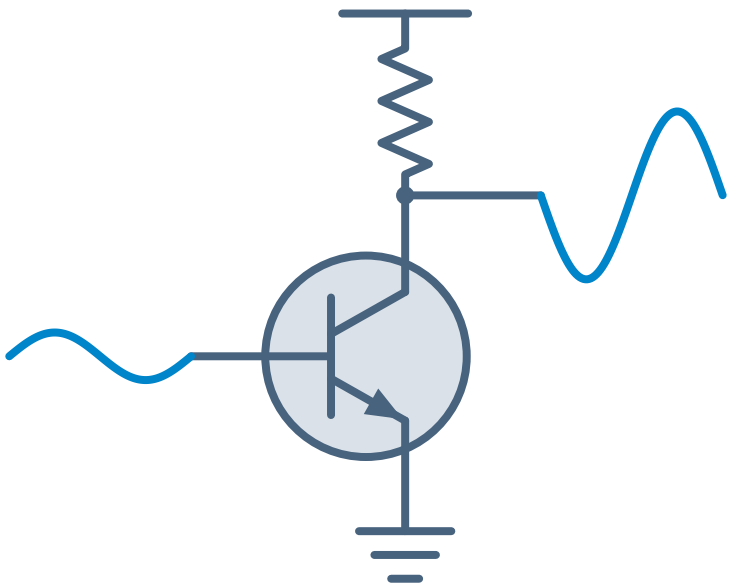
ELEKTRONİK 1

SORU KİTABI

ÖRNEK SAYFALAR

11 ünite · 150 soru · adım adım çözümler



Ertan Sinan Şahin

ertansinansahin.com

Bu kitap nasıl kullanılır?

- Her ünite, soruların dayandığı tanım ve formülleri özetleyen bir hatırlatma kutusuyla açılır.
- Zorluk: ★☆☆ temel ★★☆ orta ★★★ ileri. Her ünitede birkaç çoktan seçmeli kavram sorusu vardır; ünitenin son sorusu, birden çok konuyu birleştiren sınav tipi bir karma sorudur.
- Her sorunun altındaki noktalı alan sizin çözümünüz içindir. Önce kendiniz çözün; takıldığınızda hatırlatma kutusuna ve ders notuna dönün, çözüme en son bakın.
- Bütün çözümler kitabın sonundadır. Sorunun yanındaki Çözüm → bağlantısı çözüme, çözümdeki ← Soru bağlantısı soruya götürür. Kısa cevaplar **CEVAP** kutusundadır. Gerektiğinde çözüm varsayımlarla başlar ve kullandığı Ek tablosunu adıyla anar; kuvvetlendirici çözümleri küçük işaret eşdeğer devresinin şekliyle verilir.
- **Ek tablolar:** Yarıiletken sabitleri, diyot, BJT ve MOSFET parametreleri, küçük işaret özeti, standart direnç ve kondansatör değerleri (E12, E24) ile desibel ve Bode kuralları kitabın sonundaki Ek'tedir. Sorular yalnız bu Ek ile ve soru metnindeki verilerle çözülür; soruda verilmeyen parametre için Ek'teki varsayılan değer alınır.
- **Gösterim ve varsayılanlar:** Toplam anlık değer i_C, DC değer I_C, küçük işaret i_c, genliği I_c ile gösterilir. Aksi söylenmedikçe $V_T = 25$ mV, $V_{BE(\text{on})} = V_{D(\text{on})} = 0.7$ V, $V_{CE(\text{sat})} = 0.2$ V, $V_A = \infty$ ve $\lambda = 0$ alınır. DC çözümler varsayılan çalışma bölgesiyle başlar ve sonunda bu varsayımı denetler.
- **Ortak ünite:** Ünite 11 (frekans yanıtı) *Elektronik 2* kitabında da vardır; ikinci dersi bu konuyla başlayan okullar için o kitapta tekrar yer alır.
- **Okuma sırası:** Kitap BJT ile başlar (Ünite 5–7), MOSFET'e (Ünite 8–9) sonra geçer. Dersiniz MOSFET'le başlıyorsa Ünite 1–4, 8–9, 5–7, 10–11 sırasıyla çalışın: Ünite 8–9'daki sorular BJT bilgisi gerektirmez; iki transistörü karşılaştıran sorular yalnız bu ünitelerin *Karma sorular* bölümündedir. Yarıiletken fiziği (Ünite 2) kısa tutulmuştur.
- **Vize ve final:** Vize çoğunlukla diyotları ve BJT'nin DC analizini (Ünite 1–6), final bütün kitabı kapsar. Konu sırası ve kapsamı okuldan okula değişir; kendi dersinizin izlencesine göre çalışacağınız üniteleri seçin. Sonuçları bir devre benzetim programıyla da doğrulayabilirsiniz. Bazı üniversitelerde bu dersin adı Elektronik Devreler ya da Analog Elektronik'tir.

İçindekiler

Sayfa numaraları tam kitaba aittir. Renkli üniteler bu örnekte vardır; tıklayınca o üniteye gidersiniz.

1 Kuvvetlendirici Temelleri ve İdeal İşlemsel Kuvvetlendirici ..... 10 soru 4
2 Yarıiletkenler ve pn Eklemi ..... 10 soru 11
3 **Diyot Modelleri ve Diyot Devreleri** ..... 14 soru 17
4 Diyot Uygulamaları: Doğrultucu, Zener, Kırpıcı ve Kenetleyici ..... 16 soru 24
5 BJT: Yapı, Çalışma Bölgeleri ve DC Analiz ..... 14 soru 33
6 **BJT Kutuplama ve Çalışma Noktası Kararlılığı** ..... 12 soru 41
7 BJT Küçük İşaret Kuvvetlendiricileri ..... 18 soru 49
8 **MOSFET ve JFET: Yapı, Karakteristikler ve DC Analiz** ..... 14 soru 64
9 FET Küçük İşaret Kuvvetlendiricileri ..... 16 soru 72
10 Çok Katlı Kuvvetlendiricilere Giriş: Kaskat, Darlington, Kaskod ..... 10 soru 85
11 Frekans Yanıtı: Tek Katlı Kuvvetlendiriciler ..... 16 soru 93

