

DERIVADOR E INTEGRADOR

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

I. OBJETIVOS

- Observar na prática o funcionamento do diversos tipos de amplificadores com ampop.
- Realizar as comparações necessárias com a teoria para constatação.
- Entender na prática o conceito de “ajuste de span e zero”.

II. INTRODUÇÃO

III. MATERIAIS UTILIZADOS

- Gerador de Tensão DC Instrutherm FA - 3030;
- Gerador de funções ICEL GV - 2002;
- Osciloscópio Minipa MO - 1262;
- Protoboard;
- Resistores de $470\Omega(1)$, $1k\Omega(1)$, $2k\Omega(1)$, $10k\Omega(4)$, $20k\Omega(1)$, $100k\Omega(4)$, $200k\Omega(1)$ e $1M\Omega(2)$;
- Potenciômetros ou trimpots de $4k7\Omega(1)$ e $10k\Omega(1)$;
- Capacitor de $100nF(1)$;
- Diodos $1N4148(2)$ e zener $1N758A(1)$;
- Ampop 741.

IV. PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo estudaremos circuitos com capacitores, onde comportamento varia ao longo do tempo e depende da frequência. Portanto a análise destes circuitos deve ser feita no domínio do tempo e, principalmente, no domínio da frequência.

A. Derivador

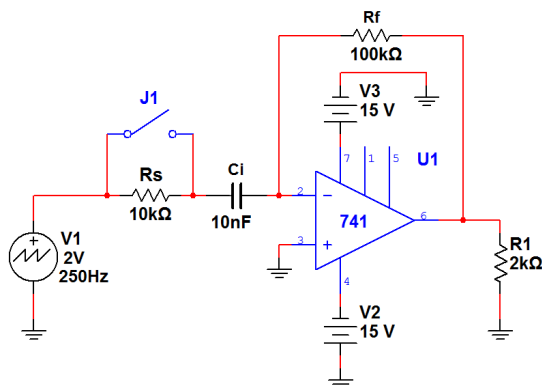


Figura 1. Esquema: Derivador.

Formulário:

$$V_O(t) = R_f.C_i \frac{d}{dt} V_i(t) = -T_d \frac{d}{dt} V_i(t)$$

$$T_d = R_f.C_i$$

$$V_O = -T_d \frac{\Delta V_i}{\Delta t}$$

$$\omega_d = \frac{1}{T_d} [\text{rad/s}]$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi.T_d} = \frac{1}{2\pi.R_f.C_i} [\text{Hz}]$$

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

SEGUNDO PASSO - Ajustes iniciais.

- Osciloscópio:
CH1=0,5V/DIV. DC; POS. CENTRAL.
CH2=0,5V/DIV. DC; POS. CENTRAL.
MODO=CHOPPER
BASE DE TEMPO=1ms/DIV.
TRIGGER=CH1; SLOPE+; AUTO,
- Gerador de funções:
TRIANGULAR; $2V_{pp}$; 250Hz.

TERCEIRO PASSO - O sinal de saída, visto através de CH2, é uma onda quadrada com amplitude de 1V de pico e com característica inversora. No intervalo onde o sinal de entrada aumenta, o sinal de saída é negativo. No outro intervalo, para V_i diminuindo, V_O é positivo. Conforme a teoria, para:

$$\Delta V_i = 1V, \Delta t = 2ms, T_d = 100k\Omega.10nF = 1ms, V_O = 1V$$

OBS: esta tensão deve ser medida em relação ao ZERO e não pico-a-pico.

$$V_{Opico \text{ medido}} = \text{_____} V$$

$$T_d = \frac{\Delta t}{\Delta V_i} V_O T_d = \text{_____} ms$$

QUARTO PASSO - Se aumentarmos a frequência para 500Hz diminuiremos Δt para 1ms e, consequentemente, aumentaremos a amplitude do sinal de saída para $V_{Opico} = 1V$.

$$V_{Opico \text{ medido}} = \text{_____} V$$

Como podemos notar, a resposta do derivador à uma onda triangular é uma onda quadrada. Observe, no entanto, que a

onda retangular é ligeiramente arredondada. Isto se deve ao resistor R_s , instalado em série ao capacitor de entrada C_i , para evitar instabilidade no circuito.

