

Amplificadores operacionais são largamente usados na eletrônica analógica. Esta aula trata das principais aplicações destes amplificadores. Tal vez você não consiga fazer todas as experiências sugeridas. Faça aquelas que você julgar mais interessantes. Anote as observações no seu caderno. Não é preciso fazer um relatório.

Tarefas sugeridas:

1) Monte um amplificador de ganho variável usando um resistor de retro-alimentação negativa de $12\text{k}\Omega$ e um resistor de $1\text{k}\Omega$ em série com um resistor variável $0 - 10\text{k}\Omega$ na entrada. Acople um sinal do gerador de funções de baixa frequência ($200\text{Hz} - 1\text{kHz}$) e observe o sinal da saída do amplificador no osciloscópio. Varie o valor do resistor variável e observe a amplitude do sinal da saída.

2) Monte um somador de potenciais (todos os resistores de $12\text{k}\Omega$). Ligue uma fonte CC variável feita de um potenciômetro de $10\text{k}\Omega$ entre $+15\text{V}$ e -15V numa das entradas e um gerador de funções na outra. Observe o sinal da saída no osciloscópio variando o potenciômetro.

3) (Experiência altamente recomendável!) Ligue os sinais de dois geradores de funções nas entradas do somador e observe o sinal de saída quando as frequências dos geradores são próximas. Acople ainda um amplificador com alto-falante na saída.

4) Os amperímetros do nosso laboratório estão longe de ser ideais. Use um ohmímetro e meça a resistência interna de um amperímetro com fundo de escala de 2mA . Depois use um amplificador operacional para construir um amperímetro com resistência interna praticamente nula. Use um resistor de $1\text{k}\Omega$ na retroalimentação inversa para facilitar a leitura do instrumento (1 Volt na saída do amplificador corresponde a 1 miliampère). Meça a resistência de um termopar feito de um arame de cobre e um de constantan. Meça a voltagem gerada pelo termopar quando posto na chama de uma vela. Depois meça a corrente gerada com o miliamperímetro do multímetro com fundo de escala de 2mA . Por que o valor encontrado não corresponde à expectativa? Depois meça a amperagem do termopar com o amperímetro construído com amplificador operacional. Qual problema você encontra com o amperímetro construído?

5) Monte um integrador e observe os sinais integrados de voltagens induzidas em bobinas. Observe também integrais de funções geradas no gerador de funções. (pode ficar para a próxima aula)

6) Invente um circuito que calcule a derivada temporal de um sinal elétrico. Monte o circuito e experimente.

7) Monte um Schmitt trigger e determine a relação entre voltagem de entrada e saída do mesmo. Use o método de Lissajous para gerar a histerese na tela do osciloscópio.

Anexo

Vimos como usar transistores para construir um amplificador de sinais alternados (oscilações). Amplificadores, que também podem ser usados para voltagens constantes (CC), são bem mais difíceis de ser construídos. Mas isto é possível e os engenheiros de eletrônica desenvolveram um tipo muito especial de amplificador para sinais CC que recebeu o nome de Amplificador Operacional. A figura 1 mostra um circuito de um dos mais usados exemplares, o LM741. Não tente entender o circuito! Ele está aqui somente para impressionar! Toda esta complicação se encontra encapsulada num minúsculo invólucro (fig.2) e pode ser comprado por menos de um Real. Aqui vamos, excepcionalmente, adotar a atitude abominável de um consumista que não quer saber

como funcionam as coisas por dentro. Estaremos interessados apenas nos comportamentos destes amplificadores.

Como qualquer amplificador, os amplificadores precisam ser alimentados com uma fonte de energia. Os LM741 que usaremos nas nossas experiências são tipicamente alimentados com uma fonte de 30 V. Mas não é simplesmente uma fonte de 30 V. São duas fontes de 15V em série¹. A diferença entre 2x 15 e 30 é a possibilidade de poder fornecer um potencial fixo no meio. Vamos declarar este potencial como 0 e os sinais de saída podem variar entre -15V e +15V. As voltagens -15V e +15V são aplicadas nos pinos 4 e 7 respectivamente (compare a figura 2 com a numeração dos pinos). A figura 3 mostra a alimentação. Como a necessidade de alimentação é um fato conhecido, geralmente ninguém desenha estas linhas de alimentação num esquema de circuito. Eles são subentendidos (mas não podem ser esquecidos numa montagem real). O amplificador é representado nos circuitos com um símbolo triangular.

Fig. 1 Esquema do circuito integrado LM741.

