

Tantárgyi dosszié

Tárgy: ELEKTRONIKA II.
Tárgyjegyző: dr. Kovács Ernő egyetemi docens
Szak: Villamosmérnöki levelező BSc alapszak
Szakirány: szakmai közös ismeretek

Tantárgykód: GEVEE508BL
Félév: tavaszi
ETF: GEVEE507BL
Követelmény: 14 óra/félév V/5

a) Tantárgyprogram

Hét	Előadás+gyakorlat
1.	MŰVELETI ERŐSÍTŐK kapcsolóüzeme: komparátorok, multivibrátorok. Jelkondicionáló áramkörök: mérőerősítők, hőmérséklet átalakítók erősítői. A/D ÉS D/A ÁTALAKÍTÓK: mintavételezés kvantálás, kódrendszerek D/A átalakítók A/D átalakítók. Optoelektronika: alapfogalmak, fotoellenállás, fotoelem, fényelem, fotodióda, Shottky-fotodióda, PIN dióda, lavina dióda
2.	OPTOELEKTRONIKA: fototranzisztor, foto-Darlington, foto-FET , képérzékelők, CCD, CMOS, Fotoadók: IRED, LED, Teljesítmény LED, Lézer dióda. Optoelektronikai adó-vevő eszközök: optocsatolók, opto-érzékelők, forgó jeladók lineáris jeladók, lézeres távolságmérők, LED alapú kijelzők, Folyadékkristályos kijelzők. TÁPEGYSÉGEK: Stabilizálatlan AC-DC tápegységek, Analóg lineáris üzemi tápegységek, Kapcsolóüzemi tápegységek: Primer oldali kapcsolóüzemi tápegységek, Szekunder oldali kapcsolóüzemi tápegységek, Szünetmentes energiaellátás.
3.	Laboratóriumi gyakorlat: Tranzisztoros kapcsolások mérése

b) Kötelező irodalom:

Dr. Kovács E: Elektronika II. on-line jegyzet Villamosmérnöki BSc alapszak levelező hallgatóknak (<http://www.uni-miskolc.hu/~elkke>)

Ajánlott irodalom:

- [1] Tietze-Schenk: Analóg és digitális áramkörök, Műszaki Könyvkiadó, 1990.
- [2] Herpy-Barka: Aktív RC szűrők, Akadémiai Kiadó, 1985
- [3] Schnell szerk.: Jelek és rendszerek mérés technikája, Műszaki Könyvkiadó, 1985.
- [4] Millmann: Microelectronics, McGraw-Hill, 1992
- [5] Winzer: Linear Integrated Circuits, Saunders College Publishing, 1992
- [6] Kissel: Industrial Electronics, Prentice Hall, 1997
- [7] Doebelin: Measurement Systems, McGraw-Hill, 1990
- [8] Savant-Roden-Carpenter: Electronic Design, Benjamin/Cummings Publishing, 1991
- [9] Smith, S.D.: Optoelectronic devices, Prentice Hall, 1995.
- [10] Kwork, K, NG: Complete Guide to Semiconductor Devices, IEEE Press, 2002.
- [11] Gies: Optokoppler und Displays, Franzis Verlag, 1987.
- [12] Usher, M.J.-Keating, D.A.: Sensors and transducers, MacMillan Press, 1996.

- [13] Ferenczi Ö.: Félvezetős feszültségátalakítók, Műszaki Könyvkiadó 1979.
- [14] Ferenczi Ö.: Kapcsolóüzemű tápegységek, Műszaki Könyvkiadó 1979.
- [15] Marty Brown: Power Supply Cookbook, Newness Publ. 2001.
- [16] M.H. Rashid: Power electronics: Prentice Hall, 1993.
- [17] Komarik J: Számítástechnika analóg áramkörei, LSI Oktatóközpont
- [18] J.G. Proakis- D.G. Manolakis: Digital Signal Processing, MacMillan Publ. , 1992.
- [19] C. Marven-G. Ewers: Simple Approach to Digital Signal Processing, Wiley International-Texas Instruments, 1996.

c) Félévi követelmények

A tantárgy lezárásának módja: aláírás, kollokvium

Az aláírás megszerzésének feltételei: az előadásokon való aktív részvétel. A mérési gyakorlaton való felkészült és aktív részvétel.

