

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 2

RESPON FREKUENSI

2.1 Pendahuluan

Suatu penguat tentunya mempunyai keterbatasan dalam hal kemampuan melewatkan frekuensi sumber sinyal. Secara umum penguat hanya mampu melewatkan daerah frekuensi menengah. Hal ini berarti faktor penguatan dari penguat tersebut menurun baik pada daerah frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Oleh karena itu penguat tersebut dikatakan mempunyai tanggapan frekuensi (respon frekuensi) tertentu. Respon frekuensi dari setiap penguat berbeda-beda, yakni tergantung dari penggunaan penguat tersebut. Ukuran untuk menyatakan seberapa lebar tanggapan frekuensi suatu penguat biasanya disebut dengan lebar band (*bandwidth*).

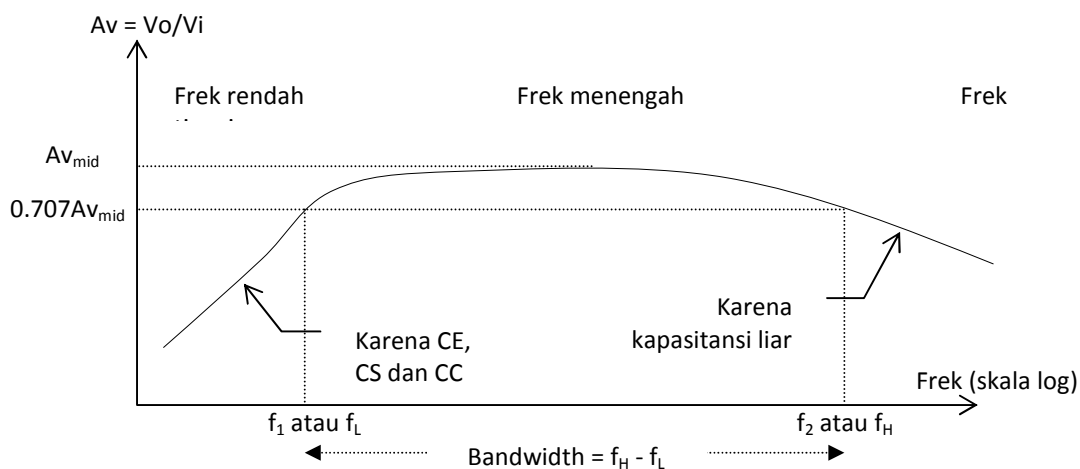
Pada bab ini akan dibahas pengaruh frekuensi sinyal terhadap karakteristik suatu penguat. Hal yang menjadi perhatian adalah karena suatu penguat tersusun atas berbagai komponen (kapasitor, induktor, transistor, dll) yang peka frekuensi, sehingga unjuk kerja penguat secara keseluruhan akan dipengaruhi juga variasi frekuensi sinyal masukan. Secara garis besar akan ada dua pembahasan yakni analisis penguat pada frekuensi rendah dan pada frekuensi tinggi. Sedangkan pembahasan pada frekuensi menengah sudah dilakukan pada buku sebelumnya.

2.2 Tanggapan Frekuensi

Pembahasan penguat yang dilakukan pada buku sebelumnya berasumsi bahwa frekuensi sinyal masukan adalah frekuensi menengah. Istilah frekuensi menengah memang mempunyai makna yang berbeda-beda tergantung dari bidang aplikasi. Akan tetapi kesepakatan yang telah dibuat adalah bahwa pada frekuensi menengah ini semua kapasitor dianggap hubung singkat (mempunyai reaktansi kapasitif sangat kecil) dan transistor serta komponen-komponen lain tidak terpengaruh oleh *stray capacitance* (kapasitansi liar).

Pembahasan dalam bab ini, perilaku atau karakteristik suatu penguat pada frekuensi rendah akan berbeda apabila diberi masukan frekuensi tinggi. Pada frekuensi rendah, kapasitor-kapasitor kopling dan by-pass tidak lagi diganti dengan ekivalen hubung singkat (dengan reaktansi kapasitif = 0) karena nilai reaktansinya menjadi semakin besar pada frekuensi rendah. Demikian juga apabila bekerja pada frekuensi tinggi, kapasitor liar yang timbul pada kaki-kaki transistor dan karena pengawatan PCB yang nilainya sangat kecil (dalam orde pF) akan mempunyai reaktansi kapasitif yang cukup berarti pada frekuensi tinggi, sehingga akan mempengaruhi faktor penguatan.

Kurva respon frekuensi tipikal dari penguat CE dengan kopling C dapat dilihat pada gambar 9. Kurva respon frekuensi ini dibuat dengan sumbu horisontal berupa besaran frekuensi (masukan) dalam skala logaritmis dan sumbu vertikal berupa besaran penguatan (atau keluaran) dalam skala linier. Kertas yang digunakan untuk menggambarkan kurva respon frekuensi disebut kertas semi-log (artinya semi logaritmis). Dengan menggunakan skala logaritmis yakni jarak antara satu titik dengan lainnya tidaklah linier melainkan secara logaritmis, maka penggambaran besaran frekuensi akan efisien.



Gambar 9. Kurva respon frekuensi tipikal penguat kopling C

Terlihat pada kurva respon frekuensi (gambar 9) bahwa pada daerah frekuensi rendah, semakin rendah frekuensi semakin kecil pula penguatannya (atau gain). Hal ini disebabkan karena pengaruh CE (C by-pass pada emitor), CS (C kopling pada masukan), dan CC (C kopling pada keluaran). Ketiga kapasitor ini reaktansi kapasitipnya akan semakin besar bila frekuensinya semakin rendah ($X_C = 1/2\pi fC$), sehingga faktor penguatannya menjadi berkurang. Sedangkan pada daerah frekuensi tinggi, semakin tinggi frekuensi semakin kecil penguatan. Hal ini disebabkan karena reaktansi dari kapasitor liar menjadi kecil dan ini akan membebani penguat sehingga penguatannya menjadi menurun.

Lebar bidang frekuensi yang menentukan ukuran bandwidth dari suatu respon frekuensi dibatasi oleh f_1 (atau f_L) untuk frekuensi rendah dan f_2 (atau f_H) untuk frekuensi tinggi. Istilah f_1 dan f_2 ini biasanya disebut dengan frekuensi *corner*, *cutoff*, *break*, atau *half power* (setengah daya). Nilai penguatan pada titik f_1 dan f_2 ini adalah sebesar $0.707 A_{v_{mid}}$. Faktor sebesar 0.707 ini dipilih karena pada titik ini daya keluaran menjadi setengah dari daya keluaran pada frekuensi menengah.

$$\text{Daya Output pada frek menengah, } P_{o_{mid}} = [V_o^2]/R_o$$

$$= [A_{v_{mid}} V_i]^2 / R_o$$

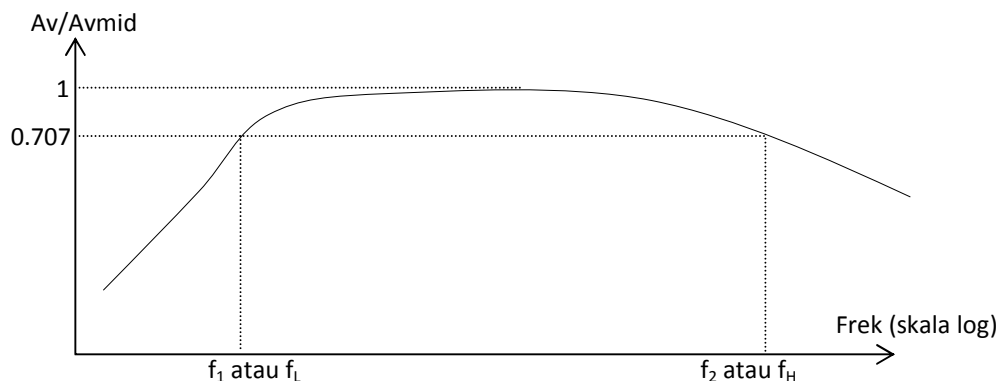
$$\text{Daya Output pada } f_1 \text{ atau } f_2, P_{o_{HPF}} = [0.707 A_{v_{mid}} V_i]^2 / R_o$$

