



الکترونیک (۳)

فصل ششم

تقویت کننده های عملیاتی

درس: دکتر رحمتی

<http://ee.iust.ac.ir/rahmati/>

آدرس Email و Website برای تکالیف و...:

rahmati@iust.ac.ir

<http://ee.iust.ac.ir/rahmati/>

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

1 / 74



Chapter 6

تقویت کننده های عملیاتی

(Operational Amplifiers)

04-Jun-07

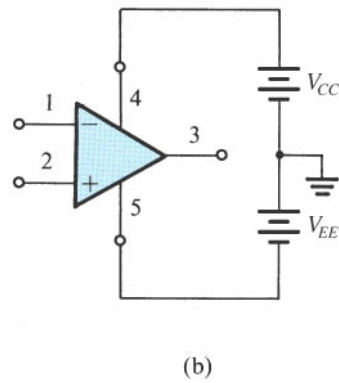
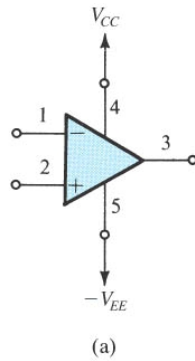
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

2 / 74



تقویت کننده های عملیاتی (Operational Amplifiers)



هیچ یک از نقاط مدار داخلی تقویت کننده به زمین وصل نیست. فقط سیگنال های ورودی و خروجی نسبت به زمین سنجیده می شوند.

04-Jun-07

The op amp shown connected to dc power supplies.

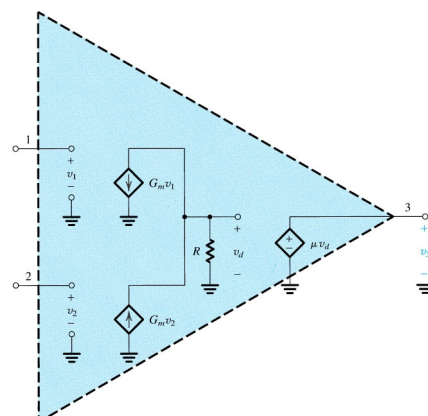
3 / 74

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی



مدار معادل ac تقویت کننده های عملیاتی در فرکانس پایین



04-Jun-07

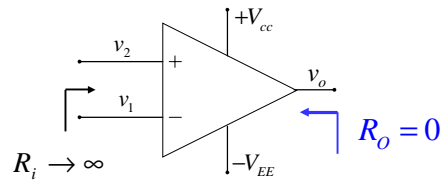
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

4 / 74



خصوصیات تقویت کننده عملیاتی ایده آل



$$R_i \rightarrow \infty \quad (۱)$$

$$R_o = 0 \quad (۲)$$

$$v_o = f(v_2 - v_1) \quad (۳)$$

$$A_d = \infty \quad (۴)$$

$$A_c = 0 \quad (۵)$$

$$CMRR = \infty \quad (۶)$$

$$f_L = 0 \quad (۷)$$

$$B.W = \infty \quad (۸)$$

$$A_d = \frac{v_o}{(v_2 - v_1)}$$

$$A_c = \frac{v_o}{\frac{1}{2}(v_2 + v_1)}$$

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

$$(۹) \quad \text{ولتاژ و جریان آفست صفر}$$

5/74

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی



خصوصیات تقویت کننده عملیاتی

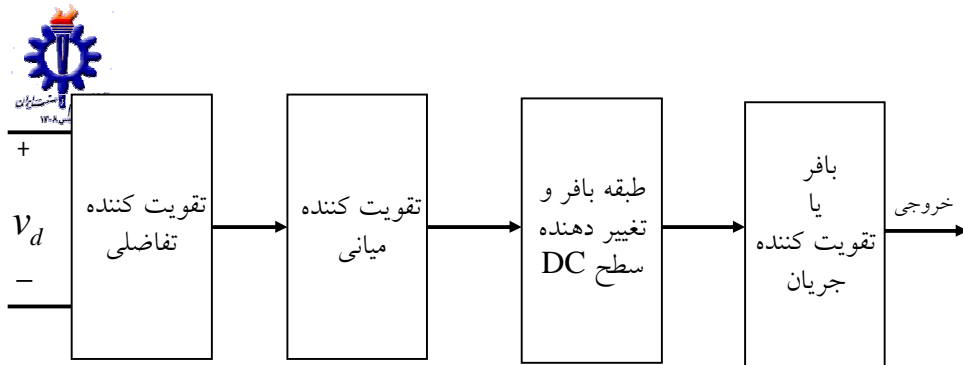
- در آپ امپ های معمولی که در ورودیشان ترانزیستور BJT به کار رفته است مقاومت ورودی در حد چند مگا اهم است.
- مقاومت ورودی آپ امپ هایی که در ورودیشان JFET به کار رفته است در محدوده $10^8 - 10^9$ اهم است.
- مقاومت ورودی آپ امپ هایی که در ورودیشان MOSFET به کار رفته است در محدوده 10^{12} اهم است.
- مقاومت خروجی در حد چند ده اهم است.
- پهنای باند پارامتری است که خیلی از حالت ایده آل دور است.
- خازن Compensator، قطب غالب ایجاد می کند، که موجب کاهش پهنای باند می شود.
- پهنای باند حلقه باز دز Op-Amp 741 حدود ۱۰Hz است.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

6/74



- از آنجا که بین طبقات مختلف تقویت کننده خازن کوپلاژ وجود ندارد و تقویت کننده ها به صورت Direct Coupled به یکدیگر متصل شده اند، تقویت کننده سیگنال های DC را هم تقویت می کند.

- خازن داخلی ۷۴۱، حدود 30pF است. فضای اشغال شده توسط این خازن از سطح اشغال شده توسط بقیه مدار به مراتب بیشتر است.

04-Jun-07

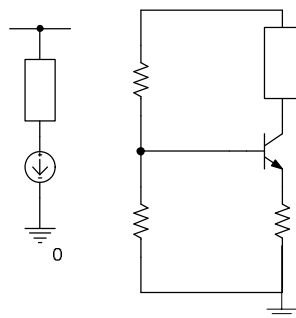
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

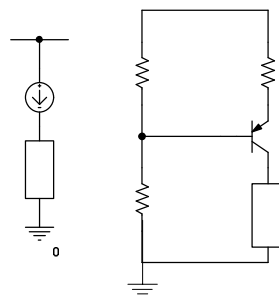
7 / 74



منابع جریان



Current Sink



Current Source

- در مدارات مجتمع بر خلاف مدارات discrete ساخت ترانزیستور ساده تر از مقاومت است، و سطح کمتری اشغال می کند به همین جهت در مدارات مجتمع به جای مقاومت از ترانزیستور برای بایاس کردن ترانزیستورها استفاده می شود.

04-Jun-07

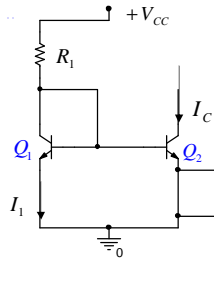
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

8 / 74



تکرار کننده های جریان (Current Mirrors)



- به شرط فعال بودن Q_1 و Q_2 ، I_C ترانزیستورها مساوی است (Q_1 فعال است چون $v_{CE} = v_{BE}$)

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} \quad I_C = \frac{b}{b+2} I_1 = \frac{I_1}{1+2/b}$$

برای داشتن نسبتی بین I_C و I_1

$$R = \frac{V_T}{I_C} \ln \frac{I_1}{I_C}$$

اگر b ترانزیستورها کوچک باشد، $I_C \neq I_1$ خواهد بود.

04-Jun-07

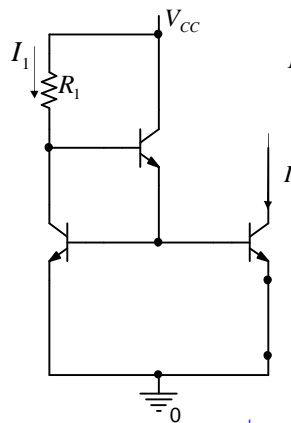
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

9/74



تکرار کننده جریان با تقریب بهتر



$$I_C = I = \frac{b(b+1)}{(b+1)b+2} I_1 = \frac{I_1}{1+2/(b+1)b}$$

- اگر b کوچک هم باشد I_C, I_1 با تقریب خوبی با هم مساویند.

04-Jun-07

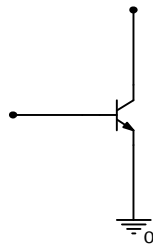
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

10/74



- تغییر دهنده سطح DC برای مساوی کردن سطح خروجی یک طبقه با ورودی طبقه بعد است.



$$V_{CE} > V_{BE}$$

- یک امیتر مشترک به نوعی می تواند تغییر دهنده سطح DC باشد.
- تغییر سطح DC انجام می شود.

- خروجی Common Collector نیز می تواند تغییر دهنده سطح DC باشد.

