

Objectivo e introdução

O objectivo deste trabalho é apresentar e exercitar o fluxo de projecto típico de um filtro activo. Partindo das especificações, determina-se a ordem do filtro e procede-se ao projecto do protótipo passa-baixo normalizado a partir das tabelas, escrevendo a sua função de transferência (FdT) na forma “matemática” normalizada. Depois, denormaliza-se aquela criando a FdT “real” do projecto (i.e., com as frequências a tomar os seus valores reais), selecciona-se o circuito para a implementação, simula-se este e, finalmente, constrói-se e testa-se o dito circuito no laboratório.

Os alunos deverão efectuar os cálculos associados ao filtro – i.e., definir os valores dos componentes, – previamente à aula presencial no laboratório. Devem usar-se componentes com valores das escalas padrão (e.g a série E22) e simular o projecto quer com os valores numéricos calculados, quer com os valores padrão dos componentes, tentando observar as diferenças nos diagramas de Bode de ambas as configurações.

Previamente, como “aquecimento”, os alunos deverão construir e medir a frequência de corte de uma secção passa-baixo de Sallen-Key.

Secção passa-baixo de Sallen-Key

Na figura 1 encontra-se uma secção passa-baixo de 2ª ordem de Sallen-Key, que implementa a função de transferência não normalizada¹

$$H(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{\alpha}{1 + [C_1(R_1 + R_2) + (1 - \alpha)R_1C_2]s + R_1R_2C_1C_2s^2}$$

onde $\alpha = 1 + R_4/R_3$ é o ganho do amplificador não inversor e $s = j\omega$. Verifique aquela função de transferência supondo o ampop ideal (sugestão - use o método dos nós, escrevendo apenas duas equações: no nó (+) do ampop; e no nó comum a R_1 , R_2 e C_2). Para o conjunto de valores dos componentes $R_1 = R_2 = 16\text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 10\text{ nF}$, $R_3 = 4.7\text{ k}\Omega$ e $R_4 = 10\text{ k}\Omega$, calcule a frequência de corte teórica a 3 dB do filtro, f_C . Construa o circuito no laboratório e meça a frequência de corte experimental. Compare com a teórica e comente eventuais discrepâncias.

¹A função de transferência na variável normalizada $S = s/\omega_C$ será

$$H(S) = \frac{\alpha}{1 + [C_1(R_1 + R_2) + (1 - \alpha)R_1C_2]\omega_C S + R_1R_2C_1C_2\omega_C^2 S^2}$$

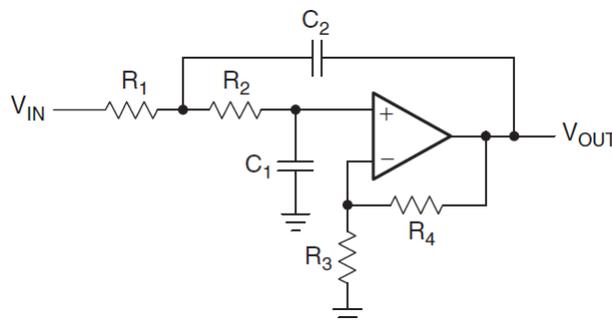


Fig. 1: Secção passa-baixo de 2ª ordem de Sallen-Key.

Requisitos de projecto e implementação do passa-alto

Pretende-se realizar um filtro activo *passa-alto* do tipo Chebyshev com $f_C = f_P = 500$ Hz e $K_P = 3$ dB. À frequência $f_S = 200$ Hz a atenuação já deverá ser superior a $K_S = 40$ dB. A tabela com os coeficientes da F. de T. do filtro de Chebyshev, a 3 dB, normalizado a $\Omega_P = 1$, está na figura 2.

Para implementar as secções de 2ª ordem da F.T. do filtro é usado o circuito de Sallen-Key passa-alto, de 2ª ordem, mostrado na figura 3, onde também está a sua função de transferência. Confirme esta expressão utilizando uma técnica de análise de circuitos à sua escolha (sugere-se o método dos nós).

A tabela de coeficientes e o circuito foram retirados do cap. 16 do livro “Opamps for Everyone”, 2ª ed., de Ray Mancini, da Texas Instruments, disponível neste link.

Fluxo de projecto

Deverá efectuar as seguintes etapas de projecto:

1. Calcular a ordem do filtro de que necessita para satisfazer os requisitos de projecto (consulte a fórmula no apêndice).
2. Escrever a FdT do filtro passa-baixo normalizado por consulta da tabela na figura 2.
3. Aplicar a transformação “passa-baixo normalizado para passa-alto” à anterior FdT normalizada para saber qual é a FdT do passa-alto pretendido.
4. Consultar a figura 3 e dimensionar o valor dos componentes do filtro, comparando os coeficientes numéricos da sua FdT com aquela na figura. Use valores típicos para os condensadores. Pode fazer $C_1 = C_2$ e $R_1 = R_2$ para facilitar os cálculos. Fazendo $\alpha = (1 + R_4/R_3)$, a FdT do filtro é

$$A(S) = \frac{\alpha}{1 + \frac{R_2(C_1+C_2)+R_1C_2(1-\alpha)}{\omega_c R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{S} + \frac{1}{\omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{S^2}}$$

5. Simular o filtro para confirmar o projecto, verificando concretamente que satisfaz os requisitos de atenuação às frequências f_P e f_S .
6. No laboratório, construa o seu filtro e registre experimentalmente os respectivos diagramas de Bode. Comente as discrepâncias que observar relativamente ao projecto “teórico”. Explique a razão que faz com que, a frequências muito elevadas, o ganho do filtro diminua, apesar de ser do tipo passa-alto.

Apêndice

A transformação de passa-baixo normalizado para passa-alto baseia-se na substituição $S \rightarrow \omega_P/s$. (Note que ω_P é também frequentemente denominada ω_c , a frequência de corte do filtro, sempre que a atenuação na banda de passagem é 3 dB, como acontece no presente caso.)

Para o filtro passa-baixo normalizado de Chebyshev calcula-se a ordem do filtro, n_{Che} , com:

$$n_{Che} = \lceil n'_{Che} \rceil \quad \text{com} \quad n'_{Che} = \frac{\cosh^{-1} M}{\cosh^{-1} \Omega_S} \quad \text{e com} \quad M = \sqrt{\frac{10^{K_S/10} - 1}{10^{K_P/10} - 1}}$$

Se o filtro **passa-baixo** não estiver normalizado, então Ω_S será substituída por (ω_S/ω_P) ou por (f_S/f_P) . No caso dos **passa-alto**, usaremos (ω_P/ω_S) , pois nestes filtros $\omega_P > \omega_S$.

Pode usar nos cálculos a igualdade $\cosh^{-1} x = \ln(x + \sqrt{x^2 - 1})$, se $x \geq 1$.

Table 16–9. Tschebyscheff Coefficients for 3-dB Passband Ripple

n	i	a_i	b_i	$k_i = f_{ci} / f_c$	Q_i
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.0650	1.9305	1.000	1.30
3	1	3.3496	0.0000	0.299	—
	2	0.3559	1.1923	1.396	3.07
4	1	2.1853	5.5339	0.557	1.08
	2	0.1964	1.2009	1.410	5.58
5	1	5.6334	0.0000	0.178	—
	2	0.7620	2.6530	0.917	2.14
	3	0.1172	1.0686	1.500	8.82
6	1	3.2721	11.677	0.379	1.04
	2	0.4077	1.9873	1.086	3.46
	3	0.0815	1.0861	1.489	12.78

Fig. 2: Tabela com os coeficientes do polinómio normalizado de Chebyshev, a 3dB, correspondente ao denominador das secções do filtro LP. O polinómio em cada secção de 2ª ordem é $P(S) = 1 + a_i S + b_i S^2$. Se a secção for de 1ª ordem (haverá uma se a ordem for ímpar), então $b_i = 0$, como é patente na tabela.

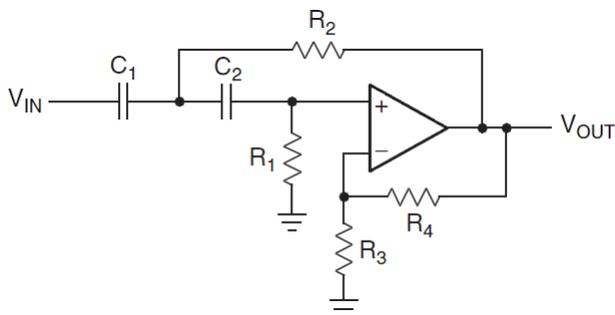


Fig. 3: Secção passa-alto de 2ª ordem de Sallen-Key (compare com o passa-baixo e descubra as diferenças).