliştireceksiniz.

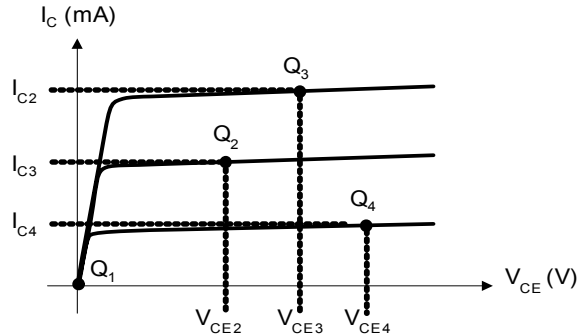
5.1 DC ÇALIŞMA NOKTASI

Bir transistör yükselteç (amplifikatör) olarak çalışabilmesi için dc polarma gereksinim duyar. Doğrusal ve verimli bir çalışma için transistörlü yükselteç devresinde polarma akım ve gerilimleri iyi seçilmeli veya hesaplanmalıdır. Bu durum bir önceki bölümde belirtilmişti.

Bu bölümde; yükselteçlerde düzgün ve verimli bir çalışma için gerekli analizler yapılacaktır. Bu analizlerde dc yük hattı ve çalışma noktası (O) gibi kavramların önemini ve özelliklerini kavrayacağız.

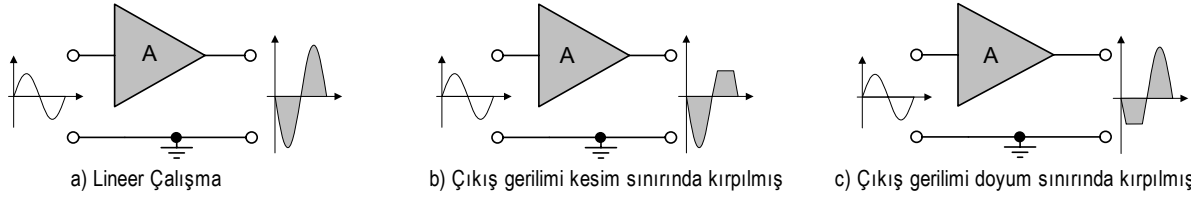
DC Polarma ve Çalışma Noktası

Transistörlü yükselteç; girişinden uygulanan işaretleri yükselterek çıkışına aktarmak üzere tasarlanmış bir devredir. Transistör, yükselteç olarak çalışabilmesi için dc polarma gerilimlerine gereksinim duyar. Transistöre uygulanan polarma gerilimleri çıkış karakteristiği üzerinde transistörün çalışma noktasını belirler. Transistörün sahip olduğu polarma akım ve gerilim değerini gösteren bu nokta “**çalışma noktası**” ya da “**Q noktası**” olarak adlandırılır. Şekil-5.1’de bir transistörün çıkış karakteristiği üzerinde çeşitli çalışma noktası örnekleri verilmiştir. Örneğin dc polarma gerilimleri uygulanmasa idi transistörün çalışma noktası Q_1 olurdu. Bu durumda transistör tümüyle kapalı olur ve girişinden uygulanan işaretleri yükseltmez idi.



Şekil-5.1 Transistör için çeşitli çalışma noktası örnekleri

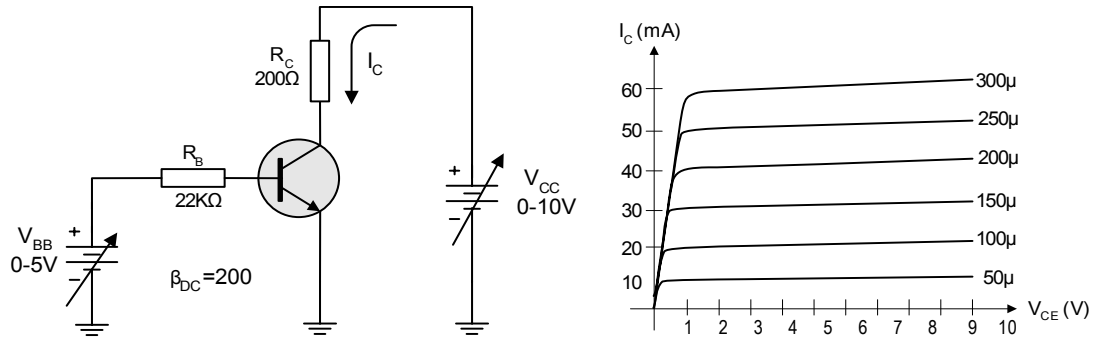
Transistöre polarma gerilimleri uygulandığında ise çalışma noktaları şekil üzerinde belirtilen Q_2 , Q_3 ve Q_4 noktalardan birinde olabilir. Bu çalışma noktalarında transistör doğal olarak yükselteç olarak çalışacaktır. Dolayısıyla girişinden uygulanan işareti yükselterek çıkışına aktaracaktır. Transistör çıkışından alınan işaret de nispeten bozulma olmayacaktır. Bu durum şekil-5.2 üzerinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Örneğin şekil-5.2.a’da transistörün çalışma noktası uygun seçilmiş ve lineer bir yükseltme sağlanmıştır. Ancak çalışma noktasının uygun seçilmemesi durumunda ise çıkış işaretinde kırılmalar oluşmaktadır. Bu durum şekil-5.2.b ve c üzerinde gösterilmiştir.



Şekil-5.2 Bir yükselteç devresinin lineer ve nonlineer çalışmasına örnekler

DC Yük Hattı

Transistörlü yükselteç devrelerinde çalışma noktasının ve dc yük hattının önemini göstermek amacı ile şekil-5.3.a'da görülen devreden yararlanılacaktır. Bu devrede transistörün polarma akım ve gerilimleri, V_{BB} ve V_{CC} kaynakları ile ayarlanabilmektedir. Devredeki transistör için kollektör karakteristik eğrileri ise şekil-5.3.b'de verilmiştir.



Şekil-5.3 Ayarlanabilen kaynaklarla dc polarma ve transistörün karakteristik eğrisi

DC polarmanın etkisini ve önemini anlamak amacı ile şekil-5.3'deki devrede I_B akımını farklı değerlere ayarlayalım. Ayarladığımız her bir I_B akımı değerine karşılık transistörün I_C ve V_{CE} değerlerinin nasıl değiştiğini inceleyelim.

İlk olarak V_{BB} kaynağını ayarlayarak I_B değerini $100\mu A$ yapalım. Bu durumda transistörün kollektör akım I_C ;

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \cdot 100\mu A = 20mA$$

olacaktır. Bu kollektör akımına karşılık transistörde oluşan kollektör-emiter gerilim düşümü V_{CE} ;

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 10V - (20mA \cdot 200\Omega) = 6V$$

olacaktır. Bulunan bu değerlere karşılık gelen transistörün çalışma noktası şekil-5.4.a da transistör karakteristiğinde gösterildiği gibi Q_1 olacaktır.

Transistörün beyz akımının $I_B=150\mu A$ yapılması durumunda ise kollektör akımı;

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \cdot 150\mu A = 30mA$$

olacaktır. Bu kollektör akımına karşılık transistörde oluşan kollektör-emiter gerilim düşümü V_{CE} ;

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 10V - (30mA \cdot 200\Omega) = 4V$$

olacaktır. Bulunan bu değerlere karşılık gelen transistörün çalışma noktası şekil-5.4.b de transistör karakteristiğinde gösterildiği gibi Q_2 olacaktır.

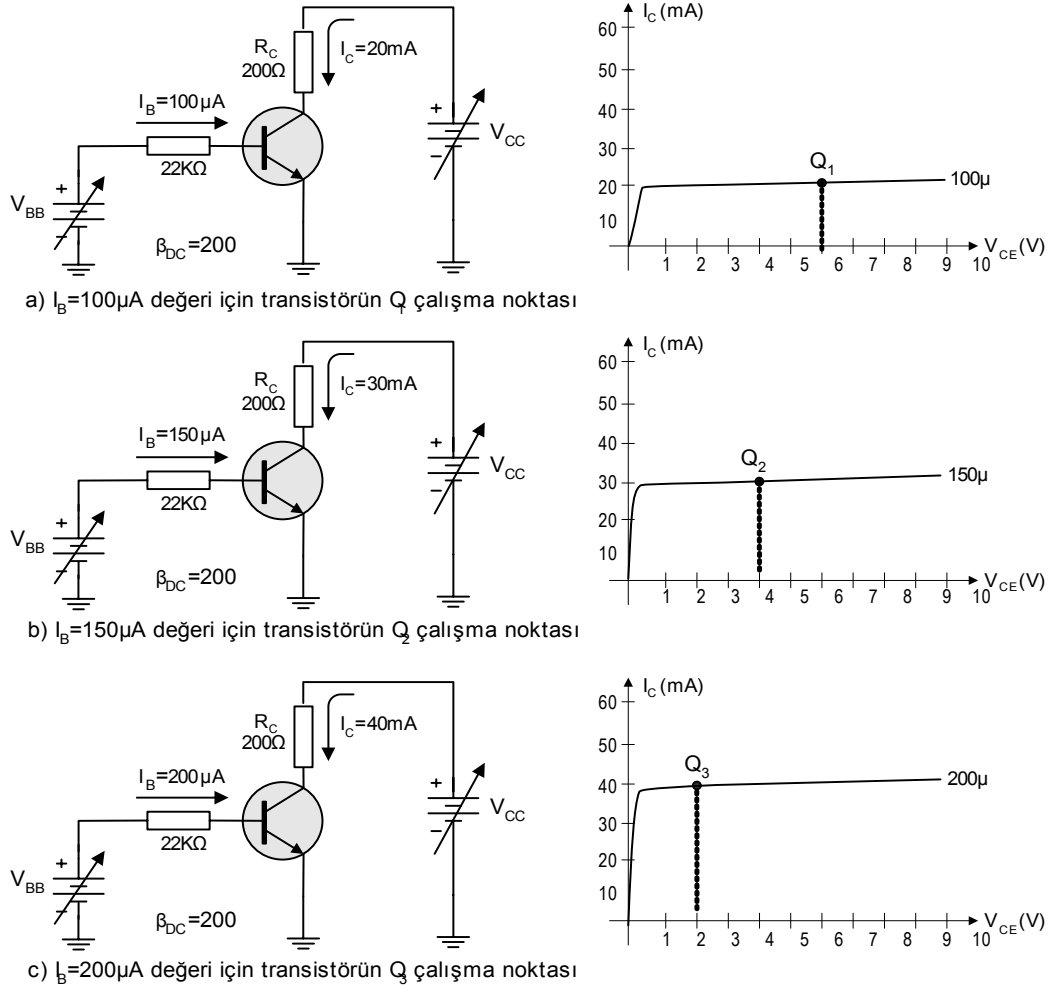
Son olarak I_B akımını $200\mu A$ yapalım bu durumda transistörün çalışma noktasını bulalım.

$$I_C = \beta \cdot I_B = 200 \cdot 200\mu A = 40mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 10V - (40mA \cdot 200\Omega) = 2V$$

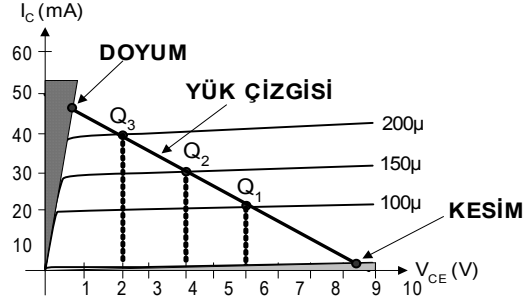
olacaktır. Bulunan bu değerlere karşılık gelen transistörün çalışma noktası şekil-5.4.c de transistör karakteristiğinde gösterildiği gibi Q_3 olacaktır.