04-Jun-07

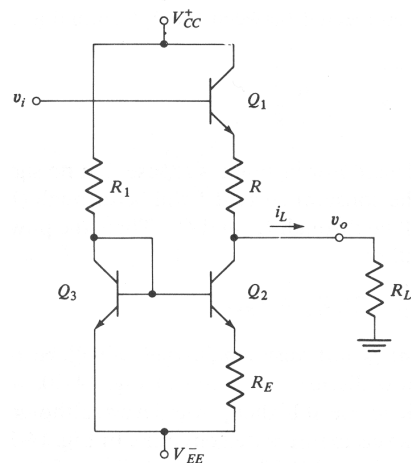
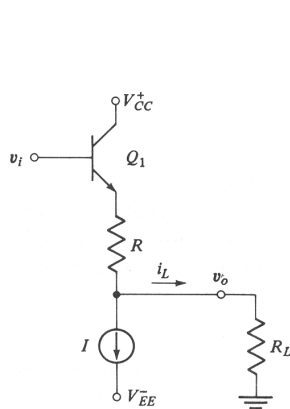
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

11 /74



- تغییر دهنده سطح DC برای مساوی کردن سطح خروجی یک طبقه با ورودی طبقه بعد



04-Jun-07

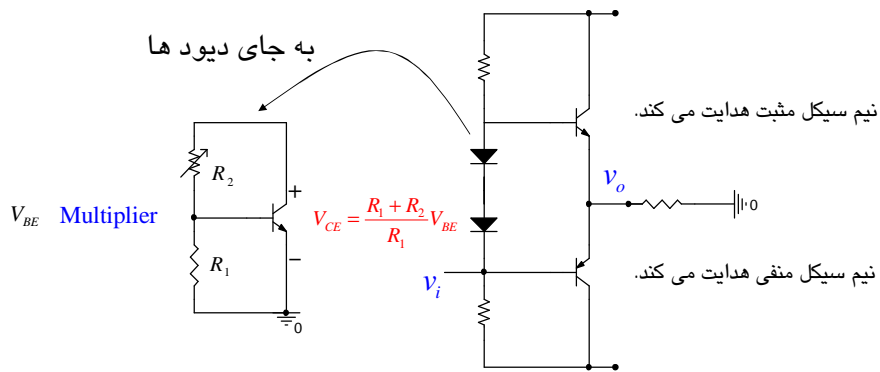
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

12 /74



بافر یا تقویت کننده جریان طبقه خروجی



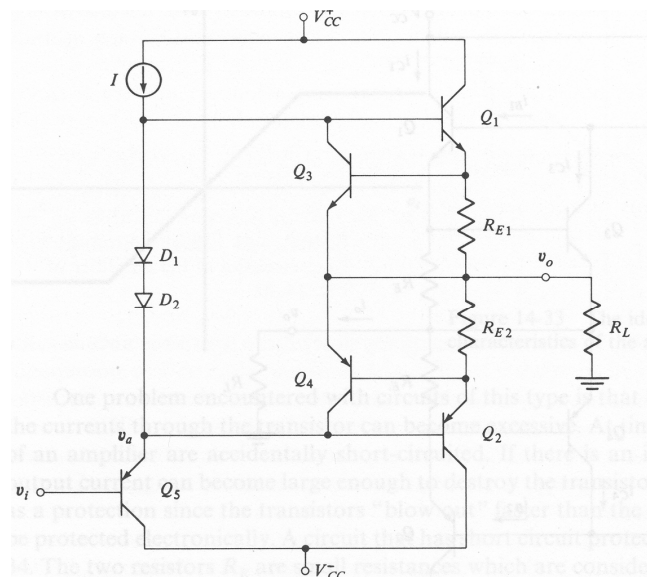
- ترانزیستورها را در آستانه هدایت قرار می دهند تا جریان نقطه کار ترانزیستورها کم باشد.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

13 /74

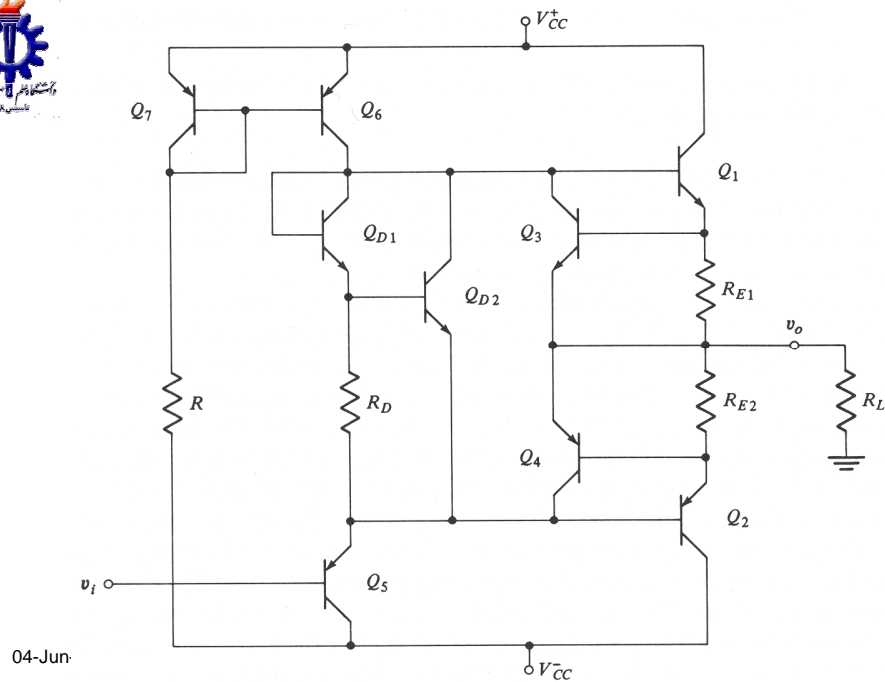


04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

14 /74



04-Jun-



تقویت کننده میانی

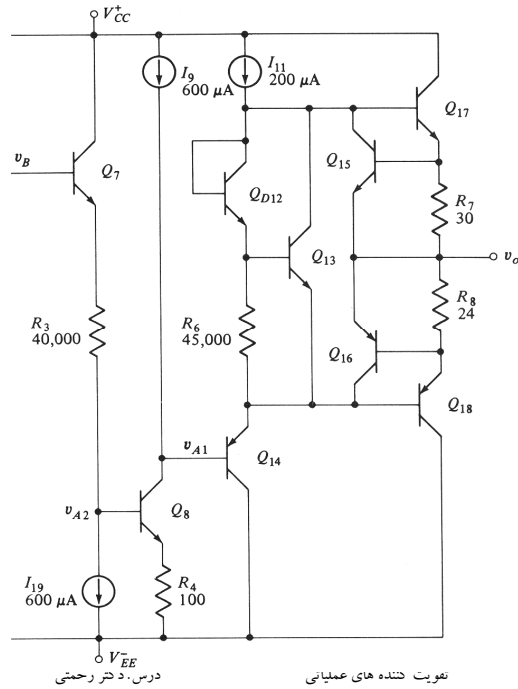
- از ترانزیستورهایی که دارای h_{fe} بالا هستند استفاده میشود.
- مقاومت ورودی باید بزرگ باشد به همین منظور از امیتر مشترک یا زوج دارلینگتون (یا یک ترانزیستور با b و h_{ie} بالا) استفاده میشود. برای افزایش مقاومت ورودی می توان روی امیتر زوج دارلینگتون مقاومت قرار داد.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

16 / 74



04-Jun-07

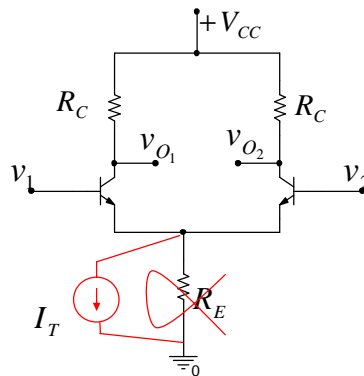
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

17 / 74



تقویت کننده تفاضلی



- اگر تفاضل v_1 و v_2 صفر باشد (یکسان تغییر کنند) خروجی های v_{O1} و v_{O2} نیز باهم تغییر کرده و تفاضل خروجی ها صفر خواهد شد. اما با تغییر غیر یکسان ورودی ها تفاضل خروجی ها هم با هم تغییر می کند.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

18 / 74



Match Pair

یک عنصر الکتریکی شامل دو ترانزیستور Q_1, Q_2 که چه در زمان ساخت و چه در زمان استفاده دارای پارامترهای تقریباً یکسان هستند. و دارای ۶ پایه می باشد.

