



## 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](mailto:rahmati@iust.ac.ir)

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

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

1



## Chapter 6

تقویت کننده های عملیاتی  
(Operational Amplifiers)

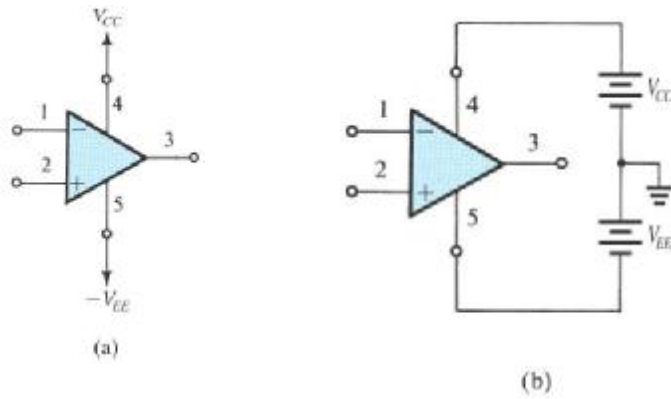
1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

2

## 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.

The op amp shown connected to dc power supplies.

1/2/2006

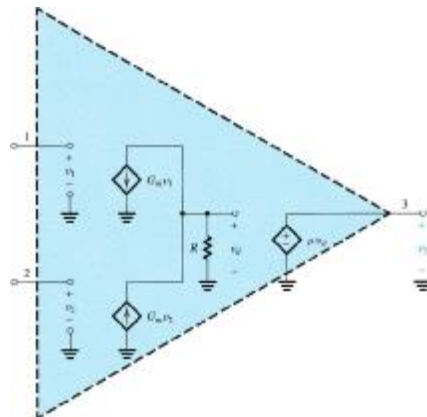
درس: دکتر رحمتی

### تقویت‌کننده های عملیاتی

3



## مدار معادل ac تقویت کننده های عملیاتی در فرکانس پایین



1/2/2006

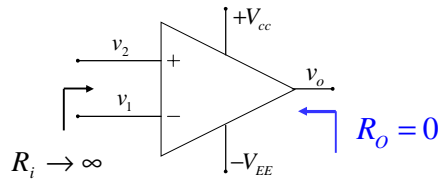
درس: دکتر رحمتی

### تقویت‌کننده های عملیاتی

4



## خصوصیات تقویت کننده عملیاتی ایده آل



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

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

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

$$R_i \rightarrow \infty \quad (1)$$

$$R_o = 0 \quad (2)$$

$$v_o = f(v_2 - v_1) \quad (3)$$

$$A_d = \infty \quad (4)$$

$$A_c = 0 \quad (5)$$

$$CMRR = \infty \quad (6)$$

$$f_L = 0 \quad (7)$$

$$B.W = \infty \quad (8)$$

$$\text{ولتاژ و جریان آفست صفر} \quad (9)$$

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

5



## 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  $10^8 - 10^9$  است.
- مقاومت ورودی آپ امپ هایی که در ورودیشان MOSFET به کار رفته است در محدوده  $10^{12}$  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  $10 \text{ Hz}$  است.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

6



دانشگاه تهران  
پژوهشگاه دانش‌های پایه  
۱۳۸۴


- 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

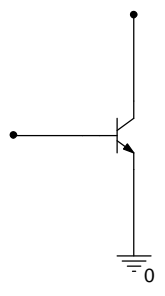
تقویت کننده های عملیاتی

7



دانشگاه تهران  
پژوهشگاه دانش‌های پایه  
۱۳۸۴

- تغییر دهنده سطح DC برای مساوی کردن سطح خروجی یک طبقه با ورودی طبقه بعد است.
- یک امیتر مشترک به نوعی می تواند تغییر دهنده سطح DC باشد.
- تغییر سطح DC انجام می شود.



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

- خروجی Common Collector و Complimentary نیز تغییر دهنده سطح DC هستند.

1/2/2006

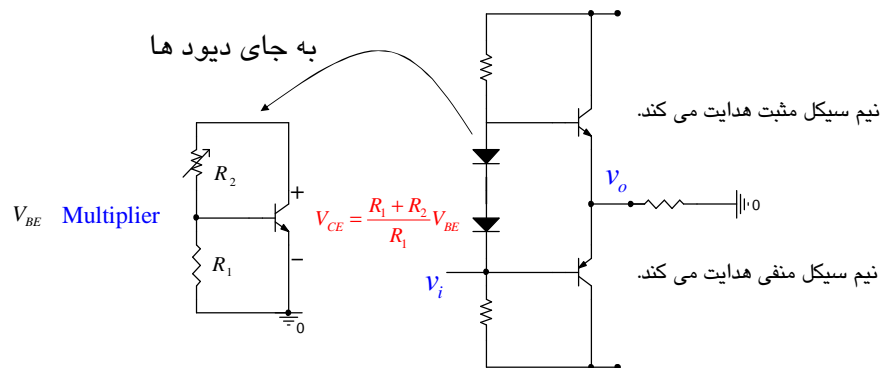
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

8



## بافر یا تقویت کننده جریان طبقه خروجی



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

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

9



## 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.

1/2/2006

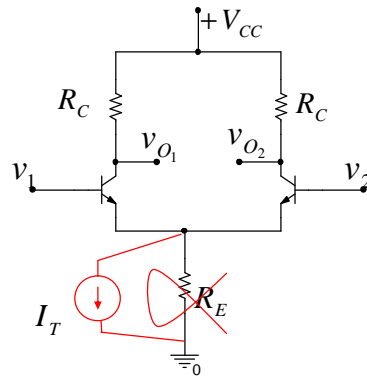
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