Az aláíráspótlás: az aláírás a vizsgaidőszakban –az engedélyezett időtartamon belül- a mérés sikeres teljesítésével pótolható.

A vizsga jegy megszerzése: A vizsga írásbeli és szóbeli. Az írásbeli rész a félév teljes anyagából az előre kiadott tételjegyzék alapján három tétel részletes kidolgozásával teljesíthető. **A vizsga elégtelen, ha bármelyik tétel kidolgozottsági szintje az elégséges szintet nem éri el.** A szóbeli rész a tételekhez fűzött kiegészítésekből és/vagy az anyag többi részét érintő kérdésekből tevődik össze

Tételjegyzék

I. kérdéscsoport

1. Műveleti erősítők kapcsolóüzeme, paraméterek. Hiszterézis-nélküli komparátorok. Bemenetek védelme. A komparátor kimenetek kialakításai.
2. Invertáló és a nem-invertáló bemenetről vezérelt hiszterézises komparátorok.
3. Astabil és monostabil multivibrátorok műveleti erősítővel.
4. Jelkondicionáló áramkörök jellemzői, egy- és többvezetékes rendszerek elve, tulajdonságaik.
5. Mérőerősítők jellemzői. Három műveleti erősítő mérőerősítő (műszererősítő) és kimeneti kiegészítői.
6. Hőmérséklet átalakítók erősítői.
7. A/D és D/A átalakítók általános felépítése, az átalakítók jellemzői, mintavételezés, mintavételezett jel spektruma.
8. Nyquist és Shannon-Kotelnikov tételek. Antialiasing szűrők alkalmazása és jellemzői. Követő-tartó áramkörök (S&H).
9. Kvantálás, kvantálási zaj. Kódszisztemek. Átalakítók pontossága és hibái: statikus hibák, dinamikus hibák.
10. D/A átalakítók (DAC): súlyozott áramok módszere, létrahálózatos átalakítók.
11. Közvetlen/teljesen dekódolt átalakító D/A. Számláló típusú A/D átalakító.
12. Sorozatos közelítéses (szukcesszív approximációs) átalakító, kettős meredekségű (dual slope) átalakító.
13. Közvetlen A/D átalakító. Speciális átalakítók: szigma-delta átalakítók.

II. kérdéscsoport

14. Optoelektronikai alapfogalmak, fénytechnikai alapfogalmak, optoelektronikai eszközök hullámtartománya (optikai spektrum), az emberi szem érzékenysége, detektálási küszöb, hőmérséklet hatása, öregedés.
15. Fotodetektorok zajai. Fotoellenállás.
16. Foto-elektromos jelenségek a pn átmenetben, fotoelem, fényelem. Fotodióda.
17. Lavina dióda. Fototranzisztor és üzemei, Foto-Darlington. Foto-FET.

18. Képerzékelők. CCD működése és tulajdonságai. CMOS képerzékelő. Színes képerzékelők.
19. Fotoadók (emittálók), IRED, kis és nagyfényerejű LED-ek. OLED működése. Lézer dióda (SDL).
20. Optoelektronikai adó-vevő eszközök, optocsatlók és alkalmazásai (legalább egy alkalmazás). Opto-érzékelők (inicializátorok).
21. Üvegszálás átvitel alapjai. Optoelektronikai elven működő mérőeszközök, forgó jeladók (enkóderek), lineáris jeladók. Háromszögeléses elven működő lézeres távolságmérők.
22. LED alapú kijelzők: folytonos és multiplex üzem, (pontoszerű és skálaszerű kijelzők). LED-kijelzők multiplex-üzeme, szegmens és pontmátrix kijelzők, intelligens kijelzők. LED-display.
23. Folyadékkristályos kijelzők (LCD): működése, jellemzői, tulajdonságai,
24. LCD vezérlési megfontolások, TFT folyadékkristályos monitorok (LCD), plazma kijelzők, megjelenítők (PDP).