QUINTO PASSO - Curto-circuitar $R_s = 10k\Omega$.

Você deverá estar observando uma grande oscilação no sinal de saída, típico de um comportamento instável.

A frequência de oscilação é determinada pela seguinte equação:

$$f_{osc} = \sqrt{f_d \cdot f_u} \text{ onde } f_u = GBP$$

Considerando $GBP = 1MHz$ e $f_d = 159,2Hz$, teremos $f_{osc} = 12,6kHz$.

Meça a frequência de oscilação medindo o intervalo entre dois picos consecutivos: BASE DE TEMPO=50 μ S/DIV.

$$\Delta t = \text{-----} \mu S$$

$$f_{osc} = 1/T = \text{-----} kHz$$

SEXTO PASSO - Retire o "jump" de R_s . O circuito volta a operar estavelmente. BASE DE TEMPO=1mS/DIV. O resistor R_s é o responsável pela constante de tempo observada na onda retangular de saída e pela frequência de corte.

$$T_c = R_s \cdot C_i$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_s \cdot C_i}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10k\Omega \cdot 10nF} = 1,592kHz$$

Esta frequência de corte deve ser menor que a frequência de oscilação que ocorre sem este resistor.

$$R_s > R_f \sqrt{\frac{f_d}{f_u}}$$

Para frequências abaixo de f_c o circuito funciona como derivador; onde o ganho aumenta com o aumento da frequência. Para frequências maiores que f_c , o circuito funciona como amplificador inversor de ganho $A_v = -R_f/R_s = -10$ (ou +20dB; $\phi = 180^\circ$)

- Aumente a frequência para aproximadamente 1,25kHz e reajuste o osciloscópio.

SÉTIMO PASSO - Aumentar a frequência para aproximadamente 12,5kHz e ajustar BASE DE TEMPO=20 μ S/DIV.

O sinal de saída é uma triangular invertida em relação ao sinal de entrada. O circuito funciona como amplificador inversor para frequências maiores que a frequência de corte.

OITAVO PASSO - Mudar o sinal de excitação para senoidal 2V_{pp}, 125Hz (duas décadas abaixo em relação à última etapa) e ajustar o osciloscópio. O sinal de saída será também uma senoidal, porém defasado 90°. Observe que a tensão de saída diminui com a diminuição da frequência.

Ajustar a frequência até a amplitude do sinal de saída ficar igual ao da entrada. (os dois canais devem estar com o mesmo V/DIV).

$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_i}$$

$$f_d \cong \frac{1}{2\pi \cdot 100k\Omega \cdot 10nF} = 159,2Hz$$

Para $V_{op} = V_{ip}$.

$$f_d = \text{-----} Hz$$

NONO PASSO - Resposta à degrau é um impulso.

- Mudar o sinal para QUADRADA=2V_{pp}. Ajustar BASE DE TEMPO = 1mS/DIV e CH2=5V/DIV. Você deverá estar observando impulsos de quase 10V de pico.

B. Integrador

Qualquer componente contínua presente no sinal de entrada ou tensão *offset* de entrada e corrente de polarização de entrada do ampop levaria o ampop à saturação. Para evitar este deslocamento, foi instalado o resistor R_p em paralelo ao capacitor C_f .

Formulário:

$$V_O(t) = \frac{-1}{R_i \cdot C_f} \int V_i(t) \cdot dt$$

$$T_i = R_i \cdot C_f$$

$$\omega_i = \frac{1}{T_i} [rad/s]$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi \cdot T_i} [Hz]$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_p \cdot C_f}$$

PRIMEIRO PASSO - Montar o circuito da figura ??.

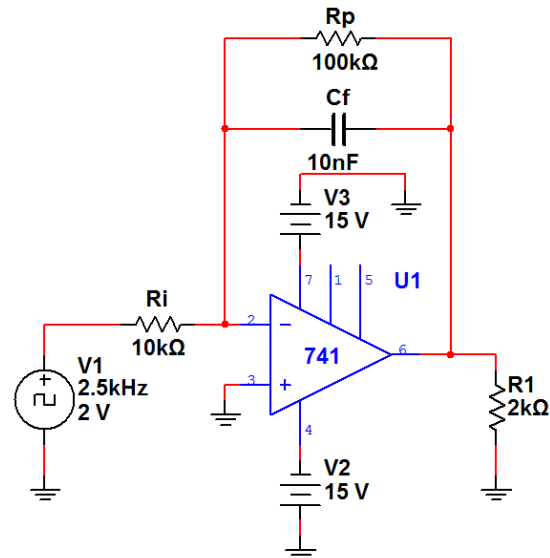


Figura 2. Esquema: Integrador.