10



## 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

11



## 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.

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

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

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

1/2/2006

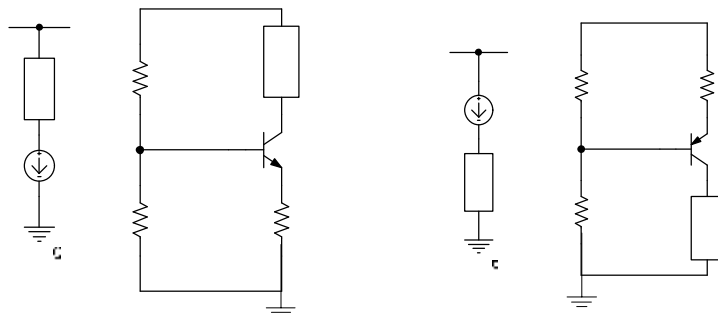
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

12



## 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.

1/2/2006

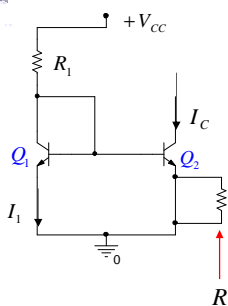
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

13



## 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.

1/2/2006

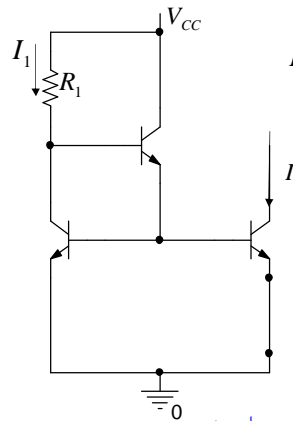
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

14



## 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

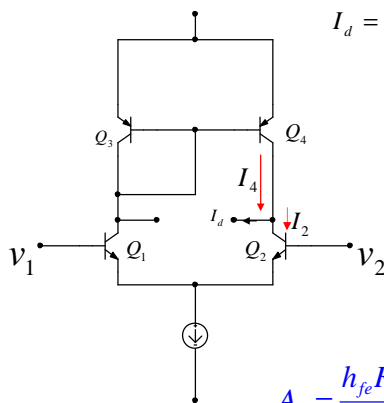
تفویت کننده های عملیاتی

15



## بار فعال (Active Load)

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



$$I_d = I_4 - I_2$$

$$v_1 \downarrow, v_2 \uparrow \Rightarrow I_d(-)$$

هدایت  $Q_1 \downarrow$ , هدایت  $Q_2 \uparrow$

$$v_1 \uparrow, v_2 \downarrow \Rightarrow I_d(+)$$

هدایت  $Q_1 \uparrow$ , هدایت  $Q_2 \downarrow$

- نسبت به تغییرات ولتاژ خروجی حساس است.

$$A_d = \frac{h_{fe} R_C}{2h_{ie}} = \frac{h_{fe} R_{CQ4}}{2h_{ie}} = \frac{h_{fe} (R_{OQ4} \parallel R_{OQ2})}{2h_{ie}}$$

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

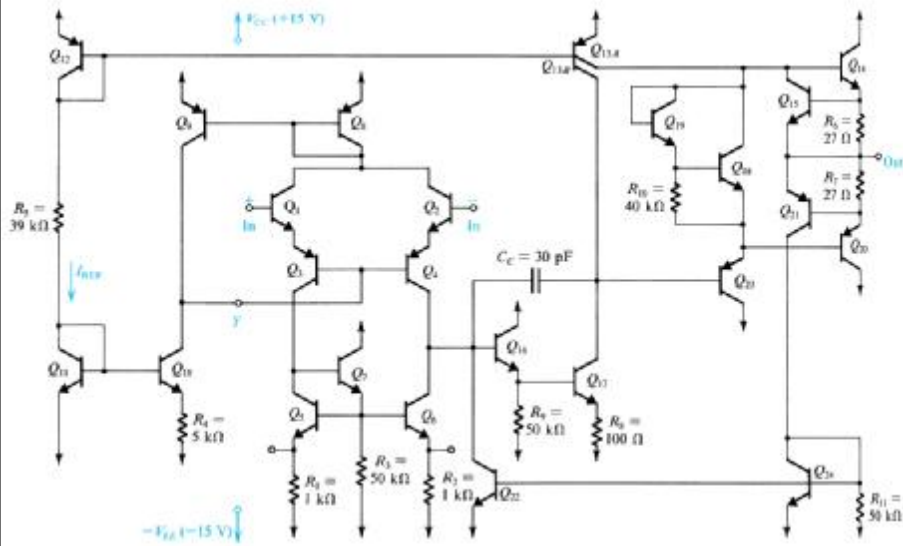
تفویت کننده های عملیاتی

16





## 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.



## توصیف عملکرد مدار داخلی تقویت کننده عملیاتی ۷۴۱

- ترانزیستورهای  $Q1$  و  $Q2$  دو مدار  $\text{Emitter Follower}$  هستند که مقاومت ورودی را زیاد و جریان ورودی را کم نگه می دارند.
- ترانزیستورهای  $Q1, Q2$  ، امیترهای زوج تفاضلی بیس مشترک  $\text{pnp}$  یعنی  $Q3, Q4$  را راه اندازی می کنند.
- ترانزیستورهای  $Q5, Q6$  بار فعالی را برای  $Q3, Q4$  تشکیل می دهند.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

