

PARÂMETROS DINÂMICOS

Fundação Universidade Federal de Rondônia
Núcleo de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Disciplina de Eletrônica II

I. OBJETIVOS

- Observar na prática a largura de banda de um ampop 741 e quais a suas complicações.
- Observar o parâmetro de *slew rate* e saber como utilizá-lo para práticas envolvendo ampops.

II. INTRODUÇÃO

O Ampop é projetado para ser um amplificador de alto ganho, com ampla banda-passante. Essa operação tende a ser instável (oscilar) devido a efeitos de realimentação positiva. Para garantir uma operação estável, ampops são construídos com circuitos de compensação interna, que podem reduzir o ganho de malha aberta com o aumento da frequência. Essa redução no ganho é chamada *roll-off*. Em muitos ampops, o roll-off ocorre em uma taxa de 20 dB por década (−20 dB/década) ou 6 dB por oitava (−6 dB/oitava).

Embora as especificações do ampop listem o ganho de tensão de malha aberta (A_{VD}), o usuário geralmente conecta o ampop utilizando resistores de realimentação para reduzir o ganho de tensão do circuito para um valor muito menor (ganho de tensão de malha fechada, A_{CL}). Vários benefícios são obtidos com essa redução do ganho. Primeiro, o ganho de tensão do amplificador fica mais estável e preciso, estabelecido por resistores externos; segundo a impedância de entrada do circuito assume um valor maior do que a do ampop isolado; terceiro, a impedância de saída do circuito assume um valor menor do que a do ampop isolado; e, finalmente, a resposta em frequência do circuito ocupa uma faixa maior do que a do ampop isolado.

A. Ganho - Largura de Banda

Devido aos circuitos de compensação interna que existem em um ampop, o ganho de tensão cai com o aumento de frequência. As especificações do ampop fornecem uma descrição do ganho *versus* largura de banda. A figura 1 mostra uma curva do ganho *versus* frequência para um ampop típico. Em baixas frequências, próximo a operação cc, o ganho é dado por A_{VD} (ganho de tensão diferencial) e é normalmente um valor muito grande. Quando a frequência do sinal de entrada aumenta, o ganho de malha aberta cai, até finalmente atingir o valor de 1 (unitário). A frequência nesse valor de ganho é especificada pelo fabricante como largura de banda de ganho unitário, B_1 . Embora esse valor seja uma frequência (veja a figura 1) na qual o ganho torna-se 1, ele também pode ser considerado

uma largura de faixa, pois representa a banda de frequência de 0 Hz até a frequência que proporciona um ganho unitário. É possível, portanto, denominar esse ponto de frequência em que o ganho é reduzido para 1 como frequência de ganho unitário (f_1) ou largura de banda de ganho unitário (B_1).

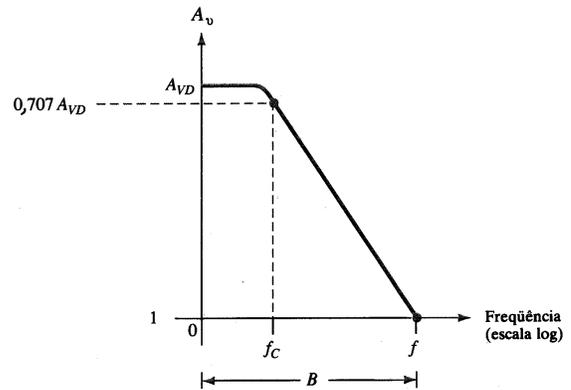


Figura 1. Gráfico de ganho *versus* frequência.

Outra frequência de interesse está representada na figura 1, onde o ganho cai para 3 dB (ou para 0,707 do ganho cc, A_{VD}), sendo essa a frequência de corte do ampop, f_c . Na realidade, a frequência de ganho unitário e a frequência de corte estão relacionadas por:

$$f_1 = A_{VD} f_c \quad (1)$$

A equação 1 mostra que a frequência de ganho unitário também pode ser chamada de produto ganho-largura de banda do ampop.

