



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

A tértöltés mérés elmélete és egy PEA rendszerű műszer komponenseinek tervezése

TDK dolgozat

Készítette: Szőke Zsolt

Konzulensek: Németh Bálint, Cselkó Richárd, Szabó Sándor



Összefoglaló

A korszerű villamos szigeteléstechika számos területén egyeduralgokóvá váltak a műanyagok. Ez egyrészt ezen anyagok különböző gyártási technológiáinak ugrásszerű fejlődésének köszönhető, másrészt bizonyos alkatrészek, különösen az integrált áramkörök rohamos méretcsökkenése következtében nagy villamos szilárdságú szigetelésekre lett szükség.

Az olaj-papír szigetelésekkel ellentétben a műanyagokban a töltéshordozók mozgékonyasága igen kicsiny, ezért a tértöltések felhalmozódásának a veszélye fokozottan fennáll. A kész szigetelőkben a felhalmozódás helyét és mértékét lehet megállapítani, a tervezés fázisában levők esetében pedig az elrendezés, illetve a használt anyagra jellemző töltésfelhalmozási hajlam vizsgálható.

A nagy térerősségnek kitett szigetelésekben a csapdába került töltések hatására az elektródák által meghatározotthoz képest erősen torzul a villamos erőtér, így akár normál üzemi körülmények között is a tervezési értékek többszöröse léphet fel azok belsejében. A tértöltés-eloszlások vizsgálatára fejlesztették ki az impulzus elektroakusztikus (pulsed electroacoustic: PEA) elven alapuló méréseket.

Alapesetben a PEA mérés eredménye a tértöltés egydimenziós eloszlása. A detektálás fizikai alapját az képezi, hogy a két elektróda közé helyezett dielektrikumra gyors feszültségimpulzust kapcsolunk, melynek hatására a töltésekre ható erő mechanikai hullámokat gerjeszt. Ezeket a mechanikai hullámokat a földelektróda hátuljára rögzített piezoelektromos film (PVDF) villamos jellé alakítja, és a kapott feszültség-hullámok egy oszcilloszkóp képernyőjén megjeleníthetők, utána pedig számítógépen feldolgozhatók.

Dolgozatomban ismertetem a tértöltés-felhalmozódás és a mérés elméleti alapjait, annak műszaki szerepét, majd részletezem a mérőeszköz egyedi megoldásokat igénylő részegységeinek, tehát az elektródáknak, az impulzusgenerátornak és egy speciális erősítő áramkörnek a tervezését.

Abstract

Plastics have become dominant in many fields of modern electrical insulation technology. On one hand there was a quantum leap in the technology of production. On the other hand the great reduction in size of most electric devices requires materials with high dielectric strength, especially in certain integrated circuits.

Unlike in oil-paper insulations the mobility of charge carriers in plastics are minor, hence the possibility of space charge accumulation is more likely. It is possible to measure the position and quantity of accumulation in manufactured insulators. In case of prototypes accumulation is subservient to examine both by changing the arrangement and the material.

When space charge is present in electrical insulations under high voltage the electric field can be highly distorted compared to the distribution defined by the electrodes. Hence, even in normal operation the electric stress within the dielectric material can be locally multiple times higher than the nominal value. The pulsed electroacoustic (PEA) measurement method has been developed to examine space charge distributions.

The result of the basic measurement is the one-dimensional distribution of charges in the insulating material. The physical basis of the detection is as follows. The dielectric is put between two electrodes and a fast voltage impulse is applied. Force will act on the free charges and mechanical waves will be initiated. There is a piezoelectric film placed on the back of the ground electrode that is able to convert the pressure waves to electric signals. Voltage waves can be displayed on an oscilloscope and later processed on a computer.

This work presents an overview of the theoretical background of space charge accumulation, its measurement and technical role. Afterwards the designs of the custom parts are presented in detail: the electrodes, a fast impulse generator and a special amplifier circuit.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	2
Abstract	3
1. Bevezetés.....	5
1.1 Villamos szigetelőanyagok.....	5
1.2 Tértöltések kialakulása	7
2. A PEA alapjai.....	10
2.1 A mérés elmélete.....	10
2.2 Tértöltések mérési módszerei.....	12
2.3 A PEA mérési elrendezése	13
3. A berendezés megtervezése.....	15
3.1 Az elektródák	15
3.2 Az impulzusgenerátor	19
3.2.1 Avalanche-tranzisztoros kapcsolás.....	20
3.2.2 A FET-es kapcsolás.....	26
3.3 A piezoelektromos film.....	27
3.4 Az erősítő áramkör	29
4. Konklúzió és alkalmazások	32
5. Mellékletek.....	34
I. melléklet: az avalanche-tranzisztoros impulzusgenerátor tervrajzai.....	34
II. melléklet: a FET-es impulzusgenerátor tervrajzai	37
III. melléklet: az erősítő áramkör tervrajzai	40
6. Szakirodalom.....	43

1. Bevezetés

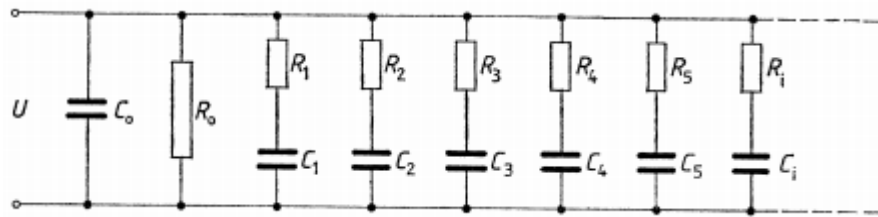
A villamos szigetelésekben lejátszódó degradációs mechanizmusok vizsgálata alapvető szerepet játszik a villamos készülékek diagnosztikája során, hiszen gyakran ezek kritikus pontjai a berendezéseknek, így azok a megbízható és gazdaságos üzemeltetés elengedhetetlen feltételei. A szigetelésekben kialakuló hibák kialakulása hosszabb vagy rövidebb időt vesz igénybe a különböző fizikai paraméterek függvényében. Ilyen tényező például az alkalmazott anyag minősége (olaj-papír, PVC, PE), a feszültség fajtája (DC, impulzus, ipari frekvenciás, nagyfrekvenciás), az elrendezésből adódó térerősség nagysága, vagy egyéb külső terhelések (mechanikai, környezeti, hőmérsékleti) [1].

1.1 Villamos szigetelőanyagok

Villamos szigetelőanyagokat használunk különböző villamos potenciálon levő vezetők egymástól való elválasztására. A szigetelőanyagok nem tökéletes szigetelők, hanem a villamos erőtér hatására fellép bennük a vezetés és a polarizáció folyamata. A vezetés folyamatát azok a villamos töltéssel rendelkező elemi részecskék okozzák, amelyek az erőtér hatására végleg elhagyják a helyüket és a szigetelőanyagban az ellenkező polaritású elektróda felé haladva, annak elérésekor átadják töltésüket. A polarizáció folyamatát viszont azok a töltéssel rendelkező anyagrészecskék hozzák létre, amelyek a helyüket nem hagyják el végleg, hanem az erőtér hatására csak eltolódnak az ellenkező polaritású elektróda felé, de az erőtér megszűnésekor újra visszatérnek eredeti helyükre. Így a polarizáció az anyagban dipólusmomentum megjelenésével jár.

A szigetelőanyagban fellépő dielektromos folyamatokat első közelítésben az *1. ábrán* látható helyettesítő kapcsolással lehet jól szemléltetni. A helyettesítő kapcsolatban a C_0 képviseli az elektródaelrendezés szigetelőanyag nélküli, geometriai kapacitását, R_{SZ} a szigetelés ohmos ellenállását, az egyes R_P-C_P tagok pedig a különböző időállandójú polarizációs folyamatokat. Az RC-tagokban a kapacitások jelképezik az illető folyamat által lekötött töltést, azaz az adott

polarizációs folyamat erősségével arányosak, az RC szorzat pedig a folyamat időállandóját adja.



1. ábra

Üzemeltetés szempontjából a szigetelés legfontosabb jellemzője a villamos szilárdság, ez azonban időben nem állandó, hanem a szigetelés romlási folyamatai következtében üzem közben folyamatosan csökken, az üzembiztonsággal együtt. A szigetelés villamos szilárdságát közvetlenül csak roncsolásos vizsgálatokkal, a szigetelés tönkretételével mérhetjük. A roncsolásmentes szigetelésvizsgálati módszerek adnak lehetőséget arra, hogy a szigetelés állapotának, villamos szilárdságának valószínű változásáról közvetve tájékoztatást kapjunk.

Ezen mérések közé tartoznak a különböző feszültségpróbák egy része, a kapacitás, a dielektromos veszteségi tényező, a töltőáram, a feszültségválasz, a visszatérő feszültség mérése, vagy a részleges kisülések vizsgálata. Ezen klasszikus mérési eljárások mellett az utóbbi években megjelentek újabb villamos és nem villamos mérési módszerek [2].

A dolgozat további részében egy elektroakusztikus elven működő eljárást és mérőműszert mutatok be, mellyel sík szigetelőmintákon mérhetjük, hogy mennyire hajlamosak tértöltés-felhalmozódásra, ezáltal az üzembiztonság drasztikus lecsökkenésére. A mérőeszközt a villamos szigeteléstechnika számos területén lehet alkalmazni, többek között nagyfeszültségű kábelek, integrált áramkörök, vagy piezoelektromos filmek gyártásánál.

1.2 Tértöltések kialakulása

A villamos szigetelőanyagok, különösen a polimerek üzemi terhelésből fakadó romlási folyamatai összefüggésben vannak a tértöltések felhalmozódásával. Ezek a töltések befolyásolják a belső térerősség-eloszlást, elektromechanikai energiát tárolnak, belső feszültségeket keltenek, és növelhetik a mikroüregek méretét. Mindezen folyamatok a szigetelés korai, visszafordíthatatlan romlásához, öregedéséhez vezetnek. Ebben a tekintetben a polimerek egyik hátránya az olajpapír szigetelésekhez képest, hogy a belsejükben könnyebben fel tudnak halmozódni a tértöltések, mert azok mobilitása nagyságrendekkel kisebb.

Sajnálatos módon azon fizikai paraméterek, melyek mennyiségileg leírják a töltések dinamikáját - mint például a töltések mobilitása, vagy a töltéscsapidák mélysége - csak igen különleges körülmények között számíthatók, így azok egzakt módon csak méréssel határozhatók meg [3].

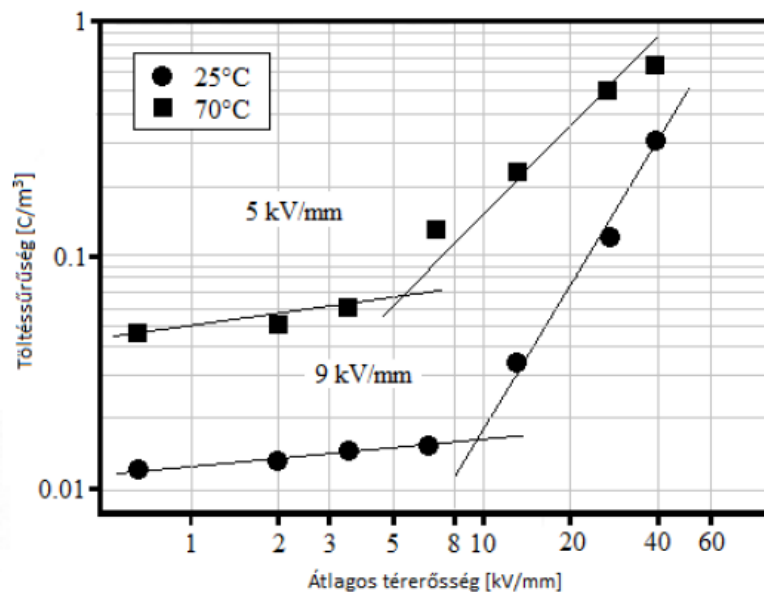
A tértöltések kialakulásához időre van szükség, az állandósult állapot eléréséhez általában órák vagy napok kellenek az üzemi feszültség amplitúdójától függően, azonban a felhalmozott töltés mennyisége ipari frekvenciás terhelés esetén, mindig kisebb, mint egyenfeszültségű esetben, hiszen az előbbihez az szükséges, hogy a töltések injektálása aszimmetrikus polaritású legyen.

A következőkben áttekintjük azokat a fizikai folyamatokat, amelyek összefüggésbe hozhatók a tértöltések szigetelő anyagokba történő injektálásával a váltakozó feszültségre tervezett, polietilén alapú szigetelőkben:

- injektálódás az elektródáról (pl. nagy előfeszítő egyenfeszültség),
- a szigetelés vezetőképességének inhomogenitásai miatt (pl. zérustól különböző hőmérsékleti gradiens),
- inhomogén dielektrikumok esetén (pl. két különböző szigetelés határfelületén).

Amikor az alkalmazott térerősség egy bizonyos határérték alatt van, akkor az injektált töltés elhanyagolható és a szigetelés Ohm törvénye szerint viselkedik, tehát nincs nettó felhalmozódás. Ahogyan a hőmérséklet és/vagy a villamos térerősség

növekszik, el fogjuk érni azt a fizikai határértéket, hogy a töltések erősen injektálódni kezdenek és felhalmozódnak a szigetelés belsejében, lásd a 2. ábrán:



2. ábra

A kábel keresztmetszete mentén fellépő hőmérsékleti gradiens szerepe nem hanyagolható el a töltés-felhalmozódás szempontjából, hiszen mind a fajlagos vezetőképesség, mind a permittivitás hőmérsékletfüggő értékek. Ennek akkor lehet nagy szerepe, amikor adott hőmérsékleten a határ-térerősség közelében vagyunk, tehát még éppen nem indult meg az intenzív töltés-felhalmozódás. Inhomogén dielektrikumokban, különösen a szigetelésrétegek határánál ez a jelenség tovább fokozódik [4].

Általánosságban is elmondható, hogy a szigetelésrendszerek leggyengébb részei a határfelületek, viszont sok gyakorlati probléma több, különböző szigetelőanyag együttes alkalmazását igényli, ami viszont számos határfelülettel jár. Tipikus példaként a kábelek külső szigetelését, végelzáróját, transzformátorok olaj-papír felületét, gáztöltésű kapcsoló berendezéseket vagy a rétegzett szigeteléseket említeném. A tervezés során szigetelések felülete a tértöltések felhalmozódása miatt további elővigyázatosságot igényel [5].

A tértöltések gyakran kerülnek összefüggésbe a villamos öregedéssel: egyszer a kettő közötti ok-okozati viszony egyik, másszor másik, olykor mindkét oldalán.

Ebből adódóan a tértöltésekkel kapcsolatban álló mennyiségekkel leírhatók az öregedés jelei, különböző nano- és mikroszemcsék hatása a szigetelőképessegre és általánosságban minőségileg jellemezhető vele a szigetelőanyag [6].

2. A PEA alapjai

2.1 A mérés elmélete

Célunk a mért jelből a szigetelésben felhalmozódott tértöltések sűrűségének az eloszlását megállapítani annak vastagsága mentén.

A szigetelőanyagban az x helyen felhalmozott töltéssűrűséget jelölje $\rho(x)$. Külső $e(t)$ térerősség bekapcsolásakor a $\rho(x)\Delta x$ töltésrétegre

$$\Delta p(x, t) = \rho(x) \Delta x e(t)$$

nyomás hat. Az eloszlás egydimenziós vizsgálatokor Δp nyomáshullám késleltetve érkezik az elektroakusztikus filmhez. Jelöljük v_y -nal az y anyagban az akusztikus hullám terjedési sebességét, l -lel a földelektróda és k -val pedig a PVDF vastagságát. Ekkor a

$$\Delta p \left(x, t - \frac{l}{v_{elektróda}} - \frac{k}{v_{PVDF}} \right) = A \rho(x) \Delta x e \left(t - \frac{l}{v_{elektróda}} - \frac{k}{v_{PVDF}} \right)$$

egyenlet teljesül, ahol A egy dimenzió nélküli korrekciós állandó. Az érzékelt hullám az infinitezimális Δx vastagságú töltésrétegek összegeként keletkezik, ezért egy térbeli integrálással az x helyváltozót kiejthetjük:

$$p(t) = A \int_0^x \rho(x) e \left(t - \frac{l}{v_{elektróda}} - \frac{k}{v_{PVDF}} \right) dx$$

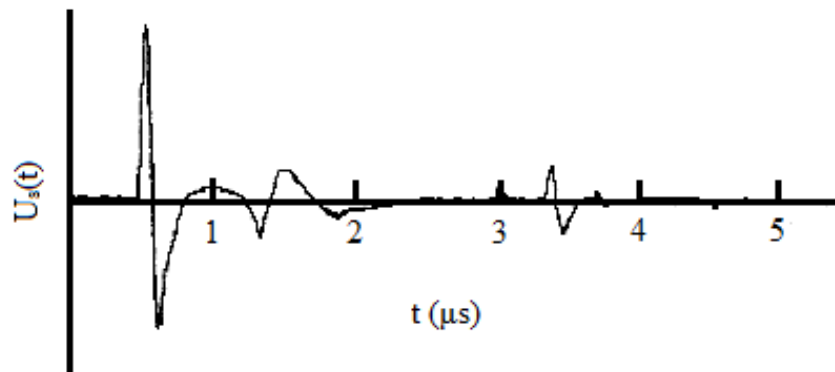
Az elektródában történő késleltetés ($l/v_{elektróda}$) állandó, viszont a felhalmozott tértöltések helye (x) nem, ezért a dielektrikumban történő terjedéshez szükséges idő ($\tau=k/v_{PVDF}$) sem az. Az integrálást ezért nem a töltés helye szerint, hanem a mért villamos jel időtartományában végezzük. A töltéssűrűség eloszlását $\rho(x)$ helyett $r(\tau)$ -val reprezentálva jól látható, hogy $p(t)$ az $r(\tau)$ és az $e(t)$ konvolúciója:

$$p(t) = A v_{PVDF} \int_0^t r(\tau) e \left(t - \frac{l}{v_{elektróda}} - \tau \right) d\tau = A v_{PVDF} (r * e)$$

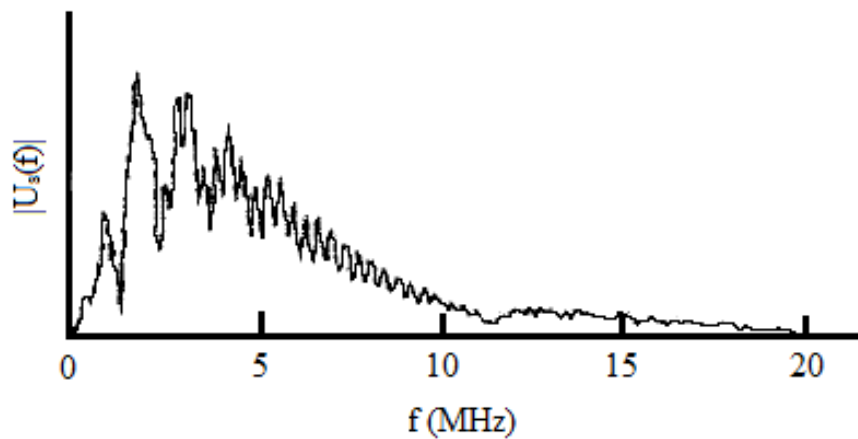
A konvolúció időtartományban bonyolult művelet, viszont a Fourier-transzformáció alkalmazása után a frekvenciatartományban egyszerű szorzássá alakul:

$$P(f) = A v_{PVDF} R(f) E(f) e^{-j2\pi f \frac{l}{v_{elektróda}}}$$

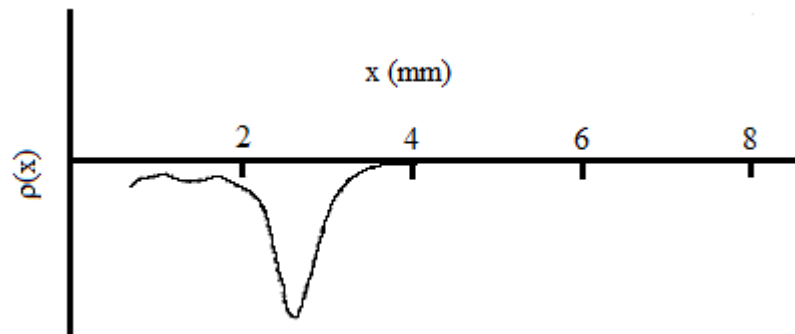
Utóbbi egyenletről kaphatunk információt a töltések eloszlásáról egy dekonvolúciót alkalmazó matematikai eljárás segítségével. Példaként illusztrálnék egy 1 μ s körüli feszültségimpulzusra kapott villamos jelet az időtartományban (3. ábra), a frekvenciatartományban (4. ábra), és az ebből számolt töltéssűrűség-eloszlást (5. ábra) [7]:



3. ábra



4. ábra



5. ábra

2.2 Tértöltések mérési módszerei

Napjainkban több módszer is elterjedt a tértöltés-eloszlások közvetlen, roncsolásmentes mérésére. Ezeket röviden az 1. táblázatban mutatnám be:

1. táblázat

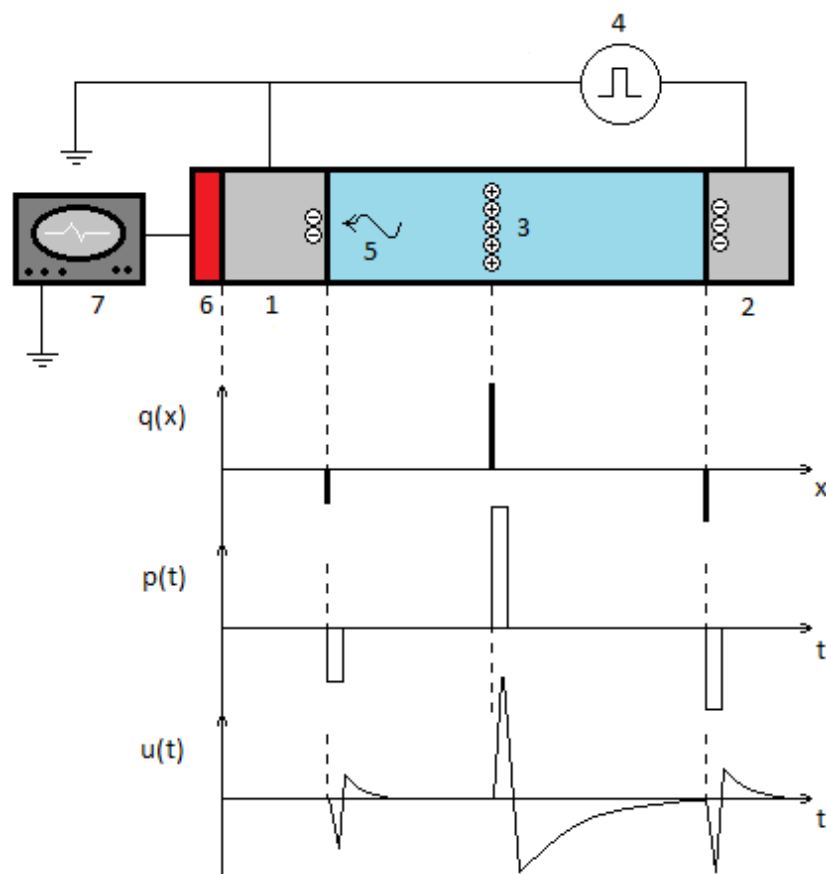
Rövidítés	A módszer angol neve	Gerjesztés	Válasz
PEA	Pulsed Electro Acoustic	feszültségimpulzus	mechanikai impulzus
PWP	Pressure Wave Propagation	mechanikai impulzus	feszültségimpulzus
TSM	Thermal Step Method	hőmérséklet-lépcső	áram
TPM	Thermal Pulse Method	hőimpulzus	feszültség
LIMM	Laser Intensity Modulation Method	hőimpulzus	áram
EBM	Electron Beam Method	elektronsugár	áram

A PEA mérés során nagy feszültségimpulzust kapcsolunk a mérendő szigetelésmintára, melyben a felhalmozott tértöltések mechanikai impulzust generálnak, ezt mérjük egy piezoelektromos átalakító segítségével. Technológiailag egyszerűbb és bő szakirodalom áll a rendelkezésre, ezért választottam ezt a metódust. A PWP-módszer gyakorlatilag a PEA inverze: a mintát mechanikai impulzussal gerjesztjük („megkopogtatjuk”), az elmozduló tértöltések villamos feszültséget hoznak létre. A TSM eljárás alapja, hogy hőhullámot indítunk a

dielektrikumban, mely hatására felborul a töltések lokális egyensúlya, így mérhetővé válik a töltéssűrűség eloszlása. A többi módszer kevésbé elterjedt, csak a teljesség kedvéért említem őket [8].

2.3 A PEA mérési elrendezése

Az egyszerűsített mérési elrendezés a 6. ábrán látható, a mintánk egy szigetelő lemez:



6. ábra

A rajzon jól követhető a működés: egy földelt (1) és egy nagyfeszültségű elektróda (2) közé helyezzük a mintát (3), melyben valamilyen külső hatás (nagy DC előfeszítő feszültség, β -sugárzás stb.) következtében tértöltés halmozódik fel. Ez az elektródákon ellentétes polaritású felületi töltést hoz létre a megmaradási törvény

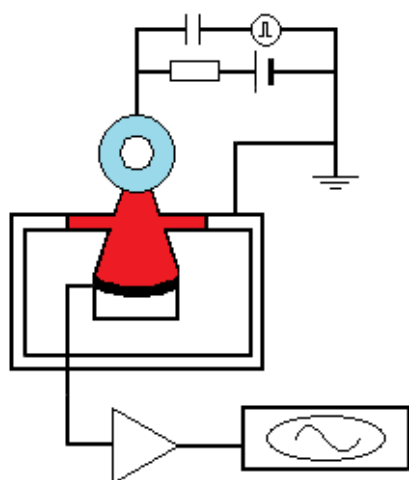
értelmében. A töltéseloszlást a $q(x)$ függvény írja le. Egy feszültségimpulzus (4) hatására villamos térerősség lép fel az anyagban, ezáltal erő hat a töltésekre a Coulomb-törvény értelmében, mely impulzusszerű, $p(t)$ mechanikai nyomáshullámokat (5) indít az anyagban a töltések helyéről. Ezek a hullámok a vizsgált mintán és az elektródákon áthaladva elérnek egy piezoelektromos eszközt (6), mely a mechanikai hullámokat $u(t)$ villamos jelekké alakítja. A feszültség-hullámok időbeli alakjából következtetni lehet a töltések térbeli, egydimenziós eloszlására [9].

3. A berendezés megtervezése

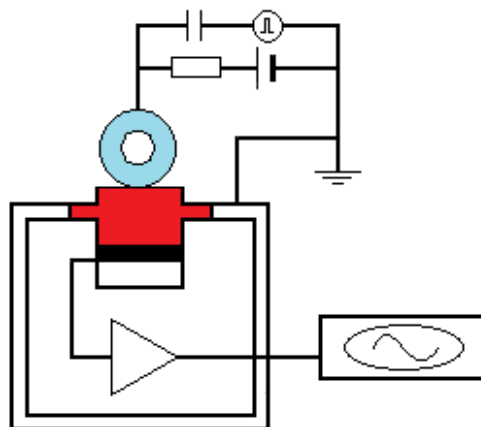
Tekintsünk vissza a PEA eszköz felépítésére. A mérendő mintát egy földelő és egy lezorító elektróda közé helyezzük. A töltések felhalmozódásához nagy egyenfeszültséggel előfeszítjük a mintát és egy feszültségimpulzust kapcsolunk rá. A töltések a térerősség-impulzus hatására „megrándulnak”, a mintából mechanikai hullám indul, amit egy piezoelektromos film villamos jellé alakít. A jelet erősíteni szükséges egy speciális áramkörrel, ezt követően egy oszcilloszkóppal történik a mérés, végül az eredményt egy szoftver segítségével fel kell dolgozni egy számítógépen. Ebben a fejezetben a szükséges eszközök tervezési és építési folyamatát ismertetem.

3.1 Az elektródák

A lehetséges elektróda-elrendezések számba vételekor a mérendő szigetelések tipikus elrendezését érdemes figyelembe venni. Ezek alapján beszélhetünk síkmintákról, tehát filmekről, vagy tömbökről, illetve kábelek koaxiális szigeteléseiről. Síkminták mérésekor a mintát egyszerűen be kell szorítani az elektródák közé, ezzel biztosítva az akusztikai csatolást. Nem kellően sima felületek esetén alkalmazhatunk akusztikus csatoló zsiradékot a rések kitöltésére. A helyzet némileg komplikáltabb a hengeres szigetelések mérésekor: alkalmazhatunk görbített elektródákat (7. ábra), mellyel jó csatolás biztosítható, viszont az eltérő méretű kábelek miatt többféleképpen is szükség lesz, vagy mérhetünk sík elektródával is (8. ábra), azonban a kisebb érintkezési felület miatt rosszabb csatolást és jel-zaj viszonyt kapunk. A probléma enyhíthető az erősítő árnyékolásával.

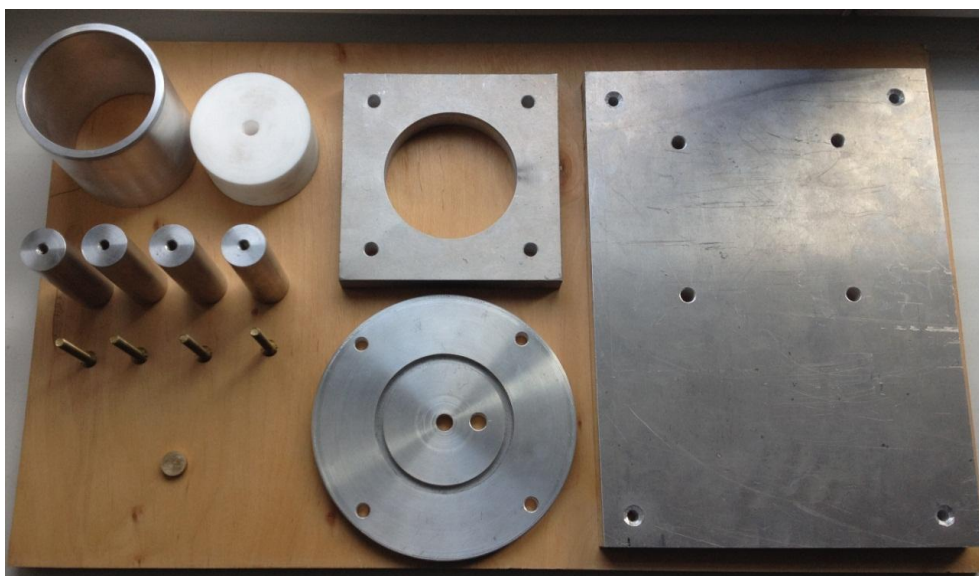


7. ábra



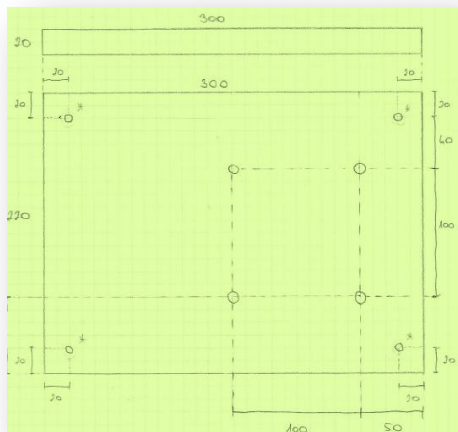
8. ábra

A prototípus megépítésénél síkelektrodát alkalmaztam szélesebb körű alkalmazhatósága miatt. A földelektroda és a nagyfeszültségű leszorító elektróda geometriáját igyekeztem egy már ismert konstrukció paramétereit követve, tradicionális „papír-ceruza módszerrel” megtervezni és azt egy esztergályossal legyártatni alumíniumból. Ennek a végeredménye összeszerelés előtt a 9. ábrán látható:

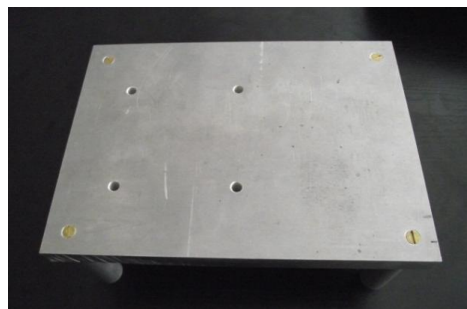


9. ábra

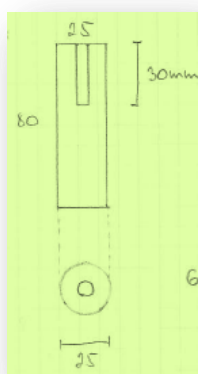
A földelő elektróda (10. és 11. ábra) felépítése egy asztalkához hasonlít, lábakon áll (12. és 13. ábra), és az alján lesznek az elektronikai eszközök, valamint a piezoelektromos film:



10. ábra



11. ábra

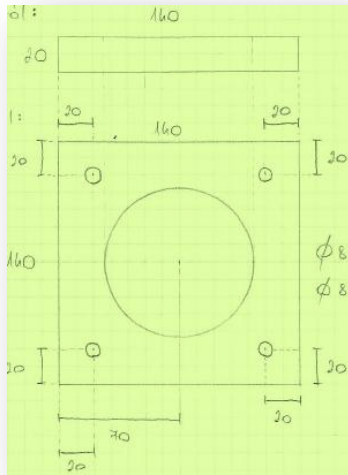


12. ábra

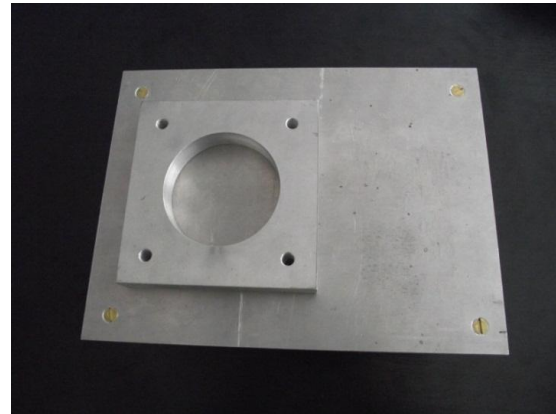


13. ábra

A mintákat az „asztal” tetején fogjuk elhelyezni. A két elektróda között árnyékolás található (14. és 15. ábra):

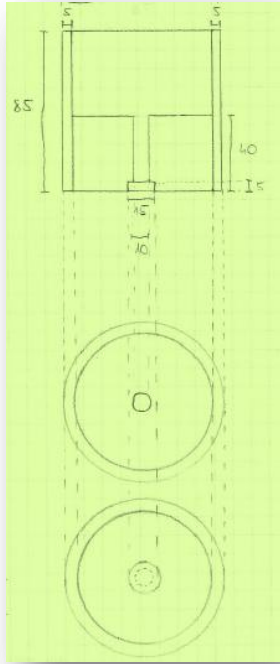


14. ábra

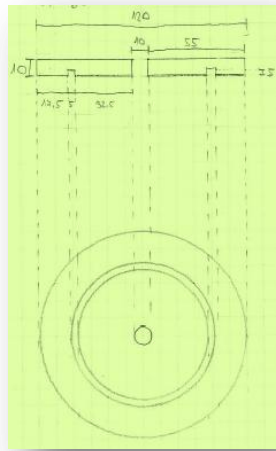


15. ábra

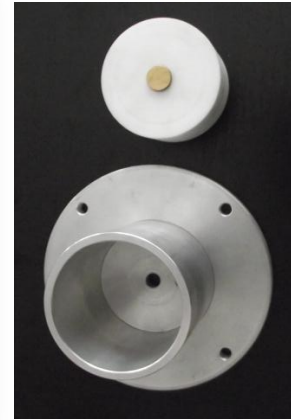
A nagyfeszültségű elektróda egy alumíniumhenger belsejében található, ami illeszkedik az árnyékolásba. A belsejében egy rézkorongra csatlakoznak a nagyfeszültségű források, és ezt a korongot egy metamidból készült henger szigeteli el a külső faltól. Az alumíniumhenger tetejére csatlakozik egy „sapka”, amin két lyukat helyeztünk el. Itt vezetjük be az előfeszítő egyenfeszültséget és a gerjesztő feszültségimpulzust (16., 17. és 18. ábra) [10]:



16. ábra



17. ábra



18. ábra

3.2 Az impulzusgenerátor

Az impulzus elektroakusztikus módszer nagy amplitúdójú és gyors feszültségimpulzusokat igényel, melyeket a szigetelésben felhalmozódott töltésekre kapcsolva akusztikus hullámokat mérhetünk. Ezeket a speciális impulzusokat úgy állítjuk elő, hogy egy jelgenerátor által biztosított feszültség hullámokat egy megfelelően nagy tápfeszültségű és sebességű kapcsoló segítségével erősítjük. A nagyfeszültségű impulzus kicsatolásához célszerű egy koaxiális kábelt, mint elosztott paraméterű tápvonalat használni. A kábel végét üresen járattva, a +1-es reflexiók tényezőit kihasználva kialakul az impulzus második éle, mely az elsőhöz hasonló meredekségű lehet. A tápfeszültség nagyságával az impulzus csúcserő, a kábel hosszával pedig annak szélessége szabályozható.

A tértöltések által a piezoelektromos érzékelőn keltett feszültségimpulzusok nagyon gyengék, mindössze néhányszor $10 \mu\text{V}$ -ot tesznek ki, ezért digitális oszcilloszkóp használata esetén több impulzus átlagolásával érdemes a jel/zaj viszonyt javítani.

Ehhez az szükségeltetik, hogy az impulzusgenerátor megfelelő alapharmonikus frekvenciával az impulzusokat képes legyen megismételni. Az ismétlés frekvenciáját a hőterhelés korlátozza, hiszen egyszerre jelentős áram és feszültség a kapcsolón csak a kapcsolás pillanatában jelenik meg.

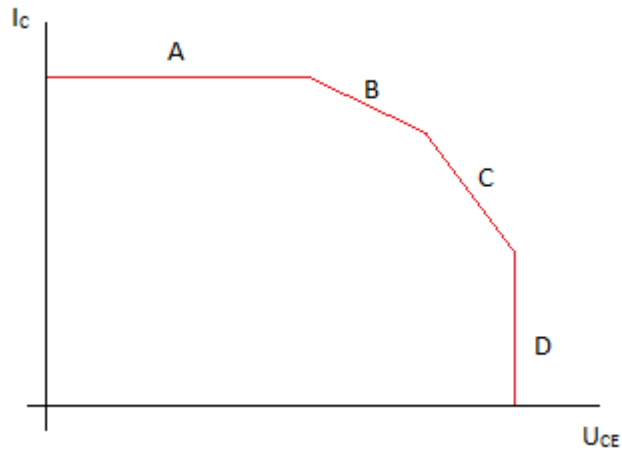
Kettő, különböző elven működő kapcsolót próbáltam ki különböző alkatrészekkel az impulzusgenerátor megépítéskor, hogy az optimálishoz közeli megoldás születhessen. Az első, olcsóbb változatban a félvezetőkben megfelelően nagy feszültségen lejátszódó lavina-effektust használok ki, a másodikban pedig nagy sebességű FET-eket használok a kapcsolásra.

3.2.1 Avalanche-tranzisztoros kapcsolás

A lavina-effektus üzemszerű felhasználásával igen gyors kapcsolásokat érhetünk el. Az elektronlavina mind szigetelőkben, mind félvezetőkben előforduló jelenség. Egy félvezető anyag belsejében kétféle töltéshordozó létezik: szabad elektronok és lyukak. Egy kötött elektron szabaddá válhat például a termikus energiájának köszönhetően, ezáltal elektron-lyuk párt keltve. Amennyiben feszültség mérhető a félvezető két vége között, akkor az elektron a pozitív, míg a lyuk a negatív pólus felé fog elmozdulni egészen addig, amíg a kristály túlsó végét el nem éri, majd megáll. Viszont ha a félvezetőre kapcsolt feszültség elegendően nagy, akkor a szabad elektron a lyukakhoz képesti nagyobb mozgékonyságának köszönhetően akkora kinetikus energiára tehet szert, hogy az ütközések során más elektronokat is szabaddá tehet, így még több elektron-lyuk párt gerjesztve. Amikor az áramerősség elér egy kritikus értéket, akkor a félvezető hőmérséklete elég nagy lesz ahhoz, hogy további elektronokat gerjesztve pozitív visszacsatolásként exponenciálisan növelje az áramerősséget. Ezt hívjuk lavinaeffektusnak. Ezen eszközökkel elérhető a számunkra szükséges, nanoszekundum nagyságrendű fel-, illetve lefutási idő.

A tranzisztorok munkapontja az ilyen használat során, különösen a tesztelési fázisban a biztonságos működési tartományon (Safe Operating Area, röviden SOA) kívülre kerülhet, ezért az áramkörbe tokokat ültettem a számukra, hogy meghibásodáskor gyorsan cserélhetők legyenek. SOA-nak nevezzük bipoláris tranzisztorok esetén azon, I_C - U_{CE} , mindkét irányban logaritmikusan skálázású síkon

vett tartományt, melyben az eszköz a működése során várhatóan nem szenved maradandó károsodást. A SOA-ra egy példa az 19. ábrán látható: az A-val jelölt egyenest a maximális áramerősség, a B-t a maximális disszipált teljesítmény, a C-t a másodlagos letörés létrejötte, a D-t pedig a maximális feszültség határozza meg.



19. ábra

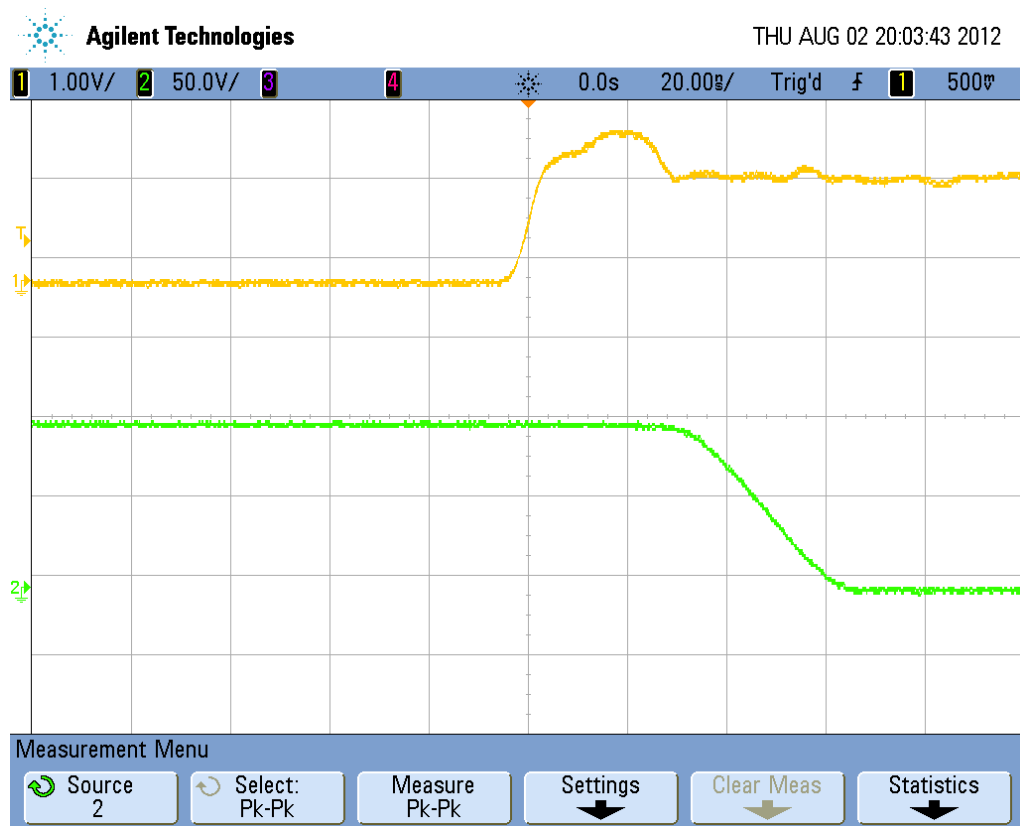
A próbák során négyféle tranzisztort próbáltam ki: BC547b, BC182b, BC549c, BC546b népszerű típusokat. A mérési eredményeket összefoglaltam a 2. táblázatban:

2. táblázat

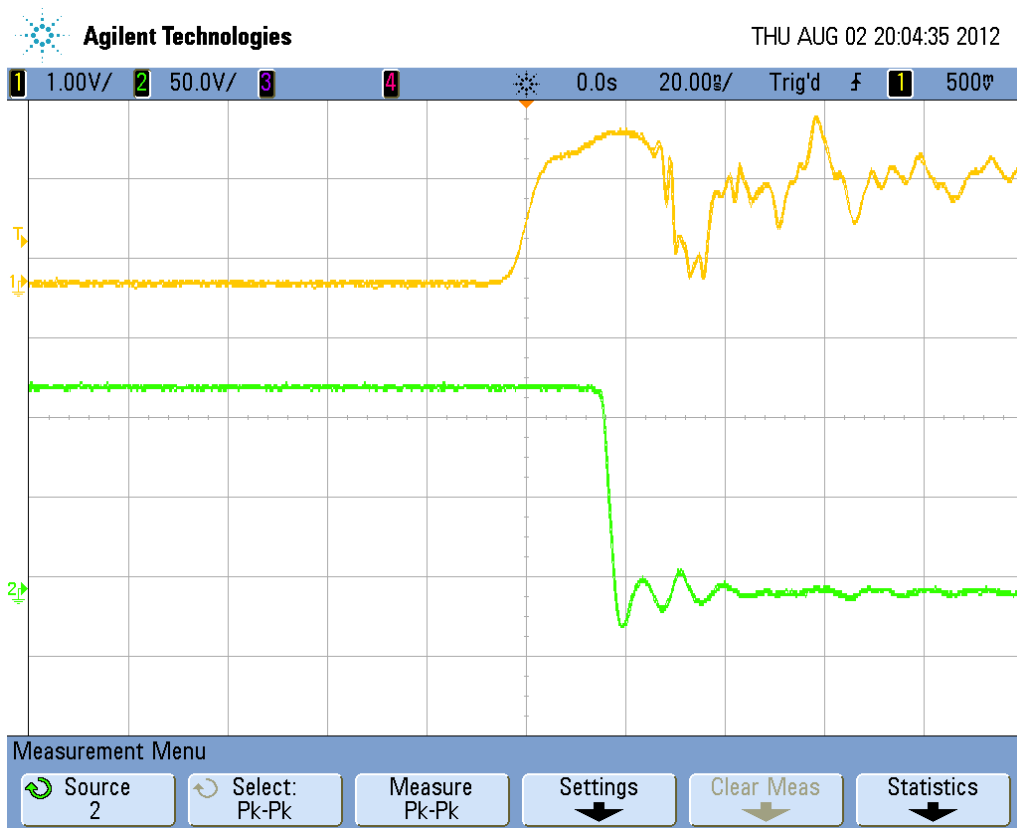
Típus	Névleges U_{CE}	Lefutási idő másodlagos letörés nélkül	Másodlagos letörés minimális feszültsége	Lefutási idő másodlagos letöréssel
BC549c	30V	24ns (105V)	116V	2ns (126V)
BC547b	45V	24ns (114V)	129V	2ns (140V)
BC182b	50V	26ns (116V)	144V	2ns (159V)
BC546b	85V	36ns (200V)	-	-

Az előzetes becsléseknek megfelelő nanoszekundumos nagyságrendű lefutási időt az eredmények alátámasztják. A névlegeshez közelebb álló feszültség melletti tipikus jelalakot az 20., a lavina-effektussal együtt járó pedig az 21. ábrán láthatjuk. Az ábrákon az egyes csatorna (sárga) jelöli a jelgenerátor által biztosított bemeneti jelet, a kettes pedig (zöld) az áramkör kimenetét. A BC546b típusú tranzisztort nem

sikerült a megfelelő tartományba vezérelni, nem jött létre a másodlagos letörés, elegendően nagy feszültség (440V) elérésekor pedig átütött.

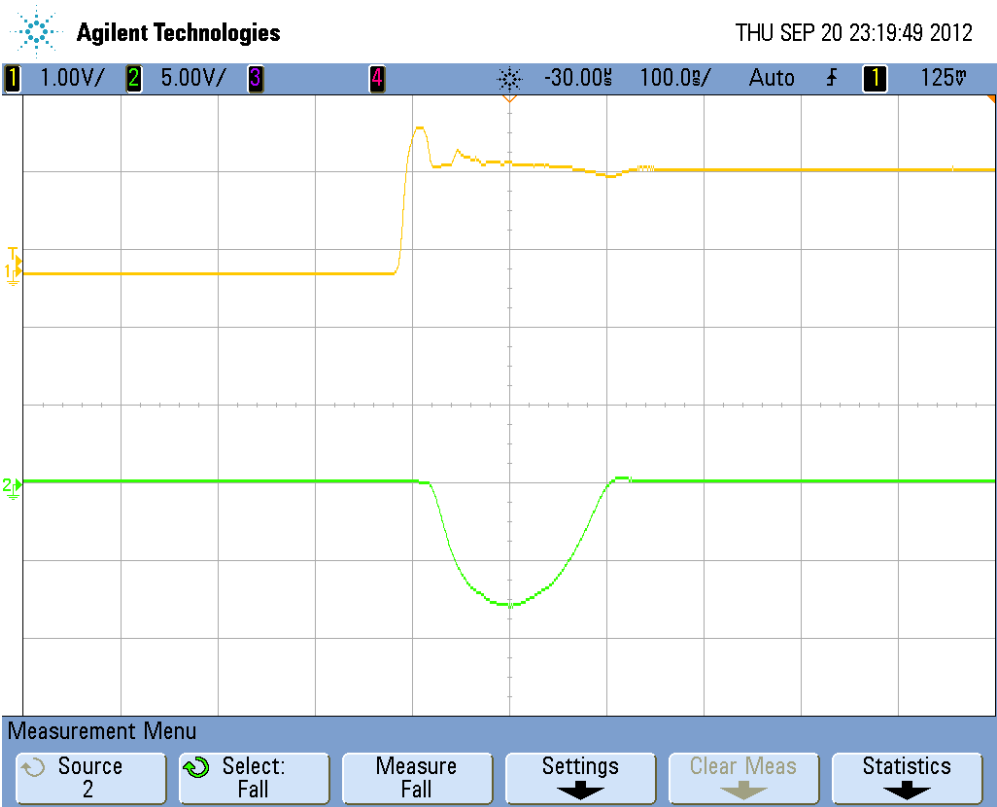


20. ábra

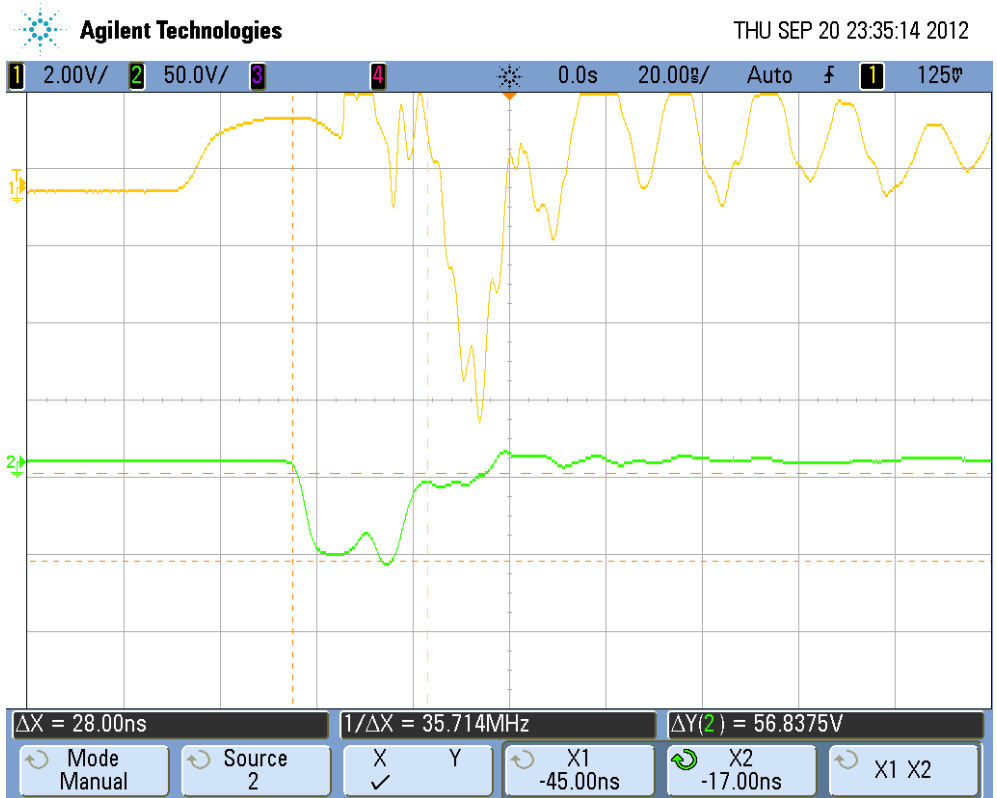


21. ábra

Próbapanelen készítettem egy maximum 10 fokozatból álló kapcsolót, melybe beültettem egy BC182 típusú tranzisztort. A mérés során kicsatoló kondenzátor nélkül csak a tranzistor kollektoráról levett jelből lehetett látni az 21. ábra szerinti lavinaeffektust, viszont egy koaxiális kábelt használva a csatolást is megoldottuk, annak végét nyitottan hagyva +1-es reflexiós tényezőt nyertünk, így kialakult a nagyfeszültségű impulzus. Az impulzus az avalanche-effektus nélkül a 22. ábrán, nagyobb feszültségen pedig a 23. ábrán látható.

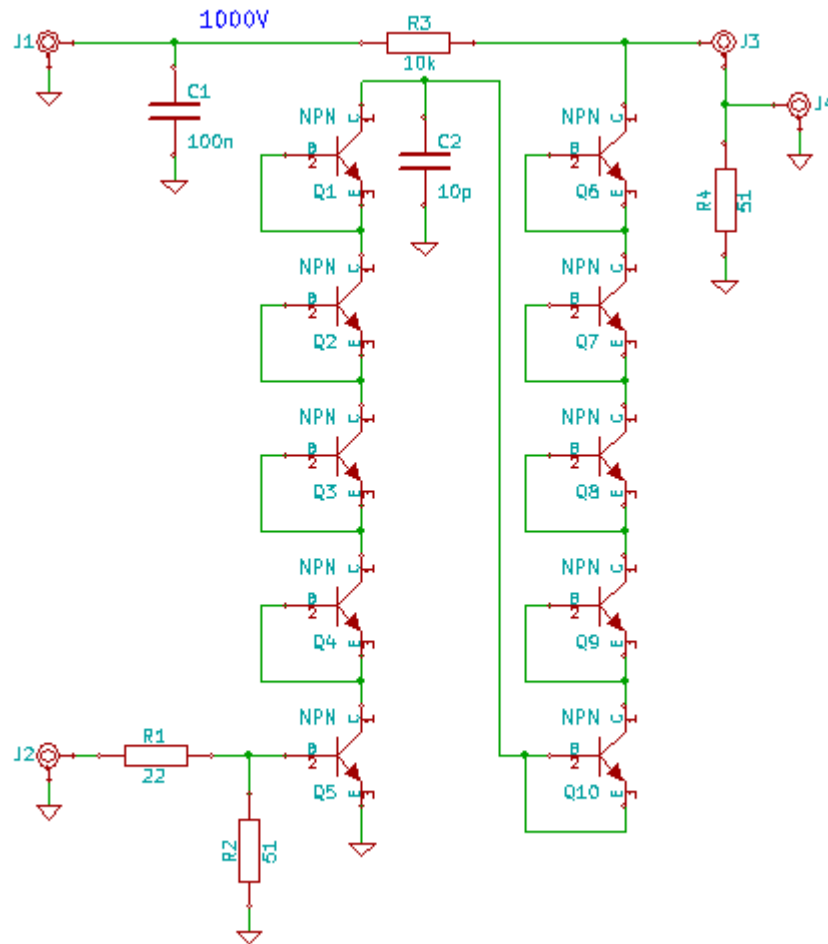


22. ábra

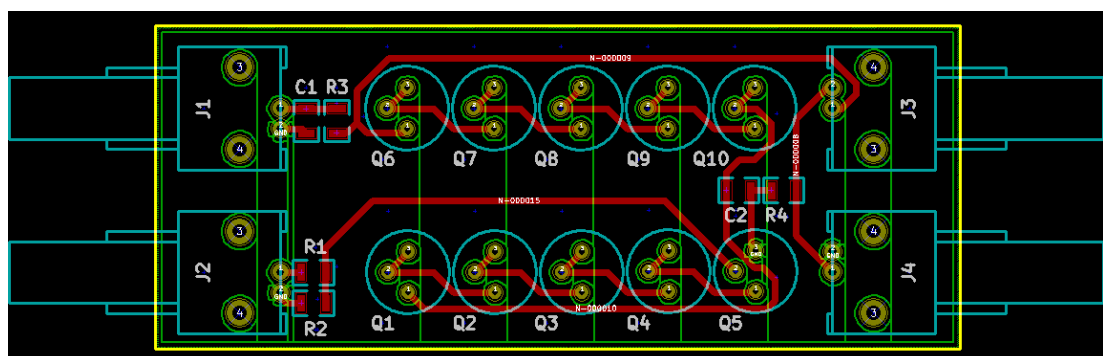


23. ábra

A működést ellenőrizvén egy későbbi, robosztus áramkör legyárthatósága érdekében NYÁK-ot terveztem az 24. ábrán látható kapcsoláshoz. Az 25. ábrán található a NYÁK tervrajza, melyet részletekbe menően az I. mellékletben talál az Olvasó.



24. ábra



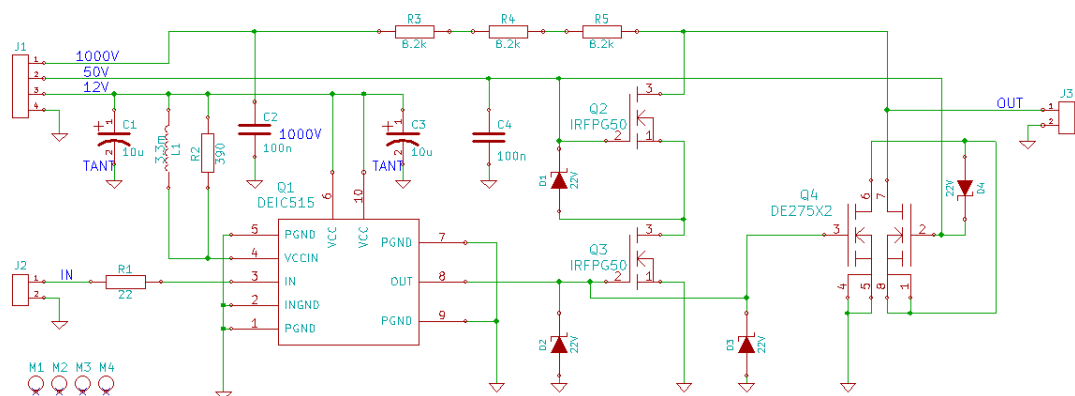
25. ábra

Több avalanche tranzisztor sorba kapcsolásával növelhető a tápfeszültség a kívánt kilovoltos nagyságrendig[11][12].

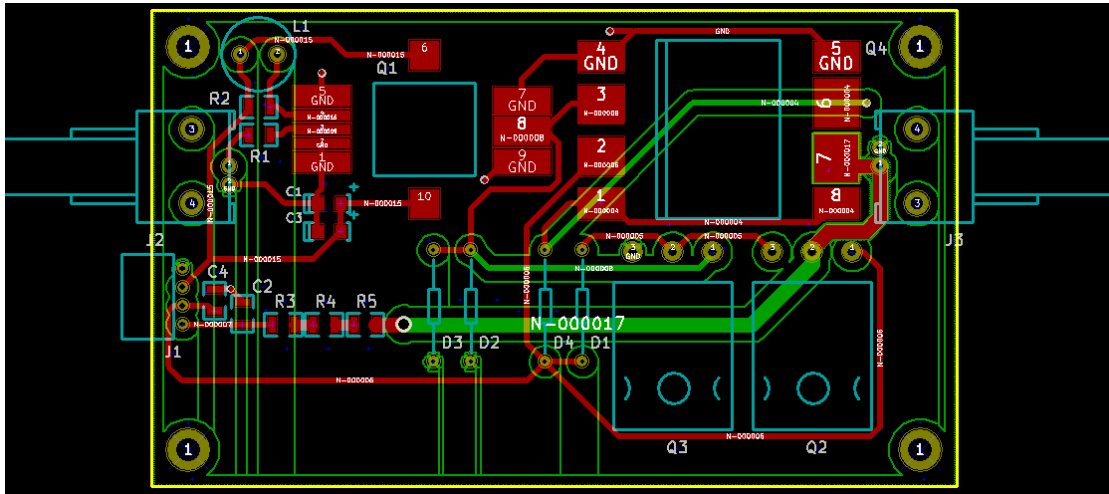
3.2.2 A FET-es kapcsolás

A második megoldás során a kapcsolót FET-ekkel valósítottam meg. Az előző típushoz hasonlóan ehhez is terveztem NYÁK-ot, méghozzá úgy, hogy kétfajta nagyfeszültségű félvezető eszközt is kipróbálhassak: IRFPG50 és DE275X2 típusokat. Az IRFPG50 egy, a DE275X2 egy illesztett pár nagy sebességű teljesítmény MOSFET. Mindkettő alkalmas a gyors kapcsolásokra, meghajtásukról egy DEIC515 driver gondoskodik.

Az áramkör terveit a 26., a hozzátartozó NYÁK-ét pedig az 27. ábrán láthatjuk. A részletes tervrajzok a II. mellékletben találhatóak [12].



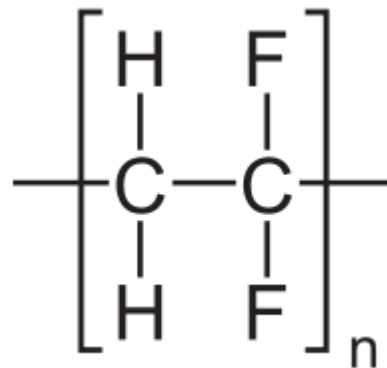
26. ábra



27. ábra

3.3 A piezoelektromos film

A PVDF, azaz a polivinilidén-fluorid egy vegyileg rosszul reagáló, hőre lágyuló fluoropolimer, egy monomerének kémiai összetételét az 28. ábrán láthatjuk:



28. ábra

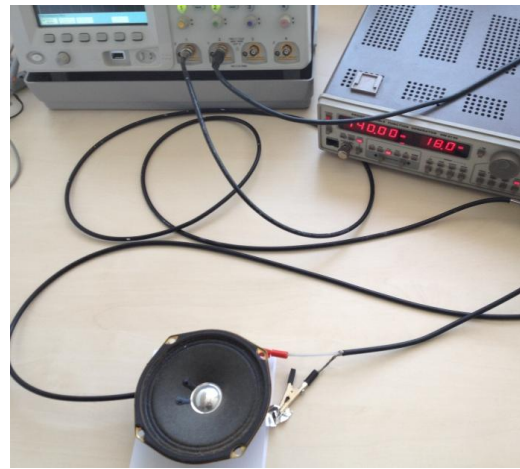
Két változatát használom a mérés során. A PVDF- β piezoelektromos tulajdonságú, mi egy 25 μm vastagságú, alumínium bevonatú filmváltozatát alkalmazzuk. A PVDF- α pedig egy 2mm vastag lemez, mely alkalmazásának az oka, hogy az aljáról visszaverődő mechanikai hullámok már kívül legyenek a mérés időtartamán, kémiailag pedig azért megegyezik az előző változattal, hogy az

impedanciaillesztésnek köszönhetően mechanikai reflexiók ne lépjenek fel a felületükön.

A teljes berendezés összeszerelése előtt a piezoelektromos filmet kipróbáltuk. Az 29. és az 30. ábrán látható a mérési elrendezés: a film két oldalára alufóliát tettünk, hogy a krokodilcsipeszeket rátehessük, valamint papírt, hogy megóvjuk a sérülésektől. Egy jelgenerátorra csatlakozó hangszóróval oldottuk meg a szinuszos mechanikai gerjesztést, ami egyúttal nehezekként is szolgált a jó mechanikai kapcsolat érdekében.

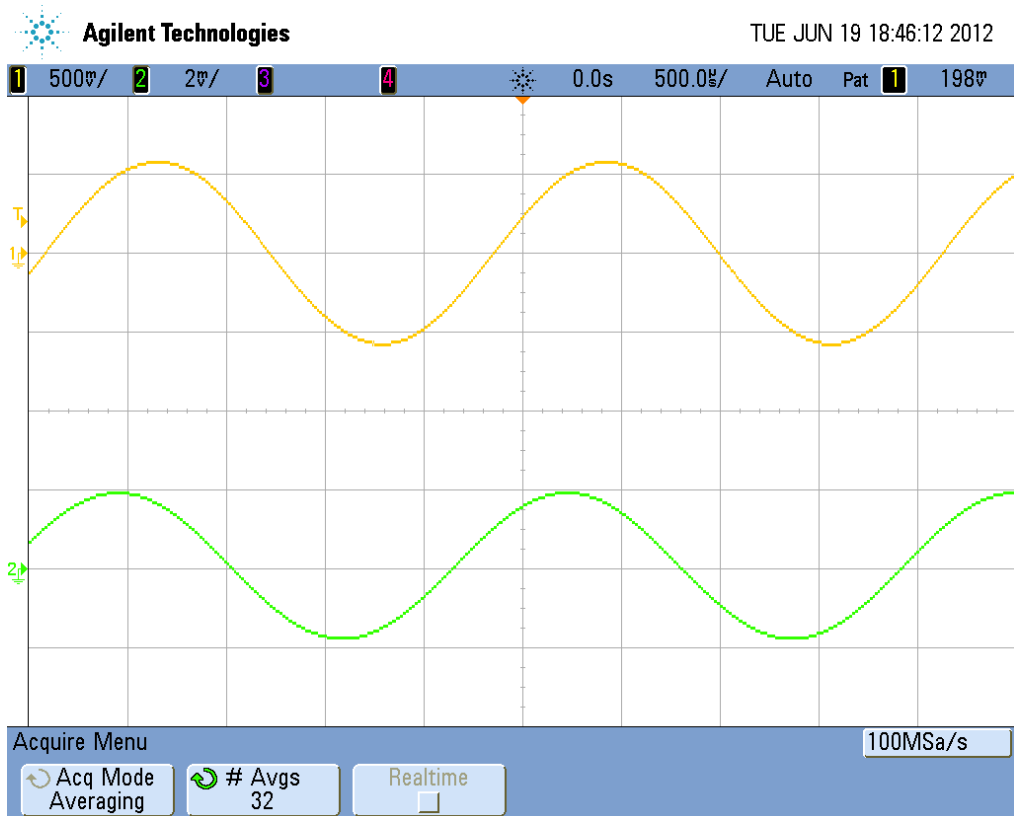


29. ábra



30. ábra

A mérés eredménye az 31. ábrán látható. A szinuszjelet torzítás nélkül átvitte az átalakító: az 1-es csatornára (sárga) csatlakoztattam a hangszórót gerjesztő jelgenerátor kimenetét, a 2-esre (zöld) pedig a krokodilcsipeszekon keresztül érkező válaszjelet 32 periódusonkénti átlagolás után. A kettő közötti fáziskülönbség a hangszóró átviteli tulajdonságaiból adódik.



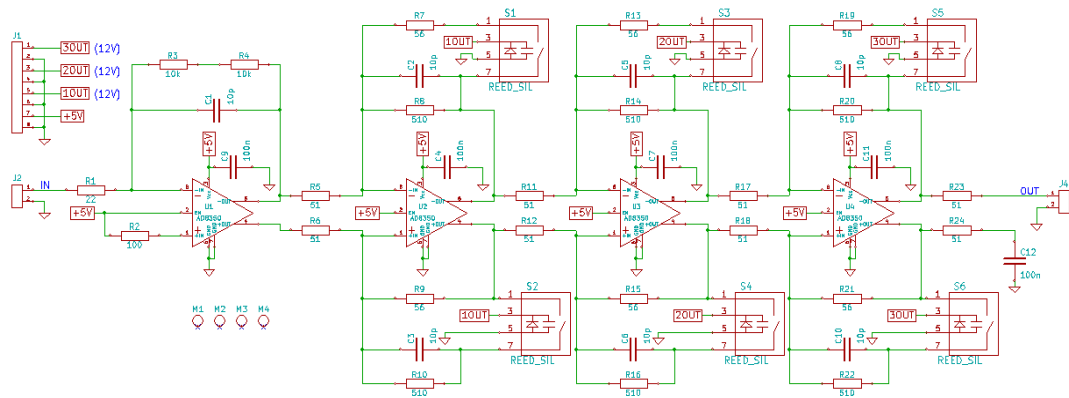
31. ábra

3.4 Az erősítő áramkör

A piezoelektromos átalakítóról érkező jeleket erősíteni kell, ehhez egy speciális áramkör készült. A tervezési szempontok közé tartozott a nagy sáv szélesség és az állítható erősítés. Előbbi értéket a 2ns körüli fel- illetve lefutási idejű impulzusokból kiindulva 500MHz-ben állapítottam meg, a szabályozhatóságot pedig három, egymástól függetlenül kikapcsolható erősítővel oldottam meg. A választás az Analog Devices AD8350 típusú erősítőjére esett, 1GHz-es törésponti frekvenciája, 5-10 voltos tápfeszültsége, könnyű forraszthatósága és kedvező ára miatt.

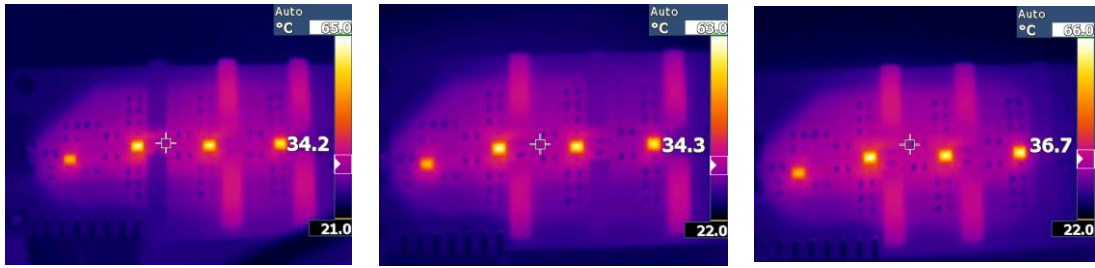
A kapcsolási rajz az 32. ábrán látható. Az áramkör négy fokozatból áll: az első a bemenő invertáló fokozat egy transzimpedancia integrátor, mely visszacsatoló ágában az egyik ellenállást kondenzátorra cseréljük a tesztelés után, mert a bemenetét majd a piezoelektromos elem hajtja. Erre azért van szükség, mert a piezoelektromos filmen erő hatására töltések válnak szét, tehát a deformáció hatására áram folyik, aminek az integráljával, tehát a töltéssel arányos feszültséget

kell előállítani a kimeneten. Ezt követi három egyforma fokozat, egyenként $A_V = \frac{R_f}{R_s} = \frac{510\Omega}{51\Omega} = 10$ -szeres feszültségerősítéssel, azonban ezek relékkel kapcsolhatók, hogy a mért mintáról kapott feszültségjelet megfelelő szintre erősíthetjük: a túl gyenge jelet nem tudjuk mérni, a túl erős pedig túlvezérelheti az IC-eket. A relékkel a visszacsatoló ágba párhuzamosan kapcsolunk egy 56Ω -os ellenállást, az így kapott erősítés pedig $A_V = \frac{R_f}{R_s} = \frac{510\Omega \times 56\Omega}{51\Omega} = 0.989$ -szeres lett, tehát jó közelítéssel egységnyi, így az adott fokozatot tulajdonképpen kikapcsoltuk. A használt Reed-relék $12V$ -os névleges feszültségen zárnak, így csökkentve az erősítést. Ezek vezérlését a tápegység és a nyomtatott áramkör közé épített billenő kapcsolókkal végezzük.



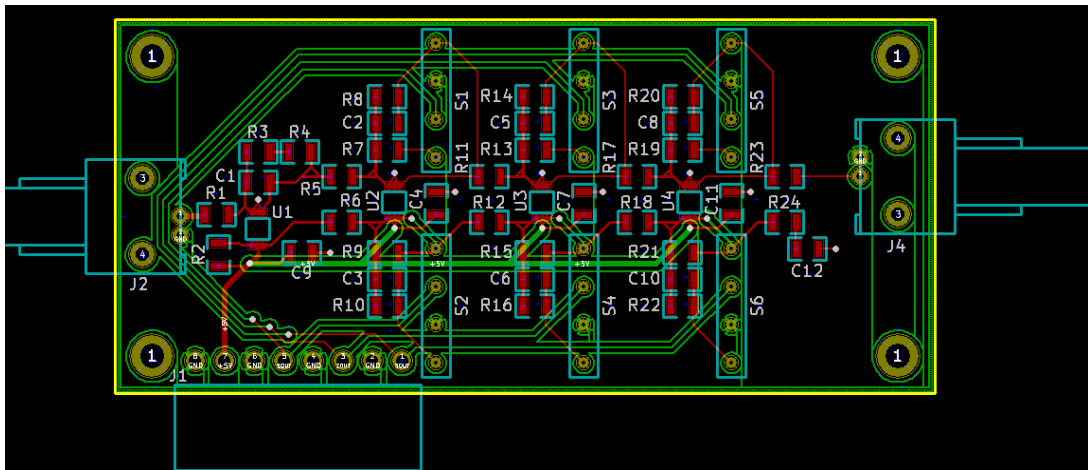
32. ábra

Az AD8350 differenciálerősítő, az egyszerűség kedvéért a működést engedélyező és a tápfeszültséget is az adatlapi értékeknek megfelelő módon egyaránt $5V$ -nak választottam. A kimenetek két párhuzamos ágon haladnak, dupla visszacsatolásra, így összesen hat relére lesz szükség. Az ellenállások és a kondenzátorok SMD 1206 ($3.1\text{mm} \times 1.6\text{mm}$) tokozású alkatrészek. Az alkatrészek beültetése után az egyes elemek melegedését és a relék működését ellenőriztem:



33. ábra

Az áramkörhöz tartozó nyomtatott áramkör tervei 34., részletes tervrajzok pedig a III. mellékletben találhatók [12].



34. ábra

4. Konklúzió és alkalmazások

Az összetett mérőberendezés egyes részegységeinek a tesztelése folyamatosan zajlik. Amint minden részegység sikeres bemérése megtörtént, utána következik a prototípus megépítése. A rendszer összehangolását követik a tényleges mérések, melyek ipari alkalmazhatóságát a következőkben mutatom be.

A tértöltés-felhalmozódás a villamosenergia-iparban leginkább a kábeleket érinti. A Magyarországon alkalmazott, 50Hz-es, kis- és középfeszültségű kábelek mellett a tértöltések által okozott veszélynek különösen a HVDC vannak kábelek kitéve a feszültség típusa és nagysága miatt is. Magyarországon ilyen kábeleket nem használnak, viszont az üzembe helyezés előtt, átvételi vizsgálatként szokás egyenfeszültségű méréseket végrehajtani rajtuk, mely alatt szintén felhalmozódhatnak tértöltések.

A PEA tértöltés vizsgálati eljárás számos polimeren alkalmazható, ám a szakirodalom mindegy 80%-ban polietilénekről és polietilén alapú anyagokkal foglalkozik, hiszen a villamosenergia-iparban ezeket a műanyagokat használják szigetelőként, viszont az eljárás alkalmazhatósága jóval szélesebb körű. Az újabb kutatások során vizsgált minták már az ipar legkülönbözőbb területeiről származnak, például optikai, vagy orvosi eszközök nagy térerősségnek kitett elemeiről.

A PEA tértöltés vizsgálati eljárás alkalmazási területei és a vizsgált anyagok:

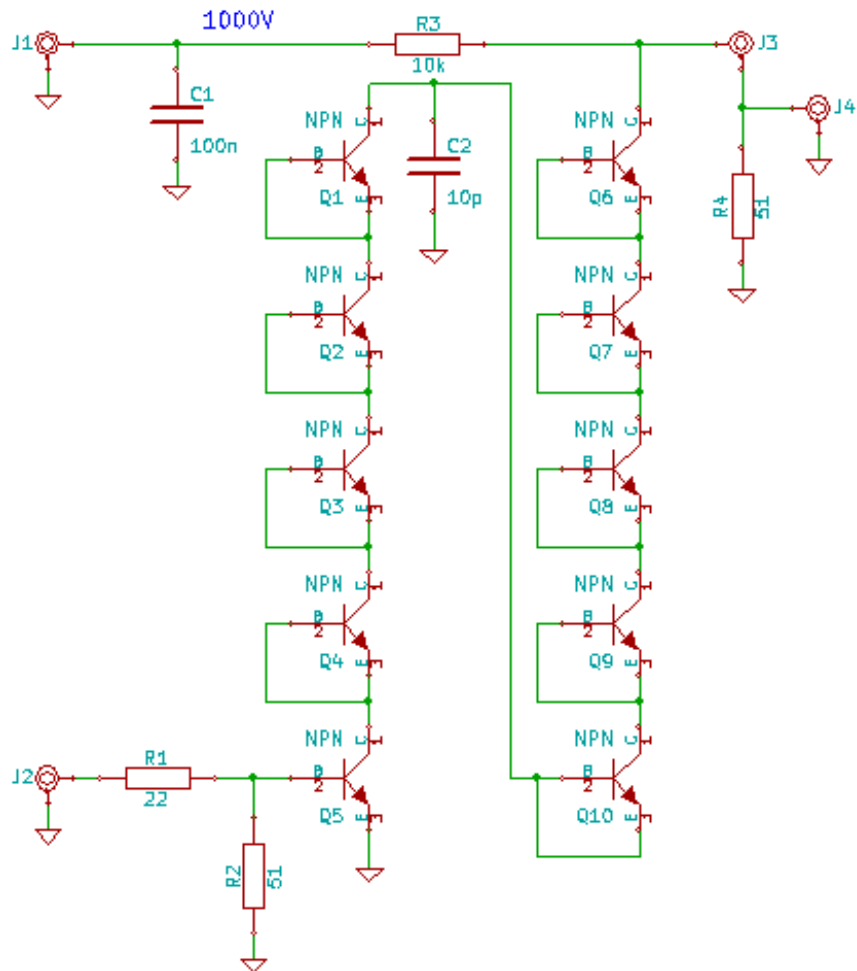
- nagyfeszültségű szigetelések
 - kábelek: polietilén, impregnált olaj-papír
 - transzformátorok: epoxi-gyanta
 - kapcsoló készülékek: epoxi-gyanta
- elektronikus eszközök
 - kondenzátorok: polipropilén
 - NYÁK-ok: epoxi-gyanta, poliimid
- funkcionális polimertechnológia
 - antisztatikus polimerek
 - szerves fényvezetők
 - szerves fénykibocsátók

Az ipari alkalmazások során megjelentek azok az anyagok és technológiák, melyek nem pusztán a felhalmozott tértöltések detektálásával, hanem azok felhasználásával, szabályozásával is foglalkoznak [13].

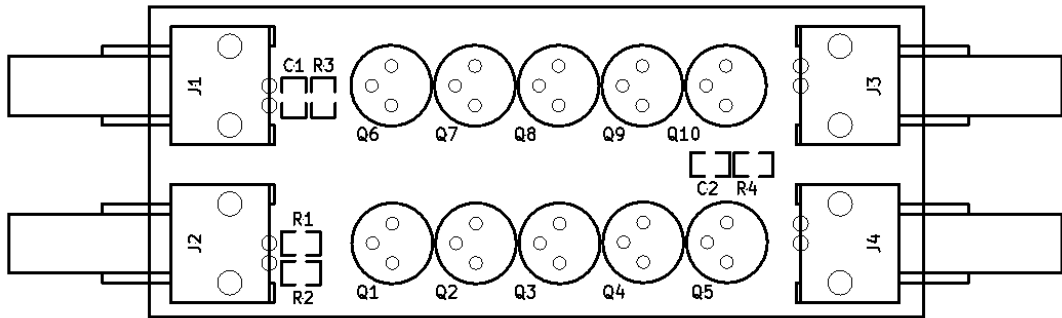
5. Mellékletek

A mellékletekben található a sematikus ábrái és a részletes, rétegenkénti tervrajzai a NYÁK-oknak [12].

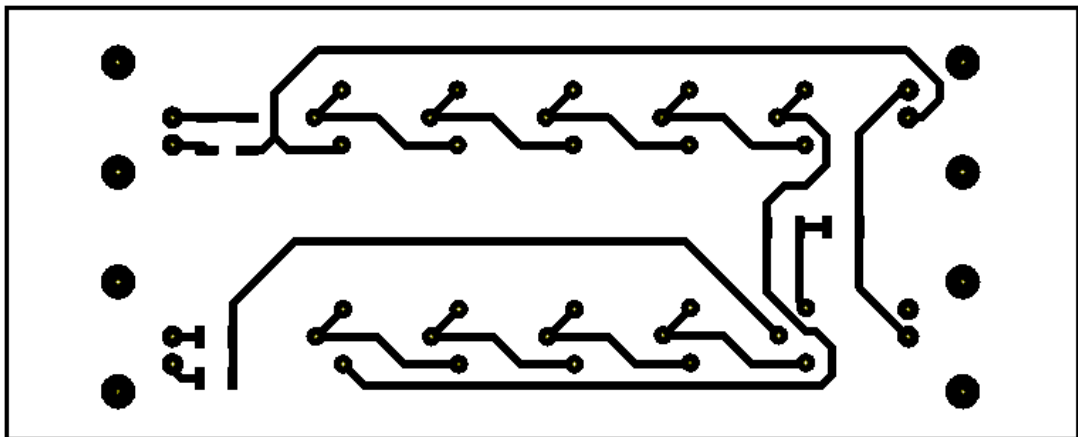
I. melléklet: az avalanche-tranzisztoros impulzusgenerátor tervrajzai



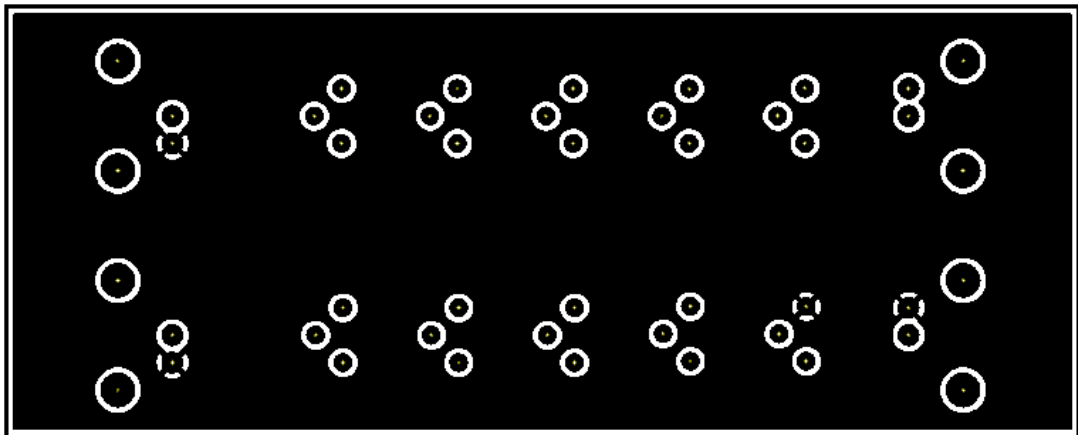
35. ábra: az áramkör sematikus rajza



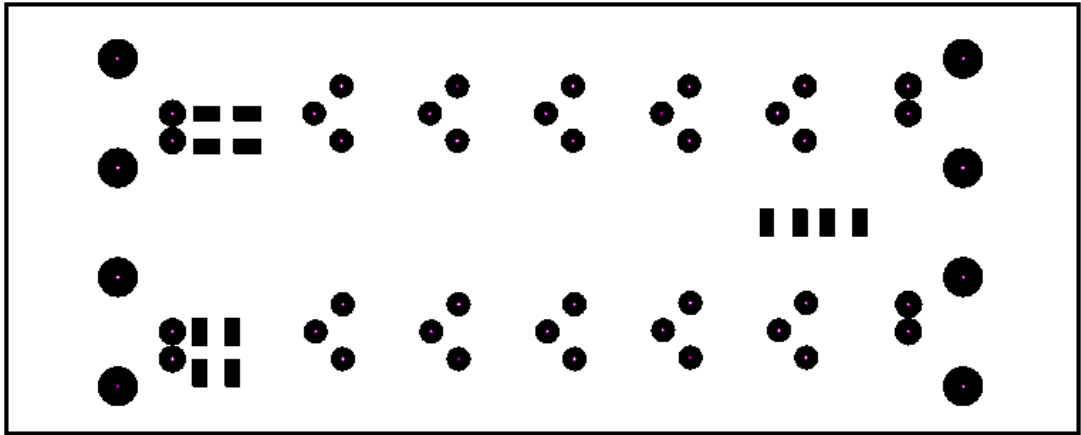
36. ábra: a belültetendő alkatrészek helyei



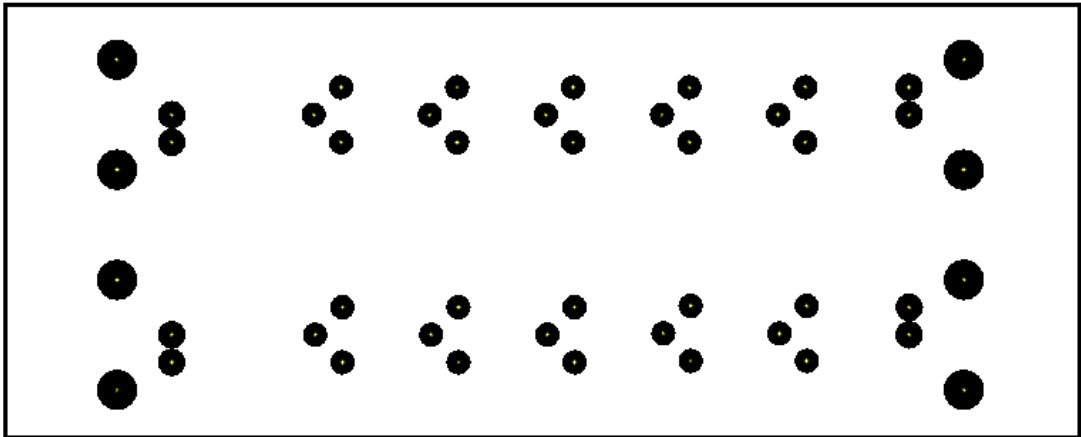
37. ábra: az áramkör előlő lapjának fémezése



38. ábra: az áramkör hátsó lapjának fémezése

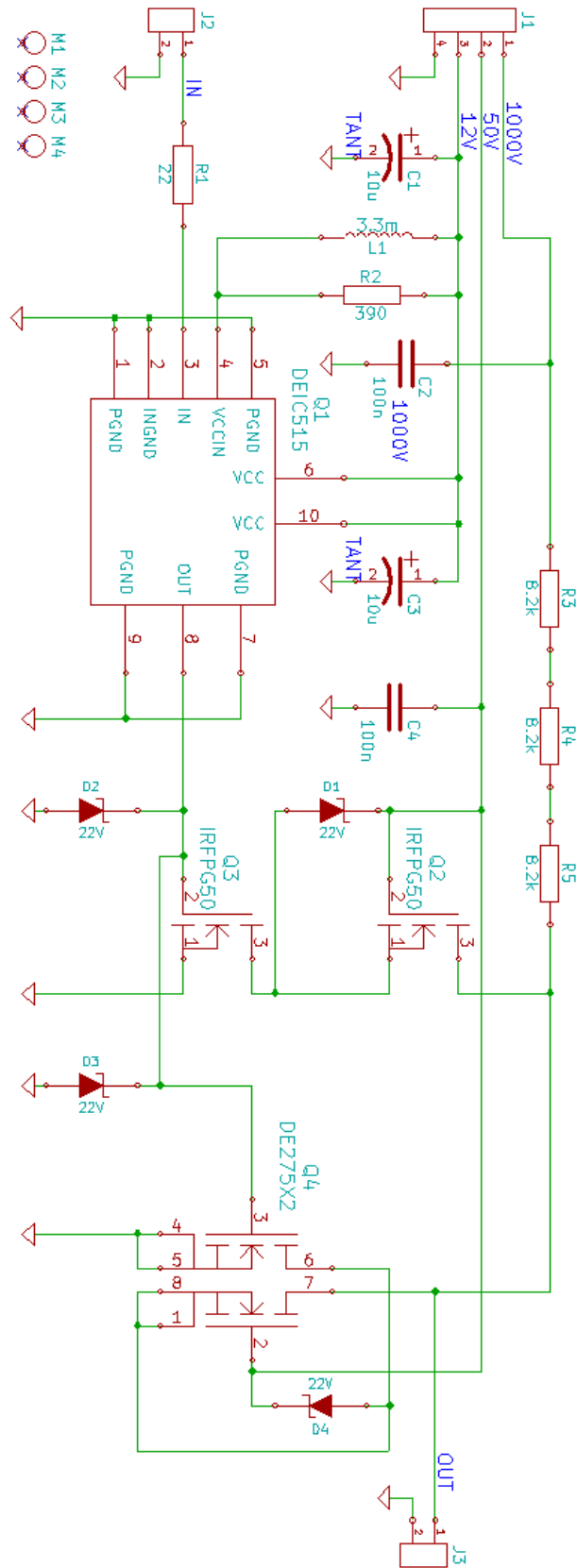


39. ábra: az áramkör elülső lapjának maszkjai

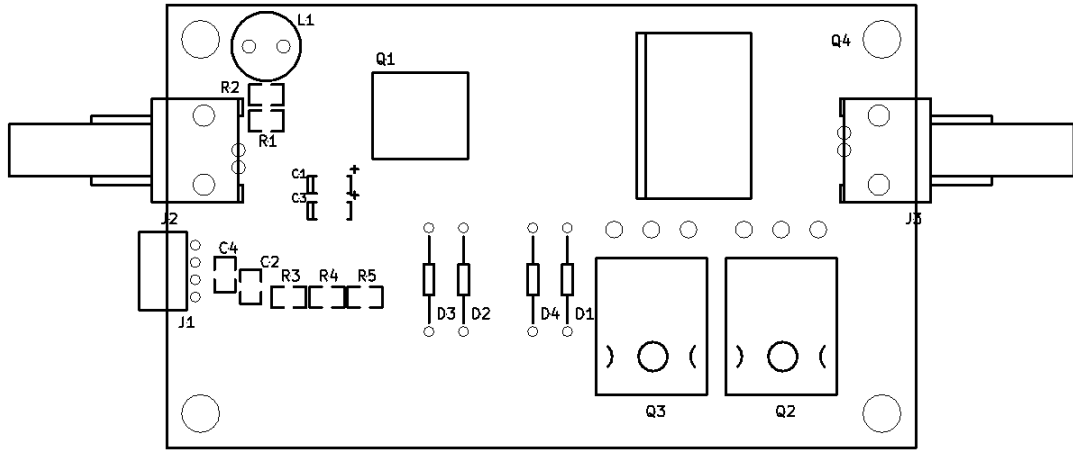


40. ábra: az áramkör hátolsó lapjának maszkjai

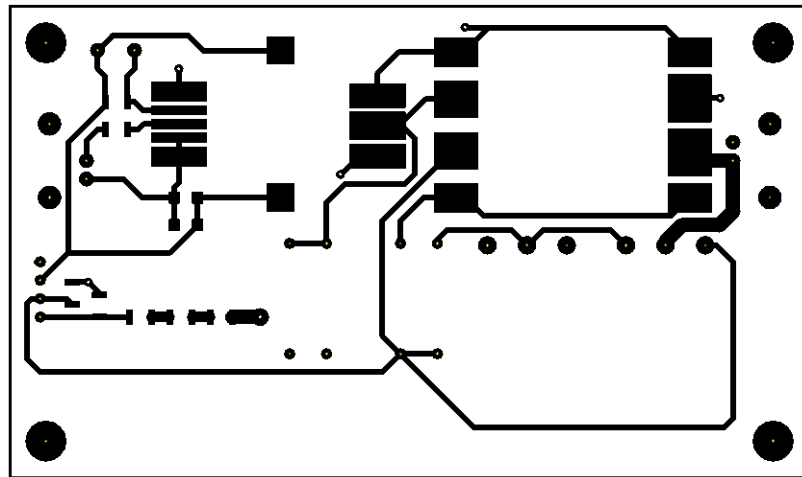
II. melléklet: a FET-es impulzusgenerátor tervrajzi



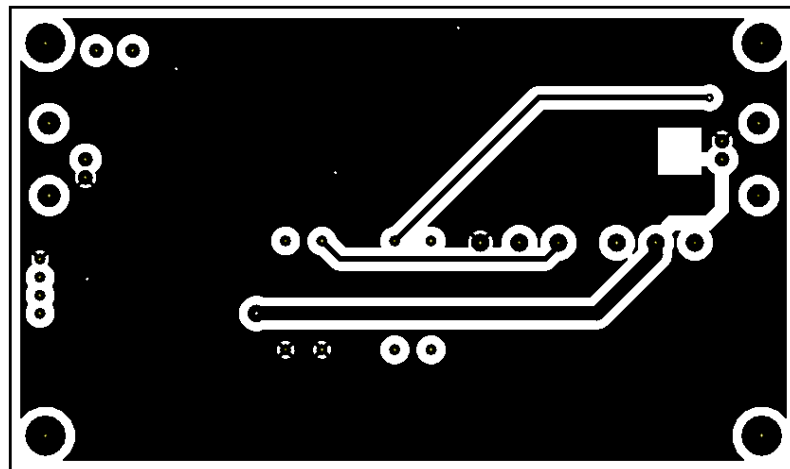
41. ábra: az áramkör sematikus rajza



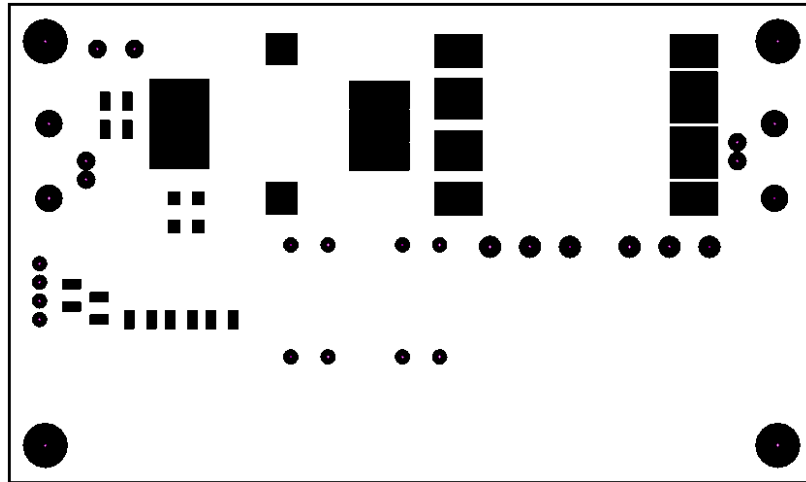
42. ábra: a belülről látható alkatrészek helyei



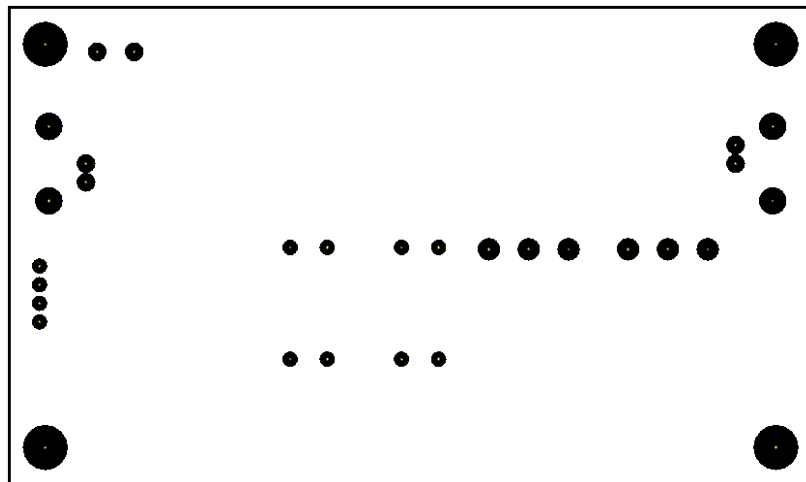
43. ábra: az áramkör elülső lapjának fémezése



44. ábra: az áramkör hátsó lapjának fémezése

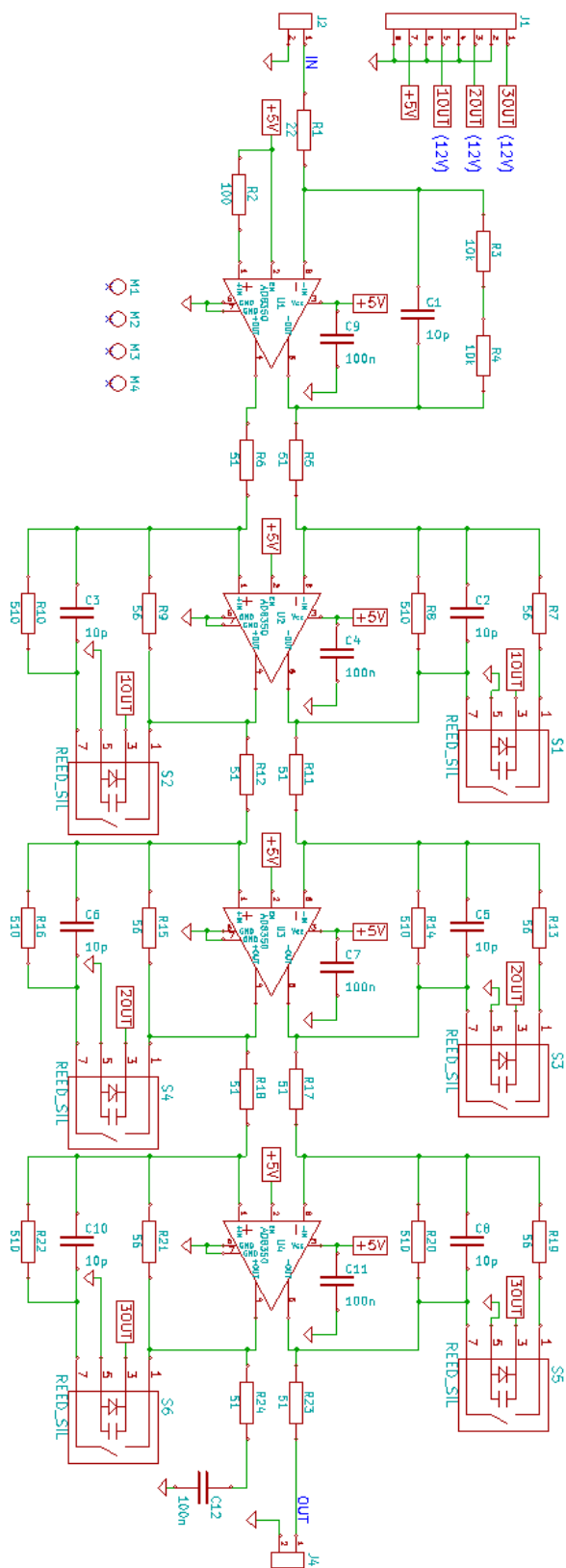


45. ábra: az áramkör elülső lapjának maszkjai

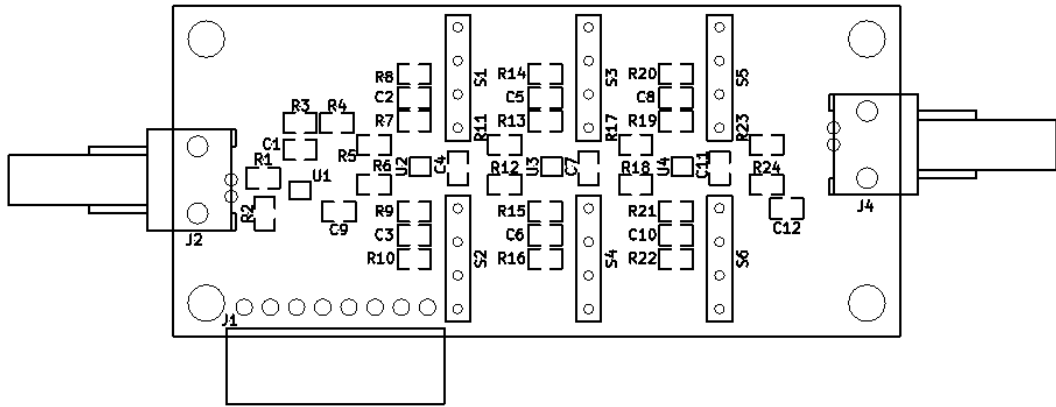


46. ábra: az áramkör hátsó lapjának maszkjai

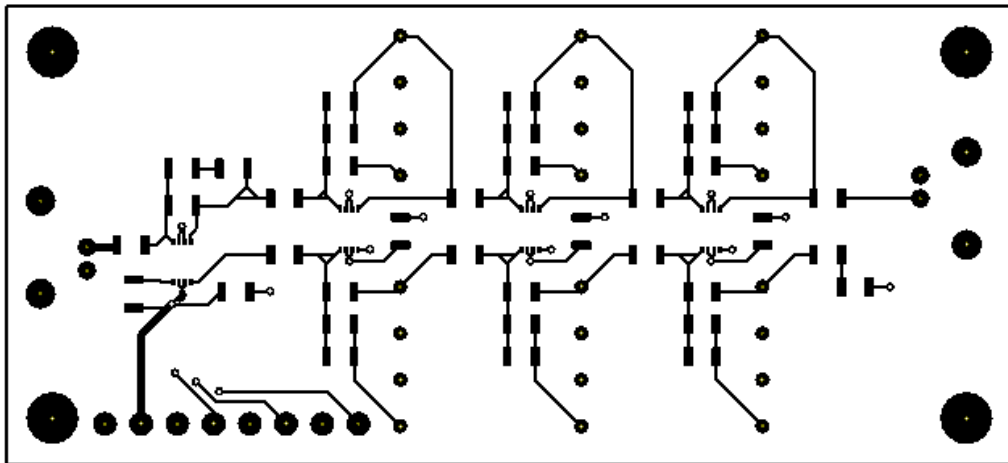
III. melléklet: az erősítő áramkör tervrajzai



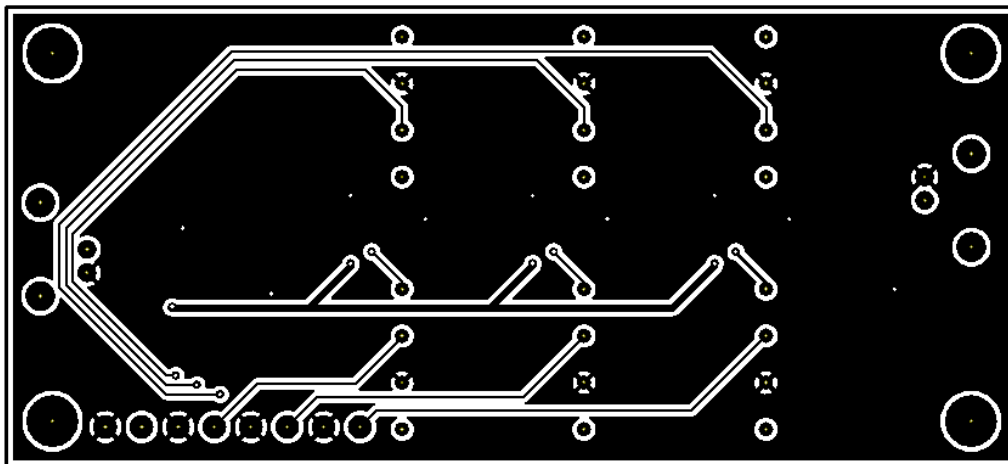
47. ábra: az áramkör sematikus rajza



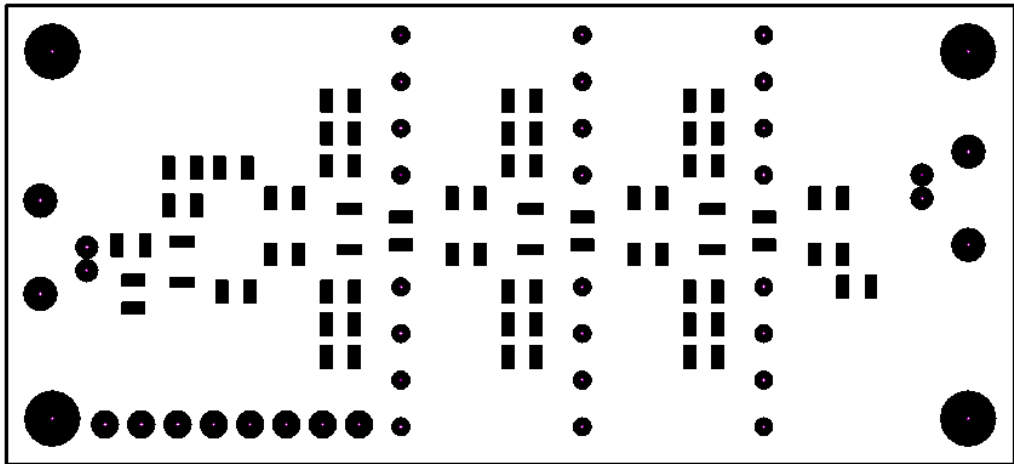
48. ábra: a belülről látható alkatrészek helyei



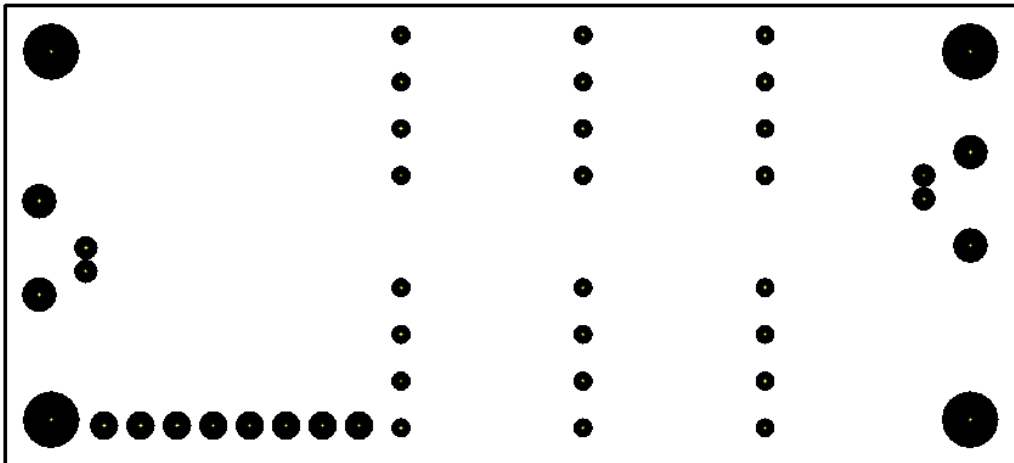
49. ábra: az áramkör elülső lapjának fémzése



50. ábra: az áramkör hátsó lapjának fémzése



51. ábra: az áramkör elülső lapjának maszkjai



52. ábra: az áramkör hátolsó lapjának maszkjai

6. Szakirodalom

- [1]: G. C. Montanari: *Bringing an Insulation to Failure - the Role of Space Charge*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18., No. 2., April 2011.
- [2]: Luspay Ödön (szerk.): *Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata*, Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, Budapest, 2000
- [3]: G. Mazzanti, G. C. Montanari, J. M. Alison: *A space-charge based method for the estimation of apparent mobility and trap depth as markers for insulation degradation-theoretical basis and experimental validation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10., No. 2., April 2003, 187-197.
- [4]: S. Delpino, D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teysedre, P. H. F. Morshuis, R. Bodega, L. A. Dissado: *Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 2 - insulation interfaces*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 24., No. 1., January/February 2008.
- [5]: R. Bodega, P.H.F. Morshuis, E. Redjosentono, J.J. Smit: *Dielectric interface characterization by means of space charge measurements*, 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
- [6]: B. Alijagic- Jonuz, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit: *Possibilities for Using Space Charge Quantities as Aging Markers and as Tool for Material Ranking*, 2004 International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France, July 5-9. 2004
- [7]: T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada, C. M. Cooke: *Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the Pulsed Electroacoustic Method*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3., 433-439, 1988. June.
- [8]: T. Takada, J. Holboell, A. Toureille, J. Densley, N. Hampton, J. Castellon, R. Hegerberg, M. Henriksen, G.C. Montanari, M. Nagao, P. Morshuis: *Space*

Charge Measurement in Dielectrics and Insulating Materials < PEA, PWP (PIPWP & LIPP) and TSM Methods >, Task Force D1.12.01, CIGRÉ 2006.

- [9]: T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada, C. M. Cooke: *Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the Pulsed Electroacoustic Method*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3., 433-439, 1988. June.
- [10]: B. Lennon: *The Pulsed Electro-Acoustic (PEA) Space Charge Measurement Systems at TU Delft – User Manual*, Department of High Voltage Components & Power Systems, Delft University of Technology, February 2011.
- [11]: Neil Chadderton: *The ZTX415 Avalanche Mode Transistor*, Application Note 8 Issue 2 January 1996
- [12]: A NYÁK-ok tervei a *KiCad* programban készültek: © 1992-2011 KiCad Developers Team, Build: (2012-01-19 BZR 3256)-stable
- [13]: Kaori Fukunaga: *Industrial applications of Space Charge Measurement in Japan*, IEEE Electrical Insulation Magazine, 0883- 7554/99 1999 IEEE