$$= 0.5 [A_{v_{mid}} V_i]^2 / R_o$$

$$= 0.5 P_{o_{mid}}$$

$$\text{Bandwidth (BW)} = f_2 - f_1, \text{ atau}$$

$$= f_H - f_L$$

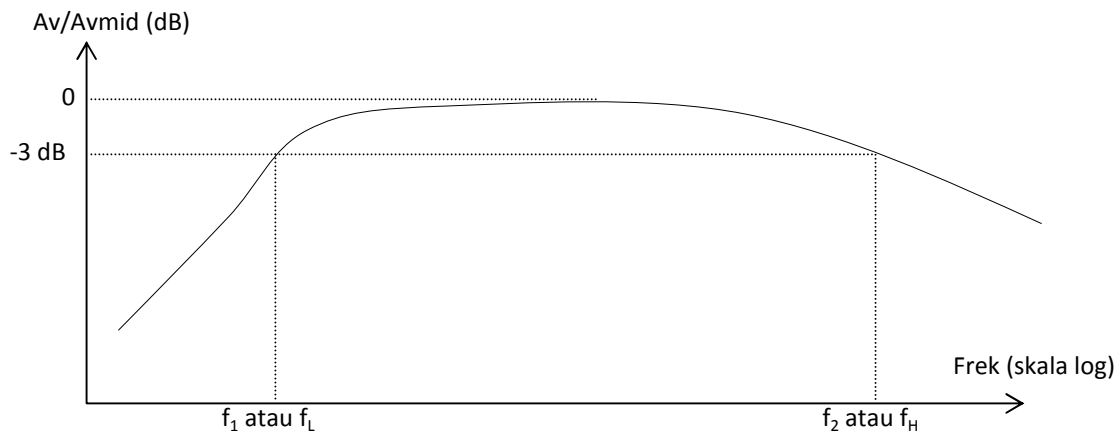


Gambar 10. Kurva respon frekuensi yang dinormalisasi

Dalam sistem komunikasi baik audio maupun video, penggambaran kurva respon frekuensi digunakan ukuran decibel untuk menunjukkan level penguatan (gain). Untuk menggambarkan kurva dalam satuan decibel terlebih dahulu kurva pada gambar 9 perlu di normalisasi, seperti gambar 10. Sumbu vertikal merupakan satuan A_v/A_{vmid} , sehingga pada saat A_v nya adalah A_{vmid} , maka nilai pada titik tersebut adalah 1. Selanjutnya kurva dengan satuan decibel dapat dibuat dengan mengkonversi satuan penguatan ke decibel (dB).

$$A_v/A_{vmid} \text{ (dB)} = 20\log A_v/A_{vmid}$$

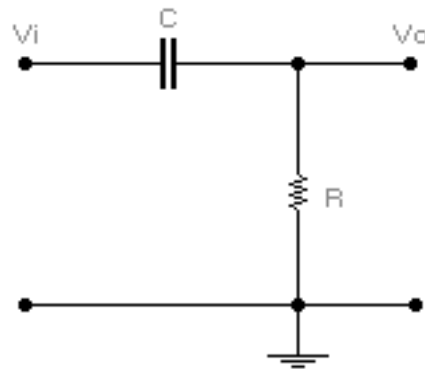
Kurva respon frekuensinya dapat dilihat pada gambar 11. Pada frekuensi menengah nilai dBnya adalah $20\log 1 = 0$ dB, sedangkan pada frekuensi cutoff nilainya adalah $20\log 1/\sqrt{2} = -3$ dB.



Gambar 11. Kurva respon frekuensi dalam decibel (dB)

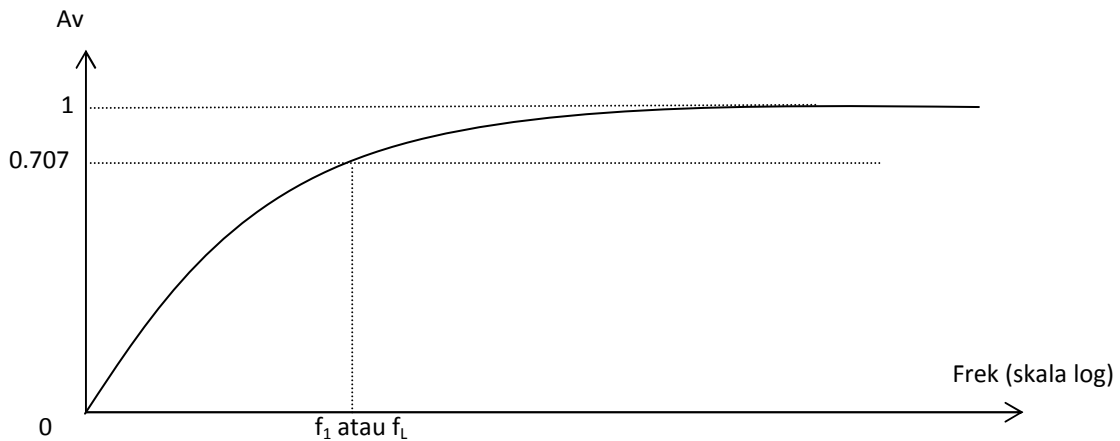
2.3 Analisis Frekuensi Rendah

Jaringan R-C yang terbentuk atas kombinasi kapasitor-kapasitor kopling, by-pass, dan resistor beban, dari suatu penguat akan menentukan frekuensi cutoff pada frekuensi rendah (f_L). Masing-masing kombinasi R - C yang terdapat pada bagian masukan, keluaran, maupun kaki emitor bisa disederhanakan menjadi sebuah R dan sebuah C seperti gambar 12.



Gambar 12. Jaringan R-C yang menentukan f_L

Karakteristik jaringan R-C tersebut terhadap frekuensi dapat dibuat secara sederhana. Perlu diingat bahwa reaktansi kapasitif bergantung pada frekuensi, yakni: $X_C = 1/2\pi fC$, sehingga semakin tinggi frekuensi semakin kecil reaktansi X_C . Pada frekuensi tinggi sekali maka X_C mendekati nol, sehingga V_o hampir sama dengan V_i ($A_v \cong 1$). Pada frekuensi nol (rendah sekali) maka X_C menjadi sangat besar, sehingga C seperti rangkaian terbuka dan V_o sama dengan nol ($A_v \cong 0$). Di antara kedua contoh ekstrem ini tentunya nilai A_v akan bervariasi dari 0 sampai 1 untuk perubahan frekuensi dari 0 sampai tak terhingga. Lihat gambar 13.



Gambar 13. Respon frekuensi rendah rangkaian R-C

Apabila gambar 12 diperhatikan, maka jaringan R-C tersebut merupakan pembagi tegangan, sehingga berlaku:

$$V_o = (R \cdot V_i) / \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Pada saat $R = X_c$, maka:

$$V_o = (R \cdot V_i) / \sqrt{(R^2 + R^2)}$$

$$V_o = (R \cdot V_i) / \sqrt{(2R^2)}$$

$$V_o = (V_i) / \sqrt{2}$$

Sehingga,

$$A_v = V_o / V_i$$

$$A_v = 1 / \sqrt{2}$$

$$A_v = 0.707$$

Dengan kata lain, sinyal keluaran V_o menjadi 70.7 % dari sinyal masukan V_i pada saat reaktansi kapasitif X_c sama dengan resistor dalam jaringan R-C. Pada saat ini (dimana $A_v = 0.707$) frekuensi sinyal dapat ditentukan, yakni:

$$X_c = 1 / 2\pi f C$$

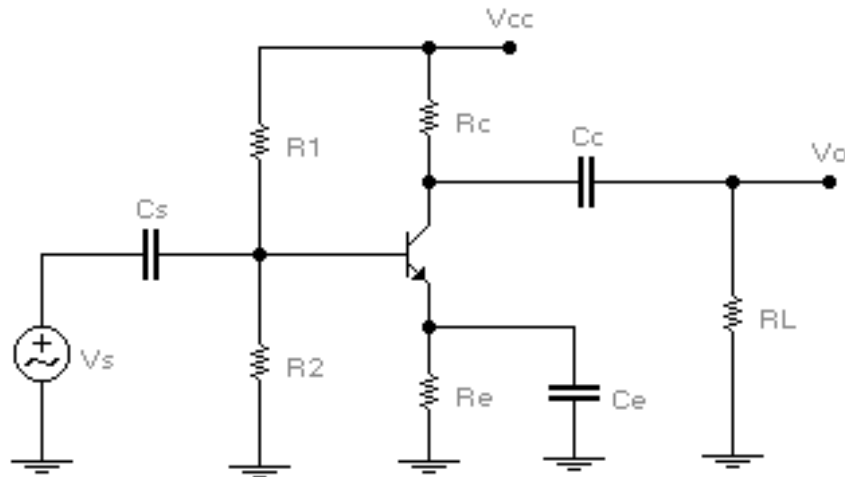
Karena: $R = X_c$

Maka: $f = 1 / 2\pi RC$

Frekuensi yang diperoleh ini merupakan frekuensi cutoff frekuensi rendah (f_1 atau f_L) dari jaringan R-C tersebut dan untuk selanjutnya disebut dengan f_L .

2.4 Respon Frekuensi Rendah

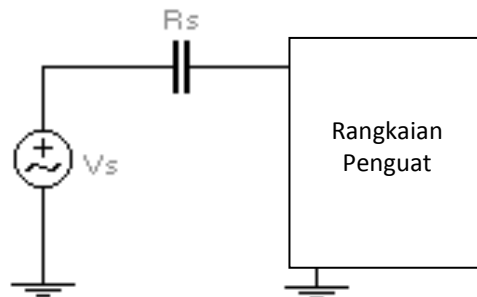
Untuk sebuah penguat satu tingkat biasanya terdapat tiga kemungkinan jaringan RC yaitu: C_s dan Z_i ; C_e dan R_e ; serta C_c dan $Z_o + \text{beban}$. Masing-masing jaringan RC tersebut tentunya mempunyai karakteristik tersendiri terhadap frekuensi (respon frekuensi) rendah. Oleh karena itu masing-masing akan mempunyai frekuensi cutoff (f_L) yang berbeda. Sebenarnya unjuk kerja respon frekuensi secara keseluruhan (f_L) dari penguat tersebut ditentukan oleh ketiga f_L tersebut secara bersama-sama. Akan tetapi dengan asumsi bahwa jarak masing-masing f_L cukup jauh, maka untuk memudahkan analisis disepakati bahwa f_L dari penguat ditentukan oleh nilai f_L tertinggi diantara ketiga f_L tersebut. Dengan demikian pengaruh masing-masing kapasitor akan dianalisis secara terpisah, sehingga diperoleh f_{Ls} , f_{Lc} , dan f_{Le} . Perhatikan rangkaian penguat CE pada gambar 14.



Gambar 14. Penguat CE dengan kapasitor penentu respon frekuensi rendah

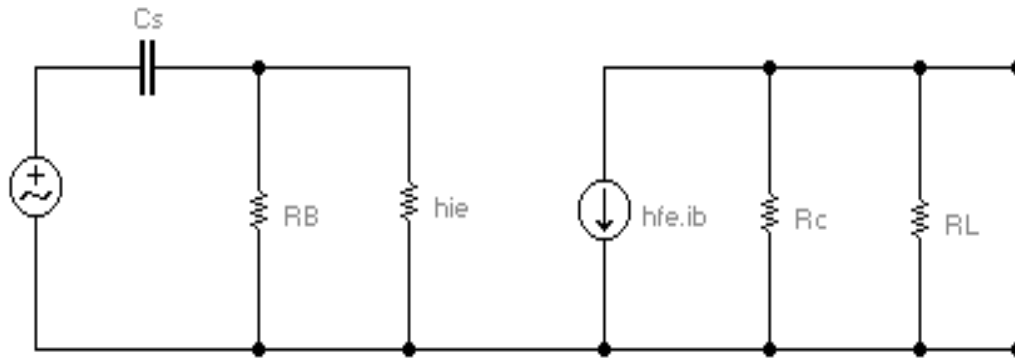
Pengaruh Cs:

Cs adalah kapasitor kopling yang menghubungkan sumber sinyal dengan rangkaian penguat. Jaringan R-C yang dibentuk oleh Cs dan komponen R pada bagian masukan penguat adalah seperti gambar 15.



Gambar 15. Jaringan R-C pada masukan penguat

Rangkaian ekivalen ac dengan menggunakan parameter-h selanjutnya dapat dibuat seperti pada gambar 16. Oleh karena analisis masing-masing jaringan R-C dibuat secara terpisah, maka pada saat menganalisis pengaruh Cs, pengaruh Cc dan Ce ditiadakan yang berarti reaktansi kapasitipnya adalah nol. Dengan demikian hanya pengaruh Cs saja yang diamati. Demikian juga nanti sebaliknya untuk Cc dan Ce.



Gambar 16. Rangkaian ekuivalen ac dengan pengaruh C_s (C_e dan C_c diabaikan)

Dari rangkaian ekuivalen ac gambar 16, maka besarnya frekuensi cutoff rendah karena pengaruh C_s (f_{Ls}) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$f_{Ls} = 1 / \{2\pi (R_B // h_{ie}) C_s\}$$

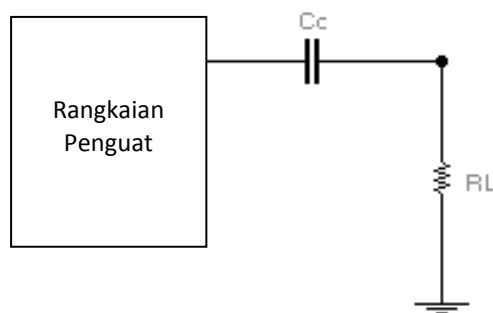
Apabila sumber sinyal mempunyai tahanan dalam atau R_s , maka R total pada jaringan R-C tersebut menjadi:

$$R_t = (R_B // h_{ie}) + R_s$$

dan f_{Ls} menjadi: $f_{Ls} = 1 / \{2\pi (R_t) C_s\}$

Pengaruh C_c :

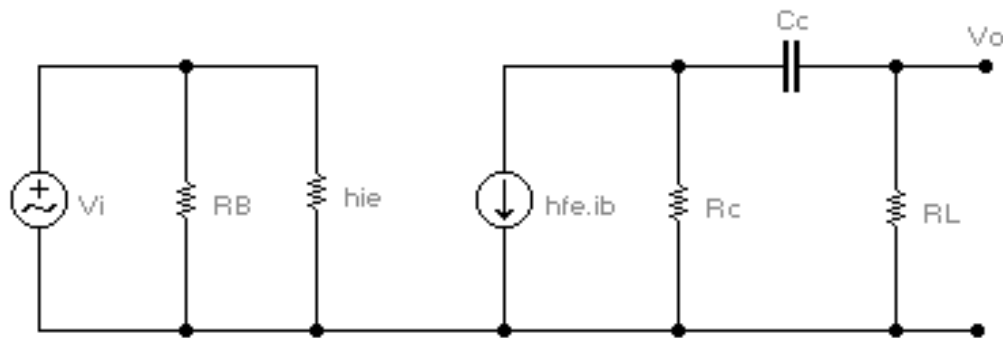
C_c adalah kapasitor kopling yang menghubungkan rangkaian penguat dengan beban (R_L). Jaringan R-C yang dibentuk oleh C_c dan komponen R pada bagian keluaran penguat adalah seperti gambar 17.



Gambar 17. Jaringan R-C pada keluaran penguat

Rangkaian ekuivalen ac dengan parameter-h untuk menganalisis pengaruh C_c dari penguat tersebut adalah seperti pada gambar 18. Pada rangkaian ekuivalen ac tersebut pengaruh C_s

dan C_e ditiadakan atau dianggap hubung singkat (reaktansi kapasitif = 0). Dengan demikian pada tahap ini hanya pengaruh C_c saja yang dianalisis.