$$A_d = \frac{v_o}{v_1 - v_2} = \frac{v_{o2}}{v_1 - v_2} = \frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}}$$

$$A_C = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (1 + h_{fe})(2R_E)}$$

$$CMRR = \frac{A_d}{A_C} = \frac{h_{ie} + (1 + h_{fe})(2R_E)}{2h_{ie}}$$

04-Jun-07

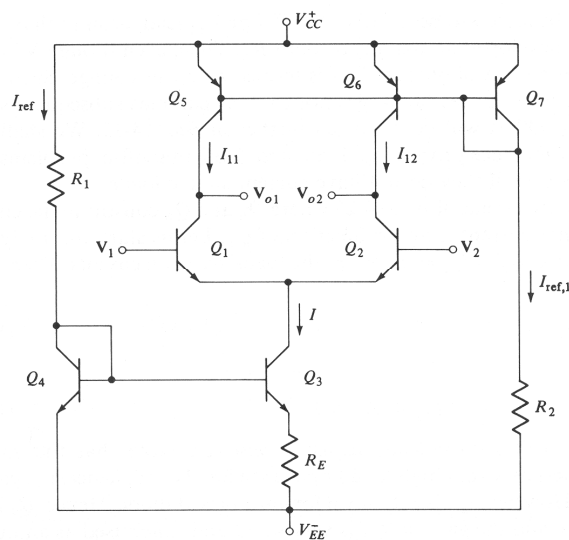
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

19 /74



بار فعال (Active Load)



04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

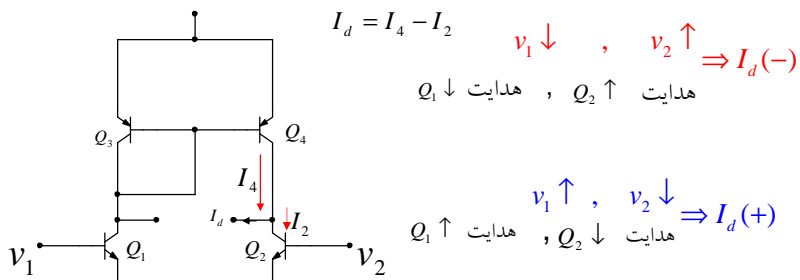
تقویت کننده های عملیاتی

20 /74



بار فعال (Active Load)

- از همین منابع جریان می توان به عنوان بار فعال برای ترانزیستورها استفاده کرد.



- نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی حساس است.

$$A_d = \frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}} = \frac{h_{fe} R_{cQ4}}{2h_{ie}} = \frac{h_{fe} (R_{OQ4} \parallel R_{OQ2})}{2h_{ie}} = \frac{h_{fe} (r_{oQ4} \parallel r_{oQ2})}{2h_{ie}}$$

04-Jun-07

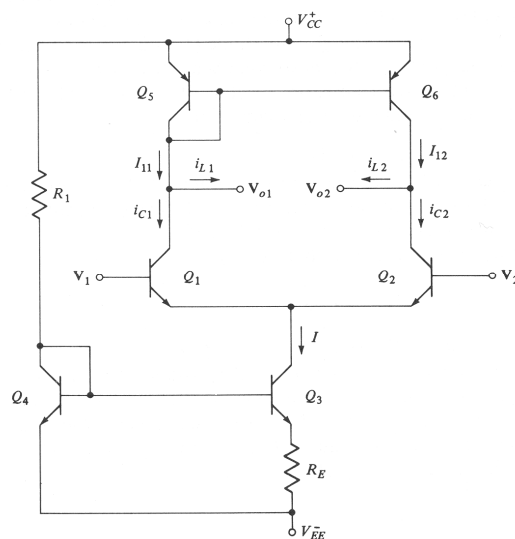
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

21 / 74



مدار کامل تقویت کننده تفاضلی



04-Jun-C

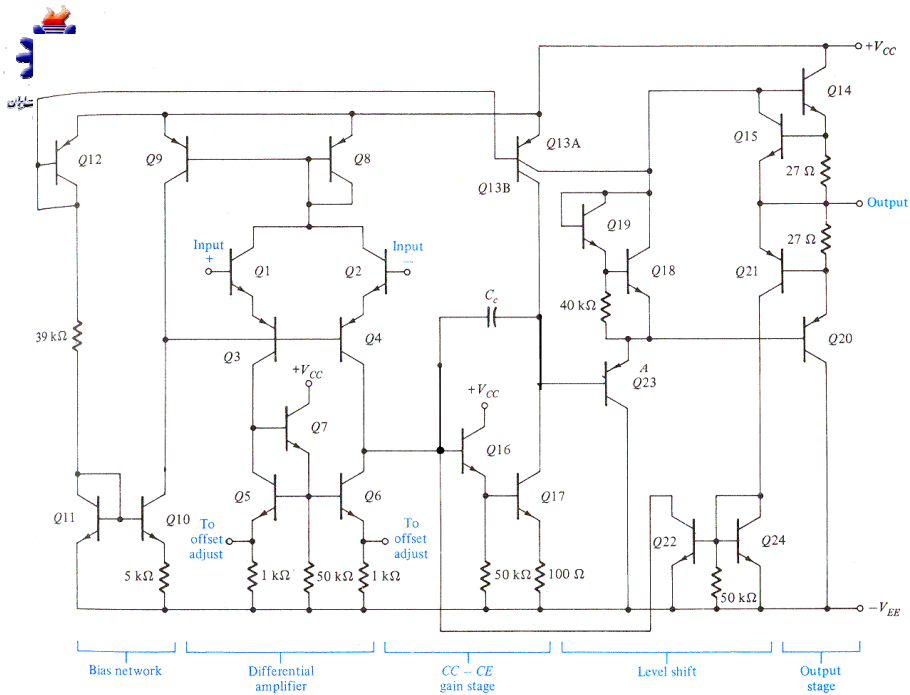
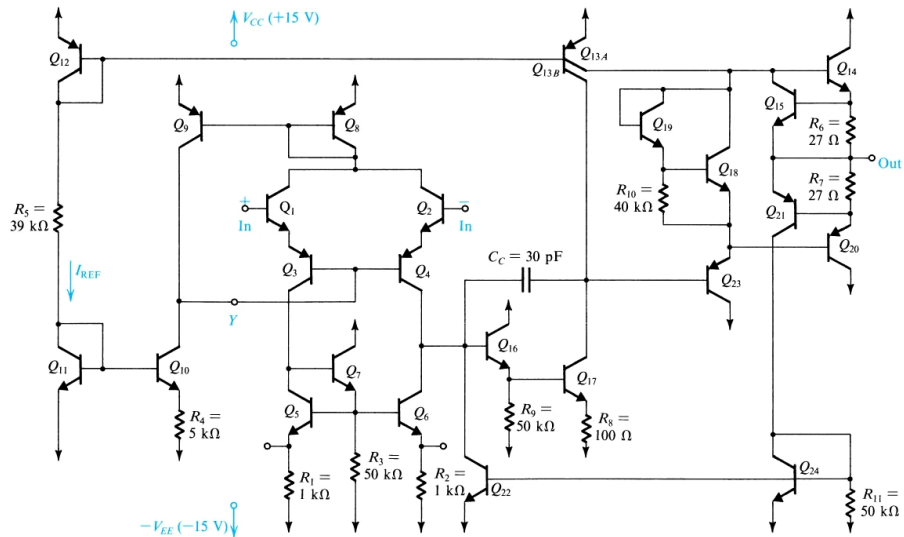
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

22 / 74



مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی LM741





In the 741 op-amp circuit.

Q_{11} , Q_{12} , and R_5 generate a reference bias current, I_{REF} .

Q_{10} , Q_9 , and Q_8 bias the input stage, which is composed of Q_1 to Q_7 .

The second gain stage is composed of Q_{16} and Q_{17} with Q_{13B} acting as active load.

The class AB output stage is formed by Q_{14} and Q_{20} with biasing devices Q_{13A} , Q_{18} , and Q_{19} , and an input buffer Q_{23} .

Transistors Q_{15} , Q_{21} , Q_{24} , and Q_{22} serve to protect the amplifier against output short circuits and are normally cut off.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

25 /74



توصیف عملکرد مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی ۷۴۱

- ترانزیستورهای Q_1 و Q_2 دو مدار Emitter Follower هستند که مقاومت ورودی را زیاد و جریان ورودی را کم نگه می دارند.
- ترانزیستورهای Q_1, Q_2 ، آمپترهای زوج تفاضلی بیس مشترک pnp یعنی Q_3, Q_4 را راه اندازی می کنند.
- ترانزیستورهای Q_5, Q_6 بار فعالی را برای Q_3, Q_4 تشکیل می دهند.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

26 /74



وظایف ترانزیستورهای Q1 تا Q7

1. ورودی تفاضلی

§ یک ورودی تفاضلی فراهم می کنند که حساسیت آن به ولتاژهای وجه مشترک نسبتاً کم است.

§ مقاومت ورودی را زیاد می کند.

§ مقداری بهره ولتاژ به ورودی می دهد.

§ داشتن مقداری بهره ولتاژ در ورودی مطلوب است زیرا ولتاژ آفست و نویز همراه با طبقات دوم و طبقات بعد، از دید ورودی بر این بهره تقسیم می شود.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

27 /74



وظایف ترانزیستورهای Q1 تا Q7

2. انتقال سطح

§ ترانزیستورهای pnp ساخته شده با تکنولوژی IC استاندارد، پاسخ فرکانسی ضعیفی دارند. بنابراین مطلوب ترین روش در تحقق آپ امپ، استفاده از ترانزیستورهای npn است.