Her I_B akımı değerine bağlı olarak transistörün çalışma bölgesindeki değişimler şekil-5.4 üzerinde toplu olarak verilmiştir.



Şekil-5.4 Çeşitli I_B akımı değerlerinde transistörün çalışma noktasının değişimi

Şekil-5.4 dikkatlice incelenirse transistörün beyz akımındaki değişim, kollektör akımını değiştirmekte dolayısıyla transistörün kollektör-emiter (V_{CE}) gerilimi de değişmektedir. Örneğin I_B akımındaki artma, I_C akımını artırmaktadır. Buna bağlı olarak V_{CE} gerilimi azaltmaktadır. Bu durumda V_{BB} geriliminin ayarlanması ile I_B değeri ayarlanmaktadır. I_B 'nin ayarlanması ise transistörün DC çalışma noktasını düzgün bir hat üzerinde hareket ettirmektedir. Şekil-5.4'de transistör karakteristiği üzerinde gösterilen ve Q_1 , Q_2 ve Q_3 ile belirtilen çalışma noktalarının birleştirilmesi ile bir doğru elde edilir. Bu doğru "**dc yük hattı**" olarak adlandırılır. Şekil-5.5'de dc yük hattı karakteristik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil-5.5 Transistör karakteristiği üzerinde dc yük hattının gösterilişi

DC yük hattı x eksenini 10V'da kesmektedir. Bu değer $V_{CE}=V_{CC}$ noktasıdır. Bu noktada transistör kesimdedir çünkü kollektör ve beyz akımları idealde sıfırdır. Gerçekte beyz ve kollektör akımları bu noktada tam sıfır değildir. Çok küçük bir sızıntı akım vardır. Bu nedenle bu kesim noktası gerçekte 10V'dan biraz daha küçüktür. Yine bu örnekte dc yük hattının I_C eksenini kestiği değer idealde 50mA'dır. Bu değer ise transistör için doyum noktasıdır. Transistörün doyum noktasında kollektör akımı maksimumdur. Çünkü bu noktada $V_{CE}=0$ 'dır. Kollektör akımı;

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

değerinde olacaktır ve maksimumdur.

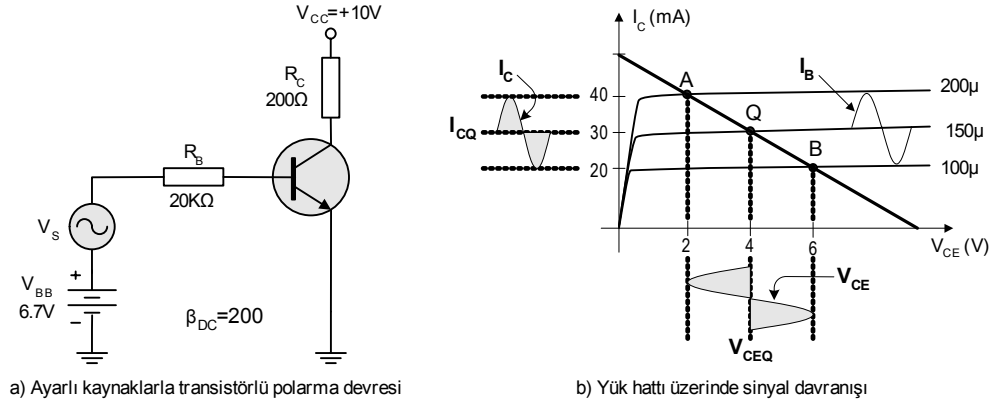
Lineer Çalışma

Transistörün başlıca 3 çalışma bölgesi olduğu belirtilmişti. Bunlar; kesim, doyum ve aktif bölgelerdir. Transistör aktif bölgede çalışırken bütün çalışma noktaları kesim ve doyum bölgeleri arasındadır. Transistör eğer aktif bölgede çalışıyorsa girişine uygulanan işareti (sinyali) lineer olarak yükseltir. Lineer yükseltme işlemini incelemek amacıyla şekil-5.6.a' da verilen devreden yararlanılacaktır.

Başlangıçta devre girişine V_s işaretinin uygulanmadığını düşünelim. Devrede beyz akımının $I_B=150\mu A$ ve kollektör akımının ise 30mA olduğunu kabul edelim. Bu durumda transistörün çalışma noktası $V_{CE}=4V$ olacaktır. Bu nokta şekil-5.6.b'de transistör karakteristiği üzerinde gösterilen Q çalışma noktasıdır.

Devre girişine V_s kaynağından tepe değeri $50\mu A$ olan bir sinüs işareti uygulandığını varsayalım. Önce V_s işaretinin pozitif saykılı geldiğini kabul edelim. Bu işaret; V_{BB} kaynağı ile aynı yönde etki edecek ve beyz akımının yükselmesine neden olacaktır. Giriş işareti V_s , pozitif tepe değerine ulaştığında beyz akımında maksimum oranda yükselecektir. Bu anda $I_B=150+50=200\mu A$ olacaktır. Bu değer şekil-5.6.b'de karakteristikte "A" noktası olarak işaretlenmiştir. Buna karşılık kollektör akımı 40mA değerine yükselecek, kollektör-emiter gerilimi ise 2V değerine düşecektir. Bu aşamadaki çalışmaya dikkat edilirse transistörün çalışma noktası A noktasına kaymıştır. Burada giriş işaretinde toplam $50\mu A$ 'lık bir değişim vardır. Çıkış kollektör akımında ise 10mA'lık bir değişim söz konusudur. Dolayısıyla giriş işaretinin pozitif saykılı 200 kat yükseltilmiştir.

Giriş işaretinin negatif saykılında ise; bu işaret beyz akımını dolayısıyla kollektör akımını azaltacaktır. Transistör şekil-5.6.b’de karakteristik üzerinde gösterilen ve “B” olarak adlandırılan çalışma noktasına kayacaktır. Bu çalışma noktasında; $I_B=100\mu A$, $I_C=20mA$ ve $V_{CE}=6V$ değerine ulaşacaktır. Aynı şekilde dikkat edilirse giriş işaretinin 200 kat yükseltildiği görülecektir.

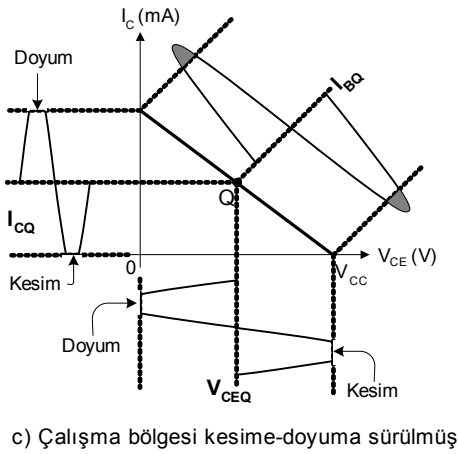
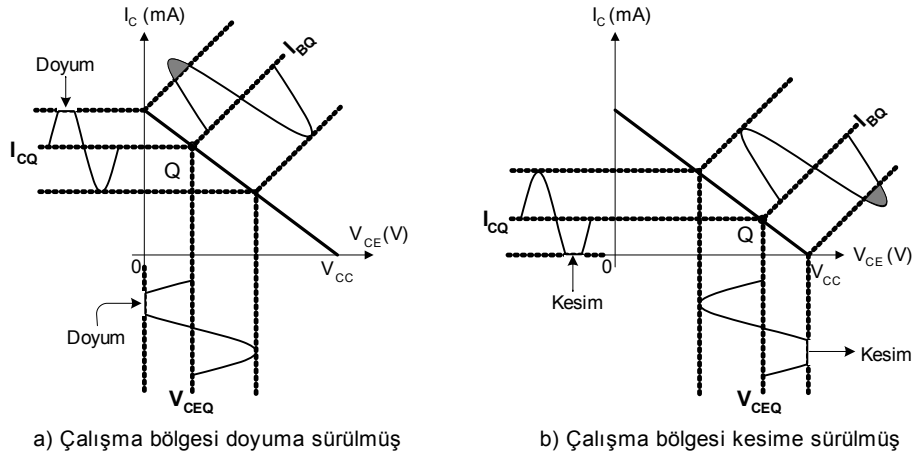


Şekil-5.6 Transistörlü yükselteç devresi ve yük hattı üzerinde sinyal davranışları

Buraya kadar anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi, devre girişinde ac giriş işareti yokken, transistör Q çalışma noktasında (sükunet noktası) kalmaktadır. Girişe bir sinyal gelmesi durumunda ise çalışma noktası bu sinyalin yönüne bağlı olarak aşağıya veya yukarıya kaymaktadır. Giriş işareti yükseltme işlemi Q noktasının etrafında salınmaktadır. Transistörün kesim veya doyum noktalarına ulaşmamaktadır. Çıkışta elde edilen işaret, giriş işaretinin yükseltilmiş bir formudur. Çıkış işaretinin dalga biçiminde herhangi bir bozulma yoktur. Bundan dolayı bu işleyişe “Lineer Çalışma” denir.

Çıkışın Bozulması (Distorsiyon)

Transistörle gerçekleştirilen yükselteçlerde; çıkıştan elde edilen yükseltilmiş işaretin giriş işareti ile aynı dalga formunda olması istenir. Çıkış işaretinde her hangi bir bozulma olması istenmez. Çıkış işaretinde oluşan veya oluşabilecek bozulmaya ise “distorsiyon” adı verilir. Yükselteç devrelerinde bir çok nedenden dolayı distorsiyon oluşabilir. Şekil-5.7’de transistör devresinde oluşabilecek distorsiyonlar çıkış karakteristikleri üzerinde gösterilmiştir.



