



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
**Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar**

**Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék**

**Példatár az Elektrotechnika – elektronika I.-II.  
(BSc) és az Elektronika – elektronikus  
mérőrendszerek (MSc) c. tárgyakhoz**

Készítette: Lövétei István Ferenc – Dr. Szabó Géza

Verzió: 1.2, 2014.július 7.

## Tartalomjegyzék

Előszó.....	3
1 Műveleti erősítő kapcsolások.....	4
1.1 Általános alapismeretek.....	4
1.2 Erősítőkapcsolások (arányos típusú) műveleti erősítővel .....	5
1.3 Integráló és differenciáló kapcsolások .....	15
1.4 Többfokozatú erősítőkapcsolások .....	21

## Előszó

Példatárunk a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karon, a Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék által oktatott elektrotechnika tárgycsoport tantárgyaihoz készült. A tárgycsoport a BSc. képzésben az Elektrotechnika - elektronika I - II tárgyakat, az MSc. képzésben pedig az Elektronika-elektronikus mérőrendszerek tantárgyat tartalmazza.

A tárgycsoport egy részében az un. gyengeáramú elektrotechnika alapelemei és alapkapsolásai kerülnek tárgyalásra. Ezen részek elsajátítását szeretnénk támogatni jelen példatárunkkal. A példatárban régebbi évek zárthelyi példáinak megoldásait mutatjuk be; célunk nem csupán a megoldás rövid bemutatása, hanem e mellett a szükséges háttérismeretek hivatkozása is.

Elképzelésünk szerint példatárunk folyamatosan bővül: jelen verzió a műveleti erősítős erősítő (jellegű) alapkapsolások példáit tartalmazza, de továbbiakban tervezzük mind a többfokozatú erősítőkapcsolásos példák felé történő továbblépést, mind a tranzistoros kapcsolások felé történő továbblépést. A példatárat elektronikus formában tesszük közzé, javasoljuk mindenkinek, használat előtt ellenőrizze, hogy a legutolsó (és így a legbővebb) verzióval rendelkezik-e. Az elektronikus közzététel helye tanszékünk honlapja (azon belül is a tárgycsoport saját honlapja): [www.kjit.bme.hu/](http://www.kjit.bme.hu/)

Szeretnénk felhívni a figyelmet arra, hogy példatárunk önmagában történő forgatása nem megfelelő út a szükséges ismeretek elsajátításához: javasoljuk a gyengeáramú részekhez dr. Sárközy Sándor Elektrotechnika I. című jegyzetét (több kiadásban, pl. J7-857/1); a példák megoldásához pedig dr. Kohut Mátyás (szerk.) Elektrotechnika példatár című jegyzetét (szintén több kiadásban, pl. J7-898). Javasoljuk azt is, hogy a példák ismeretanyagánál mindenki gondoljon vissza a laborméréseken megismert jelenségekre, viselkedésmódokra, nézze vissza a laborgyakorlat jegyzetének vonatkozó részeit: dr. Kloknicer Imre (szerk.) Elektrotechnika laboratóriumi gyakorlatok, Műegyetemi Kiadó, 75017.

Reméljük, hogy kezdeményezésünket, munkánkat hasznosnak fogja találni az olvasó. Mi mindenesetre törekszünk egyre jobb, teljesebb munka létrehozására: jobbító szándékú észrevételeket, javaslatokat szívesen fogadunk.

A szerzők

# 1 Műveleti erősítő kapcsolások

## 1.1 Általános alapismeretek

A műveleti erősítő olyan integrált kapcsolás (integrált áramkör), amelyben több tranzisztoros erősítőfokozat található egymás után sorba kapcsolva (így azok erősítése összeszorozódik). Bemeneti fokozata differenciaerősítő, amely nem egy adott bemeneti pont közös ponthoz képesti feszültségét erősíti, hanem két bemeneti pont között (+ és -, nem invertáló bemenet és invertáló bemenet) értelmezett feszültséget erősít. A differenciaerősítő két, szimmetrikusan felépített és közös részeket is tartalmazó erősítőkapcsolásból áll. Ez azért fontos, mert így ez a kapcsolás jelentősen érzéketlen a munkapont-változásra (hiszen mindkét tranzisztoros rész munkapontja egyformán változik) és érzéketlen a külső, közös ponthoz képest értelmezett zavarokra is. A zavarérzéketlenség azért fontos tulajdonság, mert a teljes műveleti erősítőtől igen nagy erősítést várunk el, így a bemenetén kis zavar (vagy munkapont-változás) a kimeneten hatalmas jelként jelenne meg.

A differenciaerősítő után feszültségerősítő fokozatok találhatóak (általában kettő vagy három), ezek valósítják meg a tényleges nagy feszültségerősítést ("A" osztályú erősítés). Az utolsó, kimeneti fokozat meghajtó-fokozat, ellenütemű, kéttranzisztoros megvalósítással, "AB" osztályú működéssel. Ez az utolsó fokozat feszültséget már nem erősít, de áramot és teljesítményt igen, és nagyon kicsi kimeneti ellenállást biztosít.

Fontos tulajdonsága még a műveleti erősítőnek, hogy belső feszültség-elválasztásokat nem tartalmaz a fokozatok között (nincsenek csatoló-kondenzátorok), így nulla frekvenciától erősít (un. egyenfeszültségű erősítő). Ez azonban olyan munkapont-beállítási problémákat vet fel, amelyek csak +/- tápfeszültség alkalmazásával oldhatóak meg (elvárás, hogy nulla bemenő jel mellett a kimeneti feszültség is nulla legyen).

A műveleti erősítő jellemzői tehát:

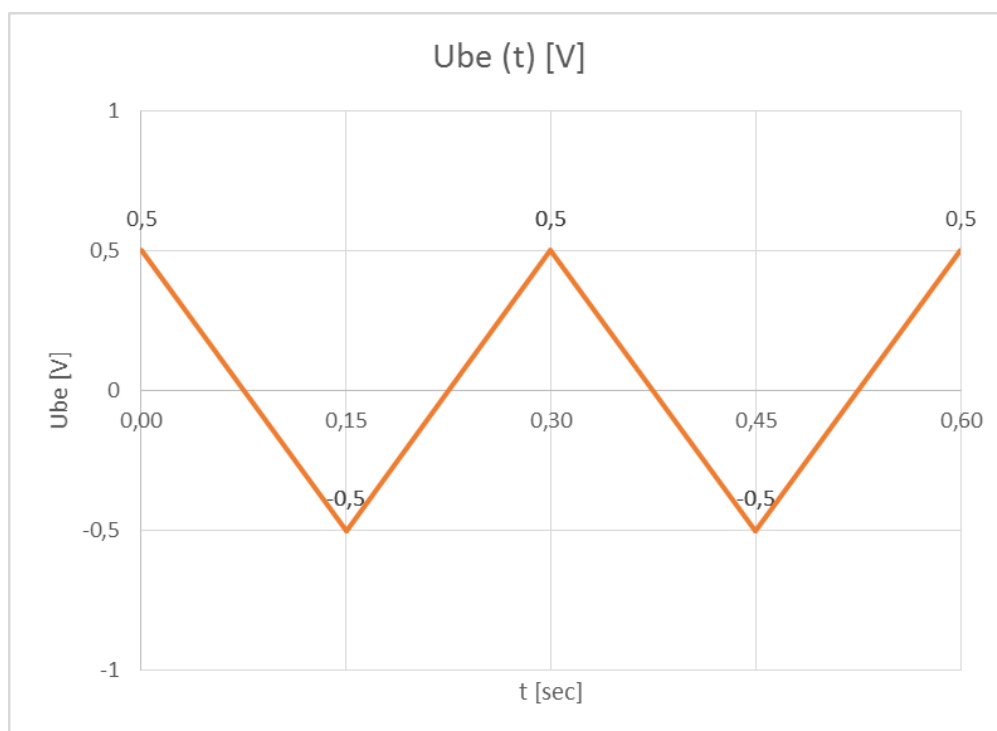
- Igen kis kimeneti ellenállás (elméletileg nullához tart): következménye, hogy a műveleti erősítő működése nem függ attól, hogy milyen terhelésre dolgozik (ellentétben a tranzisztoros fokozatokból);
- Igen nagy bemeneti ellenállás, a bemeneteken befolyó áram nullához tart (a nagy erősítés miatt a bemeneten nem igényel jelentős vezérlőáramot) + ezt még fokozni is szokták FET bemenetű megoldásokkal.
- Erősítésének értelmezése:  $U_{ki}/U_d$ , ahol  $U_d$  a nem invertáló és az invertáló bemenetek közötti feszültségkülönbség, az un. differenciafeszültség;
- Erősítése nagyon nagy, tart a végtelenhez (gyakorlatban  $10^5$ - $10^6$  nagyságrend) - vigyázat, ez az un. nyílthurkú erősítés, ez kapcsolásba építve a műveleti erősítőt, a teljes kapcsolásra már nem igaz;
- Ha a műveleti erősítőt erősítőkapcsolásban használjuk (negatív a visszacsatolás, az invertáló bemenetre csatolunk vissza), a véges kimeneti jel miatt a differenciális feszültség értéke nullának tekinthető.

A műveleti erősítő - ahogy minden erősítő - kimeneti korlátokkal is rendelkezik: a kimeneti feszültség értéke nem haladhatja meg még ideális műveleti erősítő esetében sem a tápfeszültség

értékét (a valóságban ezt a tulajdonságot a rail-to-rail műveleti erősítők biztosítják, a normál műveleti erősítők kimeneti feszültségkorlátja általában a tápfeszültség alatt egy-két voltal található). A megengedett kimeneti feszültségtartomány az un. kivezérlési tartomány.

## 1.2 Erősítőkapcsolások (arányos típusú) műveleti erősítővel

1. Méretezzen erősítőkapcsolást **ideális műveleti erősítővel**, az alábbi paraméterekkel, ha a bemenő jel háromszögjel, az alakja az alábbi ábrán adott:



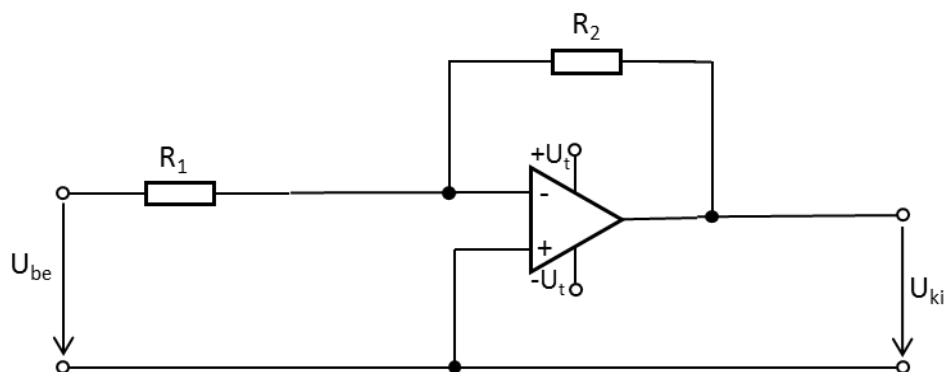
Az elvárt erősítés:

- a) -25,
- b) -50 .

A tápfeszültség értéke: +/- 20 V. A visszacsatoló ágba 50 kΩ-os ellenállás kerüljön beépítésre. Adja meg a kapcsolási rajzot, és rajzolja fel mindkét esetben a kimenő jel alakját!