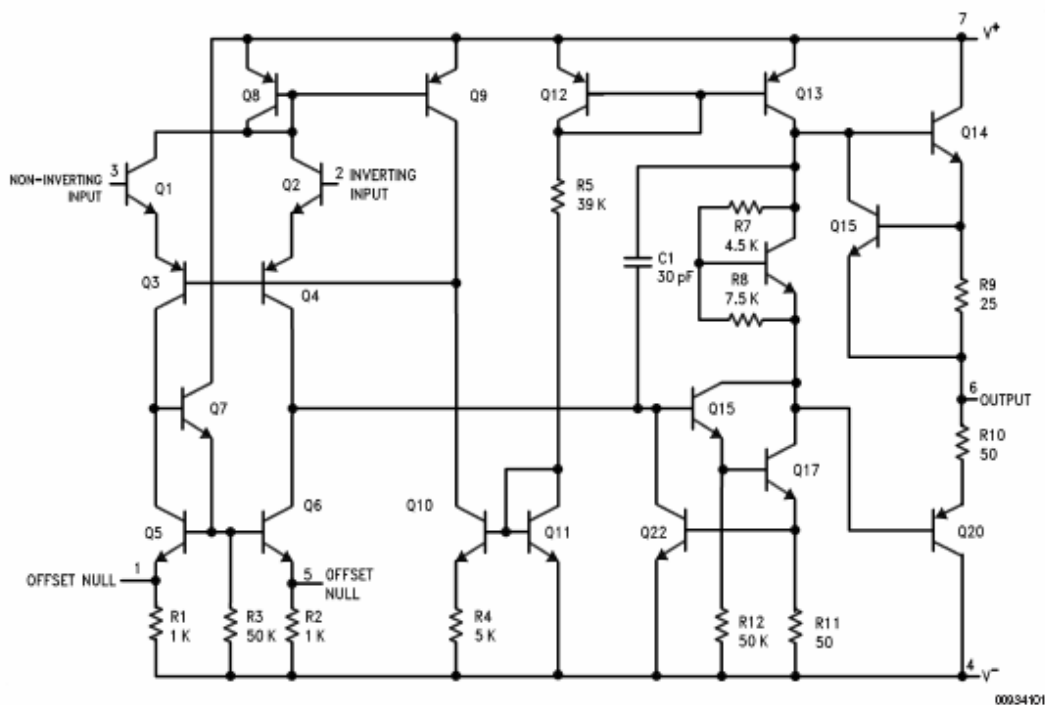
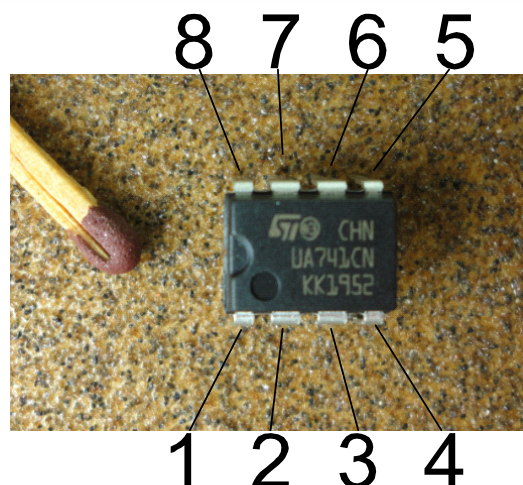


Fig. 2 Fotografia de um LM741 ao lado de um palito de fósforo. Os pinos são numerados de 1 a 8 começando na marca circular e percorrendo o chip no sentido anti-horário.



¹ Os LM741 podem ser alimentados também com 2x 9V. O aluno que queira brincar com amplificadores operacionais em casa e que não tem uma fonte de 2x15V pode usar duas baterias de 9V. A mesma loja que vende o LM741 vende também conectores para baterias de 9V.

Os amplificadores operacionais possuem duas entradas marcadas com os símbolos menos e mais e uma saída (na ponta do triângulo). A entrada com o símbolo menos (pino 2) é chamada entrada inversora, e a com o símbolo mais (pino 3) é chamada de entrada direta.

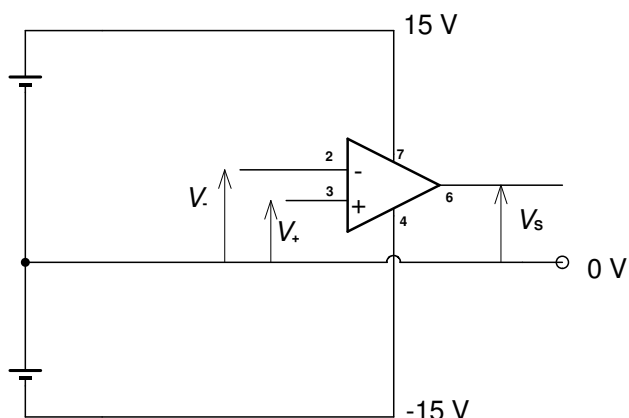


Fig. 3

Amplificador operacional com alimentação de $2 \times 15V$. Os potenciais das entradas e da saída são definidos em relação ao ponto intermediário das duas fontes.

