FÜGGELÉK AZ „OKOSTELEFONHOZ KAPCSOLT FILLÉRES ELEKTROSZKÓP” C. CIKKHEZ

Szabó Róbert[1,@], Piláth Károly[2]
[1]Fizika Doktori Iskola, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest
[2]ELTE Trefort Ágoston Gyakorló Gimnázium, Budapest
[@]E-mail: fiztan.szr@gmail.com

Az optimális műveleti erősítő kiválasztása oktatási célokra

A töltésmérő szenzora rendkívül nagy bemeneti impedanciát igényel, ezért a műveleti erősítő bemeneti árama a lehető legkisebb kell, hogy legyen. Az [1]-ben alkalmazott LMC6001 típusú MOS-bemenetű műveleti erősítő tipikusan 25 fA-es bemeneti árammal működik, így hosszú távon is gyakorlatilag driftmentes üzemelést biztosít. A tanórai kísérletek során – ahol a mérési időtartam jellemzően néhány perc – ez a precizitás nem feltétlenül szükséges. A gyakorlatban kiváló választás lehet egy jelentősen olcsóbb TLC272 típusú műveleti erősítő használata, amelynek bemeneti árama körülbelül 0,6 pA.

A driftelés időskáláját az alábbi összefüggéssel becsülhetjük:

$$\mathrm{d}t = \frac{\mathrm{d}Q}{I} = \frac{C_\mathrm{f}\cdot\Delta U}{I} = \frac{4{,}7\cdot10^{-9}\ \mathrm{F}\cdot 0{,}1\ \mathrm{V}}{0{,}6\cdot10^{-12}\ \mathrm{A}} \sim 784\ \mathrm{s}.$$

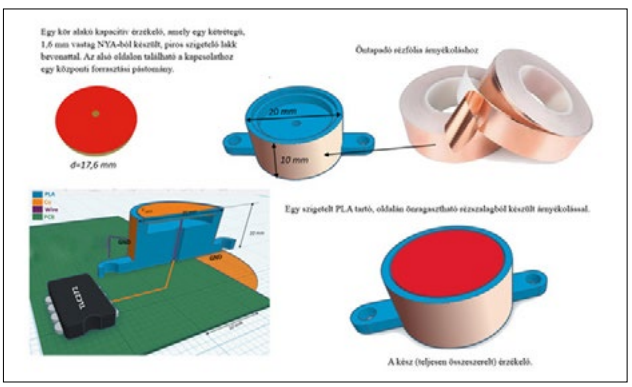
Ez C_f = 4,7 nF kapacitással számolva ez mindössze 0,1 V kimeneti eltolódást eredményez 13 perc alatt, ami gyakorlatilag elhanyagolható ezen az időskálán. Ez az időtartam elegendő ahhoz, hogy a legtöbb középiskolai mérést ne befolyásolja észrevehető drift.

A töltésmérő megtervezése

A töltésmérő tervezése során az volt a célunk, hogy a készüléket a lehető legalacsonyabb költséggel (10 $) állítsuk elő, miközben kihasználjuk a legújabb technológiai lehetőségeket. Ennek érdekében a detektor alkatrészeit 3D nyomtatással állítottuk elő. A nyomtatáshoz PLA-műanyagot használtunk, amely jó szigetelő tulajdonságokkal rendelkezik, és ma már az iskolák számára is könnyen hozzáférhető. A detektor két M2-es csavarral rögzíthető a mérőműszer nyomtatott áramköréhez (PCB).

A nyomtatott detektor egy tömör PLA-hengerből áll, amelynek átmérője 20 mm, magassága 10 mm, közepén pedig egy 2 mm átmérőjű átmenő furattal rendelkezik. A henger palástját öntapadós rézfóliával borítottuk, amely elektromágneses árnyékolásként szolgál, és a mérőelektronika GND-jére csatlakozik *(1. ábra)*. A többi elektronikus eszköz árnyékolására nem volt szükség, mivel azok mérete elhanyagolható a szenzoréhoz képest.

A detektor tetején egy 8,8 mm átmérőjű, 1 mm vastag korong található, amelynek alsó és felső felületét szintén rézfólia borítja. Az alsó fólia közepére forrasztott vékony huzal a központi furaton keresztül csatlakozik a töltésmérő IC invertáló bemenetéhez, biztosítva a töltések elektronikus érzékelését. A detektor 3D nyomtatásához szükséges terv a GitHub felületén érhető el [2].