III. kérdéscsoport

25. Tápegységek, stabilizálatlan AC-DC tápegységek, 1F2U2Ü kapcsolás (Greatz) működése, jellemző karakterisztikái, paraméterei. 1F1U2Ü kapcsolás (középpont-kapcsolás).
26. Egyenirányító transzformátorok, egyenirányító dióda, szűrőkondenzátor, passzív túláramvédelem. Túl feszültség-védelem.
27. A stabilizált kimenetű DC-DC tápegységek jellemző karakterisztikái és paraméterei. Analóg lineáris üzemű tápegységek: soros stabilizálás elve, párhuzamos (shunt) stabilizálás elve.
28. Visszacsatolt tápegységek elve, jellemzői, egyszerű (határolós) túláram-védelem. Visszahajló áram-karakterisztikájú túláram-védelem.
29. Monolitikus integrált tápegységek, a stabilizátor külső alkatrészei. Kettős tápegység kialakítása. Az áramterhelés növelése, kimeneti feszültség megváltoztatása monolitikus tápegységnél. Négyvezetékű tápegységek, tápegységek soros és párhuzamos kapcsolása.
30. Kapcsolóüzemű tápegységek: a PWM és a PFM szabályozás elve és tulajdonságaik.
31. Primer oldali kapcsolóüzemű tápegységek felépítése, fajtái. Primeroldali külső gerjesztésű záróüzemű és nyitóüzemű tápegységek működése, jellemzői.
32. Ellenüzemű kapcsolóüzemű tápegység felépítése és jellemzői. Híd- és félhíd kapcsolású kapcsolóüzemű tápegység. A primer oldali kapcsolóüzemű tápegységek jellemző veszteségei
33. Szekunder oldali kapcsolóüzemű tápegységek (DC-DC konverterek), feszültségcsökkentő tápegység, folytonos és szakaszos üzem, határterhelés.
34. Szekunder oldali kapcsolóüzemű tápegység: feszültségnövelő tápegység és jellemző karakterisztikák, paraméterek, nagyfrekvenciás transzformátorok jellemzői.
35. Szekunder oldali kapcsolóüzemű tápegység: polaritásváltó tápegység.
36. Nagyfrekvenciás tekercsek, teljesítménykapcsolók. Kapcsolóüzemű tápegységek összehasonlítása. Az analóg és kapcsolóüzemű tápegységek összehasonlítása. Szünetmentes energiaellátás megoldásai.

c) Előadások anyaga

Az előadások teljes anyagát az internetről letölthető jelszóval védett pdf állományú jegyzet alkotja. A jelszót az első előadáson kapják meg a hallgatók. Az elérési útvonal a kötelező irodalomnál található meg.

Tartalomjegyzék

3.0	Műveleti erősítők (folytatás)	2
3.4.	A műveleti erősítők hibái	2
3.4.1.	A frekvencia karakterisztika és kompenzálása	2
3.4.1.1.	A nyílthurkú erősítés frekvenciafüggése	2
3.4.1.1.1.	A negatív visszacsatolás hatása a frekvenciamenetre	2
3.4.1.1.2.	A határfrekvencia hatása a dinamikus paraméterekre	3
3.4.1.2.	Fázistartalék	3
3.4.1.2.1.	A fázisemenet hatása a linearitásra	4
3.4.1.2.2.	A fázistartalék hatása a dinamikus tulajdonságokra	4

