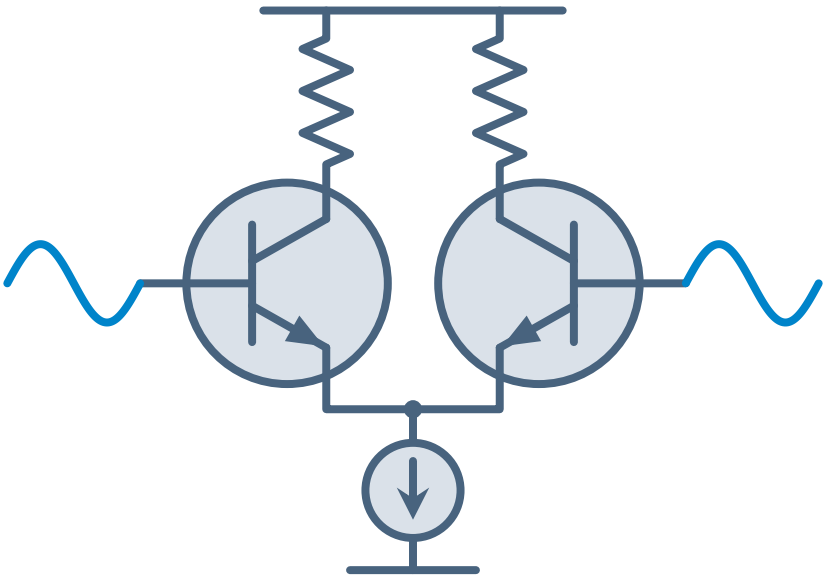
ELEKTRONİK 2

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:** Eleman parametreleri (BJT, MOSFET, genel amaçlı op-amp), küçük işaret özeti, standart değerler (E12, E24), desibel ve Bode kuralları, geri besleme ve çıkış katı ölçüt tabloları ile Butterworth ve Chebyshev filtre tabloları 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 1* kitabındakiyle aynıdır; bu konuyu birinci derste işleyenler için tekrar niteliğindedir. Diyot, BJT ve MOSFET devreleri ile tek katlı kuvvetlendiriciler bilinir kabul edilir ve gerektiği yerde hatırlatma kutusunda kısaca verilir.
- **İleri ünite:** 21. ünite (Aktif filtreler) derslerin yalnız bir kısmında işlenir ve içindekilerde İLERİ diye işaretlenmiştir. Dersiniz bu konuyu kapsamıyorsa bu üniteyi atlayabilirsiniz.
- **Vize ve final:** Vize çoğunlukla Ünite 11–15'i (frekans yanıtı, akım aynaları, diferansiyel kuvvetlendirici, çok katlı kuvvetlendiriciler), final bütün kitabı kapsar; konu seçimi okuldan okula değiştiği için üniteleri kendi izlencenize göre seçin. Sonuçları bir devre benzetim programıyla da doğrulayabilirsiniz.

İçindekiler

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

11 Frekans Yanıtı: Tek Katlı Kuvvetlendiriciler ..... 16 soru 4
12 **Akım Aynaları, Akım Kaynakları ve Aktif Yükler** ..... 14 soru 16
13 Diferansiyel Kuvvetlendirici ..... 18 soru 26
14 Çok Katlı Kuvvetlendiriciler ve Op-Amp İç Yapısı ..... 12 soru 40
15 Kaskod, İzleyici ve Diferansiyel Katların Frekans Yanıtı ..... 10 soru 52
16 Geri Besleme ..... 18 soru 60
17 **Kararlılık ve Frekans Dengelemesi** ..... 12 soru 73
18 Op-Amp Uygulamaları ve İdeal Olmayan Davranış ..... 14 soru 81
19 Çıkış Katları, Güç Kuvvetlendiricileri ve Doğrusal Düzenleyiciler ..... 14 soru 91
20 **Osilatörler, Karşılaştırıcılar ve Dalga Üreteçleri** ..... 12 soru 100
21 Aktif Filtreler İLERİ ..... 10 soru 109

Çözümler 116

Ek: Tablolar 187

12. ÜNİTE

AKIM AYNALARI, AKIM KAYNAKLARI VE AKTİF YÜKLER

model (Tablo E-5)

$$g_m = \frac{I_C}{V_T},\quad g_m = \frac{2I_D}{V_{OV}},\quad r_o = \frac{V_A}{I},\quad V_A = V_A' L$$

BJT aynası (alan oranı m)

$$I_O = \frac{m\, I_{\text{REF}}}{1 + (m+1)/\beta},\quad m = 1:\ I_O = \frac{I_{\text{REF}}}{1 + 2/\beta}$$

baz akımı telafili ayna

$$I_O = \frac{I_{\text{REF}}}{1 + 2/[\beta(\beta+1)]}$$

MOS aynası; çıkış direnci

$$I_O = I_{\text{REF}} \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1},\quad I_O \approx I_{O0} + \frac{V_O - V_{GS}}{r_{o2}}$$

Widlar kaynağı

$$I_O R_E = V_T \ln \frac{I_{\text{REF}}}{I_O},\quad R_o = r_o\left[1 + g_m(R_E \parallel r_\pi)\right]$$

Wilson kaynağı

$$I_O = \frac{I_{\text{REF}}}{1 + 2/[\beta(\beta+2)]},\quad R_o \approx \frac{\beta r_o}{2}$$

MOS kaskod aynası

$$R_o = 2r_o + g_m r_o^2 \approx g_m r_o^2,\quad V_{O,\min} = V_t + 2V_{OV}$$

aktif yüklü OE ve OS

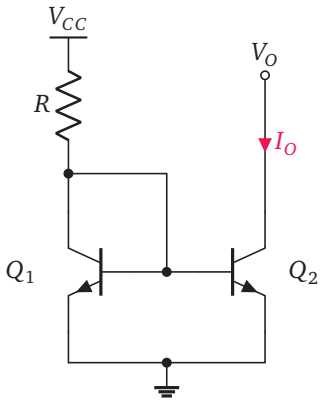
$$A_v = -g_{m1}(r_{o1} \parallel r_{o2}),\quad g_m r_o = \frac{V_A}{V_T} \text{ ya da } \frac{2V_A}{V_{OV}}$$