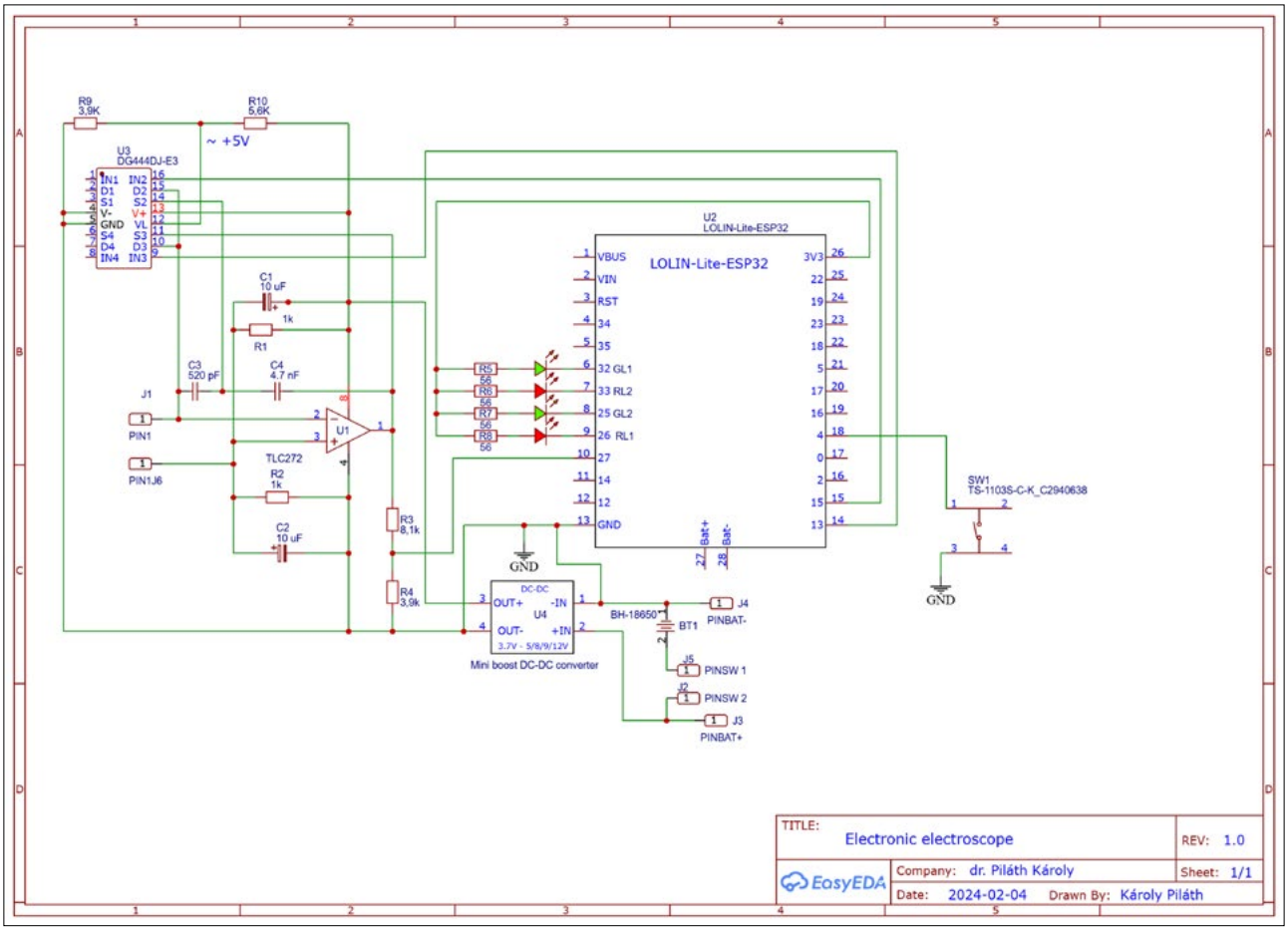
1. ábra. A 3D-nyomtatott detektor alkatrészei

Jelfeldolgozás

A szenzorjelek feldolgozását és továbbítását egy mikrokontroller végzi. A *WEMOS Lolin32 Lite* eszközt választottuk, amely az *ESP32* mikrokontrolleren alapul. Ez a mikrokontroller elegendő GPIO-lábbal rendelkezik a szenzor és a perifériák kezeléséhez, beépített Bluetooth- és Wi-Fi-modullal van ellátva, így könnyen létesíthet vezeték nélküli kapcsolatot okostelefonokkal vagy táblagépekkel, valamint támogatja az energiahatékony működést, ami a hordozható mobil eszközöknél különösen előnyös. Az alkalmazás mögötti programlogika meglehetősen egyszerű, kevesebb mint 20 vizuális blokkból áll. A legfontosabb funkciók, mint például a Bluetooth-on keresztül fogadott adatok olvasása, a vizuális indikátor frissítése és a reset parancs küldése, ezekkel a blokkokkal vannak megvalósítva. Egy időzítő gondoskodik arról, hogy a kijelző 100 ezredmásodpercenként rendszeresen frissüljön.