Megoldás:

Az elvárt erősítés negatív és konstans, ami azt jelenti, hogy invertáló műveleti erősítő kapcsolást kell megvalósítani. A kapcsolás kapcsolási rajza:



Az invertáló műveleti erősítő erősítése:

$$A = -\frac{R_2}{R_1}$$

a) Az első esetben:

$$|-25| = \frac{50}{R_1}$$

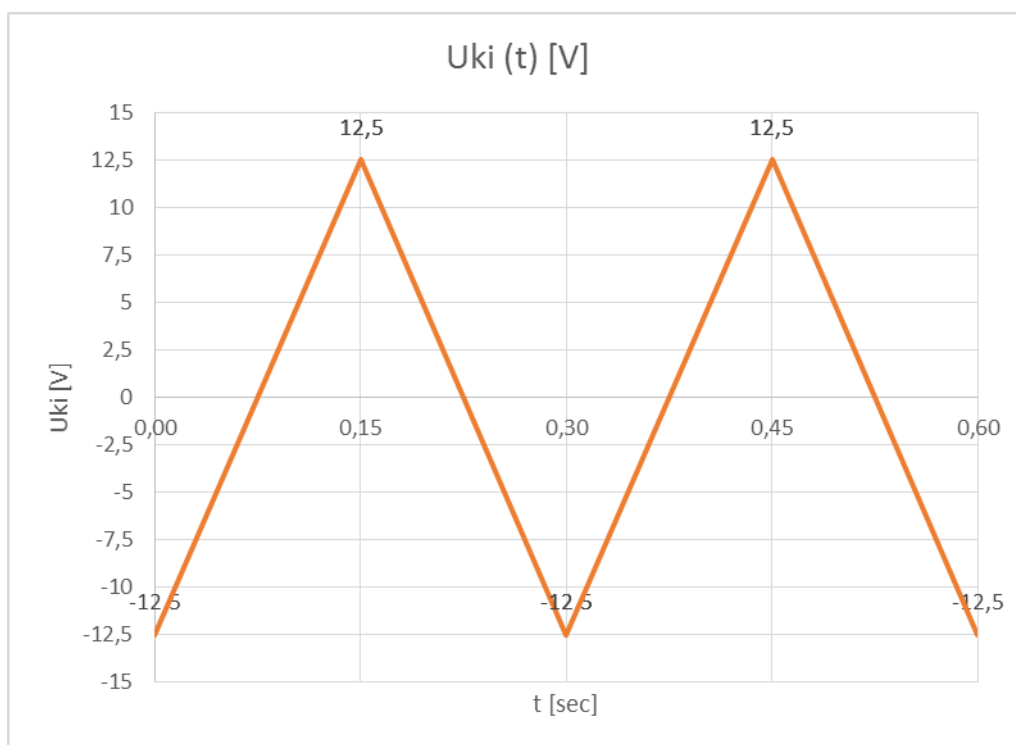
$$R_1 = \frac{50}{25}$$

$$R_1 = 2$$

Az első esetben az  $R_1$  ellenállás értéke 2 k $\Omega$ . A kimenő jel maximuma és minimuma:

$$-25 * (+/-)0,5 = +/- 12,5 V$$

A kimenő jel alakja:



b) A második esetben az erősítés:

$$|-50| = \frac{50}{R_1}$$

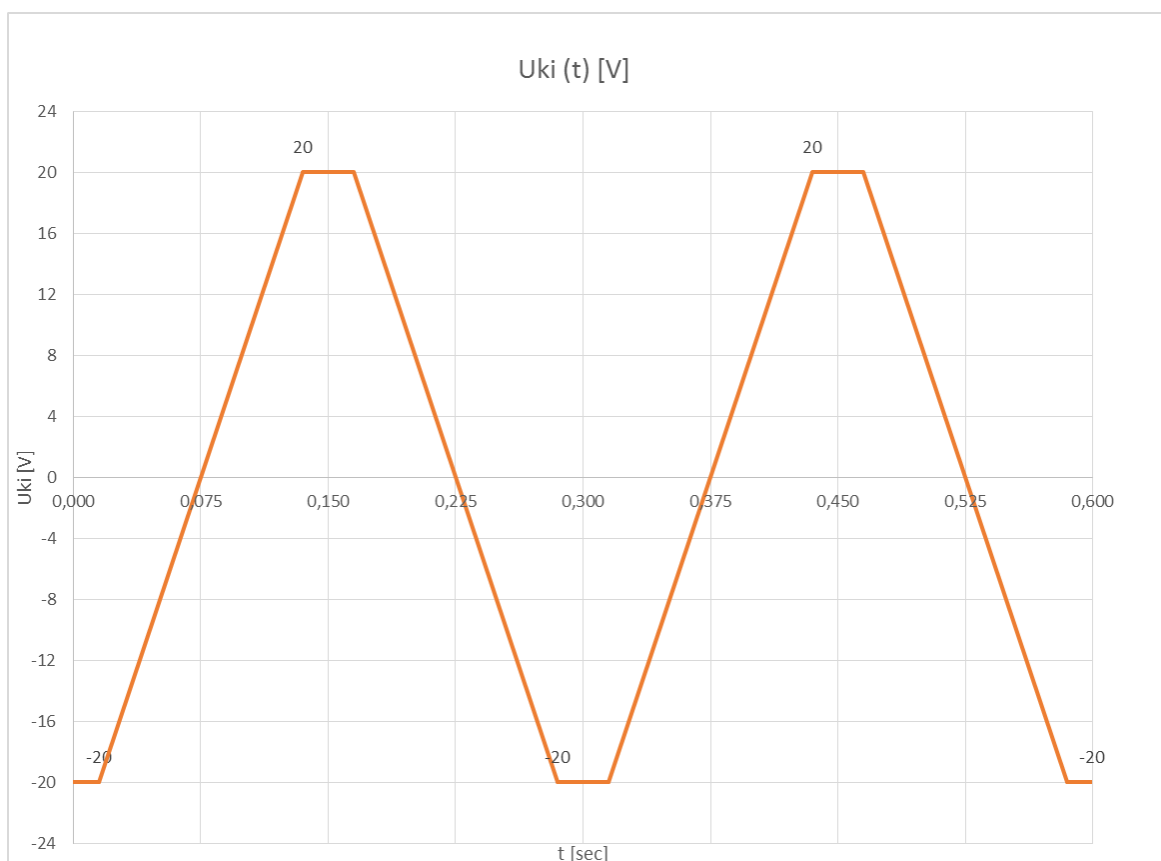
$$R_1 = \frac{50}{50}$$

$$R_1 = 1$$

A második esetben az  $R_1$  ellenállás értéke 1 k $\Omega$ . A kimenő jel maximuma és minimuma:

$$-50 * (+/-)0,5 = +/- 25 V$$

A második esetben a kimenő jel maximuma és minimuma a kivezérlési tartományon kívülre esik, így a maximális és minimális érték, amely a kimeneten megjelenhet +/- 20 V. Ezért a kimeneten nem szabályos háromszögjel jelenik meg. A kimenő feszültség -20 V-ról indul, és addig konstans, amíg a bemenő feszültség értéke 0,5 V-ról 0,4 V-ra csökken. Ez az időpont a  $t = 0,015$  másodpercnél van ( $0,4 * -50 = -20$ ). Ez után a kimenő feszültség értéke nő a bemenő jel változása miatt, amíg a 20 V-ot el nem éri. Ekkor a bemenő jel éppen -0,4 V, ez után a kimeneten állandó, 20 V-os feszültség jelenik meg. Ez a töréspont a  $t = 0,135$  ( $0,15 - 0,015 = 0,135$ ) másodpercnél van, majd a fél periódus végéig a kimeneten konstans 20 V jelenik meg. A kimenő jel alakja a második fél periódusban az előzőekben bemutatotthoz hasonlóan számítható. A kimenő jel alakja:



2. Méretezzen **nem invertáló erősítőkapcsolást** ideális műveleti erősítővel, az alábbi paraméterekkel:

- elvárt erősítés: 20 dB,
- használható ellenállások: 1 kΩ, 2 kΩ, 5 kΩ, 10 kΩ, 20 kΩ, 50 kΩ, ha más értékre van szüksége, akkor ezekből állítsa össze, egy értékből több darab is felhasználható, de törekedjen a minimális ellenállásszámra.

a) Rajzolja fel a kapcsolási rajzot!

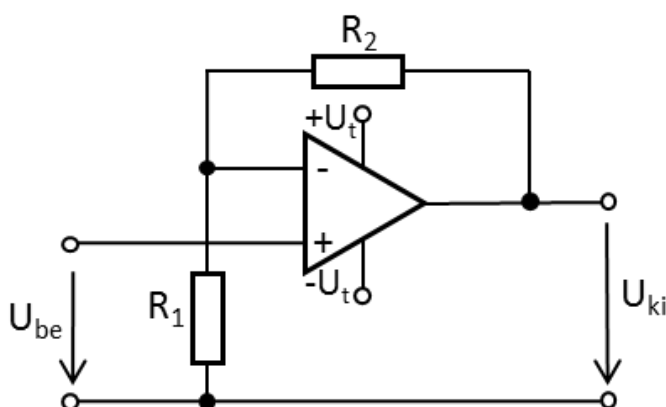
b) Adja meg, hogy a műveleti erősítő milyen paramétereit vesszük figyelembe a kapcsolás létrehozásánál, vagyis milyen paraméterekkel rendelkezik az ideális műveleti erősítő. Adja meg a szükséges ellenállások értékeit. Adja meg a kapcsolás bementi ellenállásának értékét is!

Megoldás:

Az ideális műveleti erősítő paramétereit:

- $A_u \rightarrow \infty$ ,
- $\Delta U \rightarrow 0$  (lineáris erősítő üzem),
- $i_{be}^+ = i_{be}^- \rightarrow 0$ ,
- $R_{be} \rightarrow \infty$ ,
- $R_{ki} \rightarrow 0$ .

a) A nem invertáló erősítőkapcsolás kapcsolási rajza:



b) A nem invertáló műveleti erősítő erősítése:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_u |_{dB} = 20 * \log A_u$$

ezért:

$$20 = 20 \log A_u$$

$$\log A_u = 1$$

$$A_u = 10$$



Ennek következtében:

$$10 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 9$$

A legegyszerűbb megoldás:

- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,
- $R_2 = 9 \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega$ .

Természetesen lehetséges más kombináció is, amely a fenti egyenletet kielégíti.

A kapcsolás bemeneti ellenállásának értéke – mivel a műveleti erősítő ideális, és  $R_{be} \rightarrow \infty$ . valamint a műveleti erősítő nem invertáló bemenete közvetlenül a kapcsolás bemenete is -  $\rightarrow$  végtelen.

3. Méretezzen **invertáló erősítőkapcsolást** ideális műveleti erősítővel, az alábbi paraméterekkel:

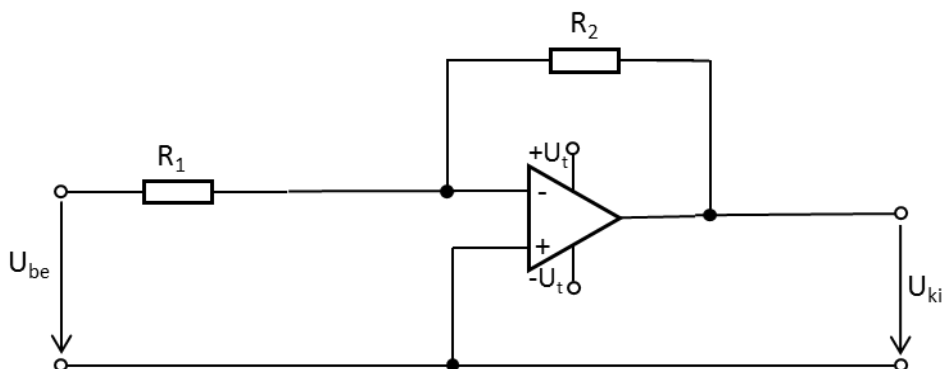
- elvárt erősítés: 40 dB,
- használható ellenállások: 1 k $\Omega$ , 2 k $\Omega$ , 5 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ , 20 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$ , ha más értékre van szüksége, akkor ezekből állítsa össze, egy értékből több darab is felhasználható, de törekedjen a minimális ellenállásszámra.

a) Rajzolja fel a kapcsolási rajzot, adja meg a szükséges ellenállások értékeit!

b) Adja meg a kapcsolás bementi ellenállásának értékét is! Adja meg, miként változik az erősítés értéke, ha a kapcsolás bemenetre is kapcsolódó ellenállás értékét a duplájára növeljük!

Megoldás:

a) Az invertáló erősítőkapcsolás kapcsolási rajza:



Az invertáló műveleti erősítő erősítése:

$$|A_u|_{dB} = 40 \text{ dB} = 20 * \log \left| \frac{U_{ki}}{U_{be}} \right|$$

ezért:

$$40 = 20 \log \left| \frac{U_{ki}}{U_{be}} \right|$$

$$\log \left| \frac{U_{ki}}{U_{be}} \right| = 2$$

$$\left| \frac{U_{ki}}{U_{be}} \right| = |A| = 100$$

így:

$$A = -100$$

Tudjuk azt is, hogy:

$$A = -\frac{R_2}{R_1}$$

A legegyszerűbb választás:

- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,
- $R_2 = 50 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega$ .

A bemeneti ellenállás:

Mivel a műveleti erősítő invertáló bemenete ebben a kapcsolásban közel nulla feszültségen van (un. virtuális földpont), így a bemenet és a nulla feszültségű pont között az  $R_1$  ellenállás látszik:

- $R_{be} = R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ .

b) Ha a bemenetre kapcsolódó ellenállást a duplájára növeljük, vagyis:

$$R'_1 = 2 * R_1 = 2 * 1 = 2 \text{ k}\Omega$$

Ezzel:

$$A' = -\frac{R_2}{R'_1} = -\frac{100}{2} = -50$$

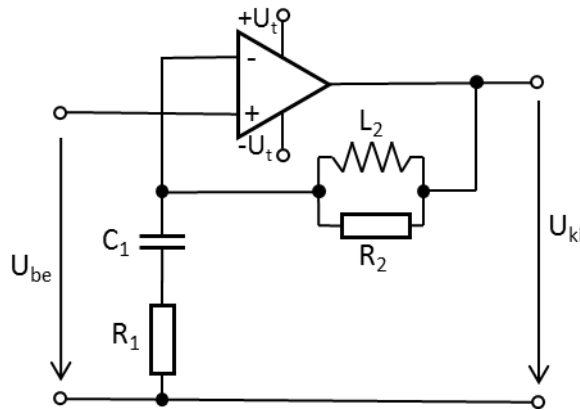
Ezzel az erősítés értéke a korábbi érték felére csökken.