Akım aynasında referans akımı I_{REF}, çıkış akımı I_O, çıkış ucunun gerilimi V_O, çıkış direnci R_o ile gösterilir; I_{O0}, Early etkisi ihmal edilerek bulunan çıkış akımıdır. Gösterim önceki ünitelerdeki gibidir: i_C toplam anlık, I_C DC, i_c küçük işaret değeridir. Aksi söylenmedikçe $V_T = 25$ mV, $V_{BE(\text{on})} = V_{EB(\text{on})} = 0.7$ V, $V_{CE(\text{sat})} = 0.2$ V; aynadaki transistörler eştir (eşlenmiş: aynı I_S ya da aynı k_n', V_t); β verilmezse Tablo E-3'teki varsayılan değer ($\beta = 100$), V_A ya da λ verilmezse $r_o = \infty$ alınır. MOSFET doyma bölgesinde $i_D = \frac{1}{2}k_n V_{OV}^2$, $k_n = k_n'(W/L)$; gövde etkisi ihmal edilir. Süreç verileri Tablo E-4'te, model bağıntıları ve r_o'lu bağıntılar Tablo E-5'tedir. Direnç kiloohm, akım miliamper, gerilim volt; g_m miliamper bölü volt (mA/V) cinsindendir.

Temel akım aynası

12.2

★☆☆ Çözüm →



Şekildeki akım aynasında $V_{CC} = 9$ V, $R = 15$ kΩ; transistörler eştir, $\beta = 125$, $V_A = 75$ V.

a. I_{REF} ve (Early etkisi ihmal edilerek) I_O nedir? I_O, I_{REF}'ten yüzde kaç küçüktür?

b. Çıkış direnci r_{o2}'yi ve çıkış ucu $V_O = 6$ V'ta iken I_O'yu bulunuz.

Akım yönlendirme

12.6 ★☆☆ Çözüm →

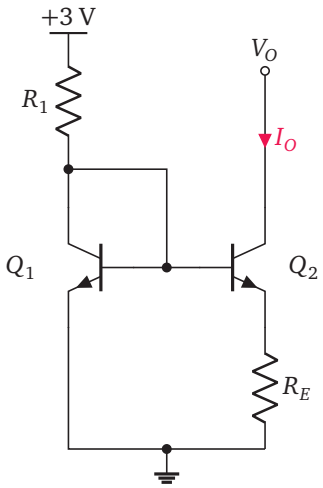
Bir NMOS akım yönlendirme devresinde referans transistörü M_1 ($W/L = 4\,\mu m/0.5\,\mu m$) $I_{REF} = 25\,\mu A$ taşır. Aynı kapı–kaynak gerilimini gören M_2 ($6\,\mu m/1\,\mu m$) ile M_3 ($12\,\mu m/0.5\,\mu m$)'ün savakları birleştirilip tek bir yüke bağlanır. Yükün çektiği toplam akım nedir? ($\lambda = 0$; bütün transistörler doymada.)

A) 93.8 µA **B)** 113 µA **C)** 150 µA **D)** 75.0 µA **E)** 18.8 µA

Çıkış direnci; Widlar ve Wilson kaynakları

12.8 ★★★ Çözüm →

3 V'luk düğme pille çalışan bir uzaktan kumandanın tümleşik verici devresinde 20 µA'lik bir kutuplama akımı gerekir. Tümleşik devrede yüksek değerli direnç çok yer kapladığı için şekildeki Widlar kaynağı kullanılacak; $I_{REF} = 0.2$ mA seçilir. Bu süreçte dirençler 0.5 kΩ'luk adımlarla yapılabilir. Baz akımlarını ihmal ediniz.



a. R_1 ve R_E'yi hesaplayıp 0.5 kΩ'un en yakın katına yuvarlayınız.

b. Seçilen dirençlerle I_O ne olur? (Denklem yinelemeyle çözülür.)

c. Aynı akımı temel aynayla elde etmek için gereken R_1'i bulunuz; iki çözümün direnç toplamlarını ve pilden çektikleri akımı karşılaştırınız.

d. $\beta = 100$ ve $V_A = 75$ V ile çıkış direncini bulunuz; aynı akımdaki temel aynanınkiyle karşılaştırınız.

17. ÜNİTE

KARARLILIK VE FREKANS DENGELEMESİ

tek kutup: kapalı çevrim kutbu

$$\omega_{pf} = \omega_p(1 + A_0\beta), \quad A_{f0} = \frac{A_0}{1 + A_0\beta}$$

iki kutup: kapalı çevrim kutupları

$$s^2 + (\omega_1 + \omega_2)s + (1 + A_0\beta)\omega_1\omega_2 = 0$$

iki kutup: Q ve ω_0

$$\omega_0 = \sqrt{(1 + A_0\beta)\omega_1\omega_2}, \quad Q = \frac{\omega_0}{\omega_1 + \omega_2}$$

tepe ($Q > 0.707$)

$$\frac{|A_f|_{\text{maks}}}{A_{f0}} = \frac{Q}{\sqrt{1 - 1/(4Q^2)}}, \quad \omega_{\text{tepe}} = \omega_0\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$$

faz payı (kesişim frekansı f_c: $|A\beta| = 1$)

$$\phi_M = 180^\circ + \angle A\beta(jf_c)$$

kazanç payı (faz kesişim frekansı f_{180})

$$G_M = -20\log_{10}|A\beta(jf_{180})|$$

baskın kutup ve ikinci kutup ($f_c \approx \beta f_t$)

$$f_t = A_0 f_b, \quad \phi_M \approx 90^\circ - \arctan\frac{f_c}{f_{p2}}$$

Miller dengelemesi (kutup ayrılması)

$$f_{p1} \approx \frac{1}{2\pi g_{m2} R_2 R_1 C_C}, \; f_{p2} \approx \frac{g_{m2} C_C}{2\pi[C_1 C_2 + C_C(C_1 + C_2)]}$$

β geri besleme oranıdır ve aksi söylenmedikçe frekanstan bağımsızdır; $A\beta$ çevrim kazancıdır. Kuvvetlendiricinin kazancı alçak frekansta A_0, kutupları $f_1 < f_2 < \dots$ ile verilir ve kutuplar sol yarı düzlemdedir; geri beslemeli devre, $1 + A(s)\beta = 0$'ın bütün kökleri sol yarı düzlemdeyse kararlıdır. Bode çiziminde bu, $|A\beta| = 1$ olduğu f_c frekansında fazın $-180°$'ye ulaşmamasıdır; faz payı ϕ_M ve kazanç payı G_M bunun ne kadar sağlandığını ölçer. Dengelenmiş op-amp'ın birim kazanç frekansı $f_t = A_0 f_b$'dir ve β'lı devrede çevrim kazancı yaklaşık $f_c \approx \beta f_t$'de 1'e iner. "Tablo E-8'deki op-amp" denirse f_t, A_0 ve R_o oradan alınır. Desibel çizelgesi ve Bode kuralları Tablo E-7'de, standart değerler (E12, E6) Tablo E-6'dadır. s rad/s, f hertz cinsindendir; açılar derecedir.