SEGUNDO PASSO - Ajustes iniciais:

- Osciloscópio: CH1=0,5V/DIV-DC; POS. SUPERIOR. CH2=0,5V/DIV-DC; POS. INFERIOR BASE DE TEMPO=0,1mS/DIV. TRIGGER=CH1; SLOPE+, NORMAL,
- Gerador de funções: QUADRADA; $\delta = 0,5$; 2V_{pp}; nível DC=ZERO, 2,5kHz.

TERCEIRO PASSO - Ligar a alimentação e o gerador de funções.

Você deverá estar observando uma onda triangular de aproximadamente 4V de pico no terminal de saída do ampop (através de CH2).

O integrador é muito sensível ao nível DC. Nesta experiência é importante que o ciclo de trabalho da onda quadrada seja exatamente 50% (duty cycle $\delta = 0,5$). O período do semiciclo positivo deve ser igual ao período do semiciclo negativo.

Para $V_i = 1V_p$, $\Delta t = 0,2ms$ ($f = 2,5kHz$) e $T_i = R_i.C_f = 10k\Omega.10nF = 0,1ms$, a tensão de saída deverá ser uma onda triangular de $2V_{pp}$.

$$\frac{\Delta V_O}{\Delta t} = \frac{V_i}{T_i}$$

$$\Delta V_{opp} = \frac{V_i}{T_i} \Delta t$$

$$T_i = \frac{V_i \Delta t}{\Delta V_O}$$

$$T_i = \frac{V_i}{\Delta V_O} \Delta t$$

QUARTO PASSO - Determinação da frequência de integração f_i .

- Mudar o sinal de entrada para SENO, $1V_{pp}$ e diminuir a frequência até a amplitude do sinal de saída ficar igual ao de entrada. Observe que a amplitude aumenta com a diminuição da frequência, comportamento oposto ao do derivador. Esta frequência deve ser próximo de $f_i = 1/2.\pi.R_i.C_f$.

$$f_i = 1/2.\pi.10k\Omega.10nF = 1,592kHz$$

$$f_i = \text{_____}kHz$$

QUINTO PASSO - Influência de R_p .

O resistor R_p , instalado em paralelo ao capacitor C_f , foi utilizado nesta experiência para evitar o deslocamento da tensão de saída para a saturação. Este resistor não é nos reguladores PID uma vez que existe um elo de realimentação negativa externo.

Mudar a forma de onda para quadrada novamente e ajustar CH2=5V/DIV-DC. Observe que o sinal de saída não é perfeitamente triangular devido ao efeito de R_p .

Para frequências maiores que a frequência de corte o circuito funciona como integrador. Para frequência menores, como amplificador inversor de ganho $A_V = -R_p/R_i = -10.(+20dB; \phi = 180^\circ)$. $f_c = 1/2\pi.R_p.C_f$.

$$f_c = 1/2\pi.100k\Omega.10nF = 159.2Hz$$

- Diminuir a frequência para aproximadamente 50Hz.

SEXTO PASSO - Retirar R_p do circuito. Observe que o sinal de saída é uma onda triangular mais perfeita, porém, deslocada e ceifada pela saturação do ampop.

Tente ajustar o nível DC do sinal de entrada com a intenção de manter o sinal de saída na posição central. É muito difícil. Qualquer componente DC, inclusive V_{IO} e I_{b-} do ampop, leva o ampop à saturação.

SÉTIMA ETAPA - *Offset*.

- Retirar o gerador de sinais do circuito.

- Aterrar a entrada do integrador. (Atenção para não curto-circuitar a saída do gerador de funções).

Curto-circuitar o capacitor C_f através de um jump. O sinal de saída deve cair para zero (precisamente V_{IO}).