Gambar 18. Rangkaian ekivalen ac dengan pengaruh C_c (C_s dan C_e diabaikan)

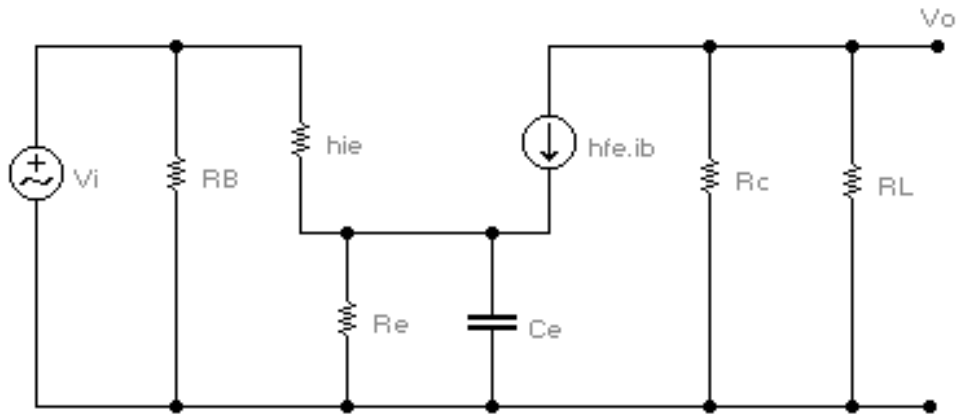
Berdasarkan rangkaian ekivalen ac gambar 18 tersebut, maka besarnya frekuensi cutoff rendah karena pengaruh C_c (f_{Lc}) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$f_{Lc} = \frac{1}{2\pi (R_c + R_L)C_c}$$

Apabila pada rangkaian tersebut tidak dipasang R_L (R_L tidak ada), maka jaringan R-C menjadi terbuka, sehingga frekuensi cutoff rendah tidak bisa ditentukan. Hal ini karena komponen R dari jaringan R-C tersebut adalah tak terhingga, sehingga f_{Lc} -nya adalah nol. Dengan kata lain f_{Lc} untuk kasus ini tidak mempengaruhi f_L penguat secara keseluruhan.

Pengaruh C_e :

C_e adalah kapasitor yang dipasang paralel dengan R_e (R emitor) yang biasanya disebut dengan C by-pass. Fungsinya adalah melewatkan sinyal ac ke ground, agar tidak terjadi rugi sinyal pada R_e . Dengan adanya C by-pass maka faktor penguatan menjadi besar dengan tetap diperoleh stabilitas bias yang baik karena adanya R_e . Tidak semua rangkaian penguat mempunyai C by-pass. Apabila C by-pass tidak ada maka tidak perlu dilakukan analisis atas pengaruh C_e . Rangkaian ekivalen ac yang menunjukkan pengaruh C_e pada rangkaian penguat adalah seperti gambar 19.



Gambar 19. Rangkaian ekivalen ac dengan pengaruh Ce (Cs dan Cc diabaikan)

Berdasarkan rangkaian ekivalen ac gambar 19 tersebut, maka besarnya frekuensi cutoff rendah karena pengaruh Ce (fLe) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$f_{Lc} = 1 / \{2\pi (Re') Cs\}$$

dimana:

$$Re' = (hie / (hfe + 1)) // Re$$

Persamaan ini diperoleh dengan asumsi bahwa penguat sumber sinyal ideal dengan tahanan dalam = 0. Apabila tidak ideal (mempunyai nilai Rs tertentu), maka nilai Rs tersebut perlu dimasukkan dalam analisis. Dengan demikian RB juga mempengaruhi analisis.

Setelah diperoleh ketiga nilai frekuensi cutoff, fLs, fLc, dan fLe, maka fL secara keseluruhan dari penguat ditentukan oleh frekuensi tertinggi di antara ketiga, fLs, fLc, dan fLe tersebut. Hal ini berlaku dengan asumsi bahwa jarak antara ketiga fL tersebut cukup jauh. Bila jarak frekuensi-frekuensi tersebut dekat, maka akan terjadi saling interaksi, sehingga fL-nya sedikit bergeser lebih tinggi.

Contoh:

Diketahui rangkaian penguat CE seperti pada gambar 14 dengan data rangkaian sebagai berikut:

Cs = 10 μF, Ce = 20 μF, Cc = 1 μF, Rs = 1 KΩ, R1 = 40 KΩ, R2 = 10 KΩ, Re = 2 KΩ, Rc = 4 KΩ, RL = 2,2 KΩ, hfe = 100, Vcc = 20 V, hie = 1576 Ω

Tentukan frekuensi cutoff rendah (fL) dari penguat tersebut.

Tentukan faktor penguatan pada fL tersebut.

Penyelesaian:

Pengaruh Cs:

$$f_{Ls} = 1/\{2\pi (R_i)C_s\}$$

dimana: $R_i = (R_1//R_2//h_{ie}) + R_s$

$$R_i = (40K//10K//1,576K) + 1K$$

$$R_i = 2,32 K$$

Sehingga:

$$f_{Ls} = 1/\{2\pi (2320)(10 \cdot 10^{-6})\}$$

$$f_{Ls} = 6,86 \text{ Hz}$$

Pengaruh Cc:

$$f_{Lc} = 1/\{2\pi (R_c + R_L)C_c\}$$

$$f_{Lc} = 1/\{2\pi (4K + 2,2K) (1 \cdot 10^{-6})\}$$

$$f_{Lc} = 25,68 \text{ Hz}$$

Pengaruh Ce:

$$f_{Lc} = 1/\{2\pi (R_{e'})C_s\}$$

dimana: $R_{e'} = \{(h_{ie}/(h_{fe}+1)) + (R_s//R_1//R_2)/(h_{fe}+1)\}/R_e$

$$R_{e'} = \{(1576/(100+1)) + (1K//40K//10K)/(100+1)\}/2K$$

$$R_{e'} = \{(15,76) + (8,89)\}/2K$$

$$R_{e'} = 24,35 \Omega$$

sehingga:

$$f_{Lc} = 1/\{2\pi (24,35) (20 \cdot 10^{-6})\}$$

$$f_{Lc} = 327 \text{ Hz}$$

Dari ketiga harga f_{Lc} , f_{Lc} , dan f_{Le} tersebut, ternyata nilai $f_{Le} = 327 \text{ Hz}$ jauh lebih besar dari dua frekuensi yang lain. Dengan demikian f_L dari penguat adalah sebesar 327 Hz .

Menentukan Av:

$$A_{vmid} = V_o/V_i$$

$$A_{vmid} = - (h_{fe})(R_c//R_L)/h_{ie}$$

$$A_{vmid} = - 90$$

Bila dihitung sejak V_s , maka:

$$A_{v_{mid_{tot}}} = A_{v_{mid}} \cdot Z_i / (Z_i + R_s)$$

$$A_{v_{mid_{tot}}} = (-90) \cdot (1,32K) / (1,32K + 1K)$$

$$A_{v_{mid_{tot}}} = - 51,21$$

Pada frekuensi cutoff, faktor penguatannya menjadi:

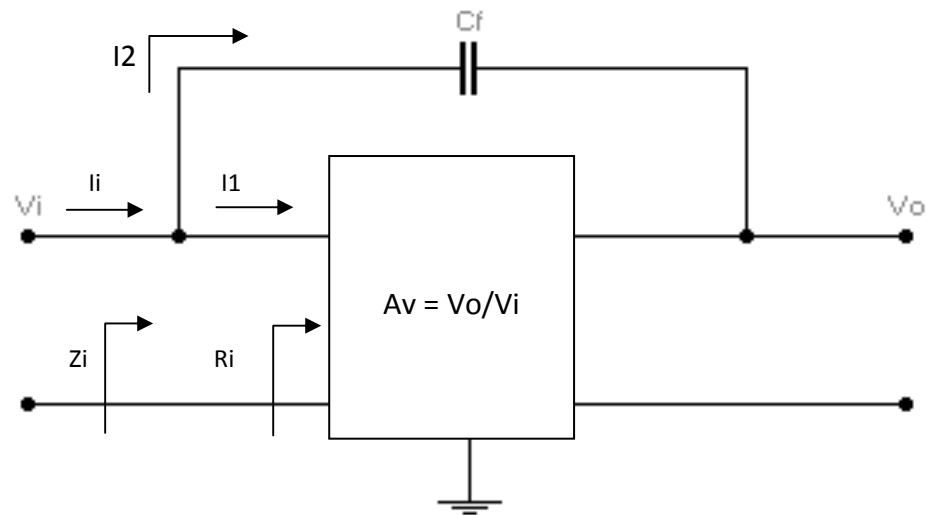
$$A_{v_{L_{tot}}} = (- 51,21)(0,707)$$

$$A_{v_{L_{tot}}} = - 36,2$$

2.5 Respon Frekuensi Tinggi

Ada dua faktor yang mempengaruhi tanggapan penguat pada frekuensi tinggi (respon frekuensi tinggi), yaitu: (a) kapasitor liar, dan (b) Beta (β) yang tergantung frekuensi. Kapasitor liar merupakan efek kapasitansi yang muncul dari ujung-ujung terminal suatu komponen atau pengawatan lainnya. Reaktansi kapasitor liar ini menjadi berarti bila dikerjakan pada frekuensi tinggi. Sedangkan dari Beta (β) suatu transistor juga sangat dipengaruhi oleh frekuensi. Artinya, beta (β) suatu transistor akan menurun bila dikerjakan pada daerah frekuensi tinggi.

Sebelum masuk pada pembahasan respon frekuensi tinggi, pembahasan tentang teori Miller perlu dijelaskan terlebih dahulu. Hal ini sangat erat kaitannya dengan pengaruh kapasitor liar pada kaki-kaki transistor. Oleh karena itu pembahasan teori Miller di sini berkenaan dengan adanya suatu kapasitor (liar) yang terhubung antara masukan dan keluaran suatu sistem penguat. Tujuan pembahasan teori Miller ini adalah apabila terdapat suatu sistem penguat dimana antara masukan dan keluarannya terhubung suatu komponen (dalam hal ini adalah kapasitor), maka kapasitansinya akan terasa pada bagian masukan saja dan pada bagian keluaran saja, sehingga akan memudahkan dalam analisis selanjutnya. Dengan kata lain, dengan teori Miller, C_f (pada gambar 20) dapat diganti dengan ekuivalen C_{Mi} (C pengaruh Miller pada input) dan C_{Mo} (C pengaruh Miller pada output).



Gambar 20. Jaringan untuk penurunan kapasitansi Miller input

Dari gambar 20 dapat diturunkan persamaan dengan menggunakan hukum Krichhoff:

$$I_i = I_1 + I_2$$

Dengan hukum Ohm:

$$I_i = V_i/Z_i$$

$$I_1 = V_i/R_i$$

$$I_2 = (V_i - V_o)/X_{Cf}$$

$$I_2 = (V_i - A_v V_i)/X_{Cf}$$

$$I_2 = (1 - A_v)V_i/X_{Cf}$$

Sehingga diperoleh:

$$I_i = I_1 + I_2$$

$$V_i/Z_i = V_i/R_i + (1 - A_v)V_i/X_{Cf}$$

$$1/Z_i = 1/R_i + 1/(X_{Cf}(1 - A_v))$$

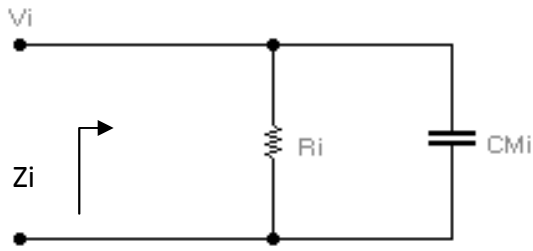
$$1/Z_i = 1/R_i + 1/X_{CM}$$

dimana:

$$X_{CM} = X_{Cf}/(1 - A_v)$$

$$C_M = (1 - A_v)C_f$$

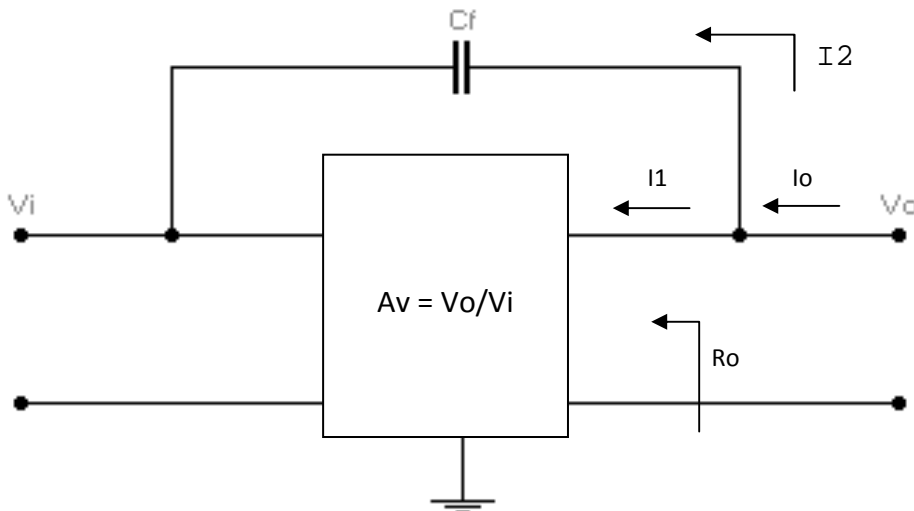
C_M adalah kapasitor pengaruh Miller yang terdapat pada masukan penguat, sehingga sering disebut C_{Mi} . Dengan demikian rangkaian ekivalen bagian masukan dari penguat dapat diganti (disederhanakan) menjadi gambar 21.



Gambar 21. Ekuivalen masukan penguat dengan pengaruh C_{Mi}

Nilai C_{Mi} merupakan efek kapasitansi yang dirasakan pada input penguat karena adanya C_f. Pada persamaan di atas, nilai C_{Mi} berlaku untuk penguat inverting (fasa keluaran dan fasa masukan berbeda 180°). Hal ini karena apabila A_v bernilai positif (bukan inverting), maka nilai C_{Mi} menjadi negatif. Bila penguat bukan inverting, maka persamaan untuk C_{Mi} perlu diturunkan kembali. Perlu diingat pula bahwa nilai A_v dalam persamaan tersebut adalah faktor penguatan tegangan penguat utama (V_o/V_i) pada frekuensi menengah. Dengan asumsi bahwa pada frekuensi menengah, faktor penguatan tegangan tidak dipengaruhi oleh kapasitor liar (misalnya: C_f) maupun kapasitor kopling dan by pass.

Kapasitor C_f juga dirasakan pengaruhnya pada bagian keluaran penguat. Analisis untuk menentukan besarnya pengaruh Miller pada keluaran penguat (C_{Mo}) dibuat seperti analisis menentukan C_{Mi}. Lihat gambar 22.



Gambar 22. Jaringan untuk penurunan kapasitansi Miller input

Dari gambar 22 dapat diturunkan persamaan dengan menggunakan hukum Krichhoff:

$$I_o = I_1 + I_2$$

Dengan hukum Ohm:

$$I_1 = V_o/R_o$$

$$I_2 = (V_o - V_i)/X_{Cf}$$

Oleh karena R_o besar sekali, maka I_1 dapat diabaikan bila dibanding dengan I_2 .