19



## 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

20



## 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 جا ها 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

21



## 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

22



## وظایف سایر ترانزیستورها

- ترانزیستور Q16، آمیتر فالوری است که اثر بار گذاری Q17 را روی خروجی طبقه بار فعال (تقویت کننده تفاضلی) کم می کند.
- ترانزیستور Q17 تقویت کننده آمیتر مشترکی است که بار فعال تشکیل شده از Q13B دارد، این طبقه تقویت کننده، بهره ولتاژ زیادی را فراهم می کند.
- ترانزیستور Q23 آمیتر 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

23



## 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.

1/2/2006

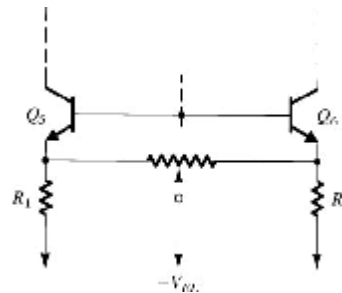
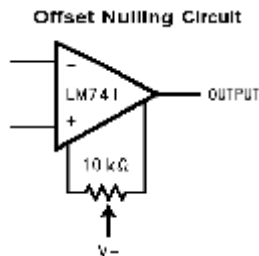
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

24



## مدار برای صفر کردن offset تقویت کننده عملیاتی LM741



1/2/2006

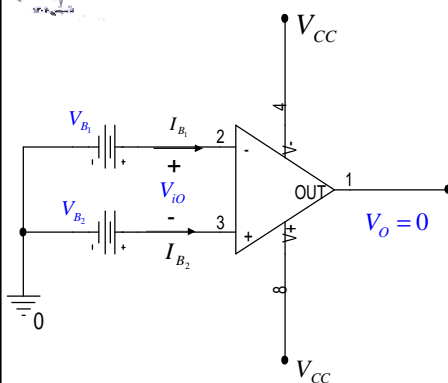
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

25



## 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.

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

1/2/2006

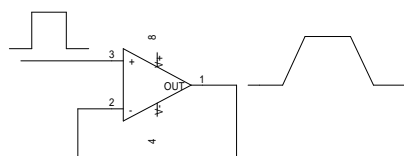
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

26

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  
$$\text{input offset voltage drift} = \frac{\Delta V_{io}}{\Delta T}$$
۶. ولتاژ آفست خروجی: ولتاژ خروجی وقتی ورودی ها زمین باشد. (آپ امپ در ناحیه فعال نخواهد 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.

۸. حوزه تغییرات ورودی به صورت تفاضلی (input differential Mode range)  
حداکثر  $V_d$  که می توان به تقویت کننده اعمال کرد بدون اینکه تقویت کننده آسیب ببیند.
۹. حوزه تغییرات خروجی (Output 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)

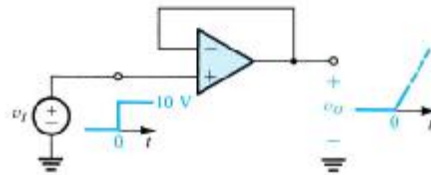


سرعت تغییرات خروجی کمتر از ورودی است.



## Slew Rate

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



سرعت تغییرات خروجی کمتر از ورودی است.

1/2/2006

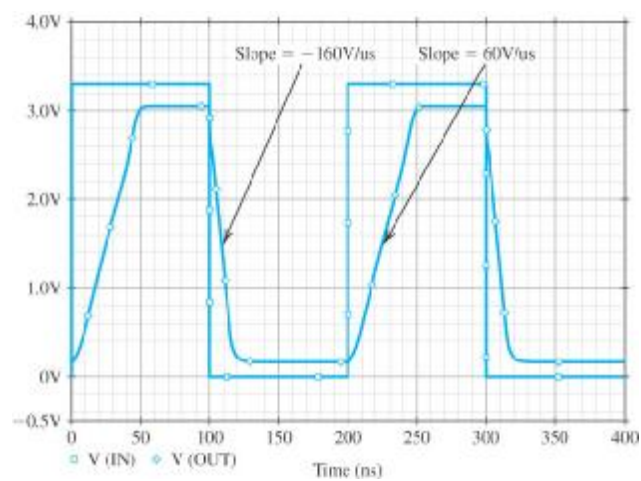
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

29



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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

30



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

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

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

$$\omega V_m \leq S.R$$

$$2\pi f_m V_m = S.R$$

در بسامد  $\omega$  بالاتر از  $\omega_m$  دامنه ماکزیمم موج سینوس اعوجاج نیافته از رابطه زیر بدست می آید.

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

1/2/2006

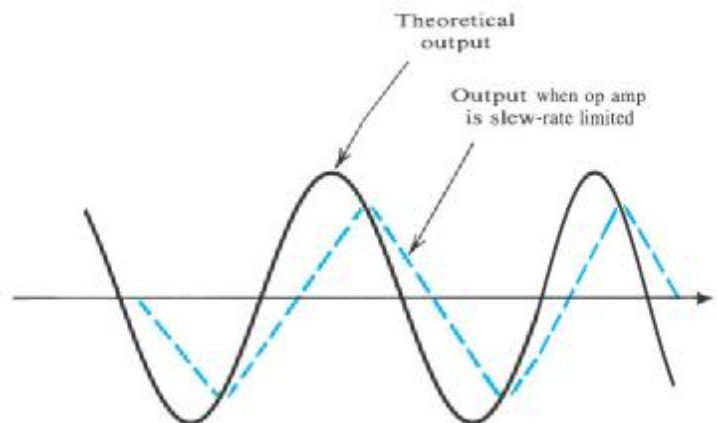
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

