

Válaszok Dr. Mingesz Róbert Zoltán opponensi kérdéseire

Atomi folyamatok rezisztív kapcsolókban:
fluktuációktól a reverzibilis atomi átrendeződésekig

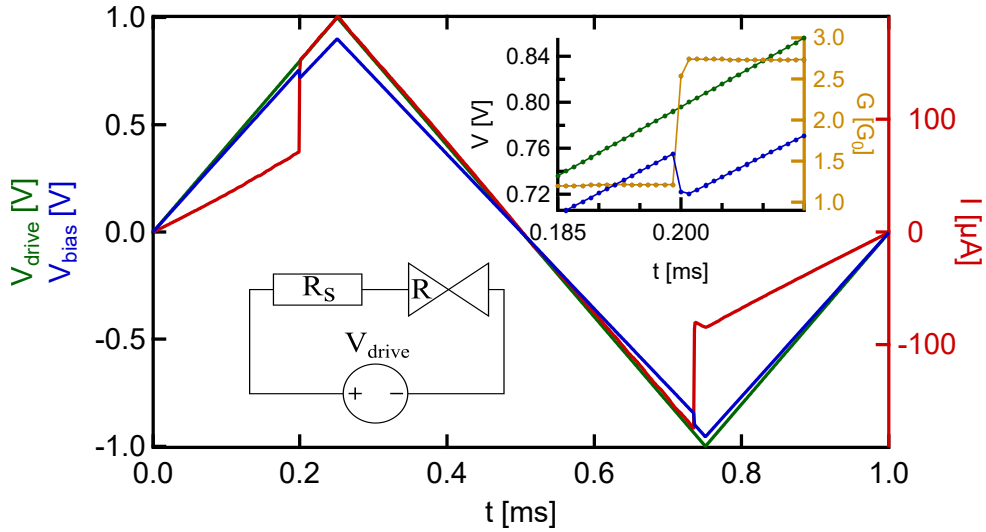
Nyáry Anna

1. A 2.4-es ábrán, a jobb felső sarokban a vezetőképesség váltásánál a függőleges vonal visszafelé dől (negatív ellenállást sugallva). A váltáskor a V_{bias} csökkenésére utalva. Ugyanez a visszafelé dőlés a 3.20-as ábrán is megfigyelhető. Okozhatja ezt a jelenséget a forrás-impedancia véges volta, vagy valamilyen egyéb fizikai jelenség van mögötte?
2. A 3.13-as ábrán (és később a 4.7-es ábrán is) mi az R_s ellenállás szerepe?

Mivel a bíráló 1. és 2. kérdései erősen összefüggnek, így a jobb érthetőség kedvéért összevontan fogok válaszolni rájuk.

A 3.13-as és 4.7-es ábrán az R_s a vizsgált minta és az áramerősítő között helyezkedik el, de a teljes áramkörből adódó soros ellenállás tagjait tartalmazza. Egyrészt lehet a mintával sorosan kötni egy ellenállást, melynek az lehet a szerepe, hogy korlátozza a mintán átfolyó áramot, és ezzel a bekapcsolás alatt megvédi a mintát egy túl nagy vezetőképességbe való kapcsolástól, amibe az eszköz beragadhatna. Az elvi kapcsolásban ezt jelölöm R_s -sel, azonban a gyakorlatban ezen felül megjelenik az egyes eszközök ellenállása is. Jelen van egy forrásimpedancia mindkét elrendezésben, a National Instrument USB-6363 adatgyűjtő kártya kimenetén egy elhanyagolható 0.2Ω [1], míg az Agilent 33220A függvénygenerátor kimenetén 50Ω [2] impedancia van. A zajmérés során szükséges RC-szűrő ellenállása is beleszámít a soros ellenállásba, ami 10Ω volt. Végül pedig a soros ellenállás tartalmazza az áramerősítő bemeneti ellenállását is, ami erősítés függvényében tipikusan $50\text{-}60 \Omega$ [3] volt. Fontos megjegyezni, hogy a soros ellenállás értékét a zajmérések során minimalizálni szeretnénk. Ennek az oka, hogy az áramzaj mérése során minél inkább törekedni kell a minta feszültséggenerátoros meghajtására.