Sehingga:

$$I_o \cong I_2$$

$$I_o \cong (V_o - V_i)/X_{Cf}$$

$$I_o \cong (V_o - V_o/A_v)/X_{Cf}$$

$$I_o \cong V_o(1 - (1/A_v))/X_{Cf}$$

$$I_o/V_o \cong (1 - (1/A_v))/X_{Cf}$$

$$V_o/I_o \cong X_{Cf}/(1 - (1/A_v))$$

Dengan demikian diperoleh:

$$X_{C_{M_o}} = X_{Cf}/(1 - (1/A_v))$$

$$C_{M_o} = C_f(1 - (1/A_v))$$

Sebagaimana pada CMI, nilai C_{M_o} ini juga berlaku untuk penguat inverting, karena bila penguatan bernilai positif maka kapasitor menjadi negatif. Pada umumnya faktor penguatan A_v berharga jauh lebih besar dari 1. Oleh karena itu secara pendekatan:

$$C_{M_o} \cong C_f$$

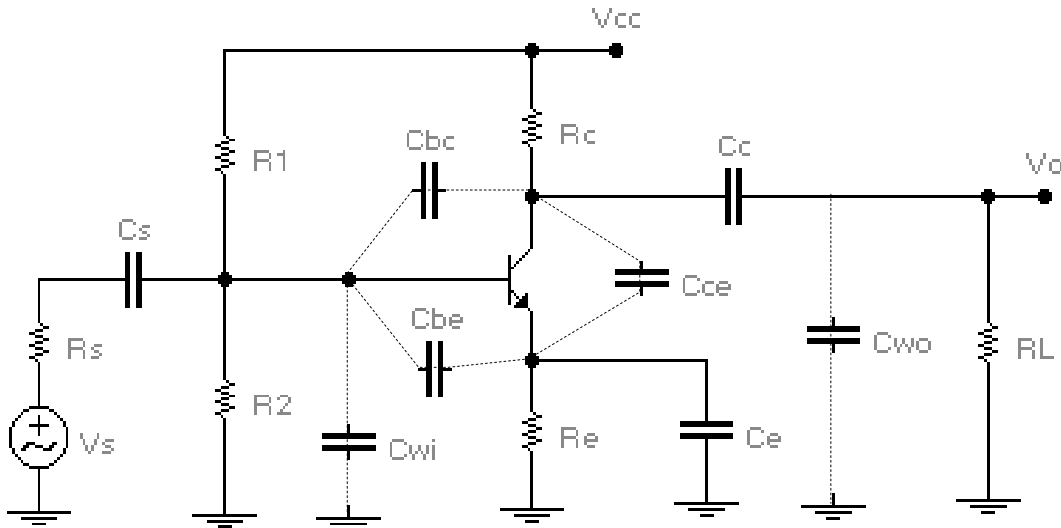
Setelah memahami pengaruh suatu kapasitor yang terhubung antara masukan dan keluaran penguat, maka sekarang pembahasan tentang respon frekuensi tinggi bisa dimulai. Rangkaian penguat dengan kapasitor liar yang dominan mempengaruhi respon frekuensi tinggi dapat dilihat pada gambar 23. Pada gambar tersebut terdapat tiga macam kapasitor liar yang muncul diantara kaki transistor, yakni: C_{be} , C_{bc} , dan C_{ce} . Nama-nama ketiga transistor tersebut disesuaikan dengan kaki-kaki transistor yang bersangkutan. Disamping itu terdapat pula kapasitor liar yang muncul karena pengawatan (atau PCB) pada bagian masukan dan keluaran, yakni: C_{wi} dan C_{wo} . Harga tipikal dari kapasitor liar ini adalah sebagai berikut:

$$C_{be} = 100 \text{ pF}$$

$$C_{bc} = (\text{atau sering disebut } C_{oB}) = 5 \text{ pF}$$

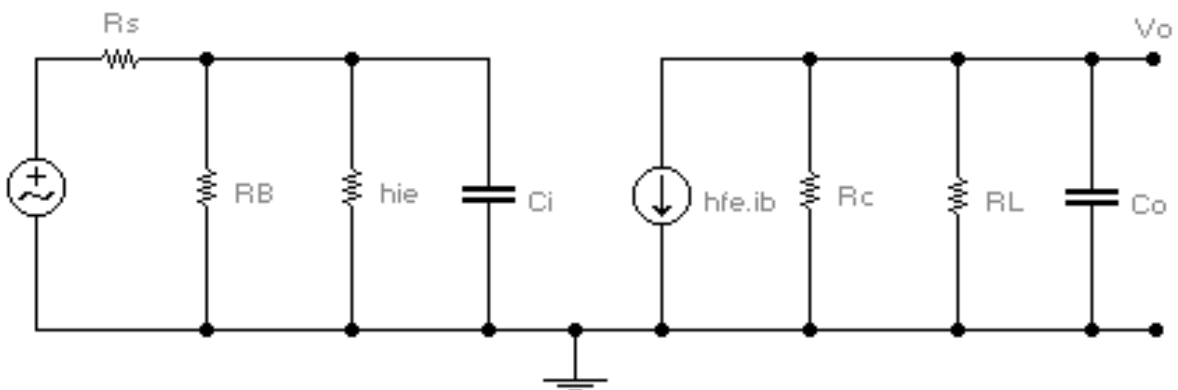
Cce = umumnya tidak disebutkan dalam buku data (dianggap tidak ada karena terlalu kecil).

Cwi dan **Cwo** = tergantung pada pengawatan rangkaian



Gambar 23. Penguat CE dengan kapasitor liar penentu respon frekuensi tinggi

Rangkaian ekuivalen dari penguat tersebut terlihat pada gambar 24. Dalam rangkaian ekuivalen ini kapasitor kopling dan by-pass tidak digambarkan, karena pada daerah frekuensi tinggi kapasitor tersebut dianggap hubung singkat. Adapun C_i merupakan gabungan semua kapasitor liar yang muncul pada bagian masukan penguat. Sedangkan C_o adalah gabungan semua kapasitor liar yang muncul pada bagian keluaran penguat.



Gambar 24. Rangkaian ekuivalen untuk analisis respon frekuensi tinggi

dimana:

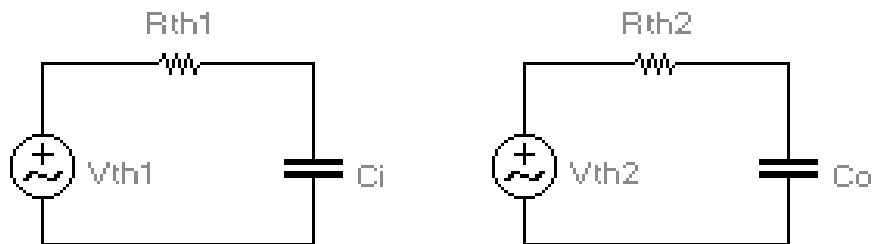
$$C_i = C_{be} + C_{wi} + C_{Mi}$$

$$C_o = C_{ce} + C_{wo} + C_{Mo}$$

$$R_B = R_1 // R_2$$

R_s = Tahanan dalam sumber sinyal

Pada rangkaian ekuivalen tersebut terdapat dua buah jaringan R-C yang tentunya masing-masing mempunyai frekuensi cut-off tinggi. Sebagaimana pada analisis frekuensi rendah, kedua jaringan tersebut akan dianalisis secara terpisah. Jaringan R-C pertama terdapat pada bagian masukan penguat yang terdiri atas C_i dan resistor-resistor pada masukan penguat dan sumber sinyal. Perhatikan ekuivalen Thevenin dari bagian masukan penguat tersebut.