Na figura as entradas e a saída não estão ligadas a nada, mas na verdade o desenho não está completo. No uso real do circuito haveria mais elementos ligados. A figura 3 serve, em primeiro lugar, para mostrar a alimentação (que não mostraremos nos futuros esquemas de circuito) e para definir os potenciais V_- , V_+ das

entradas e o potencial V_s da saída.

O funcionamento do amplificador pode ser entendido com as seguintes propriedades idealizadas:

- 1) O potencial da saída depende somente da diferença dos potenciais das entradas e esta dependência é linear:

$$V_s = (V_+ - V_-) \alpha \quad (1.1)$$

- 2) As entradas têm uma resistência interna infinita.
- 3) A saída tem uma resistência interna nula.
- 4) O fator de proporcionalidade α vale infinito.

Nos circuitos reais, a condição 1 encontra limitações. Naturalmente V_s tem que ficar dentro do intervalo $[-15V, +15V]$. Consequentemente, a relação (1.1) tem que perder sua validade para valores de $(V_+ - V_-)$ fora da faixa $[-15V \times \alpha^{-1}, +15V \times \alpha^{-1}]$. Além disso, existe uma limitação temporal. Quando se estabelece repentinamente um novo valor de $(V_+ - V_-)$, o valor correspondente de V_s se estabelecerá com um pequeno atraso. No momento vamos ignorar este fato.

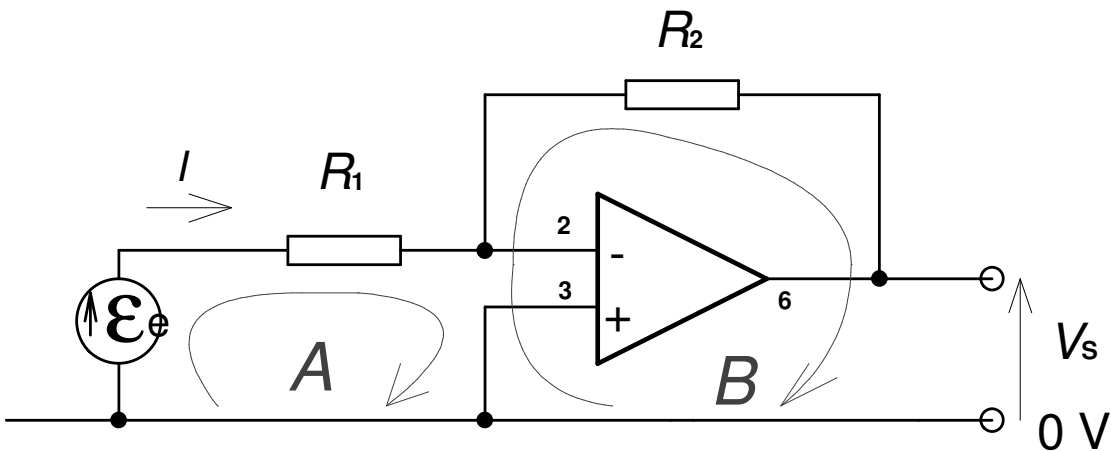
A condição 2 significa que o amplificador operacional funciona como um voltímetro ideal. Ele mede a diferença de potencial entre as duas entradas sem absorver corrente nestas entradas. Claro que um amplificador real não terá uma resistência de entrada infinita. Os nossos amplificadores têm tipicamente alguns $M\Omega$ de resistência nas entradas. Existem outros amplificadores operacionais com resistências ordens de grandeza maiores.

A condição 3 significa que o amplificador na saída pode ser considerado uma fonte ideal de voltagem. Naturalmente os amplificadores reais não cumprem esta condição perfeitamente.

A condição 4 parece totalmente louca. Que aplicação útil pode existir para um amplificador que amplifica infinitamente? Novamente, os amplificadores reais não cumprem esta condição. α é grande, mas não é infinito. Os nossos amplificadores têm α na ordem de 10^5 .

Veremos agora como um fator α enorme, quase que infinitamente grande, pode ser útil. Considere o circuito da figura 4. Neste circuito os fios de alimentação (pinos 4 e 7) são subentendidos e não mostrados para manter o esquema mais claro.

Fig. 4 Amplificador com retroalimentação negativa.