31



اثر محدود کنندگی slew-rate روی شکل موج خروجی



Effect of slew-rate limiting on output sinusoidal waveforms.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

32





## نمونه هایی از پارامترهای تقویت کننده عملیاتی LM741 ساخت کارخانه ناسیونال

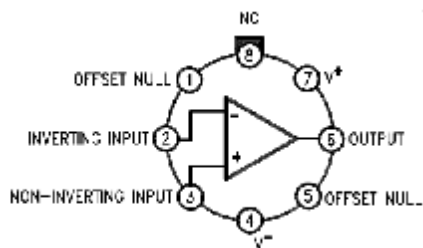
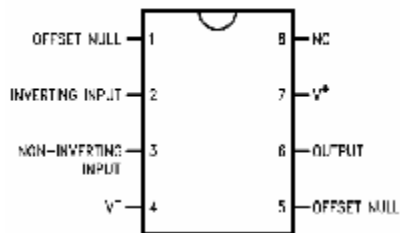
### Electrical Characteristics (Note 4)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$I_A = 25 \mu\text{C}$					1.0	5.0	2.0	6.0		mV
	$R_E \leq 10 \text{ k}\Omega$		0.4	3.0							mV
	$R_A \leq 500\Omega$			4.0							mV
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$						8.0			7.5	mV
Average Input Offset Voltage Drift	$R_E \leq 10 \text{ k}\Omega$										$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$			10							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$I_A = 25 \mu\text{C}$ , $V_E = \pm 20\text{V}$	$\pm 10$			$\pm 10$			$\pm 10$			mV
Input Offset Current	$I_A = 25 \mu\text{C}$		3.0	30	20	200	20	200			nA
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$			70	85	500		500			nA
Average Input Offset Current Drift				0.6							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80	50	500	30	500			nA
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$			120		100		100			nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_E = \pm 20\text{V}$	1.0	3.0	$>10$	0.3	2.0	0.3	2.0			M $\Omega$
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$	0.1									M $\Omega$
	$V_E = \pm 20\text{V}$										M $\Omega$
Input Voltage Range	$I_A = 25 \mu\text{C}$							$\pm 12$	$\pm 13$		V
	$T_{AMB} \leq T_A \leq T_{MAX}$				$\pm 10$	$\pm 10$					V



## پایه های تقویت کننده عملیاتی LM741

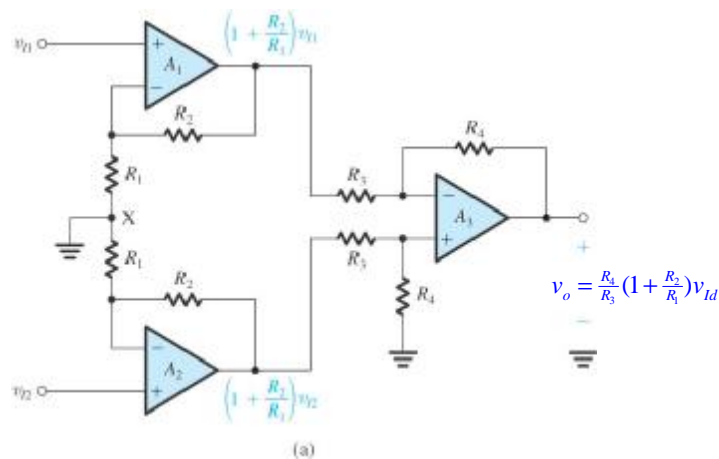
### Dual-In-Line or S.O. Package





## کاربرد های Op-Amp

تقویت کننده (تفاضلی) ابزار دقیق



این تقویت کننده دارای ۳ اشکال عمده است

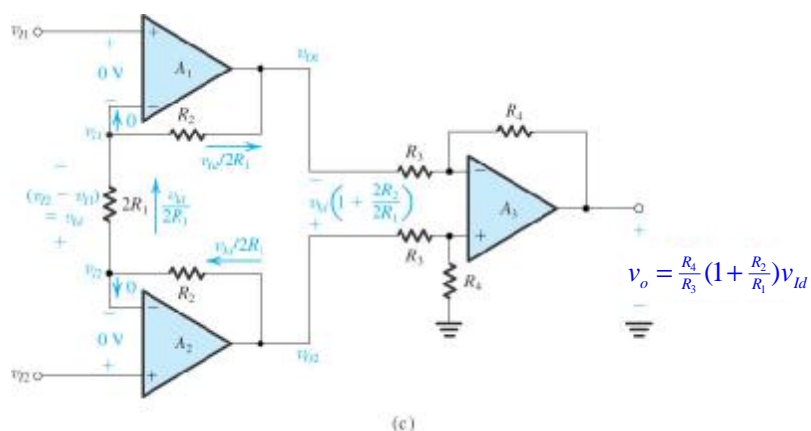
1/2/2006

35

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



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.