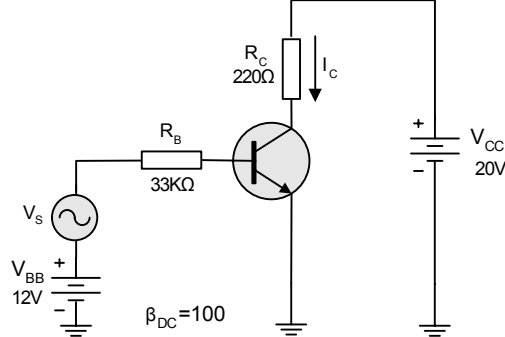
Şekil-5.7 Transistörlü yükselteç devresinde oluşan bozulmalar (distorsiyon)

Şekil-5.7’de verilen her 3 karakteristikte de distorsiyon vardır. Şekil-5.7.a’da transistörün çalışma bölgesi doyum bölgesine yakın ayarlanmıştır. Dolayısıyla çıkış işaretinin bir kısmında transistör doyum bölgesinde çalıştığı için çıkış işareti kırılmıştır. Şekil-5.7.b’de ise transistör kesim bölgesine yakın çalıştırılmış ve çıkış işaretinin bir kısmı kırılmıştır. Şekil-5.7.c’de ise transistör aktif bölgenin tam ortasında çalıştırılmıştır. Fakat giriş işaretinin aşırı yüksek olması transistör çalışma bölgesinin kesim ve doyuma kaymasına neden olmuştur. Bu durumda çıkış işaretinin her iki saykılında da kırpmalar oluşmuştur.

**Örnek:
5.1**

Şekilde verilen devrede transistör için dc yük hattını çizerek çalışma noktasını ve lineer çalışma için girişe uygulanabilecek işaretin maksimum genliğini belirleyiniz?

Cözüm



Önce transistörün Q çalışma noktasını bulalım. Q noktası I_C ve V_{CE} değerleriyle belirlendiğine göre I_C 'yi bulmak için önce I_B 'yi buluruz.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{33K\Omega} = 342.42\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = (100)(342.42\mu A) = 34.242mA$$

Buradan transistörün çalışma noktasındaki V_{CE} değerini buluruz. Kirşof'un gerilim yasasından;

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 20V - (7.533V) = 12.467V$$

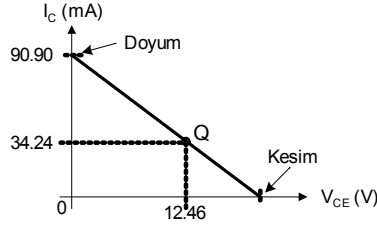
çalışma noktası değerleri olarak bulunur. $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ denklemi kullanılarak transistörün kesim anındaki V_{CE} ve $I_{C(KES)}$ değerleri belirlenir. Transistör kesim de iken kollektör akımı $I_C = 0$ 'dır. Dolayısıyla;

$$V_{CE} = V_{CC} = 20V$$

değerine eşit olur. Transistörün doyum noktasındaki değerlerini bulalım. Doyum anında $V_{CE} = 0V$ olacağına göre I_C akımı;

$$I_{C(DOY)} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{20}{220\Omega} = 90.90mA$$

Bulunan bu değerlere göre transistörün dc yük hattı aşağıda gösterildiği gibi olacaktır.

Cözüm


Bulunan bu değerler kullanılarak lineer çalışma için girişten uygulanacak V_s işaretinin maksimum genliği belirlenebilir. Bu amaçla önce Q noktasının yeri yorumlanmalıdır. Çünkü Q noktası hangi sınıra (kesim/doyum) yakınsa kırpılma önce o bölgede gerçekleşecektir. Dolayısıyla aranan değerde yakın olduğu bölgenin değeri ile Q noktası arasındaki mesafeden hareketle belirlenecektir.

Q noktasının kesim sınırı ile arasındaki mesafe 34.24mA, doyum sınırı ile arasındaki mesafe ise $(90.90-34.24)=55.76\text{mA}$ 'dır. Buradan görülmektedir ki Q çalışma noktası kesim bölgesine daha yakındır. Dolayısıyla lineer çalışma için giriş sinyali; çıkışta maksimum 34.24mA'lık kollektör akımı sağlayacak şekilde olmalıdır. O halde lineer bir çalışma için kollektör akımının genliği;

$$I_{CP} = 34.24\text{mA}$$

olmalıdır. Transistör için DC akım kazancı değeri (β_{DC}) bilindiğine göre giriş beyz akımının maksimum değeri;

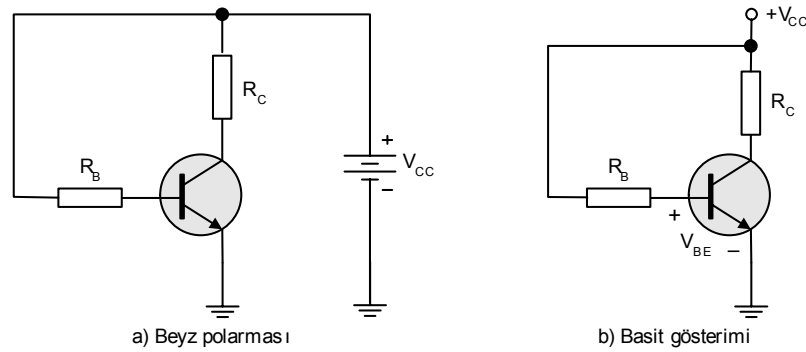
$$I_B = \frac{I_{CMax}}{\beta} = \frac{34.24}{100} = 342.42\mu A$$

olmalıdır.

5.2 BEYZ POLARMASI

Bipolar transistörün yükselteç olarak çalışabilmesi için dc polarma gerilimlerine gereksinim duyduğu belirtilmişti. Önceki birkaç bölümde transistörün gereksinim duyduğu polarma kaynakları ve çalışma karakteristikleri verilmisti. Tüm çalışmalarda transistörün çalışma bölgesinin ayarlanması için iki ayrı dc gerilim kaynağı kullanıldı. Bu; pratik bir çözüm değildir. Tek bir dc gerilim kaynağı kullanılarak yapılan birkaç polarma yöntemi vardır. Bu bölümde tek bir dc gerilim kaynağı kullanarak yapılan beyz polarması adı verilen yöntemi tüm boyutları ile inceleyeceğiz.

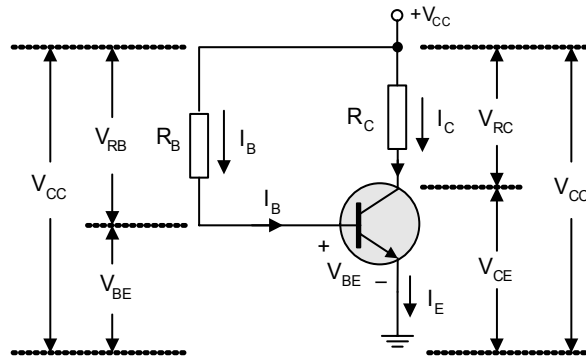
Önceki bölümlerde ele alınan polarma devrelerinde iki ayrı dc besleme gerilimi kullanılmıştı. Bu devrelerde transistörün beyz polarması V_{BB} ile tanımlanan ayrı bir güç kaynağından sağlanmıştı. Transistörlü yükselteçlerin dc polarma gerilimlerini sağlamada pratik bir çözüm tek besleme kaynağı kullanmaktır. Şekil-5.8.a'da tek bir dc gerilim kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş devre modeli verilmiştir. Bu tür polarma işlemine beyz polarması adı verilmektedir.



Şekil-5.8.a ve b Beyz polarması ve eşdeğer gösterimi

Devre dikkatlice incelenirse; transistörün beyz polarması için ayrı bir dc kaynak kullanılmamıştır. Transistörün beyz polarması R_B direnci kullanılarak V_{CC} gerilim kaynağından alınmıştır. Bu yöntem pratiktir ve avantaj sağlar.

Transistörlü polarma devrelerinde pratiklik kazanmak ve devre analizi bilgilerimizi gözden geçirelim. Bu amaçla devre üzerinde oluşan polarma akım ve gerilimlerinin olası eşitlikleri ve yönleri şekil-5.9 üzerinde yeniden verilmiştir.



Şekil-5.9 Beyz polarmasında polarma akım ve gerilimleri

Devrenin analizinde temel çevre denklemlerini kullanmak yeterlidir. Şekil-5.9'da gösterildiği gibi V_{CC} -beyz-emiter çevresinden;

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

yazılabilir. Denklemden beyz akımı çekilirse,

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

elde edilir. Beyz akımının bulunması ile devredeki diğer tüm polarma akım ve gerilimleri bulunabilir.

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta \cdot I_B) \cdot R_C$$

Bu devrede dc yük hattı sınırlarını bulmak için, doyum sınırında $V_{CE}=0V$ olduğu kabul edilerek (ideal durum),

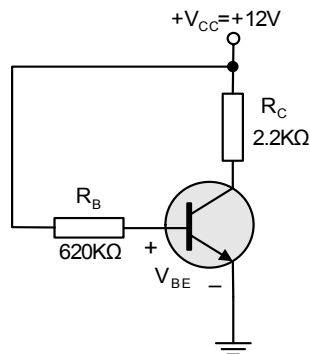
$$I_{C(DOYUM)} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

yük hattının diğer noktasını ise transistör kesimde iken $I_C=0$ kabul ederek,

$$V_{CE} = V_{CC}$$

olarak belirleriz.

Örnek: 5.2



Şekilde verilen devrede transistör için dc yük hattını çizerek çalışma noktasını belirleyiniz?

Cözüm:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0.7}{620K\Omega} = \frac{11.03}{620K\Omega} = 0.017mA = 17\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = (100) \cdot (17\mu A) = 1700\mu A = 1.7mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12V - (1.7mA \cdot 2.2K\Omega) = 8.26V$$

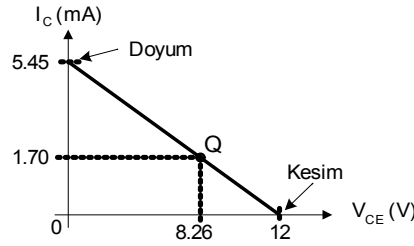
olarma akım ve gerilim değerleri olarak bulunur. Transistörün çalışma noktası gerilimi ise 8.26V'dur. Yük hattını çizmek için transistörün kesim ve doyum noktalarındaki değerleri bulalım. Kesim anında $I_C=0$ 'dır. Dolayısıyla kolektör-emiter gerilim düşümü V_{CE} ;

$$V_{CE} = V_{CC} = 12V$$

olarak belirlenir. Doyum gerilimi ise, doyum anında $V_{CE}=0V$ alınarak;

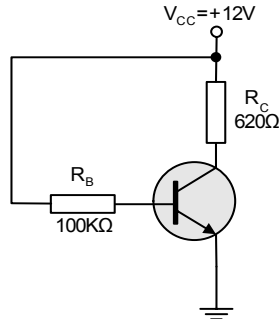
$$I_{C(DOYUM)} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12}{2.2K\Omega} = 5.45mA$$

olarak bulunur. Dc yük üzerinde çalışma noktası, aşağıda görüldüğü gibi kesim bölgesine yakın bir yerdedir.