4. (MSc-s szintű feladat) Adott egy műveleti erősítőkapcsolás (a műveleti erősítő ideális). A műveleti erősítő nem invertáló bemenete a teljes kapcsolás bemenete, az invertáló bemenet és a kapcsolás földpontja között egy soros tag található:  $R_1$  és  $C_1$ ; az invertáló bemenet és a műveleti erősítő kimenete (egyben a kapcsolás kimenete is) között pedig egy párhuzamos tag van:  $R_2$  és  $L_2$ . Adja meg a kapcsolási rajzot, adja meg az erősítés képletét a frekvencia függvényében!

Adatok:  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$      $C_1 = 10 \text{ mF}$      $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$      $L_2 = 50 \text{ mH}$

Megoldás:

A kapcsolási rajz:



A kapcsolás erősítése:

$$A_u = \frac{U_{ki}}{U_{be}}$$

A kondenzátor impedanciája:

$$Z_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1}$$

A tekercs impedanciája:

$$Z_{L2} = j\omega L_2$$

A kimenő feszültség értéke (hasonlóan a 2. példa erősítésképletéhez, csak az ottani egyedülálló ellenállások helyett itt a megfelelő /soros vagy párhuzamos/ impedanciák kerülnek a képletbe):

$$U_{ki} = U_{be} + U_{be} * \frac{R_2 \times Z_{L2}}{R_1 + Z_{C1}}$$

A kapcsolás erősítése:

$$A_u = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{U_{be} + U_{be} * \frac{R_2 \times Z_{L2}}{R_1 + Z_{C1}}}{U_{be}} = 1 + \frac{R_2 \times Z_{L2}}{R_1 + Z_{C1}}$$

A frekvenciafüggés:

$$\omega = 2 * \pi * f$$

Az adott kapcsolás frekvenciafüggő erősítése (komplex):

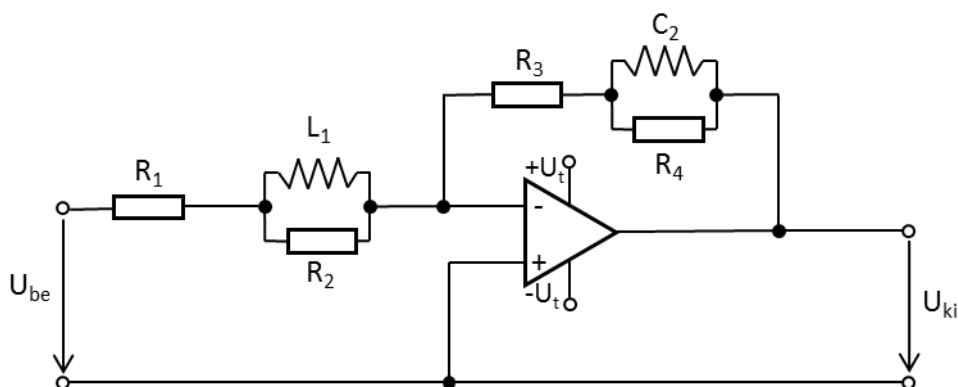
$$A_u = 1 + \frac{30 * 10^3 \times (j * 2 * \pi * f * 50 * 10^{-3})}{10 * 10^3 + \frac{1}{j * 2 * \pi * f * 10 * 10^{-3}}}$$

5. (MSc-s szintű feladat) Adott egy műveleti erősítőkapcsolás (a műveleti erősítő ideális). A műveleti erősítő invertáló bemenete és a teljes kapcsolás bemenete között egy összetett tag található, ahol  $L_1$  és  $R_2$  párhuzamosan van kapcsolva, és velük sorosan  $R_1$  tag áll. Az invertáló bemenet és a műveleti erősítő kimenete (egyben a kapcsolás kimenete is) között szintén egy összetett tag van, ott  $R_4$  és  $C_2$  van párhuzamosan kapcsolva, és velük sorosan  $R_3$  tag áll. Adja meg a kapcsolási rajzot és adja meg az erősítés képletét a frekvencia függvényében!

Adatok:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$        $C_2 = 10 \text{ }\mu\text{F}$        $L_1 = 1 \text{ H}$

Megoldás:

A kapcsolási rajz:



Ez egy invertáló műveleti erősítő kapcsolás. A kapcsolás erősítése:

$$A = -\frac{R_v}{R_{be}}$$

A tekercs impedanciája:

$$Z_{L1} = j\omega L_1$$

A kondenzátor impedanciája:

$$Z_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2}$$

A kapcsolás erősítése:

$$A_u = -\frac{R_v}{R_{be}} = -\frac{R_3 + Z_{C2} \times R_4}{R_1 + Z_{L1} \times R_2}$$

A frekvenciafüggés:

$$\omega = 2 * \pi * f$$

Az adott kapcsolás frekvenciafüggő erősítése (komplex):

$$A_u = -\frac{10 * 10^3 + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \times (10 * 10^3)\right)}{10 * 10^3 + (j\omega L_1 \times (10 * 10^3))}$$

$$A_u = -\frac{10 * 10^3 + \left(\frac{1}{j * \omega * 10 * 10^{-5}} \times (10 * 10^3)\right)}{10 * 10^3 + ((j * \omega) \times (10 * 10^3))}$$

Ábrázoljuk MATLAB-ban az erősítés-frekvencia ( $\lg \omega$ ) függvényt! (Ez nem része a feladatnak, csak a szemléltetést segíti.) Az erősítésre egy komplex szám adódik, ennek abszolút értéke:

$$|A_u| = \sqrt{(Re(A_u))^2 + (Im(A_u))^2}$$

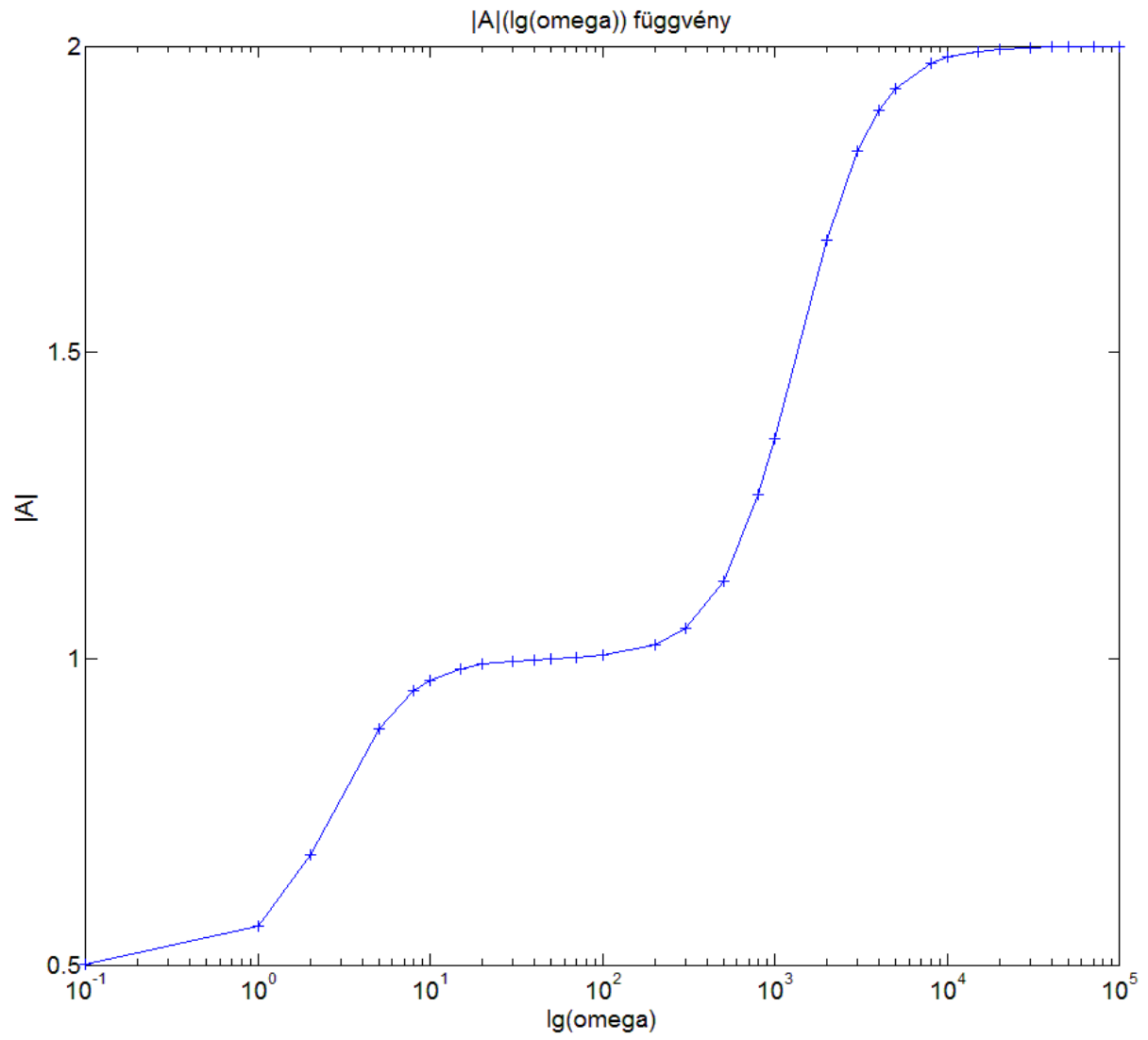
Az ábrázolt frekvenciatartomány: 0 Hz – 100 kHz, a vízszintes tengelyen  $\lg \omega$ , a függőleges tengelyen az erősítés abszolút értéke található.

Látható, hogy nagyon kis frekvenciatartományban is erősít, az erősítés ekkor tart a 0,5 értékhez.

$$\lim_{f \rightarrow 0} |A| = 0,5$$

A frekvencia növekedésével az erősítés nő, nagyon magas frekvenciák esetén tart a 2 értékhez.

$$\lim_{f \rightarrow \infty} |A| = 2$$



### 1.3 Integráló és differenciáló kapcsolások

1. Milyen műveleti erősítő kapcsolás látható az alábbi ábrán?

a) Adja meg a kimenő jel időbeni alakját, ha a bemenő jelet az alábbi diagram szemlélteti (a műveleti erősítő ideálisnak tekinthető)!