Çözümler 105

Ek: Tablolar 172

3. ÜNİTE

DİYOT MODELLERİ VE DİYOT DEVRELERİ

ideal diyot

iletim: $v_D = 0,\ i_D > 0$; kesim: $i_D = 0,\ v_D < 0$

üstel model $i_D = I_S\left(e^{v_D/(nV_T)} - 1\right) \approx I_S\, e^{v_D/(nV_T)}$

iki akımdaki gerilim farkı $V_2 - V_1 = nV_T \ln \dfrac{I_2}{I_1}$

sabit düşüm, parçalı doğrusal

$v_D = V_{D0}$; $v_D = V_{D0} + r_D\, i_D$

küçük işaret direnci $r_d = \dfrac{nV_T}{I_D}$

küçük işaret koşulu $|v_d| \ll nV_T$ $(|v_d| \le 5\ \text{mV})$

yük doğrusu $i_D = \dfrac{V_{DD} - v_D}{R}$

sıcaklık (sabit akımda) $\dfrac{dV_D}{dT} \approx -2\ \text{mV/K}$

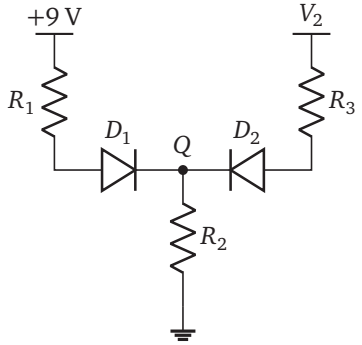
Toplam anlık değer küçük harf ve büyük indisle (i_D), DC değer büyük harf ve büyük indisle (I_D), küçük işaret küçük harf ve küçük indisle (i_d), küçük işaretin tepe değeri büyük harf ve küçük indisle (I_d) yazılır. Aksi söylenmedikçe Si diyotlar sabit gerilim düşümü modeliyle çözülür: iletimde $v_D = V_{D0} = 0.7\,\text{V}$. "İdeal diyot" denince iletimde $v_D = 0$ alınır. Üstel modelde $V_T = 25\,\text{mV}$; I_S ve n Tablo E-2'dedir (küçük işaret Si diyotu: $I_S = 10^{-15}\,\text{A}$, $n = 1$). Her çözüm diyotların durumunu (iletim ya da kesim) varsayarak başlar ve sonunda denetler: iletimdeki diyotta $I_D > 0$, kesimdeki diyotta $V_D < V_{D0}$ (ideal diyotta $V_D < 0$) olmalıdır. Diyot gerilimi anottan katoda, akımı anottan katoda doğru ölçülür. Direnç kiloohm, akım miliamper, gerilim volt cinsindendir.

İdeal diyot ve durum varsayımı

3.3

★★☆ Çözüm →

Şekildeki devrede D_1 ve D_2 ideal diyotlardır; $R_1 = 1.5\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 2.2\,\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\,\text{k}\Omega$, $V_2 = 4\,\text{V}$.



a. İki diyotun da iletimde olduğunu varsayarak V_Q'yü ve diyot akımlarını bulunuz; varsayımın tutup tutmadığını belirtiniz.

b. Diyotların doğru durumunu belirleyip V_Q'yü ve I_{D1}'i bulunuz.

c. D_2'nin iletime geçmesi için V_2 kaç voltu aşmalıdır?

Üstel model, sabit düşüm ve parçalı doğrusal model

3.4 ★☆☆ Çözüm →

Tablo E-2'deki küçük işaret Si diyotunun ($I_S = 10^{-15}$ A, $n = 1$) ileri yönde çalıştığını varsayınız.

a. $I_D = 0.2$ mA ve $I_D = 5$ mA'deki diyot gerilimlerini bulunuz.

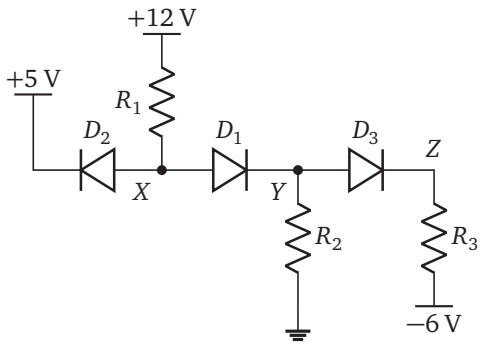
b. Akım 10 katına çıkınca diyot gerilimi kaç mV artar?

c. Diyot gerilimi 30 mV artırılırsa akım kaç katına çıkar?

Çok diyotlu devreler ve diyot mantık kapıları

3.12 ★★★ Çözüm →

Şekildeki devrede $R_1 = 2.2$ kΩ, $R_2 = 3.3$ kΩ, $R_3 = 4.7$ kΩ; raylar +12 V, +5 V ve −6 V'tur.



a. Üç diyotun da iletimde olduğunu varsayarak diyot akımlarını bulunuz ve varsayımın tutmadığını gösteriniz.

b. Doğru durumları belirleyip V_X, V_Y, V_Z gerilimlerini ve iletimdeki diyotların akımlarını bulunuz.

c. +5 V'luk ray hangi gerilimin altına inerse D_2 de iletime geçer?

6. ÜNİTE

BJT KUTUPLAMA VE ÇALIŞMA NOKTASI KARARLILIĞI

tek baz direnci $I_B = \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}, \quad I_C = \beta I_B$

baz bölücüsünün Thévenin eşdeğeri $V_{\mathrm{Th}} = V_{CC}\dfrac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{\mathrm{Th}} = R_1 \parallel R_2$

bölücü ve R_E $I_B = \dfrac{V_{\mathrm{Th}} - V_{BE}}{R_{\mathrm{Th}} + (\beta + 1)R_E}$

β değişimine duyarsızlık $\dfrac{R_{\mathrm{Th}}}{\beta + 1} \ll R_E$

kollektör–baz geri beslemesi $I_B = \dfrac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)}$

± besleme (R_B bazdan toprağa) $I_B = \dfrac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$

DC yük doğrusu $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_{\mathrm{dc}}, \quad R_{\mathrm{dc}} = R_C + \dfrac{R_E}{\alpha}$

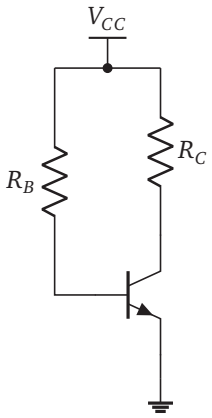
yüzde değişim $\dfrac{\Delta I_C}{I_C} = \dfrac{I_{C2} - I_{C1}}{I_{C1}}$