Gambar 25. Ekuivalen Thevenin untuk kutup masukan dan keluaran

Jaringan R-C pada kutup masukan ini mempunyai frekuensi cut-off tinggi (f_{Hi}) sebagai berikut:

$$f_{Hi} = 1 / \{2\pi (R_{th1})(C_i)\}$$

dimana:

$$R_{th1} = R_s // R_B$$

$$C_i = C_{be} + C_{wi} + C_{Mi}$$

$$C_{Mi} = (1 - A_v)C_{bc}$$

Jaringan R-C kedua terdapat pada bagian keluaran penguat yang terdiri atas kapasitor C_o dan resistor-resistor pada keluaran transistor dan beban. Jaringan pada kutup keluaran ini mempunyai frekuensi cut-off tinggi (f_{Ho}) sebagai berikut:

$$f_{Ho} = 1 / \{2\pi (R_{th2})(C_o)\}$$

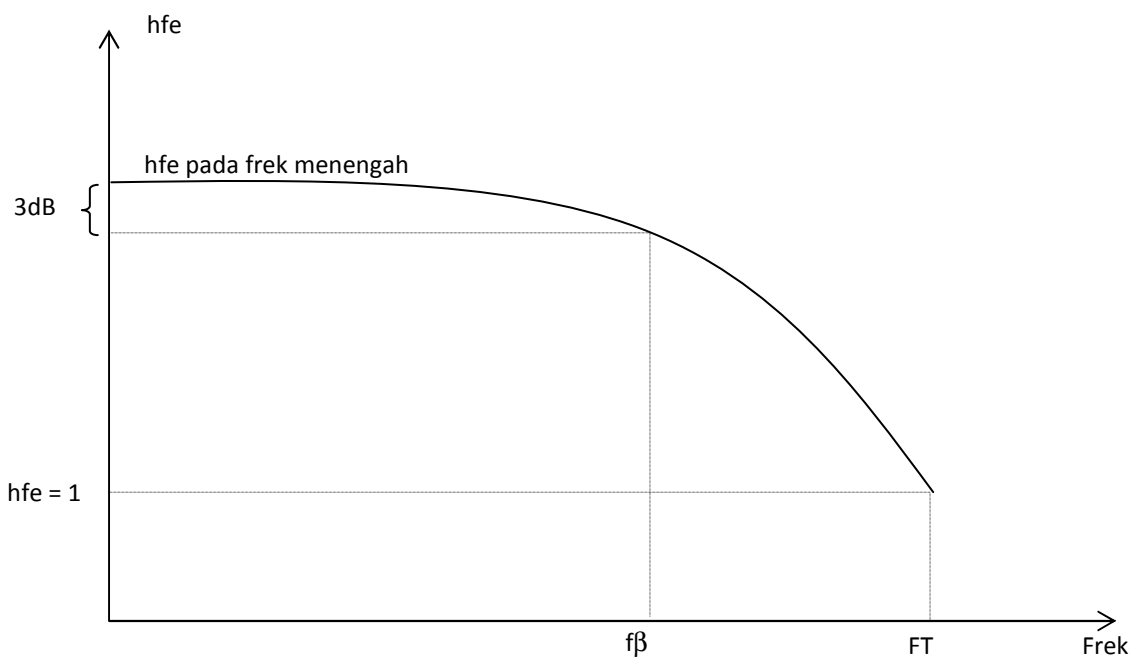
dimana:

$$R_{th2} = R_C // R_L$$

$$C_o = C_{ce} + C_{wo} + C_{Mo}$$

$$C_{Mo} = (1 - (1/A_v))C_{bc}$$

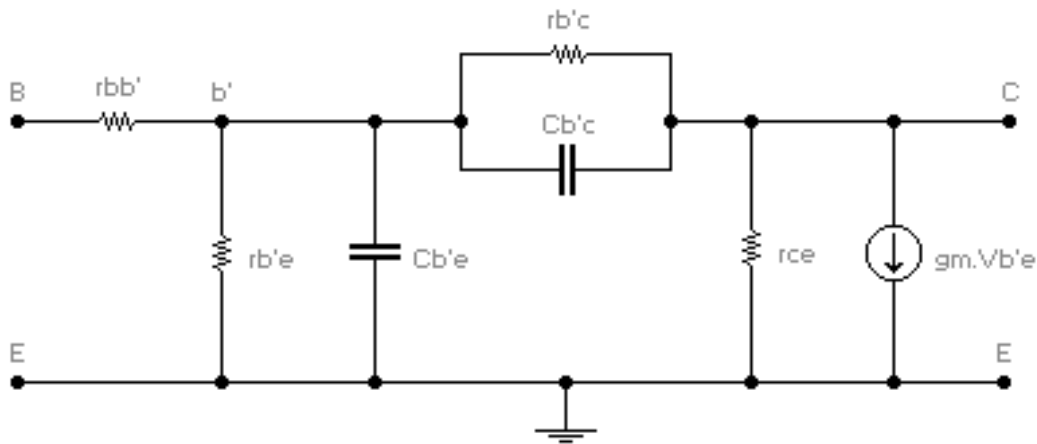
Frekuensi cut-off tinggi (f_H) suatu penguat disamping ditentukan oleh f_{H1} dan f_{H2} tersebut, juga dipengaruhi oleh variasi beta (β). Sebagaimana dijelaskan di depan bahwa beta (β) suatu transistor akan menurun bila transistor tersebut digunakan pada frekuensi tinggi. Semakin tinggi frekuensi semakin kecil beta (β)nya. Perhatikan kurva berikut:



Gambar 26. Hubungan antara beta (β) transistor dengan frekuensi

Pada kurva tersebut terlihat bahwa nilai h_{fe} (atau beta, β) suatu transistor akan berkurang 3 dB (atau menjadi 0,707 nya) pada frekuensi f_{β} . Dengan demikian definisi f_{β} adalah suatu frekuensi dimana h_{fe} (atau beta, β) suatu transistor menjadi 0,707nya dari harga pada frekuensi menengah. Harga h_{fe} (atau beta, β) yang diperoleh dari buku data transistor merupakan kondisi pada frekuensi menengah. Apabila frekuensi dinaikkan terus hingga suatu frekuensi yang disebut f_T maka h_{fe} (atau beta, β) akan turun menjadi satu (atau 0 dB). Harga f_T ini sering terdapat dalam buku data transistor, karena f_T ini sering dipandang sebagai batas frekuensi kerja transistor.

Nilai frekuensi $f\beta$ ini dapat ditentukan melalui rangkaian ekivalen hibrid- π , yakni model transistor yang bekerja pada frekuensi tinggi. Lihat gambar 27.



Gambar 27. Model hibrid- π , ekivalen transistor pada frekuensi tinggi

dimana : $rb'e = 1/gb'e$

$rce = 1/ho$

$gm.Vb'e = gm.rb'e.I'b \cong hfemid.I'b$

$I'b =$ arus yang mengalir pada $rb'e$

Pada rangkaian ekivalen dengan hibrid- π tersebut terdapat resistansi rbb' (resistansi antara titik B dan b') yang merupakan resistansi dari kontak basis sampai daerah aktif dalam basis.

Harga $f\beta$ dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$f\beta = (gb'e)/2\pi(Cb'e + Cb'c)$$

karena :

$$gb'e = gm/hfemid$$

maka :

$$f\beta = (gm)/(hfemid2\pi(Cb'e + Cb'c))$$

karena :

$$\begin{aligned} gm &= (hfemid)(gb'e) \\ &= (hfemid)(1/rb'e) \\ &\cong (hfemid)(1/hie) \end{aligned}$$

dan

$$C_{b'e} \cong C_{be} \quad \text{dan} \quad C_{b'c} = C_{bc}$$

akhirnya maka diperoleh:

$$f_{\beta} \cong 1 / (2\pi)(h_{ie})(C_{be} + C_{bc})$$

Kaitan antara f_T dengan f_{β} adalah:

$$f_T = (h_{femid})(f_{\beta})$$

dengan demikian:

$$f_T \cong (h_{femid}) / (2\pi)(h_{ie})(C_{be} + C_{bc})$$

Ketiga frekuensi cut-off yang diperoleh di atas, yakni: f_{Hi} , f_{Ho} , dan f_{β} , mempengaruhi respon frekuensi tinggi suatu penguat. Frekuensi cut-off tinggi (f_H) dari penguat secara keseluruhan ditentukan oleh harga **terendah (terkecil)** dari ketiga frekuensi tersebut. Hal ini akan tepat apabila jarak diantara ketiga frekuensi tersebut cukup jauh. Apabila ada frekuensi yang berdekatan, maka f_H merupakan interaksi dari frekuensi-frekuensi tersebut.

