

13

PENGUAT TRANSISTOR

13.1 Model Setara Penguat

Secara umum penguat (*amplifier*) dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga), yaitu penguat tegangan, penguat arus dan penguat transresistansi. Pada dasarnya kerja sebuah penguat adalah mengambil masukan (*input*), mengolahnya dan menghasilkan keluaran (*output*) yang besarnya sebanding dengan masukan. Besarnya tegangan keluaran (v_o) dibandingkan dengan tegangan masukan (v_i) dinyatakan sebagai

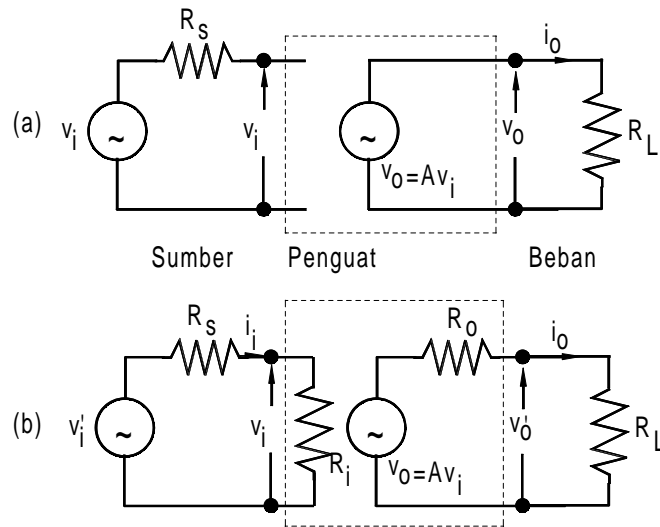
$$v_o = A_V v_i \quad (13.1)$$

dimana A_V adalah penguatan tegangan (*voltage gain*). Hal yang sama untuk penguat arus berlaku

$$i_o = A_I i_i \quad (13.2)$$

dimana i_o adalah arus keluaran, i_i adalah arus masukan dan A_I adalah penguatan arus (*current gain*). Sementara ini pembahasan hanya dibatasi pada penguatan tegangan.

Gambar 13.1 menunjukkan rangkaian setara Thevenin dari jaringan bergerbang dua dari suatu penguat. Secara ideal, penguat tidak mengambil arus dari masukan v_i dan tegangan keluaran tidak mengalami perubahan jika arus diambil dari ujung keluaran (lihat gambar 13.1-a). Pada kenyataannya rangkaian yang ideal ini tidak bisa dibuat. Rangkaian seperti terlihat pada gambar 13.1-b adalah lebih realistis dimana kita menambah hambatan masukan R_i dan hambatan keluaran R_o .



Gambar 13.1 Rangkaian setara Thevenin jaringan bergerbang dua

Pada gambar 13.1-b terlihat bahwa pada bagian masukan mengalir arus masukan sebesar

$$i_i = \frac{v_i}{R_i} \quad (13.3)$$

Semakin besar harga R_i penguat tersebut semakin mendekati kondisi ideal. Hambatan sumber R_s dan hambatan masukan R_i membentuk pembagi tegangan sehingga

$$v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} v_s \quad (13.4)$$

Pada bagian keluaran, dengan adanya R_o , tegangan keluaran v_o' menjadi

$$v_o' = v_o - i_o R_o$$

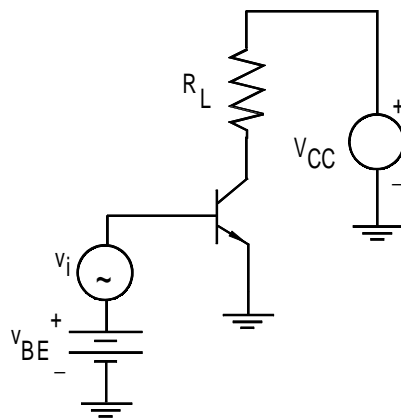
atau

$$v_o' = \frac{R_L}{R_o + R_L} v_o \quad (13.5)$$

Persamaan 13.5 jelas memperlihatkan bahwa semakin kecil harga R_o suatu penguat akan mendekati kondisi ideal.

13.2 Penguat Tegangan

Pada bagian sebelumnya telah dipelajari bagaimana transistor diberi tegangan panjar (*bias*) agar transistor tersebut dapat bekerja sebagai penguat. Pada gambar 13.2 diperlihatkan penguat BJT emitor-ditanahkan dengan tegangan panjar dari V_{CC} dan V_{BE} .