Uma fonte de tensão de força eletromotriz \mathcal{E}_e está ligada na entrada inversora através de um resistor R_1 . A entrada direta está simplesmente aterrada. O importante neste circuito é uma ligação entre saída e entrada inversora com um resistor R_2 . Veremos o que o valor enorme de α causa neste circuito. Imagine que o potencial na entrada inversora (pino 2) esteja um pouquinho acima do valor zero. Com a equação (1.1) concluímos que o potencial na saída iria despencar para $-\infty$ ou para um valor grande, negativo. Mas, devido ao resistor R_2 , isto iria puxar o potencial do pino 2 para baixo. Até onde se puxaria este potencial? Bem, vamos supor que ele foi puxado um pouquinho abaixo do nível zero (potencial do pino 3). Neste caso o fator enorme de amplificação iria mandar o potencial da saída para valores muito elevados positivos e isto puxaria o pino 2 para cima. Concluímos que o truque de ligar a saída na entrada inversora através de um resistor resulta num controle do potencial do pino 2. Este potencial não pode sair do potencial zero. Qualquer desvio é prontamente corrigido.

Este tipo de controle devido a uma retroalimentação negativa é muito freqüente nos seres vivos e em processos industriais. Imagine um motorista de carro numa estrada reta. Quando o motorista nota que o carro desvia um pouquinho para um lado ele logo corrige isto girando o volante para a direção contrária. Resulta uma trajetória do carro praticamente reta e o volante praticamente não sai da direção neutra. Mas, se parafusássemos o volante na direção neutra, o carro iria bater rapidamente na lateral da estrada. A situação no caso do circuito da figura 4 é muito parecida. A diferença de potencial entre os pinos 2 e 3 é praticamente sempre zero como se tivéssemos posto um arame de cobre entre estes pinos. Mas, se puséssemos um arame de cobre de verdade, o

circuito deixaria de funcionar. Os engenheiros de eletrônica falam que existe no circuito da figura 4 “um curto circuito *virtual* entre os pinos 2 e 3”.

Com o curto circuito virtual entre entrada inversora e direta podemos formar duas *malhas virtuais* para a análise do circuito. A primeira malha (indicada como A) começa no fio terra, atravessa a força eletromotriz \mathcal{E}_e , depois o resistor R_1 e finalmente retorna ao fio terra através do curto circuito virtual entre os pinos 2 e 3. A segunda malha (B) começa na terra, atravessa o curto circuito virtual, o resistor R_2 e retorna à terra atravessando a força eletromotriz que corresponde à saída do amplificador. Na malha A definimos uma corrente I indicada na figura. Com ela podemos escrever a lei das malhas:

$$A: \quad -\mathcal{E}_e + R_1 I = 0 \quad (1.2)$$

Na frente da entrada inversora temos um nó onde a corrente I pode se dividir. Mas, como a entrada do amplificador operacional tem supostamente uma resistência infinita, toda a corrente I tem que seguir para cima e atravessar o resistor R_2 . Desta forma a lei das malhas da malha B é:

$$B: \quad +V_s + R_2 I = 0 \quad (1.3)$$

Repare que a força eletromotriz que representa a saída do amplificador entra com o sinal trocado porque atravessamos esta força eletromotriz em sentido contrário. Resolvendo este sistema de equações obtemos:

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} \mathcal{E}_e \quad (1.4)$$

Como podemos ver, conseguimos um fator de proporcionalidade finito e bem controlável entre voltagem de entrada e saída usando este “amplificador louco”, que amplifica infinitamente. O sinal menos não é nenhum problema. Na maioria das aplicações este fator -1 não incomoda e, caso ele incomode, podemos usar um segundo circuito deste mesmo tipo que introduz outro fator -1 compensando o primeiro.

Amplificador com ganho variável

Nas tarefas sugerimos montar um amplificador com ganho variável. A figura 5 mostra o esquema. O gerador de funções deve ser usado como força eletromotriz \mathcal{E}_e e as voltagens de entrada e saída devem ser observadas com os dois canais C1 e C2 do osciloscópio, como indicado na figura. A alimentação do amplificador não está mostrada e nada precisa ser montado para providenciar esta alimentação. O cabo preto que vem da fonte e entra na placa de circuito já trás os três fios -15 V, 0V e +15 V.

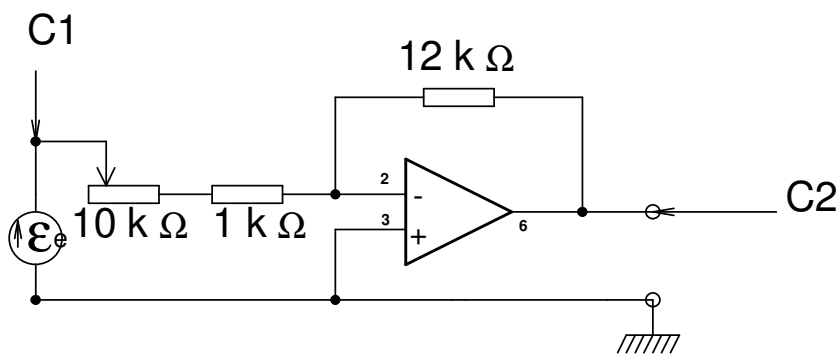


Fig. 5 Amplificador com ganho variável.