1/2/2006

36

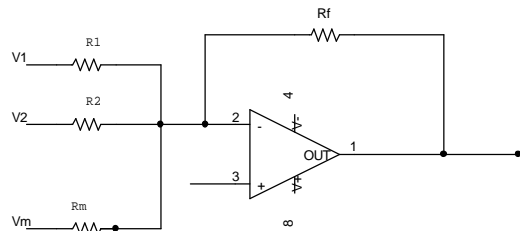
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی



## کاربرد های Op-Amp

(۱) جمع کننده آنالوگ:



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

1/2/2006

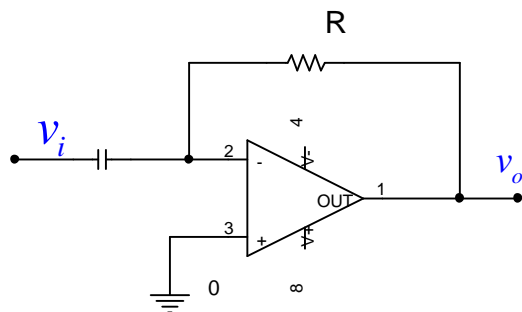
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

37



## (۲) مدار مشتق گیر



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

1/2/2006

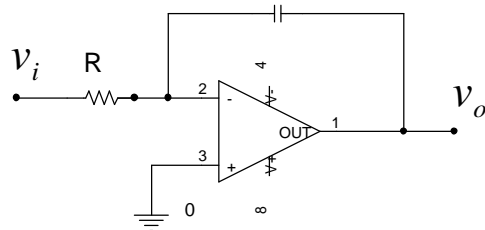
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

38



## مدار انتگرال گیر



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

1/2/2006

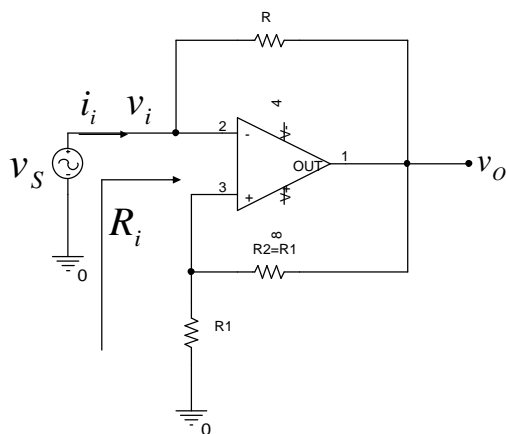
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

39



## مقاومت منفی



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

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

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

1/2/2006

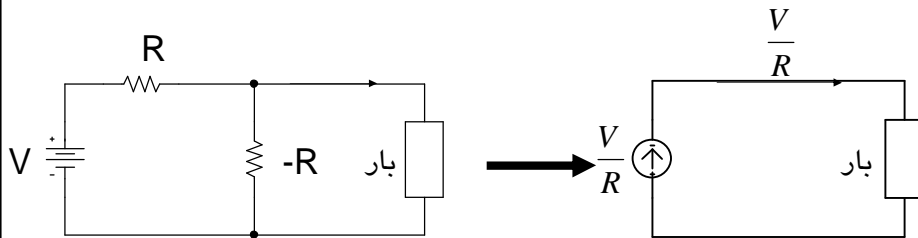
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

40



## کاربرد مقاومت منفی



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

1/2/2006

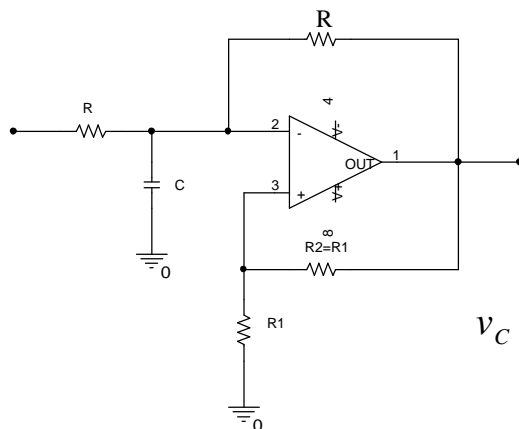
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

41



## کاربرد مقاومت منفی در انتگرال گیر



$$i_C = \frac{v_i}{R}$$

$$v_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{RC} \int v_i dt$$

1/2/2006

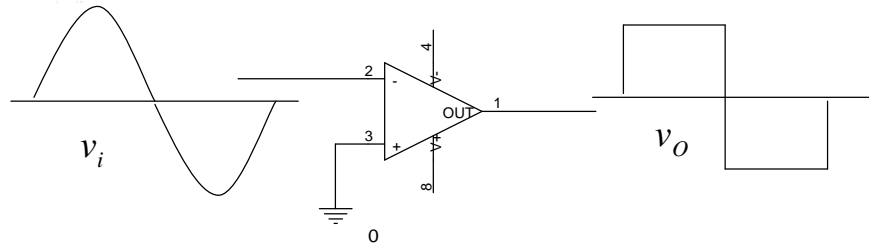
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

42



## مقایسه کننده یک سطحی



$$v_+ = v_- + e \Rightarrow v_o = High \quad v_+ = v_- - e \Rightarrow v_o = Low$$

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

1/2/2006

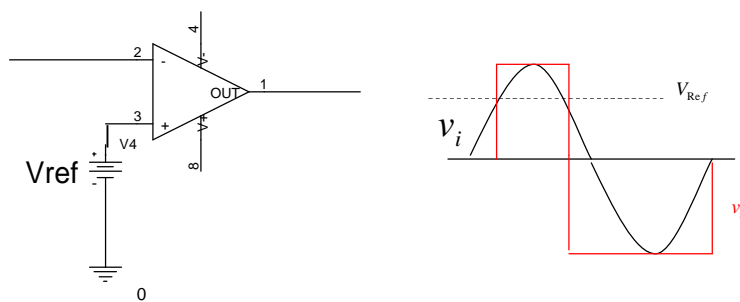
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