DC değerler büyük harf ve büyük indisle (I_C, V_{CE}) yazılır. Aksi söylenmedikçe $V_{BE(\mathrm{on})} = 0.7\ \mathrm{V}$, $V_{CE(\mathrm{sat})} = 0.2\ \mathrm{V}$ (pnp'de $V_{EB(\mathrm{on})}$ ve $V_{EC(\mathrm{sat})}$ aynı değerlerle) ve Early etkisi ihmal edilir. β verilmezse Tablo E-3'teki varsayılan değer ($\beta = 100$) alınır; "β'nın aralığı" denince Tablo E-3'teki aralık (küçük işaret npn için 100–300) kastedilir. V_{BE}'nin sıcaklıkla değişimi Tablo E-3'ün notunda, standart direnç değerleri (E24) Tablo E-6'dadır. Bu ünitedeki devrelerde kondansatör yoktur. Her çözüm aktif bölge varsayımıyla başlar ve $V_{CE} > V_{CE(\mathrm{sat})}$ ile denetlenir. Direnç kiloohm, akım miliamper, gerilim volt cinsindendir.

Tek baz dirençli kutuplama

6.1

★☆☆ Çözüm →



Şekildeki tek baz dirençli katta $V_{CC} = 15\ \mathrm{V}$, $R_B = 1.2\ \mathrm{M\Omega}$, $R_C = 5.1\ \mathrm{k\Omega}$.

a. $\beta = 160$ için I_C'yi ve V_{CE}'yi bulunuz.

b. Transistör, aynı tipten $\beta = 240$ olan bir başkasıyla değiştirilirse I_C ve V_{CE} ne olur?

c. Transistörün doyuma girdiği β değeri nedir?

6.2 ★☆☆ Çözüm →

Emetörü toprakta olan tek baz dirençli bir kutuplama devresi için aşağıdakilerden hangisi doğrudur?

A) $I_C \approx \beta(V_{CC} - 0.7)/R_B$ olduğundan β iki katına çıkınca I_C de yaklaşık iki katına çıkar.

B) R_B büyütülürse I_C artar.

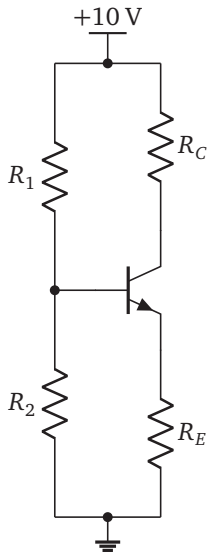
C) I_C, β'dan bağımsızdır; Q noktası yalnız V_{BE} sıcaklıkla değiştiği için kayar.

D) Bu devrede transistör, R_C ne kadar büyük seçilirse seçilsin doyuma giremez.

E) Emetöre bir direnç eklemek I_C'nin β'ya duyarlılığını artırır.

pnp kutuplama ve Q noktası seçimi

6.10 ★★★ Çözüm →



Şekildeki katta kondansatör yoktur; baza eklenen işaretle v_{CE} DC yük doğrusu üzerinde değişir. $V_{CC} = 10\,\text{V}$, $R_C = 3\,\text{k}\Omega$, $R_E = 750\,\Omega$, $R_1 = 68\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 15\,\text{k}\Omega$, $\beta = 150$. Kesimde $v_{CE} = V_{CC}$, doyumda $v_{CE} = 0.2\,\text{V}$ olur.

a. v_{CE}'nin iki yönde eşit ve olabildiğince büyük salınımına izin veren Q noktasını (I_C, V_{CE}) ve bu salınımın tepe değerini bulunuz.

b. Devrenin gerçek Q noktasını ve v_{CE}'nin kırpılmadan alabileceği en büyük simetrik tepe salınımını bulunuz; (a)'daki ideal değerle karşılaştırınız.

c. β Tablo E-3'teki aralığın uçlarında (100 ve 300) olursa simetrik salınım ne olur?

8. ÜNİTE

MOSFET VE JFET: YAPI, KARAKTERİSTİKLER VE DC ANALİZ

NMOS, doyma ($v_{DS} \geq v_{OV}$)

$$i_D = \tfrac{1}{2}k_n v_{OV}^2, \quad v_{OV} = v_{GS} - V_t, \quad k_n = k_n' \frac{W}{L}$$

NMOS, triyot ($v_{DS} < v_{OV}$)

$$i_D = k_n\left(v_{OV}v_{DS} - \tfrac{1}{2}v_{DS}^2\right), \quad r_{DS} \approx \frac{1}{k_n v_{OV}}$$

kanal boyu modülasyonu

$$i_D = \tfrac{1}{2}k_n v_{OV}^2(1 + \lambda v_{DS}), \quad \lambda = 1/V_A$$

gövde etkisi

$$V_t = V_{t0} + \gamma\left(\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f}\right)$$

PMOS

$$i_D = \tfrac{1}{2}k_p(v_{SG} - |V_t|)^2, \quad v_{SD} \geq v_{SG} - |V_t|$$

JFET (n kanallı), doyma

$$i_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2, \quad v_{DS} \geq v_{GS} - V_P$$

kaynak dirençli kutuplama

$V_{GS} = V_G - I_D R_S \Rightarrow$ ikinci dereceden denklem

CMOS evirici, anahtarlama eşiği

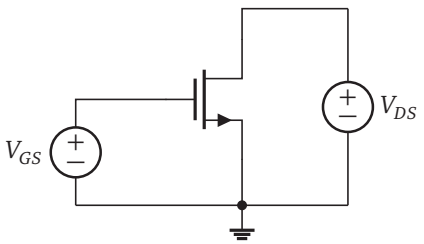
$$V_M = \frac{V_{DD} - |V_{tp}| + rV_{tn}}{1 + r}, \quad r = \sqrt{\frac{k_n}{k_p}}$$

Toplam anlık değer küçük harf ve büyük indisle (i_D, v_{GS}), DC değer büyük harf ve büyük indisle (I_D, V_{GS}) yazılır. Aksi söylenmedikçe ayrık NMOS Tablo E-4'teki küçük işaret NMOS'tur ($k_n = k_n'(W/L) = 4\ \text{mA/V}^2$, $V_t = 1\ \text{V}$), PMOS $k_p = 2\ \text{mA/V}^2$, $V_t = -1\ \text{V}$; n kanallı JFET $I_{DSS} = 8\ \text{mA}$, $V_P = -4\ \text{V}$. Kanal boyu modülasyonu (λ) ve gövde etkisi yalnız soruda istenince hesaba katılır; kapı akımı sıfırdır. Her DC çözümü bir bölge varsayımıyla başlar ve sonunda denetlenir: NMOS doymada $V_{DS} \geq V_{OV}$, PMOS'ta $V_{SD} \geq V_{SG} - |V_t|$, JFET'te $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$. V_{OV} (aşırı sürme gerilimi) PMOS'ta da artı yazılır: $V_{OV} = V_{SG} - |V_t|$. Standart direnç değerleri (E24) Tablo E-6'dadır. Direnç kiloohm (kapı dirençleri megaohm), akım miliamper, gerilim volt; k_n miliamper bölü volt kare (mA/V^2) cinsindendir.