Amplificador que não inverte os sinais

Tarefa de casa: faça a análise de circuito da figura 6

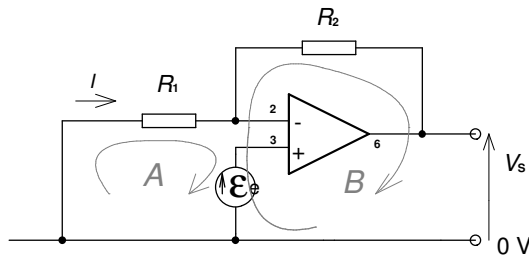


Fig. 6 Amplificador sem inversão.

Somador de potenciais

Somar duas voltagens não parece ser uma tarefa difícil. Botando duas pilhas de 1,5 V em série obtemos uma fonte de 3V. Mas, na maioria dos casos na eletrônica, temos voltagens definidas a um mesmo nível de potencial. Nestes casos não existe a possibilidade de colocá-las em série. Então a tarefa verdadeiramente difícil é somar potenciais. Isto é, fazer a transformação indicada na figura 7:

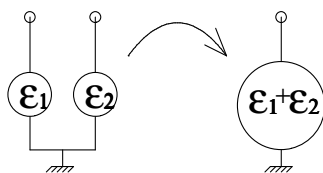


Fig. 7 Tarefa de somar dois potenciais.

Os amplificadores operacionais permitem fazer esta operação. A idéia é simples: a regra dos nós nos permite somar correntes. A malha A do circuito da figura 4 transforma uma voltagem numa corrente com a ajuda da lei de Ohm. A malha B transforma de novo esta corrente numa voltagem. Podemos resolver a tarefa de somar potenciais colocando várias malhas A no circuito. A figura 8 mostra um caso com dois potenciais:

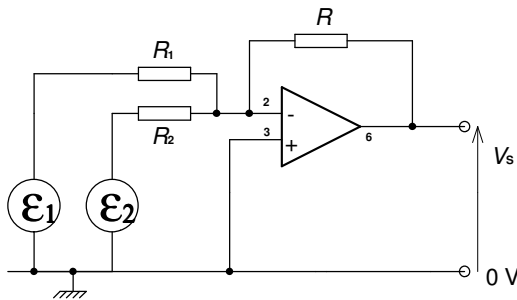


Fig. 8 Somador

Tarefa: Faça a análise de circuito da figura 8 e mostre que o potencial de saída vale

$$V_s = -\frac{R}{R_1}\epsilon_1 - \frac{R}{R_2}\epsilon_2 \quad (1.5)$$

Escolhendo todos os resistores iguais obtemos, fora de um sinal negativo, a soma desejada. De novo o sinal negativo pode ser corrigido colocando mais um amplificador na saída do somador. Sugerimos que você monte um somador e use como FEM 1 um divisor de voltagem e como FEM 2 um gerador de funções, como indicado na figura 9. Você obtém as voltagens -15 V e +15 V, que alimentam o divisor de voltagem, na própria placa de circuito.

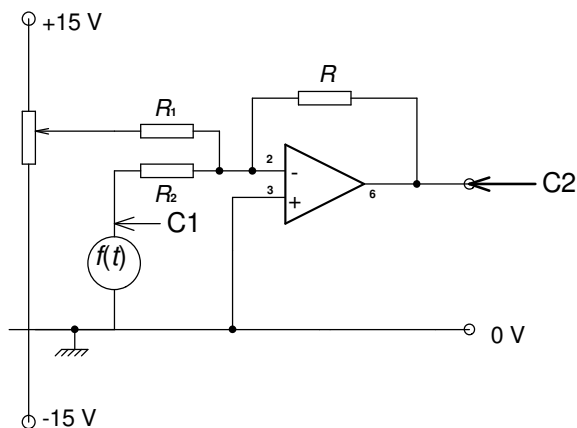


Fig. 9 Circuito para a tarefa 2.

A figura 10 mostra o circuito da tarefa 3. Monte primeiramente o circuito sem os elementos na caixinha pontilhada (alto-falante e transistor) e observe o sinal da saída do amplificador para frequências das duas oscilações quase iguais. Use sinais harmônicos na faixa de 1 kHz. Depois acople o alto-falante com transistor para poder ouvir o sinal da soma.