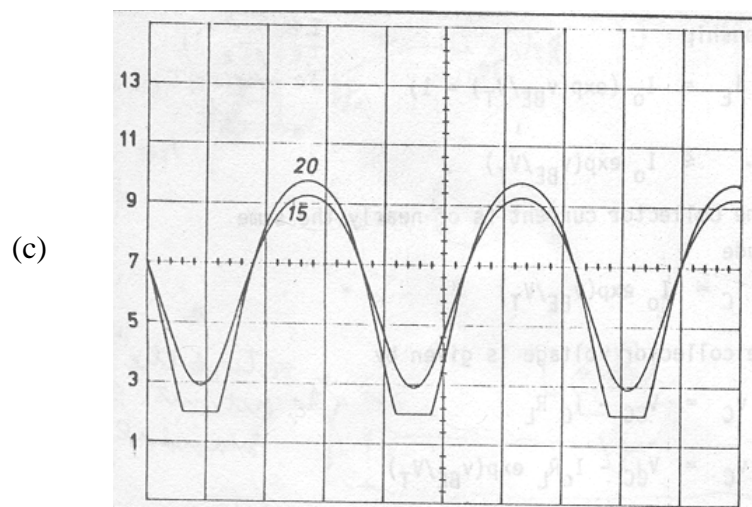
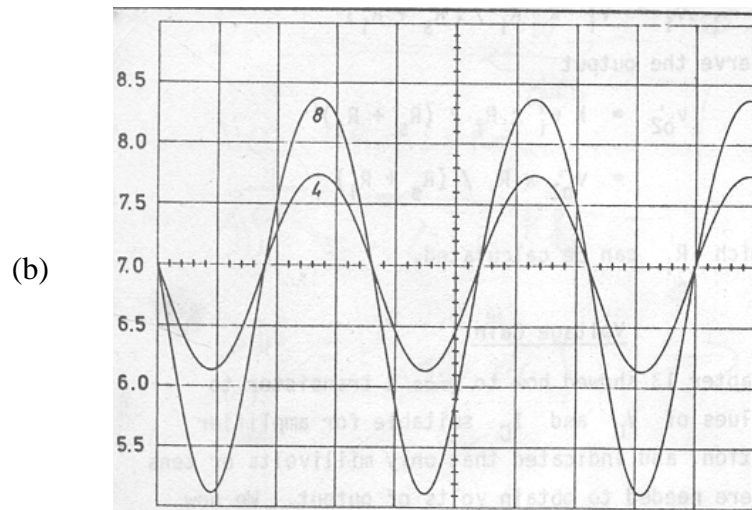
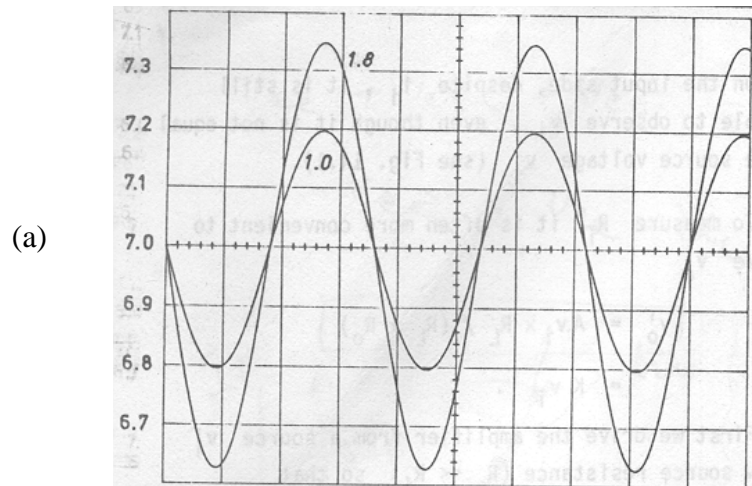
Gambar 13.2 pemasangan tegangan panjar pada penguat emitor ditanahkan

Antara parameter masukan dan keluaran terdapat hubungan dalam bentuk eksponensial sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 -i_E &= I_o \left\{ \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right\} \\
 &\approx I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)
 \end{aligned}
 \tag{13.6}$$