Kutupların geri beslemeyle yer değiştirmesi

17.2 ★☆☆ Çözüm →

Kazancı (s, rad/s cinsinden)

$$A(s) = \frac{400}{(1 + s/2\times10^4)(1 + s/5\times10^5)}$$

olan bir kuvvetlendiriciye frekanstan bağımsız β ile negatif geri besleme uygulanır. β hangi değeri aşınca kapalı çevrim kutupları karmaşık (eşlenik çift) olur?

A) 0.0313

B) 0.0169

C) 0.0144

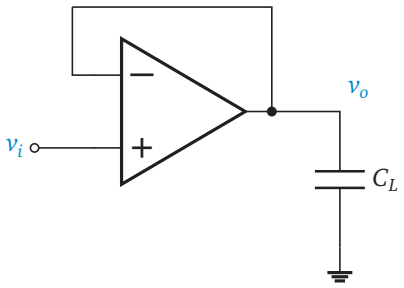
D) 0.00250

E) Hiçbir β'da; iki kutuplu kuvvetlendiricinin kapalı çevrim kutupları hep gerçektir.

Bode ile kararlılık: kazanç ve faz payı

17.6 ★★☆ Çözüm →

Bir kuvvetlendiricinin çıkış işareti, birkaç metrelik ekranlı bir kabloyla uzaktaki bir gösterge paneline taşınır; kablo, tampon olarak kullanılan gerilim izleyiciyi kapasitif olarak yükler. Tablo E-8'deki CMOS op-amp, gerilim izleyici olarak $C_L = 470$ pF'lık kapasitif yükü (kablonun kapasitesi ve panelin girişi) sürer. Op-amp tek kutuplu (f_t) ve açık çevrim çıkış direnci R_o olan modelle gösterilir.



a. R_o ile C_L'nin oluşturduğu kutbu ve faz payını bulunuz.

b. Faz payının en az 45° olması için C_L en çok kaç pF olabilir?

Baskın kutupla dengeleme

17.8 ★★☆ Çözüm →

Alçak frekans kazancı $A_0 = 1000$ olan bir kuvvetlendiricinin baskın kutbu, toplam direnci $R = 40$ kΩ, kapasitesi $C = 5$ pF olan bir iç düğümden gelir; öteki kutuplar 10 MHz ve 60 MHz'dedir. Kuvvetlendirici birim kazançlı izleyici ($\beta = 1$) olarak kullanılacak.

a. Özgün baskın kutup nerededir?

b. $|A|$'nın 10 MHz'de 0 dB'ye inmesi için bu düğüme topraktan eklenmesi gereken kapasite nedir?

c. Faz payını, kesişim frekansını 10 MHz alarak tahmin ediniz.

d. Özgün kutup yerinde kalıp yeni bir baskın kutup eklenseydi açık çevrim bant genişliği ne olurdu; kutbu kaydırmak kaç kat geniş bant verir?

20. ÜNİTE

OSİLATÖRLER, KARŞILAŞTIRICILAR VE DALGA ÜRETEÇLERİ

Barkhausen ölçütü	$A(j\omega_0)\beta(j\omega_0) = 1$
Wien köprüsü	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi RC}, \quad A \geq 3$
RC faz kaydırmalı	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}, \quad \dfrac{R_f}{R} \geq 29$
Colpitts	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_1C_2/(C_1+C_2)}}, \quad g_mR \geq \dfrac{C_2}{C_1}$
Hartley	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2)C}}, \quad g_mR \geq \dfrac{L_1}{L_2}$
kristal	$f_s = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_kC_k}}, \quad f_p = f_s\sqrt{1+\dfrac{C_k}{C_p}}$
evirmeyen Schmitt (eşikler)	$V_{TH} = -V_{TL} = L\dfrac{R_1}{R_2}$
RC dolma/boşalma süresi	$t = RC\ln\dfrac{V_\infty - V_{\text{baş}}}{V_\infty - V_{\text{son}}}$
kare/üçgen üreteci	$\hat{V}_{\text{üç}} = L\dfrac{R_1}{R_2}, \quad f = \dfrac{R_2}{4R_1RC}$
555 benzeri: eşikler	$\frac{2}{3}V_{CC}$ (ya da V_{CV}), $\frac{1}{3}V_{CC}$ ($V_{CV}/2$)
tek kararlı; kararsız	$T = RC\ln 3; \quad t_H = (R_A+R_B)C\ln 2,\ t_L = R_BC\ln 2$

Op-amp'lar aksi söylenmedikçe idealdir; karşılaştırıcı ve Schmitt devrelerinde çıkış iki doyma düzeyinden $(+L, -L)$ birindedir ve anında geçer. Op-amp'ın tipik değerleri (salınım, yükselme hızı) Tablo E-8'de, osilatör koşulları Tablo E-9(c)'de, ayrık MOSFET değerleri Tablo E-4'te, standart değerler (E24) Tablo E-6'dadır. L ve C kayıpsızdır; LC osilatörlerde R çıkış düğümündeki toplam dirençtir (yük ve r_o dâhil), kuvvetlendiricinin giriş direnci sonsuzdur. 555 benzeri zamanlayıcıda iç karşılaştırıcıların eşikleri $\frac{2}{3}V_{CC}$ ve $\frac{1}{3}V_{CC}$'dir; kontrol ucuna V_{CV} uygulanırsa V_{CV} ve $V_{CV}/2$ olur. Doluluk oranı, çıkışın yüksek kaldığı sürenin periyoda oranıdır.

Barkhausen ölçütü ve RC osilatörler

20.2

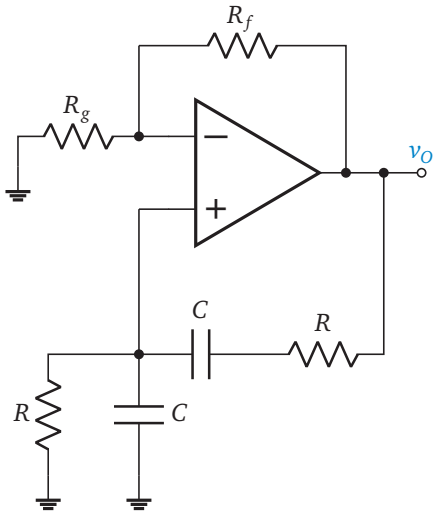
★☆☆ Çözüm →

Şekildeki Wien köprüsü osilatöründe $R = 12\ \text{k}\Omega$, $C = 8.2\ \text{nF}$, $R_g = 10\ \text{k}\Omega$.

a. Salınım frekansını bulunuz.

b. Salınımın sürmesi için R_f en az kaç kiloohm olmalıdır?

c. $R_f = 22\ \text{k}\Omega$ seçilirse f_0'daki çevrim kazancı nedir?