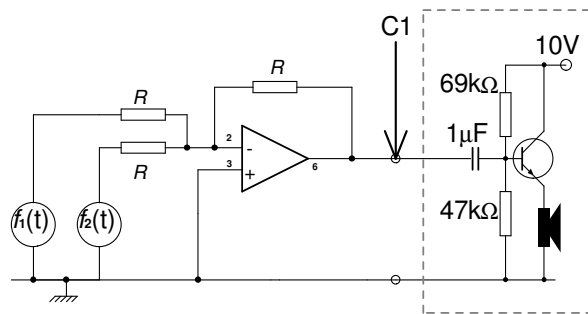
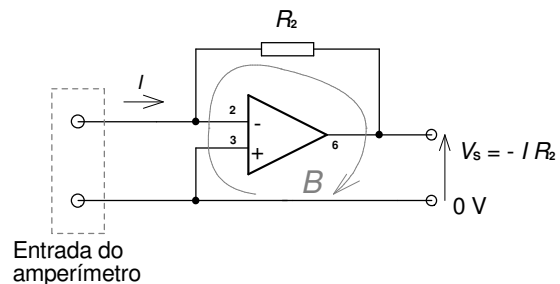


Fig. 10 Circuito da tarefa 3

Amperímetro

Na discussão do somador entendemos que a malha *B* da figura 4 converte uma corrente numa voltagem. Bem, qualquer resistor faz isto. Mas, se se usa a medida da tensão num resistor para medir uma corrente, tem-se o problema que o amperímetro resultante disso teria o valor do resistor como resistência interna. A grande vantagem do amplificador operacional é o potencial fixo na entrada inversora. A figura 11 mostra um amperímetro perto do ideal.

Fig. 11 Amperímetro.



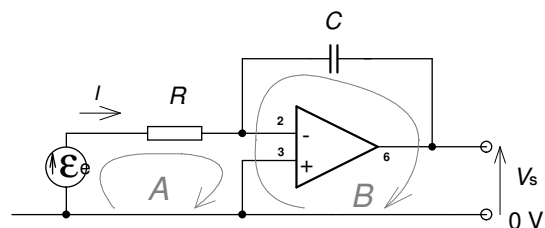
Integrador de Miller²

O efeito do curto circuito virtual entre os pinos 2 e 3 funciona também quando a retroalimentação negativa for feita com um capacitor. A figura 12 mostra um circuito que calcula a integral temporal de um sinal elétrico. Você deve fazer a análise de circuito da figura 12 e mostrar que a voltagem na saída é dada por

$$V_s(t) = const. - \frac{1}{RC} \int_0^t \mathcal{E}_e(t') dt' \quad (1.6)$$

Fig. 12 Integrador de Miller

A constante vale zero se descarregarmos o capacitor no instante $t = 0$. Este circuito é simples e resolve integrais, tarefa que às vezes pode ser complicada para o ser humano. No entanto, há um pequeno problema com este integrador. As duas



² John Milton Miller (1882 - 1962) Engenheiro americano

entradas do amplificador operacional constituem um voltímetro. Como qualquer medidor, este voltímetro possui pequenos erros. Para as aplicações discutidas anteriormente estes erros não causam grande distúrbio. Mas no integrador a situação é diferente. No lugar da equação teórica (1.6) teremos

$$V_s(t) = const. - \frac{1}{RC} \int_0^t (\mathcal{E}_e(t') + \mathcal{E}_{erro}) dt' \quad (1.7)$$

Mesmo que a voltagem de erro \mathcal{E}_{erro} seja pequena, a integral $\int \mathcal{E}_{erro} dt'$ pode chegar a valores consideráveis com o passar do tempo. Pode-se ligar um trimpot de $10\text{k}\Omega$ nos pinos 1 e 5 que permite compensar o erro para minimizar este efeito. No integrado LM741 o pino central deste trimpot deve ser ligado na voltagem negativa. Em outros modelos deve ser ligado na voltagem positiva. Infelizmente a voltagem de erro depende da temperatura e pode mudar. Desta forma o integrador funciona apenas por tempos limitados sem maiores erros. Existe uma possibilidade de combater estes erros de integração que funciona quando o sinal a ser integrado varia rapidamente no tempo. Pode-se ligar um resistor grande de dreno R_D , na ordem de alguns $\text{M}\Omega$, paralelo ao capacitor. Este resistor descarrega o capacitor lentamente e combate o carregamento causado pelo termo de erro. Isto causa uma imprecisão na integração, mas esta imprecisão será pequena para sinais que variam numa escala de tempo pequena em comparação com a constante de tempo $R_D C$.