MOSFET'in yapısı ve karakteristikleri

8.2 ★☆☆ Çözüm →

Şekildeki NMOS'ta $k_n = 6\ \text{mA/V}^2$, $V_t = 1.2\ \text{V}$; iki DC kaynak V_{GS} ve V_{DS} gerilimini doğrudan belirler.



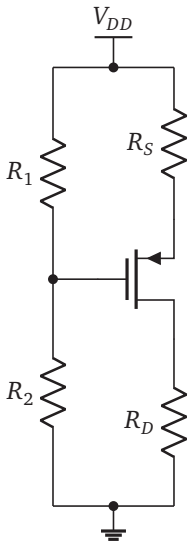
a. $(V_{GS}, V_{DS}) = (0.9\ \text{V}, 5\ \text{V})$, $(2.0\ \text{V}, 3.0\ \text{V})$ ve $(2.7\ \text{V}, 0.6\ \text{V})$ için çalışma bölgesini ve I_D'yi bulunuz.

b. $V_{GS} = 2.7\ \text{V}$'ta çok küçük V_{DS} için savak–kaynak direnci (r_{DS}) kaç ohm olur?

DC analiz ve kutuplama

8.7

★★☆ Çözüm →



Şekildeki PMOS devresinde $V_{DD} = 10\,\text{V}$, $R_1 = 470\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 680\,\text{k}\Omega$, $R_S = 1.5\,\text{k}\Omega$, $R_D = 3.9\,\text{k}\Omega$. Transistör Tablo E-4'teki küçük işaret PMOS'tur.

a. I_D, V_S ve V_D değerlerini bulunuz; çalışma bölgesini denetleyiniz.

b. Transistörün doymada kalması için R_D en çok kaç kiloohm olabilir?

MOSFET anahtar ve CMOS evirici

8.12

★☆☆ Çözüm →

Bir CMOS evirici için aşağıdakilerden hangisi doğrudur?

A) Giriş 0 V iken NMOS iletimde, PMOS kesimdedir.

B) Çıkış "1" iken besleme, çıkışa yük bağlı olmasa da PMOS üzerinden sürekli bir DC akım verir.

C) PMOS'un W/L oranı küçültülürse anahtarlama eşiği V_M yükselir.

D) $v_I = V_M$ iken iki transistör de triyot bölgesindedir.

E) Giriş 0 ya da V_{DD}'deyken durgun akım (sızıntı dışında) sıfırdır.

ÇÖZÜMLER

3 DİYOT MODELLERİ VE DİYOT DEVRELERİ

3.3

← Soru

a. İki diyot da kısa devre sayılırsa Q düğümünde Kirchhoff akım yasası:

$$\frac{9-V_Q}{1.5}+\frac{4-V_Q}{1}=\frac{V_Q}{2.2},$$

$$V_Q=\frac{9/1.5+4/1}{1/1.5+1/1+1/2.2}=\frac{10}{2.1212}=4.714\ \text{V},$$

$$I_{D1}=\frac{9-4.714}{1.5}=2.857\ \text{mA},$$

$$I_{D2}=\frac{4-4.714}{1}=-0.714\ \text{mA}.$$

$I_{D2}<0$: D_2 için iletim varsayımı tutmaz.

b. D_2 kesimde, D_1 iletimde varsayılır; R_3'ten akım geçmez, R_1 ile R_2 seridir:

$$I_{D1}=\frac{9}{1.5+2.2}=2.432\approx 2.43\ \text{mA},$$

$$V_Q=2.432(2.2)=5.351\approx 5.35\ \text{V}.$$

Kontrol: $I_{D1}>0$; D_2'nin gerilimi $V_2-V_Q=4-5.351=-1.351\ \text{V}<0$: iki varsayım da tutar.

c. D_2 kesimdeyken $V_Q=5.351$ V değeri V_2'ye bağlı değildir. D_2'nin anodu (V_2) katodundan (V_Q) yüksek olunca iletime geçer: $V_2>5.35$ V.

Sık yapılan hata: (a)'daki çözümde yalnız I_{D1}'in artı çıkmasına bakıp durmak. Her iletim varsayımı kendi akımıyla, her kesim varsayımı kendi gerilimiyle denetlenmelidir.

CEVAP a. $V_Q=4.714$ V, $I_{D1}=2.857$ mA, $I_{D2}=-0.714$ mA; varsayım tutmaz b. D_1 iletimde, D_2 kesimde; $V_Q=5.35$ V, $I_{D1}=2.43$ mA c. 5.35 V

3.4

← Soru

a. İleri yönde $e^{v_D/V_T}\gg 1$ olduğundan $V_D=V_T\ln(I_D/I_S)$:

$$V_D=0.025\ln\frac{0.2\times10^{-3}}{10^{-15}}=0.025\ln\left(2\times10^{11}\right),$$

$$V_D=0.025(26.02)=0.6505\approx 0.651\ \text{V},$$

$$V_D=0.025\ln\left(5\times10^{12}\right)=0.025(29.24)=0.731\ \text{V}.$$

b. $V_2-V_1=nV_T\ln(I_2/I_1)=25\ln 10=57.6$ mV.

c. $I_2/I_1=e^{\Delta V/V_T}=e^{30/25}=e^{1.2}=3.32$.

Kontrol: (a)'daki iki gerilimin farkı $0.731-0.6505=0.0805$ V; bağıntıdan $25\ln(5/0.2)=25\ln 25=80.5$ mV.