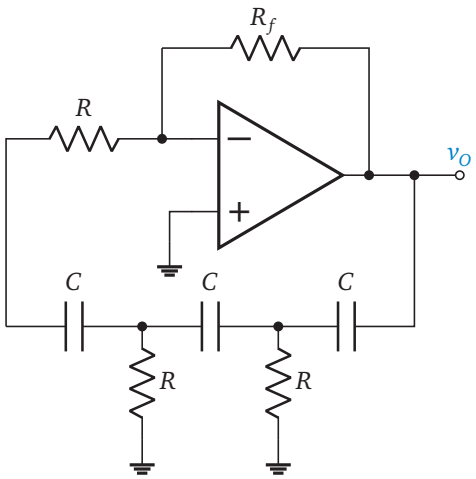


20.3 ★★☆ Çözüm →

Şekildeki RC faz kaydırmalı osilatörde üç kondansatör de $C = 4.7$ nF'dır; üçüncü R eviren kuvvetlendiricinin giriş direncidir (sanal toprağa bağlıdır).

a. Salınım frekansı yaklaşık 1.5 kHz olsun: R'yi hesaplayıp E24'ten seçiniz ve seçilen değerle f_0'ı bulunuz.

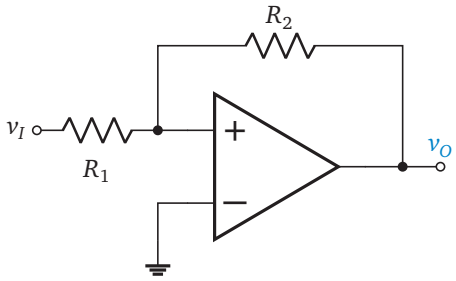
b. En küçük R_f'yi bulunuz; salınımın başlaması için E24'ten bir değer seçiniz ve f_0'daki çevrim kazancını bulunuz.



Karşılaştırıcı ve Schmitt tetikleyici

20.8 ★☆☆ Çözüm →

Şekildeki evirmeyen Schmitt tetikleyicide $R_1 = 10\ \text{k}\Omega$, $R_2 = 100\ \text{k}\Omega$; op-amp'ın çıkışı ± 12 V'ta doyar. Çıkışın değiştiği giriş eşikleri aşağıdakilerden hangisidir?



A) ± 1.09 V **B)** ± 1.20 V **C)** ± 12.0 V **D)** 0 ve $+1.20$ V **E)** ± 0.600 V

ÇÖZÜMLER

12 AKIM AYNALARI, AKIM KAYNAKLARI VE AKTİF YÜKLER

12.2

← Soru

Varsayımlar: iki transistör de aktif bölgede; Q_1 diyot bağlıdır ($V_{CB} = 0$).

a. Q_1'in kollektörü $V_{BE} = 0.7$ V'tadır:

$$I_{\text{REF}} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} = \frac{9 - 0.7}{15} = 0.5533 \approx 0.553 \text{ mA},$$

$$I_O = \frac{I_{\text{REF}}}{1 + 2/\beta} = \frac{0.5533}{1.016} = 0.5446 \approx 0.545 \text{ mA}.$$

Oran $1/1.016 = 0.9843$: I_O, I_{REF}'ten %1.57 küçüktür.

b. Bağıntılar Tablo E-5'te:

$$r_{o2} = \frac{V_A}{I_O} = \frac{75}{0.5446} = 137.7 \approx 138 \text{ k}\Omega,$$

$$I_O = I_{O0} + \frac{V_O - V_{BE}}{r_{o2}} = 0.5446 + \frac{6 - 0.7}{137.7}$$

$$= 0.5831 \approx 0.583 \text{ mA}.$$

Q_2'nin V_{CE}'si Q_1'inkinden 5.3 V büyük olduğundan çıkış akımı %7.07 artar.

Kontrol: Early bağıntısının öbür biçimi aynı sonucu verir:

$$I_{O0}\left(1 + \frac{5.3}{V_A}\right) = 0.5446(1.0707) = 0.5831 \text{ mA}.$$

$V_{CE2} = 6 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$: Q_2 aktif bölgededir.

CEVAP a. $I_{\text{REF}} = 0.553$ mA, $I_O = 0.545$ mA; %1.57 küçük b. $r_{o2} = 138$ kΩ; $I_O = 0.583$ mA

12.6

← Soru

Akım, W ile değil W/L oranıyla ölçeklenir. $(W/L)_1 = 8$, $(W/L)_2 = 6$, $(W/L)_3 = 24$:

$$I_2 = 25\,\tfrac{6}{8} = 18.75 \text{ μA}, \quad I_3 = 25\,\tfrac{24}{8} = 75 \text{ μA},$$

$$I_2 + I_3 = 93.75 \approx 93.8 \text{ μA}.$$

A doğrudur.

- (B): Yalnız genişlik oranı alınmış ($6/4 + 12/4 = 4.5$, 112.5 μA); M_2'nin kanal boyu iki kat olduğundan W/L'si 1.5 değil 0.75 kattır.
- (C): M_2 de M_3 gibi $W/L = 24$ sayılmış ($2 \times 3 \times 25$); boyutlar farklıdır.
- (D) ve (E): Yalnız M_3'ün (75.0 μA) ya da yalnız M_2'nin (18.8 μA) akımıdır; savaklar birleştiğinde akımlar toplanır.