Q Çalışma noktasına β_{DC} etkisi ve kararlılık

Transistörün akım kazancını β_{DC} değeri belirler. Bu değer her bir transistör için üretici tarafından verilir. Günümüz teknolojisinde üretimi yapılan aynı tip transistörlerin β_{DC} değerlerinde farklılık olabilir. Üreticiler genellikle ortalama bir değer verirler.

β_{DC} değerini etkileyen diğer önemli bir faktör ise ısıdır. Çalışma ortamı ısısına bağlı olarak bu değer değişir. Örneğin $25^{\circ}C$ 'de 100 olan β_{DC} , $75^{\circ}C$ 'de 150 olabilir. Bu durum transistörün kollektör akımını dolayısıyla kolektör-emiter gerilimini etkiler. Bu etkileşim sonucunda transistörün Q çalışma noktası ortam ısısına bağlı olarak değişecektir. Transistör çalışma noktasının β_{DC} değerine bağlı olarak kayması istenmeyen bir durumdur. Çünkü distorsiyona neden olur. Bu durumu basit bir örnekle açıklayalım.

**Örnek:
5.3**


Şekil-5.10

Şekil-5.10'da verilen beyz polarmalı devrenin çalışma ortamı ısısı 25°C ile 50°C arasında değişmektedir. Transistörün β_{DC} değeri $25^{\circ}\text{C}=100$, $50^{\circ}\text{C}=150$ olmaktadır. Bu koşullar altında transistörün Q çalışma bölgesinde davranışını (I_C , V_{CE}) analiz ediniz. Sıcaklıktaki değişimin devreye etkilerini belirleyiniz.

Cözüm

Önce 25°C ısı altında transistör devresinde V_{CE} ve I_C değerlerini bulalım. Devreden;

$$V_{CC} = V_{CE} + (I_C \cdot R_C)$$

$$V_{CC} = V_{CE} + [(\beta \cdot I_B) \cdot R_C]$$

veya yine devreden;

$$V_{CC} = V_{RB} + V_{BE}$$

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

eşitliklerini yazabiliriz. Bize I_C akımı gerekmektedir. Yukarıdaki eşitlikte I_B değerini I_C cinsinden ifade edelim.

$$V_{CC} = \frac{I_C}{\beta_{DC}} + V_{BE}$$

Bulunan bu eşitlikten I_C 'yi çekelim ve değerini hesaplayalım.

$$I_C = \beta_{DC} \left[\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right] = 100 \cdot \frac{12 - 0.7}{100\text{k}\Omega} = 100 \cdot \frac{11.03}{100\text{k}\Omega} = 11.3\text{mA}$$

Buradan transistörün Q çalışma noktası gerilimi V_{CE} değerini bulalım.

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 12\text{V} - (11.3\text{mA} \cdot 620\Omega) = 5\text{V}$$

Şimdi 50°C ısı altında transistör devresinde V_{CE} ve I_C değerlerini bulalım. Devreden;

$$I_C = \beta_{DC} \left[\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right] = 150 \cdot \frac{12 - 0.7}{100\text{k}\Omega} = 150 \cdot \frac{11.03}{100\text{k}\Omega} = 17\text{mA}$$

Buradan transistörün Q çalışma noktası gerilimi V_{CE} değerini bulalım.

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 12\text{V} - (17\text{mA} \cdot 620\Omega) = 1.46\text{V}$$

Dolayısıyla ısı değişim transistörün kolektör akımını ve çalışma noktası gerilimi V_{CE} değerini değiştirmektedir. I_C akımındaki değişimin yüzde miktarını bulalım.

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 12V - (17mA \cdot 620\Omega) = 1.46V$$

Dolayısıyla ısıl değişim transistörün kolektör akımını ve çalışma noktası gerilimi V_{CE} değerini değiştirmektedir. I_C akımındaki değişimin yüzde miktarını bulalım.

$$\% \Delta I_C = \frac{I_{C(75^\circ)} - I_{C(25^\circ)}}{I_{C(25^\circ)}} \cdot \%100 = \frac{17mA - 11.3mA}{11.3mA} \cdot \%100 \cong \%50 \text{ (Artma)}$$

Neticede sıcaklık artışıyla oluşan β_{DC} değerindeki değişim I_C akımında %50 oranında bir artışa neden olmaktadır. Aynı şekilde transistörün çalışma noktasında oluşan değişim oranını hesaplayalım.

$$\% \Delta V_{CE} = \frac{V_{CE(75^\circ)} - V_{CE(25^\circ)}}{V_{CE(25^\circ)}} \cdot \%100 = \frac{1.46V - 5V}{5V} \cdot \%100 \cong -\%70 \text{ (Azalma)}$$

görüldüğü gibi ısı değişimi transistörün çalışma bölgesini de kaydırmaktadır.

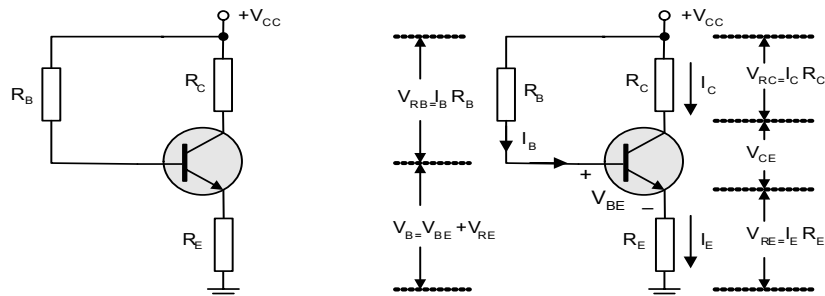
Yorum:

Isıl veya çeşitli etkenlerden dolayı β_{DC} değerinin değişmesi transistörün çalışma noktasını aşırı ölçüde etkilemektedir. Bu durum lineer çalışmayı etkiler ve kararlı bir çalışma oluşturulmasını engeller. Transistörün çalışma bölgesinin kayması istenmeyen bir durumdur. Transistörün çalışma bölgesinin kararlı olması ve kaymaması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin emiter dirençli beyz polarması β_{DC} değişimlerinden aşırı etkilenmez.

Emiter dirençli beyz polarması

Transistörlü polarma devrelerinde kararlı çalışmayı sağlamak amacıyla beyz polarmasının geliştirilmiş halidir. Beyz polarmasından daha avantajlıdır. Bu polarma tipinde de tek bir dc besleme kaynağı kullanılır.

Tipik bir emiter dirençli beyz polarma devresi şekil-5.11'de verilmiştir. Devre beyz polarma devresinden daha kararlı bir çalışma sağlamak için geliştirilmiştir. Devrenin emiterinde kullanılan R_E direnci transistörün daha kararlı çalışmasını sağlar.



Şekil-5.11 Emiter dirençli Beyz polarması ve polarma akım ve gerilimleri

Devreyi analiz etmek için beyz-emiter ve kolektör-emiter çevrelerini ayrı ayrı ele alalım. nin analizinde temel çevre denklemlerini kullanmak yeterlidir. Şekil-5.9'da gösterildiği gibi V_{CC} -beyz-emiter çevresinden;

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

denklemini elde edilir. I_E akımını I_B cinsinden ifade edelim.

$$I_E = I_C + I_B \Rightarrow I_E = (\beta \cdot I_B) + I_B \Rightarrow I_E = I_B(\beta + 1)$$

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + (\beta + 1)I_B \cdot R_E$$

Bu denklem beyz akımı (I_B) çekilirse;

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

değeri elde edilir. Artık beyz akımı kullanılarak kolektör ve emiter akımları belirlenebilir. Transistörün kolektör-emiter gerilimini (V_{CE}) bulmak için kolektör-emiter çevresinden yararlanalım.

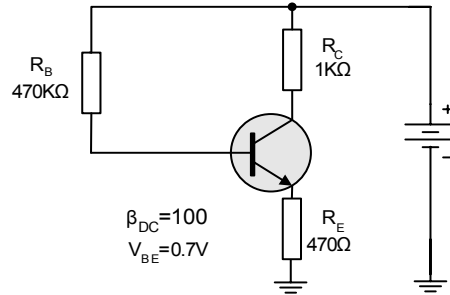
$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_E \cdot R_E$$

Buradan V_{CE} gerilimini çekelim.

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E$$

olarak bulunur.

Örnek: 5.4



a) Şekilde verilen devrede oda sıcaklığında çalıştırılmaktadır (25°C) transistörün polarma akım ve gerilim değerlerini bulunuz?

b) Aynı devrede transistörün β_{DC} değeri 75°C ısı altında 150 olsaydı polarma akım ve gerilimlerdeki değişimi hesaplayarak yorumlayınız.

Cözüm

a. 25°C oda sıcaklığında, $\beta_{DC}=100$ için gerekli analizleri yapalım. Beyz-emiter çevresinden beyz akımı (I_B);

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{12V - 0.7V}{470K\Omega + (101) \cdot 470\Omega} = \frac{11.3}{517470} = 0.021mA = 21\mu A$$

elde edilir. Buradan kolektör ve emiter akımları buluruz.