Arus kolektor (i_C) besarnya hampir mendekati arus emitor (i_E), dengan demikian kita dapat menuliskan

$$i_C \approx I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)
 \tag{13.7}$$



Gambar 13.3 Bentuk isyarat keluaran suatu penguat untuk isyarat masukan (a) 1 dan 1,8 mV, (b) 4 dan 8 mV dan (c) 15 dan 20 mV

dan tegangan kolektor diberikan oleh

$$v_C = V_{CC} - i_C R_L$$

$$v_C = V_{CC} - I_o R_L \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \quad (13.8)$$

Persamaan 13.8 menunjukkan hubungan antara tegangan input v_{BE} dan tegangan output v_C dimana keduanya terdapat komponen DC (untuk panjar) dan komponen AC (isyarat).

Sayangnya keluaran dan masukan merupakan hubungan yang tidak selalu linier. Dengan kata lain tidak selalu keluaran merupakan *copy* dari masukan sehingga terjadi keluaran yang terdistorsi (cacat). Ini terjadi akibat isyarat masukan yang terlalu besar. Pada gambar 13.3-a isyarat keluaran dari suatu input 1 dan 1.8 mV memperlihatkan bentuk sinusoida yang sempurna (tidak terjadi distorsi). Namun jika isyarat masukan diperbesar menjadi 4 dan 8 mV (gambar 13.3-b) nampak bahwa untuk garis referensi di 7V, isyarat keluaran tidak simetri lagi (bagian bawah lebih tajam). Pada isyarat masukan sebesar 15 mV (gambar 13.3-c), isyarat keluaran mengalami distorsi yang sangat nyata. Saat masukan diperbesar ke harga 20 mV, masukan kolektor menyamai tegangan emiter, akibatnya transistor berada pada daerah jenuh sehingga isyarat keluaran terpotong kurang lebih 2V.

Dengan demikian kita hanya dapat menentukan besarnya tegangan keluaran karena adanya perubahan yang sangat kecil pada masukan, yang lebih dikenal sebagai penguatan isyarat kecil (*small-signal gain*). Kita memiliki

$$v_C = V_{CC} - I_o R_L \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

dan besarnya penguatan diberikan oleh

$$\frac{dv_C}{dv_{BE}} = -\left\{\left(\frac{R_L}{V_T}\right) I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)\right\} \quad \text{atau}$$

$$\frac{dv_C}{dv_{BE}} = -\frac{i_C R_L}{V_T} \quad (13.9)$$

Pada persamaan 13.9 terlihat bahwa penguatan berharga negatif, artinya jika v_{BE} naik maka i_C juga naik, tetapi sebaliknya v_C akan menurun.

Untuk pengoperasian pada isyarat kecil, i_C tetap mendekati harga panjar DC yaitu I_C , sehingga penguatan isyarat kecil diberikan oleh

$$A_V = -\frac{I_C R_L}{V_T} \quad (13.10)$$

Penguatan ini bernilai cukup besar, misalnya untuk $I_C R_L = 5 \text{ V}$ diperoleh penguatan sebesar ≈ -200 .

13.3 Hambatan Masukan

Pada rangkaian emitor-ditanahkan (*common emitor*) harga hambatan masukan dapat diperoleh juga dari hubungan eksponensial

$$-i_E = I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

atau

$$i_B = \frac{I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)}{(\beta + 1)}$$

Sekali lagi untuk isyarat masukan yang sangat kecil diperoleh

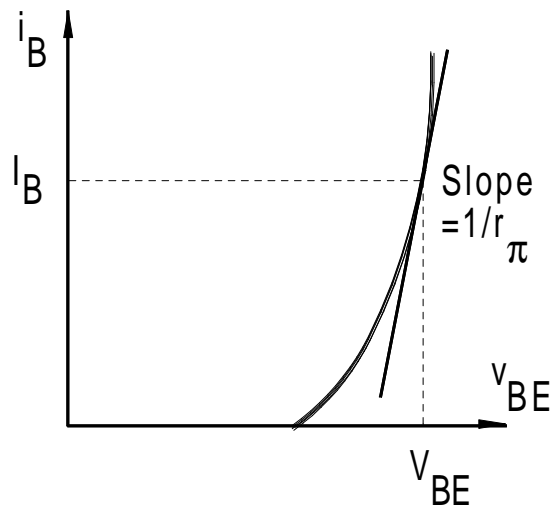
$$\frac{di_B}{dv_{BE}} = \frac{\left(\frac{I_o}{V_T}\right) \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)}{(\beta + 1)}$$

sehingga

$$\begin{aligned} \frac{dv_{BE}}{di_E} &= \frac{(\beta + 1) V_T}{I_o \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)} \\ &= \frac{\beta V_T}{I_E} \end{aligned} \quad (13.11)$$

Ruas kiri tidak lain adalah hambatan masukan untuk rangkaian emitor ditanahkan atau biasa disimbolkan dengan r_π . Untuk isyarat kecil, arus emitor mendekati hara DC (I_E) sehingga

$$r_\pi = \frac{\beta V_T}{I_E} \quad (13.12)$$



Gambar 13.4 Pengambilan harga r_π dari karakteristik input transistor

Perlu dicatat bahwa r_π bukanlah berasal dari resistor yang nyata; namun berasal dari kemiringan (slope) kurva karakteristik masukan (lihat gambar 13.4) pada titik panjar DC.

Dengan cara yang sama untuk rangkaian penguat basis-ditanahkan, dengan arus masukan $-i_E = (\beta + 1) i_B$, hambatan masukan (r_e) adalah

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \quad (13.13)$$

Persamaan 13.13 diturunkan langsung dari $-I_E \approx I_o \exp(-v_{EB} / V_T)$. Dengan demikian hubungan r_π dan r_e dapat dituliskan sebagai

$$r_{\pi} = \beta r_e \quad (13.14)$$

Sedangkan besarnya penguatan tegangan dimungkinkan untuk dituliskan sebagai

$$A_V = -\frac{R_L}{r_e} \quad (13.15)$$

Dari keadaan di atas nampak bahwa besarnya penguatan tegangan adalah sama untuk setiap transistor, yaitu hanya tergantung pada I_C dan bukan pada β .

13.4 Hambatan Keluaran

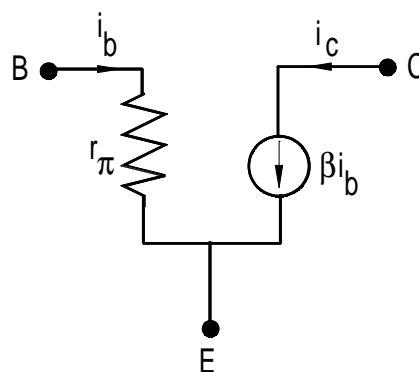
Trasistor mengalirkan arus lewat hambatan beban sebesar

$$i_C = \beta i_B \quad (13.16)$$

dimana harganya hampir tidak tergantung pada besarnya R_L karena i_C hampir tidak tergantung pada besarnya v_{CE} . Besarnya hambatan keluaran walaupun keluaran terbebani akan berharga sekitar R_L .

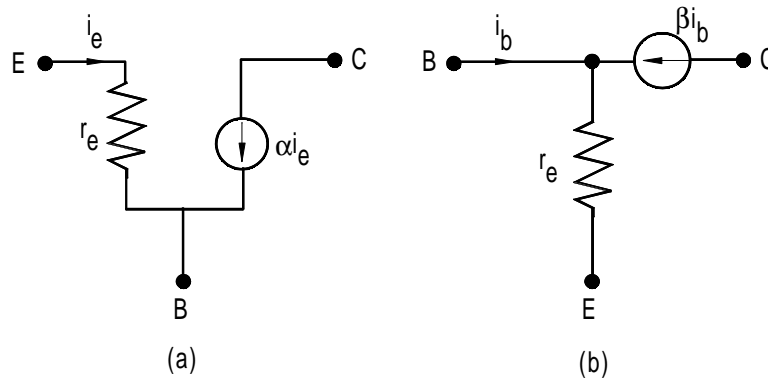
13.5 Model-model Isyarat Kecil (*Small-Signal Models*)

Untuk menentukan sifat-sifat sebuah penguat transistor, dapat dilakukan pendekatan yaitu mengganti transistor tersebut dengan rangkaian setara model isyarat kecil. Model ini tersusun dari rangkaian yang lebih sederhana sehingga memudahkan perhitungan.



Gambar 13.5 Model isyarat kecil untuk penguat emitor ditanahkan

Gambar 13.5 menunjukkan sebuah model isyarat kecil untuk penguat emitor ditanahkan. Pada bagian masukan (basis) mengalir arus AC (yaitu i_B) lewat hambatan $r_\pi = \beta r_e$ dimana $r_e = V_T / I_E$. Pada bagian keluaran (kolektor), transistor mempunyai arus AC kolektor (i_C) yang (hampir) konstan sebesar $i_C = \beta i_b$.



Gambar 13.5 Model isyarat kecil untuk penguat basis ditanahkan

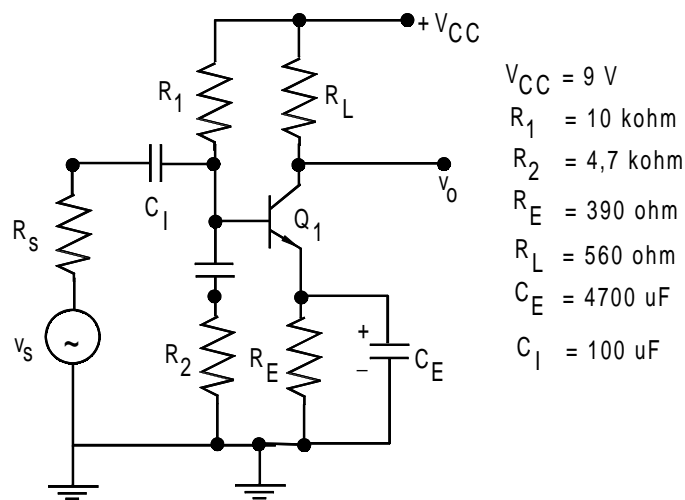
Gambar 13.6-a menunjukkan sebuah model isyarat kecil untuk penguat basis-ditanahkan. Dengan membuat modifikasi model seperti terlihat pada gambar 13.6-b, kadang-kadang dapat memberi kemudahan dan lebih berguna. Pada bagian masukan terdapat hambatan masukan r_e . Jika pada masukan diberi tegangan masukan sebesar v_b maka arus masukan adalah i_b , sedangkan arus sebesar $(\beta + 1) i_b$ mengalir lewat r_e sehingga

$$v_B = (\beta + 1) i_b r_e \quad (13.17)$$

$$\frac{v_b}{i_b} = (\beta + 1) r_e \quad (13.18)$$

$$\approx r_\pi$$

yang merupakan hambatan masukan seperti yang diharapkan.



Gambar 13.7 Contoh pemberian keadaan panjar pada penguat transistor

Gambar 13.7 memperlihatkan contoh rangkaian penguat transistor dengan sumber tegangan masukan v_s dengan resistansi sumber R_s . Kita menganalisis rangkaian tersebut dengan membuat pendekatan seperlunya. Misalkan transistor Q_1 adalah terbuat dari silikon dengan tipe $n-p-n$ dengan penguatan arus $\beta = 200$. Beberapa permasalahan berikut akan kita selesaikan.

- (a) Berapa arus DC kolektor ?
- (b) Beri komentar seberapa efektif keadaan panjar rangkaian pada gambar 13.7 (misalnya dengan membuat perkiraan besarnya perubahan arus kolektor jika dilakukan penggantian transistor dengan harga gain arus setengahnya)
- (c) Dengan asumsi harga R_s dapat diabaikan, perkirakan efek pada tanggapan frekuensi isyarat-kecil pada 50 Hz
 - (i) dari C_E
 - (ii) dari C_1
- (d) Jika v_s berupa gelombang sinus dengan amplitudo 2 mV dan frekuensi 1 kHz, perkirakan bentuk tegangan keluarannya dengan
 - (i) berasumsi $R_s = 0$,
 - (ii) berasumsi $R_s = 600\ \Omega$

Penyelesaian:

- (a) Pertama harus kita hitung besarnya sumber tegangan rangkaian terbuka basis (ingat teorema Thevenin) sebagai

$$\begin{aligned}V_{BB} &= V_{CC} \times R_2 / (R_1 + R_2) \\ &= 9 \times 4,7 / 14,7 \\ &= 2,88 \text{ V}\end{aligned}$$

dan hambatan sumber basis

$$\begin{aligned}R_B &= R_1 // R_2 \\ &= 3,20 \text{ k}\Omega\end{aligned}$$

Untuk transistor dengan gain arus β berlaku

$$\begin{aligned}I_B &= \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \\ &= \frac{2,88 - 0,6}{3,20 + 201 + 0,39} \text{ mA} \\ &= 27,9 \mu\text{A}\end{aligned}$$

Demikian juga

$$\begin{aligned}I_C &= \beta I_B \\ &= 200 \times 27,9 \mu\text{A} \\ &= 5,58 \text{ mA}\end{aligned}$$

(dalam hal ini kita berasumsi bahwa V_{BE} berharga 0,6 V)

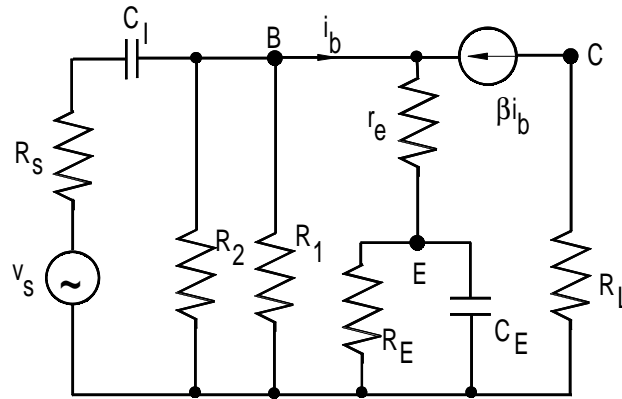
- (b) Untuk $\beta = 100$ kita mendapatkan

$$\begin{aligned}I_B &= \frac{2,88 - 0,6}{3,20 + 101 \times 0,39} \text{ mA} \\ &= 53,5 \mu\text{A} \\ I_C &= 5,35 \text{ mA}\end{aligned}$$

ternyata diperoleh hasil yang hampir sama dengan transistor dengan $\beta = 200$. Dengan demikian rangkaian ini mempunyai stabilitas panjar yang baik. Sebagai alternatif dari bagian (a) diperoleh

$$\begin{aligned}V_E &= I_E R_E \\ &= (201/200) \times 5,58 \text{ mA} \times 390 \Omega \\ &= 2,19 \text{ V}\end{aligned}$$

sehingga $V_B = 2,79 \text{ V}$, nampak hampir sama dengan harga V_{BB} , memberi indikasi bahwa R_B berharga sangat kecil. Juga harga V_{BB} cukup besar untuk menghapus ketidakpastian pada V_{BE} saat menghitung I_B .



Gambar 13.8 Rangkaian ekuivalen AC

- (c) (i) Kita berasumsi bahwa C_i berharga cukup besar untuk dianggap terjadi hubung singkat pada frekuensi 50 Hz, kemudian kita akan lihat efek dari C_E . Kita akan menggunakan model setara transistor seperti pada gambar 13.6 (b). Kita perlu menggambar rangkaian setara AC, dan untuk keperluan ini untuk sebarang titik pada tegangan DC adalah pada AC ditanahkan (karenanya mempunyai tegangan AC nol). Selengkapnya rangkaian tersebut seperti terlihat pada gambar 13.8. Harga reaktansi dari C_E pada frekuensi 50 Hz adalah

$$\begin{aligned} 1/\omega C_E &= (4700 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50)^{-1} \\ &= 0,677 \Omega \end{aligned}$$

Reaktansi ini paralel dengan $R_E = 390 \Omega$ dimana harganya dapat diabaikan, dan ini seri dengan

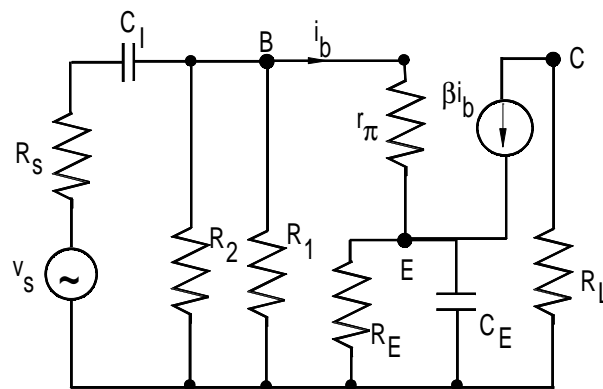
$$\begin{aligned} r_e &= 25 \text{ mV}/5,61 \text{ mA} \\ &= 4,46 \Omega \end{aligned}$$

Arus sebesar $i_e = (\beta + 1)i_b$ mengalir melalui keduanya sehingga tegangan pada kedua ujungnya adalah sebesar

$$v_b = i_b (896 \Omega \text{ resistif} + 136 \Omega \text{ kapasitif})$$

dimana karena kita mengabaikan impedansi R_S dan C_I , maka harganya sama dengan v_S . Bagian dari v_S yang muncul pada r_e adalah sebesar $4,46/\sqrt{4,46^2 + 0,677^2} = 0,989$. Dengan demikian C_E hanya memberikan efek yang kecil pada frekuensi 50 Hz (ini akan menghasilkan pergeseran fase sebesar $\tan^{-1}(0,677/4,46) = 8,6^\circ$)

(ii) Pada kasus ini model seperti terlihat pada gambar 13.5 lebih sesuai sehingga rangkaian ekivalen AC terlihat seperti pada gambar 13.9.



Gambar 13.9 Rangkaian setara

Kita dapat mengabaikan besarnya reaktansi dari C_E sehingga emiter ditanahkan (*grounded*) dan hambatan masukan merupakan kombinasi paralel R_1 , R_2 dan

$$\begin{aligned} r_\pi &= \beta V_T / I_E \\ &= 200 \times 25 \text{ mV} / 5,61 \text{ mA} \\ &= 896 \Omega \end{aligned}$$

yaitu $R_{in} = (1/896 + 1/4700 + 1/10000)^{-1} = 700 \Omega$. Reaktansi C_I adalah sebesar

$$1/\omega C_I = (100 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50)^{-1} = 31,8 \Omega$$

Bagian dari v_S yang muncul pada r_π adalah sebesar $700/\sqrt{700^2 + 31,8^2} = 0,999$. Dengan demikian pada frekuensi 50 Hz, C_I memberikan efek yang dapat diabaikan pada besarnya penguatan.

(d) Masukan sebesar 2 mV ($\gg V_T = 25$ mV) adalah cukup kecil untuk menghasilkan distorsi pada keluaran, karenanya kita dapat menggunakan analisis isyarat-kecil. Pada frekuensi 1 kHz, baik C_I dan C_E dapat dianggap terjadi hubung singkat.

(i) Disini $v_{be} = v_s$ dan besarnya penguatan adalah sebesar

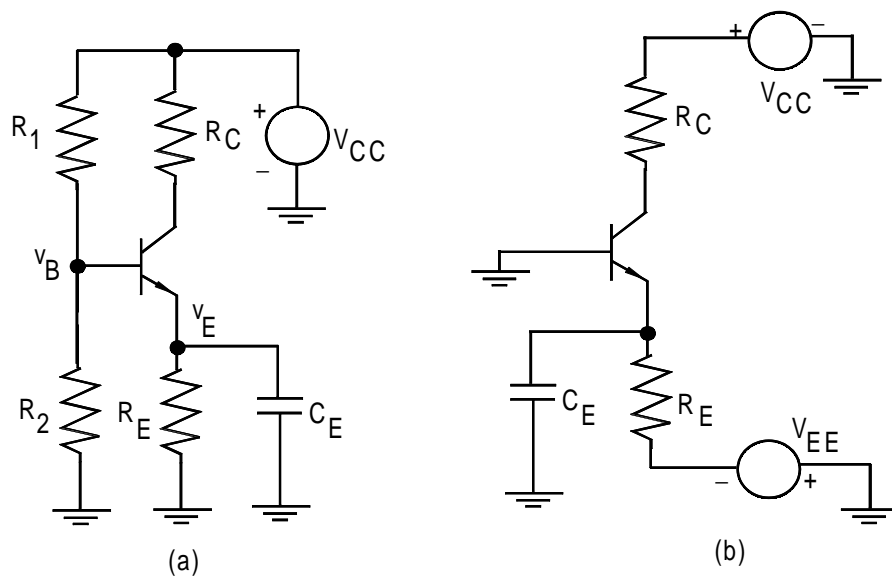
$$A = -R_L/r_e = - (560/4,46) = -126$$

dengan demikian keluaran berbentuk sinusoida dengan amplitudo 252 mV

(ii) Dalam hal ini hambatan masukan sebesar 700 Ω (lihat bagian c-ii) dikenai 2 mV dari sumber dengan hambatan seri sebesar 600 Ω . Tegangan keluaran akan turun sebesar $(700/(700+600)) \times 2$ mV $\times 126 = 136$ mV.