A mikrokontrollert és a mérőelektronikát tartalmazó kapcsolási rajzot a fent bemutatott elvek alapján készítettük el. Ezt használtuk fel a PCB-terv elkészítéséhez is, amely lehetővé teszi az eszköz egyszerű összeszerelését és másolását. A *2. ábrán* látható kapcsolási rajz szerint a TLC272 műveleti erősítő és a DG444DJ CMOS analóg kapcsoló működéséhez 12 V-os tápfeszültség szükséges. Ezt egy beépített DC-DC átalakító biztosítja alacsonyabb feszültségű bemeneti tápfeszültségről.

Az integrátor IC (TLC272) kimeneti feszültségét az ESP32 mikrokontroller GPIO27-es lába olvassa be. Mivel



2. ábra. A töltésmérő részletes kapcsolási rajza

ez a bemenet maximum 3,3 V-ot fogadhat, egy feszültségosztót (R3 és R4 ellenállások) építettünk be a biztonságos működés érdekében. Ez az osztó biztosítja, hogy még teljes kivezérlés esetén se haladja meg a mikrokontrollerre jutó feszültség a 3,3 V-os határt. Emellett egy második feszültségosztó (R9 és R10) biztosítja a +5 V-os referenciafeszültséget a DG444DJ működéséhez.

A tervezési folyamat során az egyik legfontosabb célunk az volt, hogy az eszköz önálló vizuális indikátorként is használható legyen. A töltésszintet és polaritást PWM-vezérelt LED-ek jelzik: két piros LED a pozitív, két zöld LED pedig a negatív töltést. Két LED-re azért van szükség, mert ez lehetővé teszi szélesebb tartomány jelzését: kis töltés esetén csak az egyik aktív, de a fényereje arányos a kis töltéssel. Egy bizonyos küszöbérték túllépésekor a másik LED is bekapcsol, tovább növelve a fényerőt. A LED-ek fényereje arányos az érzékelt töltéssel, és fordítottan arányos a töltött test és a szenzor távolságának négyzetével.

A rendszer működése során gyakran szükségessé válhat a nulla töltésszint újradefiniálása. Ez az úgynevezett automatikus nullázás (auto-zero) kétféleképpen hajtható végre: egy gomb megnyomásával (az ESP32 GPIO4-es lábára kötve), vagy a kijelzőként használt mobilalkalmazásból, illetve a com porton keresztül egy Z parancs küldésével.

Mindkét esetben a mikrokontroller aktiválja a DG444DJ CMOS kapcsolót, amely rövid időre rövidzárlatot hoz létre, ezáltal kisütve a C_f visszacsatoló kondenzátort, és az aktuális állapotot nulla töltésűnek állítva be.

A sikeres nullázás után a rendszer egy jól felismerhető állapotba kerül: egyik LED sem világít, vagy ha okostelefonhoz csatlakozik, a kijelzőn egy kis szürke korong látható, szimbolizálva a töltetlen állapotot, és a képernyőn kijelzett, a C_f-en mért töltésérték is nulla. Ez a többszintű visszajelzés biztosítja, hogy a felhasználó egyértelmű jelzést kapjon arról, hogy a készülék kiegyensúlyozott állapotban van, és készen áll egy új mérés megkezdésére.

Jelkimenet

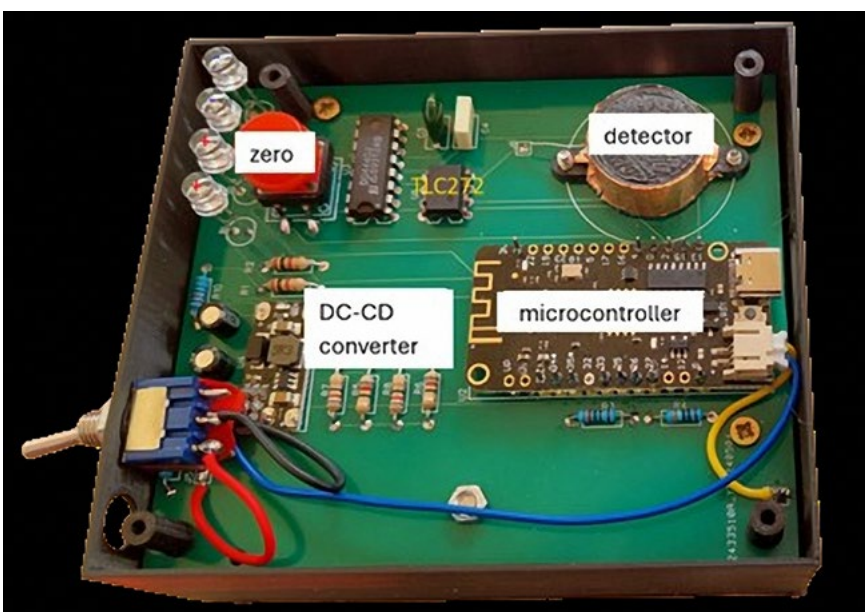
Az érzékelt töltésértéket az alkalmazás egy színes koronggal jeleníti meg: a zöld negatív, a piros pozitív töltést jelez. A kör sugara arányos a töltés nagyságával. A C_f-en mért töltésérték és a töltés előjele numerikus formában is megjelenik.