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0.021mA = 2.1mA$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \text{ veya } I_E = I_C + I_B = 2.1mA + 0.021mA = 2.12mA$$

değerleri elde edilir. Buradan transistörün kolektör-emiter gerilimi V_{CE} ;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E \Rightarrow V_{CE} = 12 - (2.1mA \cdot 1K\Omega) - (2.12mA \cdot 470\Omega)$$

$$V_{CE} = 8.9V$$

- b.** $75^\circ C$ oda sıcaklığında, $\beta_{DC}=150$ için gerekli analizleri yapalım. Beyz-emiter çevresinden beyz akımı (I_B);

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{12V - 0.7V}{470K\Omega + (151) \cdot 470\Omega} = \frac{11.3}{517470} = 0.020mA = 20\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 150 \cdot 0.020mA = 3mA$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \text{ veya } I_E = I_C + I_B = 3mA + 0.020mA = 3.02mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E \Rightarrow V_{CE} = 12 - (3mA \cdot 1K\Omega) - (3.02mA \cdot 470\Omega)$$

$$V_{CE} = 7.5V$$

Dolayısıyla ısı değişim transistörün kolektör akımını ve çalışma noktası gerilimi V_{CE} değerini değiştirmektedir. I_C akımındaki değişimin yüzde miktarını bulalım.

$$\% \Delta I_C = \frac{I_{C(75^\circ)} - I_{C(25^\circ)}}{I_{C(25^\circ)}} \cdot \%100 = \frac{3.02mA - 2.12mA}{2.12mA} \cdot \%100 \cong \%42 \text{ (Artma)}$$

$$\% \Delta V_{CE} = \frac{V_{CE(75^\circ)} - V_{CE(25^\circ)}}{V_{CE(25^\circ)}} \cdot \%100 = \frac{7.5V - 8.9V}{8.9V} \cdot \%100 \cong -\%15 \text{ (Azalma)}$$

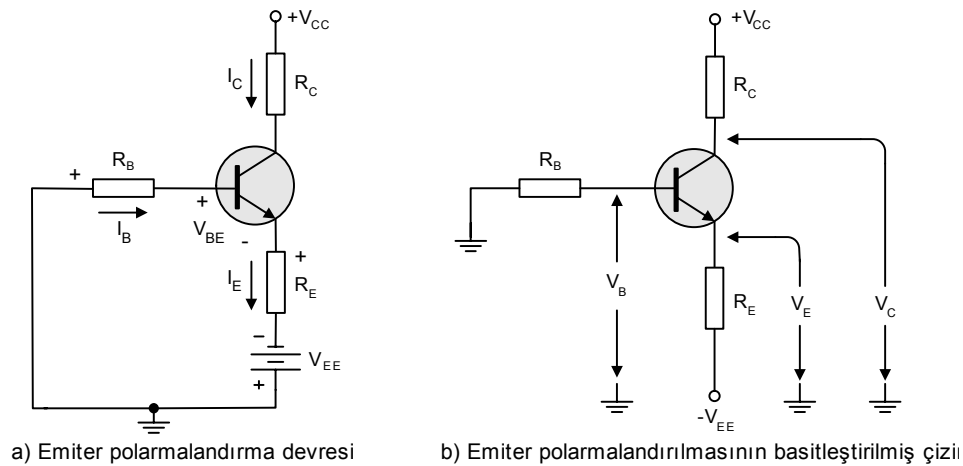
Yorum:

Örnek 5.3’de verilen polarma devresi β_{DC} değişiminden çok fazla etkilenmekte ve çalışma noktası %70 oranında kaymakta idi. Yukarıda verilen emiter dirençli polarma devresinde ise β_{DC} değişiminden etkilenme oranı (%15) çok azdır. Dolayısıyla emiter dirençli beyz polarma devresinin kararlılığı daha iyidir.

5.3 EMİTER POLARMASI

Emiter polarması transistörün kararlı çalıştırılması için geliştirilmiş bir diğer polarma metodudur. Bu polarma tipinde pozitif ve negatif olmak üzere iki ayrı besleme gerilimi kullanılır. Bu nedenle bu polarma tipi kimi kaynaklarda simetrik polarma olarak adlandırılmaktadır.

Tipik bir emiter polarma devresi şekil-5.12.a'da verilmiştir. Görüldüğü gibi devrede iki ayrı gerilim kaynağı kullanılmıştır. V_{CC} ve V_{EE} olarak adlandırılan bu kaynaklar transistörün polarma akım ve gerilimlerini sağlarlar. Bu devrede beyz gerilimi yaklaşık 0V'dur. Aynı devrenin basitleştirilmiş çizimi ise şekil-5.12.b'de verilmiştir.



Şekil-5.12.a ve b Emiter polarmalı transistor devresi ve basitleştirilmiş çizimi

Devrede beyz gerilimi şase potansiyelindedir ve yaklaşık 0V civarındadır. Transistörün emiterini $-V_{EE}$ kaynağı beyze göre daha düşük potansiyelde tutarak, beyz-emiter jonksiyonunu iletim yönünde etkiler. Devrede analizini çevre denklemlerini kullanarak yapalım.

Devrenin analizinde iki farklı yöntem (yaklaşım) kullanabiliriz. Birinci yaklaşım beyz gerilimini, dolayısıyla da beyz akımını sıfır kabul ederek ihmal etmektir. İkinci yaklaşım ise beyz akımını da hesaba katmaktır.

I. Yaklaşım: Beyz akımını yaklaşık sıfır kabul edelim.

$$V_B = 0V$$

$$V_E = -V_{EE}$$

$$I_E = \frac{V_E - V_{EE}}{R_E}$$

$$I_C = I_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

II. Yaklaşım: Beyz akımının varlığını kabul edip devrenin analizini yapalım.

$$-V_{EE} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

Yukarıdaki denklemde beyz akımı yerine; $I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$ eşitliğini yazarsak;

$$-V_{EE} = \left[\frac{I_E}{\beta + 1} \right] \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

bu denklemde gerekli I_E akımını çekersek;

$$I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

Devrede eğer, $R_E = \frac{R_B}{\beta + 1}$ ise yukarıdaki eşitlik yeniden düzenlenebilir. Bu durumda;

$$I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

devrede $V_{EE} \gg V_{BE}$ olması durumunda bir basitleştirme daha yapabiliriz. Bu durumda eşitlik;

$$I_E = \frac{-V_{EE}}{R_E}$$

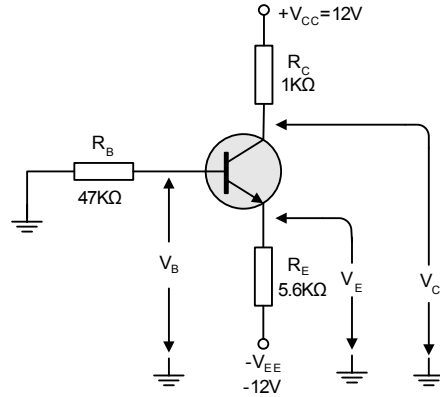
olarak yazılabilir. Bu eşitlik bize emiterli polarma devresinin β_{DC} ve V_{BE} değerlerinden ve değişimlerinden bağımsız olduğunu gösterir. Bu durum, transistörün Q çalışma noktasının kararlı olduğu anlamına gelir.

Görüldüğü gibi emiterli polarma devresi oldukça kararlıdır. Emiterli polarma devresinde transistörün kollektör-emiter gerilimini doyum anında yaklaşık sıfır $V_{CE}=0$ kabul edersek kollektör akımını;

$$I_{C(DOYUM)} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_C + R_E}$$

belirleriz. Transistörün kesim anında ise kollektör akımını yaklaşık sıfır kabul ederek kollektör-emiter arasındaki toplam gerilim bulunur. Bu değer;

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{EE}$$

**Örnek:
5.5**


Yandaki emiterli polarma devresinde transistörün çalışma noktası değerlerini bulunuz. Hesaplamalarda beyz akımını ihmal ediniz.

Cözüm

Devrede V_B gerilimini yaklaşık olarak sıfır kabul edersek;

$$V_E = -V_{BE} = 0.7V$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_E}{R_E} = \frac{-0.7V - (-12V)}{5.6K\Omega}$$

$$I_E = \frac{11.3V}{5.6K\Omega} = 2.01mA$$

$$I_C \cong I_E = 2.01mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - (2.01mA \cdot 1K\Omega) = 10V$$

$$V_{CE} = V_C - (-V_E) = 10V - (-0.7V) = 10.7V$$

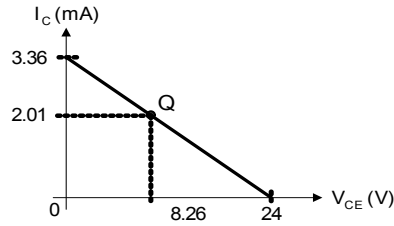
Emiterli polarma devresinde transistörün çalışma noktası değerleri elde edilmiştir. DC yük hattı değerlerini bulalım. Doyum anında $V_{CE}=0V$ kabul edersek;

$$I_{C(DOYUM)} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_C + R_E} = \frac{12V - (-12V)}{1K\Omega + 5.6K\Omega} = \frac{24V}{6.6K\Omega} = 3.64mA$$

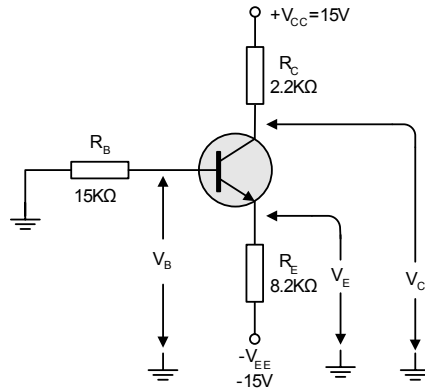
bulunur. Transistör kesimdeyken ise $I_C=0$ kabul edersek;

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{EE} = 12V - (-12V) = 24V$$

değerlerini elde ederiz. Bulunan bu değerler kullanılarak karakteristikte yük doğrusu aşağıdaki gibi çizilir.



Örnek: 5.6



Yanda verilen devrede V_{BE} geriliminin $0.7V$ 'dan $0.6V$ 'a düşmesi ve β_{DC} değerinin 100 'den 150 'ye çıkması durumunda çalışma noktasında meydana gelecek değişimleri analiz ediniz.