Retire o jump. O sinal de saída se deslocará para a saturação (positiva ou negativa). Este erro, que aumenta com o tempo, é provocado por V_{IO} e I_{b-} .

Para $R_i = R_b$.

$$V_{o(offset)} = V_{IO} + \frac{1}{T_i} \int [V_{IO} + R_i.I_{IO}]dt$$

Para $R_b = 0$.

$$V_{o(offset)} = V_{IO} + \frac{1}{T_i} \int [V_{IO} + R_i.I_{b-}]dt$$

Não desmonte este circuito. Reinstale o resistor $R_p = 1M\Omega$ e modifique o circuito conforme o diagrama esquemático da figura ??.

C. Regulador PI

O circuito do regulador PI (Proporcional-Integral) não inversor é exatamente o circuito do Integrador com o sinal de excitação aplicado na entrada não inversora enquanto que o PI inversor necessita de um resistor adicional em série com o capacitor.

1) *Não-inversor*:

$$V_o(t) = 1 + \frac{1}{R_i.C_f} \int V_i(t)dt$$

$$\frac{V_O}{V_i}(S) = 1 + \frac{1}{T_i.S}$$

$$K_p = 1$$

$$T_i = R_i.C_f$$

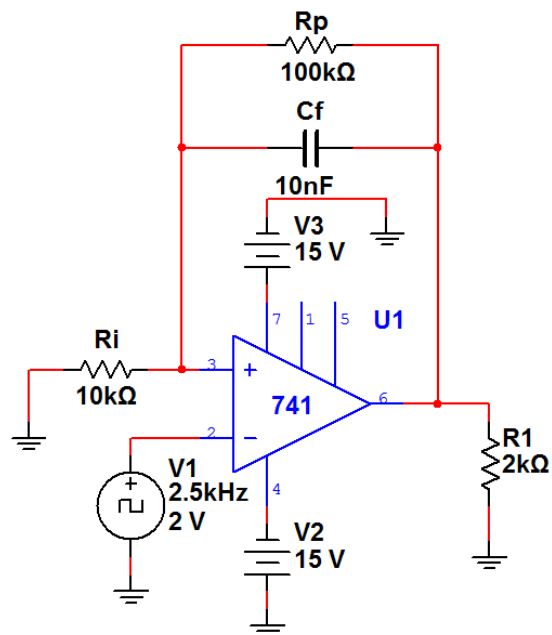


Figura 3. Esquema: Regulador PI não-inversor.

2) Inversor:

$$\frac{V_O(S)}{V_i(S)} = - \left[K_p + \frac{1}{T_i \cdot S} \right] = -K_p \left[1 + \frac{1}{T_n \cdot S} \right]$$

$$K_p = R_f / R_i$$

$$T_i = R_i \cdot C_f$$

$$T_n = K_p \cdot T_i = R_f \cdot C_f$$

$$T_c = R_p \cdot C_f$$

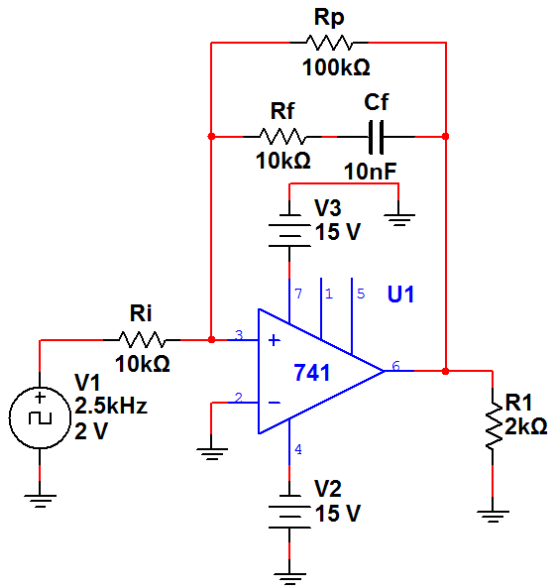


Figura 4. Esquema: Regulador PI inversor.

D. Regulador PD inversor

$$\frac{V_O(S)}{V_i(S)} = -[K_p + T_d \cdot S] = -K_p[1 + T_v \cdot S]$$

$$K_p = R_f / R_i$$

$$T_d = R_f \cdot C_i$$

$$T_v = R_i \cdot C_i$$

$$T_c = R_s \cdot C_i$$

Kp= Ganho proporcional.

