

Áramkörök számítása, szimulációja és mérése próbapaneleken

Elektronika 1 Tehetséggondozás Laboratóriumi program 2017 ősz

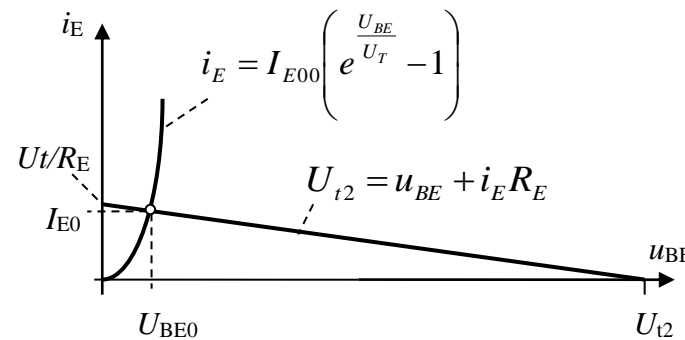
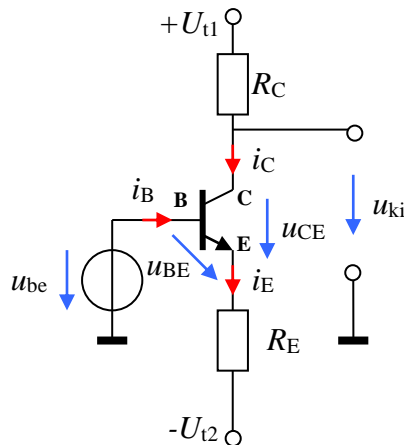
Dr. Koller István

1. Munkapontbeállítás

1.1. NPN rétegtranzisztor munkapontjának kiszámítása

Adott az alábbi kapcsolás, a következő adatokkal: $U_{t1} = 15 \text{ V}$, $U_{t2} = 5 \text{ V}$,
 $R_C = 5.6 \text{ k}\Omega$, $R_E = 4.4 \text{ k}\Omega$,

Határozzuk meg a munkaponti adatokat!



A munkaponti értékeket vezérlés-mentes állapotban számítjuk ($u_{be} = 0$)

$$I_{E0} = \frac{U_{i2} - U_{BE0}}{R_E} = \frac{5V - 0.6V}{4.4k\Omega} = 1mA$$

Vezérlés nélkül az elektródák potenciáljai (a földeléshez képest):

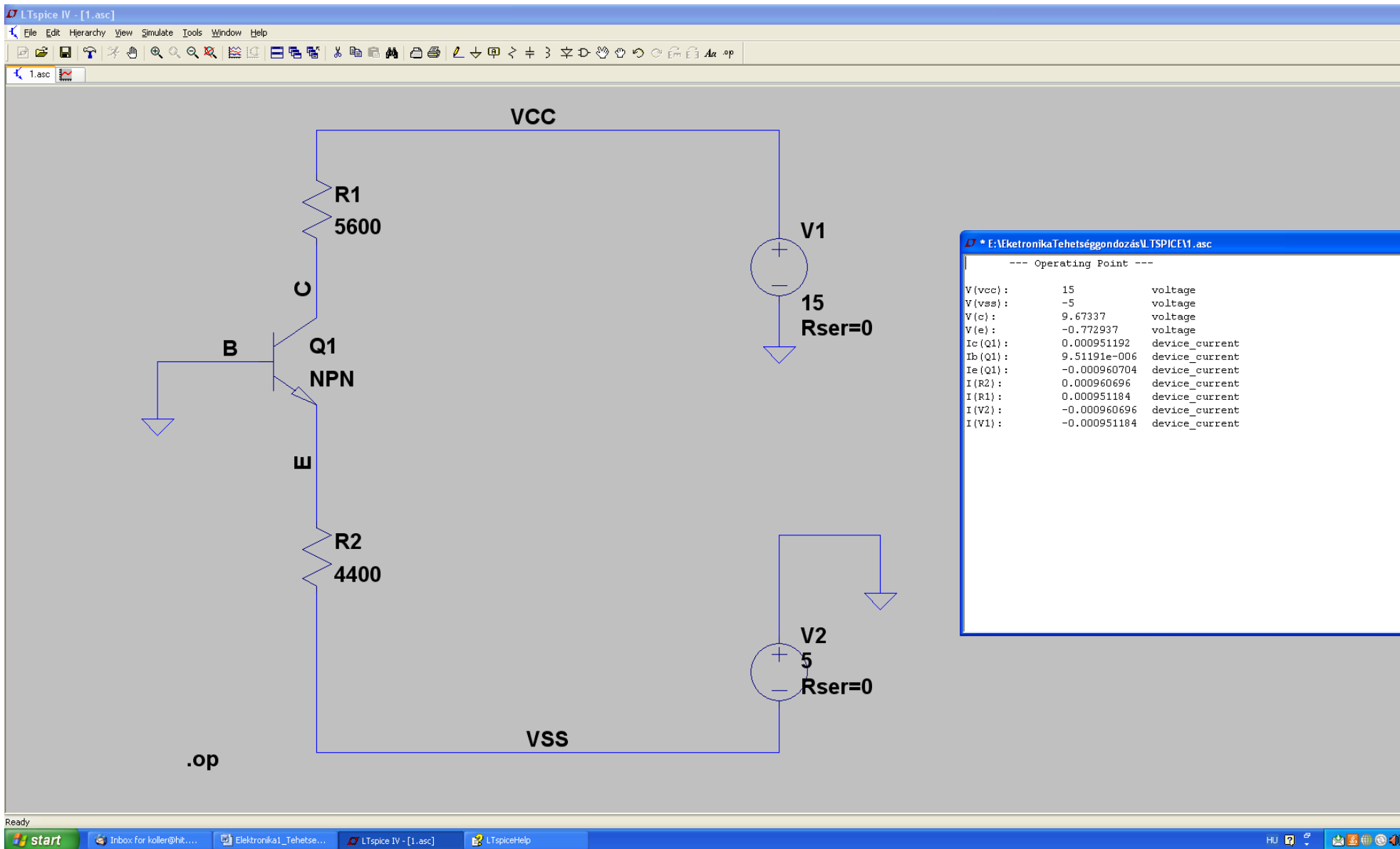
$$U_{C0} = U_{i1} - I_{C0}R_D = 15 - 1 * 5.6 = 9.4V$$

$$U_{B0} = 0V$$

$$U_{E0} = -U_{i2} + I_{E0}R_E = -5 + 1 * 4.4 = -0.6V$$

1.2. Munkapont számítás ellenőrzése LTSPICE szimulációs programmal

Nyissuk meg az LTSPICE IV szimulációs programot. A File New Schematic menüben nyissunk új rajzot. Az eszközökből válogatva rajzoljuk meg a kapcsolást az 1.2.1. ábra szerint. A tranzisztor esetében válasszunk npn tranzisztort, majd később a pontos típust is megadhatjuk a tranzisztorra való jobbgomb kattintással. Miután a szimulálandó áramkört megrajzoltuk a Simulate menüben az Edit Simulate Command segítségével állítsuk be a DC Operating Point fület, majd OK-val szálljunk ki. Ezt követően az analízis típusa (.op) kijelzésre kerül a rajzon. Megnyomva a RUN gombot a munkapont számítás lefut, melynek eredménye az ablakban látható. Vessük össze a szimulációs eredményeket az órán kapottakkal.



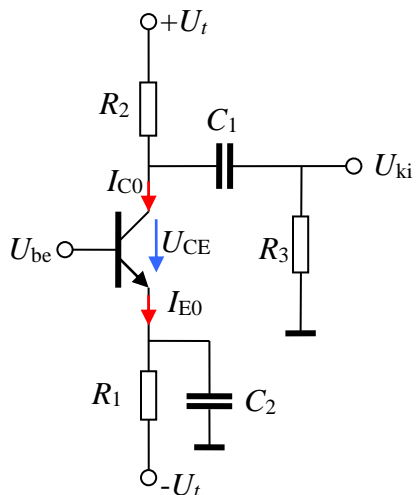
1.2.1. ábra

1.3. Munkapont számítás ellenőrzése valódi áramkörön, próbapanelen

A rendelkezésre álló műszerek, alkatrészek segítségével állítsa össze az áramkört, és ellenőrizze a munkaponti adatokat feszültség és áram méréssel.