B. Taxa de subida, SR

Outro parâmetro que reflete a capacidade do ampop de operar com sinais variantes é a taxa de subida (SR - *slew rate*) definida como a máxima taxa na qual a saída do amplificador pode variar em volts por microsegundo ($V/\mu s$).

$$SR = \frac{\Delta V_0}{\Delta t} \quad (2)$$

A taxa de subida fornece um parâmetro que especifica a taxa máxima de variação da tensão de saída quando é aplicado um sinal de grande amplitude na forma de degrau. Se for aplicado um sinal de entrada com uma taxa de variação de

tensão maior que a taxa de subida, a saída não será capaz de variar suficientemente rápido e não cobrirá a faixa completa esperada, resultando em um sinal ceifado ou distorcido. De qualquer forma, a saída não será uma versão amplificada do sinal de entrada se a taxa de subida do ampop não for respeitada.

C. Máxima Frequência de Sinal

A máxima frequência de sinal em que um ampop pode operar depende tanto dos parâmetros de largura de banda (BW) quanto da taxa de subida (SR). Para um sinal senoidal de forma geral:

$$v_0 = K \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

É possível mostrar que a máxima taxa de variação de tensão (MTV), em V/s é:

$$MTV = 2\pi fK \quad (4)$$

Para evitar distorção na saída, a taxa de variação também deve ser menor do que a taxa de subida. Ou seja:

$$2\pi fK \leq SR \quad (5)$$

$$\omega K \leq SR \quad (6)$$

de maneira que:

$$f \leq \frac{SR}{2\pi K} \text{ Hz} \quad (7)$$

$$\omega \leq \frac{SR}{K} \text{ rad/s} \quad (8)$$

Adicionalmente, a máxima frequência, f , na equação 7 também é limitada pela largura de banda de ganho unitário.

III. MATERIAIS UTILIZADOS

- Gerador de Tensão DC Instrutherm FA - 3030;
- Gerador de funções ICEL GV - 2002;
- Osciloscópio Minipa MO - 1262;
- Protoboard;
- Resistores de $10\Omega(1)$, $100\Omega(1)$, $1k\Omega(3)$, $2k\Omega(2)$, $100k\Omega(2)$ e $1M\Omega(2)$;
- Ampop 741(1).
- Ampop LF351(1).

IV. PARTE EXPERIMENTAL

Nesta experiência iremos medir os parâmetros do ampop que podem prejudicar o desempenho dos circuitos em alta frequência: Produto Ganho-Largura de Banda GBP (também denominado GBW) e *slew rate* (SR).

A. Curva de resposta em frequência

O amplificador mantém o ganho de tensão determinado pelos resistores de realimentação até a frequência denominada “frequência de corte”. Acima desta frequência, o ganho diminui com o aumento da frequência, pois o circuito começa a sofrer influência do ampop.

Na região plana da resposta em frequência, frequência menor que a frequência de corte, o ganho de tensão permanece praticamente constante; não variando com a frequência. Acima da frequência de corte, o ganho diminui com o aumento da frequência. O ganho diminui dez vezes a cada aumento em dez vezes na frequência, ou seja, atenua $20dB$ por década. Portanto, na região de atenuação, a curva de resposta em frequência tem uma inclinação de $-20dB/DÉCADA$.

Na frequência de corte, o ganho de tensão está atenuada $3dB$ em relação ao ganho na região plana, o ganho é $0,707A_O$. Por exemplo, se o ganho de tensão é 100 ($40dB$), na frequência de corte o ganho será $70,7$ ($37dB$). Esta frequência determina a “banda passante” BW (*bandwidth*) do amplificador, uma vez que o amplificador responde desde corrente contínua ($0Hz$).

A banda passante, *bandwidth*, dos amplificadores não-inversor, inversor e diferencial, é determinada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} BW &= B.GBP \\ BW &= (1 + A_O.B)f_C \\ B &= \frac{e_-}{V_O} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \end{aligned}$$

Onde A_O é o ganho de tensão e f_C é a frequência de corte do ampop em malha aberta (*open loop gain*), B é o ganho da malha de realimentação.