Ti= Tempo de Integração.

Tn= Tempo da ação integradora.

Td= Tempo de derivação.

Tv= Tempo da ação derivadora.

E. Regulador PID

$$\frac{V_O(S)}{V_i(S)} = - \left[K_p + T_d \cdot S + \frac{1}{T_i \cdot S} \right]$$

$$\frac{V_O(S)}{V_i(S)} = -K_p \left[1 + T_v \cdot S + \frac{1}{T_n \cdot S} \right]$$

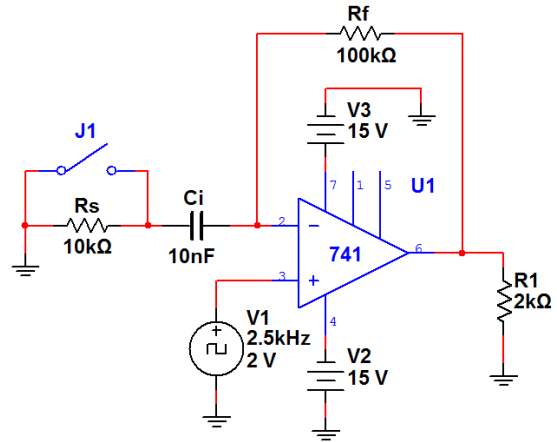


Figura 5. Esquema: Regulador PD não-inversor.

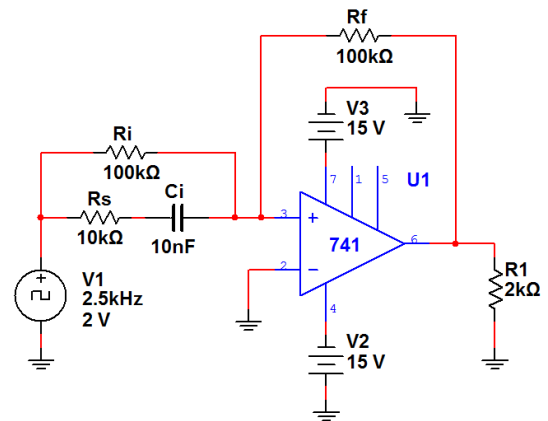


Figura 6. Esquema: Regulador PD inversor.

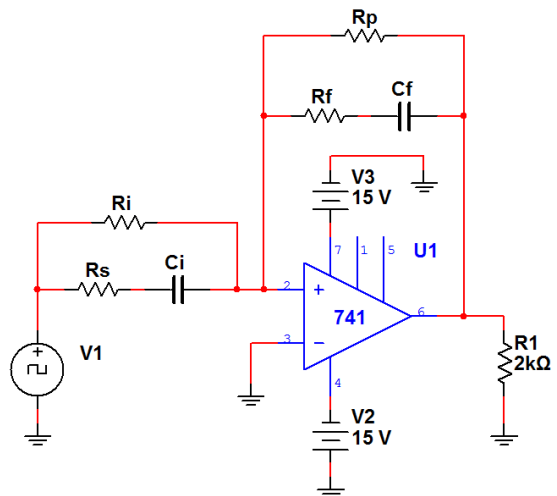


Figura 7. Esquema: Regulador PID.

Devemos tomar muito cuidado ao relacionarmos tempo de derivação (ou de integração) com a frequência de derivação (ou de integração).

Reguladores PI, PD e PID que permitem ajustes independentes de K_p , T_i e T_d (ou de K_p , T_n e T_v) necessitam de pelo menos três amp op's.

No regulador PI da figura ??, o potenciômetro $P1$ ajusta o ganho proporcional K_p enquanto o potenciômetro $P2$ ajusta o tempo da ação integral T_n .

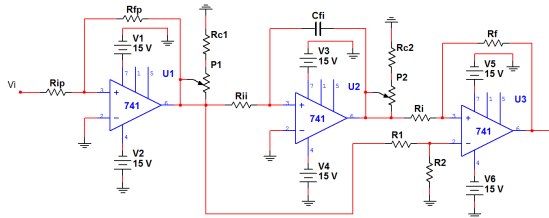


Figura 8. Esquema: Regulador PI.

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.