Cözüm

$\beta_{DC}=100$ ve $V_{BE}=0.7$ olması durumunda gerekli analizleri yapalım.

$$I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} = \frac{-(-15V) - 0.7V}{8.2K\Omega + \frac{15K\Omega}{100 + 1}} = \frac{14.3V}{8.34K\Omega} = 1.71mA$$

$$I_C \cong I_E = 1.71mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 15 - (1.71mA \cdot 2.2K\Omega) = 11.23V$$

$$V_E = V_{EE} + I_E \cdot R_E = -15V + (1.71mA \cdot 8.2K\Omega) = -0.98V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 11.23V - (-0.98V) = 10.25V$$

$\beta_{DC}=150$ ve $V_{BE}=0.6$ olması durumunda gerekli analizleri yapalım.

$$I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} = \frac{-(-15V) - 0.6V}{8.2K\Omega + \frac{15K\Omega}{100 + 1}} = \frac{14.4V}{8.34K\Omega} = 1.72mA$$

$$I_C \cong I_E = 1.72mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 15 - (1.72mA \cdot 2.2K\Omega) = 11.21V$$

$$V_E = V_{EE} + I_E \cdot R_E = -15V + (1.72mA \cdot 8.2K\Omega) = -0.896V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 11.21V - (-0.896V) = 10.31V$$

Bulunan bu değerleri kullanarak; kolektör akımı (I_C) ve kolektör-emiter gerilimi (V_{CE}) değişim yüzdelerini bulalım.

$$\% \Delta I_C = \frac{I_{C(\beta=150)} - I_{C(\beta=100)}}{I_{C(\beta=100)}} \cdot \%100 = \frac{1.72mA - 1.71mA}{1.71mA} \cdot \%100 \cong \%0.5 \text{ (Artma)}$$

$$\% \Delta V_{CE} = \frac{V_{CE(\beta=150)} - V_{CE(\beta=100)}}{V_{CE(\beta=100)}} \cdot \%100 = \frac{10.31V - 10.25V}{10.25} \cdot \%100 \cong \%0.50 \text{ (Artma)}$$

Yorum:

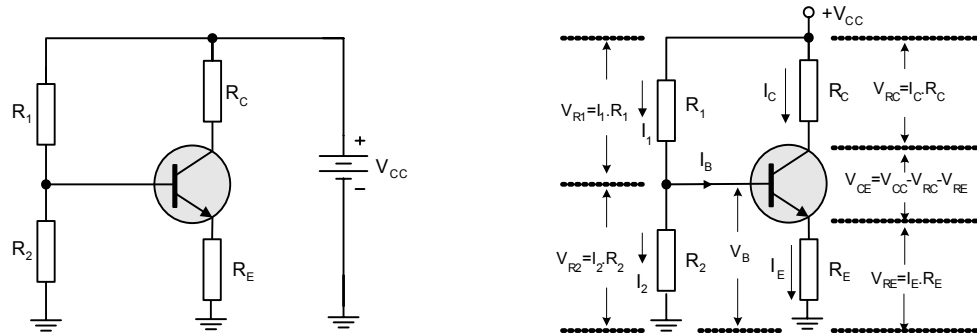
Sonuçlardan da görüldüğü gibi ısı ve çeşitli nedenlerden dolayı β_{DC} ve V_{BE} değerlerindeki değişim transistörün çalışma noktası değerlerini çok az miktarda etkilemektedir. Bu nedenle emiterli polarlama devresinin kararlı yüksektir ve β_{DC} 'den bağımsızdır diyebiliriz.

5.4 GERİLİM BÖLÜCÜLÜ POLARMA

Gerilim bölücülü polarlama devresi, Lineer çalışmada sıkça tercih edilen en popüler polarlama metodudur. Gerilim bölme işlemi dirençlerle gerçekleştirilir. Bu polarlama tipi transistörün son derece kararlı çalışmasını sağlar ve β_{DC} 'den bağımsızdır. Bu tip polarlama devresinde tek bir besleme geriliminin kullanılması ise diğer bir avantajdır. Özellikle lineer yükselteç devrelerinin tasarımlarında gerilim bölücülü polarlama devreleri kullanılır.

Önceki bölümlerde incelediğimiz polarma devrelerinde çalışma noktası β_{DC} yükseltme faktörüne aşırı derecede bağımlı idi. B'ya bağımlılık yükselteç devrelerinde bir takım sorunlar yaratır. Örneğin aynı firma tarafından üretilen aynı tip transistörlerin β değerleri farklılıklar içerir. Ayrıca β ısı değişiminden de etkilenmektedir. Bu durum transistörün kararlı çalışmasını engelleyerek çalışma noktasının istenmeyen bölgelere kaymasına neden olur. Çalışma noktasının önemi önceki konularda açıklanmıştı. Transistörlerde kararlı bir çalışma için gerilim bölücülü polarma devreleri geliştirilmiştir.

Tipik bir gerilim bölücülü polarma devresi şekil-5.13.a'da verilmiştir. Görüldüğü gibi devre tek bir gerilim kaynağından (V_{CC}) beslenmiştir. Devrede transistörün beyz akımı R_1 ve R_2 dirençleri tarafından sağlanmaktadır. Devrenin kararlılığı çok yüksektir. Transistörün çalışma bölgesi değerleri β_{DC} 'nin değişiminden etkilenmez. Bu nedenle bu tür polarma tipine " **β 'dan bağımsız polarma**" adı da verilmektedir. Şekil-5.13.b'de ise polarma devresinin analizini kolaylaştırmak amacı ile polarma akım ve gerilimleri devre üzerinde gösterilmiştir.

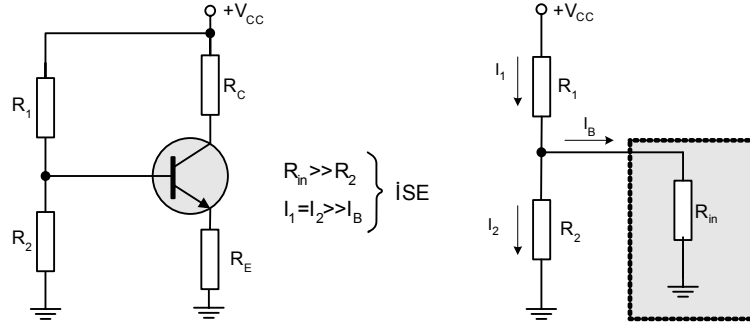


Şekil-5.13.a ve b Gerilim bölücülü polarma devresi ve polarma akımı-gerilimi ilişkileri

Devrenin çözümü için çeşitli yöntemler uygulanabilir. İki temel yöntem vardır. Birinci yöntem devrede beyz akımı ihmal edilebilecek kadar küçük ise uygulanır. Bu yöntemde I_1 akımının tamamının I_2 olarak yoluna devam ettiği varsayılarak çözüm üretilir. İkinci yöntemde ise devre analizi beyz akımı dikkate alınarak yapılır. Çözüm tekniğinde theve'nin teoreminden yararlanılır.

Yöntem 1:

Bu yöntemde beyz akımı ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edilir. R_1 direncinden akan akımın R_2 direncinden de aktığı kabul edilir. Çünkü transistörün giriş direnci R_{in} R_2 direncinden çok büyük olduğu kabul edilir ($R_{in} \gg R_2$). Yapılan kabuller neticesinde polarma devresinin eşdeğeri şekil-5.14.b'de verilen hale gelir. Eşdeğer devrede; R_1 ve R_2 dirençlerinin birleştiği noktada elde edilen gerilim, transistörün beyz polarma gerilimi olacaktır.



Şekil-5.14.a ve b Gerilim bölücülü polarma devresi ve eşdeğer gösterimi

Transistörün beyz'inde elde edilen V_B geriliminin değeri;

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

olarak bulunur. Beyz gerilimi; beyz noktası ile şase arasındaki gerilim olduğundan yazılacak çevre denkleminde;

$$V_B = V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

Buradan I_E akımını çekersek;

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

devrede I_B çok küçük olduğundan $I_E = I_C$ kabul edebiliriz. Dolayısıyla;

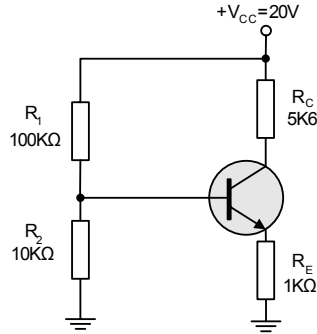
$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

transistörün çalışma noktası ise;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E$$

olarak elde edilir. Dikkat ederseniz yaptığımız analizlerde transistörün β_{DC} değerini hiç kullanmadık. Beyz akımı R_1 , R_2 dirençlerine bağımlı kılınmıştır. Emiter gerilimi ise yaklaşık olarak beyz gerilimine bağımlıdır. Emiter direnci R_E , emiter ve kolektör akımını kontrol etmektedir. Son olarak R_C direnci kolektör gerilimini dolayısıyla kolektör-emiter gerilimi V_{CE} 'yi kontrol etmektedir.

**Örnek:
5.7**



Yandaki devrede polarma akım ve gerilimi değerlerini bulunuz.

$$\beta_{DC}=100$$

$$V_{BE}=0.7V$$

Cözüm

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{10K\Omega}{100K\Omega + 10K\Omega} \cdot 20V = 1.82V$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{1.82 - 0.7}{1K\Omega} = 1.12mA$$

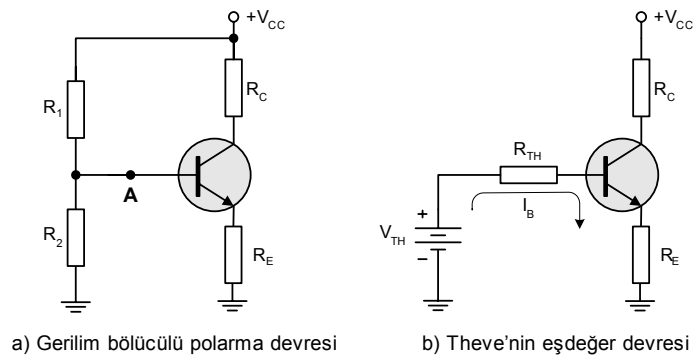
$$I_E \cong I_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E = 20V - (1.12mA \cdot 5.6K\Omega) - (1.12mA \cdot 1K\Omega)$$

$$V_{CE} = 20 - 6.27V - 1.11V = 20 - 7.38 = 12.6V$$

Yöntem 2:

Gerilim bölücülü polarma devresinde bir diğer yöntem ise Theve'nin teoremini kullanmaktır. Bu yöntem tam çözüm sunar. Hiçbir kabul içermez. Devrenin girişinde (beyz) theve'nin teoremi uygularsak polarma devresi şekil-5.15.b'de verilen basit forma dönüşür.



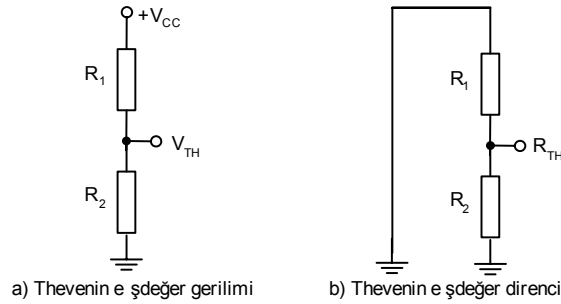
Şekil-5.15 Gerilim bölücülü polarma devresi ve Theve'nin eşdeğeri

Theve'nin eşdeğer gerilimi olan V_{TH} değerini bulmak için devre girişini A noktasından ayıralım (Transistörü bağımlı akım kaynağı gibi düşünebiliriz). Bu durumda devremiz şekil-5.16.a'da verilen forma dönüşür. V_{TH} gerilimi ise A noktasında elde edilecek gerilim değeridir.

$$V_{TH} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

Theve'nin eşdeğer direnç değeri R_{TH} 'ı ise; V_{CC} gerilim kaynağı kısa devre edilerek bulunur. Bu değer A noktasından görülen direnç değeridir ve R_1 ve R_2 dirençleri paralel duruma geçmiştir. Bu durum şekil-5.16.b'de gösterilmiştir.