Comentário sobre a idealização

Discutimos todos os circuitos usando as idealizações dos pontos 1 – 4. Desprezamos completamente o fator tempo nestas discussões. Para ver como questões temporais podem ter um significado importante, voltaremos para a analogia com o motorista na estrada reta. Vamos dar um pouco de bebida alcoólica para este motorista. Isto tornará suas reações mais lentas. Quando o carro desvia para a direita o motorista bêbado percebe isto tarde demais e correspondentemente faz uma correção grande para a esquerda. Em consequência disso o carro desvia para a esquerda. Esta reação também é percebida e corrigida tarde demais com uma correção relativamente grande. Seguindo desta forma o carro seguirá numa trajetória sinuosa. O volante não ficaria praticamente na posição neutra. Então uma reação lenta leva a oscilações. Este fenômeno é bem conhecido na teoria de controle. Estas oscilações podem ocorrer também em circuitos com amplificadores operacionais, violando a condição de curto circuito virtual. Neste primeiro contato com o assunto não trataremos da teoria destas oscilações e das contramedidas que podem ser tomadas para evitar este fenômeno. Para ver estes detalhes, recomendamos o livro P. Horowitz & W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge University Press (1980), Chapter 3.

O Schmitt³ Trigger

Na discussão do osciloscópio falamos do trigger. Este é um dispositivo que gera um sinal digital quando uma voltagem atravessa um determinado nível. Podemos construir um dispositivo deste tipo usando um amplificador operacional como mostra a figura 13.

³ Inventado por Otto Herbert Schmitt (1913 – 1998). Schmitt era inventor americano que além de inventar vários circuitos eletrônicos importantes contribuiu na biofísica. Ele é um dos fundadores da engenharia biomédica.

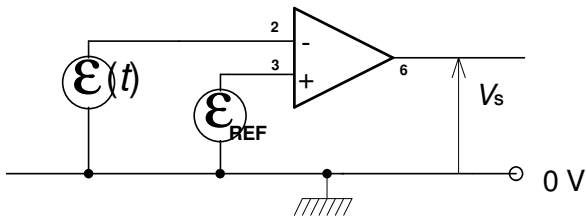


Fig. 13 Discriminador simples

Neste circuito não há retroalimentação. O sinal $\mathcal{E}(t)$, que deve ser julgado, está sendo comparado com uma voltagem fixa \mathcal{E}_{REF} . Portanto podemos chamar este

circuito de comparador. Quando $\mathcal{E}(t) > \mathcal{E}_{REF}$ a voltagem da saída fica em $-15V$. Para $\mathcal{E}(t) < \mathcal{E}_{REF}$ a saída passa a $+15V$, como mostra a figura 14.

Fig. 14 Resposta de um simples comparador.

Para sinais elétricos simples, como aquele da figura 14, o circuito da figura 13 poderia servir. Mas, no mundo real os sinais elétricos nem sempre têm uma forma tão simples. Geralmente há ruídos superpostos aos sinais. A figura 15 mostra qual seria a resposta do comparador para um sinal com ruído.

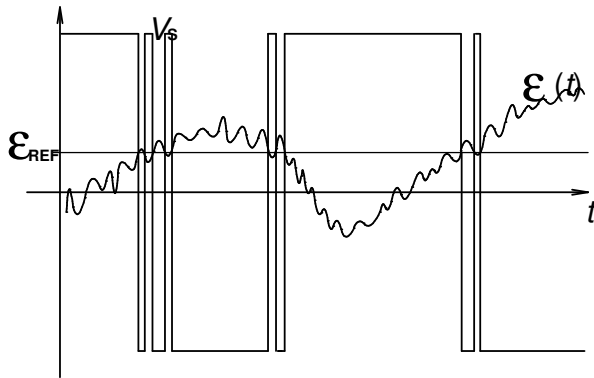
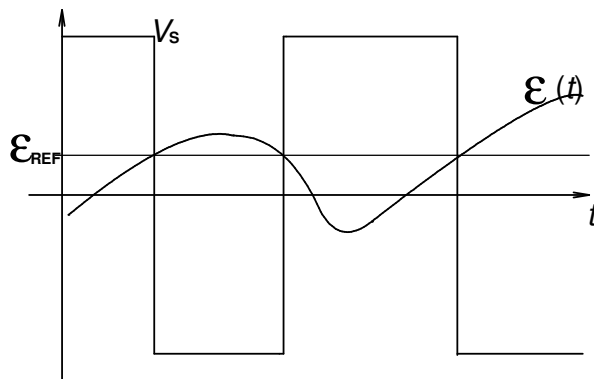


Fig. 15 Resposta do comparador na presença de ruído no sinal.

Estas rápidas idas e voltas da saída não são, na maioria das aplicações, desejáveis. O comportamento desejado deveria ser parecido com aquele da figura 14, como se o ruído não existisse. Otto Herbert Schmitt inventou uma maneira de eliminar os efeitos do ruído.