Apabila pada suatu penguat sudah ditentukan frekuensi cut-off bawah (f_L) dan frekuensi cut-off atas (f_H), maka selanjutnya bisa dihitung lebar bandnya. Lebar band (bandwidth) suatu respon frekuensi adalah:

$$BW = f_H - f_L$$

Contoh:

Suatu rangkaian penguat seperti gambar 23 mempunyai data sebagai berikut:

$$R_s = 1K\Omega, R_1 = 40K\Omega, R_2 = 10K\Omega, R_E = 2K\Omega, R_c = 4K\Omega, R_s = 2,2K\Omega$$

$$C_s = 10\mu F, C_c = 1\mu F, C_e = 20\mu F$$

$$h_{fe} = 100, h_{ie} = 1576\Omega, V_{cc} = 20 V$$

$$C_{be} = 36pF, C_{bc} = 4pF, C_{ce} = 1pF, C_{wi} = 6pF, C_{wo} = 8pF$$

Tentukan:

Frekuensi cut-off atas (f_H) dari penguat tersebut

Penyelesaian:

Menentukan A_v :

$$A_{vmid} = V_o/V_i$$

$$A_{vmid} = - (h_{fe})(R_c//R_L)/h_{ie}$$

$$A_{vmid} = - 90$$

Menentukan f_{Hi}:

$$R_{th1} = R_s // R_1 // R_2 // h_{ie}$$

$$R_{th1} = 1K // 40K // 10K // 1,576K$$

$$R_{th1} = 568 \Omega$$

$$C_i = C_{wi} + C_{be} + (1 - A_v)C_{be}$$

$$C_i = 6p + 36p + (1 - (-90))4p$$

$$C_i = 406 pF$$

sehingga:

$$f_{Hi} = 1 / \{2\pi (R_{th1})(C_i)\}$$

$$f_{Hi} = 1 / \{2\pi (568)(406 \cdot 10^{-12})\}$$

$$f_{Hi} = 690,15 \text{ KHz}$$

Menentukan f_{Ho}:

$$R_{th2} = R_c // R_L$$

$$R_{th2} = 4K // 2,2K$$

$$R_{th2} = 1419 \Omega$$

$$C_o = C_{wo} + C_{ce} + (1 - A_v)C_{be}$$

$$C_o = 8p + 1p + (1 - (1/-90))4p$$

$$C_o = 13,04 pF$$

sehingga:

$$f_{Ho} = 1 / \{2\pi (R_{th2})(C_o)\}$$

$$f_{Ho} = 1 / \{2\pi (1419)(13,04 \cdot 10^{-12})\}$$

$$f_{Ho} = 8,6 \text{ MHz}$$

Menentukan f_β:

$$f_{\beta} \cong 1 / (2\pi)(h_{ie})(C_{be} + C_{bc})$$

$$f_{\beta} \cong 1 / (2\pi)(1576)(36 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12})$$

$$f_{\beta} \cong 2,52 \text{ MHz}$$

Menentukan f_H penguat:

Ketiga frekuensi cut-off atas, yakni f_{Hi}, f_{Ho}, dan f_β ternyata berjarak cukup jauh, yakni masing-masing: 690,15 KHz; 8,6 MHz; dan 2,52 MHz.

Dengan demikian f_H dari penguat merupakan harga terendah dari ketiga harga tersebut yaitu:

$$f_H = 690,15 \text{ KHz}$$

2.6 Ringkasan

Respon frekuensi suatu penguat merupakan tanggapan penguat tersebut terhadap frekuensi sinyal masukan. Tanggapan suatu penguat terhadap berbagai frekuensi sinyal masukan, seperti frekuensi rendah, menengah, dan tinggi, tidaklah sama. Pada umumnya penguatan akan menurun pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Lebar band (bandwidth) suatu penguat merupakan jarak antara dua frekuensi (f_L dan f_H) dimana penguat tersebut mempunyai penguatan yang signifikan (antara 1 hingga 0.707 kali penguatan maksimum). Pada penguat kopling RC (atau C), besarnya frekuensi cut-off bawah (f_L) ditentukan oleh nilai kapasitor kopling input, output dan kapasitor by-pass. Sedangkan besarnya frekuensi cut-off atas (f_H) ditentukan oleh nilai kapasitor liar. Disamping itu respon frekuensi tinggi suatu penguat juga sangat dipengaruhi oleh sifat β suatu transistor yang sangat bergantung pada frekuensi tinggi.

2.7 Soal Latihan

1. Diketahui rangkaian penguat CE seperti pada gambar 14 dengan data rangkaian sebagai berikut: $C_s = 1 \mu\text{F}$, $C_e = 10 \mu\text{F}$, $C_c = 1 \mu\text{F}$, $R_s = 1 \text{ K}\Omega$, $R_1 = 47 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 15 \text{ K}\Omega$, $R_e = 1.5 \text{ K}\Omega$, $R_c = 2 \text{ K}\Omega$, $R_L = 2,2 \text{ K}\Omega$, $h_{fe} = 100$, $V_{cc} = 20 \text{ V}$, $h_{ie} = 1576 \Omega$. Tentukan frekuensi cutoff rendah (f_L) dari penguat tersebut. Tentukan faktor penguatan pada f_L tersebut.
2. Suatu rangkaian penguat seperti gambar 23 mempunyai data sebagai berikut: $R_s = 1 \text{ K}\Omega$, $R_1 = 56 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 27 \text{ K}\Omega$, $R_E = 2 \text{ K}\Omega$, $R_c = 3.3 \text{ K}\Omega$, $R_s = 5 \text{ K}\Omega$; $C_s = 10 \mu\text{F}$, $C_c = 1 \mu\text{F}$, $C_e = 20 \mu\text{F}$; $h_{fe} = 100$, $h_{ie} = 1576 \Omega$, $V_{cc} = 20 \text{ V}$; $C_{be} = 36 \text{ pF}$, $C_{bc} = 4 \text{ pF}$, $C_{ce} = 1 \text{ pF}$, $C_{wi} = 6 \text{ pF}$, $C_{wo} = 8 \text{ pF}$. Tentukan f_L dan f_H dari rangkaian penguat tersebut.
3. Diketahui rangkaian penguat CE seperti pada gambar 14 dengan data rangkaian sebagai berikut: $C_s = 0.47 \mu\text{F}$, $C_e = 20 \mu\text{F}$, $C_c = 0.47 \mu\text{F}$, $R_s = 0.82 \text{ K}\Omega$, $R_1 = 68 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_e = 1.2 \text{ K}\Omega$, $R_c = 5,6 \text{ K}\Omega$, $R_L = 3,3 \text{ K}\Omega$, $h_{fe} = 120$, $V_{cc} = 14 \text{ V}$. Tentukan: h_{ie} ; A_v ; Z_i ; f_L .

4. Rangkaian seperti soal no.3 dengan data tambahan sebagai berikut: $C_{wi} = 5\text{pF}$; $C_{wo} = 8\text{pF}$; $C_{bc} = 12\text{pF}$; $C_{be} = 40\text{pF}$; $C_{ce} = 8\text{pF}$. Tentukan: f_H !
5. Perhatikan suatu penguat CE seperti gambar 14. Diketahui: $R_1=27\text{K}\Omega$; $R_2 = 12\text{K}\Omega$; $R_c = 2\text{K}\Omega$; $R_E = 470\Omega$; $C_s = 0.1\ \mu\text{F}$; $C_c = 1\mu\text{F}$; $C_e = \text{tidak ada}$; $C_{oB} = 5\text{pF}$; $f_T = 150\text{ MHz}$; $h_{fe} = 100$; $V_{BE\text{ aktif}} = 0.7\text{ V}$; $V_{cc} = 12\text{ V}$. Tentukan: f_L dan f_H !
6. Perhatikan suatu penguat CE seperti gambar 14. Diketahui: $R_1=21\text{K}\Omega$; $R_2 = 1.5\text{K}\Omega$; $R_c = 10\text{K}\Omega$; $R_E = 100\Omega$; $C_s = 0.1\ \mu\text{F}$; $C_c = 0.01\mu\text{F}$; $C_e = \text{tidak ada}$; $R_L = 10\text{K}\Omega$; $C_{oB} = 4.5\text{pF}$; $f_T = 200\text{ MHz}$; $h_{fe} = 100$; $V_{BE\text{ aktif}} = 0.7\text{ V}$; $V_{cc} = 12\text{ V}$; $R_s = 500\Omega$. Tentukan: f_L dan f_H !