§ با وجود رعایت بند ۱ در برخی جاها باید سطح dc مسیر سیگنال کاهش یابد، در Op-Amp741 معمولاً این کار با قرار دادن ترانزیستور pnp افقی در مسیر سیگنال انجام می شود.

§ در Op-Amp741، کلکتور ترانزیستورهای pnp یعنی Q3, Q4 در پتانسیلی نزدیک به تغذیه منفی قرار دارند.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

28 /74



وظایف ترانزیستورهای Q1 تا Q7

3. تبدیل تفاضلی به خروجی تک انتهایی (Single-Ended)

- § تقویت کننده های عملیاتی ، ورودی های تفاضلی و خروجی های تک انتهایی دارند ، بنابراین در مدار آنها باید عمل تبدیل به خروجی تک انتهایی انجام شود.
- § یکی از خروجی های زوج با امیتر تزویج شده را در نظر گرفته و توسط آن ، یک مدار با خروجی تک انتهایی را تغذیه می کنیم.
- § با رعایت بند ۲ ، حساسیت به ولتاژهای ورودی وجه مشترک زیاد می شود ، لذا عموماً از مدار بار فعال مانند ترانزیستورهای Q5, Q6 استفاده می شود.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

29 /74



وظایف سایر ترانزیستورها

- ترانزیستور Q16، امیتر فالوری است که اثر بار گذاری Q17 را روی خروجی طبقه بار فعال (تقویت کننده تفاضلی) کم می کند.
- ترانزیستور Q17 تقویت کننده امیتر مشترکی است که بار فعال تشکیل شده از Q13B دارد، این طبقه تقویت کننده ، بهره ولتاژ زیادی را فراهم می کند.
- ترانزیستور Q23 امیتر فالور دیگری است که از بار گذاری طبقه خروجی روی خروجی طبقه بهره جلوگیری می کند.
- ترانزیستورهای Q14, Q20 طبقه خروجی کلاس AB را تشکیل می دهند.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

30 /74



وظایف سایر ترانزیستورها

- ترانزیستور Q13 یک ترانزیستور pnp افقی چند کلکتوره است. حلقه کلکتور به دو قسمت تقسیم شده است:
 - یکی که در مقابل سه چهارم محیط آمیتر قرار گرفته است و حفره های تزریق شده از این محیط را جمع آوری می کند.
 - دومی در مقابل یک چهارم محیط آمیتر قرار گرفته است و حفره های تزریق شده از آن وجه را جمع آوری می کند.
- بنابراین این ساختار معادل دو ترانزیستور pnp است که اتصال های بیس - آمیتر آنها به طور موازی باشد و I_S یکی از آن ها یک چهارم I_S ترانزیستور pnp استاندارد، و I_S دیگری سه چهارم I_S ترانزیستور pnp استاندارد است که آمیتر آن کاملاً احاطه شده است.

04-Jun-07

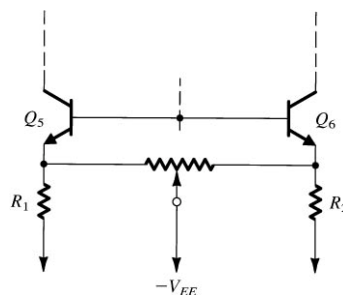
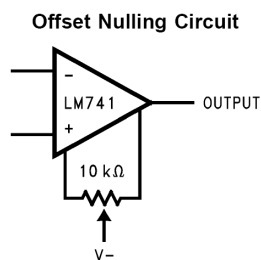
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

31 /74



مدار برای صفر کردن offset تقویت کننده عملیاتی LM741



04-Jun-07

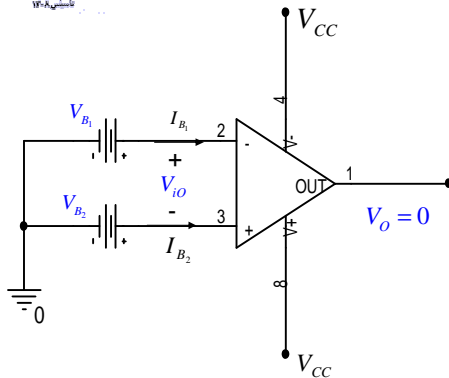
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

32 /74



پارامترهای Op-Amp



1. ولتاژ آفست ورودی :

اختلاف ولتاژ بین پایه های ۲ و ۳
برای صفر شدن خروجی

$$V_{io} = |V_{B1} - V_{B2}|$$

برای آپ امپ ایده آل $V_{io} = 0$

برای آپ امپ ایده آل $I_{B1} = I_{B2}$

ولی عملاً اختلاف ناچیزی دارند.

۲. جریان بایاس ورودی: $\frac{I_{B1} + I_{B2}}{2}$

۳. جریان آفست ورودی: تفاضل جریان های ورودی وقتی خروجی صفر است.

$$I_{io} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

04-Jun-07

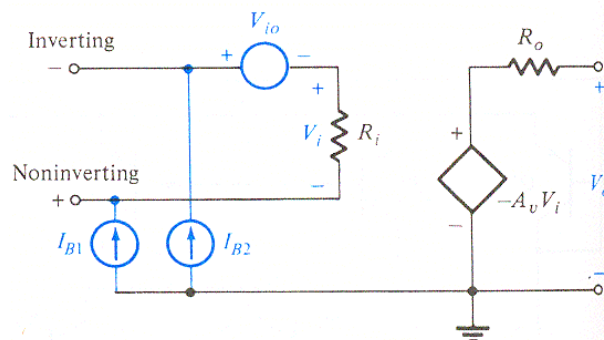
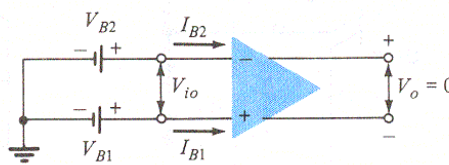
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

33 / 74



مدار معادل برای Op-Amp با در نظر گرفتن ولتاژ آفست و
جریان بایس ورودی



04-Jun-07

34 / 74



۴. رانش جریان آفست ورودی (input offset current drift)

عبارت است از تغییرات جریان آفست ورودی نسبت به تغییرات دما

$$\text{input offset current drift} = \frac{\Delta I_o}{\Delta T}$$

۵. رانش ولتاژ آفست ورودی (input offset voltage drift)

عبارت است از تغییرات ولتاژ آفست ورودی نسبت به تغییرات دما

$$\text{input offset current drift} = \frac{\Delta V_{io}}{\Delta T}$$

۶. ولتاژ آفست خروجی: ولتاژ خروجی وقتی ورودی ها زمین

باشد. (آپ امپ در ناحیه فعال خواهد بود یا high است یا low است)

۷. حوزه تغییرات ورودی در حالت ورودی مشترک (input common mode range)

عبارت است از حوزه تغییرات سیگنال ورودی که به ازای آن تقویت کننده خطی کار کند.

رابطه بین ولتاژ آفست ورودی و ولتاژ آفست خروجی



8. حوزه تغییرات ورودی به صورت تفاضلی (input differential Mode range)

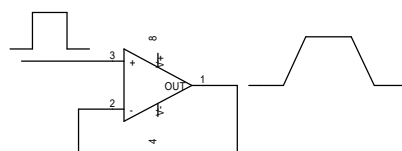
حداکثر V_H که می توان به تقویت کننده اعمال کرد بدون اینکه تقویت کننده آسیب ببیند.

9. حوزه تغییرات خروجی (Out put voltage range)

حداکثر تغییرات خروجی که می توان بدون اعوجاج قابل ملاحظه داشت.

10. Slew Rate:

سرعت تغییرات ولتاژ خروجی تقویت کننده با فیدبک نسبت به زمان (تحت شرایط large signal)

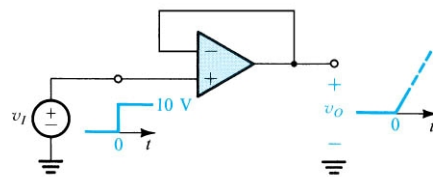


سرعت تغییرات خروجی کمتر از ورودی است.



Slew Rate

سرعت تغییرات ولتاژ خروجی تقویت کننده با فیدبک نسبت به زمان
(تحت شرایط large signal)



سرعت تغییرات خروجی کمتر از ورودی است.