CEVAP A

12.8

← Soru

Varsayımlar: iki transistör aktif bölgede; baz akımları ihmal; Q_1 diyot bağlı ($V_{BE1} = 0.7$ V).

a. $R_1 = (3 - 0.7)/0.2 = 11.5$ kΩ; bu zaten 0.5 kΩ'un katıdır. Baz–emetör çevriminden $V_{BE1} = V_{BE2} + I_O R_E$; $V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln(I_{\text{REF}}/I_O)$:

$$R_E = \frac{V_T}{I_O} \ln \frac{I_{\text{REF}}}{I_O} = \frac{0.025}{0.02} \ln 10 = 2.878 \approx 2.88 \text{ k}\Omega.$$

0.5 kΩ'un en yakın katı 3.0 kΩ'dur (2.5 kΩ daha uzaktır).

b. $I_{\text{REF}} = 2.3/11.5 = 0.200$ mA.
$I_O = (V_T/R_E)\ln(I_{\text{REF}}/I_O)$ yinelenir (I_O mikroamper cinsinden, $V_T/R_E = 8.333$ μA):
$20 \to 19.19 \to 19.53 \to 19.38 \to 19.45 \to \cdots$;

$$I_O = 8.333 \ln \frac{200}{I_O} = 19.43 \approx 19.4 \text{ μA}.$$

c. Temel aynada $I_O \approx I_{\text{REF}}$: $R_1 = 2.3/0.02 = 115$ kΩ. Widlar kaynağı $11.5 + 3.0 = 14.5$ kΩ ile yetinir; kazanç direnç alanındadır. Pil akımı ise Widlar'da $0.200 + 0.019 = 0.219$ mA, temel aynada $0.020 + 0.020 = 0.040$ mA'dir: Widlar kaynağı pil akımını azaltmaz, tümleşik devrede yer kazandırır.

d. $g_{m2} = 0.01943/0.025 = 0.7772$ mA/V,
$r_{\pi 2} = 100/0.7772 = 128.7$ kΩ,
$r_{o2} = 75/0.01943 = 3.860$ MΩ; $R_E \parallel r_{\pi 2} = 2.932$ kΩ.
Tablo E-5 (c):

$$R_o = r_{o2}\left[1 + g_{m2}(R_E \parallel r_{\pi 2})\right] = 3.860(3.278),$$

$$R_o = 12.66 \approx 12.7 \text{ MΩ}.$$

Aynı akımdaki temel aynanın çıkış direnci yalnız $r_o = 3.86$ MΩ'dur; emetör direnci R_o'yu 3.28 kat büyütür.

ertansinansahin.com

Kontrol: Bulunan değer denklemi sağlar:

$$8.333 \ln \frac{200}{19.43} = 8.333(2.332) = 19.43\ \mu\text{A}.$$

Q_1 diyotu, R_1 ve r_{o1} dâhil tam netlist çözümü $R_o = 12.65\ \text{M}\Omega$ verir; formülden farkı %0.04'tür.

CEVAP a. $R_1 = 11.5\ \text{k}\Omega$, $R_E = 3.0\ \text{k}\Omega$ (hesap $2.88\ \text{k}\Omega$) b. $I_O = 19.4\ \mu\text{A}$ c. $115\ \text{k}\Omega$; $14.5\ \text{k}\Omega$'a karşı $115\ \text{k}\Omega$; pil akımı 0.219 mA'e karşı 0.040 mA d. $R_o = 12.7\ \text{M}\Omega$ (temel ayna $3.86\ \text{M}\Omega$)

17 KARARLILIK VE FREKANS DENGELEMESİ

17.2

← Soru

$1 + A\beta = 0$'dan karakteristik denklem ($\omega_1\omega_2 = 10^{10}$):

$$s^2 + (2\times10^4 + 5\times10^5)s + (1 + 400\beta)10^{10} = 0.$$

Kökler, diskriminant sıfır olunca çakışır:

$$(5.2\times10^5)^2 = 4(1+400\beta)10^{10},$$

$$1 + 400\beta = 6.76 \Rightarrow \beta = \frac{5.76}{400} = 0.0144.$$

Bu β'da kutuplar $s = -2.6\times10^5$ rad/s'de çakışır; daha büyük β'da eşlenik çift olur. **C** doğrudur.

- (A): $Q = 0.707$ (en düz yanıt) koşuludur: $1 + 400\beta = (5.2\times10^5)^2/(2\times10^{10}) = 13.52$, $\beta = 0.0313$; kutuplar o noktada zaten karmaşıktır.
- (B): $6.76/400 = 0.0169$; 1 çıkarılmamıştır.
- (D): $1/A_0$'dır; kutup yerleriyle ilgisi yoktur.
- (E): β büyüdükçe iki gerçek kutup birbirine yaklaşır, çakışır ve sonra eşlenik çift olarak $j\omega$ eksenine paralel ayrılır; ama sol yarı düzlemde kalır (iki kutuplu sistem kararlıdır, salınım eğilimi artar).

CEVAP C

ertansinansahin.com

17.6

← Soru

a. Tablo E-8: $f_t = 10\ \text{MHz}$, $R_o = 200\ \Omega$. Op-amp'ın iç kaynağı R_o üzerinden C_L'yi sürer; çevrim kazancına ($\beta = 1$) ikinci bir kutup eklenir:

$$f_{CL} = \frac{1}{2\pi(200)(470\times10^{-12})} = 1.693\ \text{MHz}.$$

$$|A\beta| \approx \frac{f_t}{f}\,\frac{1}{\sqrt{1+(f/f_{CL})^2}} = 1.$$

$x = f^2$ ile $x + x^2/f_{CL}^2 = f_t^2$; MHz cinsinden $x^2/2.867 + x - 100 = 0$:

$$x = 15.56\ \text{MHz}^2 \Rightarrow f_c = 3.944\ \text{MHz}.$$

$$\phi_M = 90^\circ - \arctan\frac{3.944}{1.693} = 90^\circ - 66.77^\circ = 23.2^\circ.$$

Faz payı küçüktür; çıkışta belirgin aşma ve çınlama görülür.

b. $\phi_M = 45^\circ$ için $f_c = f_{CL}$; o frekansta $|A\beta| = (f_t/f_{CL})/\sqrt{2} = 1$:

$$f_{CL} = \frac{f_t}{\sqrt{2}} = 7.071\ \text{MHz},$$

$$C_L = \frac{1}{2\pi(200)(7.071\times10^6)} = 112.5\ \text{pF}.$$

Yük kapasitesi 4.2 kat büyük olduğundan çıkışa seri bir yalıtım direnci ya da kapasitif yük için dengelenmiş bir op-amp gerekir.

Kontrol: $A_0 = 10^5$ ve $f_b = 100$ Hz'lik tam modelle sayısal tarama: $f_c = 3.944$ MHz, $\phi_M = 23.2^\circ$; $C_L = 112.5$ pF'da $\phi_M = 45.0^\circ$.