Como $A_V = 1/B$ no amplificador não-inversor, ou $A_V = 1 - 1/B$ no amplificador inversor, significa que quanto maior o ganho do amplificador, menor será a resposta em frequência.

Esta frequência é conhecida também como “resposta à meia potência”. Na frequência de corte a potência fornecida pelo ampop, $P_{ocut-off}$, é metade da potência que o ampop fornece na região plana P_{omid} .

$$\begin{aligned} P_{omid} &= \frac{V_{omid}^2}{R_L} \\ P_{ocut-off} &= \frac{(0,707V_{omid})^2}{R_L} \\ &= \frac{1}{2} \frac{V_{omid}^2}{R_L} = \frac{1}{2} P_{omid} \end{aligned}$$

B. Distorção

Para realização deste ensaio, é importante evitar distorção do sinal de saída provocado pela saturação e pelo *slew rate* do ampop. Para isso:

$$\begin{aligned} V_{opico} &< V_{sat} \\ V_{opico} &< \frac{SR}{2\pi f} \end{aligned}$$

Mas como $V_o = A_v \cdot V_i$, e como desejamos levar a frequência até o limite da banda passante $BW = B.GBP$:

$$V_{ip} < \frac{V_{sat}}{A_v}$$

$$V_{ip} < \frac{SR}{2\pi.GBP}$$

Para o 741 cujo $SR = 0.5V/\mu S$ e $GPB = 1MHz$, $V_i < 79.5mV$ de pico ($159mV_{pp}$)

PRIMEIRO PASSO - Montar o circuito conforme o diagrama esquemático da figura 2.

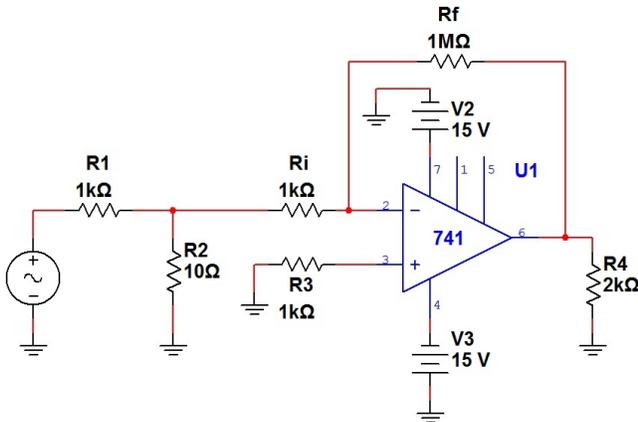


Figura 2. Esquema: Distorção.

Uma vez que o sinal de entrada, V_i , é muito pequeno e muito difícil de ser ajustado pelo gerador de funções, utilizaremos um atenuador de $40dB$ constituído de um divisor resistivo de $R1/(R1 + R2) = 1/101$.

Este amplificador inversor apresenta um ganho de tensão de:

$$A_v = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{1M\Omega}{1k\Omega} = -1000$$

O ganho da malha de realimentação $B = e_-/V_o$ é:

$$B = \frac{e_-}{V_o} = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1}{1001}$$

A banda passante deste amplificador será, então:

$$BW = B.GBP = \frac{1MHz}{1001} \cong 1kHz$$

O sinal de saída é uma senoidal invertida em relação ao sinal de entrada.

Ajustes iniciais:

- Osciloscópio:
CH1=10mV/DIV; DC; POS. CENTRAL
CH2=5V/DIV; DC; POS. CENTRAL
BASE DE TEMPO=2ms/DIV
TRIGGER=CH1; NORMAL; SLOPE+
- Gerador de funções:
SENO; $\cong 2V_{pp}$; $100Hz \Rightarrow V_i \cong 20mV_{pp}$.
- Ajustar a amplitude de $V_i = 20mV_{pp}$. Se não for possível medir $20mV$ com seu osciloscópio, medir a

tensão diretamente na saída do Gerador de Funções; este sinal deverá ser ajustado em $2V_{pp}$ (2 divisões pico-a-pico na escala de V/DIV ou 4 divisões pico-a-pico na escala de 0,5V/DIV).