04-Jun-07

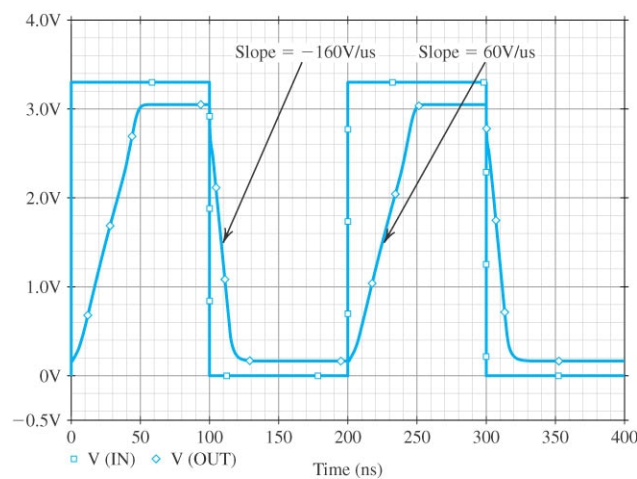
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

37 /74



سرعت تغییرات خروجی در هنگام صعود معمولاً کمتر از هنگام نزول است



Large-signal step response (for a 3.3-V step-input) of the op-amp connected in a unity-gain configuration. The slope of the rising and falling edges of the output waveform correspond to the slew rate of the op amp.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

38 /74



۱۱. Full Power Band Width: حداکثر فرکانسی که موج سینوسی با دامنه ماکزیمم در خروجی می تواند داشته باشد.

$$v_o = V_m \sin(\omega t)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = V_m \omega \cos(\omega t) \quad \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = \omega V_m \leq S.R$$

$$\omega_m V_m \leq S.R \quad 2\pi f_m V_m = S.R$$

در بسامد ω بالاتر از ω_m دامنه ماکزیمم موج سینوسی اعوجاج نیافته، از رابطه زیر بدست می آید.

$$V_o = V_{o\max} \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)$$

04-Jun-07

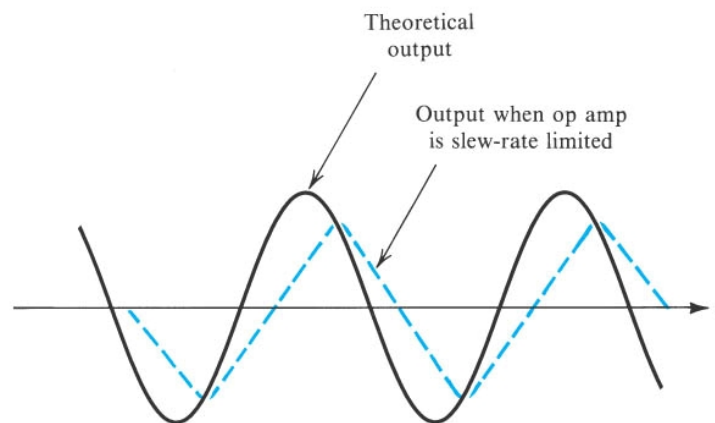
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

39 / 74



اثر محدود کنندگی slew-rate روی شکل موج خروجی



Effect of slew-rate limiting on output sinusoidal waveforms.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

40 / 74



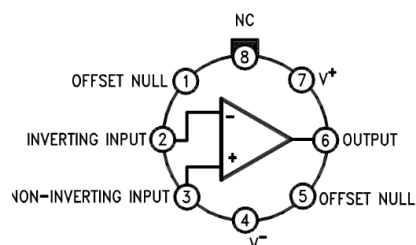
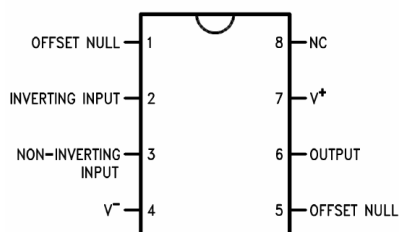
نمونه هایی از پارامترهای تقویت کننده عملیاتی LM741 ساخت کارخانه ناسیونال

Electrical Characteristics (Note 4)											
Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV
											$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	± 10				± 15			± 15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							nA/ $^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	μA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M Ω
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$, $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									M Ω
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							± 12	± 13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				± 12	± 13					V



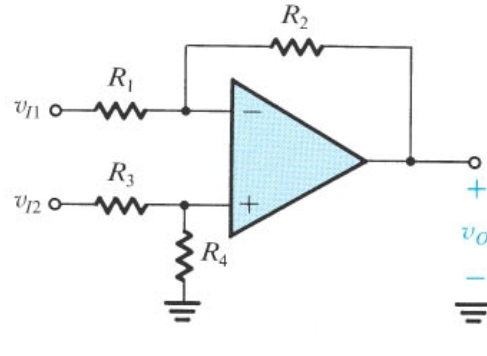
پایه های تقویت کننده عملیاتی LM741

Dual-In-Line or S.O. Package





کاربرد های Op-Amp



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{I2} - v_{I1}) = \frac{R_2}{R_1} v_{Id}$$

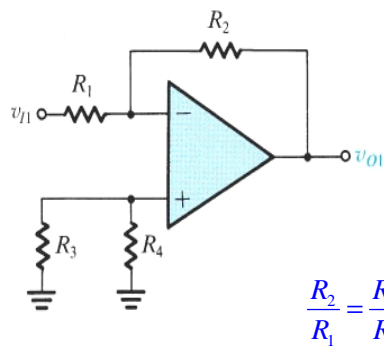
04-Jun-07

A difference amplifier.

43 /74

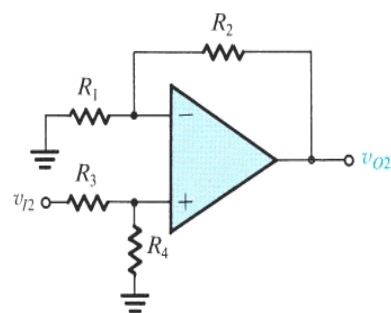
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

$$v_{o1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1}$$



$$v_{o2} = v_{I2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{R_2}{R_1} v_{I2}$$

Application of superposition to the analysis of the circuit

04-Jun-07

44 /74

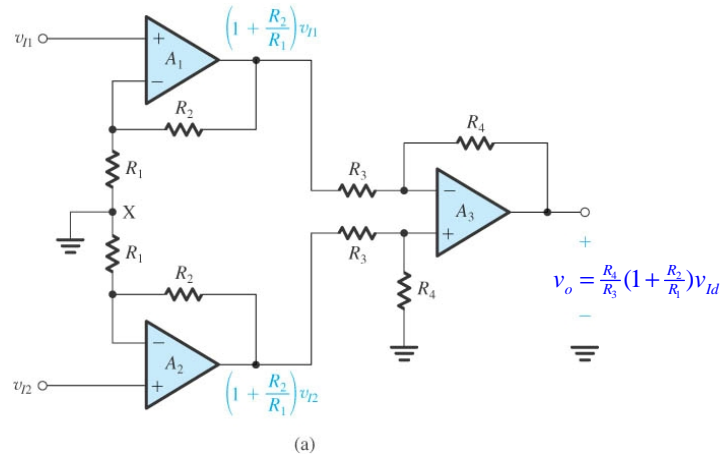
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی



کاربرد های Op-Amp

تقویت کننده (تفاضلی) ابزار دقیق



این تقویت کننده دارای ۳ اشکال عمده است

04-Jun-07

45 /74

A popular circuit for an instrumentation amplifier: (a) Initial approach to the circuit



۱) تقویت Common Mode Signal در طبقه اول

۲) ایجاد سیگنال تفاضلی در صورت عدم تقارن
تقویت کننده های ورودی

۳) نیاز به تغییر دو پتانسیومتر همزمان در صورت نیاز به
تغییر بهره

04-Jun-07

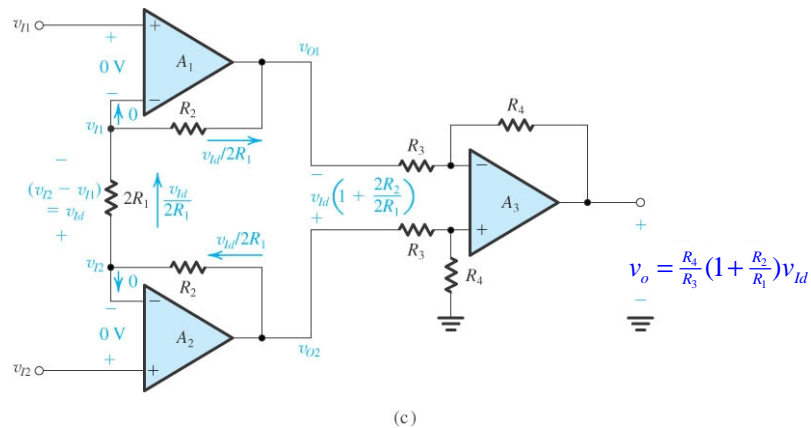
46 /74

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی



تقویت کننده (تفاضلی) ابزار دقیق عملی



A popular circuit for an instrumentation amplifier with the connection between node X and ground removed and the two resistors R_1 and R_1 lumped together. This simple wiring change dramatically improves performance of the circuit. Analysis assuming ideal op amps.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