CEVAP a. 0.651 V ve 0.731 V b. 57.6 mV c. 3.32 katına

3.12

← Soru

a. Üç diyot iletimde: $V_X=5+0.7=5.7$ V, $V_Y=5.0$ V, $V_Z=4.3$ V. Direnç akımları:

$$I_{R1}=\frac{12-5.7}{2.2}=2.864\ \text{mA},$$

$$I_{R2}=\frac{5}{3.3}=1.515\ \text{mA},$$

$$I_{D3}=I_{R3}=\frac{4.3+6}{4.7}=2.191\ \text{mA},$$

$$I_{D1}=I_{R2}+I_{D3}=3.707\ \text{mA},$$

$$I_{D2}=I_{R1}-I_{D1}=-0.843\ \text{mA}.$$

$I_{D2}<0$: D_2'nin iletim varsayımı tutmaz. (D_1 ve D_3'ün akımları artı olsa da bu çözüm bütünüyle geçersizdir.)

b. D_2 kesimde, D_1 ve D_3 iletimde varsayılır: $V_X=V_Y+0.7$, $V_Z=V_Y-0.7$. R_1'in akımı D_1'den geçip

ertansinansahin.com

R_2 ile D_3–R_3 dalına bölünür:

$$\frac{12-0.7-V_Y}{2.2}=\frac{V_Y}{3.3}+\frac{V_Y-0.7+6}{4.7},$$

$$V_Y\Big(\frac{1}{2.2}+\frac{1}{3.3}+\frac{1}{4.7}\Big)=\frac{11.3}{2.2}-\frac{5.3}{4.7},$$

$$V_Y=\frac{4.0087}{0.9703}=4.131\ \text{V},$$

$$V_X=4.831\approx 4.83\ \text{V},\qquad V_Z=3.431\approx 3.43\ \text{V},$$

$$I_{D1}=\frac{12-4.831}{2.2}=3.259\approx 3.26\ \text{mA},$$

$$I_{D3}=\frac{3.431+6}{4.7}=2.007\approx 2.01\ \text{mA}.$$

Kontrol: $I_{R2}=4.131/3.3=1.252$ mA ve $1.252+2.007=3.259\ \text{mA}=I_{D1}$. D_2'nin gerilimi $V_X-5=-0.169\ \text{V}<0.7\ \text{V}$: kesim doğrudur. Üstel modelle sayısal çözüm $V_X=4.844$ V, $I_{D1}=3.253$ mA verir.

c. D_2 kesimdeyken $V_X=4.831$ V raya bağlı değildir. D_2, ray gerilimi $V_X-0.7=4.13$ V'un altına inince iletir.

Sık yapılan hata: Yalnız D_1 ve D_3'ün akımlarına bakıp (a)'yı kabul etmek. Durum varsayımı bütün diyotlar için birlikte denetlenir; biri tutmazsa bütün değerler yeniden hesaplanır.

CEVAP a. $I_{D1}=3.707$ mA, $I_{D2}=-0.843$ mA, $I_{D3}=2.191$ mA; tutmaz b. D_2 kesimde; $V_X=4.83$ V, $V_Y=4.13$ V, $V_Z=3.43$ V, $I_{D1}=3.26$ mA, $I_{D3}=2.01$ mA c. 4.13 V

6 BJT KUTUPLAMA VE ÇALIŞMA NOKTASI KARARLILIĞI

6.1

← Soru

Varsayımlar: BJT aktif bölgede.

a. Baz çevrimi (1.2 MΩ = 1200 kΩ):

$$I_B=\frac{15-0.7}{1200}=11.92\ \mu\text{A},$$

$$I_C=160(11.92\ \mu\text{A})=1.907\approx 1.91\ \text{mA},$$

$$V_{CE}=15-1.907(5.1)=5.28\ \text{V}>0.2\ \text{V}.$$

b. I_B, β'dan bağımsızdır; I_C, β ile orantılı artar:

$$I_C=240(11.92\ \mu\text{A})=2.86\ \text{mA},$$

$$V_{CE}=15-2.860(5.1)=0.414\ \text{V}.$$

$V_{CE}>0.2$ V: transistör hâlâ aktiftir, ama doyumun eşiğindedir. β %50 artınca I_C de %50 artmıştır.

c. Doyum sınırında $I_C=(15-0.2)/5.1=2.902$ mA:

$$\beta=\frac{2.902}{0.011917}=243.5.$$

Not: Tablo E-3'te küçük işaret npn'in β aralığı 100–300'dür; bu devre aralığın üst kısmındaki transistörlerle doyuma girer.

CEVAP a. $I_C=1.91$ mA, $V_{CE}=5.28$ V b. 2.86 mA, 0.414 V (sınırda aktif) c. $\beta=243.5$

6.2

← Soru

Baz akımını yalnız R_B ve V_{CC} belirler: $I_B=(V_{CC}-0.7)/R_B$. Kollektör akımı βI_B olduğundan doğrudan β ile orantılıdır. **A** doğrudur.

- (B): R_B büyüdükçe I_B, dolayısıyla I_C küçülür.
- (C): Asıl sorun β'dır; V_{BE}'nin 0.1 V'luk değişimi $V_{CC}-0.7$ yanında küçüktür.
- (D): R_C büyüyünce $V_{CE}=V_{CC}-I_CR_C$ düşer; $\beta I_BR_C>V_{CC}-0.2$ olduğunda transistör doyuma girer.
- (E): Tersidir; emetör direnci $(I_B=(V_{CC}-0.7)/(R_B+(\beta+1)R_E))$ β arttığında I_B'yi azaltarak duyarlılığı düşürür.