- Ajustar a frequência em $100Hz$. O período $T = 10ms$ deverá ocupar 5 divisões horizontais na BASE DE TEMPO=2ms/DIV, ou seja, deverá aparecer dois ciclos completos na tela do osciloscópio.
- Medir a tensão de saída do ampop, V_o , e calcular o ganho A_v . Provavelmente $V_o = 20V_{pp}$.
- Para facilitar a execução da experiência, a frequência será alterada na sequência 1 – 2 – 4. Primeiro ajuste a BASE DE TEMPO conforme indicado na tabela. Em seguida ajuste a nova frequência; um período completo deverá ocupar as mesmas 5 divisões horizontais da etapa anterior.
- Ajustar o V/DIV de CH2, de acordo com a tensão, para obter uma leitura mais precisa.
- Desloque o sinal CH2 verticalmente e horizontalmente para medir a amplitude pico-a-pico.

f	s/DIV	V_{ipp}	V_{opp}	A_v	$A_v [db]$
100	2m	20mV			
200	1m	"			
400	0,5m	"			
1k	0,2m	"			
2k	0,1m	"			
4k	50μ	"			
10k	20μ	100mV			
20k	10μ	"			
40k	5μ	"			
100k	2μ	"			

Tabela I
Resultados do primeiro passo.

SEGUNDO PASSO - $A_v = -100$ ($40dB$)

- Diminuir a amplitude do sinal de entrada para $0V$.
- Desligar a alimentação.
- Substituir $R_f = 100k\Omega$.
- Ligar a alimentação.

f	s/DIV	V_{opp}	A_v	$A_v [db]$	FASE
100	2m				
200	1m				
400	0,5m				
1k	0,2m				
2k	0,1m				
4k	50μ				
10k	20μ				
20k	10μ				
40k	5μ				
100k	2μ				

Tabela II
Resultados do segundo passo.

Com a diminuição do ganho a largura de banda aumenta na

mesma proporção. Para $R_i = 1k\Omega$ e $R_f = 100k\Omega$:

$$A_v = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{100k\Omega}{1k\Omega} = -100$$

$$B = \frac{e_-}{V_O} = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1}{101}$$

$$BW = B.GBP = \frac{1MHz}{101} \cong 10kHz$$

Obs: 1) A medição da fase é um processo muito trabalhoso; 2) Um medidor de frequência (multímetro que meça frequência, um scopemeter ou tekmeteter e um osciloscópio digital com mais recursos) tornaria esta experiência mais rápida e precisa.

Não desmonte este circuito.

TERCEIRO PASSO - Diagrama de Bode.

- Transfira os resultados obtidos para um gráfico monolog. A curva de resposta em frequência do amplificador $A_V = -1000$ em vermelho, e do amplificador $A_V = -100$, em azul. Lembre-se: frequência no eixo X (escala logarítmica) e ganho (em dB) no eixo Y (escala linear).

Para o amplificador $A_V = -1000$, você deverá estar observando duas retas. (ASSÍNTOTAS). Uma horizontal em $60dB$, e outra com inclinação de $-20dB/década$. A interseção destas duas assíntotas ocorrerá exatamente na frequência de corte, aproximadamente $1kHz$.

Na região de atenuação, reta inclinada, o produto entre o ganho e a frequência é constante e igual ao GBP do ampop.

Para o amplificador $A_V = -100$, a banda passante é maior ($10kHz$). Observe, no entanto, que após a frequência de corte, a curva acompanha a curva do amplificador anterior.

A parte inclinada da curva é determinada pelo ampop. Se trocarmos o ampop, LF351 por exemplo, esta curva estaria deslocada para a direita, uma vez que o GBP do LF351 é $4MHz$, contra $1MHz$ do 741.