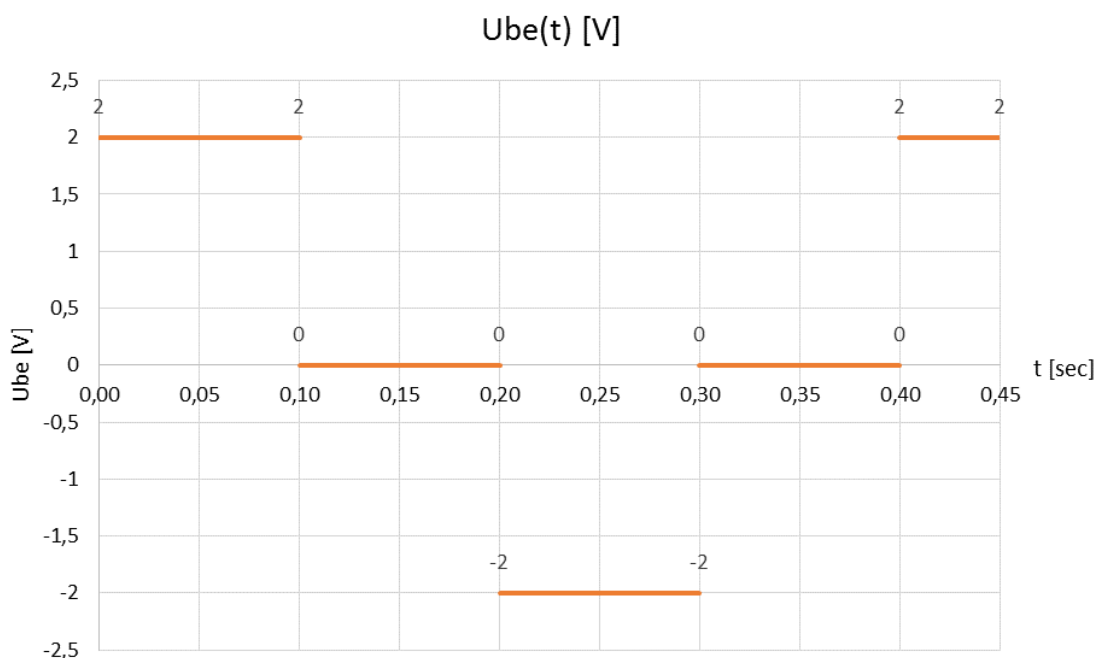
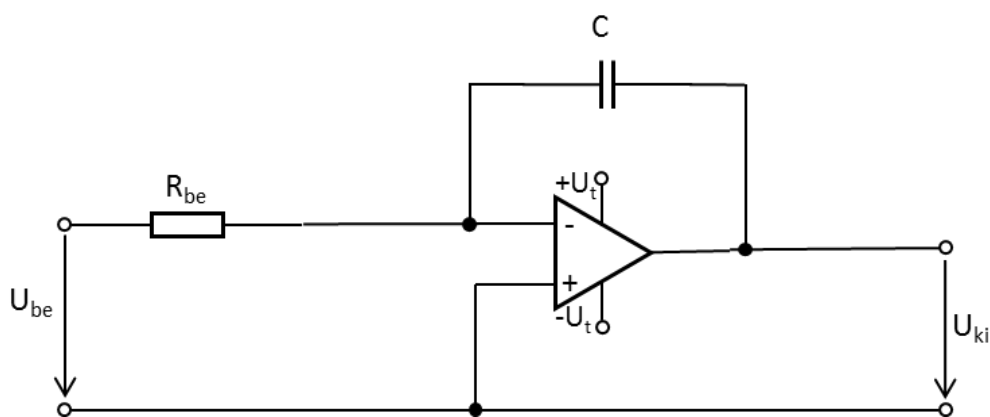
Mi történik akkor, ha a periódusidőket:

b) a tizedére,

c) az ötszörösére

változtatjuk?

Adatok:  $R_{be} = 10\text{k}\Omega$      $C = 10\mu\text{F}$      $U_t = \pm 12\text{V}$



Megoldás:

a) A rajzon ideális integráló típusú műveleti erősítő kapcsolás látható. Ebben az esetben:

$$U_{ki}(t) = (U_0) - \frac{1}{R_{be} * C} \int U_{be}(t) dt = (U_0) - \frac{U_{be}}{R_{be} * C} * [t]_k^v$$

ahol  $U_0$  a kimenő jel értéke a kezdeti időpillanatban,  $t_k$  és  $t_v$  a periódusidő az intervallum elején és végén.

Az integrálási időállandó:

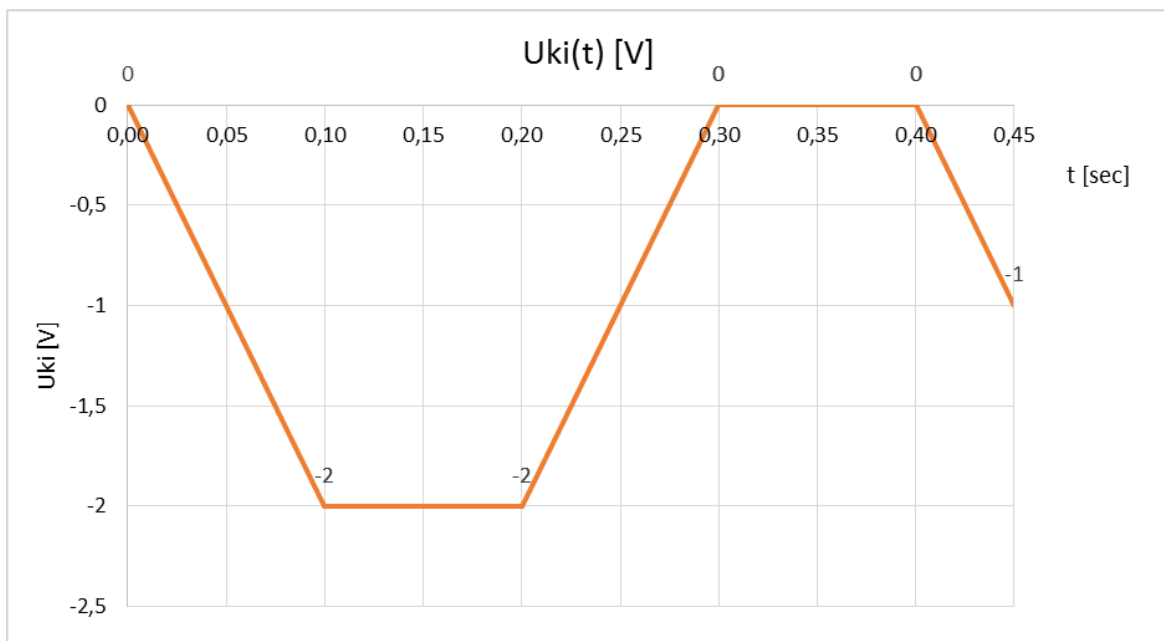
$$T = R_{be} * C = 10 * 10^3 * 10 * 10^{-6} = 0,1 \text{ sec}$$

Az integrálást ebben az esetben szakaszonként kell elvégezni! Fontos megjegyezni, hogy a kimeneten az integrálás mellett előjelváltás is van.

$$U_{ki} = (U_0) - \frac{U_{be}}{T} * [t]_k^v = 0 - \frac{2}{0,1} * (0,1 - 0) = -2 \text{ V}$$

Ezért a kimenő jel alakja – a kezdeti időpontban zérusnak tekintve – 0,1 másodpercig csökken, eléri a -2V-ot. Ez után a bemenő jel értéke zérus lesz, az integrálás eredménye is zérus, így a kimenő jel tartja az előző értéket, ami -2V. Amikor a bemenő jel -2V-ra változik, az integrátor értelmében a kimeneten egy lineárisan növekvő feszültség jelenik meg, amelynek kezdeti értéke az előzőleg tartott -2V. A jel értéke addig az időpillanatig nő, amíg a bemeneten -2V feszültség van. Amikor a bemeneten ismét 0V lesz, az integrálás értéke zérus lesz, így a kimeneten ismét 0V jelenik meg.

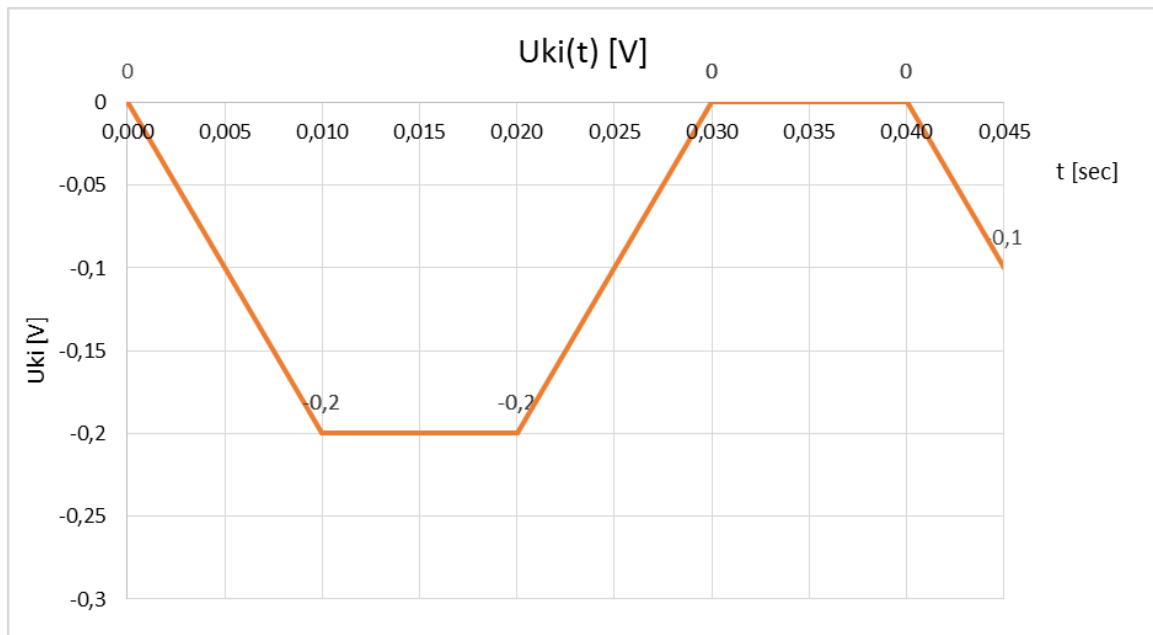
A kimenő jel alakja:



b) Ebben az esetben a kimeneti jel alakja megváltozik, a jel csak -0,2V értékre fog lecsökkenni.  
 $-\frac{U_{be}}{T} * [t]_k^v = -\frac{2}{0,1} * (0,01 - 0) = -0,2 \text{ V}$  (megjegyzés: rövidebb ideig integráljuk ugyanazt a bemeneti jelet, amit az előbb; így az eredmény is kisebb lesz.)



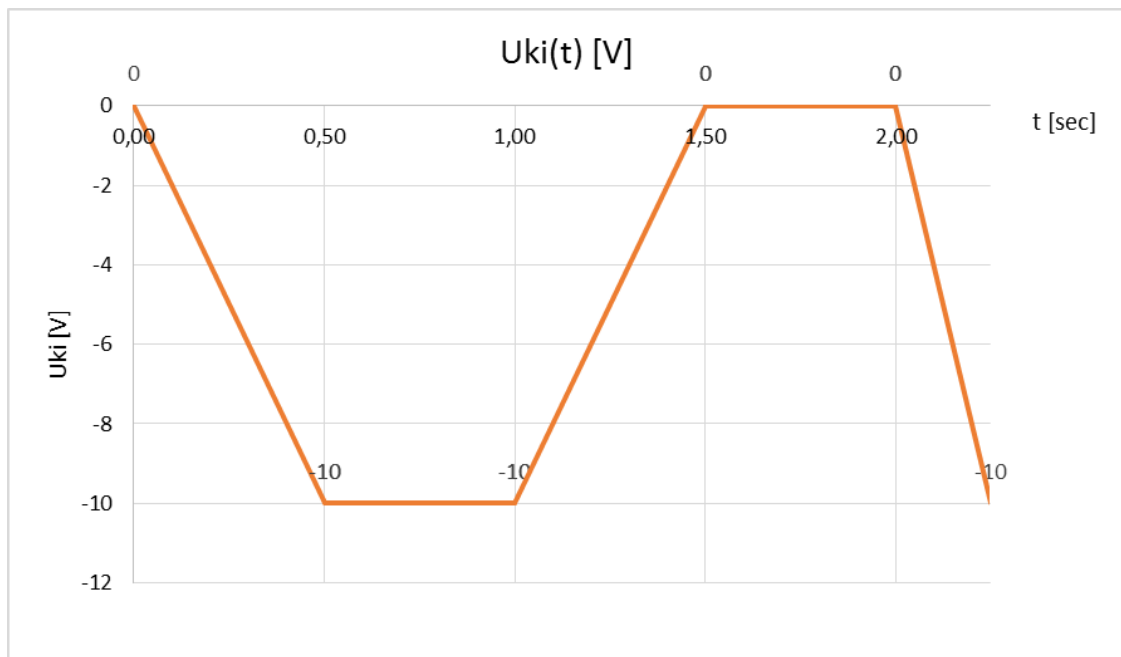
A kimenő jel alakja az előző megoldáshoz hasonló, a különbség annyi, hogy a periódusidő a tizedére csökken, így az integrálási idő is a tizede lesz, a jel alakja ezért csak -0,2V értékig tud lecsökkenni.



c) Ebben az esetben a kimenő jel értéke -10V lesz.

$$-\frac{U_{be}}{T} * [t]_k^v = -\frac{2}{0,1} * (0,5 - 0) = -10 \text{ V}$$

A jelalak:



2. Milyen műveleti erősítő kapcsolás látható az alábbi ábrán?

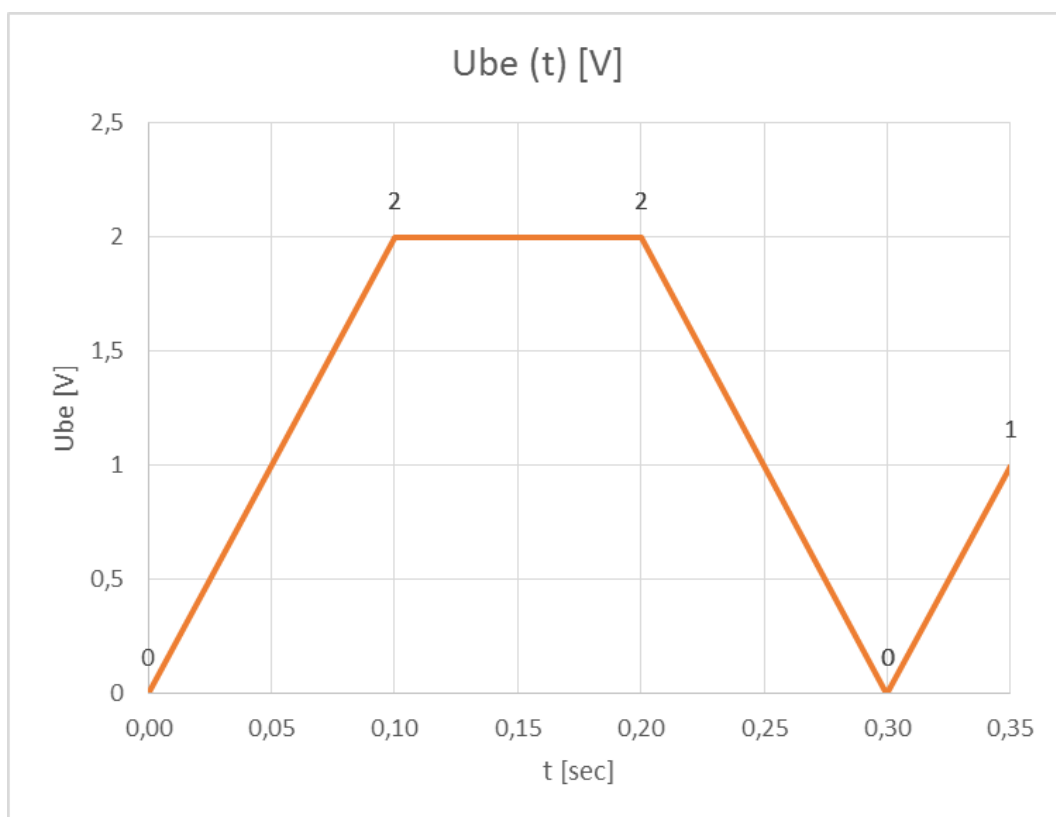
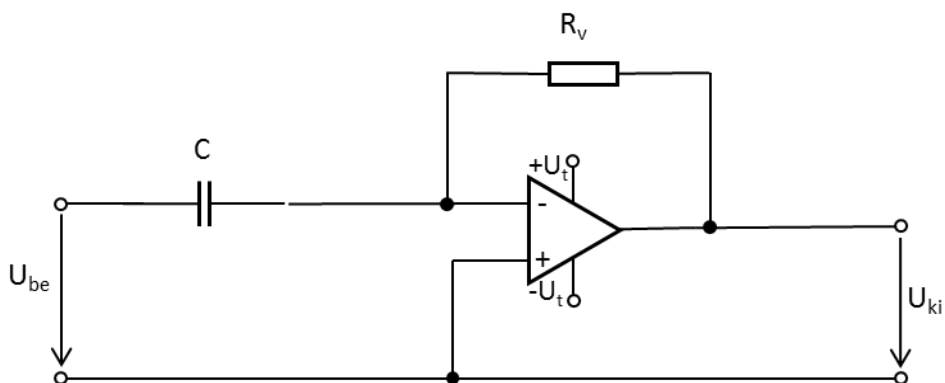
- a) Adja meg a kimenő jel időbeni alakját, ha a bemenő jelet az alábbi diagram szemlélteti (a műveleti erősítő ideális)!

Mi történik akkor, ha a periódus időket:

- b) a tizedére,  
c) a tízszeresére

változtatjuk?

Adatok:  $R_v = 10\text{k}\Omega$      $C = 10\mu\text{F}$      $U_t = \pm 12\text{V}$



Megoldás:

- a) A rajzon ideális differenciáló típusú műveleti erősítő kapcsolás látható. Ebben az esetben:

$$U_{ki}(t) = -R_v * C * \frac{dU_{be}}{dt}$$

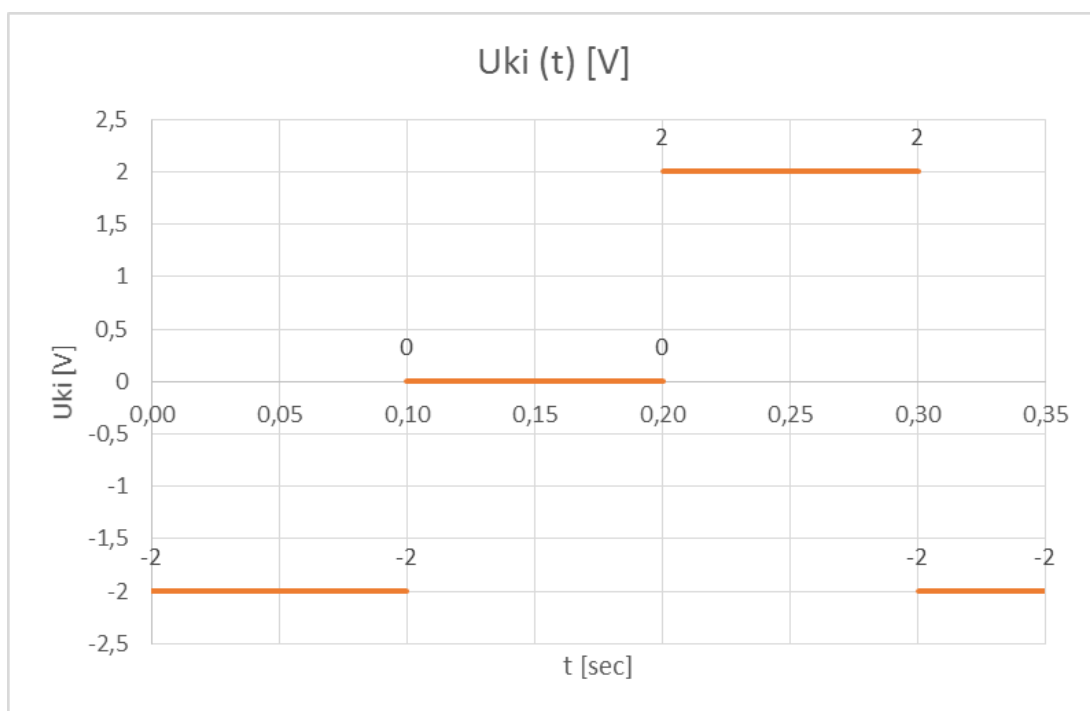
A differenciálási időállandó:

$$T = R_v * C = 10 * 10^3 * 10 * 10^{-6} = 0,1 \text{ sec}$$

A differenciálást ebben az esetben szakaszonként kell elvégezni! Fontos megjegyezni, hogy a kimeneten a differenciálás mellett előjelváltás is van!

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,1 * \frac{2}{0,1} = -2 \text{ V}$$

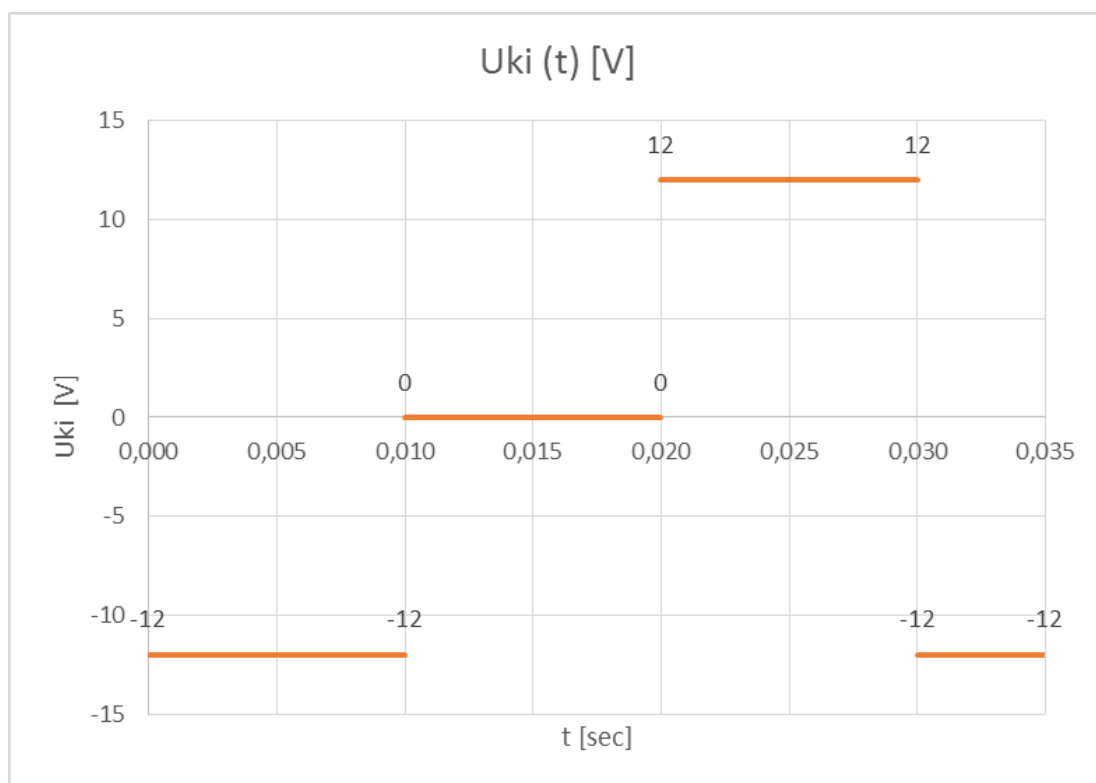
A kimenő jel értéke a 0-0,1 másodperc közötti intervallumon a differenciálást elvégezve konstans -2V. Ha a bemenő jel konstans, akkor a differenciálás eredménye zérus, a kimenő jel értéke konstans 0V. Ha a bemenő jel értéke 2V-ról 0V-ra csökken, akkor ott a differenciálás miatt a kimenő jel értéke konstans 2V lesz. Így a kimenő jel alakja:



- b) Ebben az esetben a kimeneti jel alakja megváltozik, a differenciálást az eredeti periódusidő tizedrészén kell elvégezni, vagyis

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,1 * \frac{2}{0,01} = -20 \text{ V}$$

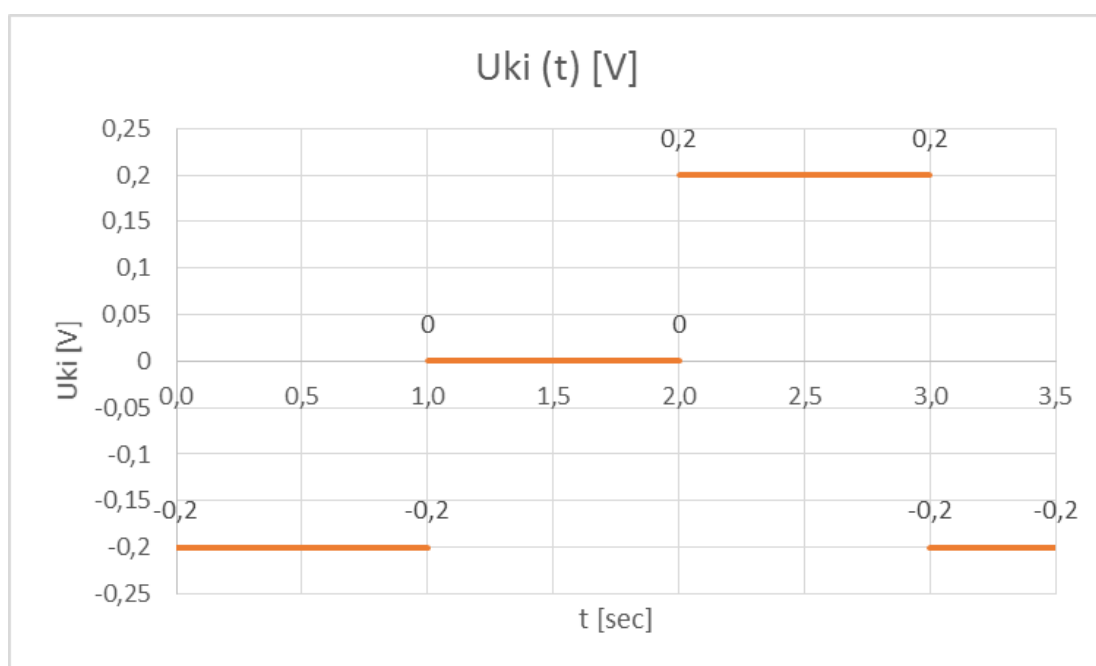
Az ideális műveleti erősítő kivezérlés tartománya a maximálisan a tápfeszültség, +/-12V, vagyis ennél nagyobb értékű jel a kimeneten nem jelenhet meg. A kimenő jel alakja az előzőhöz hasonló, de a kimeneti értéktartomány +/- 12V. A kimenő jel alakja:



- c) Ebben az esetben a kimeneti jel alakja megváltozik, a differenciálást az eredeti periódusidő tízszeresén kell elvégezni, vagyis

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,1 * \frac{2}{1} = -0,2 V$$

A kimenő jel tartománya ezért +/-0,2 V lesz. A kimenő jel alakja:



## 1.4 Többfokozatú erősítőkapcsolások

(MSc-s feladatok)

Mivel a műveleti erősítő kimeneti ellenállása kicsit (tart a nullához), ezért a műveleti erősítővel felépített kapcsolások számára (elméletben) érdektelen, mivel (milyen további fokozattal) terhelik őket. Ezért az ismert alkapcsolásokat tartalmazó többfokozatú műveleti erősítő kapcsolásokat nyugodtan szétválaszthatjuk az egyes alkapcsolások sorozatára, és külön-külön, lépésenként elemezhetjük a viselkedésüket, figyelembe véve azt, hogy a sorban egy következő kapcsolat bemeneti feszültsége az előző fokozat kimeneti feszültsége lesz.