3.4.1.3.	A frekvencia karakterisztika kompenzálása	4
3.4.2.	Ofszet hibák és kompenzálásuk	6
3.4.2.1.	Ofszet hiba csökkentése a tervezés során	6
3.4.2.2.	Ofszet kompenzálás	6
3.4.2.2.1.	Külső kivezetett kompenzációjú áramkörök	6
3.5.	Aktív szűrők	7
3.5.1.	Konjugált komplex gyökpár tulajdonságai	7
3.5.2.	Aktív szűrők tervezése	7
3.6.	Műveleti erősítők kapcsolóüzeme	9
3.6.1.	Komparátorok	9
3.6.1.1.	Hisztérezis-nélküli komparátorok	11
3.6.1.2.	Hisztérezises komparátorok	11
3.6.2.	Multivibrátorok	12
3.6.2.1.	Astabil multivibrátor műveleti erősítővel	12
3.6.2.2.	Monostabil multivibrátor műveleti erősítővel	13
3.7.	Jelkondicionáló áramkörök	15
3.7.1.	Mérőerősítők (Műszererősítők, Instrumentation amplifiers)	15
3.7.1.1.	Három műveleti erősítő mérőerősítő (műszererősítő)	15
3.7.2.	Szigetelt erősítők	16
3.7.2.1.	Transzformátoros leválasztású szigetelt erősítők	17
3.7.2.2.	Optoelektronikai leválasztású szigetelt erősítő	17
3.7.3.	Töltéscsatolt erősítők	18
4.0	A/D és D/A átalakítók	19
4.1.	Az átalakítók jellemzői és paraméterei	20
4.1.1.	Mintavételezés	20
6.1.2.	Követő-tartó áramkörök (S&H)	22
6.1.3.	Kvantálás	23
6.1.4.	Kódrendszerek	23
6.1.5.	Átalakítók pontossága és hibái	24
6.1.5.1.	Statikus hibák	24
6.1.5.2.	Dinamikus hibák	25
4.2.	D/A átalakítók (DAC)	25
4.2.1.	Létrahálózatos átalakító	25
4.2.2.	Közvetlen/teljesen dekódolt átalakító	26
4.3.	A/D átalakítók (ADC)	26
4.3.1.	Sorozatos közelítéssel (szukcesszív approximációs) átalakító	27
4.3.2.	Közvetlen átalakító	27
4.3.3.	Kettős meredekségű (dual slope) átalakító	27
4.4.	Speciális átalakítók	28
4.4.1.	Sigma-delta átalakítók	28
5.0.	TÁPEGYSÉGEK	30
5.1.	Stabilizálatlan AC-DC tápegységek	31
5.1.1.	Egyfázisú egyenirányító kapcsolások	31
5.1.1.1.	1F2U2Ü kapcsolás (Graetz)	31
5.1.1.2.	1F1U2Ü kapcsolás (középpont-kapcsolás)	33
5.1.2.	AC-DC átalakítók elemei	34
5.1.2.1.	Egyenirányító transzformátorok	34
5.1.2.2.	Egyenirányító dióda	34
5.1.2.3.	Szűrőkondenzátor	35
5.1.2.4.	Túláram-védelem	35
5.1.2.5.	Túlfeszültség-védelem	35
5.2.	Stabilizált kimenetű DC-DC tápegységek jellemzői	36
5.3.	Analóg lineáris üzemi tápegységek	38
5.3.1.	Stabilizálási elvek	38
5.3.1.1.	Soros stabilizálás elve	38
5.3.1.2.	Párhuzamos (shunt) stabilizálás elve	39
5.3.2.	Visszacsatolt tápegységek	39
5.3.2.1.	Analóg lineáris tápegység feszültség-referencia elemmel	39