Ez a fent kifejtett soros ellenállás az oka a kapcsoláskor megfigyelhető V_{bias} mintán eső feszültség minimális csökkenésének. Az 1. ábra mutatja be a 2.4-es ábra kapcsolásának időbeli alakulását. A V_{drive} meghajtó feszültség a teljes



1. ábra. A V_{drive} meghajtó feszültség (zöld), a mintán eső V_{bias} feszültség (kék) és az I áram (piros) időbeli alakulása egy kapcsolás alatt. A jobb felső belső ábra mutatja bekapcsolás folyamatát a G vezetőképesség (sárga) alakulásával. A bal alsó belső ábra illusztrálja a mérési áramkör leegyszerűsített rajzát: a meghajtó feszültség az R_s soros ellenálláson és a minta R ellenállásán oszlik meg.

áramkörben az R_s soros ellenálláson és a minta R ellenálláson oszlik meg. Ekkor a V_{bias} mintán eső feszültséget a következő képlettel írhatjuk fel:

$$V_{\text{bias}} = V_{\text{drive}} \left(1 - \frac{R_s}{R_s + R} \right). \quad (1)$$

Tehát például amikor a minta bekapcsol (1. ábra jobb felső belső ábra), ellenállása lecsökken ($G = 1/R$ vezetőképessége megnő), és a V_{bias} lecsökken.

3. Milyen érzékenységre volt állítva a Femto DLPCA-200 áramfeszültség konverter, és ebből milyen sáv szélesség adódott? Milyenek becsülhető a rendszer sáv szélessége a mérés során? Ez befolyásolhatta a méréseket a nagyobb frekvenciájú méréseknél?

Az áramerősítő erősítésének megválasztásához több szempontot kell figyelembe venni. Az eszköz vezetőképessége, a meghajtó feszültség, valamint az áramerősítő zajszintje és sáv szélessége [3] határozza meg az ideális erősítést, ami a mérések során tipikusan $10^3 - 10^6$ V/A tartományban volt. A legtöbb esetben a lehető legnagyobb erősítéssel szeretnénk mérni, különösen a zajmérések esetén, mivel az

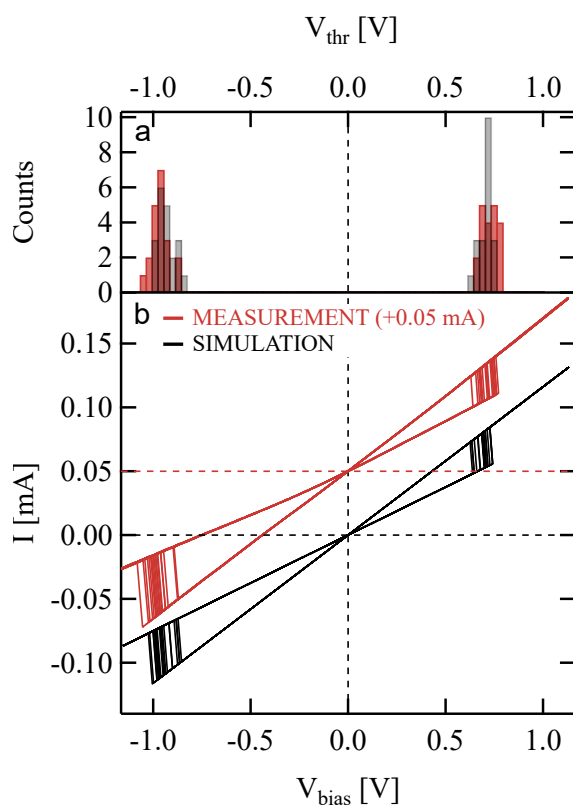
áramerősítő áramzaja az erősítés növelésével csökken. Azonban az áramerősítő maximális kimeneti feszültsége ± 10 V, valamint a zajmérő kártya maximális bemeneti feszültsége ± 5 V, így túl nagy erősítés mellett a mérés telítésbe menne. Mindemellett, a nagyobb erősítések irányába a sávszélesség csökken, a $10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ V/A értékekhez tartozó -3 dB-es levágások 500, 500, 400, 200 kHz frekvenciánál vannak.