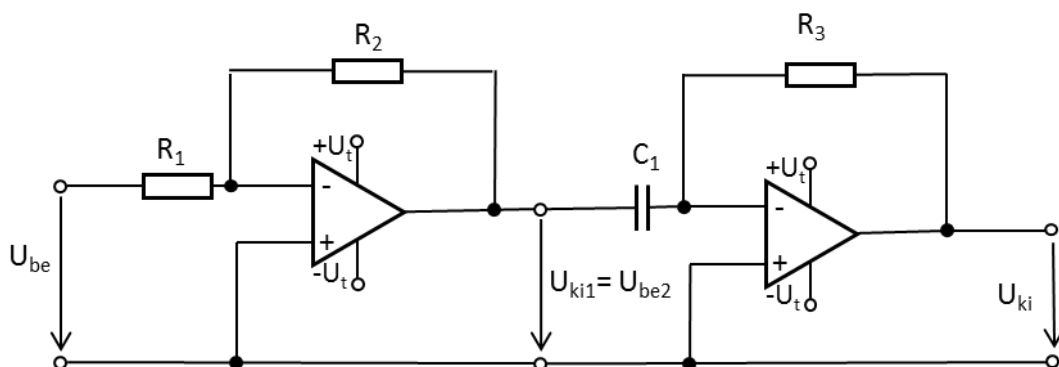
1. Adott egy kétfokozatú műveleti erősítőkapcsolás, mindkét műveleti erősítő ideális. Az első (bemeneti) fokozat műveleti erősítőjének nem invertáló bemenete a teljes kapcsolás földpontjára csatlakozik, invertáló bemenetére a teljes kapcsolás bemenetéről  $R_1$  ellenállás, a műveleti erősítő kimenetéről  $R_2$  ellenállás kapcsolódik. Az első fokozat műveleti erősítőjének kimenete a fokozat kimenet is, ez közvetlenül a második fokozat bemenetét hajtja meg. A második fokozat műveleti erősítőjének nem invertáló bemenete szintén a teljes kapcsolás földpontjára csatlakozik, invertáló bemenete és a fokozat bemenete között  $C_1$  kondenzátor található, míg az invertáló bemenet és fokozat (és egyben a teljes kapcsolás) kimenete között  $R_3$  ellenállás található. A tápfeszültség:  $\pm 15$  V.

- Adja meg a kapcsolási rajzot! Határozza meg a kimeneti feszültség pontos (értékekkel adott) jelalakját, ha a bemeneti feszültség  $\pm 1$  V maximális értékű szimmetrikus háromszög-jel  $T=0,1$  ms periódusidővel (a jel induláskor  $-1$  V értékről növekszik  $+1$  V értékig).
- Adja meg, miként változik a kimeneti jel alakja, ha a bemeneti jel periódusidejét a korábbi hússzorosára növeljük!
- Adja meg, mi változik a működésben, ha az első fokozat műveleti erősítője nem közvetlenül a teljes kapcsolás földpontjára csatlakozik, hanem egy  $R_4$ -es ellenálláson keresztül kerül oda lekötésre.

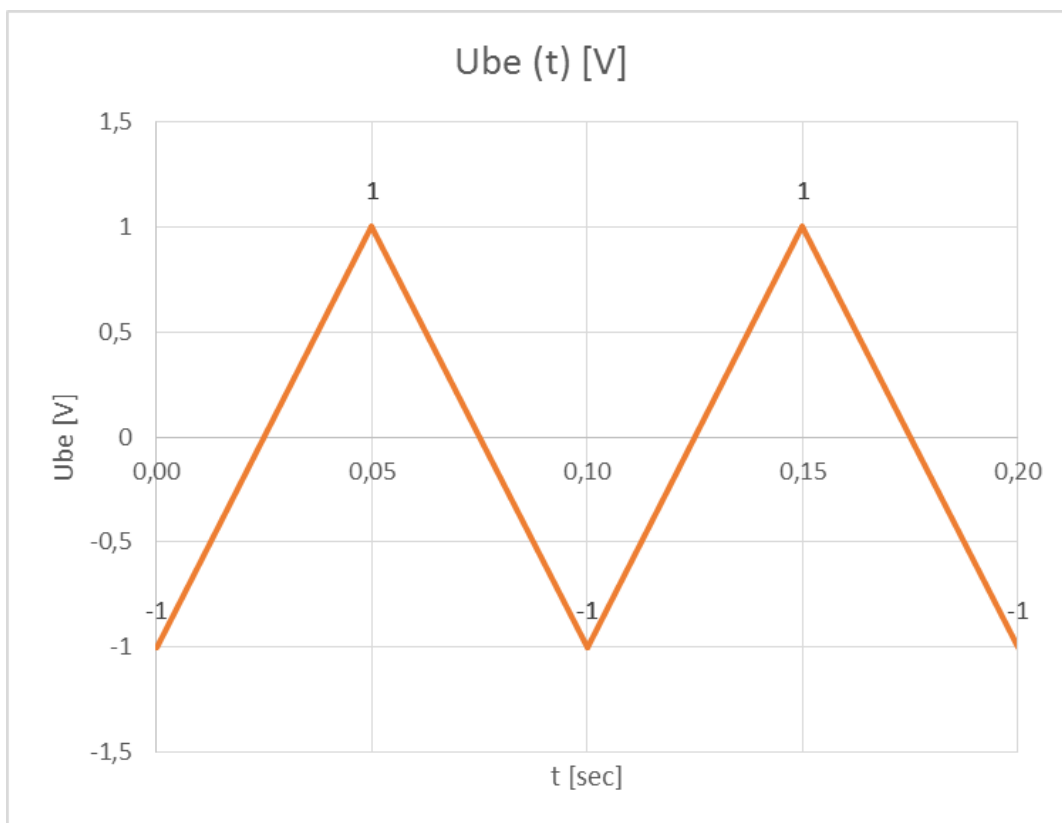
Adatok:  $R_1 = 10$  k $\Omega$      $R_2 = 20$  k $\Omega$      $R_3 = 1$  k $\Omega$      $C_1 = 100$  nF     $U_t = \pm 15$  V

Megoldás:

A kapcsolási rajz:



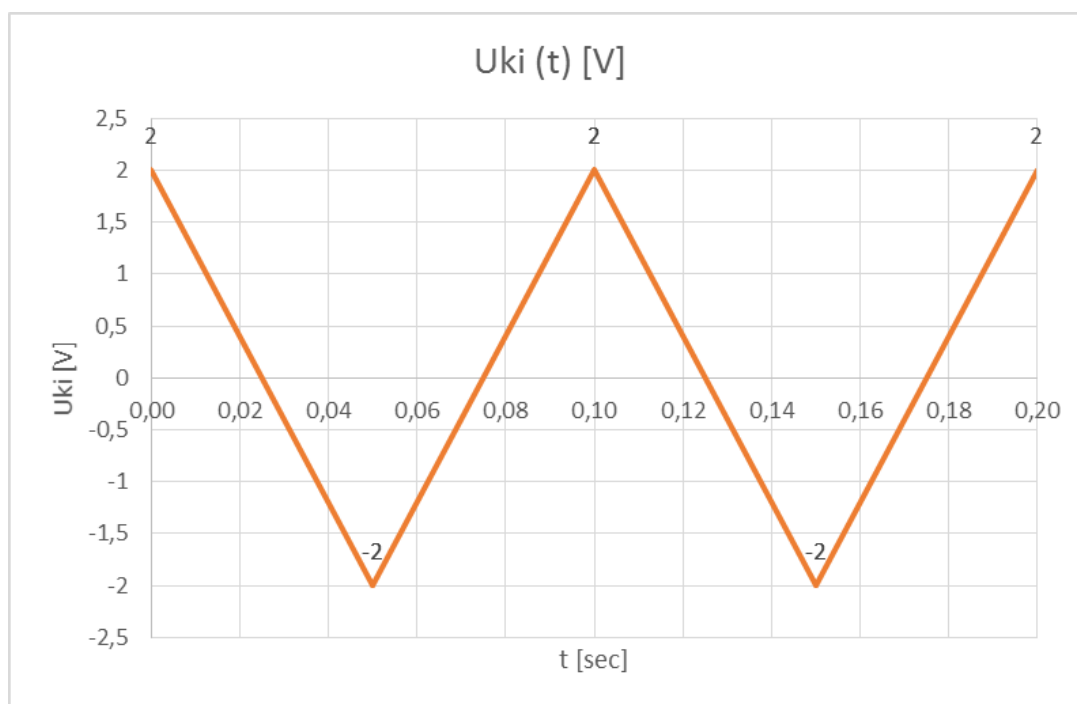
A teljes kapcsolás bemenő jelének alakja:



Az első fokozat egy invertáló erősítő műveleti kapcsolás, melynek erősítése:

$$A_1 = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{20 * 10^3}{10 * 10^{-3}} = -2$$

Ezért az első fokozat után a kimenő jel alakja:



A második fokozat egy differenciálós műveleti erősítő kapcsolás. A fokozat erősítése:

$$U_{ki}(t) = -R_3 * C_1 * \frac{dU_{be}}{dt}$$

a) A differenciálási időállandó:

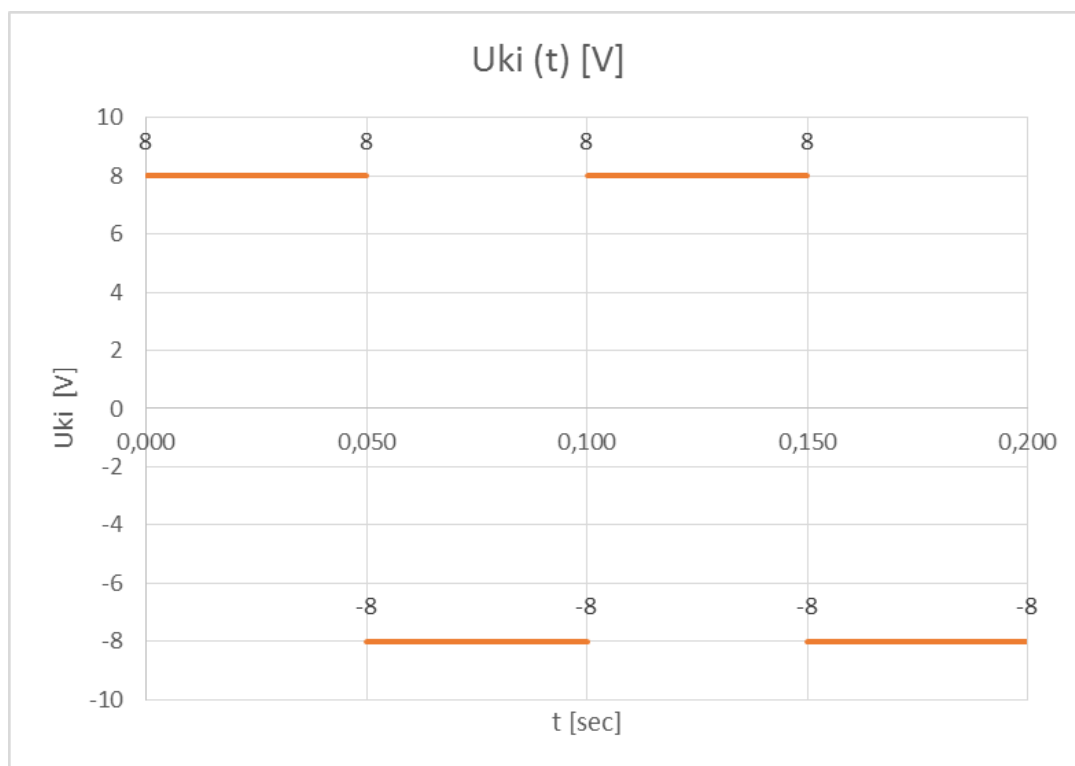
$$T = R_3 * C_1 = 1 * 10^3 * 100 * 10^{-9} = 0,0001 \text{ sec}$$

A differenciálást ebben az esetben szakaszonként kell elvégezni! Fontos megjegyezni, hogy a kimeneten a differenciálás mellett előjelváltás is van! A fokozat bemenő jele az első fokozat kimenő jele:

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,0001 * \frac{-4}{0,05 * 10^{-3}} = 8 \text{ V}$$

Az első fél periódusban ezért a kimenő jel konstans 8 V lesz. A másik fél periódusban a kimenő jel értéke konstans -8V lesz.

