

Circuitos Eletrônicos

Projeto

**Introdução à Computação Analógica com
Amplificadores Operacionais**

Objetivo:

- Enfatizar o emprego das técnicas de análise de circuitos elétricos através da utilização de amplificadores operacionais como dispositivos úteis na simulação e implementação de elementos, tais como: amplificadores, somadores, integradores e inversores.
- Resolver equações diferenciais com coeficientes constantes, via computação analógica, empregando circuitos eletrônicos com amplificadores operacionais, com ênfase especial nas técnicas de escala de amplitude e de tempo.

Fundamentação

Um computador analógico eletrônico de uso geral desempenha um papel muito importante nas indústrias de engenharia atuais. Embora não seja tão popular quanto um computador digital por sua *precisão*, no entanto, devido à sua velocidade de computação, ele tem uma posição especial no campo da computação. De fato, os resultados teóricos implicam que a computação analógica pode escapar das limitações da computação digital. A computação analógica está retornando como uma importante alternativa de tecnologia de computação, notadamente para aplicações específicas, como automotiva, industrial, médica, eletrônica pessoal ou como um dispositivo de múltiplos empregos.

Neste projeto, será enfatizado a construção de um computador analógico genérico, usando amplificadores operacionais, resistores e capacitores, para resolver uma equação diferencial genérica de 1ª ordem para qualquer sinal de entrada. Vide as notas de aula e práticas de laboratório para uma breve descrição dos vários elementos de computação linear e não linear é fornecida. Neste projeto será ressaltado o amplificador integrador mostrado na Fig. 1.

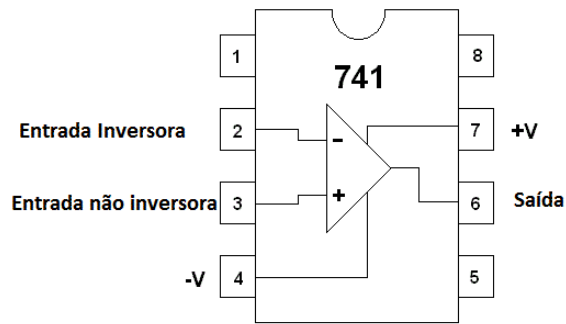


Figura 1 - Amplificador operacional $\mu A741$.

Amplificadores Integradores

A integração é a operação mais importante disponível no computador analógico. Na verdade, os computadores analógicos devem sua existência à capacidade de se integrar rapidamente. A integração é diferente de inversão e soma porque é dependente do tempo. O circuito elétrico para um integrador com uma entrada V_I é mostrado na Fig.2.

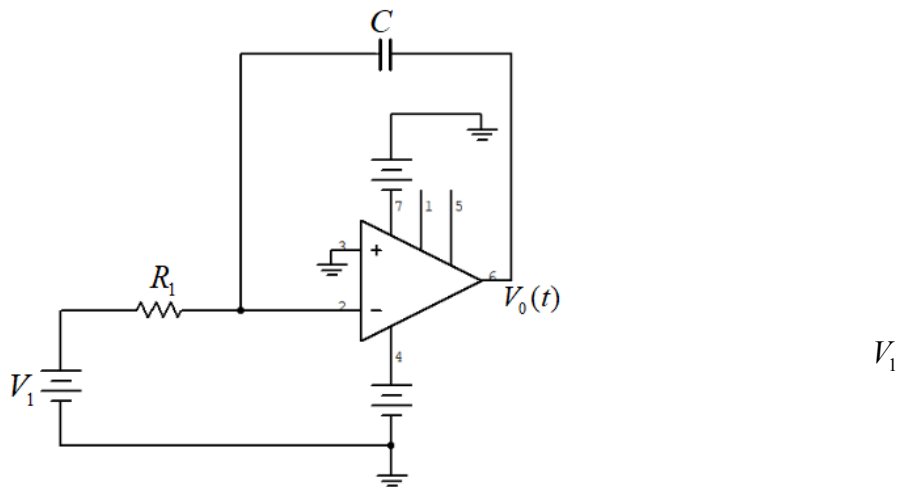


Figura 2 - Circuito elétrico para um amplificador integrador puro

A tensão de saída:

$$V_0(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t V_I(\tau) d\tau + V_0(0)$$

Considerando condição inicial nula, $V_0(0) = 0$ e fazendo $k_i = \frac{1}{R_1 C}$ obtêm-se:

$$V_0(t) = -k_i \int_0^t V_1(\tau) d\tau$$

O ganho do integrador é dado por k_i .