Observe ainda que:

$$\text{Log}\left(AB \cdot \frac{1}{B}\right) = \text{Log}(AB) + \text{Log}\left(\frac{1}{B}\right) = \text{Log}(A)$$

C. Bandwidth (BW)

Muitas vezes nos interessa determinar apenas a largura de faixa BW . Se este for o caso, não será necessário levantar toda curva de resposta em frequência do amplificador.

PRIMEIRO PASSO - $A_V = -100$:

- Ajustar a frequência do GF em $100Hz$ e a amplitude até obter $14V_{pp}$ na saída, (7 divisões pico-a-pico através de $CH2=2V/DIV$, ajuste a posição vertical POS VERT um pouco para baixo). Medir V_{ipp} através de CH1 (deve ser próximo de $140mV$) comprovando que o ganho de tensão é 100.

$$V_{ipp} = \text{_____}mV$$

$$A_v = V_O/V_i = \text{_____}$$

$$A_v[dB] = 20\log|A_v| = \text{_____}dB$$

- Aumentar a frequência para aproximadamente $10kHz$. Próximo desta frequência, a amplitude do sinal de saída começa diminuir com o aumento da frequência. Ajustar a frequência até a amplitude do sinal de saída ocupar 5 divisões pico-a-pico. Medir a frequência nesta condição. Deve estar próximo de $10kHz$. Verifique se não existe nenhuma distorção na onda senoidal.

Para medir a frequência através do osciloscópio, você deverá ajustar a base de tempo até observar um ciclo inteiro na tela.

$$f_c = BW = \text{_____}kHz$$

O produto entre o ganho e a largura de banda deverá ser $\approx 1MHz$.

$$GBP = BW/B = \text{_____}MHz$$

SEGUNDO PASSO - Mudar $R_f = 10k\Omega$:

Para este valor de resistência teremos:

$$A_v = \frac{R_f}{R_i} = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega} = -10$$

$$B = 1/11$$

$$BW = 90,9kHz$$

- Ajustar o sinal de entrada para $V_i \cong 140mV_{pp}$ na frequência de $100Hz$. Ajustar a amplitude do sinal até obter exatamente $1,4V_{pp}$ na tensão de saída (7 DIV pico-a-pico com $CH2=0,2V/DIV$). Medir V_{ipp} e calcular o ganho de tensão.

$$V_{ipp} = \text{_____}mV$$

$$A_v = V_O/V_i = \text{_____}$$

$$A_v[dB] = 20\log|A_v| = \text{_____}dB$$

- Aumentar a frequência até a amplitude cair para 5 DIV pico-a-pico e medir a frequência.

$$f_c = BW = \text{_____}kHz$$

- Calcular o produto ganho banda.

$$GBP = BW/B = \text{_____}MHz$$

Este valor deve ser igual ao valor encontrado no item anterior. A pequena diferença se deve à imprecisão nas leituras.

D. Slew Rate

A tensão de saída não consegue variar mais rápido que a taxa denominada *slew rate*.

Por exemplo, para uma onda quadrada, a tensão de saída do 741 cujo *Slew Rate* é $0,5V/\mu S$, pode levar até $1\mu S$ para variar $0,5V$.

Através de regra de três simples, o 741 levará $40\mu s$ para variar de $-10V$ até $+10V$.

Uma onda retangular sofrerá, sempre, uma distorção por *slew rate*.

Para uma onda senoidal, no entanto, ocorrerá distorção somente se o produto amplitude-frequência ultrapassar o limite. Não haverá distorção se:

$$2\pi f \cdot V_{opico} \leq SR$$

Obs.: Esta equação determina a máxima frequência de operação sem distorção com o ampop fornecendo a máxima amplitude de 10V de pico (*power bandwidth*) e deve ser observada no levantamento da resposta em frequência do circuito, onde é importante manter a onda perfeitamente senoidal sem distorções.

PRIMEIRO PASSO - Montar o circuito de teste conforme o diagrama esquemático da figura 3.