CEVAP A

6.10

← Soru

Varsayımlar: BJT aktif bölgede; kondansatör olmadığı için işaret Q noktasını DC yük doğrusu üzerinde kaydırır.

a. Yük doğrusu $V_{CE}=10-I_CR_{\text{dc}}$, $R_{\text{dc}}=R_C+R_E/\alpha=3+0.75(151/150)=3.755$ kΩ. Kesim yönünde salınım $V_{CC}-V_{CE}$, doyum yönünde $V_{CE}-0.2$; ikisi eşit olmalı:

$$V_{CE}=\frac{V_{CC}+0.2}{2}=5.10\ \text{V},$$

$$I_C=\frac{10-5.1}{3.755}=1.305\ \text{mA}.$$

Tepe salınım $5.1-0.2=4.90$ V'tur.

ertansinansahin.com

b. Thévenin: $V_{\text{Th}} = 10(15/83) = 1.807$ V, $R_{\text{Th}} = 68 \parallel 15 = 12.29$ kΩ;

$$I_B = \frac{1.807 - 0.7}{12.29 + 151(0.75)} = \frac{1.107}{125.5} = 8.820\ \mu\text{A},$$

$$I_C = 1.323\ \text{mA}, \quad I_E = 1.332\ \text{mA},$$

$$V_{CE} = 10 - 1.323(3) - 1.332(0.75) = 5.03\ \text{V}.$$

$V_{CE} > 0.2$ V: aktif. Kesim yönü $10 - 5.032 = 4.968$ V, doyum yönü $5.032 - 0.2 = 4.832$ V: simetrik salınım 4.83 V (doyum sınırlı); idealin (4.90 V) %1.4 altında. Q noktası ideal noktaya ($I_C = 1.305$ mA) çok yakındır.

c. Aynı bağıntıyla:

$$\beta = 100: \quad I_C = 1.258\ \text{mA}, \quad V_{CE} = 5.27\ \text{V},$$

$$\beta = 300: \quad I_C = 1.395\ \text{mA}, \quad V_{CE} = 4.76\ \text{V}.$$

$\beta = 100$'de salınımı kesim sınırlar: $10 - 5.274 = 4.73$ V. $\beta = 300$'de doyum sınırlar: $4.764 - 0.2 = 4.56$ V.

Kontrol: İki salınım da (a)'daki ideal 4.90 V'tan küçüktür: $\beta = 100$'de %3.6, $\beta = 300$'de %6.9.

Not: Bölücü ve R_E, β üç kat değişse de Q noktasını yük doğrusunun ortasına yakın tutar.

CEVAP a. $I_C = 1.305$ mA, $V_{CE} = 5.10$ V, 4.90 V b. $I_C = 1.323$ mA, $V_{CE} = 5.03$ V, 4.83 V c. 4.73 V ($\beta = 100$), 4.56 V ($\beta = 300$)

ertansinansahin.com

8 MOSFET VE JFET: YAPI, KARAKTERİSTİKLER VE DC ANALİZ

8.2

← Soru

a. $V_{OV} = V_{GS} - V_t$ ile bölge seçilir (Tablo E-4 notu):

(0.9 V, 5 V): $V_{OV} = -0.3\ \text{V} < 0$; kanal yoktur, **kesim**, $I_D = 0$.

(2.0 V, 3.0 V): $V_{OV} = 0.8$ V, $V_{DS} = 3.0\ \text{V} \geq 0.8$ V, **doyma**:

$$I_D = \tfrac{1}{2}(6)(0.8)^2 = 1.92\ \text{mA}.$$

(2.7 V, 0.6 V): $V_{OV} = 1.5$ V, $V_{DS} = 0.6\ \text{V} < 1.5$ V, **triyot**:

$$I_D = 6\big(1.5(0.6) - \tfrac{1}{2}(0.6)^2\big) = 6(0.72) = 4.32\ \text{mA}.$$

b. Küçük v_{DS} değerinde $i_D \approx k_n V_{OV} v_{DS}$:

$$r_{DS} = \frac{1}{k_n V_{OV}} = \frac{1}{6(1.5)} = 0.1111\ \text{k}\Omega = 111\ \Omega.$$

Kontrol: İkinci durumda doymanın başladığı gerilim $V_{DS} = V_{OV} = 0.8$ V'tur; bu noktada triyot bağıntısı da $6(0.8 \cdot 0.8 - 0.32) = 1.92$ mA verir (iki bağıntı sınırda birleşir).

CEVAP a. kesim, 0; doyma, 1.92 mA; triyot, 4.32 mA b. 111 Ω

8.7

← Soru

Varsayımlar: PMOS doymada; $\lambda = 0$.

a. Tablo E-4: $k_p = 2$ mA/V^2, $|V_t| = 1$ V. Kapı bölücüsü:

$$V_G = 10\,\frac{680}{1150} = 5.913\ \text{V}.$$

Kaynak gerilimi ve kaynak–kapı gerilimi:

$$V_S = 10 - 1.5 I_D,$$

$$V_{SG} = V_S - V_G = 4.087 - 1.5 I_D;$$

doymada $I_D = \tfrac{1}{2}(2)V_{OV}^2 = V_{OV}^2$ ve $V_{OV} = V_{SG} - 1$:

$$1.5V_{OV}^2 + V_{OV} - 3.087 = 0,$$

$$V_{OV} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 18.52}}{3} = 1.139\ \text{V},$$

$$I_D = (1.139)^2 = 1.298 \approx 1.30\ \text{mA}.$$

$$V_S = 10 - 1.5(1.298) = 8.05\ \text{V},$$

$$V_D = 1.298(3.9) = 5.06\ \text{V}.$$

$V_{SD} = 8.052 - 5.064 = 2.99\ \text{V} \geq V_{OV} = 1.14$ V: doyma varsayımı doğrudur.

b. $V_{SD} \geq V_{SG} - |V_t|$ koşulu $V_D \leq V_G + |V_t| = 6.913$ V demektir; I_D, R_D'ye bağlı değildir:

$$R_D \leq \frac{6.913}{1.298} = 5.32\ \text{k}\Omega.$$

Kontrol: $V_{SG} = 8.052 - 5.913 = 2.139$ V, $V_{OV} = 1.139$ V, $\frac{1}{2}(2)(1.139)^2 = 1.298$ mA.

CEVAP a. $I_D = 1.30$ mA, $V_S = 8.05$ V, $V_D = 5.06$ V; doyma b. 5.32 kΩ

8.12

← Soru

Giriş 0 iken NMOS'un $v_{GS} = 0 < V_{tn}$ (kesim), giriş V_{DD} iken PMOS'un $v_{SG} = 0 < |V_{tp}|$ (kesim). Akım yolu olmadığından iletimdeki transistörün akımı sıfırdır; $i_D = 0$ triyotta $v_{DS} = 0$ demektir ve çıkış rayın kendisine oturur. **E** doğrudur.

- (A): Tersidir: giriş 0 iken PMOS iletimde ($v_{SG} = V_{DD}$), NMOS kesimdedir; çıkış V_{DD}'dir.
- (B): "1" çıkışta NMOS kesimdedir; DC akım yoktur (CMOS'un düşük durgun gücü buradan gelir).
- (C): k_p küçülünce PMOS zayıflar, $r = \sqrt{k_n/k_p}$ büyür ve V_M düşer.
- (D): V_M'de iki transistör de doymadadır; VTC'nin en dik yeri budur.