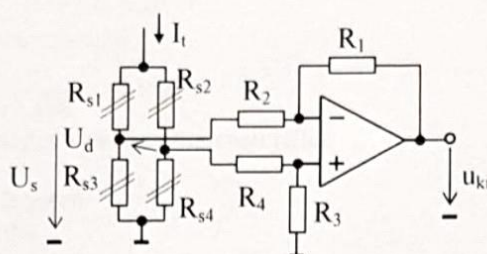
5.3.2.2	Analóg lineáris tápegység áram-referencia elemmel	40
5.3.2.3.	Aktív túláramvédelem	40
5.3.2.3.1.	Egyszerű (határolós) túláram-védelem	41
5.3.2.3.2.	Visszahajló áram-karakterisztikájú túláram-védelem	41
5.3.2.4.	Fix kimenetű feszültségű három-lábás tápegységek	42
5.3.2.4.1.	A stabilizátor külső alkatrészei	42
5.3.2.4.2.	Kettős tápegység kialakítása	43
5.3.2.4.3.	Áramterhelés növelése	43
5.3.2.4.4.	Kimeneti feszültség változtatása	
5.3.2.5.	Változtatható kimeneti feszültségű tápegységek három-lábás fix feszültségű stabilizátorral	43
5.3.4.	Tápegységek különleges kapcsolásai	43
5.3.4.1.	Négyszögletes tápegység	44
5.3.4.2.	Tápegységek soros kapcsolása	44
5.3.4.3.	Tápegységek párhuzamos kapcsolása	44
5.3.5.	Alacsony feszültségesésű tápegységek (Low Dropout-LDO)	44
5.3.6.	Analóg lineáris tápegységek jellemző paraméterei	45
5.4.	Kapcsolóüzemű tápegységek	46
5.4.1.	Primer oldali kapcsolóüzemű tápegységek	47
5.4.1.1.	Záróüzemű tápegység (flyback converter)	49
5.4.1.2.	Nyitóüzemű (gerjesztő átalakító) tápegység (IT forward converter)	49
5.4.1.3.	Ellenütemű kapcsolóüzemű tápegység (Push-pull converter)	50
5.4.1.4.	Hídkapcsolású kapcsolóüzemű tápegység (Full-bridge converter)	51
5.4.1.6.	A primer oldali kapcsolóüzemű tápegységek jellemző veszteségei	51
5.4.2.	Szekunder oldali kapcsolóüzemű tápegységek (DC-DC konverterek)	51
5.4.2.1.	Feszültségcsökkentő tápegység (buck/step down regulator)	53
5.4.2.2.	Feszültségnövelő tápegység (boost/step up regulator)	54
5.4.2.3.	Polaritásváltó tápegység (inverting regulator)	55
5.4.2.8.	Nagyfrekvenciás transzformátorok és tekercsek	55
5.4.2.4.	Teljesítménykapcsolók	55
5.5.	Tápegységek összehasonlítása	56
5.6.	Szünetmentes energiaellátás	58
6.0	Optoelektronika	58
6.1.	Optoelektronikai alapfogalmak	58
6.1.1.	Fénytechnikai alapfogalmak	58
6.1.2.	Az optoelektronikai eszközök hullámtartománya (optikai spektrum)	58
6.1.3.	Az emberi szem érzékenysége	58
6.1.8.	Hőmérséklet hatása, öregedés	59
6.2.	Fotovevők/detektorok	59
6.2.1.	Fotoellenállás (Light Dependent Resistor, LDR)	60
6.2.2.	Foto-elektromos jelenségek a pn átmenetben	61
5.2.2.1.	Fotoelem	61
6.2.2.2.	Fényelem	61
6.2.3.	Fotodióda	62
6.2.3.2.	PIN dióda	62
5.2.3.3.	Lavina dióda (APD, Avalanche Photo Diode)	62
6.2.8.	Fototranzisztor	63
6.2.4.	Foto-FET	64
6.2.4.1.	Képérzékelők	64
6.3.	Fotoadók (emittálók)	68
6.3.1.	IREĐ	68
6.3.2.	LED	68
6.3.3.	Lézer dióda (SDL)	70
6.4.	Optoelektronikai adó-vevő eszközök	71
6.4.1.	Optocsatolók	71
6.4.2.	Opto-érzékelők	72
6.4.3.	Üvegszál as átvitel alapjai	73
6.4.	Optoelektronikai elven működő mérőeszközök	74

5.4.1.	Forgó jeladók	74
6.4.2.	Lineáris jeladók	75
6.4.3.	Háromszögeléses elven működő lézeres távolságmérők	76
6.7.	Folyadékkristályos kijelzők (LCD)	76
6.7.1.	Működése, tulajdonságai	76
6.7.2.	Folyadékkristályos monitorok (LCD)	79

Gyakorlatok anyaga

3.1. példa: Határozzuk meg a differencia-erősítőnél az alkatrészek eltéréséből adódó hibát

A kapcsolás alkalmazása mérőerősítőként ellenállás típusú szenzorok esetén (teljes hidas kapcsolás):



Legyen $R_{ki0} = 50 \Omega$, $A_0 = 2 \cdot 10^5$ és $|A_{ul}| = 20$

$R_{kiV} = 50 \cdot 20 / 2 \cdot 10^5 = 5 \text{ m}\Omega$! ez érték összemérhető a nyomtatott-áramköri huzalozás ellenállásával.