O trigger de Schmitt possui dois níveis de atuação. Um, $\mathcal{E}_+ = \mathcal{E}_{REF} + \epsilon$, ligeiramente maior que o nível de referência e o outro ligeiramente menor, $\mathcal{E}_- = \mathcal{E}_{REF} - \tilde{\epsilon}$. O dispositivo reage da seguinte maneira. Suponha que a saída se encontre no estado $+15V$. Este estado muda para $-15V$ somente quando $\mathcal{E}(t) > \mathcal{E}_+$. Uma vez que a saída está no estado de $-15V$, ocorre a mudança para $+15V$ somente quando $\mathcal{E}(t) < \mathcal{E}_-$. A figura 16 mostra qual seria a resposta de um Schmitt trigger com o sinal de entrada da figura 15.

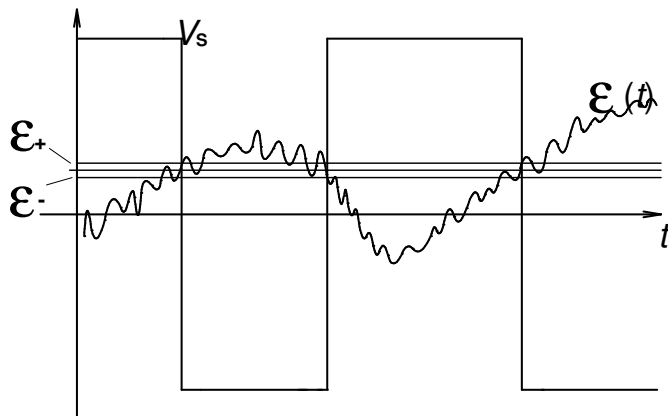


Fig. 16 Resposta de um Schmitt trigger com sinal ruidoso.

Enquanto o sinal $\epsilon(t)$ estiver entre os níveis ϵ_+ e ϵ_- , o valor da saída permanece no estado anterior. Daí vem o nome da curva que descreve a relação entre $\epsilon(t)$ e V_s . Ela se chama histerese do grego ὑστερέω = atrasar-se. A figura 17 mostra esta relação.

Fig. 17 Histerese de um Schmitt trigger.

A figura 18 mostra o esquema do dispositivo. Desta vez o amplificador é usado com uma retroalimentação positiva. Neste caso não há curto circuito virtual entre os pinos 2 e 3.

Para a tarefa 7 recomendamos de usar:
 $\epsilon_0 = 0$, $R_1 = 1\text{k}\Omega$,
 $R_2 = 12\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega$ (variável).

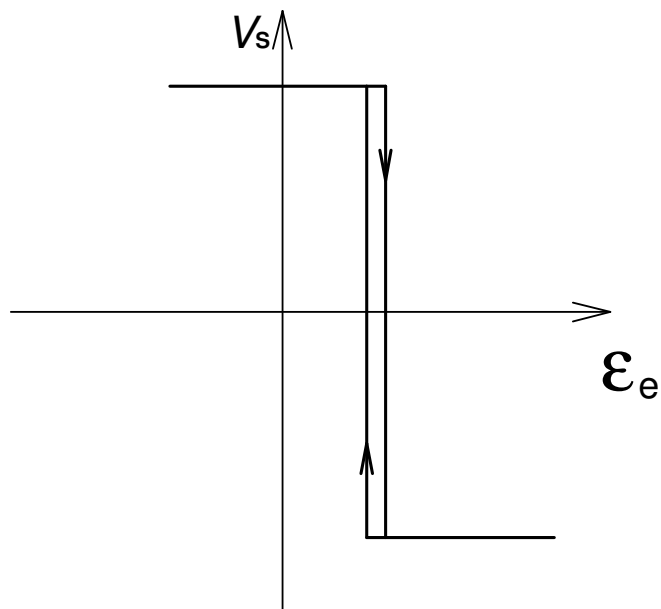
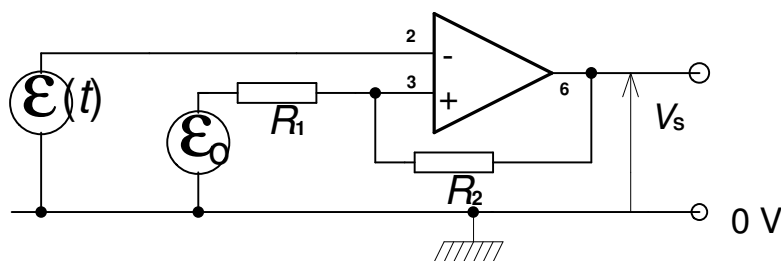


Fig. 18 Realização de um Schmitt trigger inversor com amplificador operacional.



Exercício: mostre que os dois níveis ϵ_+ e ϵ_- neste circuito

seriam

$$\epsilon_{\pm} = \epsilon_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \pm 15\text{V} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.8)$$

A curva da figura 17 é decrescente. Também se pode fazer um Schmitt trigger com uma histerese crescente. Basta inverter os papéis de $\epsilon(t)$ e ϵ_0 no circuito 18.