CEVAP a. $f_{CL} = 1.693$ MHz, $\phi_M = 23.2^\circ$ b. $C_L \le 112.5$ pF

17.8

← Soru

a. Düğümün zaman sabitinden:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi(40\times10^3)(5\times10^{-12})},$$

$$f_1 = 795.8\ \text{kHz}.$$

b. Kutup kaydırılınca 10 MHz'de $|A| \approx A_0 f_1'/(10\ \text{MHz}) = 1$:

$$f_1' = \frac{10\ \text{MHz}}{1000} = 10.0\ \text{kHz},$$

$$C_{\text{top}} = \frac{1}{2\pi(40\times10^3)(10^4)} = 397.9\ \text{pF},$$

$$C_{\text{ek}} = 397.9 - 5 = 392.9\ \text{pF}.$$

c. 10 MHz'deki faz katkıları $\arctan(1000) = 89.94^\circ$, $\arctan 1 = 45.00^\circ$, $\arctan(1/6) = 9.46^\circ$; toplam

$-144.40°$:

$$\phi_M \approx 180° - 144.40° = 35.6°.$$

d. Yeni kutup f_D, $|A|$'yı özgün kutupta (795.8 kHz) 0 dB'ye indirmelidir:

$$f_D = \frac{795.8\ \text{kHz}}{1000} = 795.8\ \text{Hz}.$$

Kutbu kaydırmak 10.0 kHz'lik bant genişliği verir; bu, yeni kutup eklemekten $10\,000/795.8 = 12.57$ kat (özgün f_2/f_1 oranı kadar) geniştir: kaydırılan kutup ortadan kalktığı için kesişim, bir sonraki kutba (10 MHz) kadar uzatılabilir.

Kontrol: Tam hesap: $|A| = 1$, 7.814 MHz'de sağlanır (10 MHz'de $|A| = 0.697$); orada $\phi_M = 44.7°$. Ek kapasite düğüm empedansından da doğrulanır: 40 kΩ ‖ 397.9 pF'ın kutbu 10.0 kHz'dir.

CEVAP a. 795.8 kHz b. $C_{\text{ek}} = 392.9$ pF c. $\phi_M \approx 35.6°$ (tam 44.7°) d. 795.8 Hz; kutbu kaydırmak 12.57 kat geniş bant verir

20 OSİLATÖRLER, KARŞILAŞTIRICILAR VE DALGA ÜRETEÇLERİ

20.2

← Soru

a. Tablo E-9(c), Wien köprüsü:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(12\times10^3)(8.2\times10^{-9})},$$

$$f_0 = 1617\ \text{Hz} \approx 1.62\ \text{kHz}.$$

b. f_0'da $\beta = 1/3$; evirmeyen kuvvetlendiricinin kazancı $A = 1 + R_f/R_g \geq 3$ olmalıdır:

$$R_f \geq 2R_g = 20.0\ \text{k}\Omega.$$

c. Kazanç ve çevrim kazancı:

$$A = 1 + \frac{22}{10} = 3.20, \qquad A\beta = \frac{3.20}{3} = 1.067 \approx 1.07.$$

Çevrim kazancı 1'den %6.7 büyüktür: salınım güvenle başlar, genliği op-amp'ın doyması sınırlar.

Kontrol: Geri besleme ağının $\beta(j\omega)$'sı düğüm analiziyle kurulup fazın sıfır olduğu frekans arandığında 1617 Hz ve $\beta = 0.3333$ bulunur.

CEVAP a. $f_0 = 1.62$ kHz b. 20.0 kΩ c. 1.07

ertansinansahin.com

20.3

← Soru

a. Tablo E-9(c): $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{6}RC)$.

$$R = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}f_0C} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}(1500)(4.7\times10^{-9})},$$

$$R = 9.216 \approx 9.22\ \text{k}\Omega.$$

E24'te en yakın değer 9.1 kΩ:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}(9.1\times10^3)(4.7\times10^{-9})} = 1519\ \text{Hz}.$$

b. f_0'da ağın kazancı $-1/29$'dur; eviren kuvvetlendiricinin kazancı $-R_f/R$:

$$R_f \geq 29R = 29(9.1) = 263.9 \approx 264\ \text{k}\Omega.$$

Başlama için bu sınırın üstündeki ilk E24 değeri, 270 kΩ, seçilir:

$$A\beta = \frac{R_f}{29R} = \frac{270}{263.9} = 1.023 \approx 1.02.$$

Kontrol: Üç kesitli ağ ve sanal toprak düğüm analiziyle kurulup çevrim kazancının sanal kısmının sıfır olduğu frekans arandığında 1519 Hz ve $A\beta = 1.023$ bulunur.

Sık yapılan hata: Her kesitin 60° kaydırdığını varsaymak. Kesitler birbirini yükler; f_0'da kaymalar 55.8°, 56.4° ve 67.8°'dir (toplam 180°). $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{6}RC)$ bu yüklemeyle bulunur; yüksüz kesitlerle hesaplanan $\tan 60°$ koşulu yanlış frekans verir.

CEVAP a. $R = 9.22\ \text{k}\Omega \to 9.1\ \text{k}\Omega$, $f_0 = 1519$ Hz b. $R_f \geq 264$ kΩ, 270 kΩ; $A\beta = 1.02$

20.8

← Soru

Eksi giriş topraktadır; çıkış artı girişin işaretiyle değişir. $v_O = +12$ V iken artı giriş, v_I ile v_O arasındaki bölücünün noktasıdır:

$$v_+ = \frac{v_I R_2 + v_O R_1}{R_1 + R_2} = 0 \implies v_I = -v_O\frac{R_1}{R_2}.$$

Çıkış +12 V'tayken $v_I = -12(10/100) = -1.20$ V'ta, −12 V'tayken +1.20 V'ta değişir. Eşikler ±1.20 V, histerezis genişliği 2.40 V'tur. **B** doğrudur.

- (A): $12(10/110) = 1.09$ V, eviren Schmitt'in bölücü bağıntısıdır; burada giriş bölücünün ucundan uygulanır.

- (C): Doyma düzeyinin kendisidir.
- (D): Eşikler sıfıra göre simetriktir; eksi girişe referans gerilimi bağlı değildir.
- (E): Histerezis genişliğinin yarısının yarısıdır; eşik LR_1/R_2'dir, $LR_1/(2R_2)$ değil.

CEVAP B

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-3–E-10 basılmıştır.