43



## مقایسه کننده یک سطحی



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

1/2/2006

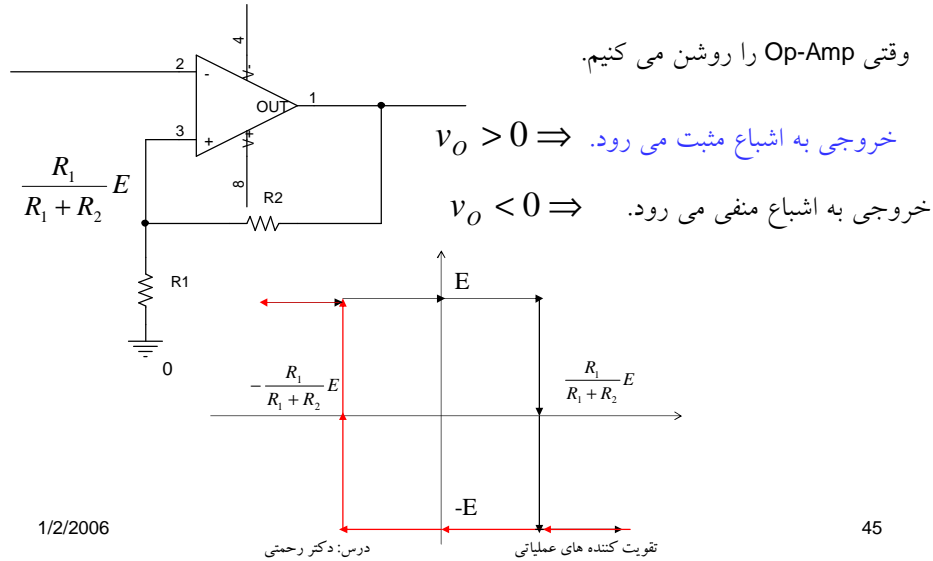
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

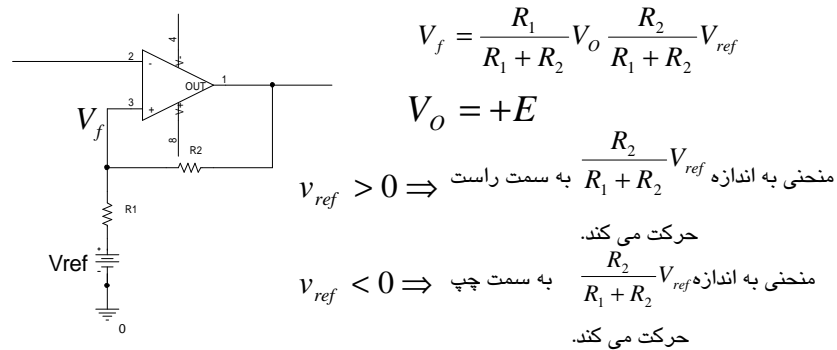
44



## مقایسه کننده های دو سطحی



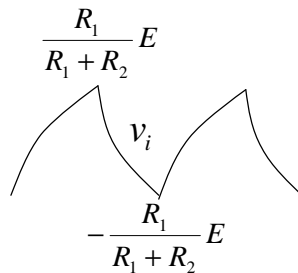
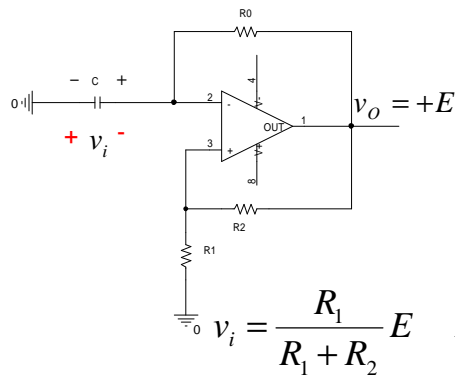
## مقایسه کننده های دو سطحی



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



## مولتی ویبراتور موج مربعی



$$v_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E \quad v_f = -E \quad v_C = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} E$$

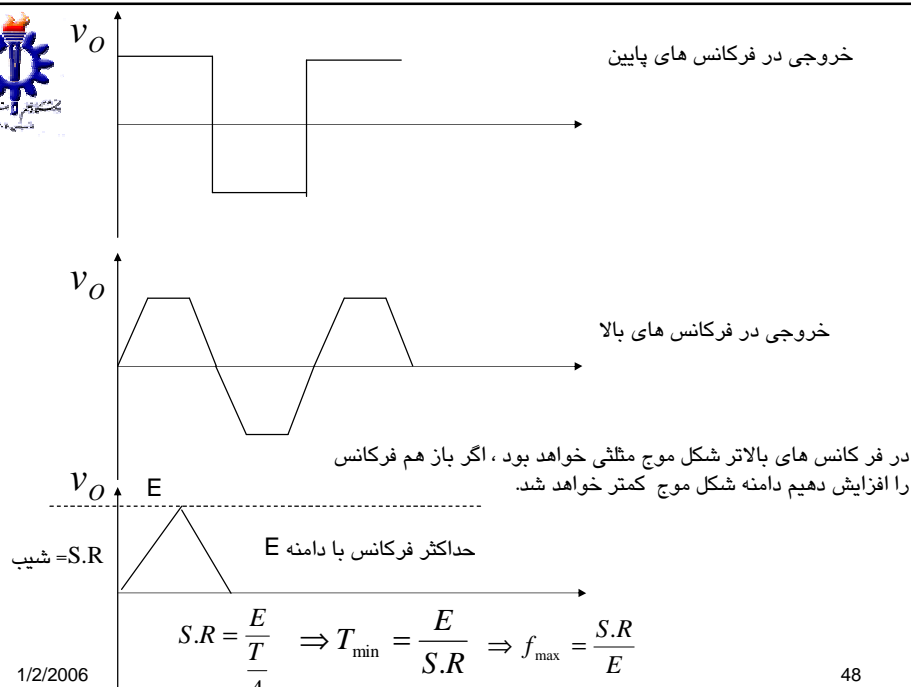
$$v_C = v_f + (v_i - v_f) e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{if } R_1 = R_2 \Rightarrow T = 2RC \ln 3$$