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



Şekil-5.16 Thevenin eşdeğer gerilimi (V_{TH}) ve Eşdeğer direncinin (R_{TH}) bulunması

Theve'nin eşdeğer gerilimi ve eşdeğer direnç değerlerini bulduktan sonra şekil-5.15.b'de verilen eşdeğer devreden çözüme devam edelim. I_B akımını bulmak için devre girişi için çevre denklemini yazalım.

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

Devrede I_B ve I_E olmak üzere iki bilinmeyen var. O halde I_E akımını I_B cinsinden ifade edelim. $I_E = I_B(\beta + 1)$ 'dir. Denklemden yerine koyalım.

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + (\beta + 1) \cdot I_B \cdot R_E$$

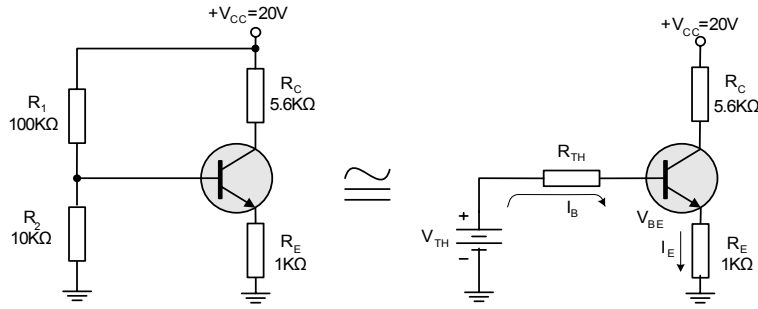
Buradan gerekli olan I_B akımını çekerim.

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E}$$

olarak bulunur. Bulanan bu değerden I_E , I_C ve V_{CE} değerleri sırayla elde edilir.

**Örnek:
5.8**

Aşağıda verilen devrenin analizini yapınız. Çözüm için Theve'nin teoremini kullanınız. $\beta_{DC}=100$, $V_{BE}=0.7V$. **Not:** Aynı devre örnek 5.7'de farklı bir yöntem kullanılarak çözülmüştü.


Cözüm

Çözüm için ilk adım thevenin eşdeğer devresini çizmektir. Eşdeğer devre yukarıda çizilmiştir. Önce theve'nin eşdeğer gerilimi ve eşdeğer direnç değerlerini bulalım.

$$V_{TH} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{20}{100K\Omega + 10K\Omega} \cdot 10K\Omega = 1.82V$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100K\Omega \cdot 10K\Omega}{100K\Omega + 10K\Omega} = 9.09K\Omega$$

Eşdeğer devreden giriş için çevre denklemini yazalım.

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + (\beta + 1)I_B \cdot R_E$$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{1.82V - 0.7V}{9.09K\Omega + (101) \cdot 1K\Omega} = \frac{1.12V}{110K\Omega} = 10\mu A$$

Yorum

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 101 \cdot 10\mu A = 1.02mA$$

$$I_C = I_E - I_B = 1.02mA - 0.01mA = 1.01mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E = 20V - (1.01mA \cdot 5.6K\Omega) - (1.02mA \cdot 1K\Omega)$$

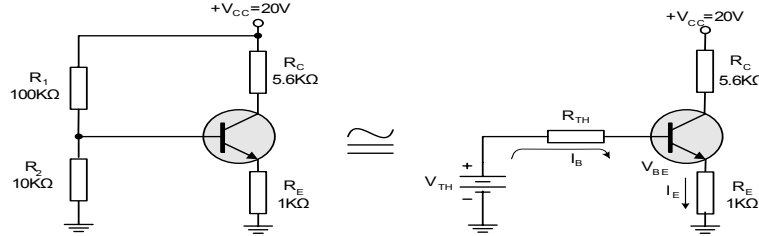
$$V_{CE} = 20V - (5.65V) - (1.02V) = 20V - 6.67V = 13.33V$$

Elde edilen bu sonuç örnek:5.7'de bulunan değerler ile karşılaştırıldığında aralarında yaklaşık %3-%4 civarında fark olduğu görülür. Dolayısıyla yaklaşık çözüm ile tam çözüm arasında çok küçük bir fark vardır. Bu fark kimi zaman ihmal edilebilir.

**Örnek:
5.9**

Örnek 5.8’de verilen polarma devresinde transistörün β_{DC} değeri yüzde yüz artarak 200 olmuştur. Polarma akım ve gerilimlerini bulunuz?

Not: Polarma devresi ve theve’nin eşdeğeri aşağıda yeniden verilmiştir.



$$V_{TH} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

$$V_{TH} = \frac{20}{100K\Omega + 10K\Omega} \cdot 10K\Omega = 1.82V$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{TH} = \frac{100K\Omega \cdot 10K\Omega}{100K\Omega + 10K\Omega} = 9.09K\Omega$$

Eşdeğer devreden giriş için çevre denklemini yazalım.

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

Denklemden I_B ve I_E olmak üzere iki adet bilinmeyen var. O halde I_E akımını I_B cinsinden yazalım. $I_E = I_B (\beta + 1)$ denkleminde yerleştirilirse;

$$V_{TH} = I_B \cdot R_{TH} + V_{BE} + (\beta + 1) I_B \cdot R_E$$

Analiz için gerekli olan I_B akımını çekelim.

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) \cdot R_E} = \frac{1.82V - 0.7V}{9.09K\Omega + (201) \cdot 1K\Omega} = \frac{1.12V}{210K\Omega} = 5.3\mu A$$

Polarma devresinde diğer akım ve gerilim değerlerini bulalım.

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 201 \cdot 5.33\mu A = 1.072mA$$

$$I_C = I_E - I_B = 1.072mA - 0.005mA = 1.067mA$$

Transistörün çalışma noktası gerilimi V_{CE} ;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - I_E \cdot R_E = 20V - (1.067mA \cdot 5.6K\Omega) - (1.07mA \cdot 1K\Omega)$$

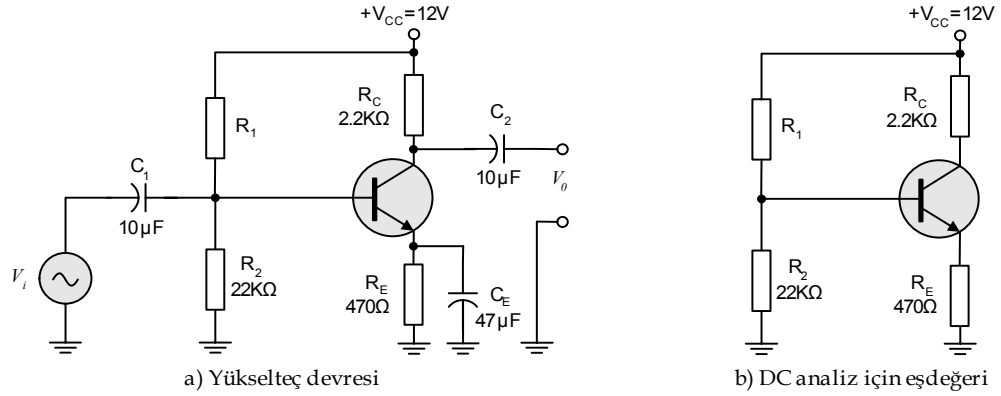
$$V_{CE} = 20V - (5.97V) - (1.07V) = 20V - 6.67V = 13V$$

Görüldüğü gibi β_{DC} değerinin %100 oranında değişmesi devrenin çalışma bölgesini pek etkilememiştir. Devre çalışma değerlerinde kararlı kalmaktadır. Bu durum gerilim bölücülü polarma devresinin son derece kararlı çalıştığını göstermektedir.

Yorum:

**Örnek:
5.10**

Aşağıda şekil-5.17.a’da verilen yükselteç devresinde transistörün aktif bölgenin ortasında çalışması isteniyor. Gerekli çalışma koşulunun sağlanması için R_1 direncinin değeri ne olmalıdır? Hesaplayınız?



Şekil-5.17. a ve b Yükselteç devresi ve dc analizi

Cözüm

Şekil-5.17.a’da komple bir yükselteç devresi verilmiştir. Yükselteç girişine uygulanan V_i işareti; yükselteç tarafından kuvvetlendirilecek ve yükselteç çıkışından V_o olarak alınacaktır.

Yükseltecin lineer çalışabilmesi için dc polarma gerilimleri ve akımları iyi ayarlanmalıdır. Kısaca önce dc analiz gerekir. DC analiz için devrenin dc eşdeğeri çizilir. Eşdeğer devre için; devredeki ac kaynaklar kısa devre ve kondansatörler açık devre kabul edilir. Bu durumda devremiz şekil-5.17.b’de verilen hale dönüşür.

Yükselteç devresi aktif bölgenin tam ortasında çalışması isteniyor. O halde transistörün kesim ve doyuma gitmeden ikisinin ortasında çalışması gerekir. Transistörün aktif bölgedeki çalışma gerilimi değerini bulmak için kesim ve doyum noktalarını belirleyip ikisinin tam ortasını almamızdır. O halde;

Transistör kesim noktasında iken $I_C = 0$ ’dır. Bu durumda Q çalışma noktası gerilimi V_{CQ} maksimum olacaktır ve değeri;

$$V_{CQ(max)} = V_{CC}$$

besleme gerilimine eşittir. Transistör doyum’da iken kollektör-emiter arası kısa devre olur ve minimumdur. I_C akımı ise maksimumdur. Bu durumda transistörün Q çalışma noktası gerilimi $V_{CQ(min)}$ ise;

$$V_{CQ(min)} = \frac{V_{CC}}{R_E + R_C} \cdot R_E$$

değerine eşit olacaktır. Bizim amacımız kesim ve doyum noktalarına gitmeden ikisinin tam ortasında çalışmaktır. O halde aktif bölgenin ortasında çalışmak için;

$$V_{CQ} = \frac{V_{CQ(\max)} + V_{CQ(\min)}}{2} = \frac{V_{CC}}{2} \left[1 + \frac{R_E}{R_E + R_C} \right]$$

olmalıdır. Buradan transistörün aktif bölgenin ortasında çalışabilmesi için gerekli olan V_{CQ} değerini bulalım.