2. Kivezérelhetőség és erősítés vizsgálat

Határozza meg az alábbi fokozat kivezérelhetőségét!



$$U_t = 15 \text{ V}, \quad U_m = 0,5 \text{ V}, \quad A = 1, \quad I_{E0} = 1 \text{ mA}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 10 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 10 \text{ k}\Omega,$$

a.) $U_{ki}^+ = ?$, $C_1 \rightarrow \infty$, $C_2 \rightarrow \infty$, nyitóirányú vezérlés

b.) $U_{ki}^- = ?$, $C_1 \rightarrow \infty$, $C_2 \rightarrow \infty$, záróirányú vezérlés

A munkaponti áram a feladatban adott: $I_{E0} = I_{C0} = 1 \text{ mA}$ ($A=1$, nagy alfa)

A két tápfeszültség betáplálási pont közé felírható **egyenáramú** Kirchoff egyenlet:

$$2U_t = U_{CE0} + I_{E0}R_1 + I_{C0}R_2 = U_{CE0} + I_{E0}(R_1 + R_2)$$

Amiből:

$$U_{CE0} = 2U_t - I_{E0}(R_1 + R_2) = 30 - 1 \cdot 20 = 10 \text{ V}$$

A kollektor és az emitter feszültsége (a földeléshez viszonyítva):

$$U_{C0} = +U_t - I_{C0}R_2 = 15 - 1 \cdot 10 = +5 \text{ V}$$

$$U_{E0} = -U_t + I_{E0}R_1 = -15 + 1 \cdot 10 = -5 \text{ V}$$

a.) $U_{ki}^+ = U_{CE0} - U_m = 9,5 \text{ V}$

b.) $U_{ki}^- = I_{E0}(R_2 \parallel R_3) = 1 \cdot 5 = 5 \text{ V}$

2.2. Kivezélhetőség ellenőrzése LTSPICE szimulációs programmal

Az előzőhöz hasonlóan rajzoljuk meg a 2.2.1. ábrán látható kapcsolási rajzot és határozzuk meg a munkapontot. A generátor paramétereit állítsuk be az ábra szerint, azaz -4.4V-os nyugalmi bázis feszültséget biztosítunk, az 1 mA-es munkaponti emitter áramhoz. Első lépésben végezzünk munkaponti analízist, és értelmezzük a kapott eredményeket.

Majd állítsuk be a tranziens analízis módot, és futtassuk le az analízist. Rákattintva az áramkör vezetéseire helyezhetünk le oszcilloszkóp probe-okat. Tegyük őket a kimeneti pontra. A 2.2.2. ábrán láthatjuk az áramkör kimeneti feszültségének határolt értékeit.

A következő lépésben adjunk a bemenetre olyan kis amplitúdójú vezérlő jelet, ami a lineáris tartományon lévő kimeneti jelet eredményez. Ábrázoljuk mind a bemenő, mind pedig a kimenő jelet. Így kapjuk a 2.2.3. ábrán látható kisjelű működést. A gerjesztés 10mV-os amplitúdójú. Látható, hogy az áramkör feszültség erősítése nagy. Mennyi, és ez mennyire egyezik meg a várakozásainkkal?

Vegyük ki a C2 kapacitást, és ellenőrizzük a kis jelű feszültség erősítést is.

2.3. Kivezélhetőség ellenőrzése valódi áramkörön

Próbapanelen állítsuk össze az áramkört, és generátor, valamint oszcilloszkóp segítségével ellenőrizzük a működést.

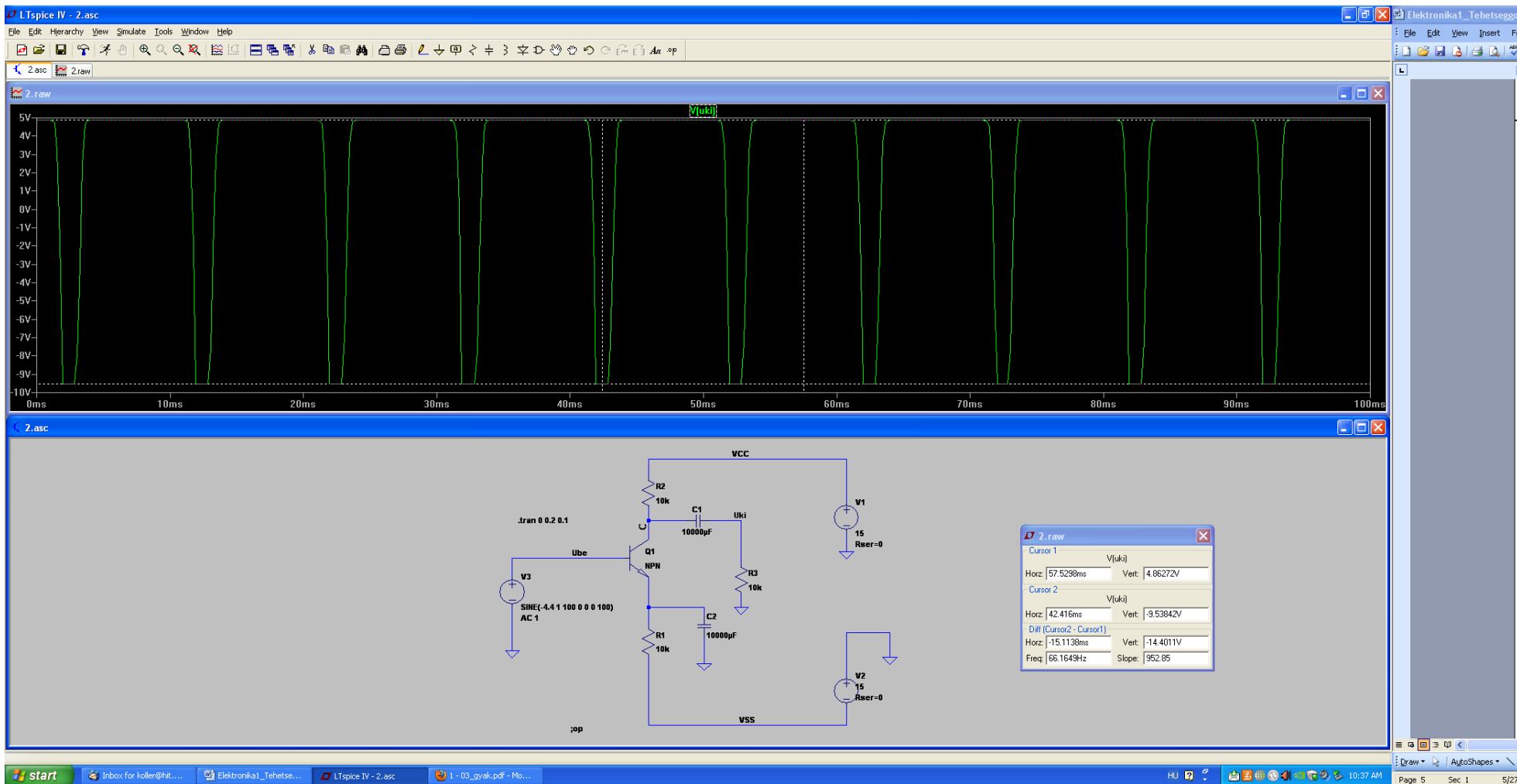
The screenshot shows the LTspice IV interface with a circuit diagram and a simulation results window. The circuit consists of an NPN transistor (Q1) with a sine wave input (V3) connected to its base. The base is biased by a 15V source (V1) through a 10k resistor (R2). The emitter is connected to ground (VSS) through a 10k resistor (R1). The collector is connected to a 15V source (V2) through a 10k resistor (R3). Two capacitors, C1 and C2, are connected in parallel between the base and collector nodes. The simulation window displays the following operating point results:

```

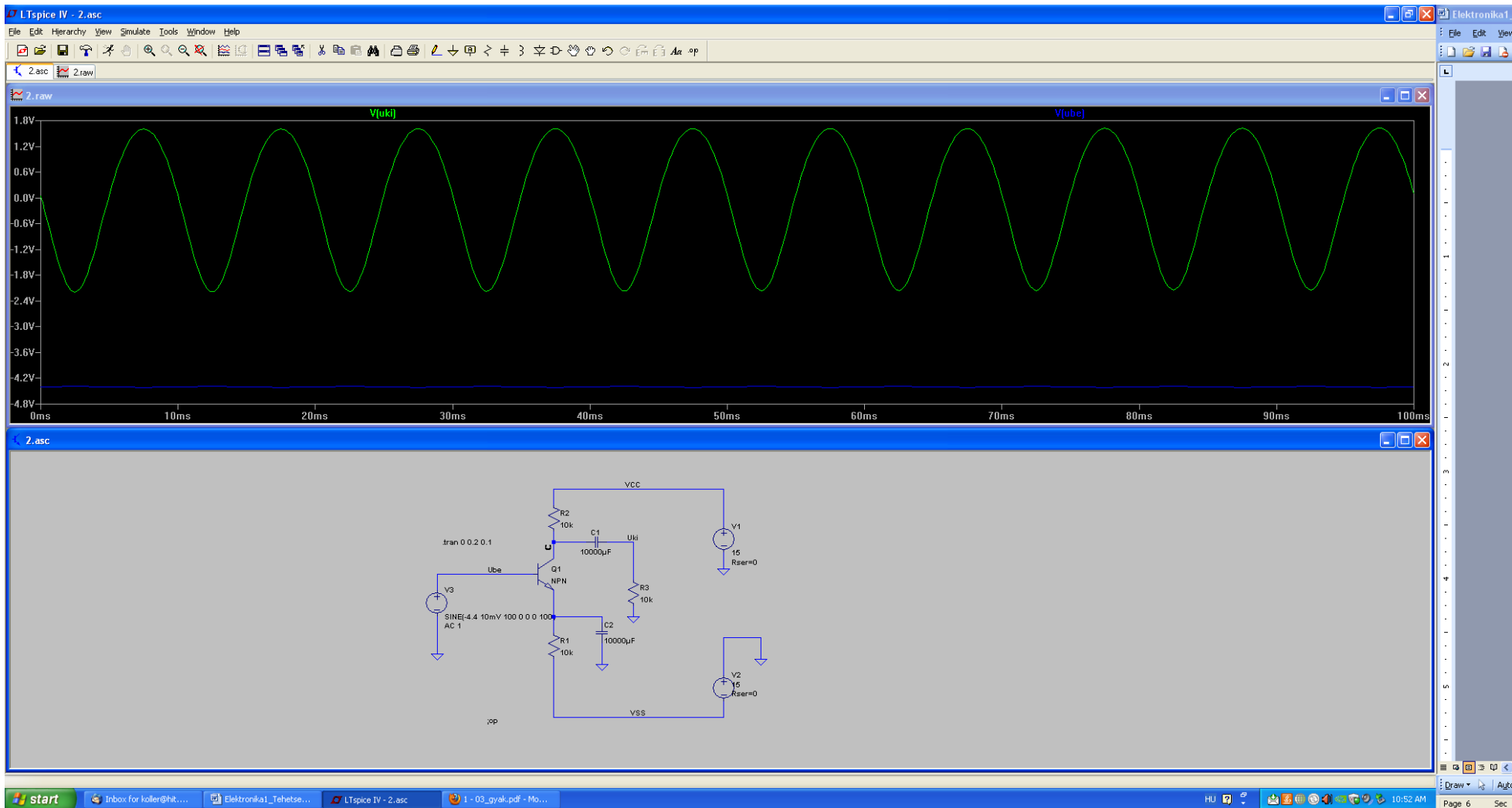
--- Operating Point ---
V(vcc) :      15      voltage
V(vss) :     -15      voltage
V(ube) :     -4.4     voltage
V(n001) :   -5.17352  voltage
V(c) :       5.27081  voltage
V(uki) :   5.27081e-010 voltage
Ic(Q1) :   0.000972925 device_current
Ib(Q1) :   9.72924e-006 device_current
Ie(Q1) :  -0.000982654 device_current
I(C2) :   -5.17352e-014 device_current
I(C1) :   -5.27081e-014 device_current
I(R3) :   5.27081e-014 device_current
I(R2) :   0.000972919 device_current
I(R1) :   0.000982648 device_current
I(V3) :  -9.72918e-006 device_current
I(V2) :  -0.000982648 device_current
I(V1) :  -0.000972919 device_current

```

2.2.1. ábra

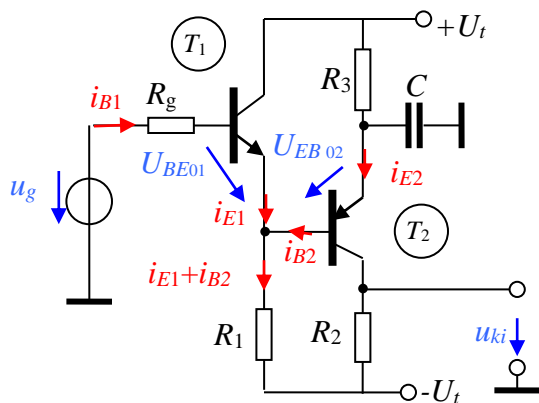


2.2.2. ábra



2.2.3. ábra

3. Kéttranzisztoros kapcsolás munkapontjának vizsgálata



T_1 : n-p-n tranzisztor $U_{BE0} = 0.6 \text{ V}$, $\beta_1 = B_1 = 99$

T_2 : p-n-p tranzisztor $U_{EB0} = 0.6 \text{ V}$, $\beta_2 = B_2 \rightarrow \infty$

$U_t = 15 \text{ V}$, $R_g = 10 \text{ k}\Omega$,

$U_{BE01} = 0.6 \text{ V}$, $U_{EB02} = 0.6 \text{ V}$ $R_1 = 14.3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 7.55 \text{ k}\Omega$

Kérdések:

a.) $I_{E01} = ?$, $U_{CE01} = ?$

b.) $I_{E02} = ?$, $U_{EC02} = ?$

c.) $\Delta I_{E01} = ?$ ha $\Delta T = 10 \text{ C}^0$

d.) $\Delta I_{E02} = ?$ ha $\Delta T = 10 \text{ C}^0$

a.)

$$I_{E01} = \frac{U_t - U_{BE01}}{R_1 + R_g / (1 + B_1)} = \frac{15 - 0.6}{14.3 + 10/100} = 1 \text{ mA}$$

$$U_{CE01} = 2U_t - I_{E01}R_1 = 2 * 15 - 1 * 14.3 = 15.7 \text{ V}$$

b.)

$$U_{CE01} = I_{E02}R_3 + U_{EB02}$$

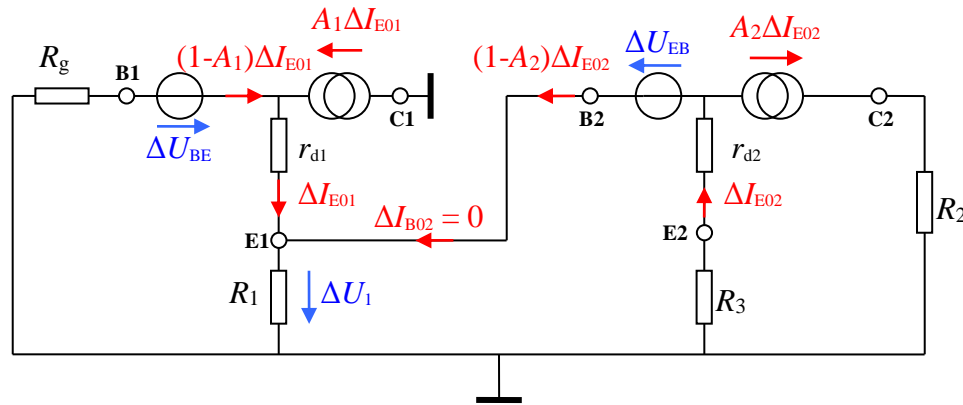
$$I_{E02} = \frac{U_{CE01} - U_{EB02}}{R_3} = \frac{15.7 - 0.6}{7.55} = 2 \text{ mA}$$

$$U_{CE02} = 2U_t - I_{E02}(R_2 + R_3) = 2 * 15 - 2 * 12.55 = 4.9 \text{ V}$$

c.) $\Delta I_{E01} = ?$ ha $\Delta T = 10 \text{ C}^0$

Rétegztranszisztorokra nagyon jó közelítéssel mondható:

$$\Delta U_{BE} = \Delta U_{EB} = \left(-2 \frac{mV}{C^0}\right) \Delta T$$



A B1-E1 körre felírható hurok-egyenlet:

$$(1 - A_1) \Delta I_{E01} R_g + (r_{d1} + R_1) \Delta I_{E01} + \Delta U_{BE} = 0$$

Ebből :

$$\Delta I_{E01} = \frac{-\Delta U_{BE}}{r_{d1} + R_1 + (1 - A_1) R_g} = \frac{-(-2mV/C^0) \Delta T}{r_{d1} + R_1 + R_g (1 + B_2)} = \frac{20mV}{0.026 + 14.3 + 0.1} = 1.38 \mu A$$

d) $\Delta I_{E02} = ?$ ha $\Delta T = 10C^0$

Az E1-B2-E2 körre felírható hurok-egyenlet: $\Delta U_1 + \Delta U_{EB} + (r_{d2} + R_3) \Delta I_{E02} = 0$

Ahol:

$$\Delta U_1 = R_1 \Delta I_{E01} = 14.3 \text{ k}\Omega * 1.38 \mu A = 19.73 \text{ mV}$$

Ebből:
$$\Delta I_{E02} = \frac{-\Delta U_{EB} - \Delta U_1}{r_{d2} + R_3} = \frac{-(-2mV/C^0) \Delta T - \Delta U_1}{r_{d2} + R_3} = 36nA$$

3.2. Kéttranzisztoros kapcsolás munkapontjának vizsgálata LTSPICE szimulációs programmal

A már megismert módon rajzoljuk fel a kéttranzisztoros áramkört a 3.2.1. ábra szerint és végezzük el a munkaponti analízist.

Vizsgáljuk meg a munkaponti áram hőmérséklet függését.

A munkaponti áram hőmérséklet függésének szimulációjához állítsuk be a szimulátort hőmérséklet függés vizsgálatára a `.temp 22 32` paranccsal, majd állítsunk be munkapont analízist (3.2.2. ábra). Áram probe-ot helyezzünk az emitter körbe a kurzor mozgatásával, illetve a lakatfogó feltűnésével. Látható, hogy a vizsgált hőmérséklet tartományon a Q1 tranzisztor emitter árama kb. 1.1uA-t változik 10 C hőmérséklet változás hatására, ami jó egyezés a számítottal. A 4.2.4. ábrán látható a Q2 tranzisztor emitter áramának változása a hőmérséklet függvényében, ami 65nA-nek adódik.

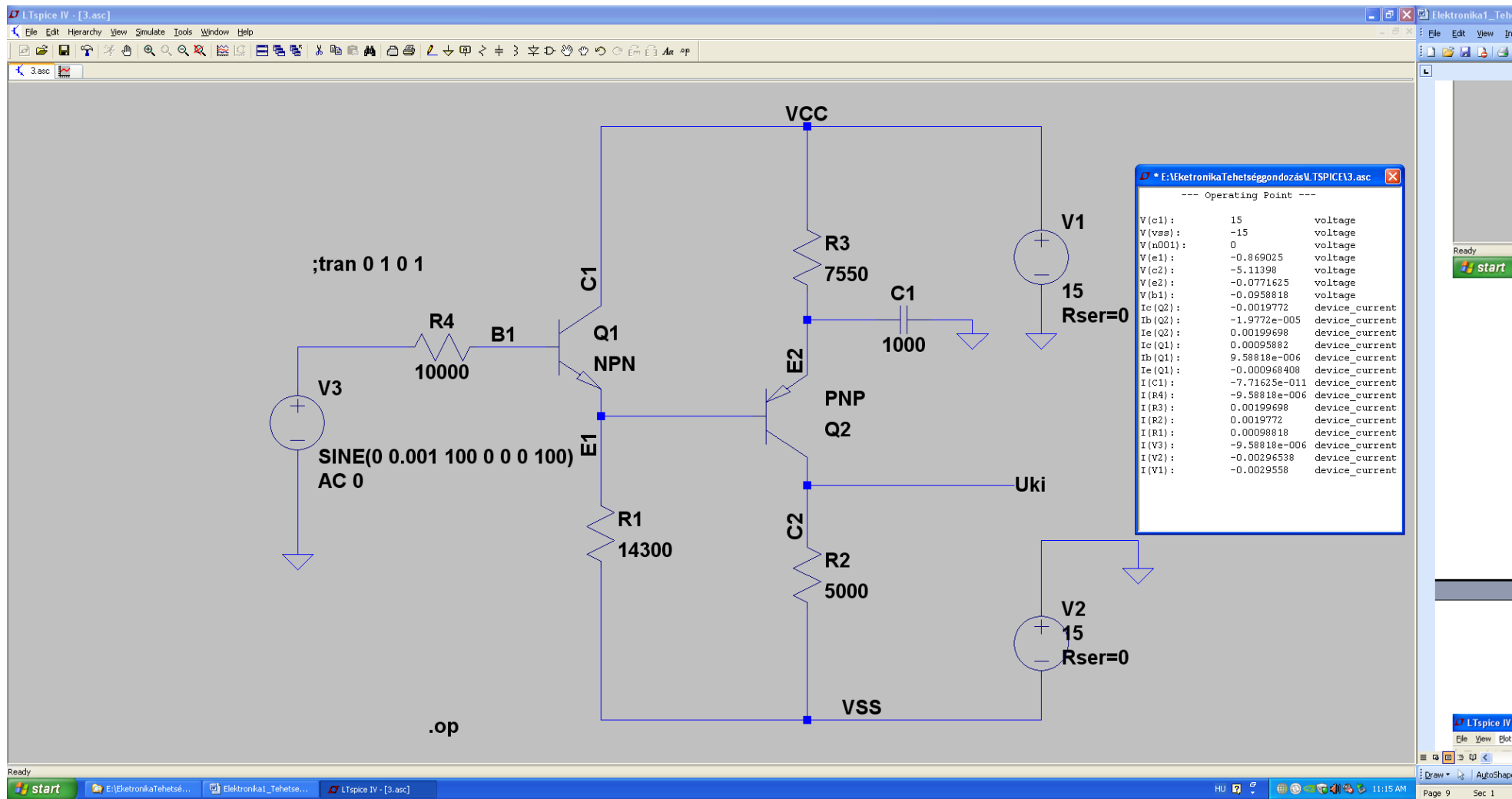
3.3. Kéttranzisztoros kapcsolás munkapontjának ellenőrzése valódi áramkörön

PNP és NPN tranzisztorok segítségével építsük meg az áramkört és ellenőrizzük a munkapontokat.

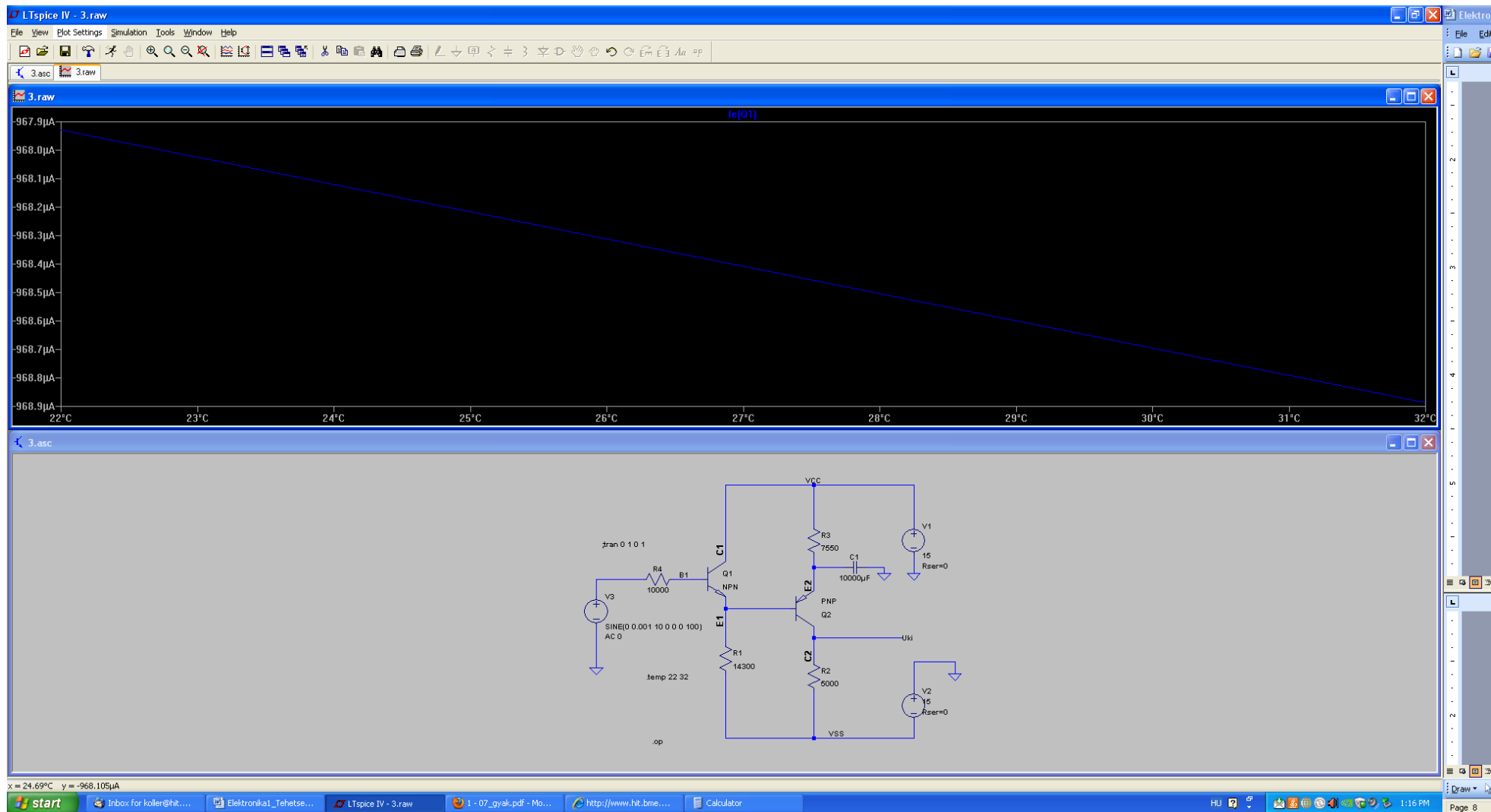
Mi a szerepe a kapcsolatban a Q1 tranzisztornak, ha elhagyjuk, hogyan változik a feszültség erősítés, meghagyva a generátor nagy ellenállását?

Mekkora a bementi ellenállás a Q1 bázisában? Hogyan mérné ezt meg?

Mekkora a kimeneti ellenállás? Hogyan mérné ezt meg?



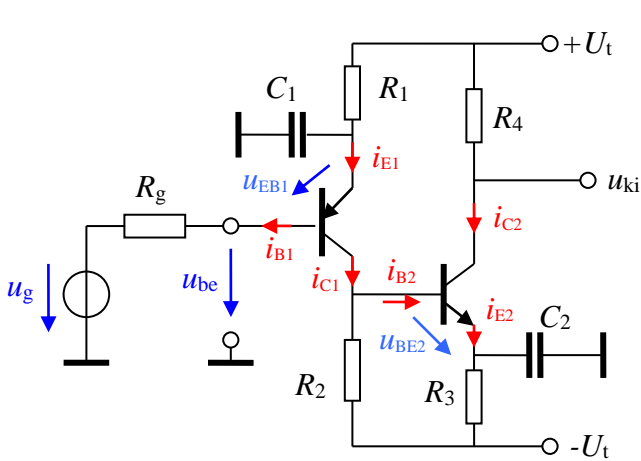
3.2.1. ábra



3.2.1. ábra

4. Kéttranzisztoros áramkör munkapontja, erősítése, emitter kondenzátorának hatása

4.1.



- T₁: p-n-p tranzisztor, $\beta_1=B_1=99$,
 $U_{EB0} = 0,6 \text{ V}$
 T₂: n-p-n tranzisztor, $\beta_2=B_2 \rightarrow \infty$,
 $U_{BE0} = 0,6 \text{ V}$
- a.) $I_{E01}=?$,
 b.) $I_{E02}=?$,
 c.) $\frac{u_{ki}}{u_g} = ?$, $C_1 \rightarrow \infty$, $C_2 \rightarrow \infty$,
 d.) $\frac{u_{ki}}{u_g} = ?$, $C_1 \rightarrow 0$, $C_2 \rightarrow \infty$,

$$U_t = 15 \text{ V}, \quad R_g = 1 \text{ k}\Omega, \quad R_1 = 14,39 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 5,66 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 5 \text{ k}\Omega, \quad R_4 = 15 \text{ k}\Omega$$

Megoldás:

$$\text{a.) } I_{E01} = \frac{U_t - U_{EB0}}{R_1 + (1 - A_1)R_g} = \frac{15 - 0,6}{14,39 + 0,01} = 1 \text{ mA} \quad \alpha_1 = A_1 = \frac{B_1}{1 + B_1} = \frac{99}{100} = 0,99 \quad I_{C01} = \frac{B_1}{1 + B_1} I_{E01} = 0,99 \text{ mA} \quad r_{d1} = \frac{U_T}{I_{E01}} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 26 \Omega$$

$$\text{b.) } I_{E02} = \frac{I_{C01}R_2 - U_{BE0}}{R_3} = \frac{0,99 * 5,66 - 0,6}{5} = 1 \text{ mA} \quad \text{és} \quad r_{d2} = \frac{U_T}{I_{E02}} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 26 \Omega$$

$$\text{c.) } \frac{u_{ki}}{u_g} = \frac{(1 + \beta)r_{d1}}{R_g + (1 + \beta)r_{d1}} \left(-\alpha_1 \frac{R_2}{r_{d1}} \right) \left(-\alpha_2 \frac{R_4}{r_{d2}} \right) = 89810$$

$$\text{d.) } \frac{u_{ki}}{u_g} = \frac{(1 + \beta)(r_{d1} + R_1)}{R_g + (1 + \beta)(r_{d1} + R_1)} \left(-\alpha_1 \frac{R_2}{r_{d1} + R_1} \right) \left(-\alpha_2 \frac{R_4}{r_{d2}} \right) = 221,9$$

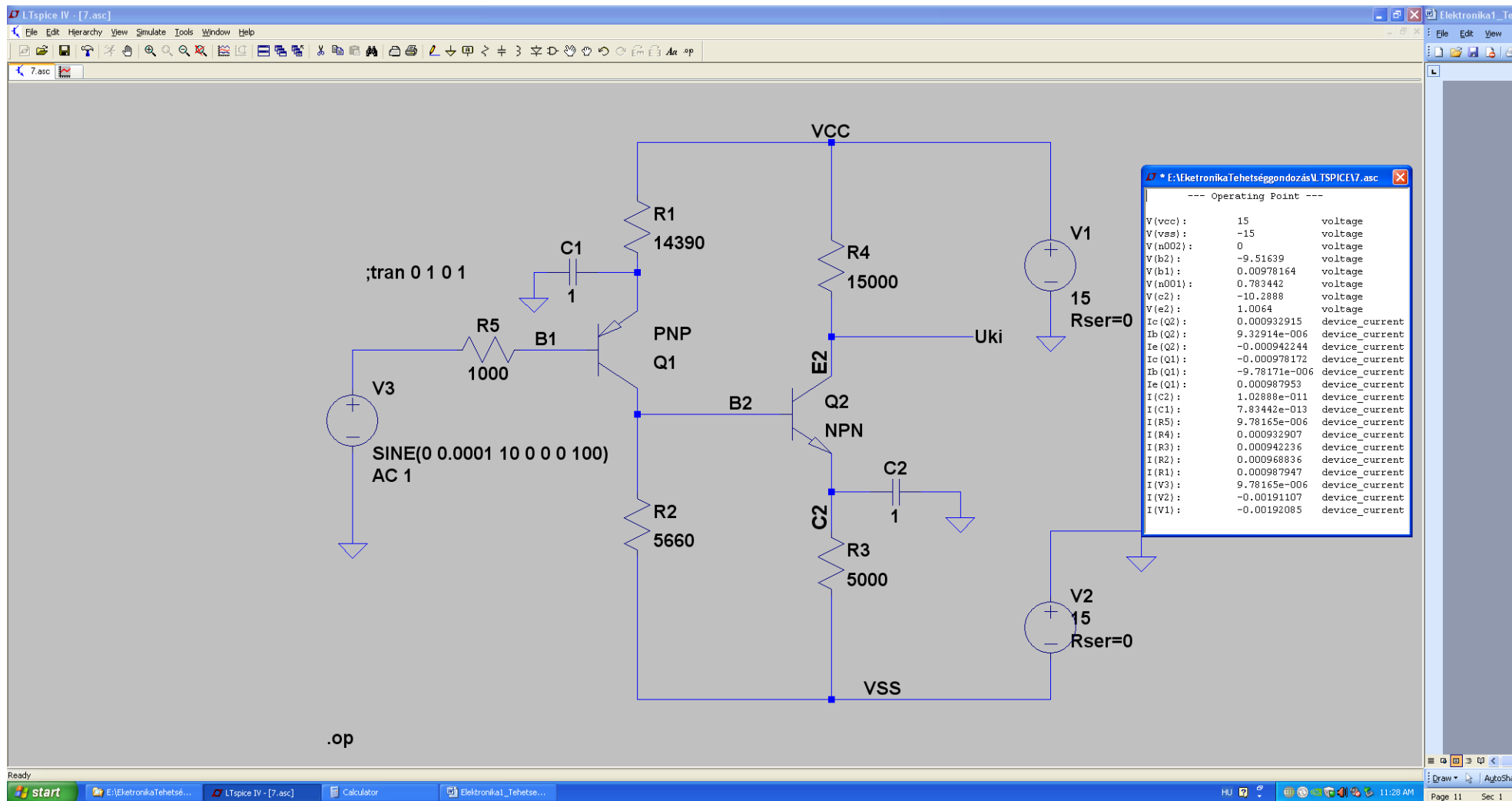
4.2. Kéttranzisztoros kapcsolás paramétereinek vizsgálata LTSPICE szimulációs programmal

A már megismert módon rajzoljuk fel a kéttranzisztoros áramkört a 4.2.1. ábra szerint és végezzük el a munkaponti analízist 4.2.1. ábra. Állítsunk be 0.1mV-os bemenő feszültséget és végezzünk tranziens analízist.

Miért sokkal kisebb a szimulált erősítés a példában számoltak?

4.3. Kéttranzisztoros kapcsolás paramétereinek mérése valódi áramkörön

NPN és PNP tranzisztorok segítségével állítsuk össze az áramkört, ellenőrizzük a munkaponti paramétereket. A feszültség erősítést megmérve mit tapasztalunk? Mekkora a Q2 tranzisztor bétája?



4.2.1.ábra

5. B, AB, és A osztályú teljesítmény erősítők

5.1. Teljesítmény erősítők analízise

A jegyzet (<http://www.hit.bme.hu/~gaal/elektronika/Elektronika1.pdf>) 71. oldalától.

5.2. Végfokozat vizsgálata LTSPICE szimulációs programmal

A már megismert módon rajzoljuk fel az 5.2.1. ábra szerint és végezzük el a munkaponti analízist. Az ábra szerinti beállítás B osztályú működést eredményez, R4 ellenállás legyen 820 Ohm. Vizsgáljuk meg a kimenőjelet, valamint a Q1 Q2 tranzisztorokon folyó áramokat 13V-os csúcsértékű szinuszos bemenőjel esetén.

Ha rövidre zárjuk a B1 B2 pontokat, akkor egy C osztályú működést kapunk. Állítsunk be 1 V-os bemeneti amplitúdót. Mi jellemző erre a beállításra?

Az R4 ellenállás legyen 1.5k ezzel AB üzemet állítottunk be. Vizsgáljuk meg most is a kimenőjelet, valamint a Q1 Q2 tranzisztorokon folyó áramokat 1V-os amplitúdójú szinuszos bemenőjel esetén.

Végül állítsunk be tiszta A osztályú működést, amihez az R4 ellenállást 2.7k- ra állítsuk be. Ellenőrizzük a kimenő jelalakot, valamint az áramokat. Mekkora a munkaponti áram?

LTspice IV - [A4.asc]

File Edit Hierarchy View Simulate Tools Window Help

A4.asc

```

.tran 0 1ms 0 0.1
.op

```

Operating Point

Variable	Value	Unit
V(vcc)	15	voltage
V(vee)	-15	voltage
V(be)	0	voltage
V(ki)	-1.63636e-014	voltage
V(b3)	0.0649486	voltage
V(b1)	-0.71618	voltage
V(b2)	0.71618	voltage
V(m001)	0.00789043	voltage
V(m002)	-0.00789043	voltage
Ic(Q2)	-7.81231e-005	device_current
Ib(Q2)	-7.81217e-007	device_current
Ie(Q2)	7.89043e-005	device_current
Ic(Q3)	0.0013056	device_current
Ib(Q3)	1.3056e-005	device_current
Ie(Q3)	-0.00131865	device_current
Ic(Q1)	7.81231e-005	device_current
Ib(Q1)	7.81217e-007	device_current
Ie(Q1)	-7.89043e-005	device_current
I(C2)	1.43236e-016	device_current
I(C1)	-7.1618e-020	device_current
I(R2)	0.00210056	device_current
I(R1)	0.00210056	device_current
I(R9)	7.89043e-005	device_current
I(R8)	7.89043e-005	device_current
I(R4)	0.000794184	device_current
I(R3)	0.000781128	device_current

Ready

start | Inbox for koller@hit... | Elektronika1_Tehetse... | LTspice IV - [A4.asc] | http://www.hit.bme... | C:\Program Files\LTC...

5.2.1. ábra

5.3 Végfokozat vizsgálata valódi áramkörön

Komplementer pár Q1, Q2 (BC301, BC303), illetve Q3 (BC182) tranzisztorok segítségével állítsuk össze az áramkört, ellenőrizzük a munkaponti paramétereket, és szinuszos gerjesztés esetén a jelalakokat.

6. Frekvenciafüggés

6.1. Földelt emitteres fokozat emitter kondenzátor okozta frekvenciafüggése

A jegyzet 114. oldal .

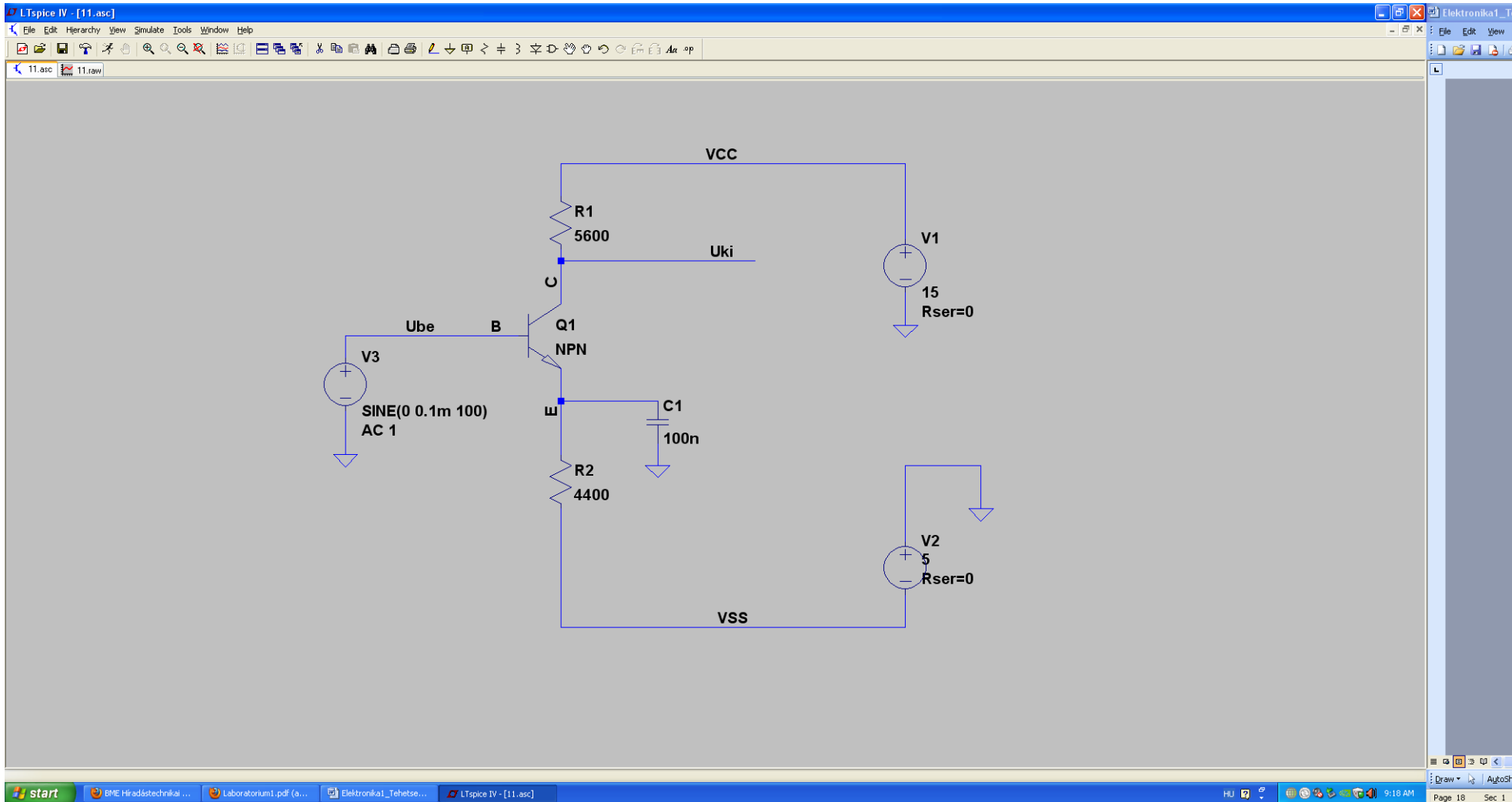
Számítsuk ki a a 6.2.1. ábra szerinti áramkör feszültség erősítésének alsó határfrekvenciáját.

6.2. Földelt emitteres fokozat vizsgálata LTSPICE szimulációs programmal

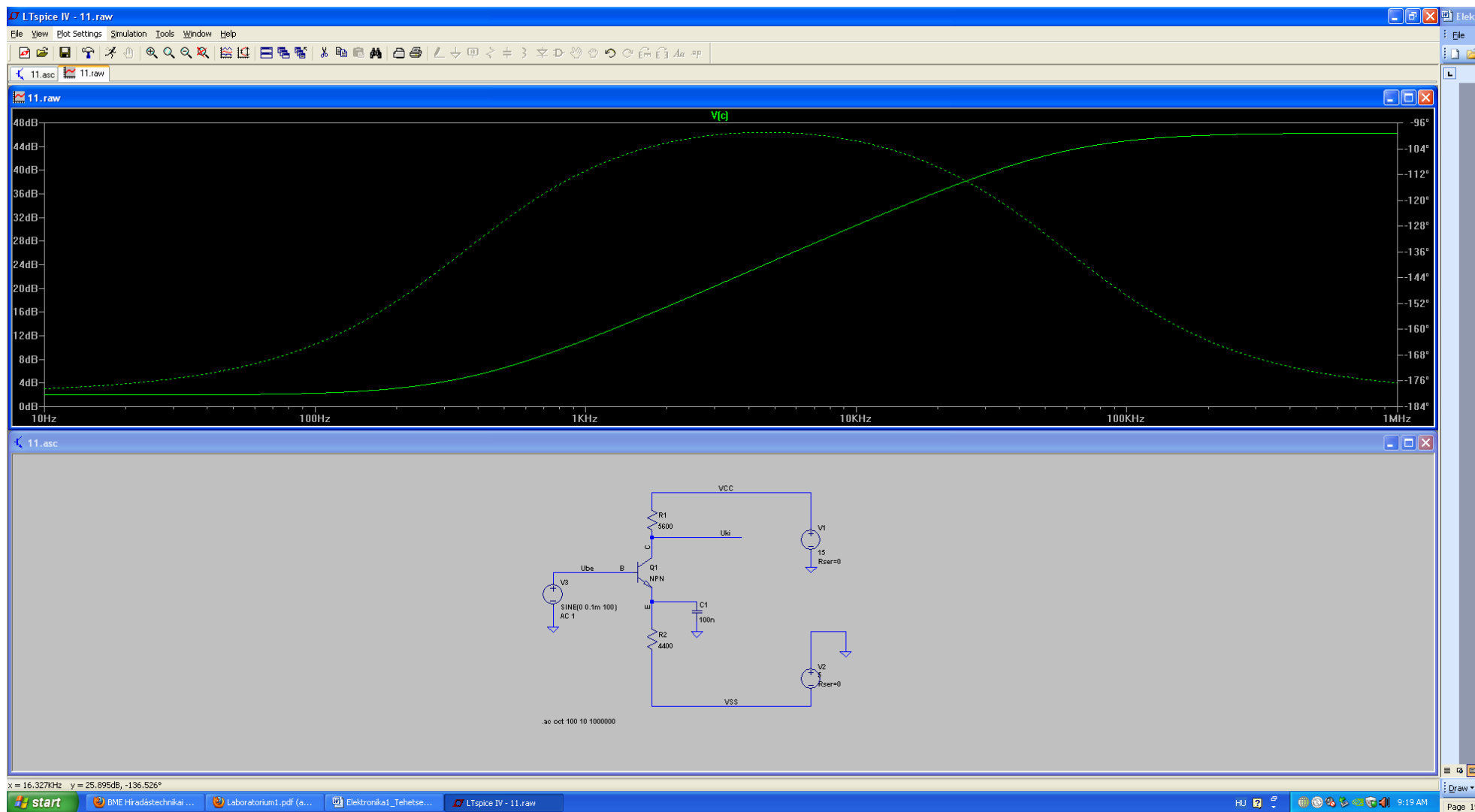
Állítsuk össze a már munkapont beállítás szempontból vizsgálat 6.2.1. ábra szerinti kapcsolást a C_1 emitter kondenzátorral együtt. Végezzünk AC analízist 10Hz és 10MHz közötti frekvenciákra.

6.3. Földelt emitteres fokozat vizsgálata valódi áramkörön

Ellenőrizzük a rendelkezésre álló műszerek segítségével a -3 dB-es pont frekvenciáját a megépített áramkörön.



6.2.1. ábra



6.2.2. ábra

7. A tranzisztor kapacitásai által okozott frekvenciafüggés

7.1. Miller kapacitás okozta frekvenciafüggés

A Miller kapacitás leírását a jegyzet (<http://www.hit.bme.hu/~gaal/elektronika/Elektronika1.pdf>) 142. oldalától találjuk.

7.2. Miller kapacitás okozta frekvenciafüggésének vizsgálata LTSPICE szimulációs programmal

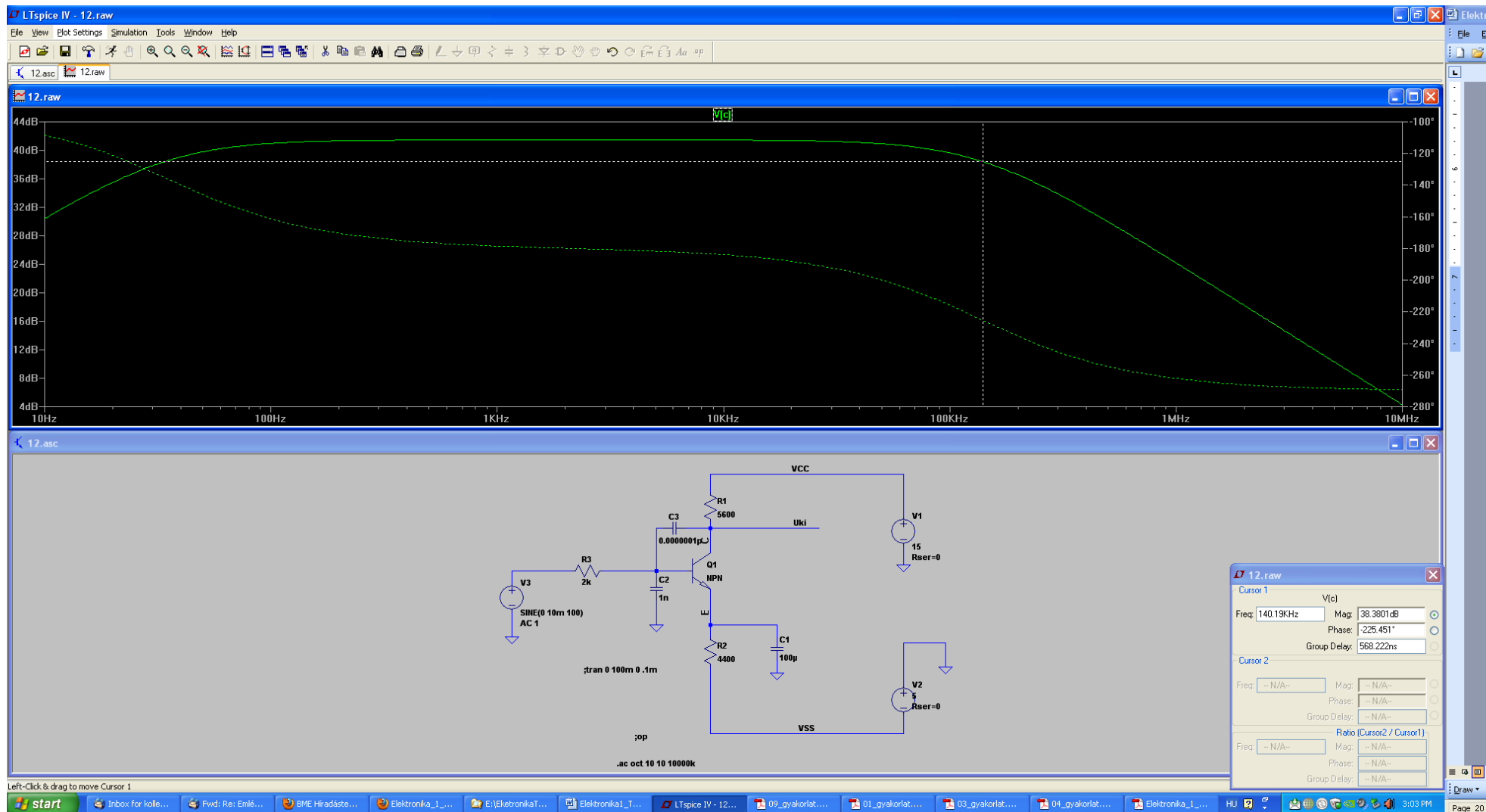
A 7.2.1 szerinti áramkört megrajzolva, majd AC analízisnek alávetve az ábra felső részén látható Bode diagramot kapjuk. Értelmezze a kapott eredményt.

Kicsit változtassunk (7.2.2. ábra) az áramkörön úgy, hogy a BC kapacitást 4.7pF-ra állítjuk, miközben a BE kapacitást nagyon kicsire változtatjuk. A kapott feszültségerősítési frekvenciamenet az előzőhöz nagyon hasonló. Mi ennek az oka?

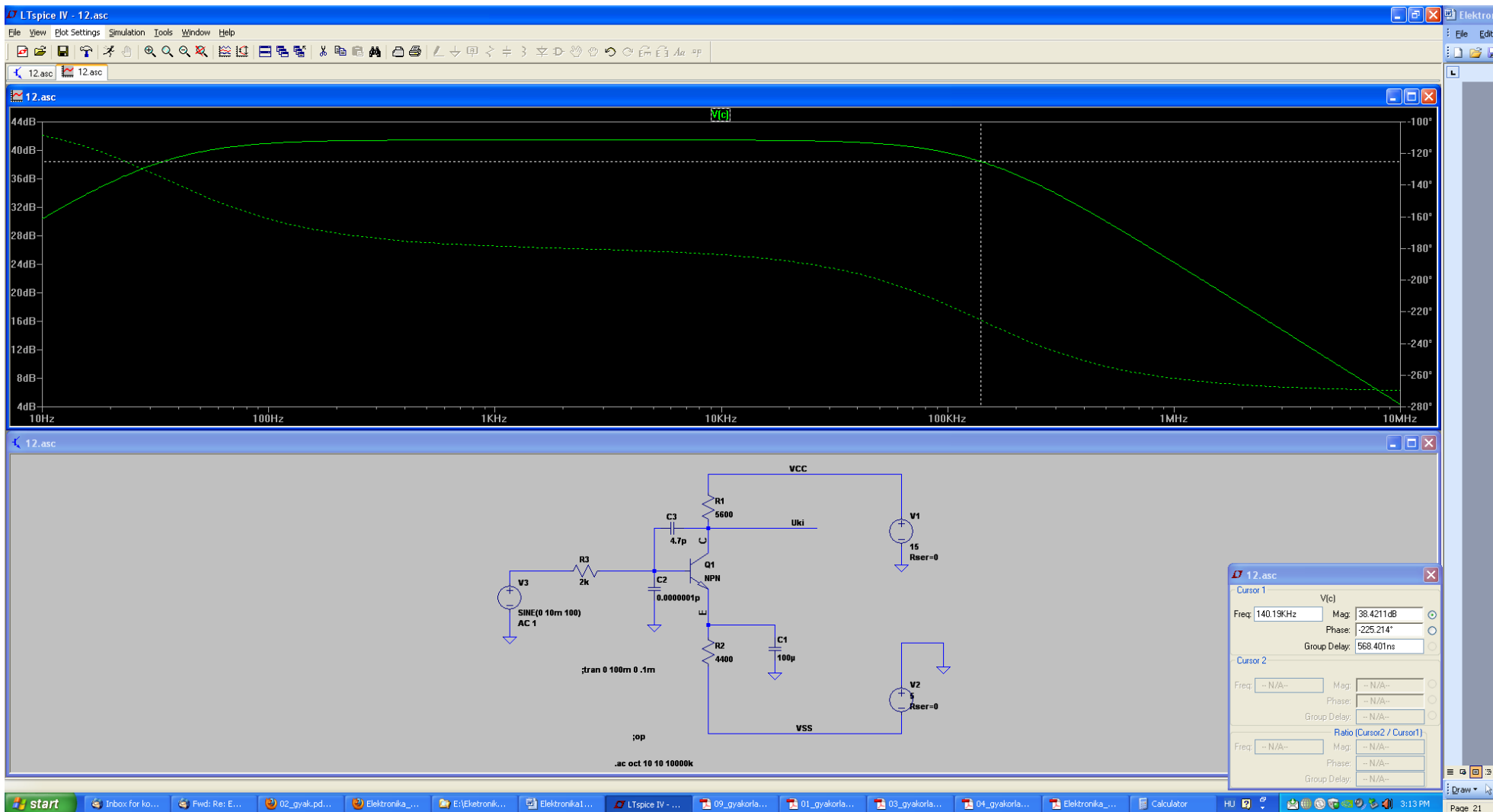
A feszültség erősítés nagy sávszélességét a kaszkód kapcsolással tudjuk megtartani, amikor a nagy C_{BC} ellenére megmarad a nagy sávszélességű feszültség átvitel. Ennek ára a még egy tranzisztor alkalmazása.

7.3. Miller kapacitás okozta frekvenciafüggésének vizsgálata valódi áramkörön

Ellenőrizzük a 7.2. pontban kapott eredményeinket a próbapanelen.



7.2.1. ábra

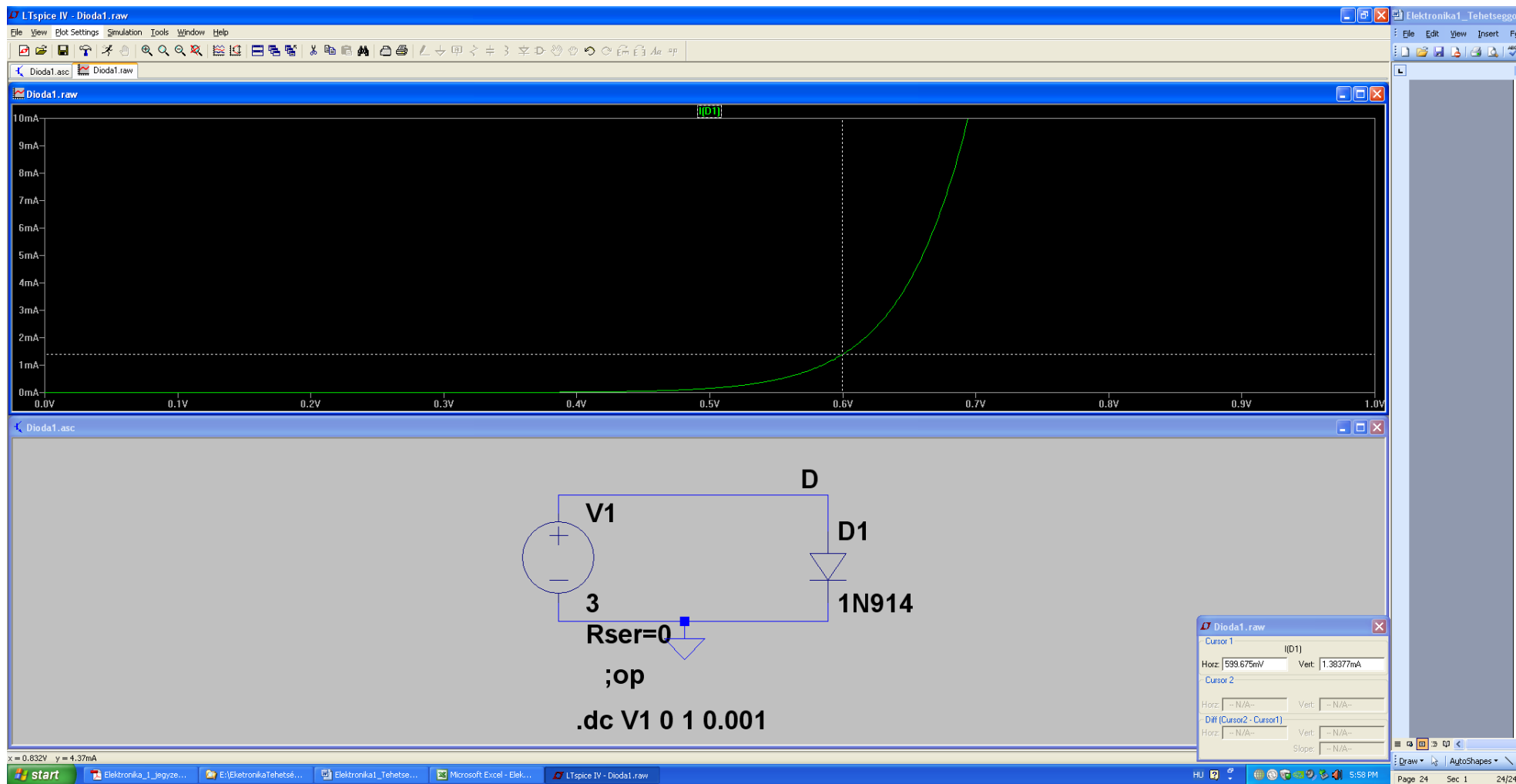


7.2.2. ábra

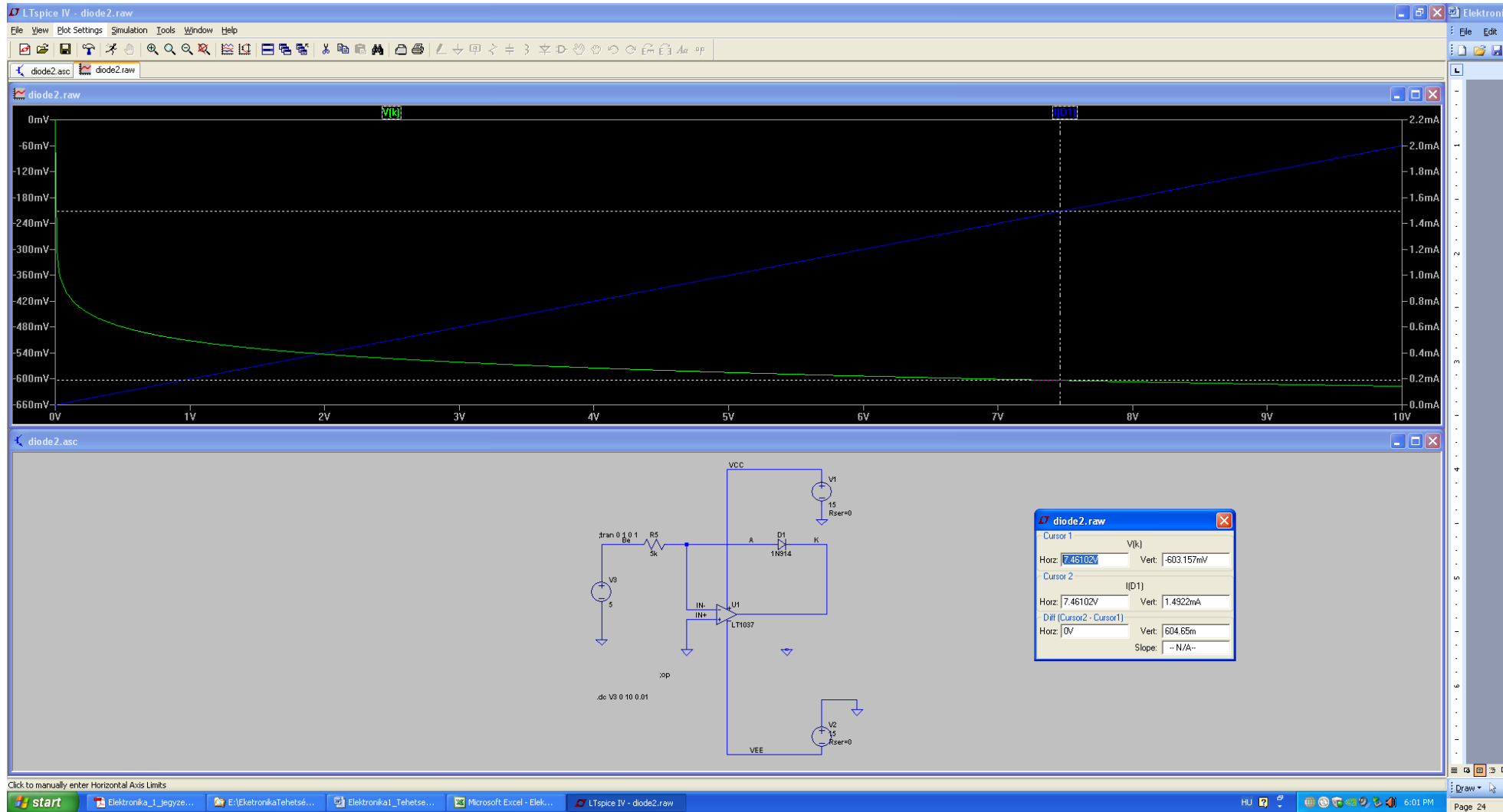


7.2.3. ábra

F1. Félvezető dióda IU karakterisztikájának vizsgálata



Állítsuk össze az ábra szerinti kapcsolást és mérjük meg a dióda áram feszültség karakterisztikáját a DCsweep szimulációs parancsal.



F2. Bipoláris tranzisztor B áramerősítési tényezőjének vizsgálata

The circuit diagram shows an NPN transistor (Q1) in a common-emitter configuration. The base is connected to the collector through a resistor R1 (100k). The emitter is connected to ground (VEE). The collector is connected to VCC (15V) through a resistor R5 (5k). A 5V source V3 is connected to the base through R5. The simulation results are shown in a window titled "Operating Point" with the following data:

--- Operating Point ---		
V(vcc):	15	voltage
V(vee):	-15	voltage
V(be):	5	voltage
V(in-):	9.63353e-008	voltage
V(e):	-1.77423	voltage
V(b):	-1	voltage
Ic(Q1):	0.001	device_current
Ib(Q1):	1e-005	device_current
Ie(Q1):	-0.00101	device_current
I(R1):	-1e-005	device_current
I(R5):	-0.001	device_current
I(V3):	-0.001	device_current
I(V2):	-0.0032202	device_current
I(V1):	-0.0022102	device_current
Ix(u1:1):	-9.63353e-019	subckt_current
Ix(u1:2):	1.01381e-017	subckt_current
Ix(u1:3):	0.0022102	subckt_current
Ix(u1:4):	-0.0032202	subckt_current
Ix(u1:5):	0.00101	subckt_current

F3. Bipoláris tranzisztor B áramerősítési tényezőjének vizsgálata

Alakítsuk át az előző mérési összeállítást, hogy a β mérésére legyen alkalmas. Hogyan függ a β a munkaponti áramtól?

BOM. A laboratóriumi gyakorlatokhoz szükséges alkatrészek

1 db NPN tranzisztor: BC182
1db PNP tranzisztor: BC212
1db BC301 BC303 pár
1db uA741 műveleti erősítő

R:

2db 100 Ohm
1db 820 Ohm
2 db 1k
1 db 1.5k
1 db 2.7k
1db 4.4k (4.7k)
1db 5k
1db 5.6k
2 db 6.8k
1db 7550 Ohm
3db 10k
1 db 14.4k
1 db 15k

2 db 4.7p
2 db100uF
2 db100nF