Bu örnekte Ek'ten yalnız seçilen soruların kullandığı tablolar (E-5, E-8, E-9) vardır. Kitabın tamamındaki Ek 8 tablo (E-3–E-10) ve 7 sayfadır: BJT, MOSFET ve JFET parametreleri, küçük işaret özeti, standart değerler, desibel ve Bode kuralları, op-amp parametreleri, geri besleme, çıkış katı ve osilatör ölçüt tabloları, Butterworth ve Chebyshev filtre tabloları.

Tablo E-5 Küçük işaret özeti

(a) Model parametreleri

Aygıt	Büyüklük	Bağıntı
BJT	g_m	I_C/V_T
	r_π	$\beta/g_m = V_T/I_B$
	r_e	$\alpha/g_m = V_T/I_E$
	r_o	V_A/I_C
	$C_\pi + C_\mu$	$g_m/(2\pi f_T)$
MOSFET	g_m	$k_n V_{OV} = \sqrt{2k_n I_D} = 2I_D/V_{OV}$
	r_o	$V_A/I_D = 1/(\lambda I_D)$, $V_A = V'_A L$
	g_{mb}	χg_m, $\chi = \gamma/(2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}})$
	C_{gs}, C_{gd}	$\frac{2}{3}WLC_{ox} + WC_{ov}$, WC_{ov}
	f_T	$g_m/[2\pi(C_{gs} + C_{gd})]$
JFET	g_m	$(2I_{DSS}/\lvert V_P\rvert)(1 - V_{GS}/V_P) = 2\sqrt{I_{DSS} I_D}/\lvert V_P\rvert$

(b) Altı temel kat (r_o ihmal)

Kat	Giriş	Giriş ucundan direnç	$R_{\text{çık}}$	$A_v = v_o/v_i$
Ortak emetörlü (OE)	baz	$R_{\text{baz}} = (\beta + 1)(r_e + R_E)$	R_C	$-\dfrac{\alpha(R_C \parallel R_L)}{r_e + R_E}$
Ortak bazlı (OB)	emetör	$R_{\text{emetör}} = r_e$	R_C	$\dfrac{\alpha(R_C \parallel R_L)}{r_e} = g_m(R_C \parallel R_L)$
Ortak kollektörlü (OK, emetör izleyici)	baz	$R_{\text{baz}} = (\beta + 1)(r_e + R_E \parallel R_L)$	$R_E \parallel \left(r_e + \dfrac{R'_s}{\beta + 1}\right)$	$\dfrac{R_E \parallel R_L}{R_E \parallel R_L + r_e}$
Ortak kaynaklı (OS)	kapı	$R_{\text{kapı}} = \infty$	R_D	$-\dfrac{g_m(R_D \parallel R_L)}{1 + g_m R_S}$
Ortak kapılı (OG)	kaynak	$R_{\text{kaynak}} = 1/g_m$	R_D	$g_m(R_D \parallel R_L)$
Ortak savaklı (OD, kaynak izleyici)	kapı	$R_{\text{kapı}} = \infty$	$R_S \parallel (1/g_m)$	$\dfrac{R_S \parallel R_L}{R_S \parallel R_L + 1/g_m}$

v_i: giriş ucundaki gerilim (baz, emetör, kapı ya da kaynak). Giriş ucundan direnç yalnız transistörün ucundan bakılan dirençtir (R_{baz}, $R_{\text{emetör}}$, …). Katın toplam giriş direnci kutuplama direncini de içerir: $R_{\text{gir}} = R_B \parallel R_{\text{baz}}$ (OE, OK; $R_B = R_1 \parallel R_2$), $R_{\text{gir}} = R_E \parallel R_{\text{emetör}}$ (OB), $R_{\text{gir}} = R_S \parallel R_{\text{kaynak}}$ (OG), $R_{\text{gir}} = R_G$ (OS, OD). $R_{\text{çık}}$ katın çıkış direncidir (R_L hariç). R_E, R_S: köprülenmemiş (dejenerasyon) direnç; köprülenmişse sıfır alınır (OE: $R_{\text{baz}} = r_\pi$, $A_v = -g_m(R_C \parallel R_L)$). OK ve OD satırında R_E, R_S çıkış ucundan toprağa; $R'_s = R_s \parallel R_B$. R_s: işaret kaynağının iç direnci. Kaynaktan yüke toplam kazanç $G_v = A_v R_{\text{gir}}/(R_{\text{gir}} + R_s)$. Gövde etkisi ihmal.

(c) r_o ile bağıntılar

Durum	Bağıntı
İçsel kazanç	$A_0 = g_m r_o$ (BJT: V_A/V_T; MOS: $2V_A/V_{OV}$)
OE ve OS, r_o ile	$A_v = -g_m(R_C \parallel R_L \parallel r_o)$, $R_{\text{çık}} = R_C \parallel r_o$
Dejenerasyonlu BJT, kollektörden	$R_o = r_o + (R_E \parallel r_\pi)(1 + g_m r_o) \approx r_o[1 + g_m(R_E \parallel r_\pi)]$
Dejenerasyonlu MOSFET, savaktan	$R_o = r_o + R_S + g_m r_o R_S \approx r_o(1 + g_m R_S)$
Kaskod (MOS; BJT)	$R_o \approx g_{m2} r_{o2} r_{o1}$; $R_o \approx g_{m2} r_{o2}(r_{o1} \parallel r_{\pi 2}) \lesssim \beta r_o$

Kaskod: alttaki transistör (1) ortak emetörlü/kaynaklı, üstteki (2) ortak bazlı/kapılı. BJT kaskodun çıkış direnci en çok yaklaşık βr_o olabilir.

Örnek sayfalar · Kitabın tamamı: ertansinansahin.com

Tablo E-8 Op-amp tipik parametreleri (25 °C)

Parametre	Simge	Birim	BJT girişli, genel amaçlı	CMOS girişli, raydan raya	İdeal
Açık çevrim DC kazancı	A_0	V/V (dB)	2×10^5 (106)	10^5 (100)	∞
Birim kazanç frekansı	f_t	MHz	1.0	10	∞
Açık çevrim 3 dB frekansı	$f_b = f_t/A_0$	Hz	5.0	100	∞
Yükselme hızı	SR	V/µs	0.5	10	∞
Giriş ofset gerilimi (en çok)	V_{OS}	mV	1 ($\lesssim 5$)	0.5 ($\lesssim 2$)	0
V_{OS} sıcaklık kayması	$\Delta V_{OS}/\Delta T$	µV/K	5	2	0
Giriş kutuplama akımı	I_B		100 nA	1 pA	0
Giriş ofset akımı	I_{OS}		10 nA	0.5 pA	0
Fark giriş direnci	R_{id}		2 MΩ	10^{12} Ω	∞
Açık çevrim çıkış direnci	R_o	Ω	75	200	0
Ortak mod bastırma oranı	CMRR	dB	90	80	∞
Besleme bastırma oranı	PSRR	dB	90	85	∞
Çıkış salınımı	$V_{o,\text{maks}}$		$\pm(V_S - 1.5)$ V	raydan 0.05 V	besleme
Çıkış kısa devre akımı	I_{sc}	mA	25	40	—
Besleme gerilimi	V_S		±5 … ± 18 V	2.7 … 5.5 V	—