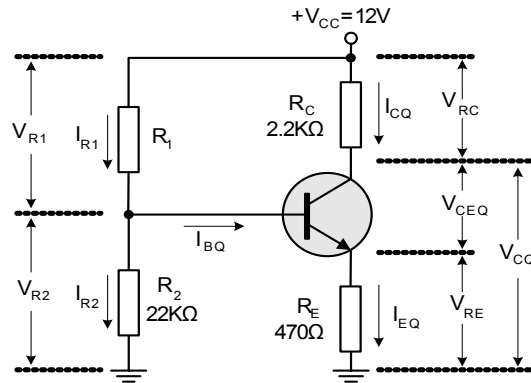
$$V_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2} \left[1 + \frac{R_E}{R_E + R_C} \right] = \frac{12}{2} \left[1 + \frac{470\Omega}{470\Omega + 2.2K\Omega} \right] = 7.05V$$

Bu durumda R_1 direncini V_{CQ} gerilimini 7.05V yapacak şekilde seçmeliyiz. R_1 direncini bulamak için R_1 üzerinde oluşan akım ve gerilimi bulmalıyız. Önce I_C akımını bulalım.

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CQ}}{R_C} = \frac{12 - 7.05}{2.2K\Omega} = 2.25mA$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{2.25mA}{200} = 0.01125mA = 11.25\mu A$$

Analiz kolaylığı için devreyi yeniden çizelim.



Devreden V_{R2} geriliminin; $V_{R2} = V_{CC} - V_{R1}$ veya $V_{R2} = V_{BE} + V_{RE}$ değerine eşit olacaktır. Buradan;

$$V_{R2} = V_{BE} + I_B(\beta + 1) \cdot R_E = 0.7V + 11.25\mu A \cdot (201) \cdot 470\Omega = 1.76V$$

Buradan I_2 akımını bulabiliriz.

$$I_2 = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{1.76V}{22K\Omega} = 0.080mA = 80\mu A$$

V_{R1} değerini bulalım. Devreden $V_{R1} = V_{CC} - V_{R2}$ olarak görülmektedir.

$$V_{R1} = V_{CC} - V_{R2} = 12V - 1.76V = 10.24V$$

I_1 akımını bulmak için devreden; $I_1=I_2-I_B$ olduğu görülür.

$$I_1 = I_2 - I_B = 80\mu A - 11.25\mu A = 68.75\mu A$$

Bulunan bu değerleri kullanarak R_1 'in olması gereken değerini bulabiliriz.

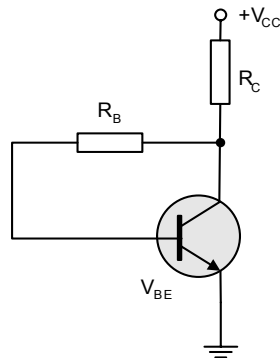
$$R_1 = \frac{V_{R1}}{I_1} = \frac{10.24V}{68.75\mu A} = 148.9K\Omega$$

Olarak bulunur. Şu halde şekil-5.17'de verilen yükselteç devresinde transistörün aktif bölgenin ortasında çalışabilmesi için gerekli R_1 direnci $149K\Omega$ olarak bulunmuştur.

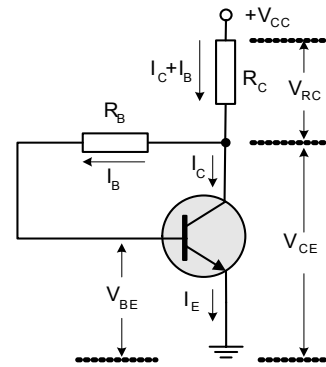
5.5 KOLLEKTÖR-GERİBESLEMELİ POLARMA

Transistörlü yükselteç devrelerinin polarmalandırılmasında kullanılan bir diğer yöntem ise kollektör-geribeslemeli devredir. Bu devrenin kararlılığı oldukça yüksektir. Transistörün çalışma bölgesi değerleri β_{DC} değişimlerinden pek fazla etkilenmez.

Tipik bir kolektör-geribeslemeli polarma devresi şekil-5.18'de verilmiştir. Devrede negatif geribesleme yapılmıştır. Çünkü beyz ve kollektör gerilimleri arasında 180° faz farkı vardır. Devre, yapılan geribesleme sayesinde kararlı bir yapıya kavuşmuştur. Çünkü transistörün β 'sının neden olduğu etkiler ve değişimler geribesleme ile azaltılmıştır. Kısaca geribesleme sayesinde kararlı bir çalışma sağlanmıştır.



a) Kollektör-geribeslemeli polarma devresi



b) Polarma akım ve gerilimlerinin gösterimi

Şekil-5.18.a ve b Kollektör-geribeslemeli polarma devresi ve polarma değerleri

Sistemin kararlı çalışması için geribesleme ile yapılan iyileştirilme aşağıda anlatılmıştır. Isı ile β 'nın artması transistörün kolektör akımında da bir artışa neden olur. Kolektör akımının artması R_C direnci üzerinde oluşan gerilimi de artıracaktır. R_C direnci üzerinde oluşan gerilimin (V_{RC}) artması ise transistörün V_{CE} geriliminin azalmasına neden olur. Kolektör gerilimi ise R_B direnci üzerinden beyz'i beslemektedir. Bu durumda beyz akımında azalacaktır. Beyz akımının azalması ise kolektör akımında β değişiminin neden olduğu artmayı engelleyecektir. Sıcaklık etkisiyle β 'da dolayısıyla kolektör akımında oluşan artma veya azalma geribesleme ile dengelenmektedir. Bu durum, transistörün çalışma bölgesinin kararlı kalmasını sağlar.

Devrenin matematiksel analizini yapalım. Şekil-5.18.b'de verilen devrede beyz-emiter çevresi için gerekli eşitlikler yazılırsa;

$$V_{CC} = I_{RC} \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

olur. Burada I_{RC} akımı, R_C direnci üzerinden geçen akımdır ve $I_{RC}=I_B+I_C$ değerine eşittir.

$$V_{CC} = (I_B + I_C) \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

I_B+I_C değeri ise I_E akımına eşittir.

$$V_{CC} = I_E \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

I_E akımını I_B cinsinden yazarak $I_E=(\beta+1)I_B$ yukarıdaki denklemi sadeleştirelim

$$V_{CC} = (\beta + 1) \cdot I_B \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

elde edilen bu denklemden I_B akımını çekelim.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C}$$

denklemini elde edilir.

Devrede çalışma noktası değerlerini bulmak için kolektör-emiter çevresi için gerilimler yazılırsa;

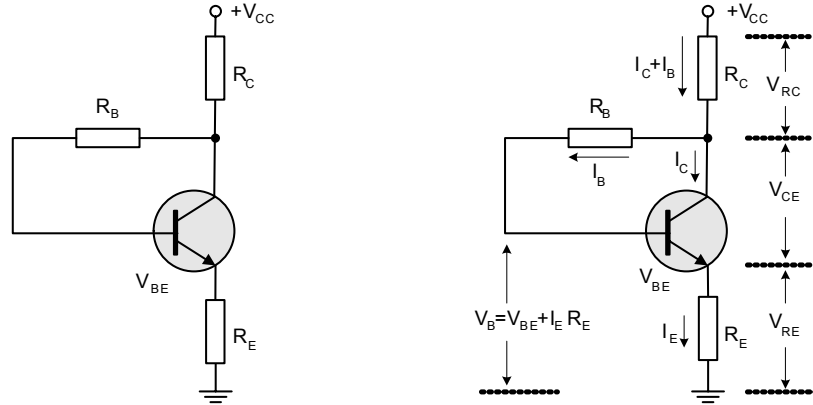
$$V_{CC} = I_{RC} \cdot R_C + V_{CE}$$

$I_{RC}=I_E$ 'dir. Denklem yeniden düzenlenirse;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E \cdot R_C$$

eşitliği elde edilir.

Kollektör-geribesleme devresinin çok daha geliştirilmiş bir uygulaması şekil-5.19'da verilmiştir. Kararlılık faktörünü artırmak amacı ile devrede ilave olarak R_E direnci kullanılmıştır. Devrenin analizi ise aşağıda ayrıntıları ile verilmiştir.



Şekil-5.19.a ve b Kollektör-geribeslemeli emiter dirençli polarma devresi

$$V_{CC} = I_{RC} \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

denklemini elde edilir. Elde edilen denkleminde I_{RC} akımı yerine, $I_{RC} = I_B + I_C = (\beta + 1)I_B$ eşitliğini kullanırsak;

$$V_{CC} = (\beta + 1)I_B \cdot R_C + I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_E$$

denklemini elde edilir. Elde edilen denklemden I_B akımını çekerim.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot (R_C + R_E)}$$

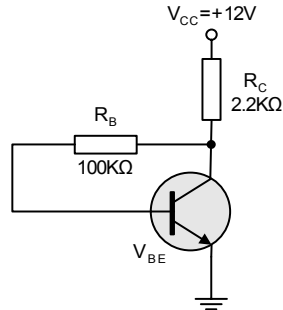
Transistörün çalışma noktasındaki değerleri bulmak için polarma devresinden;

$$V_{CC} = I_{RC} \cdot R_C + V_{CE} + I_E \cdot R_E$$

Formüldeki I_{RC} yerine I_E kullanırsak $I_{RC} = I_E$;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E (R_C + R_E)$$

denklemini elde edilir.

**Örnek:
5.11**


Yanda verilen kollektör-geribeslemeli polarma devresinde gerekli polarma akım ve gerilimlerini hesaplayınız?

$$\beta_{DC}=150$$

$$V_{BE}=0.7V$$

Cözüm

Devrede önce beyz akımını bulalım.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C} = \frac{12V - 0.7V}{100K\Omega + (151) \cdot 2.2K\Omega} = \frac{11.3V}{432.2K\Omega} = 0.026mA = 26\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 150 \cdot 26\mu A = 3900\mu A = 3.90mA$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 151 \cdot 26\mu A = 3926\mu A = 3.92mA$$

Transistörün çalışma noktası gerilimi V_{CE} ise;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E \cdot R_C = 12V - (3.92mA \cdot 2.2K\Omega) = 3.376V$$

olarak bulunur.

Devrenin kararlılık faktörünü incelemek amacıyla aynı devrede sıcaklık etkisiyle β_{DC} değerinin 150'den 250'ye çıktığını kabul edelim. Devrenin çalışma noktasına etkisini görelim.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) \cdot R_C} = \frac{12V - 0.7V}{100K\Omega + (251) \cdot 2.2K\Omega} = \frac{11.3V}{652.2K\Omega} = 0.017mA = 17\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 250 \cdot 17\mu A = 4250\mu A = 4.25mA$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B = 251 \cdot 17\mu A = 4267\mu A = 4.26mA$$

Transistörün çalışma noktası gerilimi V_{CE} ise;

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E \cdot R_C = 12V - (4.2mA \cdot 2.2K\Omega) = 2.76V$$

Yorum

Transistörün β_{DC} değerinde yaklaşık %100'lük bir artışa rağmen çalışma bölgesi akım ve gerilimlerindeki değişim yaklaşık %10 civarındadır. Bu durum bize devrenin kararlılık faktörünün iyi olduğunu gösterir.