$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4}$ ellenállás típusú érzékelők pl. nyúlásmérő-bélyeg, hőellenállás, stb.

I_t a híd tápárama

U_d a híd két ága között keletkező különbségi feszültség

U_s a hídágak nyugalmi feszültsége

Az $U_d = 0 \text{ V}$, amennyiben az érzékelő ellenállások nem kapnak jelet. Ilyenkor a hídágak feszültsége azonos.
 $U_s = I_t \cdot R_s / 2$

Legyen ΔR az egyes ellenállások megváltozásának értéke a mérés során! (Két-két átlósan levő ellenállás együtt változik és ellentétes előjellel.) Tételezzük fel, hogy az R_{s1} és R_{s4} értéke ΔR ellenállással nő a másik két ellenállás ugyanilyen mértékben csökken (teljes hidas megoldás).

$$U_d = \frac{I_t}{2} (R_{s4} + \Delta R) - \frac{I_t}{2} (R_{s3} - \Delta R) = I_t \Delta R$$

$$u_{ki} = I_t \Delta R \frac{R_1}{R_2}$$

A kapcsolás aszimmetriájának hatása a közös módusú elnyomási tényezőre

Tételezzük fel, hogy az R_1/R_2 arány eltér az R_3/R_4 aránytól egy $\Delta\alpha$ értékkel. Ez a CMRR értékének leromlását eredményezi, amely mérőerősítők esetén - ahol a hasznos jel a differencia jel - jelentős hibát okozhat.

$$u_{ki} = -u_{be1}(\alpha + \Delta\alpha) + u_{be2}(1 + \alpha + \Delta\alpha) \frac{\alpha}{1 + \alpha} =$$

$$\underbrace{\alpha(u_{be2} - u_{be1})}_{\text{szimmetrikus kimeneti jel}} + \underbrace{u_{be2} \frac{\alpha\Delta\alpha}{1 + \alpha} - u_{be1}\Delta\alpha}_{\text{közös módusú kimeneti hibajel}}$$

$$A_{us} = \alpha$$

$$A_{uk} \big|_{u_{be1}=0} = \frac{\alpha\Delta\alpha}{1 + \alpha} - \Delta\alpha = \frac{-\Delta\alpha}{1 + \alpha}$$

$$CMRR = 20 \log \left(\left| \frac{A_{us}}{A_{uk}} \right| \right) = 20 \log \left(\frac{1 + \alpha}{\frac{\Delta \alpha}{\alpha}} \right)$$

Példa:

Legyen $R_s = 100 \, \Omega$

$I_i = 10 \, \text{mA}$

$\varepsilon = \Delta R / R_s = 2 \cdot 10^{-4}$

$\alpha = 100$

$\Delta \alpha = 1$ azaz az ellenállások arányának hibája 1%

A hasznos jel a kimeneten

$$u_{kih} = I_i \Delta R \alpha = 0.01 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 100 = 20 \, \text{mV}$$

A közös módusú (hiba) jel a kimeneten

$$u_{kik} = U_s \frac{-\Delta \alpha}{1 + \alpha} = 0.01 \cdot 100 \frac{-1}{1 + 100} = -9.9 \, \text{mV}$$

A hibajel összemérhetően magas a hasznos kimeneti jellel!

A közösmódusú elnyomási tényező:

$$CMRR = 20 \cdot \lg(101 \cdot 100) = 80 \, \text{dB}$$

Ahhoz, hogy a hiba a hasznos jelhez viszonyítva 1 % alatt legyen az ellenállásarányoknak jobbnak kell lenni, mint

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \leq \frac{\frac{\Delta R}{R}(1 + \alpha)}{100} = \frac{2 \cdot 10^{-4}(1 + 100)}{100} \approx 2 \cdot 10^{-4} !!$$

3.2 Példa: Tervezzünk egy feszültség/áram átalakítót (távadót)

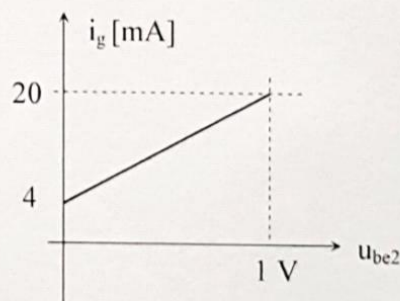
Feltételek:

bemeneti jeltartomány $0 \leq u_{be} \leq 1 \, \text{V}$.

A kimeneti áram változzon a 4-20 mA-es tartományban.

Megoldás:

Válasszuk $R = 100 \, \Omega$! A vezérlő bemenet az u_{be2} lesz. (Az előjelek miatt.) Az u_{be1} az eltolást végzi, azaz 0 V bemeneti feszültség esetén is folyjon 4 mA ('élőnullás' rendszer, a vezeték szakadás vizsgálatára).



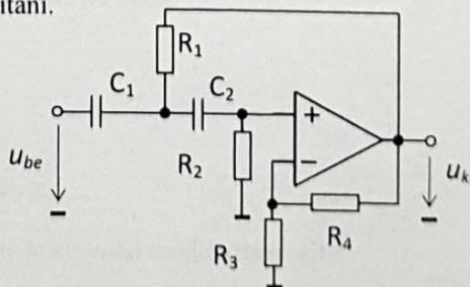
3.5. Példa: Tervezzon felüláteresztő szűrőt közvetlen szűrőtervezéssel

Specifikáció:

$$|A_0| = 1.5, \quad f_c = 2 \, \text{kHz}, \quad Q = 5$$

Megoldás: A 10-s jósági tényező több szűrőfajtánál is a felső határérték, ezért válasszuk a Sallen-Key szűrőt, amellyel 20-s jósági tényezőt is meg lehet valósítani.

A választott kapcsolás:



Alkalmazási feltételek:

$$Q < 20$$

$$|A_o|Q^2 = 1.5 \cdot 5^2 < 100 \quad \text{teljesülnek!}$$

Az aktív felületeresztő szűrő elméleti átviteli függvénye:

$$Y(s) = A_o \frac{\frac{s^2}{\omega_c^2}}{1 + \frac{s}{\omega_o Q} + \frac{s^2}{\omega_c^2}}$$

A kapcsolás átviteli függvénye a tényleges alkatrészekkel kifejezve:

$$Y(s) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{1 + s \left[R_1 (C_1 + C_2) - \frac{R_4}{R_3} R_2 C_2 \right] + s^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

Együttható összehasonlítás alapján:

$$A_o = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad \omega_c = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right) - \frac{R_4}{R_3} \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}$$

Három egyenlet van és hat ismeretlen paraméter, így három paraméter vagy feltétel szabadon választható!

Válasszuk: $C_1 = C_2 = C = 10 \text{ nF}$ és $R_3 = 22 \text{ k}\Omega$!

$$R_4 = R_3 (A_o - 1) = 11 [\text{k}\Omega] \quad \omega_c = \frac{1}{C \sqrt{R_1 R_2}} = \frac{10^8}{\sqrt{R_1 R_2}}, \quad \sqrt{R_1 R_2} = \frac{10^8}{\omega_c} = \frac{10^8}{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^3} = 7957.7$$

$$\frac{1}{Q} = 2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} - (A_o - 1) \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} = \frac{2R_1 - 0.5R_2}{\sqrt{R_1 R_2}} = \frac{2R_1 - 0.5R_2}{7957.7}$$

$$= \frac{1}{7957.7} \left(2 \frac{7957.7^2}{R_2} - 0.5R_2 \right)$$

$$6.283 \cdot 10^{-5} R_2^2 + 0.2 \cdot R_2 - 15915.4 = 0$$

$$R_{2,1,2} = \frac{-0.2 \pm \sqrt{0.04 + 4 \cdot 6.283 \cdot 10^{-5} \cdot 15915.4}}{2 \cdot 6.283 \cdot 10^{-5}} = 14.4 [\text{k}\Omega]$$

$$R_1 = \frac{(7.958 \cdot 10^3)^2}{14.4 \cdot 10^3} = 4.4 [\text{k}\Omega]$$

A nagy jósági tényező szükségessé teszi a szükséges műveleti erősítő határfrekvenciájának meghatározását a kiválasztáshoz:

$$f_c < \frac{0.05 f_T 2Q}{\sqrt{2Q(Q+2)} - 2} \Rightarrow f_T > f_c \frac{\sqrt{2Q(Q+2)} - 2}{0.1Q} = 2 \cdot 10^3 \frac{\sqrt{2 \cdot 5(5+2)} - 2}{0.1 \cdot 5} = 40.27 \cdot 10^3$$

$$f_h = \frac{f_T}{A_o} \cong \frac{40.27 \cdot 10^3}{10^5} = 0.4 [\text{Hz}]$$

A fenti határfrekvenciát mindegyik előkompenzált erősítő tudja.