Tek kutuplu model $A(s) = A_0/(1 + s/\omega_b)$, $f_t = A_0 f_b$; kapalı çevrim bant genişliği $f_{3\text{dB}} = f_t/(1 + R_2/R_1)$ (evirmeyen ve eviren). Tam güç bant genişliği $f_M = \text{SR}/(2\pi V_{o,\text{maks}})$: ör. BJT girişli tipte $V_{o,\text{maks}} = 13.5$ V (±15 V besleme) için 5.89 kHz, CMOS tipte 2.45 V (5 V tek besleme, 2.5 V ortada) için 650 kHz. BJT girişli tipte salınım $R_L \geq 2$ kΩ, CMOS tipte $R_L \geq 10$ kΩ içindir. Aksi söylenmedikçe op-amp idealdir; soru “tipik” derse bu tablo kullanılır.

Tablo E-9 Ölçüt tabloları

(a) Geri besleme topolojileri

Kuvvetlendirici	Topoloji	Örnekleme	Karıştırma (girişte)	A	β	R_{if}	R_{of}
Gerilim	seri–şönt	çıkış gerilimi (şönt)	gerilim (seri)	V/V	V/V	$R_i(1+A\beta)$	$R_o/(1+A\beta)$
Akım	şönt–seri	çıkış akımı (seri)	akım (şönt)	A/A	A/A	$R_i/(1+A\beta)$	$R_o(1+A\beta)$
Geçiş iletkenliği	seri–seri	çıkış akımı (seri)	gerilim (seri)	A/V	V/A	$R_i(1+A\beta)$	$R_o(1+A\beta)$
Geçiş direnci	şönt–şönt	çıkış gerilimi (şönt)	akım (şönt)	V/A	A/V	$R_i/(1+A\beta)$	$R_o/(1+A\beta)$

$A_f = A/(1+A\beta)$; çevrim kazancı $T = A\beta$; bant genişliği ve bozulmaya etkisi $(1+A\beta)$ kat; $dA_f/A_f = (dA/A)/(1+A\beta)$. Seri bağlantı direnci $(1+A\beta)$ kat büyütür, şönt bağlantı küçültür. R_i, R_o: geri besleme ağının yüklemesi eklenmiş A devresinin giriş ve çıkış direnci.

(b) Çıkış katı sınıfları

Sınıf	İletim açısı	En büyük verim (%)	Transistör kaybı	Bozulma
A (direnç ya da akım kaynağı yüklü)	360°	25	işaret yokken en büyük: $P_D = V_{CC}I_Q$	düşük
A (trafo ya da endüktans bağlaşımlı)	360°	50	işaret yokken en büyük	düşük
B	180°	78.5	$P_{D,\text{maks}}/P_{L,\text{maks}} = 0.405$	çapraz bozulma
AB	180–360°	≈ 78.5	B'ye yakın, artı $V_{CC}I_Q$	küçük
C	$< 180°$	$\to 100$	küçük (ayarlı yük)	yüksek; ayarlı devre süzer
D	anahtarlama	$\to 100$ (pratikte > 90)	anahtarlama kaybı	filtreyle küçük

B sınıfı itme–çekme, $\pm V_{CC}$ besleme, R_L yük, tepe çıkış $\hat{V}_o$: $P_L = \hat{V}_o^2/(2R_L)$, $P_S = 2V_{CC}\hat{V}_o/(\pi R_L)$, $\eta = (\pi/4)(\hat{V}_o/V_{CC})$. Toplam transistör kaybı $\hat{V}_o = 0.637V_{CC}$ $(2V_{CC}/\pi)$ iken en büyüktür: $P_{D,\text{maks}} = 2V_{CC}^2/(\pi^2 R_L)$, bu noktada $\eta = \%50$. Verimler kuramsal sınırlardır (doyum gerilimleri ihmal).

(c) Osilatör koşulları

Osilatör	Frekans	Koşul	Düzen
Barkhausen ölçütü	$A(j\omega_0)\beta(j\omega_0) = 1$	$\lvert A\beta\rvert = 1,\ \angle A\beta = 0°$	başlama için $\lvert A\beta\rvert$ biraz > 1
Wien köprüsü	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi RC}$	$\beta(j\omega_0) = 1/3,\ A \geq 3$	seri RC + paralel RC, eşit R ve C; evirmeyen kuvvetlendirici
RC faz kaydırmalı	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$	$\beta(j\omega_0) = -1/29,\ A \leq -29$	üç eşit kesit (seri C, paralel R), yüklenmesiz; eviren
Colpitts	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_1C_2/(C_1+C_2)}}$	$g_m R \geq C_2/C_1$	C_1 çıkış (kollektör/savak) ucunda, C_2 giriş (baz/kapı) ucunda
Hartley	$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2)C}}$	$g_m R \geq L_1/L_2$	L_1 çıkış ucunda, L_2 giriş ucunda; ortak endüktans yok
Kristal	$f_s = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_kC_k}},\ f_p = f_s\sqrt{1+C_k/C_p}$	$f_s < f < f_p$	L_k, C_k: seri kol; C_p: paralel kapasite; kristal endüktif bölgede

Colpitts ve Hartley koşulu: kuvvetlendirici geçiş iletkenliği g_m ile çıkış düğümündeki toplam direnç R (yük ve r_o dâhil), giriş direnci sonsuz. f_0 bağıntıları kayıpsız ve yüklenmesiz geri besleme ağı içindir.

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 8 tablo (7 sayfa): BJT, MOSFET ve JFET parametreleri, küçük işaret özeti, standart direnç ve kondansatör değerleri (E12, E24), desibel ve Bode kuralları, op-amp tipik parametreleri, geri besleme, çıkış katı ve osilatör ölçüt tabloları, normalleştirilmiş Butterworth ve Chebyshev filtreleri.

ertansinansahin.com