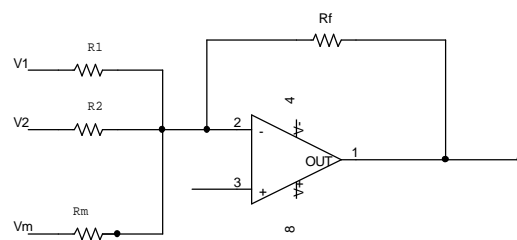
تقویت کننده های عملیاتی

47 / 74



کاربرد های Op-Amp

(۱) جمع کننده آنالوگ:



$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \dots + \frac{R_f}{R_m} v_m \right)$$

04-Jun-07

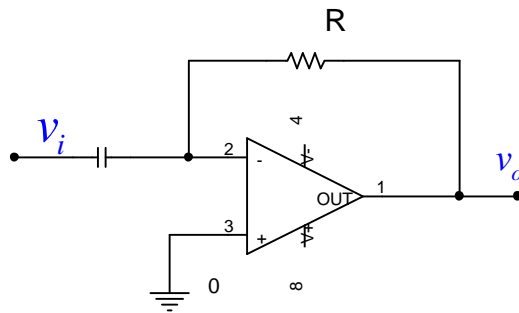
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

48 / 74



۲) مدار مشتق گیر



$$v_o = -RC \frac{dv_i}{dt}$$

04-Jun-07

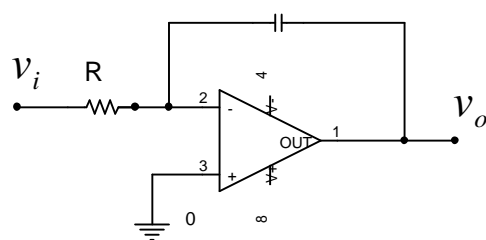
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

49 /74



مدار انتگرال گیر



$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i .dt$$

04-Jun-07

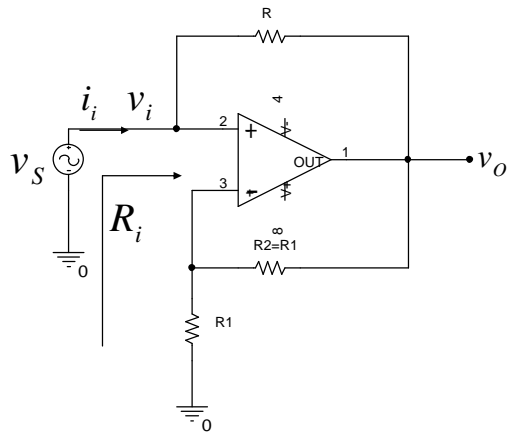
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

50 /74



مقاومت منفی



$$v_i = v_f = \frac{v_o R_1}{R_1 + R_2} = \frac{v_o}{2}$$

$$i = \frac{v_i - v_o}{R} \Rightarrow i = -\frac{v_i}{R}$$

$$\frac{v_i}{i} = R_i = -R$$

04-Jun-07

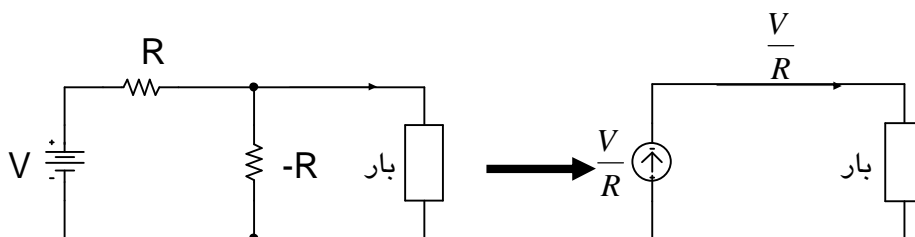
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

51 / 74



کاربرد مقاومت منفی



- جریان بار همواره ثابت است و به مقاومت بار بستگی ندارد.

04-Jun-07

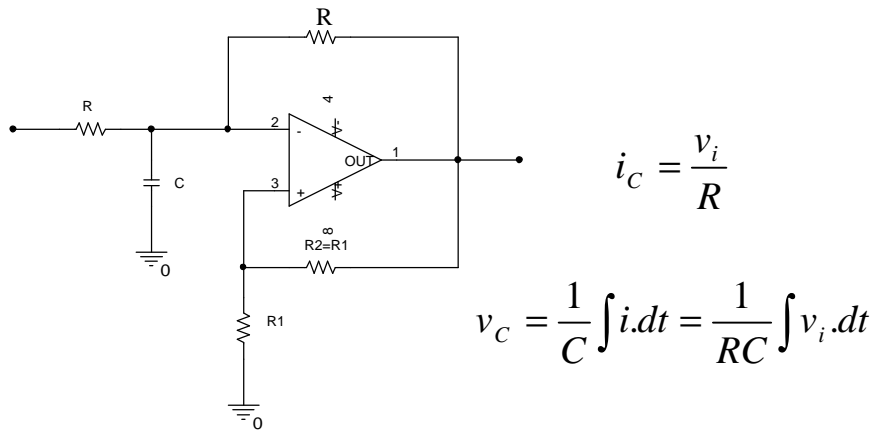
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

52 / 74



کاربرد مقاومت منفی در انتگرال گیر



04-Jun-07

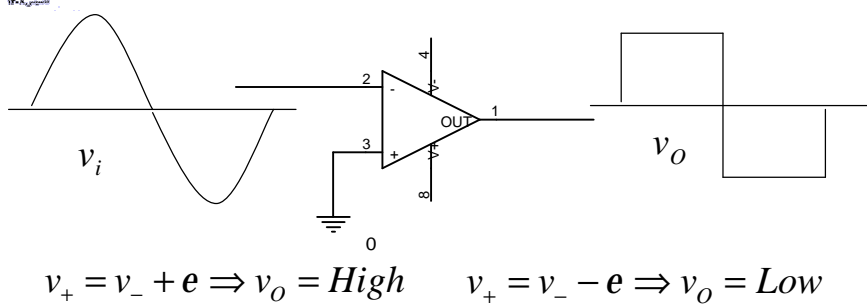
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

53 / 74



مقایسه کننده یک سطحی



- این مدار لحظه عبور از صفر را مشخص می کند. و یک آشکار ساز عبور از صفر (Zero Cross detector) است.

04-Jun-07

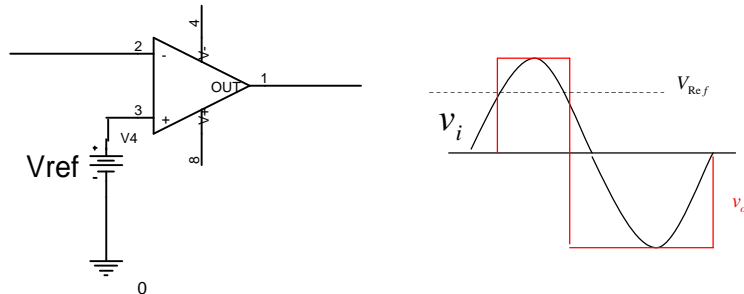
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

54 / 74



مقایسه کننده یک سطحی



- این مدار لحظه عبور از V_{Ref} را مشخص می کند.

04-Jun-07

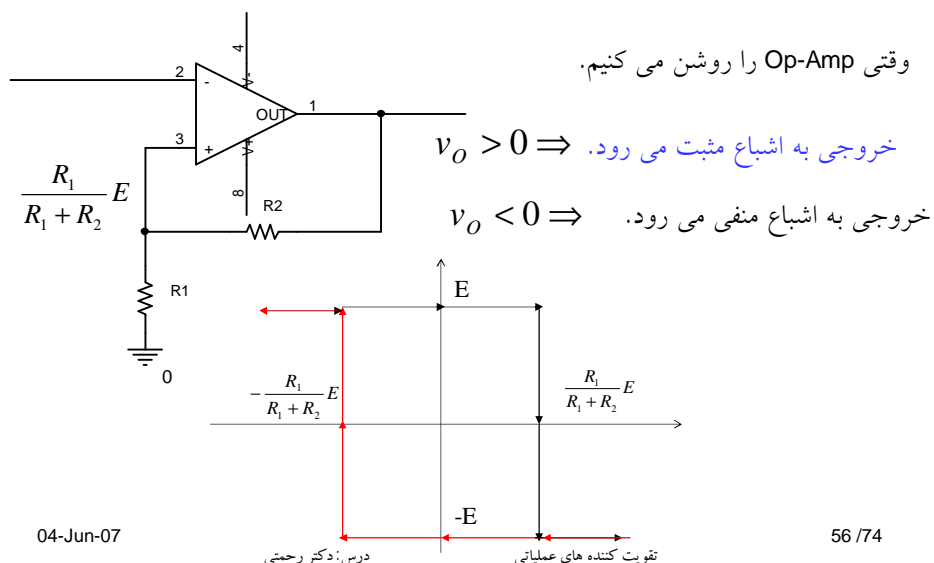
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

55 / 74



مقایسه کننده های دو سطحی



04-Jun-07

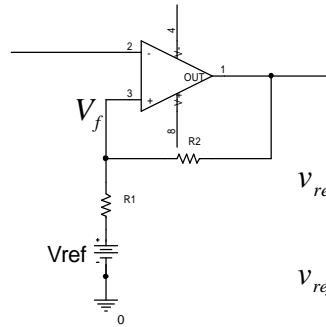
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

56 / 74



مقایسه کننده های دو سطحی



$$V_f = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_O + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref}$$

$$V_O = +E$$

$V_{ref} > 0 \Rightarrow$ منحنی به اندازه $\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref}$ به سمت راست حرکت می کند.