Nota: Há uma inversão de sinal na operação de integração como resultado da tensão negativa ganho do amplificador operacional.

Se for aplicado um degrau de tensão de amplitude V na entrada, a tensão de saída será:

$$V_0(t) = -k_i \int_0^t V d\tau \Rightarrow V_0(t) = -k_i V t$$

Rampa com inclinação negativa.

O tempo de integração é dado por:

$$t_i = R_1 C$$

Nota: O tempo de integração é o tempo que transcorre até que a tensão de saída sofra uma variação igual ao valor do degrau de entrada.

Se for aplicado uma tensão senoidal de amplitude V , a tensão de saída será:

$$V_0(t) = -k_i \int_0^t V \sin(\omega \tau) d\tau \Rightarrow V_0(t) = \frac{k_i V}{\omega} \cos(\omega t)$$

uma tensão senoidal.

Material Utilizado:

- Osciloscópio Digital
- Gerador de Funções

- Amplificadores Operacionais
- Fonte de Tensão Simétrica ($+V_{cc}=15V$ e $-V_{cc}=-15V$)
- Multímetro
- Resistores e capacitores diversos

Procedimento Experimental

Para a análise inicial, antecedendo a realização experimental, deve ser empregado um simulador de circuitos eletrônicos que contenham os instrumentos e componentes mencionados.

1ª Parte:

- Montar o circuito mostrado na Fig.3 com $R_i = 1M\Omega$ e $C = 1\mu F$. Não conectar o resistor de $1k\Omega$. A entrada e a saída teóricas.
- Aplicar na entrada $V_i = 1V$

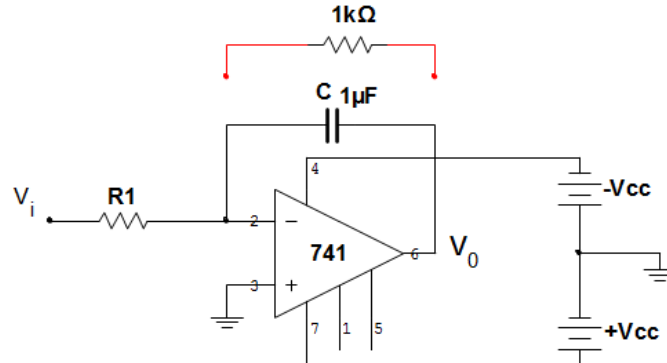


Figura 3 - Circuito integrador

- Conectar o resistor de $1k\Omega$ em paralelo ao capacitor C para “reset” do integrador a zero, descarregando o capacitor e levar $V_o = -1mV \approx 0$ volts.
- Desconectar o resistor de $1k\Omega$ para que o circuito comece a integrar a tensão de entrada.

- Observar e registrar V_o .
- Verificar o tempo necessário para se atingir v_o . Comparar com o tempo que você obtém usando a equação abaixo:

$$V_o(t) = -\frac{1}{R_i C} \int_0^t V_i(\tau) d\tau + V_o(0)$$

Nota: Para repetir o experimento acima, basta descarregar o capacitor C usando o resistor de $1k\Omega$ conforme descrito anteriormente. Observar que o capacitor C não descarrega sozinho.

- Avaliar e justificar com base na teoria, o resultado obtido.

2ª. Parte:

- Montar o circuito mostrado na Fig. 4 com $R_i = 10k\Omega$ e $C = 100nF$.
- Aplicar um sinal sinusoidal de $1V_{pp}$ com frequências de 100 a 1000Hz. Medir a amplitude da resposta. Anotar a constante de integração do circuito.
- Aplicar um sinal sinusoidal de $1V_{pp}$ a 100Hz. Medir a amplitude e defasagem da resposta.

Nota: Um circuito integrador puro apresenta alguns problemas que podem dificultar seu uso em certas aplicações, a saber: saturação rápida, sensibilidade a ruídos e limitações de resposta em frequência. Para reduzir tais efeitos, geralmente é necessário adicionar componentes extras, como uma resistência de alto valor em paralelo com o capacitor, para melhorar a estabilidade e a resposta em frequência do circuito integrador. Essas modificações podem transformá-lo em um circuito integrador ativo.