A kétfajta mérési elrendezésben a sávszélesség szerepét külön tárgyalom. Az első témakörben, az atomi kapcsolások vizsgálatakor nem az áramerősítő, hanem a mérési elrendezés és a méréstechnika limitálja a mérés sávszélességét. Az alacsony hőmérsékleti mintatartóban szükséges hosszú kábelek szórt kapacitása okoz valamekkora sávszélesség-csökkentést, de elsősorban a mintavételezés részleteiben rejlik a limitáció. Az adatgyűjtő kártya maximális mintavételezése 2 MS/s, de egy $I(V)$ -görbe frekvencia- és feszültségtartománytól függően megfelelően sok, tipikusan 200-1000 pontból kell álljon, hogy a teljes kapcsolat követhető legyen. Ezen megfontolások indokolják, hogy a gyakorlatban az atomi kapcsolások a kHz-es tartományig vizsgálhatóak. Egy nagyfrekvenciás mérésekre optimalizált mérőrendszerrel magasabb frekvencián is lehetne atomi kapcsolásokat vizsgálni, azonban ez nem volt célja a kutatásomnak.

Ugyanakkor, a zajmérések esetén már valóban tudja az áramerősítő is korlátozni a sávszélességet. A zajmérő kártya maximálisan 1 MS/s-mal mintavételez, és tipikusan 500 kS/s-es beállítás mellett használtam. Az ezekhez tartozó maximális *aliasing*tól mentes sávszélesség 400, ill. 200 kHz. Ennél az elrendezésnél tehát az áramerősítő lehetne a szűk keresztmetszet, amennyiben 1 MS/s-os mintavételezést választunk. Ez a gyakorlatban azért nem okoz problémát, mivel a zajmérések kiértékelésének eredménye a $\Delta I/I$ relatív zaj a 100 Hz és 50 kHz közötti tartományon van kiértékelve, és ez bőven benne van a mérés sávszélességében. A tartomány megválasztását pedig az indokolja, hogy a kutatócsoportunkban vizsgált memrisztorok mindegyike ebben a tartományban megfelelően kiértékelhető, így az eredmények jól összehasonlíthatóak.

4. A 3.20-as ábrán bemutatott mérések esetén készült-e statisztika arról, hogyan változott a kapcsolási küszöb a ciklusról-ciklusra egyetlen adott eszköz esetén? Össze lehet-e ezt vetni az elméleti számolásokból kapott eredményekkel?

Egy elméleti számolásokkal való összevetést először a 2. ábrán mutatom be, mely a dolgozat 3.33-as ábrájának kísérleti-elméleti összehasonlítását egészíti ki a küszöbfeszültségek eloszlásával az (a) panelben. A szimulált (fekete) és a kísérleti (piros) sorozat is 20 kapcsolást tartalmaz. Az eloszlások jó egyezést mutatnak a hasonló közel szimmetrikus eloszlásokkal. Az összehasonlítás lényeges eleme, hogy a releváns paraméterek megegyeznek a két adatsorban: azonos a frekvenciaváltoztatás-

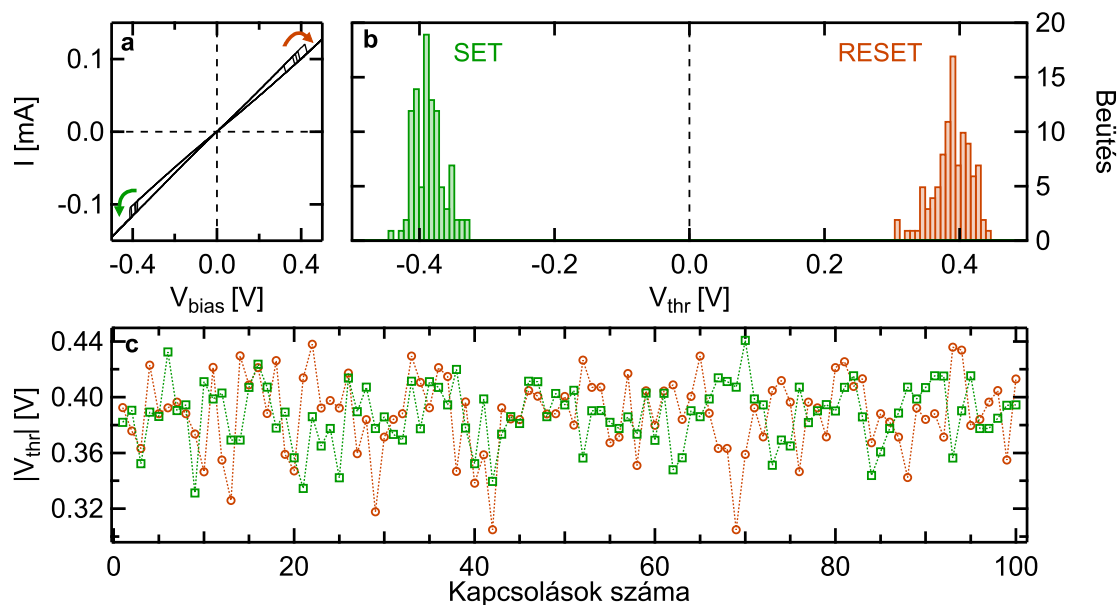


2. ábra. 20-20 elméleti (fekete) és kísérleti (piros) kapcsolás (a) küszöbfeszültség-eloszlásainak és (b) $I(V)$ -görbéinek összehasonlítása.

sebesség (*sweep rate*) és a kiindulási vezetőképesség. A szimulációt több küszöb-energián lefuttatva kapjuk meg a kapcsolási küszöbfeszültségek eloszlásait, melyekből azt az eredményt választhatjuk ki, aminek az átlagos kapcsolási feszültsége a lehető legközelebb esik a kísérleti átlagfeszültséghez.

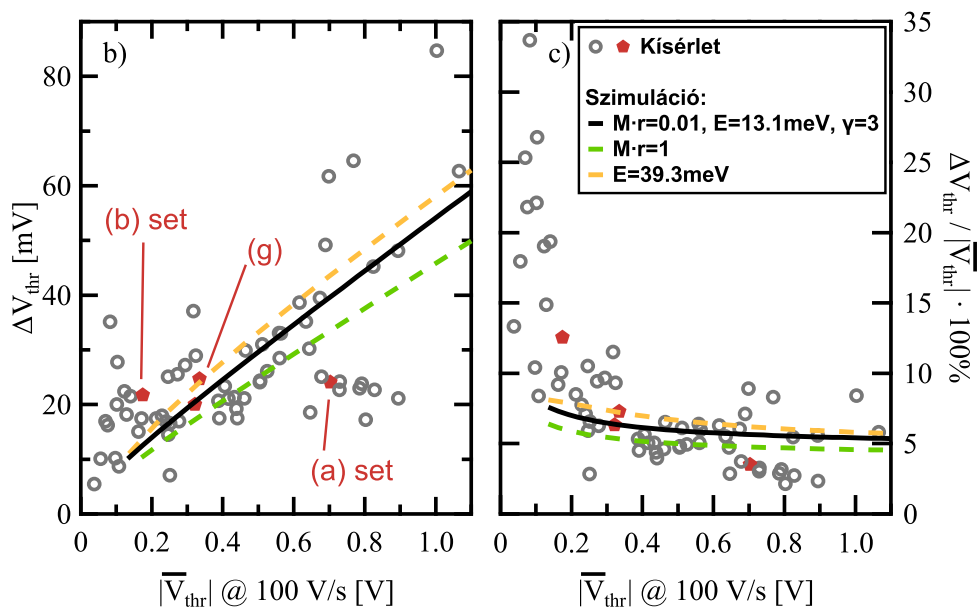
A dolgozat 3.20-as ábráján bemutatott mérésekre is elkészíthető statisztika a kapcsolási küszöbökről, egy példát mutat be a 3. ábra, ami a 3.20(g) panelen bemutatott atomi kapcsolás. Az (a) panel 5 egymást követő $I(V)$ -kapcsolást mutat be, a (b) panelen látható a teljes sorozat, a 100 egymást követő kapcsolás be- (*set*) és a kikapcsoló (*reset*) küszöbfeszültségeinek eloszlása. A kapcsolás szimmetrikus, a két oldali feszültségek abszolút értékei közel megegyeznek, az eloszlások hasonló jelleget mutatnak, még hozzá egy enyhén aszimmetrikus, a kis feszültségértékek fele elnyúló alakot. Végezetül a (c) panel a teljes sorozat időbeli alakulását ábrázolja, amelyen jól látható a kapcsolási feszültség sztochasztikussága.