$V_{ref} < 0 \Rightarrow$ منحنی به اندازه $\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ref}$ به سمت چپ حرکت می کند.

- اگر سرعت تغییرات ورودی (فرکانس) را زیاد کنیم خروجی با همان سرعت تغییر نمی کند و شیب دار می شود.

04-Jun-07

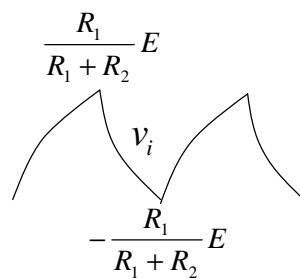
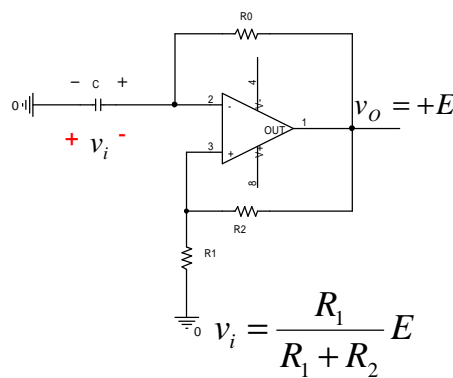
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

57 / 74



مولتی ویراتور موج مربعی



$$V_C = V_f + (V_i - V_f) e^{-\frac{t}{RC}}$$

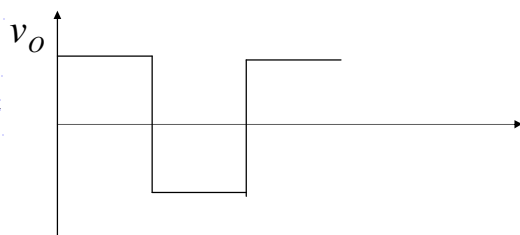
$$\text{if } R_1 = R_2 \Rightarrow T = 2RC \ln 3$$

04-Jun-07

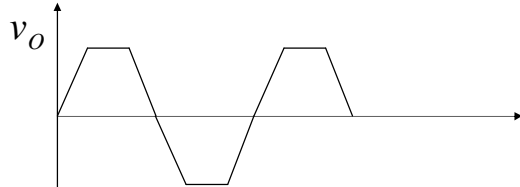
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

58 / 74

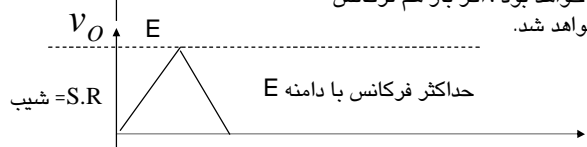


خروجی در فرکانس های پایین



خروجی در فرکانس های بالا

در فرکانس های بالاتر شکل موج مثلثی خواهد بود ، اگر باز هم فرکانس را افزایش دهیم دامنه شکل موج کمتر خواهد شد.



شیب = S.R

حداکثر فرکانس با دامنه E

$$S.R = \frac{E}{T} \Rightarrow T_{\min} = \frac{E}{S.R} \Rightarrow f_{\max} = \frac{S.R}{E}$$

04-Jun-07

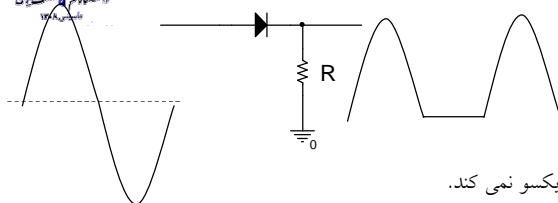
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

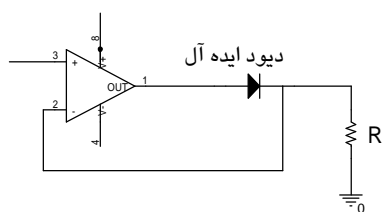
59 / 74



یکسوسازی



شکل موج با دامنه کمتر از ۰/۵ ولت را یکسو نمی کند.



• برای فرکانس های پایین به کار می رود.

$$v_i < 0 \Rightarrow v_o = 0$$

$$v_i > 0 \Rightarrow v_o = v_i$$

04-Jun-07

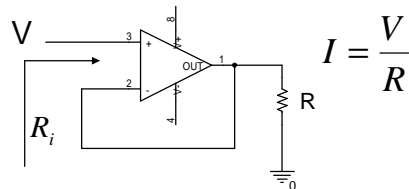
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

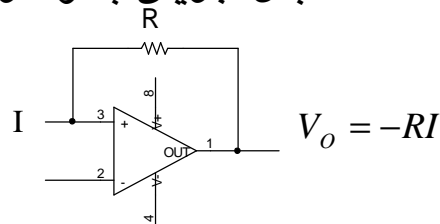
60 / 74



مبدل ولتاژ به جریان



مبدل جریان به ولتاژ



04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

61 /74



منحنی پاسخ فرکانسی تقویت کننده عملیاتی

یک OpAmp معمولاً دارای سه طبقه تقویت کننده است.

روش کلی به دست آوردن پاسخ فرکانسی آن است که بجای هر طبقه مدار معادل آن را قرار دهیم و تابع تقویت کننده انتقالی (A_v) را به دست آوریم.

به علت اینکه مدار پیچیده است این کار بدون کمک کامپیوتر عملاً غیر ممکن است.

قطب ها را می توان به طور تقریب از روی منحنی مشخصه انتقالی به دست آورد.

بعضی از تولید کنندگان OpAmp منحنی پاسخ فرکانسی آن را در کاتالوگ چاپ و در اختیار استفاده کننده قرار می دهند.

در بعضی از OpAmp ها (مانند ۷۴۱) برای خنثی کردن اثر قطب های مدار از قطب غالب استفاده می کنند.

برای بعضی از OpAmp ها خازن جبران ساز باید از بیرون وصل کرد.

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

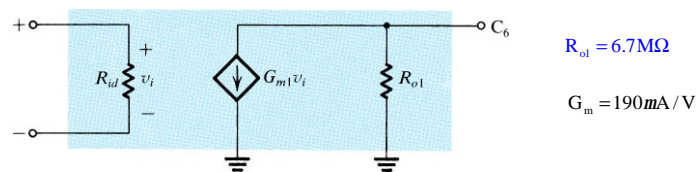
62 /74



منحنی پاسخ فرکانسی تقویت کننده عملیاتی LM741

این تقویت کننده دارای ۳ طبقه است

طبقه ورودی (تقویت کننده تفاضلی) که مدار معادل آن به صورت زیر است



Small-signal equivalent circuit for the input stage of the 741 op amp.

04-Jun-07

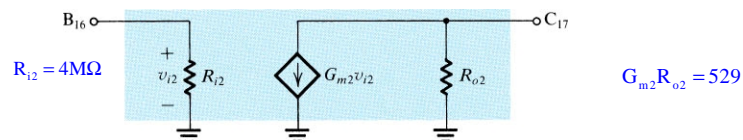
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

63 / 74

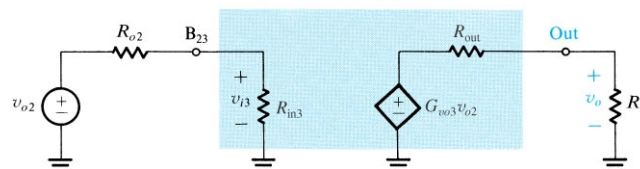


طبقه میانی (تقویت کننده ولتاژ) که مدار معادل آن به صورت زیر است



Small-signal equivalent circuit model of the second stage.

طبقه خروجی (تقویت کننده جریان) که مدار معادل آن به صورت زیر است



Model for the 741 output stage.