CEVAP E

ertansinansahin.com

EK: TABLOLAR

Bu ekteki tablolar soruların çözümünde kullanılır. Değerler fiziksel sabitler, ölçülmüş malzeme verileri, IEC 60063 standart değerleri ve genel veri sayfası aralıklarından seçilmiş **tipik ve yuvarlak** değerlerdir; belirli bir ürünün verisi değildir. Soru metni bir parametreyi vermiyorsa bu ekteki **varsayılan** değer (tablolarda kalın) kullanılır: oda sıcaklığı 300 K, $V_T = 25$ mV, Si diyotta $V_{D0} = 0.7$ V, BJT'de $V_{BE(\text{on})} = 0.7$ V, $V_{CE(\text{sat})} = 0.2$ V, $\beta = 100$ (güç BJT'sinde 50, Tablo E-3); V_A ya da λ verilmedikçe $r_o = \infty$; ayrık MOSFET'te $k_n = 4$ mA/V^2, $V_t = 1$ V, JFET'te $I_{DSS} = 8$ mA, $V_P = -4$ V (Tablo E-4); op-amp aksi söylenmedikçe idealdir. Tabloda bulunmayan değerler için **doğrusal enterpolasyon** yapılır: $x_1 < x < x_2$ ise $y = y_1 + (y_2 - y_1)(x - x_1)/(x_2 - x_1)$. Tablo numaraları iki kitapta ortaktır; bu kitapta E-1–E-7 basılmıştır.

Bu örnekte Ek'ten yalnız seçilen soruların kullandığı tablolar (E-2, E-3, E-4) vardır. Kitabın tamamındaki Ek 7 tablo ve 6 sayfadır: fiziksel sabitler ve yarıiletken verileri, diyot, BJT, MOSFET ve JFET parametreleri, küçük işaret özeti, standart direnç ve kondansatör değerleri, desibel çizelgesi ve Bode kuralları.

Tablo E-2 Diyot model parametreleri

(a) Diyot türleri

Tür	I_S	n	n aralığı	V_D (akım)	Sabit düşüm	Parçalı doğrusal			$V_{R,\text{maks}}$	$I_{F,\text{maks}}$
	A			V	V_{D0} (V)	V_{D0} (V)	r_D (Ω)	aralık	V	A
Küçük işaret (Si)	10^{-15}	1.00	1–2	0.691 (1 mA)	0.7	0.684	6.40	1 mA–10 mA	100	0.2
Doğrultucu, güç (Si)	2×10^{-8}	2.00	1.5–2	0.886 (1 A)	0.8	0.758	0.128	100 mA–1 A	50–1000	1–3
Schottky	10^{-7}	1.05	1–1.1	0.302 (10 mA)	0.3	0.295	0.672	10 mA–100 mA	20–60	1

Üstel model $i_D = I_S[e^{v_D/(nV_T)} - 1]$, $V_T = 25$ mV; V_D sütunu bu modelle parantezdeki akımda hesaplanmıştır. Parçalı doğrusal model ($v_D = V_{D0} + i_D r_D$) üstel eğrinin verilen akım aralığındaki kirişidir. Küçük işaret direnci $r_d = nV_T/I_D$. I_S sıcaklıkla yaklaşık her 5 K'de iki katına çıkar; sabit akımda $dV_D/dT \approx -2$ mV/K. Aksi söylenmedikçe Si diyot için sabit düşüm modeli, $V_{D0} = 0.7$ V.

(b) Işık yayan diyot (LED), 20 mA

Renk	λ	$h\nu$	V_F	V_F aralığı	$I_{F,\text{maks}}$
	nm	eV	V	V	mA
Kızılötesi	940	1.32	1.3	1.1–1.5	50
Kırmızı	630	1.97	2.0	1.8–2.2	30
Sarı	590	2.10	2.1	1.9–2.4	30
Yeşil (InGaN)	525	2.36	3.1	2.8–3.5	30
Mavi	470	2.64	3.2	2.9–3.6	30
Beyaz (mavi + fosfor)	—	—	3.2	2.9–3.6	30

λ: tepe dalga boyu; $h\nu = hc/\lambda$ foton enerjisi. LED sabit düşüm modeliyle (V_F) çözülür; aksi söylenmedikçe $I_F = 20$ mA.

(c) Zener diyotu, 0.5 W

V_Z	I_{ZT}	r_z	V_{Z0}	$I_{Z,\text{maks}}$	TC
V	mA	Ω	V	mA	%/K
3.3	20	30	2.70	152	−0.06
4.7	20	20	4.30	106	−0.02
5.6	20	10	5.40	89	+0.02
6.2	20	7	6.06	81	+0.04
6.8	20	5	6.70	74	+0.05
8.2	20	8	8.04	61	+0.06
10	20	15	9.70	50	+0.065
12	10	25	11.75	42	+0.07
15	10	30	14.70	33	+0.075
20	5	50	19.75	25	+0.08
24	5	70	23.65	21	+0.085

V_Z: I_{ZT} sınama akımındaki gerilim; model $v_Z = V_{Z0} + r_z i_Z$, $V_{Z0} = V_Z - r_z I_{ZT}$. Diz akımı $I_{ZK} = 0.25$ mA (bütün satırlar); $I_{Z,\text{maks}} = P_Z/V_Z$, $P_Z = 0.5$ W. TC: V_Z'nin sıcaklık katsayısı.

Tablo E-3 BJT parametreleri

(a) Model parametreleri

Tür	Tip	β aralığı	β	$V_{BE(\text{on})}$ V	$V_{CE(\text{sat})}$ V	I_S A	V_{BE} (akım) V	$\lvert V_A\rvert$ V
Küçük işaret	npn	100–300	**100**	0.7	0.2	10^{-15}	0.69 (1 mA)	100
Küçük işaret	pnp	80–250	**100**	0.7	0.2	10^{-15}	0.69 (1 mA)	50
Orta güç	npn	40–250	**100**	0.7	0.3	10^{-14}	0.72 (30 mA)	100
Güç	npn	20–100	**50**	0.7	0.5	10^{-12}	0.67 (500 mA)	100
Güç	pnp	20–100	**50**	0.7	0.5	10^{-12}	0.67 (500 mA)	80

Kalın β: varsayılan değer (soruda verilmezse). pnp'de $V_{EB(\text{on})}$ ve $V_{EC(\text{sat})}$ okunur. $\alpha = \beta/(\beta+1)$; $i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$, $V_T = 25$ mV; V_{BE} sütunu bu bağıntıyla parantezdeki akımda hesaplanmıştır. DC çözümde $V_{BE(\text{on})} = 0.7$ V kullanılır; V_{BE}'nin sıcaklık katsayısı yaklaşık -2 mV/K. Early etkisi ($r_o = \lvert V_A\rvert/I_C$) yalnız soruda V_A verilince hesaba katılır.