A *2. ábrán* látható kapcsolási rajz alapján elkészítettük a töltésmérő PCB-jét az *EasyEDA* tervezőprogram segítségével. A készülék működésének részletes leírása és a forráskód a projekt GitHub-oldalán érhető el [3].

A mérőeszköz egy Android telefonon futó alkalmazással is kommunikálhat. A Q_{meter} alkalmazás az *MIT App Inventor* platformon készült. Ez az alkalmazás Bluetooth-csatornán keresztül kommunikál a töltésmérővel, annak valós idejű kijelzőjeként szolgálva. A felület *(3. ábra)* a következőket tartalmazza:

1. *Töltésjelző:* Egy színes kör, amelynek színe és sugara arányos az érzékelt térerősséggel.
2. *Numerikus kijelzés:* A kör alatt megjelenik az aktuális feszültségérték és a töltésszint.
3. *Vezérlőgombok:* Csatlakozáskor megnyílik a párosított Bluetooth-eszközök listája, és csatlakozik a szenzormodulhoz (Smart Q_{meter}). Nullázáskor egy Z parancsot küld az integrátor távvezérelt alaphelyzetbe állításához.
4. *Állapotfelirat:* A kapcsolat állapotának és az adatátviteli sebességnek a jelzésére.

3. ábra. Az alkalmazás felülete



4. ábra. Az elkészült kísérleti példány fényképe

A lefordított .apk-telepítő és a szerkeszthető .aia forrásfájlok is elérhetők a projekt GitHub-oldalán [4]. A telepítéshez Android 6.0 vagy újabb verzió szükséges; a felhasználóknak engedélyezniük kell az „Ismeretlen forrás"-ból származó alkalmazások telepítését, majd meg kell nyitniuk az .apk fájlt. Alternatív megoldásként az .aia fájl appinventor.mit.edu oldalra történő importálásával a tanárok vagy diákok újjáépíthetik vagy módosíthatják a felületet tantermi kísérletekhez.

A szerelési rajz alapján elkészítettünk egy működő prototípust, amely teljes mértékben tükrözi a tervezett elrendezést. A készülék stabilan működik, és tantermi bemutatókon is sikeresen használható. A *4. ábra* az elkészült áramkör fényképét mutatja.

Bár a precíz méréstechnikai kalibrációt oktatási célokra nem tartottuk szükségesnek,[1] a kísérleti modell tesztelésekor ellenőriztük annak helyes működését. Ezt a következőképpen ellenőriztük: egy kis, ismert kalibrációs kondenzátort (C_{cal}) párhuzamosan csatlakoztattunk a töltésmérő erősítő bemenetére. A kondenzátort ismert feszültségű forrásra kapcsolva, majd gyorsan átkapcsolva a mérőműszer bemenetére, $Q = C_{\text{cal}} \cdot U$ töltést juttattunk a rendszerbe. A műszer a kimeneti feszültséget $V_{\text{out}} = Q/C_{\text{f}}$ értékűnek jelezte, ±5%-os hibahatáron belül. Ez a módszer a szakirodalomban „ismert kalibrációs kondenzátor befecskendezésként" ismert [5].

Irodalom

1. Zátonyi Sándor: Digitális multiméter az elektrosztatika tanításában. *Nukleon* 7 (2014) 1–8.
2. https://github.com/pkarcsi55/-Smart-Electroscope/blob/main/3D%20printable%20designs.zip
3. https://github.com/pkarcsi55/-Smart-Electroscope/blob/main/SmartElectroscope.ino
4. https://github.com/pkarcsi55/-Smart-Electroscope/blob/main/Smart_electroscope.aia
5. James David, Fontanese John, Munsat Tobin, Horányi Mihály: Calibration methods of charge sensitive amplifiers at the Colorado dust accelerator. *Rev. Sci. Instrum* 91 (2020) 1–6.

[1] Akárcsak a hagyományos elektroszkópok esetében, a mért értékeket itt is befolyásolhatják környezeti tényezők, mint például a páratartalom, a földelési viszonyok vagy a közeli vezető tárgyak.