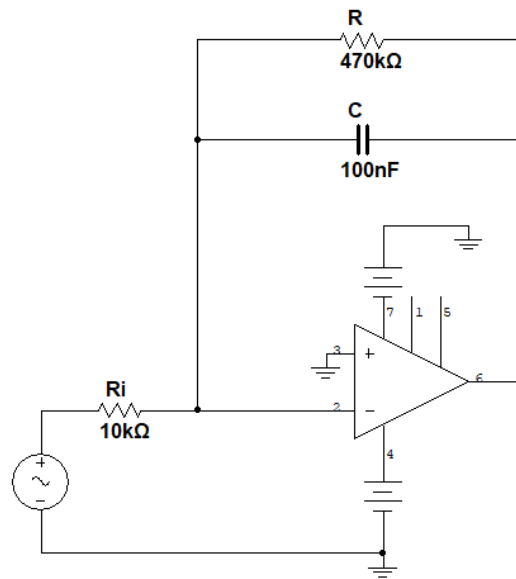


Figura 4 - Circuito integrador ativo

3ª. Parte: Computação Analógica

Na simulação analógica (computação analógica), circuitos eletrônicos com amplificadores operacionais são usados para resolver equações diferenciais. O coração da técnica é o AMP_OP empregado como circuito integrador conforme mostrado na primeira parte..

Com base na equação abaixo, fazer as seguintes equivalências:

$$v_o(t) = -\frac{1}{R_i C} \int_0^t v_i(\tau) d\tau + v_o(0)$$

- A entrada do integrador v_i é igual dy/dt (*termo da equação diferencial ordinária*)
- A saída do integrador v_o é igual a $-(1/R_i C)y(t)$ (*termo da equação diferencial ordinária*)

Desta forma, as tensões no circuito AMP_OP: v_o e v_i podem ser *análogos* de outros parâmetros como distância (metros), velocidade (metros/s), força (N), temperatura (°C) e etc.

Exemplo: Considerar um sistema mecânico composto de amortecedor e de mola descrito pela seguinte equação diferencial de primeira ordem, em que $y(t)$ é deslocamento em metros:

$$\frac{dy(t)}{dt} + 5y(t) = 2, t \geq 0, y(0) = -1 \text{ cm}$$

Como analogia, a saída do integrador deve ser proporcional ao deslocamento, ou seja,

$$v_o(t) = Ky(t).$$

Observar que, para manter a operação linear e obter uma solução precisa, deve-se ter cuidado ao dimensionar as tensões de saída para não saturar o amplificador operacional. Considerando que $v_{SAT} \approx 10$ Volts para o amplificador operacional e que o deslocamento máximo de $y(t) \leq 10$ centímetros, pode-se projetar um circuito AMP_OP para simular o sistema realizando o escalonamento da tensão de saída do integrador para 1 Volt / cm, isto é, $v_o(t) = y(t)$ ou $K = 1$ Volt/cm. O escalonamento em amplitude da tensão de saída é uma forma de assegurar que a tensão de saída não ultrapasse os limites de alimentação dos amplificadores operacionais.

A Fig. 5 mostra um dos muitos circuitos possíveis do amplificador operacional que podem ser usados para simular a equação diferencial dada acima.

As tensões CC são incluídas no circuito para aplicar tensões de polarização representando:

1. a condição inicial de $y(0) = -1 \text{ cm}$ ($v_{o2}(0) = -1V$) ao capacitor de realimentação durante o *reset*, ou seja, $t < 0$ e
2. a entrada degrau de 2cm ($v_i = 2V$) à entrada do integrador durante operação, isto é, $t \geq 0$.

A simulação analógica por computador mostrada na Fig. 5 foi obtida da seguinte maneira. Primeiro, a saída do integrador foi escolhida para representar o deslocamento:

$$v_{o2} = y(t).$$

Escolhendo $R_i = 1M\Omega$ e $C = 1\mu F$ para que $R_i C = 1 \text{ segundo}$, a equação do amplificador integrador indica que

$$v_{i2} = -dv_{o2}/dt = -dy/dt.$$

Observando que $v_{i2} = v_{o1}$ e resolvendo a equação diferencial descrita acima para $-dy/dt$, obtêm-se:

$$v_{o1} = -dy/dt = -2 + 5y = -2 + 5v_{o2}$$

Do amplificador somador, obtêm-se:

$$v_{o1}(t) = -\frac{R_f}{R_1}v_1(t) - \frac{R_f}{R_2}v_2(t)$$

Deixando $R_f (R2) = 1M\Omega$, $v_1 = +2V$, $v_2 = -v_{o2}$ e equacionando os termos nas equações

$$v_{o1} = -dy/dt = -2 + 5y = -2 + 5v_{o2}.$$

$$v_{o1}(t) = -\frac{R_f}{R_1}v_1(t) - \frac{R_f}{R_2}v_2(t)$$

obtêm-se $R1 (R3) = 1M\Omega$ e $R2 (R5) = 0,2M\Omega$. Usando um amplificador inversor com entrada e resistências de realimentação escolhidas como $0,2M\Omega$ cada uma para obter $v_{o3} = -v_{o2}$, consegue-se o computador de simulação analógica do sistema mecânico mostrado na Fig. 5.