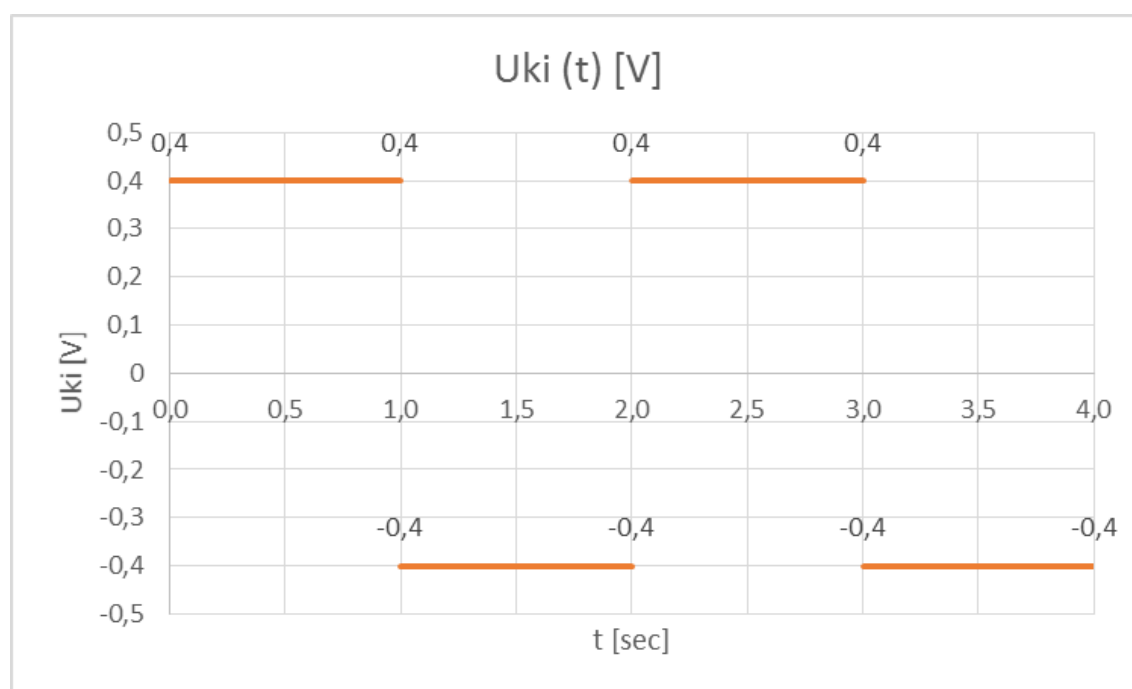
A kimenő jel alakja:



b) A periódusidő változása az első fokozat kimenetén nem okoz jelalak (érték) változást, de a differenciálós fokozaton igen. Ebben az esetben:

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,0001 * \frac{-4}{20 * 0,05 * 10^{-3}} = 0,4 \text{ V}$$

A kimenő jel amplitúdója ebben az esetben az előző huszadrészére változik. A kimenő jel alakja:



c) Az új, R<sub>4</sub>-es ellenállás a működésben nem okoz változást, mert a műveleti erősítő bemenetein ideális esetben nem folyik áram, így az új ellenálláson nem esik feszültség, nem változnak meg a kapcsolás feszültségviszonyai.

2. Adott egy kétfokozatú műveleti erősítőkapcsolás, mindkét műveleti erősítő ideális. Az első (bemeneti) fokozat műveleti erősítőjének nem invertáló bemenete a teljes kapcsolás földpontjára csatlakozik, invertáló bemenetére a teljes kapcsolás bemenetéről R<sub>1</sub> ellenállás, a műveleti erősítő kimenetéről R<sub>2</sub> ellenállás kapcsolódik. Az első fokozat kimenete a második fokozat bemenetét hajtja meg. A második fokozat műveleti erősítőjének nem invertáló bemenete szintén a teljes kapcsolás földpontjára csatlakozik, invertáló bemenete és a fokozat bemenete között C<sub>1</sub> kondenzátor található, míg az invertáló bemenet és fokozat egyben a teljes kapcsolás kimenete között R<sub>3</sub> ellenállás található. A tápfeszültség: +/-15 V.

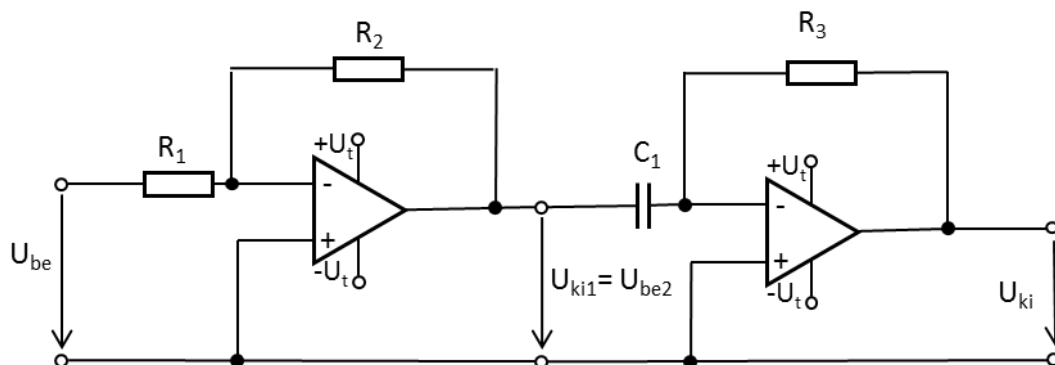
- Adja meg a kapcsolási rajzot! Határozza meg a kimeneti feszültség pontos (értékekkel adott) jelalakját, ha a bemeneti feszültség +/-1 V maximális értékű szimmetrikus háromszög-jel T=0,1 ms periódusidővel (a jel induláskor -1 V értékről növekszik +1 V értékig).
- Adja meg, miként változik a kimeneti jel alakja, ha a bemeneti jel periódusidejét a korábbi tizedére csökkentjük!
- Adja meg, miként változik a kimeneti jel alakja, ha az a) esethez képest az R<sub>2</sub> ellenállás értékét 200kΩ-ra változtatjuk.

Adatok: R<sub>1</sub> = 10 kΩ    R<sub>2</sub> = 10 kΩ    R<sub>3</sub> = 1 kΩ    C<sub>1</sub> = 100nF    U<sub>t</sub>= +/-15 V

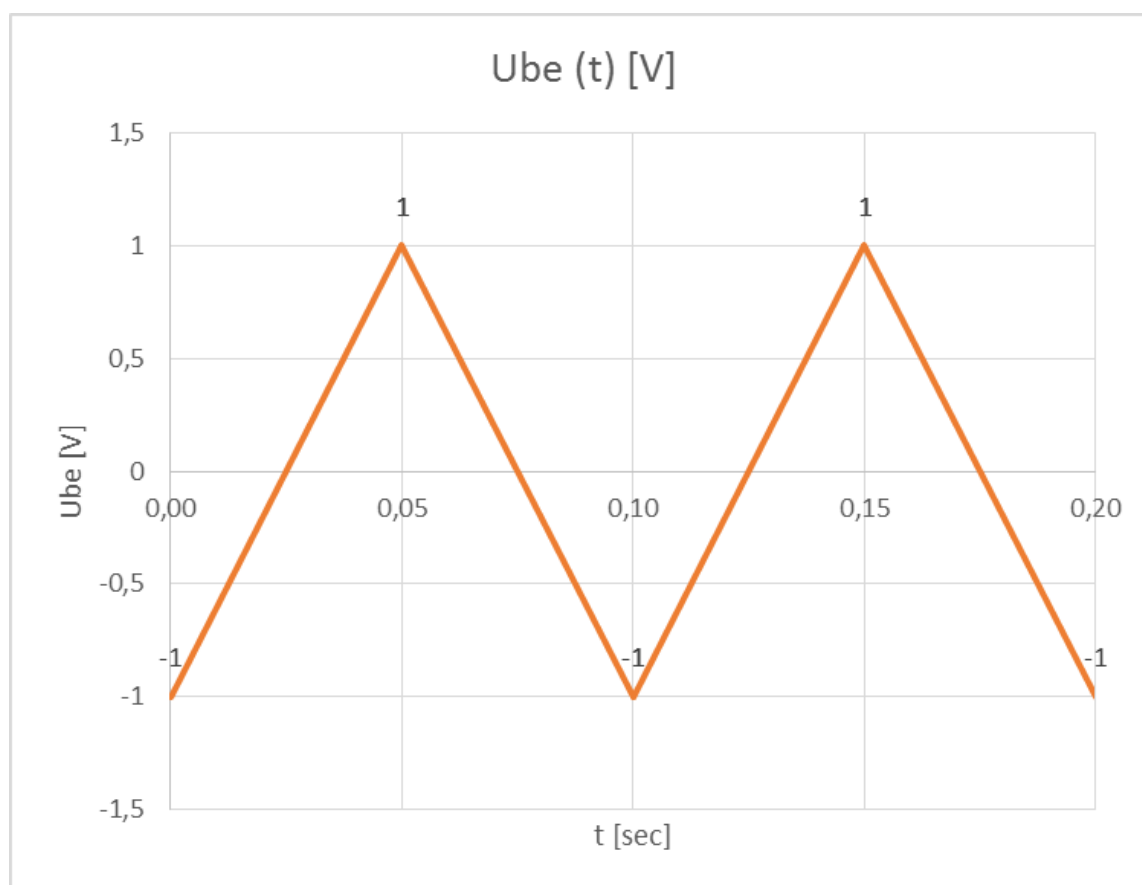


Megoldás:

a) A kapcsolási rajz:



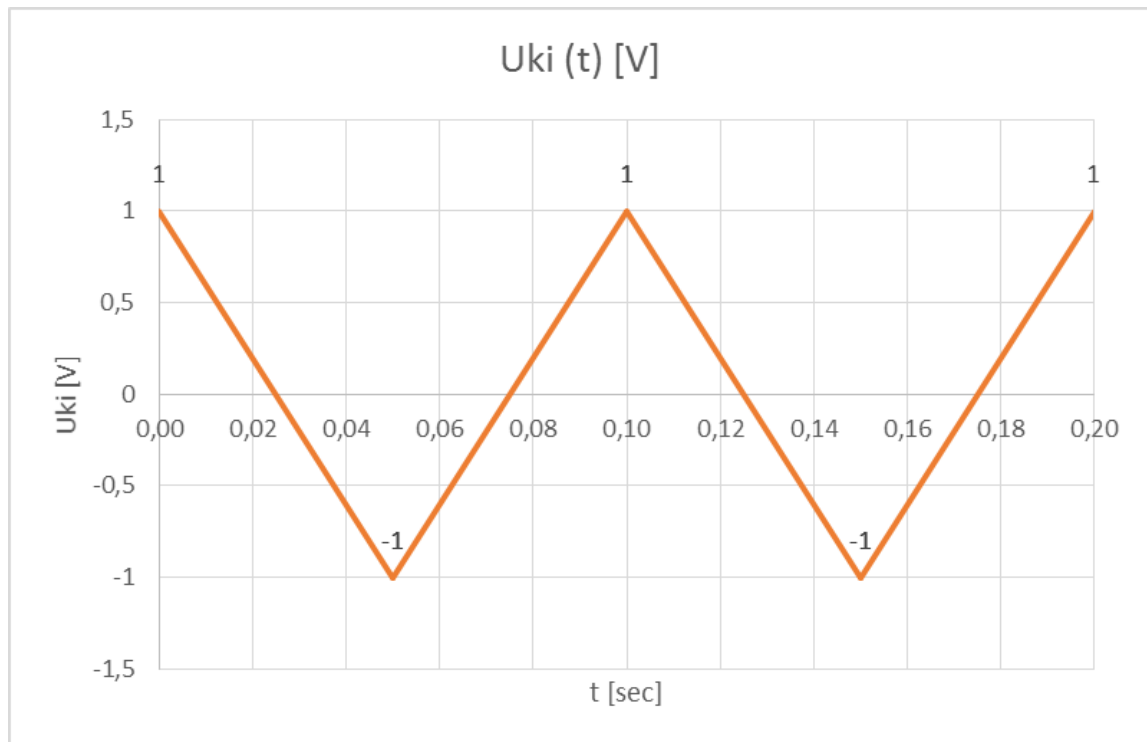
A teljes kapcsolás bemenő jelének alakja:



Az első fokozat egy invertáló erősítő műveleti kapcsolás, melynek erősítése:

$$A_1 = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10 * 10^3}{10 * 10^3} = -1$$

Ezért az első fokozat után a kimenő jel alakja:



A második fokozat egy differenciáló műveleti erősítő kapcsolás. A fokozat erősítése:

$$U_{ki}(t) = -R_3 * C_1 * \frac{dU_{be}}{dt}$$

A differenciálási időállandó:

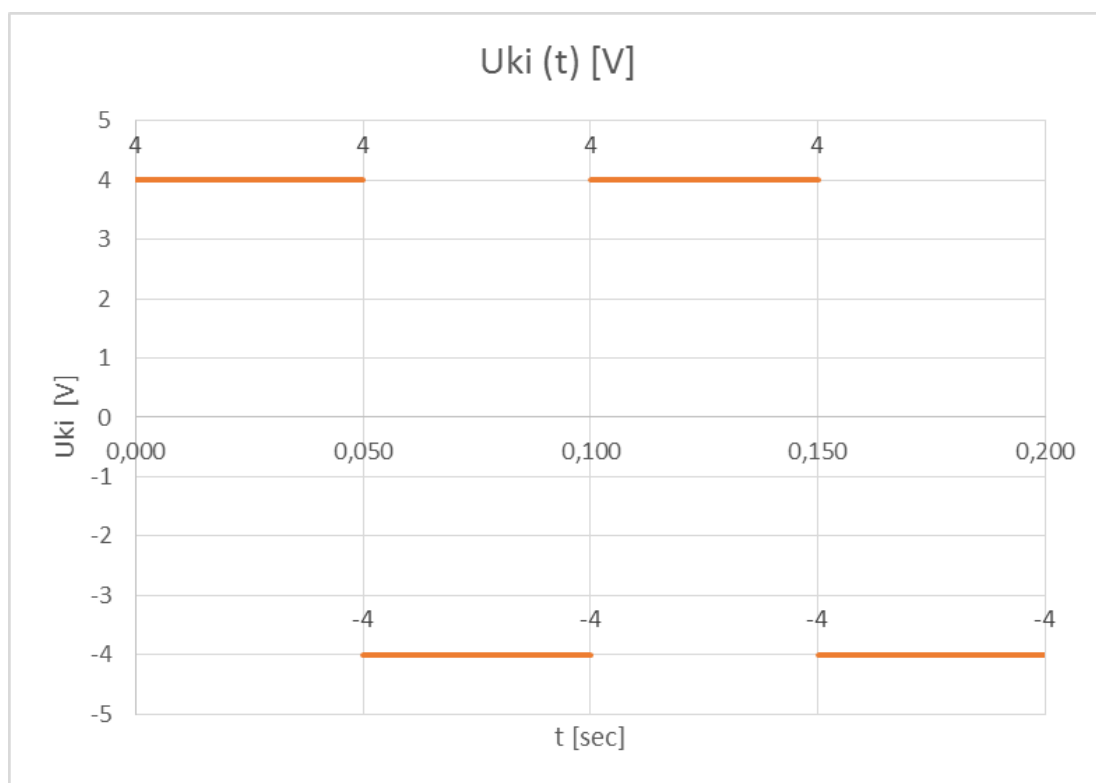
$$T = R_3 * C_1 = 1 * 10^3 * 100 * 10^{-9} = 0,0001 \text{ sec}$$

A differenciálást ebben az esetben szakaszonként kell elvégezni! Fontos megjegyezni, hogy a kimeneten a differenciálás mellett előjelváltás is van! A fokozat bemenő jele az első fokozat kimenő jele:

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,0001 * \frac{-2}{0,05 * 10^{-3}} = 4 \text{ V}$$

Az első fél periódusban ezért a kimenő jel konstans 4 V lesz. A másik fél periódusban a kimenő jel értéke konstans -4 V lesz.

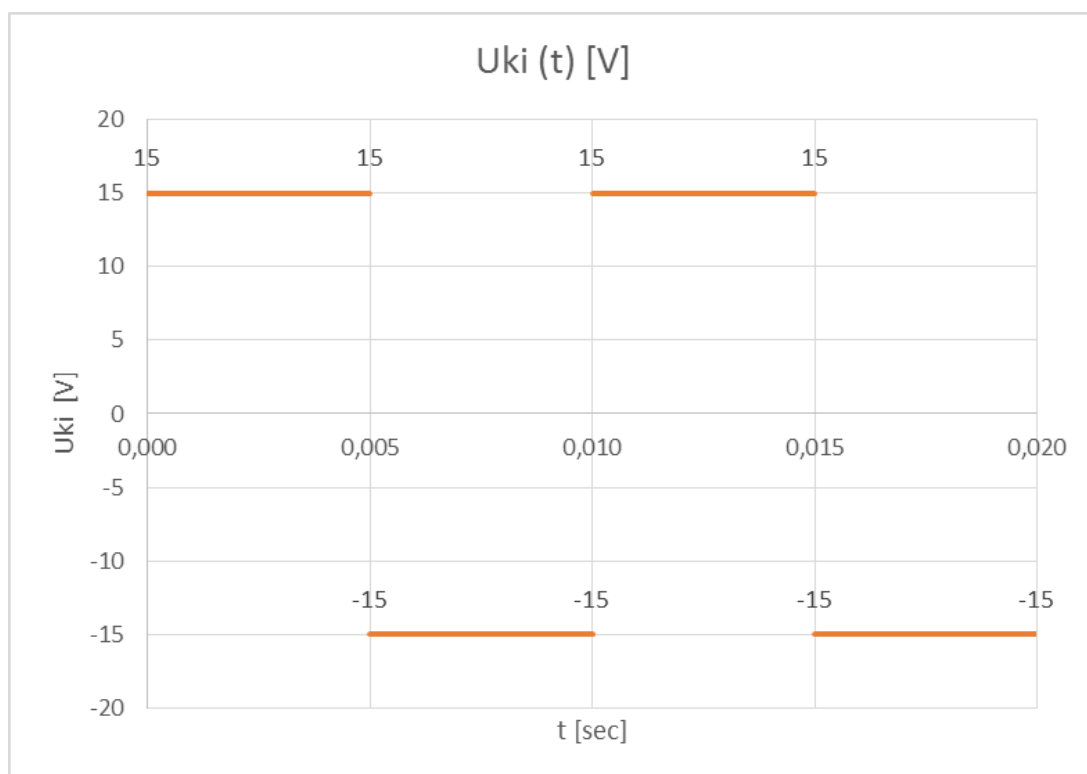
A kimenő jel alakja:



- b) A periódusidő változása az első fokozat kimenetén nem okoz jelalak (érték) változást, de a differenciáló fokozaton igen. Ebben az esetben:

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,0001 * \frac{-2}{0,05 * 10^{-3} * 10^{-1}} = 40 V$$

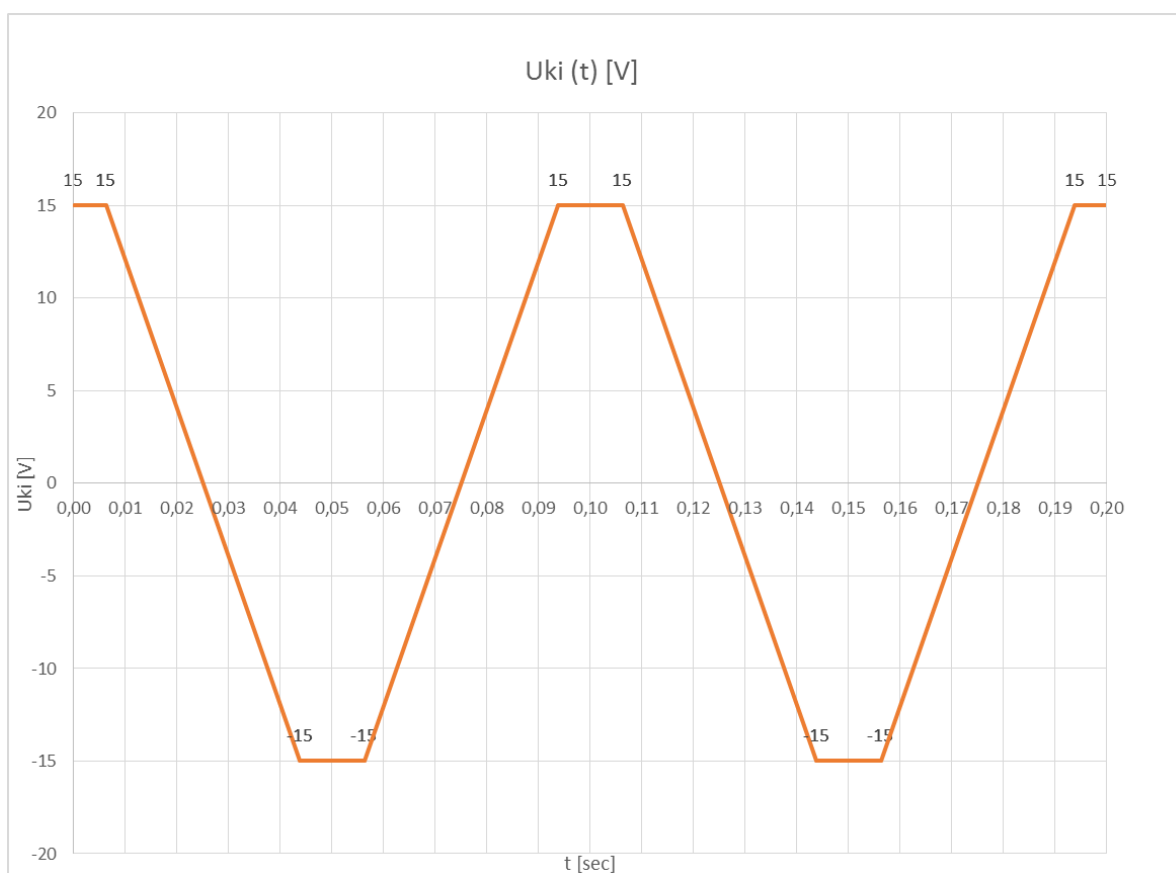
Az ideális műveleti erősítő csak a tápfeszültség értékéig tud erősíteni, így a kimenő jel amplitúdója +/-15 V lesz. A kimenő jel alakja:



c) Ha az R2 ellenállást 200 kΩ-ra növeljük, akkor az első fokozat erősítése:

$$A_1 = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{200 * 10^3}{10 * 10^3} = -20$$

Ekkor már az első fokozatnál elérjük az ideális műveleti erősítő kivezérlési határát. Ezért az első fokozat után nem szabályos háromszöggel jelenik meg a kimeneten. A kimenő feszültség 15 V-ról indul, és addig konstans, amíg a bemenő feszültség értéke -1 V-ról -0,75 V-ra nő. Ez az időpont a  $t = 0,00625$  másodpercnél van ( $-0,75 * -20 = 15$ ). Ez után a kimenő feszültség értéke csökken a bemenő jel változása miatt, amíg a -15V-ot el nem éri. Ekkor a bemenő jel éppen 0,75 V, ez után a kimeneten állandó, -15V-os feszültség jelenik meg, amelyet a  $t = 0,05$  másodpercig állandó. Ez a töréspont a  $t = 0,04375$  másodpercnél van. A kimenő jel alakja a második fél periódusban az előzőekben bemutatotthoz hasonlóan számítható. Az első fokozat után ezért a kimenő jel alakja:



Ez a kimenő jel kerül a differenciáló műveleti erősítő bemenetére. A differenciáló műveleti erősítő erősítése:

$$A_d = -T * \frac{dU_{be}}{dt}$$

Abban az esetben, amikor a bemenő jel konstans, a differenciáló műveleti erősítőn a kimenet zérus, hiszen  $dU_{be} = 0V$ , amikor a bemenő jel alakja változik, akkor a kimenő jel alakja a következőképpen változik (30 V csökkenés 0,0375 másodperc alatt):

$$-T * \frac{dU_{be}}{dt} = -0,0001 * \frac{-30}{0,0375 * 10^{-3}} = 80 \text{ V}$$

Ez azt jelenti, hogy ebben az esetben konstans +/- 80 V-nak kellene a kimeneten megjelenni. Mivel az is a kivezérlési tartomány felett van, így a kimeneten ténylegesen +/- 15 V fog megjelenni. Ezért a kimenő jel alakja a következő:

