

ELEKTRONIKA

Lanjutan

Elektronika Lanjut

Herman Dwi Surjono, Ph.D.

Elektronika Lanjut

Disusun Oleh: **Herman Dwi Surjono, Ph.D.**

© 2009 All Rights Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang

Penyunting : **Tim Cerdas Ulet Kreatif**

Perancang Sampul : **Dhega Febiharsa**

Tata Letak : **Dhega Febiharsa**

Diterbitkan Oleh:

Penerbit Cerdas Ulet Kreatif

Jl. Manggis 72 RT 03 RW 04 Jember Lor – Patrang

Jember - Jawa Timur 68118

Telp. 0331-422327 Faks. 0331422327

Katalog Dalam Terbitan (KDT)

Herman Dwi Surjono, **Elektronika Lanjut**/Herman Dwi Surjono, Penyunting:
Tim Cerdas Ulet Kreatif, 2009, 104 hlm; 14,8 x 21 cm.

ISBN 978-602-98174-6-1

1. Hukum Administrasi	I. Judul
II. Tim Cerdas Ulet Kreatif	104

Distributor:

Penerbit CERDAS ULET KREATIF

Website : www.cerdas.co.id - email : buku@cerdas.co.id

Cetakan Kedua, 2011

Undang-Undang RI Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta

Ketentuan Pidana

Pasal 72 (ayat 2)

1. Barang Siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Kata Pengantar

Buku ini diperuntukkan bagi siapa saja yang ingin mengetahui elektronika baik secara teori, konsep dan penerapannya. Pembahasan dilakukan secara komprehensif dan mendalam mulai dari pemahaman konsep dasar hingga ke taraf kemampuan untuk menganalisis dan mendesain rangkaian elektronika. Penggunaan matematika tingkat tinggi diusahakan seminimal mungkin, sehingga buku ini bias digunakan oleh berbagai kalangan. Pembaca dapat beraktivitas dengan mudah karena didukung banyak contoh soal dalam hamper setiap pokok bahasan serta latihan soal pada setiap akhir bab. Beberapa rangkaian penguat sedapat mungkin diambilkan dari pengalaman praktikum.

Sebagai pengetahuan awal, pemakai buku ini harus memahami teori dasar rangkaian DC dan matematika dasar. Teori Thevenin, Norton, dan Superposisi juga digunakan dalam beberapa pokok bahasan. Di samping itu penguasaan penerapan hukum Ohm dan Kirchhoff merupakan syarat mutlak terutama pada bagian analisis dan perancangan.

Bab 1 membahas bermacam-macam regulator tegangan beserta prinsip kerjanya. Bab 2 membahas tanggapan frekuensi beserta analisis frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Selanjutnya pada bab 3 dibahas berbagai rangkaian bertingkat mulai dari kaskade, darlington hingga CMOS. Pembahasan tentang penguat operasi yang didahului dengan penguat beda dan dilanjutkan dengan berbagai penggunaan Op-Amp seperti penguat inverting dan non-

inverting terdapat pada bab 4. Dan akhirnya bab 5 dari buku ini membahas umpan balik yang dimulai dari konsep dasar hingga analisis berbagai jenis umpan balik.

Semoga buku ini bermanfaat bagi siapa saja. Saran-saran dari pembaca sangat diharapkan.

Yogyakarta, Agustus 2009

Penulis,

Herman Dwi Surjono, Ph.D.

Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Elektronika, FT- UNY

Daftar Isi

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. REGULATOR TEGANGAN	1
1.1. Pendahuluan	1
1.2. Regulator Tegangan Seri	2
1.3. Regulator Tegangan Paralel	6
1.4. Regulator Tegangan IC	8
1.5. Ringkasan	10
1.6. Soal Latihan	10
2. RESPON FREKUENSI	11
2.1. Pendahuluan	11
2.2. Tanggapan Frekuensi	12
2.3. Analisis Frekuensi Rendah	14
2.4. Respon Frekuensi Rendah	16
2.5. Respon Frekuensi Tinggi	22
2.6. Ringkasan	32
2.7. Soal Latihan	32
3. RANGKAIAN BERTINGKAT	35
3.1. Pendahuluan	35
3.2. Hubungan Kaskade	36
3.3. Hubungan Cascode	39
3.4. Hubungan Darlington	42
3.5. Hubungan Pasangan Umpan Balik (<i>Feedback Pair</i>)	45
3.6. Rangkaian CMOS	49
3.7. Ringkasan	51
3.8. Soal Latihan	52
4. PENGUAT OPERASI	53
4.1. Pendahuluan	53
4.2. Penguat Beda	53
4.3. Penguat Operasi (<i>Op-Amp</i>) Ideal	61
4.4. Penguat Inverting	63
4.5. Penguat Non-Inverting	64
4.6. Ringkasan	66
4.7. Soal Latihan	67
5. UMPAN BALIK	69
5.1. Pendahuluan	69
5.2. Konsep dan Jenis Umpan Balik	69
5.3. Analisis Penguat Umpan Balik Tegangan-Seri	73
5.4. Analisis Penguat Umpan Balik Arus-Paralel	79

5.5. Analisis Penguat Umpan Balik Tegangan-Paralel	81
5.6. Analisis Penguat Umpan Balik Arus-Seri	83
5.7. Ringkasan	85
5.8. Soal Latihan	86
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN	89
INDEKS	91

Bab 3

RANGKAIAN BERTINGKAT

3.1 Pendahuluan

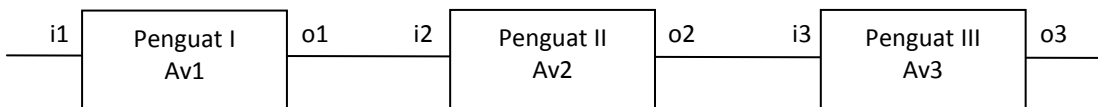
Aplikasi rangkaian elektronika di lapangan sering melibatkan tidak hanya sebuah transistor, tetapi lebih dari satu. Yang dimaksud dengan rangkaian bertingkat dalam bab ini adalah suatu kombinasi rangkaian yang terdiri atas lebih dari satu transistor (BJT atau FET) sebagai lawan dari penguat tunggal. Dalam bab ini akan dibahas beberapa bentuk rangkaian bertingkat seperti: Kaskade, Cascode, Darlington, Pasangan umpan balik, dan CMOS. Aplikasi rangkaian bertingkat tersebut disamping untuk keperluan yang berdiri sendiri, juga sebagai dasar pembentuk rangkaian lain yang lebih besar dalam rangkaian terintegrasi (IC).

3.2 Hubungan Kaskade

Rangkaian bertingkat dalam bentuk hubungan kaskade merupakan rangkaian yang populer atau banyak dijumpai dalam berbagai aplikasi. Dalam hubungan kaskade penguat satu dihubungkan dengan penguat lainnya secara seri, artinya keluaran penguat pertama dihubungkan dengan masukan tingkat kedua dan seterusnya. Lihat diagram pada gambar 28. Tujuan utama penguat dengan hubungan kaskade adalah diperolehnya penguatan total yang besar. Penguatan total dari rangkaian bertingkat tersebut adalah:

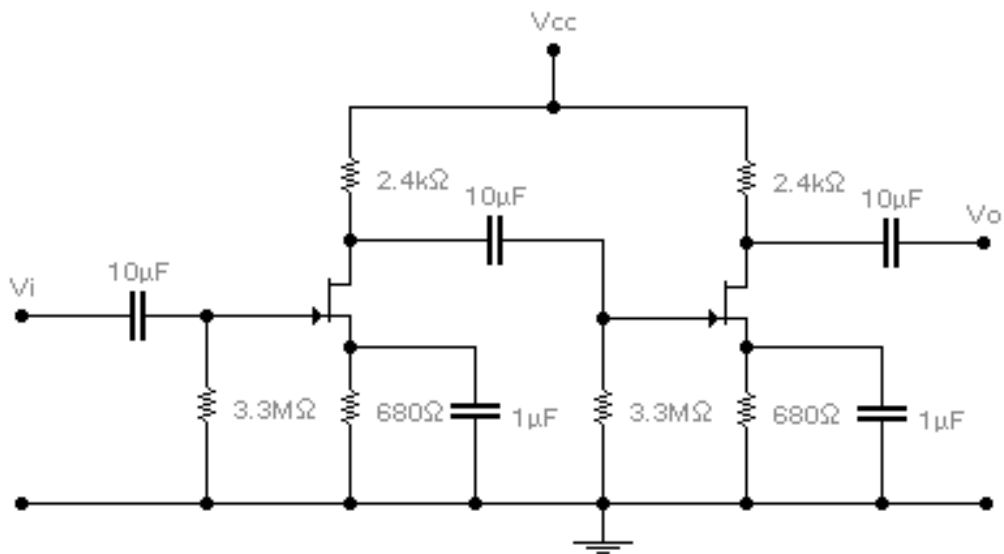
$$A_{vt} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}$$

Impedansi masukan dari penguat kedua menjadi beban bagi penguat pertama, demikian juga bahwa impedansi masukan penguat ketiga menjadi beban penguat kedua.



Gambar 28. Blok diagram penguat dalam hubungan kaskade

Kopling yang digunakan untuk menghubungkan antara tingkat satu dengan tingkat berikutnya bisa dengan kapasitor (R-C), trafo, atau kopling langsung. Namun demikian secara umum kopling kapasitorlah yang paling banyak digunakan. Dengan menggunakan kopling kapasitor, maka analisis dc (titik kerja) setiap penguat dapat dikerjakan secara terpisah karena satu dengan lainnya tidak saling mempengaruhi. Akan tetapi bila menggunakan kopling langsung (atau sering disebut penguat DC), maka analisis dc harus dikerjakan sekaligus untuk semua tingkat. Gambar 29 merupakan contoh penguat kaskade dua tingkat dengan menggunakan FET.



Gambar 29. Penguat kaskade dua tingkat dengan FET

Pada rangkaian tersebut diketahui data tambahan sebagai berikut: $V_{cc} = 20\text{ V}$; $V_i = 10\text{ mVp-p}$; dan data untuk kedua FET adalah: $I_{dss} = 10\text{ mA}$; $V_p = -4\text{ V}$. Oleh karena rangkaian tingkat pertama dan kedua adalah identik baik susunan maupun nilai komponennya, maka analisis dc untuk kedua tingkat adalah sama.

Analisis dc:

Menentukan titik kerja JFET (V_{GS} dan I_D) guna menghitung g_m

Ingat persamaan kuadrat berikut (pembahasan JFET pada buku 1):

$$((I_{dss}.R_s)/V_p^2).V_{GS}^2 + (1 - (2.I_{dss}.R_s/v_p^2)).V_{GS} + I_{dss}.R_s = 0$$

dengan menggunakan persamaan ABC, maka dapat diselesaikan nilai V_{GS} nya, yaitu:

$$\mathbf{V_{GS} = -1,9\text{ Volt.}}$$

Selanjutnya nilai I_D ditentukan dengan persamaan:

$$\mathbf{V_{GS} = -I_D.R_s}$$

Sehingga diperoleh

$$\mathbf{I_D = 2,8\text{ mA}}$$

Nilai V_{GS} dan I_D ini berlaku untuk JFET1 dan JFET2.

Analisis AC:

Menentukan g_m

$$g_{m0} = (2 \cdot I_{DSS}) / |V_p|$$

$$g_{m0} = (2 \cdot 10\text{mA}) / |-4|$$

$$g_{m0} = 5 \text{ mS}$$

sehingga:

$$g_m = g_{m0} (1 - (V_{GS}/V_p))$$

$$g_m = (5\text{m}) (1 - (-1,9/-4))$$

$$g_m = 2,6 \text{ mS}$$

Menentukan penguatan tegangan

Tingkat 1:

$$A_{v1} = -g_m \cdot (R_D // Z_{i2})$$

$$A_{v1} = - (2,6\text{m}) \cdot (2,4\text{K} // 3,3\text{M})$$

$$A_{v1} = - 6,2$$

Tingkat 2:

$$A_{v1} = -g_m \cdot (R_D)$$

$$A_{v1} = - (2,6\text{m}) \cdot (2,4\text{K})$$

$$A_{v1} = - 6,2$$

Total:

$$A_{vt} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

$$A_{vt} = (-6,2) \cdot (-6,2)$$

$$A_{vt} = 38,4$$

Sinyal output (V_o):

$$V_o = A_{vt} \cdot V_i$$

$$V_o = (38,4) \cdot (10\text{mV}_{p-p})$$

$$V_o = 384 \text{ mV}_{p-p}$$

Impedansi input penguat:

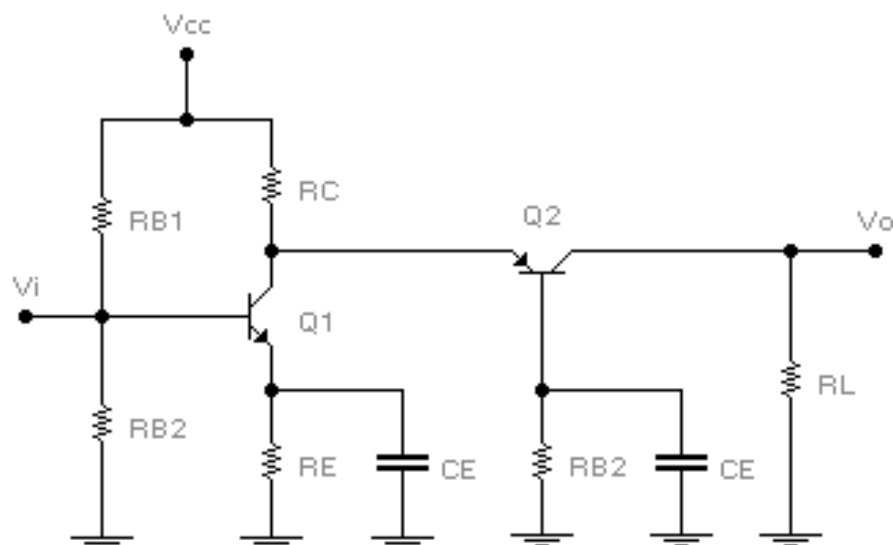
$$Z_i = R_{G1} = 3,3 \text{ M}$$

Impedansi output rangkaian:

$$Z_o = R_{D2} = 2,4 \text{ K}$$

3.3 Hubungan Cascode

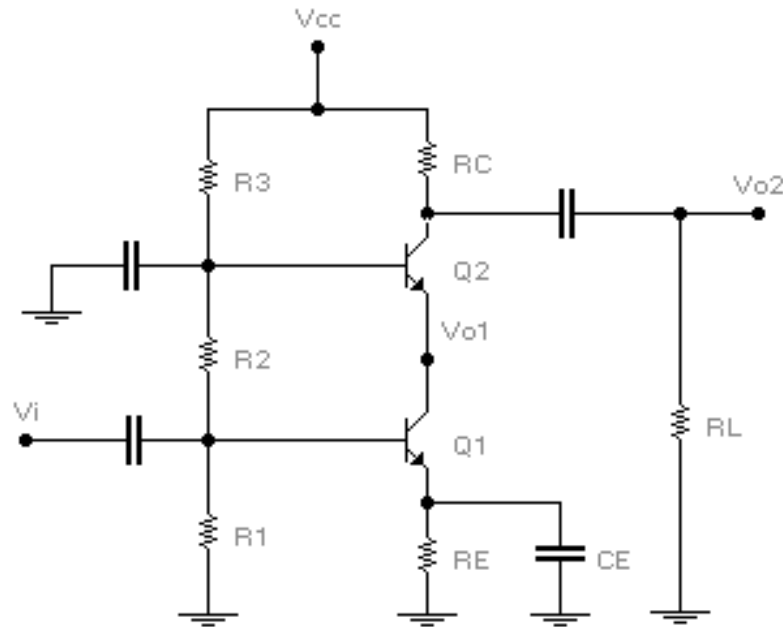
Hubungan *Cascode* banyak digunakan pada aplikasi frekuensi tinggi. Gambar 30 menunjukkan penguat bertingkat dengan hubungan Cascode. Pada hubungan Cascode tersebut keluaran penguat pertama yang berupa Common Emitter diumpangkan secara langsung ke penguat kedua yang berupa Common Basis. Hubungan seperti ini akan memberikan pengaruh C-Miller yang kecil pada tingkat pertama karena penguat CE ini mempunyai A_v yang kecil (-1), sehingga f_H (frekuensi cut-off atas) akan meningkat. Sedangkan pada tingkat kedua yang berupa CB akan memberikan respon frekuensi tinggi yang baik (f_H tinggi) karena tidak dipengaruhi C-Miller. Disamping itu penguat CB mempunyai A_v yang tinggi (sehingga bisa mengkompensasi A_v pertama yang kecil) dan Z_o yang besar. Dengan demikian keuntungan utama penguat bertingkat Cascode adalah respon frekuensi tinggi baik (f_H tinggi), sehingga BW lebar, dan impedansi keluaran tinggi (Z_o tinggi) dengan tetap memberikan A_v yang tinggi dan impedansi input cukup tinggi.



Gambar 30. Penguat bertingkat Cascode

Contoh penguat bertingkat dengan hubungan Cascode yang umum digunakan dalam praktek adalah seperti gambar 31. Rangkaian ini secara prinsip adalah sama seperti rangkaian pada gambar 30. Transistor Q1 sebagai penguat pertama dengan konfigurasi CE dan diumpangkan ke Q2 dengan konfigurasi CB. Transistor Q2 merupakan Common Basis (CB) ka-

rena pada basisnya terhubung ke ground oleh kapasitor. Resistor R1, R2, dan R3 merupakan pembagi tegangan yang memberikan tegangan bias pada kedua transistor. Rangkaian ekivalen AC dari rangkaian tersebut ditunjukkan pada gambar 32.



Gambar 31. Penguat Cascode dalam aplikasi praktek

Rangkaian ekivalen AC pada gambar 32 tersebut dibuat dengan menggunakan parameter-h. Pada penguat pertama yang konfigurasi CE terdapat parameter hie, hfe, dan ro (atau 1/hoe). Sedangkan penguat kedua dengan konfigurasi CB terdapat parameter hib, hfb, dan ro (atau 1/hoe = untuk CE). Analisis berikut dimaksudkan untuk membuktikan bahwa impedansi output (keluaran) dari rangkaian cascode adalah tinggi, dan menentukan penguatan tegangan.

Membuktikan Ro:

$$i_{ro2} = (V_o)/(r_{o2} + h_{ib}) \cong (V_o)/(r_{o2}) = -i_e$$

(karena r_{o1} dan $r_{o2} \gg h_{ib}$)

$$i_t = \alpha i_e$$

$$i_t = -(\alpha \cdot V_o)/(r_{o2})$$

sehingga,

$$i_{t2} = i_{ro2} + i_t$$

$$i_{t2} = (V_o)/(r_{o2}) + (-\alpha \cdot V_o)/(r_{o2})$$

$$i_{t2} = (V_o (1 - \alpha))/(r_{o2})$$

karena: $(1 - \alpha)/(\alpha) = 1/\beta$, $\Rightarrow (1 - \alpha) \cong 1/\beta$

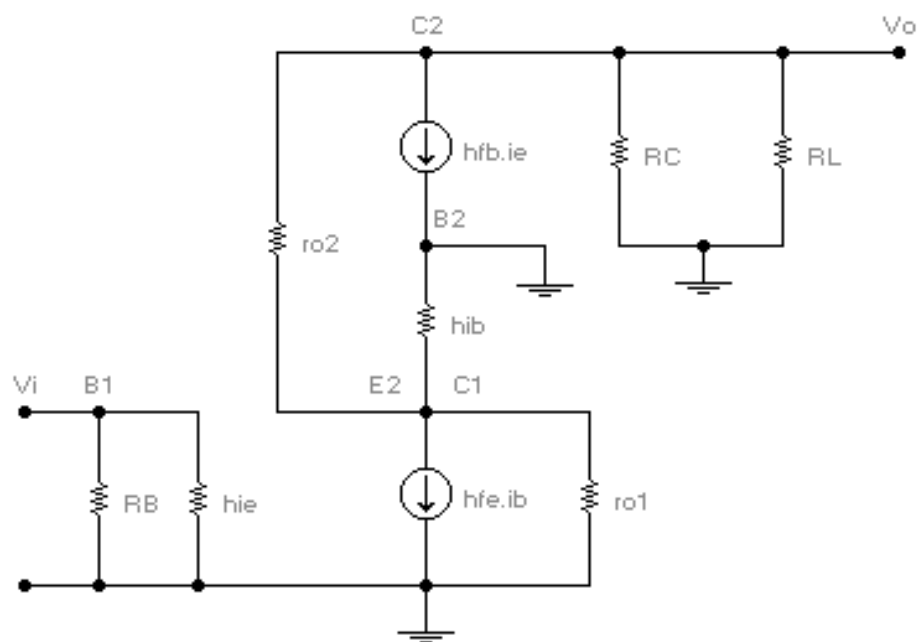
maka:

$$i_{t2} \cong (V_o)/(\beta \cdot r_{o2})$$

Dengan demikian:

$$R_o = (V_o)/(i_{t2})$$

$$R_o = \beta \cdot r_{o2}$$



Gambar 32. Rangkaian ekivalen penguat cascode

Penguatan tegangan, A_v :

Dengan asumsi $h_{fe1} = h_{fe2}$, maka:

$$I_{c1} = I_{c2}$$

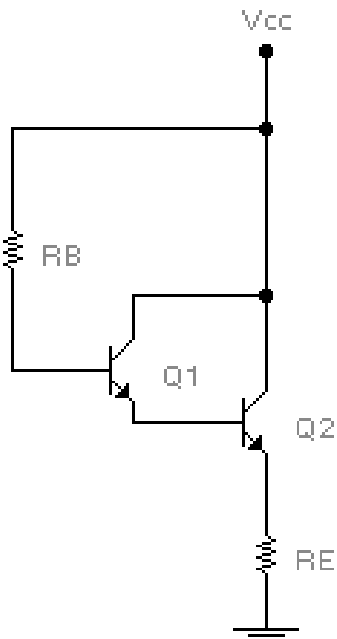
Dan $I_{b1} = I_{b2}$

Oleh karena I_{b1} dan I_{b2} kecil (pendekatan), maka:

$$V_{B1} = (R_1 \cdot V_{cc}) / (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$I_{C1} = I_{C2} = (V_{B1} - V_{BE}) / R_E$$

Dimana:



Gambar 34. Bias DC rangkain darlington

$$\beta_D = \beta_1 \cdot \beta_2$$

V_{BE} aktif = 1,4 s/d 1,8 Volt

Bias DC:

$$I_B = (V_{cc} - V_{BE}) / (R_B + \beta_D \cdot R_E)$$

$$I_E = (\beta_D + 1) \cdot I_B$$

$$I_E \cong \beta_D \cdot I_B$$

$$V_E = I_E \cdot R_E$$

$$V_B = V_E + V_{BE}$$

Analisis AC:

Rangkaian ekuivalen penguat dengan hubungan darlington adalah ditunjukkan pada gambar 35. Dasar penggambaran rangkain ekuivalen ini adalah gambar 34, dimana terminal masukan diambil pada basis Q1 dan terminal keluaran diambil pada kolektor Q2.

Menentukan Impedansi input, Z_i

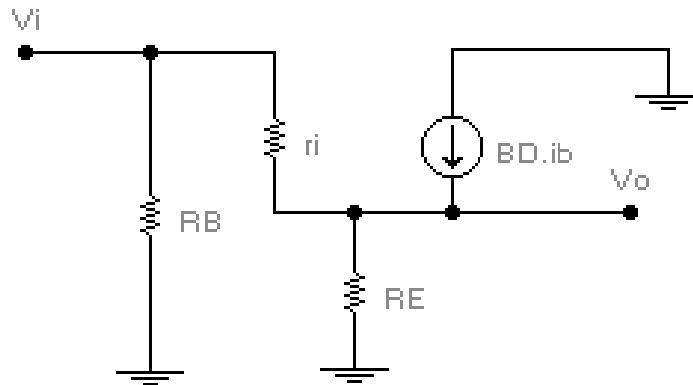
$$v_i = i_b \cdot r_i + i_b (\beta_D + 1) \cdot R_E$$

$$(v_i / i_b) = r_i + (\beta_D + 1) \cdot R_E$$

$$\cong r_i + \beta_D \cdot R_E$$

Dengan demikian:

$$Z_i = R_B // (r_i + \beta_D \cdot R_E)$$



Gambar 35. Rangkaian ekivalen transistor darlington

Menentukan Penguatan Arus, A_i :

$$i_o = i_e = i_b + \beta_D \cdot i_b$$

$$i_o = i_e \cong \beta_D \cdot i_b$$

Sedangkan,

$$i_b = (R_B) \cdot (i_{in}) / (R_B + (r_i + \beta_D \cdot R_E))$$

$$i_{in} = (i_b) \cdot (R_B + (r_i + \beta_D \cdot R_E)) / (R_B)$$

Sehingga:

$$A_i = i_o / i_{in}$$

$$A_i = (\beta_D \cdot i_b) \cdot (R_B) / (R_B + (r_i + \beta_D \cdot R_E)) \cdot (i_b)$$

$$A_i = (\beta_D \cdot R_B) / (R_B + (r_i + \beta_D \cdot R_E))$$

Menentukan Impedansi Output, Z_o :

Kondisi yang harus dipenuhi untuk mendapatkan impedansi output adalah sumber sinyal harus dibuat nol, dan tahanan beban harus dibuat terbuka. Rangkaian ekivalen menjadi seperti gambar 36.

$$Z_o = v_o / i_o$$

Diturunkan persamaan arus output sesuai dengan hukum Kirchoff arus sebagai berikut:

$$i_o = (v_o / R_E) + (v_o / r_i) - (\beta_D \cdot i_b)$$

$$i_o = (v_o / R_E) + (v_o / r_i) - (\beta_D)(v_o / r_i)$$

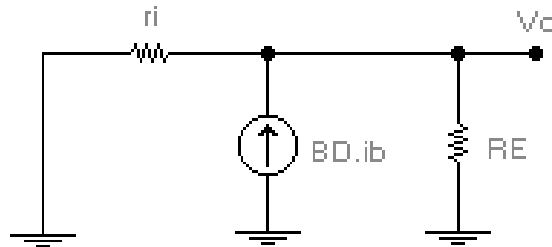
$$i_o = \{(1 / R_E) + (1 / r_i) - (\beta_D / r_i)\} \cdot v_o$$

Dengan demikian,

$$Z_o = v_o/i_o$$

$$Z_o = 1 / \{(1/RE) + (1/ri) - (\beta_D/ri)\}.$$

$$Z_o = RE // ri // (ri/\beta_D)$$



Gambar 36. Rangkaian ekivalen untuk menentukan Z_o

Menentukan Penguatan Tegangan, A_v :

Lihat kembali rangkaian ekivalen gambar 35.

$$v_o = (i_b + \beta_D \cdot i_b) \cdot R_E$$

$$v_o = i_b \cdot (R_E + \beta_D \cdot R_E)$$

Dan

$$v_i = i_b \cdot r_i + i_b (\beta_D + 1) \cdot R_E$$

$$v_i = i_b \cdot (r_i + R_E + \beta_D \cdot R_E)$$

Sehingga:

$$v_o/v_i = \{i_b \cdot (R_E + \beta_D \cdot R_E)\} / \{i_b \cdot (r_i + R_E + \beta_D \cdot R_E)\}$$

$$v_o/v_i = (R_E + \beta_D \cdot R_E) / (r_i + R_E + \beta_D \cdot R_E)$$

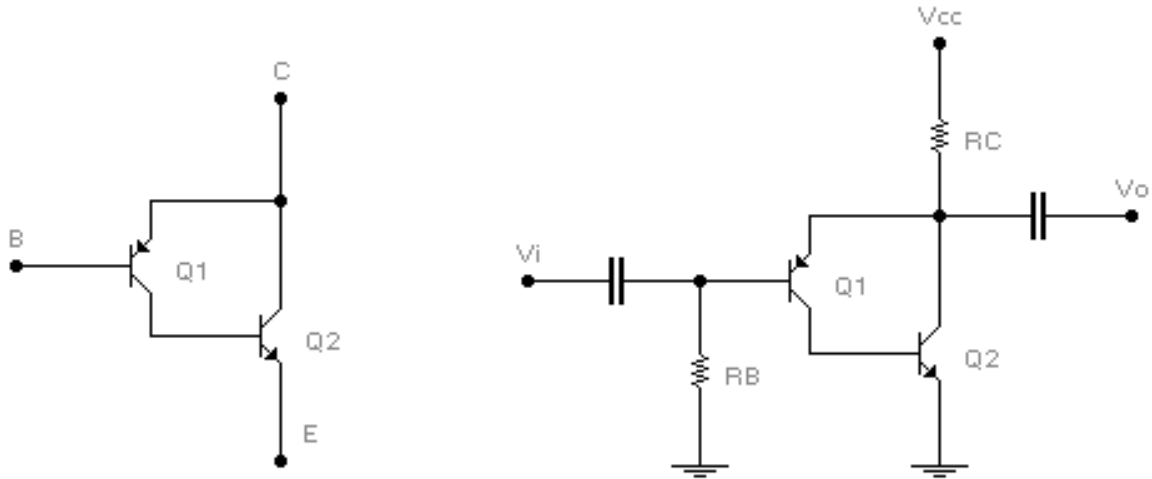
atau secara pendekatan:

$$v_o/v_i \cong 1$$

3.5 Hubungan Pasangan Umpan Balik (Feedback Pair)

Pasangan umpan balik tersusun atas dua transistor yang berlawanan jenis yakni transistor PNP dan NPN. Jenis kedua transistor ini yang membedakannya dengan hubungan darlington. Seperti halnya pada hubungan darlington, rangkaian pasangan umpan balik ini juga memberikan faktor penguatan arus yang tinggi, yakni perkalian beta kedua transistor. Pa-

sangan umpan balik ini digunakan bersama-sama dengan darlington guna membentuk rangkaian komplementer yang biasanya banyak dipakai dalam penguat daya. Hubungan pasangan umpan balik dan contoh rangkaian biasanya dapat dilihat pada gambar 37.



Gambar 37. Hubungan pasangan umpan balik dan rangkaian bias

Analisis DC:

Dari untai (loop) V_{cc} , R_C , Basis-Emiter Q1, dan R_B dapat diturunkan:

$$V_{cc} = I_C.R_C + V_{EB1} + I_{B1}.R_B$$

$$V_{cc} - V_{EB1} = (I_{C1} + I_{C2}).R_C + I_{B1}.R_B$$

$$V_{cc} - V_{EB1} = (I_{B1}.\beta_1 + I_{B2}.\beta_2).R_C + I_{B1}.R_B$$

karena $I_{B2} = I_{C1} = I_{B1}.\beta_1$, maka:

$$V_{cc} - V_{EB1} = (I_{B1}.\beta_1 + I_{B1}.\beta_1.\beta_2).R_C + I_{B1}.R_B$$

$$V_{cc} - V_{EB1} = I_{B1} . (\beta_1 + \beta_1.\beta_2).R_C + I_{B1}.R_B$$

Sehingga:

$$I_{B1} = (V_{cc} - V_{EB1}) / \{(\beta_1 + \beta_1.\beta_2).R_C + R_B\}$$

Atau secara pendekatan:

$$I_{B1} \cong (V_{cc} - V_{EB1}) / (\beta_1.\beta_2.R_C + R_B)$$

Selanjutnya I_{C1} dan I_{C2} dapat ditentukan

$$I_{C1} = I_{B1}.\beta_1$$

$$I_{C2} = I_{B2}.\beta_2$$

Karena $I_{C1} = I_{B2}$, maka:

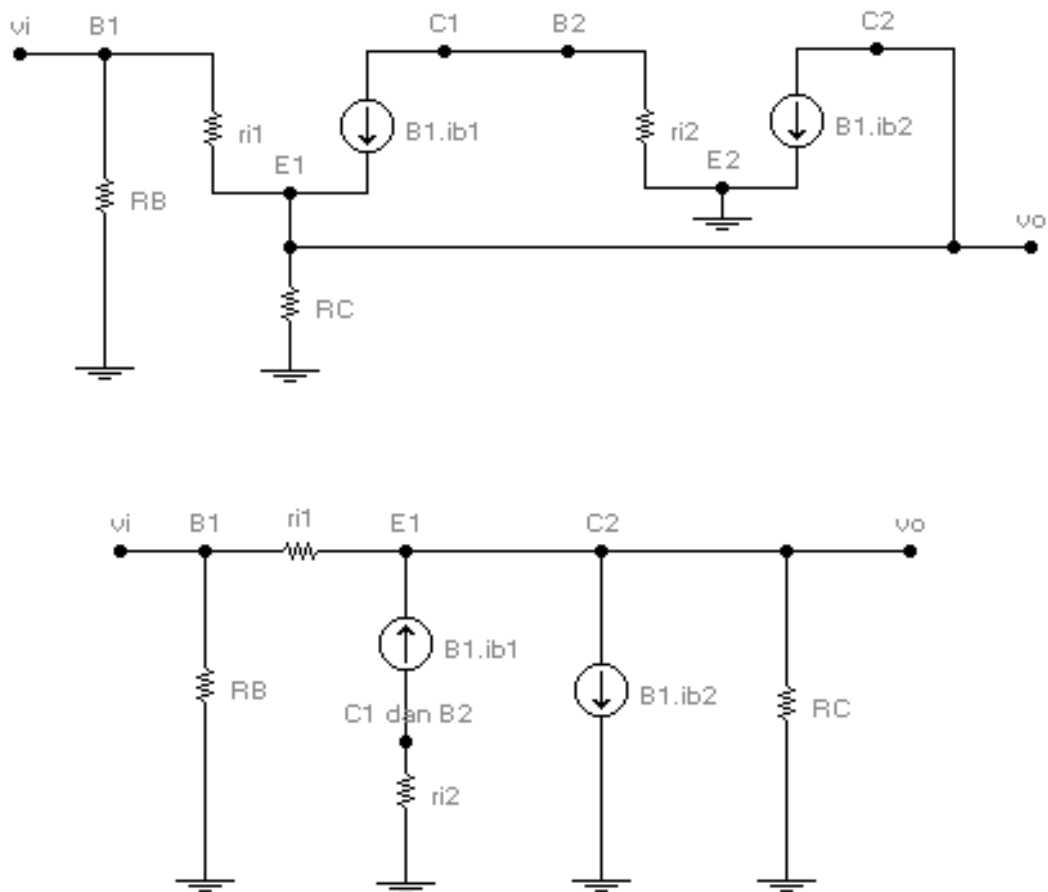
$$I_{C2} = I_{C1} \cdot \beta_2$$

Dengan demikian secara pendekatan, $I_{C2} \gg I_{C1}$

$$\text{Dan, } I_C \cong I_{C2}$$

Analisis AC:

Rangkaian ekuivalen pasangan umpan balik dari gambar 37 dapat dilihat pada gambar 38 berikut. Gambar atas merupakan penggambaran langsung dari rangkaian sedangkan gambar bawah telah disederhanakan untuk memudahkan analisis.



Gambar 38. Rangkaian ekuivalen pasangan umpan balik

Menentukan impedansi input, Z_i :

Tanpa memperhitungkan RB terlebih dahulu, maka

$$Z_i = v_i / i_{b1}$$

dimana:

$$i_{b1} = (v_i - v_o) / r_{i1}$$

sedangkan:

$$v_o = (\beta_2 \cdot i_{b2} - \beta_1 \cdot i_{b1} - i_{b1}) \cdot R_C$$

oleh karena: $\beta_2 \cdot i_{b2} \gg \beta_1 \cdot i_{b1} \gg i_{b1}$, maka:

$$v_o \cong (\beta_2 \cdot i_{b2}) \cdot R_C$$

Dengan demikian:

$$i_{b1} = (v_i - v_o) / r_{i1}$$

$$i_{b1} \cdot r_{i1} = v_i - (\beta_2 \cdot i_{b2}) \cdot R_C$$

$$i_{b1} \cdot r_{i1} + \beta_2 \cdot (\beta_1 \cdot i_{b1}) \cdot R_C = v_i$$

$$v_i / i_{b1} = r_{i1} + \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot R_C$$

jadi $Z_i = r_{i1} + \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot R_C$

Apabila RB diperhitungkan maka nilai RB harus diparalel dengan harga tersebut.

Menentukan Penguatan Arus, A_i :

Apabila RB tidak diperhitungkan maka:

$$A_i = i_o / i_{b1}$$

$$A_i = \{ \beta_2 \cdot i_{b2} - \beta_1 \cdot i_{b1} - i_{b1} \} / i_{b1}$$

$$A_i = \{ \beta_2 \cdot (\beta_1 \cdot i_{b1}) - (1 + \beta_1) \cdot i_{b1} \} / i_{b1}$$

$$A_i \cong \beta_1 \cdot \beta_2$$

Apabila RB diperhitungkan, maka:

$$A_i = \{ \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot R_B \} / (R_B + Z_i)$$

Menentukan Penguatan Tegangan, A_v :

$$A_v = v_o / v_i$$

perhatikan rangkaian ekuivalen,

$$i_{b1} = (v_i - v_o) / r_{i1}$$

$$v_o = v_i - i_{b1} \cdot r_{i1}$$

oleh karena: $i_{b1} = v_o / (\beta_1 \beta_2 R_C)$, maka:

$$v_o = v_i - \{v_o / (\beta_1 \beta_2 R_C)\} \cdot r_{i1}$$

$$v_i = v_o + \{v_o / (\beta_1 \beta_2 R_C)\} \cdot r_{i1}$$

$$v_i = v_o \{1 + r_{i1} / (\beta_1 \beta_2 R_C)\}$$

sehingga,

$$v_o / v_i = 1 / \{1 + r_{i1} / (\beta_1 \beta_2 R_C)\}$$

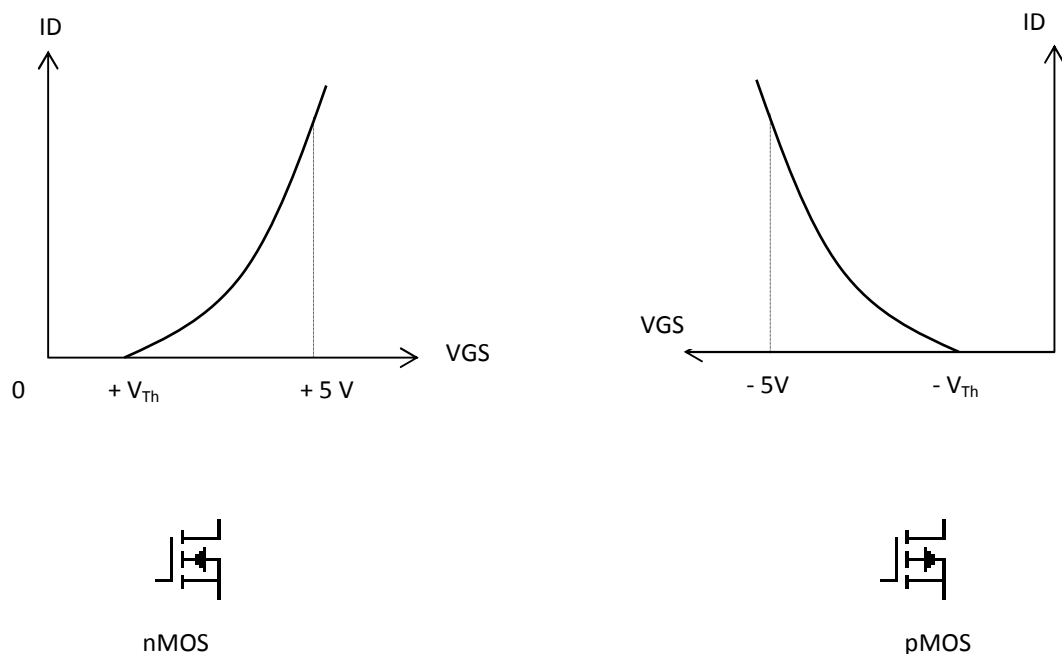
$$v_o / v_i = (\beta_1 \beta_2 R_C) / (r_{i1} + \beta_1 \beta_2 R_C)$$

$$v_o / v_i \cong 1$$

Jadi penguatan tegangan rangkaian pasangan umpan balik adalah satu.

3.6 Rangkaian CMOS

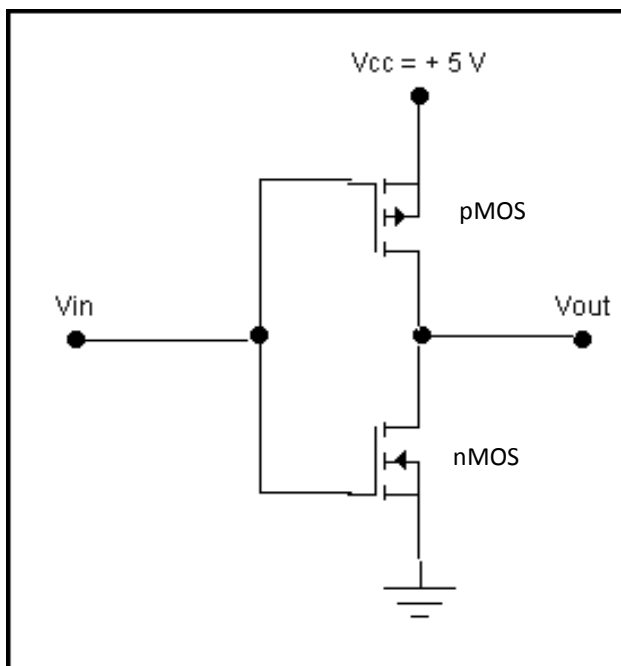
Rangkaian CMOS banyak digunakan dalam rangkaian terintegrasi digital. CMOS terdiri atas E-MOSFET kanal N dan E-MOSFET kanal P yang disusun secara komplementer. Untuk memahami cara kerja rangkaian CMOS, maka perlu diingat kembali prinsip kerja E-MOSFET baik untuk kanal N dan kanal P. Dalam pembicaraan ini E-MOSFET kanal N disebut juga nMOS, sedangkan E-MOSFET kanal P disebut juga pMOS. Kurva karakteristik serta simbol nMOS dan pMOS pada gambar 39 berikut.