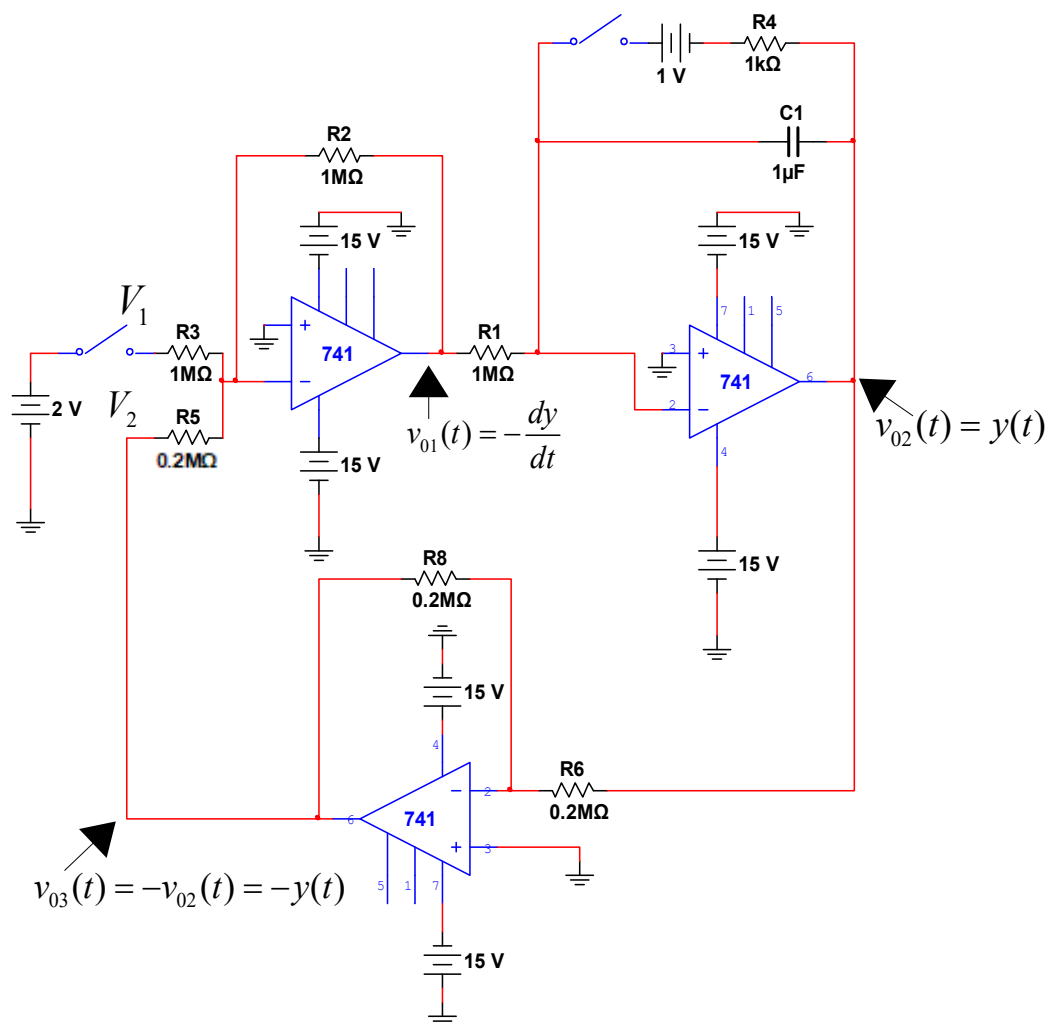


Figura 5 - Circuito de simulação de computador analógico para um sistema de primeira ordem usando três amplificadores operacionais.

Procedimento

- Montar o circuito mostrado na Fig.5.
- Repetir o exemplo utilizando um simulador de circuitos eletrônicos.
- Observar o sinal de saída v_o no osciloscópio.
- Se o deslocamento máximo for alterado para 100 cm e a entrada degrau é alterada para 10cm, que mudanças você faria na simulação analógica?