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تفویض کننده های عملیاتی

47



1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

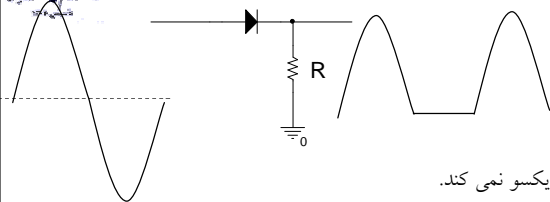
تفویض کننده های عملیاتی

48

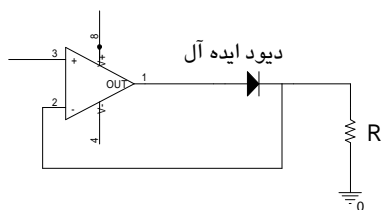




## یکسوسازی



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



• برای فرکانس های پایین به کار می رود.

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

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

1/2/2006

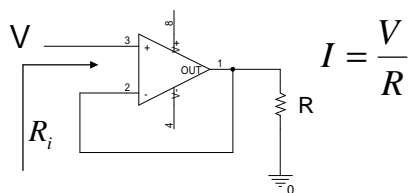
درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

49

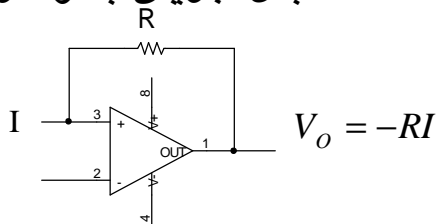


## مبدل ولتاژ به جریان



$$I = \frac{V}{R}$$

## مبدل جریان به ولتاژ



$$V_o = -RI$$

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تفویت کننده های عملیاتی

50



## 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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

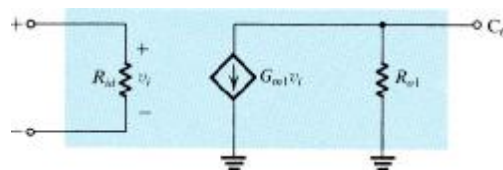
51



## 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



$$R_{o1} = 6.7 \text{ M}\Omega$$

$$G_m = 190 \text{ mA/V}$$

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

1/2/2006

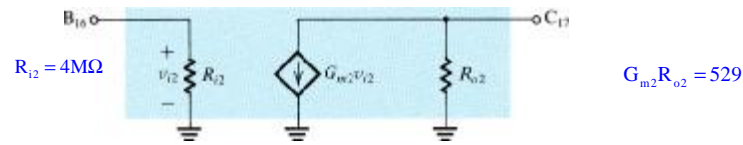
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

52

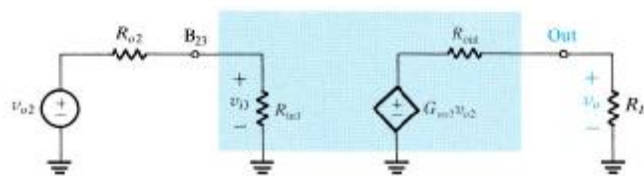


طبقه میانی (تقویت کننده ولتاژ) که مدار معادل آن به صورت زیر است



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.

1/2/2006

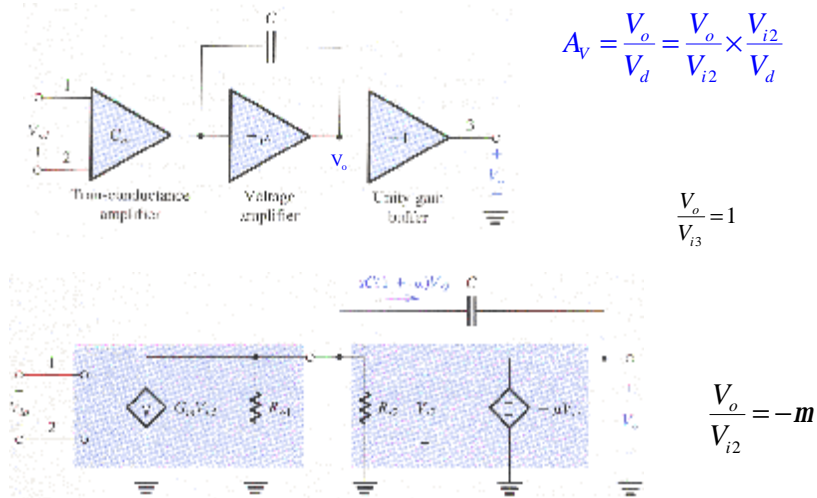
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

53



پس بطور خلاصه مدار معادل آن به صورت زیر است



1/2/2006

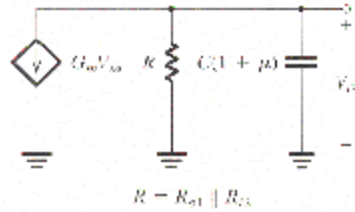
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

54



### بهره ولتاژ (تابع تبدیل) تقویت کننده عملیاتی LM741



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

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

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

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{V_o}{V_{i2}} \times \frac{V_{i2}}{V_d} \quad A_v = \frac{mG_m R}{(1 + RSC)} \quad A_{vo} = mG_m R = A_o = 250000$$

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

55



### پهنای باند تقویت کننده عملیاتی LM741

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

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

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

1/2/2006

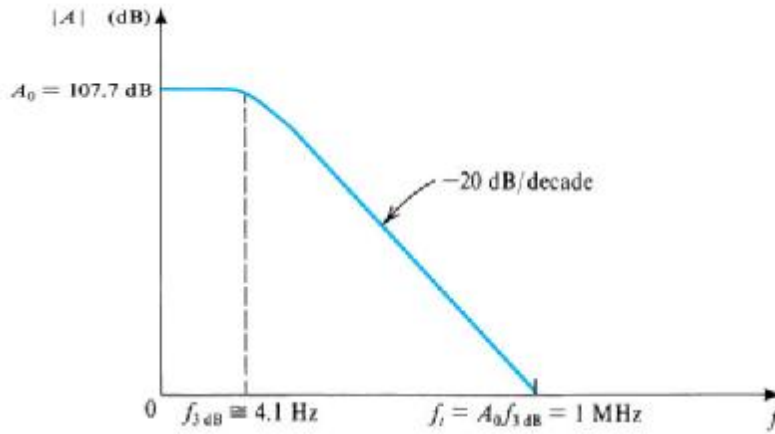
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

56



## منحنی پاسخ فرکانسی تقویت کننده عملیاتی LM741



Bode plot for the 741 gain, neglecting nondominant poles.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

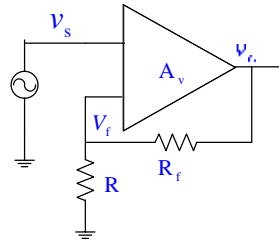
تقویت کننده های عملیاتی

57



## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

### 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

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

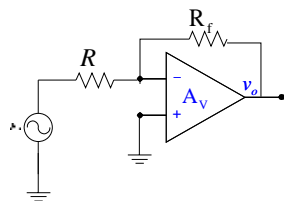
تقویت کننده های عملیاتی

58

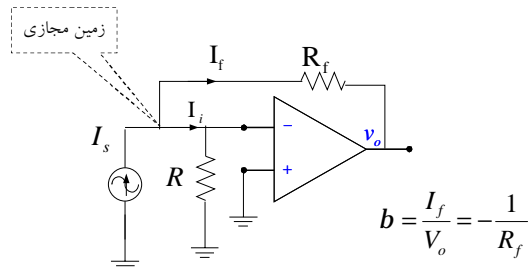


## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

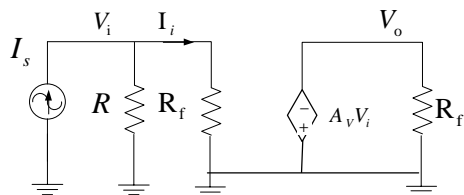
### Inverting Amplifier



نوع فیدبک: ولتاژ-موازی



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



مدار معادل با اثر بار گذاری و بدون فیدبک

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

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

59



## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

### 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

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

60



## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

### 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؟

1/2/2006

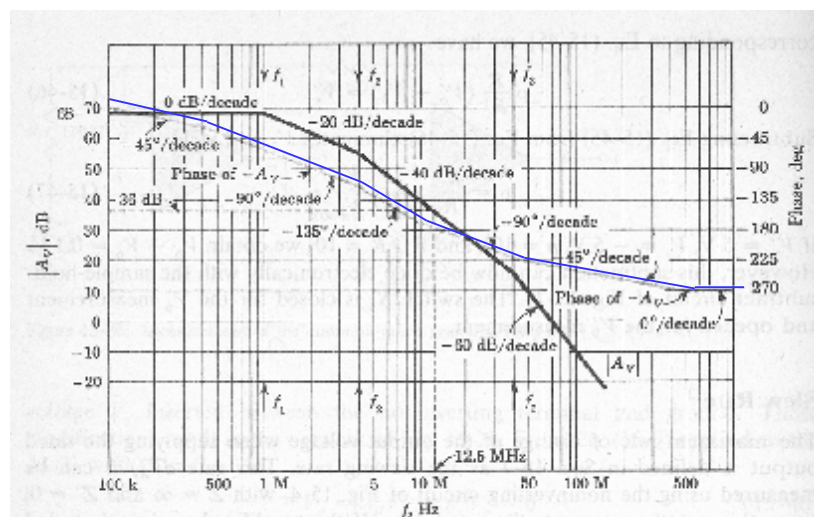
درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

61



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



1/

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

i2



## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

حل:

(الف)

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

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

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.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

63



## بررسی پایداری تقویت کننده های عملیاتی

$$\angle A_v = -135^\circ \Rightarrow f = 5.4 \text{ MHz} \Rightarrow |A_v| \cong 50 \text{ dB} \equiv 316$$

$$\Rightarrow \left| \frac{R}{R + R_f} A_v \right| = 1 \Rightarrow \frac{R}{R + R_f} = \frac{1}{316} \Rightarrow \frac{R + R_f}{R} = 316$$

$$\Rightarrow \frac{R_f}{R} = 315$$

اگر نسبت مقاومت ها از این مقدار کمتر بشود یعنی فیدبک زیادتر شود، حاشیه فاز تقویت کننده از ۴۵ درجه خواهد شد.

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تقویت کننده های عملیاتی

64





# پایان

1/2/2006

درس: دکتر رحمتی

تفاوت کننده های عملیاتی

65