04-Jun-07

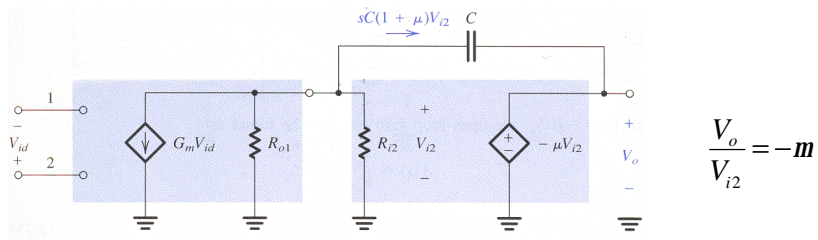
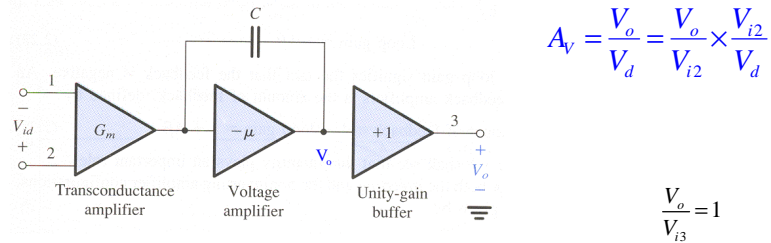
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

64 / 74



پس بطور خلاصه مدار معادل آن به صورت زیر است



04-Jun-07

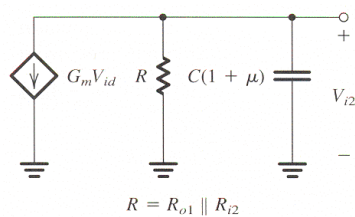
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

65 /74



بهره ولتاژ (تابع تبدیل) تقویت کننده عملیاتی LM741



$$\frac{V_{i2}}{V_d} = -G_m Z \quad Z = R \parallel (1/SC)$$

$$Z = \frac{R}{1 + RSC}$$

$$\frac{V_{i2}}{V_d} = -G_m Z = -\frac{G_m R}{1 + RCS}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{V_o}{V_{i2}} \times \frac{V_{i2}}{V_d}$$

$$A_v = \frac{mG_m R}{(1 + RCS)}$$

$$A_{vo} = mG_m R = A_o = 250000$$

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

66 /74



پهنای باند تقویت کننده عملیاتی LM741

$$W_{3dB} = \frac{1}{RC} \quad f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \cong 4Hz$$

$$|A_v| = \frac{mG_m R}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^2}} = \frac{A_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^2}} \quad \text{If } f \gg f_{3dB} \Rightarrow |A_v| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}}\right)^2}} \cong \frac{A_o f_{3dB}}{f}$$

$$\begin{cases} f = f_t \\ |A_v| = 1 \end{cases} \quad f_t = A_o f_{3dB} = 1MHz \quad w_t = \frac{mG_m R}{RC(1+m)}$$

04-Jun-07

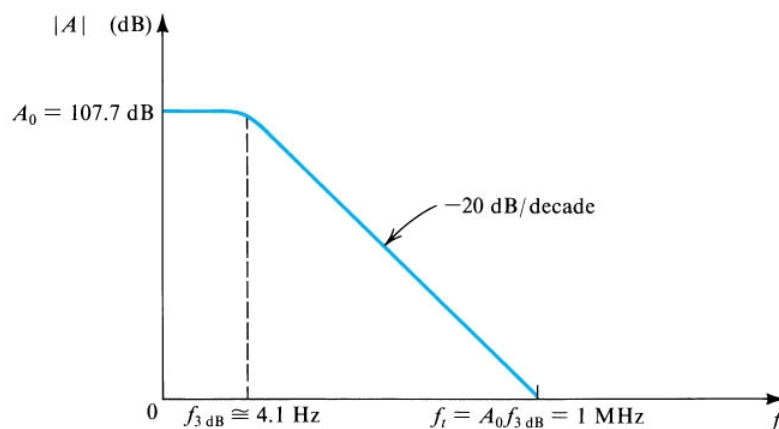
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

67 /74



منحنی پاسخ فرکانسی تقویت کننده عملیاتی LM741



Bode plot for the 741 gain, neglecting nondominant poles.

04-Jun-07

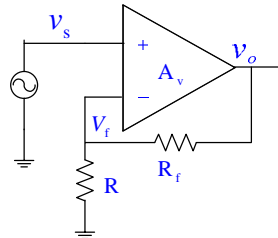
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

68 /74



Non-Inverting Amplifier



$$b = \frac{V_f}{V_o} = \frac{R}{R + R_f} \quad A = A_v$$

$$bA = bA_v = \frac{R}{R + R_f} A_v$$

نوع فیدبک ولتاژ- سری

اگر منحنی های قدر مطلق و فاز A_v را داشته باشیم می توانیم روی پایداری تقویت کننده با توجه به مقدار فیدبک بحث کنیم

04-Jun-07

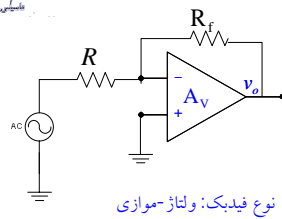
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

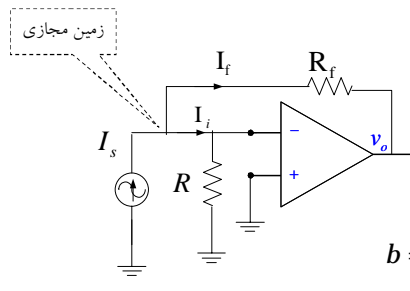
69 / 74



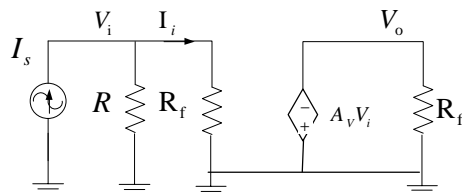
Inverting Amplifier



نوع فیدبک: ولتاژ- موازی



$$b = \frac{I_f}{V_o} = -\frac{1}{R_f}$$



مدار معادل با اثر بار گذاری و بدون فیدبک

$$R_m = \frac{V_o}{I_s}$$

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

70 / 74



Inverting Amplifier

$$V_o = -A_v V_i = -A_v I_s \frac{R R_f}{R + R_f}$$

$$R_m = \frac{V_o}{I_s} = -A_v \frac{R R_f}{R + R_f}$$

$$b R_m = \frac{-1}{R_f} \times R_m = A_v \frac{R}{R + R_f}$$

$$b A = b R_m = \frac{R}{R + R_f} A_v$$

برای این تقویت کننده هم اگر منحنی های قدر مطلق و فاز A_v را داشته باشیم می توانیم روی پایداری آن با توجه به مقدار فیدبک بحث کنیم

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

71 / 74



مثال:

منحنی های قدر مطلق و فاز بهره ولتاژ $\mu A702$ داده شده.

الف) حد اقل فیدبک مقاومتی که تقویت کننده را به نوسان در می آورد چقدر است؟

ب) حد اقل بهره ای که در حالت Inverting و non-inverting می توان داشت بدست آورید.

ج) اگر بخواهیم تقویت کننده با فیدبک، ۴۵ درجه حاشیه فاز داشته باشد مقدار فیدبک لازم چقدر است؟

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

72 / 74



منحنی های پاسخ فرکانسی (مشخصه های بهره مدار باز و فاز) $\mu A702A$

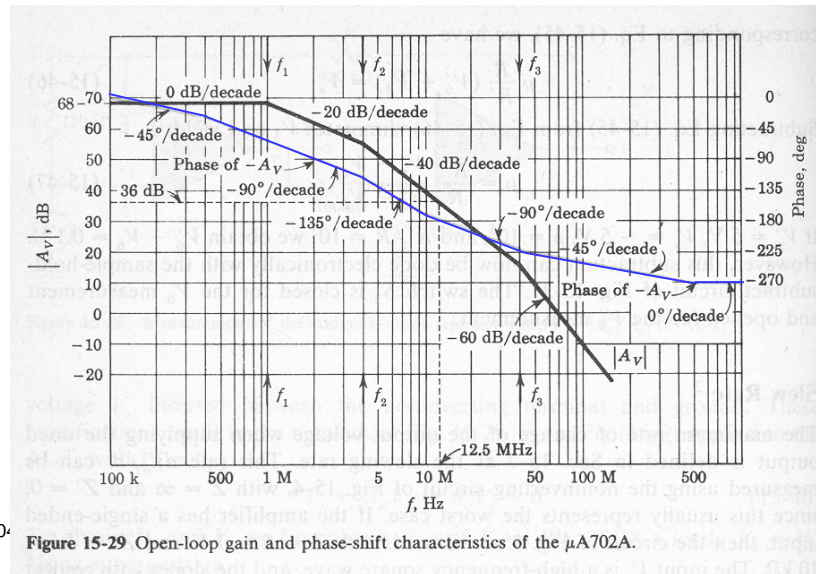


Figure 15-29 Open-loop gain and phase-shift characteristics of the $\mu A702A$.



$$\angle A_v = -180^\circ \Rightarrow f = 12.5 \text{ MHz} \Rightarrow |A_v| = 36 \text{ dB} \approx 63$$

$$\Rightarrow \left| \frac{R}{R + R_f} A_v \right| = 1 \Rightarrow \frac{R}{R + R_f} = \frac{1}{63} \Rightarrow \frac{R + R_f}{R} = 63$$

بنابراین کمترین مقدار بهره برای حالت Inverting برابر ۶۲ و برای حالت Noninverting برابر ۶۳ خواهد بود.

اگر بهره از این مقدار کمتر شود یعنی فیدبک زیادتر شده و تقویت کننده به نوسان خواهد افتاد.



پایان

04-Jun-07

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

75 /74