13.6 Pengaturan Tegangan Panjar

Jika kita diminta untuk menentukan besarnya panjar (*bias*) pada kedua rangkaian pada gambar 13.10, kemungkinan kita akan kebingungan dengan banyaknya alternatif pilihan harga. Namun perlu diperhatikan bahwa kita tidak bisa memilih panjar secara acak. Untuk itu diperlukan aturan agar didapat desain yang tepat, walaupun harga-harga pilihan dimaksud tidak berupa nilai yang eksak tetapi dalam bentuk interval nilai.



Gambar 13.10 Desain pemberian panjar pada penguat transistor

Untuk memilih desain yang tepat misalnya untuk rangkaian pada gambar 13.10-a, sebaiknya V_B tidak terlalu terpengaruh oleh adanya aliran arus basis dari pembagi potensial (sehingga $V_B \approx V_{CC} \times R_2 / (R_1 + R_2)$). Untuk itu diperlukan

$$(V_B / R_2) \gg (V_E / R_E) \times 1 / \beta$$

atau mendekati

$$R_2 \ll \beta R_E \quad (\text{karena } V_B \approx V_E)$$

Sebagai acuan dapat dibuat

$$R_2 \approx 10 R_E$$

jika dipasang R_2 yang terlalu rendah dapat mengurangi hambatan masukan isyarat-kecil (*small-signal input resistance*).

Pada kedua rangkaian pada gambar 13.10 perbedaan tegangan antara basis dan sumber emitor harus lebih besar dari 0,6 volt; dan juga kelebihan tegangan harus lebih besar dari ketidak pastian harga V_{BE} ($\sim 0,1$ V). Untuk itu diperlukan

$$V_B - 0,6 \gg 0,1 \quad \text{atau}$$

$$V_{EE} - 0,6 \gg 0,1.$$

Sebagai pedoman dapat dibuat

$$V_B \approx 3 \text{ volt, atau } V_{EE} \approx 3 \text{ volt}$$

atau mungkin

$$V_B \approx V_{CC} / 3, \text{ atau } V_{EE} \approx V_{CC}$$

Biasanya terdapat pembatasan tertentu untuk harga V_{CC} , jika tidak, dapat saja dipasang harga dari 1 – 1000 volt. Namun biasanya akan lebih realistik dengan mengambil harga pada daerah 5 – 50 volt. Secara praktis biasanya kita memilih

$$V_{CC} = 9 \text{ volt} \quad (\text{standar baterai yang banyak dijual})$$

atau

$$V_{CC} = V_{EE} = 15 \text{ volt} \quad (\text{biasanya dipakai pada penguat komersial})$$

Dari harga R_2 , V_B , dan V_{CC} selanjutnya dapat ditentukan harga R_1 .

Biasanya juga terdapat pembatasan tertentu untuk harga R_E , R_C , dan $I_E \approx I_C$. Harga R_E dan R_C dapat berkisar dari 10 Ω - 10 M Ω serta I_E dapat berharga dari 1 μ A sampai dengan 1 A.

Jika hambatan keluaran ditentukan sama dengan R_C dan jika hambatan luar harus dipasang, maka R_C harus berharga beberapa kali lebih kecil. Jika arus beban luar harus dicatu maka I_C harus paling tidak beberapa kali lebih besar.

Jika keterbatasan-keterbatasan di atas tidak berlaku, secara praktis harga-harga berikut dapat dipilih

$$I_E \approx I_C = 1 \text{ mA}$$

dan untuk meyakinkan pemilihan panjar yang tepat ambil harga R_E dan R_C dari

$$I_C R_C \approx (V_{CC} - V_E) / 2$$

$$I_E R_E = V_{EE} - 0,6$$

Kemungkinan penguatan tegangan dapat ditentukan, yaitu dari

$$A_v = -R_C / r_e = -I_C R_C / V_T$$

Dengan demikian harga $I_C R_C$ adalah tertentu sesuai dengan harga V_{CC} yang dipasang, yaitu

$$I_C R_C \approx (V_{CC} - V_E) / 2$$