Gambar 39. Karakteristik serta simbol nMOS dan pMOS

Dalam CMOS masing-masing nMOS dan pMOS bekerja secara bergantian pada dua titik ekstrem ON dan OFF atau bekerja sebagai saklar. Pada nMOS, bila tegangan masukan $V_{GS} = 0\text{ V}$, maka arus I_D tidak mengalir karena nMOS masih mati. Namun bila $V_{GS} = +5\text{ V}$, maka arus I_D akan mengalir besar. Pada pMOS, bila tegangan $V_{GS} = 0\text{ V}$, maka arus I_D tidak mengalir karena pMOS masih mati. Namun bila $V_{GS} = -5\text{ V}$, maka arus I_D akan mengalir.

Apabila kedua nMOS dan pMOS tersebut dihubungkan secara komplementer, maka diperoleh suatu rangkaian CMOS. Gambar 40 menunjukkan rangkaian CMOS yang diberi tegangan $V_{cc} = +5\text{ Volt}$.



Gambar 40. Rangkaian CMOS

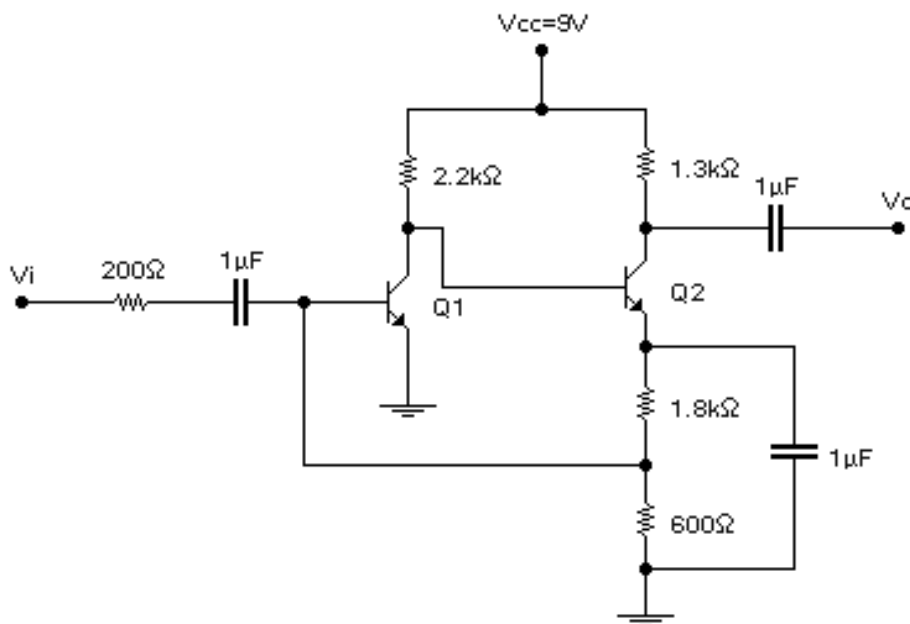
Apabila CMOS diberi tegangan masukan $V_i = 0$, maka Q1 (nMOS) akan mati karena V_{GS} -nya adalah 0 sedangkan Q2 (pMOS) akan hidup karena V_{GS} -nya adalah sebesar -5 V . Dengan demikian Q1 sebagai saklar terbuka dan Q2 sebagai saklar tertutup, maka tegangan keluaran V_o akan menjadi $+5\text{ V}$. Sebaliknya apabila CMOS diberi tegangan masukan $V_i = 5\text{ V}$, maka Q1 (nMOS) akan hidup karena V_{GS} -nya sebesar $+5\text{ V}$, sedangkan Q2 (pMOS) akan mati karena V_{GS} -nya sebesar 0 V . Dengan demikian Q1 sebagai saklar tertutup dan Q2 sebagai saklar terbuka, maka tegangan keluaran akan menjadi 0 V .

3.7 Ringkasan

Penguat bertingkat atau sering juga disebut penguat majemuk adalah rangkaian gabungan dua transistor (BJT atau FET) atau lebih. Tujuan penggabungan tersebut tidak hanya untuk mendapatkan faktor penguatan yang berlipat, seperti yang diperoleh pada penguat bertingkat jenis kaskade atau darlington, tetapi untuk memperoleh sifat atau karakteristik tertentu seperti pada rangkaian cascode dan rangkaian CMOS. Rangkaian cascode ini mempunyai respon frekuensi tinggi yang baik. Sedangkan dua buah MOSFET yang digabung menjadi CMOS banyak dipakai dalam teknologi IC. Penguat bertingkat yang dikopling secara langsung (tidak melalui C kopling) akan menyebabkan saling terpengaruhnya bias DC masing-masing tingkat.

3.8 Soal Latihan

1. Suatu penguat bertingkat jenis kaskade dua tingkat yang menggunakan 2 transistor dengan rangkaian bias yang sama, yakni: $R_1 = 15\text{K}\Omega$; $R_2 = 4,7\text{K}\Omega$; $R_c = 2,2\text{K}\Omega$; $R_e = 1\text{K}\Omega$; $\beta = 200$; $V_{cc} = 20\text{V}$; $V_i = 25\mu\text{Vp-p}$. Tentukan: V_o .
2. Perhatikan rangkaian cascode seperti gambar 31. Diketahui data sebagai berikut: $R_1 = R_2 = R_3 = 5\text{K}\Omega$; $V_{cc} = 24\text{ V}$; $R_E = 1\text{K}\Omega$; $R_L = R_C = 5\text{K}\Omega$; $\beta = 100$; $r_o = 11\text{ K}\Omega$. Tentukan A_{v1} , A_{v2} , dan R_o .
3. Diketahui suatu penguat dengan transistor darlington dengan data rangkaian bias sebagai berikut: $R_1 = 270\text{K}\Omega$; $R_2 = 100\text{ K}\Omega$; $R_C = 2\text{ K}\Omega$; $R_E = 1\text{K}\Omega$ (Ada C by-pass); $R_L = 5\text{K}\Omega$; $\beta_1 = 200$; $\beta_2 = 150$; $V_{cc} = 16\text{ V}$. Tentukan A_i dan A_v .
4. Perhatikan penguat bertingkat kopling langsung seperti gambar di bawah.



Data diketahui sebagai berikut: $h_{fe1} = h_{fe2} = 100$; $V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7$. Tentukan: Titik kerja masing-masing tingkat; penguatan tegangan total; swing sinyal output.