A képletben alkalmazott jelölések:

f_T = az erősítő tranzit frekvenciája

f_h = az erősítő határfrekvenciája

A_o = az erősítő nyílthurkú erősítése

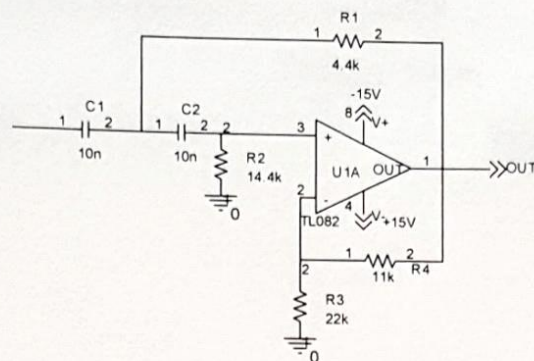
A megtervezett szűrő szimulációjának értékelése:

A szűrő az előírt paramétereket teljesíti.

A határfrekvencián jelentős kiemelése van, amely a tervezési módszerben rejlik.

Szimulációs eredmények:

Kapcsolási rajz:

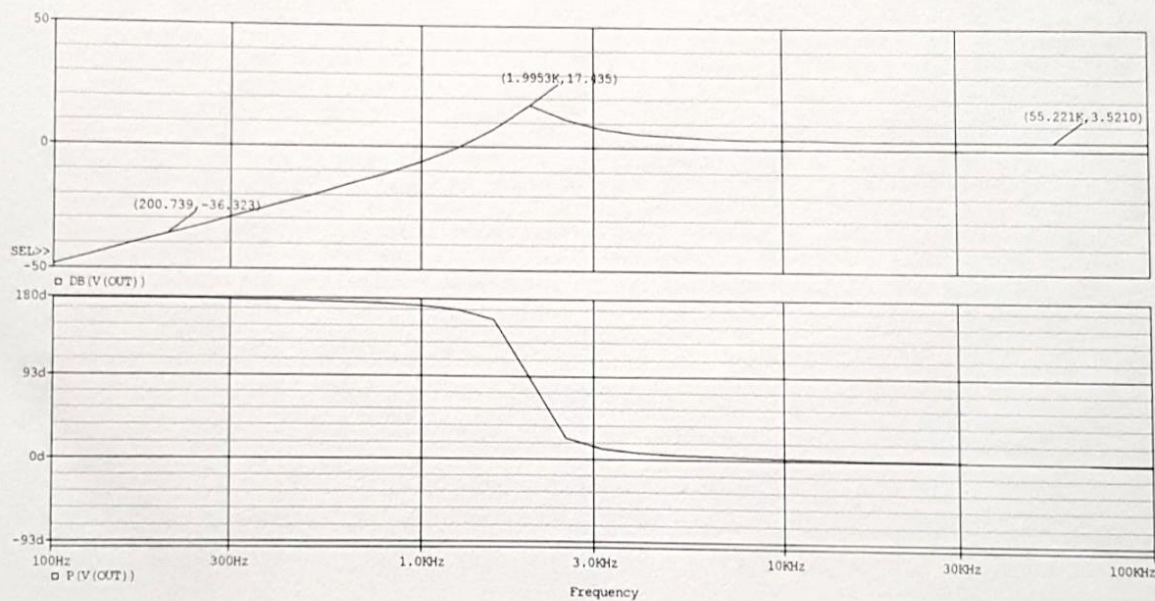


$f=2\text{kHz}$

$Q=5$

$A=1.5$

Átviteli karakterisztika:



a) Tranziens analízis 10 kHz frekvenciájú szinuszos jellel