(b) Frekans, sınır ve ısıl değerler

Tür	Tip	f_T MHz	C_μ pF	$I_{C,\text{maks}}$ A	$\lvert V_{CEO}\rvert$ V	$T_{J,\text{maks}}$ °C	θ_{JC} °C/W	θ_{JA} °C/W	$P_{D,\text{maks}}$ W
Küçük işaret	npn	300	2	0.20	40	150	80	200	0.63 (T_A)
Küçük işaret	pnp	250	3	0.20	40	150	80	200	0.63 (T_A)
Orta güç	npn	100	10	1.5	60	150	10	100	1.3 (T_A)
Güç	npn	3	200	10	80	150	1.5	60	83 (T_C)
Güç	pnp	3	300	10	80	150	1.5	60	83 (T_C)

C_μ: $\lvert V_{CB}\rvert \approx 5$ V'ta; $C_\pi = g_m/(2\pi f_T) - C_\mu$. $P_{D,\text{maks}} = (T_{J,\text{maks}} - 25\,^\circ\text{C})/\theta$: küçük işaret ve orta güçte ortam 25 °C (θ_{JA}), güçte gövde 25 °C (θ_{JC}). Soğutuculu düzende $T_J = T_A + P_D(\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA})$; yalıtkan pullu montajda $\theta_{CS} \approx 0.5$ °C/W.

Tablo E-4 MOSFET ve JFET parametreleri

(a) İki örnek CMOS süreci (tümleşik devre)

Parametre	Birim	0.5 µm benzeri		0.18 µm benzeri	
		NMOS	PMOS	NMOS	PMOS
En küçük kanal boyu $L_{\min}$	µm	0.50		0.18	
Besleme V_{DD}	V	3.3		1.8	
Oksit kalınlığı t_{ox}	nm	12		4.2	
$C_{ox} = \varepsilon_{ox}/t_{ox}$	fF/µm^2	2.88		8.22	
Etkin hareketlilik μ	cm^2/(V·s)	470	160	420	110
$k' = \mu C_{ox}$	µA/V^2	**135**	**46.0**	**345**	**90.4**
Eşik gerilimi V_t	V	0.65	−0.85	0.45	−0.50
$\lvert V_A' \rvert$ ($V_A = V_A' L$)	V/µm	22	15	6	8
Gövde katsayısı γ	V$^{1/2}$	0.55	0.60	0.40	0.45
$2\phi_f$	V	0.75		0.85	
Örtüşme kapasitesi C_{ov}	fF/µm	0.35		0.40	

Doymada $i_D = \tfrac{1}{2} k_n' (W/L)(v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$, $v_{DS} \geq v_{OV} = v_{GS} - V_t$; triyotta $i_D = k_n' (W/L)[v_{OV} v_{DS} - \tfrac{1}{2} v_{DS}^2]$. PMOS'ta v_{SG}, v_{SD} ve $\lvert V_t \rvert$ okunur. $\lambda = 1/\lvert V_A \rvert$; gövde etkisi $V_t = V_{t0} + \gamma[\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f}]$. k' değerleri sorularda doğrudan kullanılır. Kanal boyu modülasyonu ve gövde etkisi yalnız soruda istenince hesaba katılır.

(b) Ayrık MOSFET (zenginleştirme tipi)

Tür	k_n mA/V^2	aralık mA/V^2	V_t V	aralık V	λ V^{-1}	C_{gs} pF	C_{gd} pF	$I_{D,\text{maks}}$ A	$V_{DS,\text{maks}}$ V	$R_{DS(\text{on})}$ Ω
Küçük işaret NMOS	**4.0**	1–20	**1.0**	0.8–2.5	0.01	20	5	0.2	60	—
Küçük işaret PMOS	**2.0**	0.5–10	**−1.0**	−0.8 … −2.5	0.02	30	8	0.2	−60	—
Güç NMOS (anahtarlama)	**2000**	500–5000	**3.0**	2–4	0	1500	100	20	100	0.071

$k_n = k_n' (W/L)$; kalın değerler varsayılan. PMOS satırında k_p; V_t ve $V_{DS,\text{maks}}$ negatif. $R_{DS(\text{on})}$: tam iletimde ($v_{GS} = 10$ V) savak–kaynak direnci.

(c) JFET

Tür	I_{DSS} mA	aralık mA	V_P V	aralık V	λ V^{-1}	g_{m0} mA/V	C_{gs} pF	C_{gd} pF
n kanallı JFET	**8**	2–20	**−4.0**	−0.5 … −8	0.01	4.00	4	1.5
p kanallı JFET	**6**	2–15	**3.0**	+0.5 … +6	0.01	4.00	6	2

Doymada $i_D = I_{DSS}(1 - v_{GS}/V_P)^2$, $\lvert v_{DS} \rvert \geq \lvert v_{GS} - V_P \rvert$; $g_{m0} = 2I_{DSS}/\lvert V_P \rvert$, $g_m = g_{m0}(1 - V_{GS}/V_P)$. Kalın değerler varsayılan.

KİTABIN TAMAMINDA

- 11 ünite, 150 soru ve hepsinin adım adım çözümü.
- Her ünitenin başında, soruların dayandığı bağıntıları özetleyen hatırlatma kutusu.
- Temel, orta ve ileri düzeyde sorular; her sorunun altında kendi çözümünüz için noktalı alan.
- Sorudan çözüme, çözümden soruya tek tıkla geçiş.
- Kitabın sonunda 7 tablo (6 sayfa): fiziksel sabitler ve yarıiletken verileri, diyot, BJT, MOSFET ve JFET parametreleri, küçük işaret özeti, standart direnç ve kondansatör değerleri (E12, E24), desibel çizelgesi ve Bode kuralları.

ertansinansahin.com