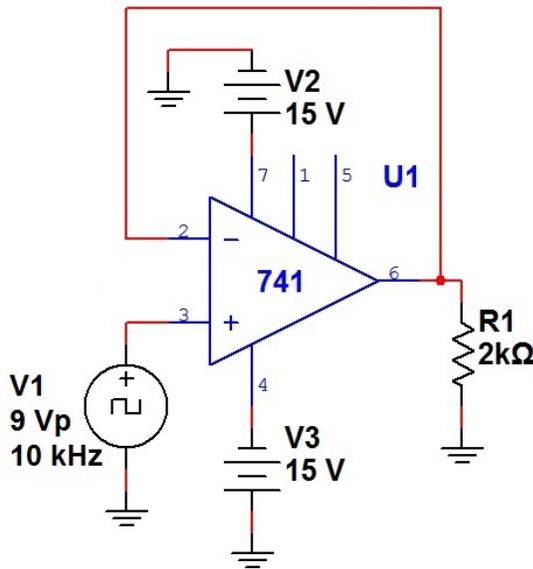


Figura 3. Esquema: *slew rate*.

SEGUNDO PASSO - Ajustes:

- Osciloscópio: CH1=5V/DIV, DC, POS. CENTRAL
CH2=5V/DIV, DC, POS. CENTRAL
BASE DE TEMPO=20μs/DIV
TRIGGER=CH1, AUTO, SLOPE+
- Gerador de funções: QUADRADO, 10kHz, 9Vp (18Vpp)

TERCEIRO PASSO - Medir $\Delta V/\Delta t$.

Se estiver difícil medir Δt , expandir a base de tempo para 10μs/DIV. Sugestão: medir ΔV correspondente à $\Delta t = 10\mu s$ (1 DIV). Faça o deslocamento horizontal para trabalhar com a graticula central.

$$\begin{aligned} \Delta V &= \text{_____} V \\ \Delta t &= \text{_____} \mu s \\ SR &= \text{_____} V/\mu s \end{aligned}$$

QUARTO PASSO - Mudar o sinal para SENOIDAL, 9Vp, 20kHz.

QUINTO PASSO - Diminuir a frequência até não existir mais a distorção. Medir esta frequência conhecida como *power bandwidth*.

$$Power\ Bandwidth = \text{_____} kHz$$

$$f \leq \frac{SR_{medido}}{2\pi V_{OP}} \quad V_{OP} = 9V$$

Para operar em frequência maior, devemos diminuir a amplitude.

E. Ampop mais rápido

Para operar em frequências maiores dispomos de ampops mais rápidos como o LM318 ($SR = 70V/\mu s$) porém muito mais caro.

Outros ampops de uso geral, compatível pino-a-pino com o 741, que apresentam maior *slew rate* e *GBP* são o LF351 ($SR = 10V/\mu s$ e $GBP = 4MHz$) e o CA3140 ($SR = 9V/\mu s$ e $GBP = 4MHz$).

F. Ampop não compensado internamente

Se o problema for resposta em frequência em amplificadores podemos escolher ampops não compensados internamente como o 748 (irmão gêmeo do 741) ou até mesmo o LM301 (de maior precisão e um pouco mais caro). Para cada valor de ganho a largura de banda pode ser otimizada através de resistores e capacitores a ser instalados nos terminais COMP (*phase compensation*). Basta seguir as recomendações apresentadas na folha de dados fornecida do fabricante.

Se utilizarmos estes ampops como amplificador (com realimentação negativa) e sem o circuito externo de compensação de fase, este circuito certamente oscilará. Substitua o 741 de qualquer circuito anterior por 748 ou LM301.

Por outro lado, se utilizarmos estes ampops nos comparadores em malha aberta ou com realimentação positiva (nos *Schmitt trigger*) teremos comutações muito mais rápidas (40V/μs).

Este elevadíssimo *slew rate* não é disponível em amplificadores de ganho baixo. Quanto menor for o ganho, maior deverá ser a compensação, comprometendo o *slew rate*.

REFERÊNCIAS

- [1] Sedra, Adel S.; Smith, Kenneth C. "Microeletrônica", 5ª Edição. Editora Pearson Prentice Hall, RJ - 2007.
- [2] Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis. "Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos", 8ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.