Láthattuk, hogy a szimulált eloszlások hasonló alakot mutatnak, mint a mért eloszlások. Ezek a közel szimmetrikus eloszlások jól leírhatóak az átlag és a szórás



3. ábra. A dolgozat 3.20-as ábrájának (g) paneljén szereplő atomi kapcsolás elemzése. (a) 5 egymást követő $I(V)$ -kapcsolás. (b-c) A teljes, mért sorozat, 100 egymást követő kapcsolás be- (*set*) és a kikapcsoló (*reset*) (b) küszöbfeszültségeinek eloszlása és (c) időbeli alakulása.

értékeivel, ezért a következő lépésben ezeket a paramétereket fogom összehasonlítani. A 4. ábra mutatja a szimulációs és kísérleti összehasonlítást, ami a dolgozat 3.35-ös ábrája alapján készült. Ebben a vonalak ábrázolják a szimulációs eredményeket, a szürke körök jelölik a mérési adatokat, és a piros hatszögekkel emeltem ki a 3.20-as ábrán látható kapcsolások eredményei közül néhányat, a feliratok jelölik őket. A többállapotú kapcsolás (3.20-as ábra (c) panel) nem szerepel az ábrán, mivel ha az abban végbemenő két átrendeződés egymástól nem függetlenek, akkor az egy fononmódus gerjesztésén alapuló modell nem írja le jól a viselkedésüket. Ezen kívül nincs belevéve a kiértékelésbe olyan kapcsolás sem, melynek küszöbfeszültsége a meghajtó maximális feszültség környékén van. Ennek egyszerű gyakorlati oka, hogy a kapcsolást akkor figyelhetjük meg teljes eloszlásában, ha a meghajtó feszültség jóval nagyobb, mint a küszöbfeszültség. Máskülönben előfordulhat, hogy egy ciklus során nem történik kapcsolás.



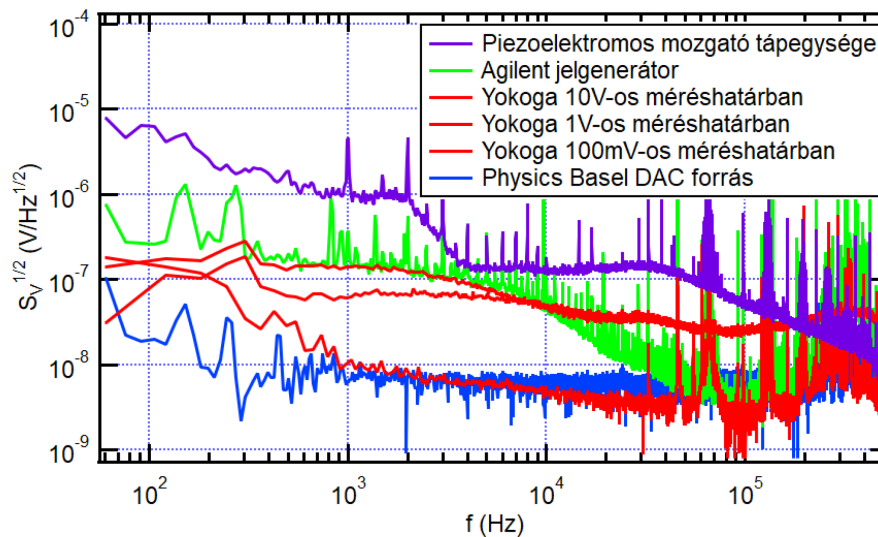
4. ábra. A dolgozat 3.35-ös ábrája alapján készített szimulációs és kísérleti összehasonlítás. A vonalak ábrázolják a szimulációs eredményeket, melyek paramétereit a szövegdoxoban szerepelnek. A szürke körök jelölik a mérési adatokat, melyek közül a 3.20-as ábrán látható (a), (b) és (g) kapcsolások eredményei piros hatszögekkel vannak jelölve.

5. A 4.7-es ábrán bemutatott mérőrendszerben egy jelgenerátort használtak a bias feszültség előállítására. A jelgenerátor kimenetének a zaja problémát okozott, ezért RC szűrővel csökkentették annak sávszélességét. Ehhez kapcsolódik a kérdésem: egy magasabb fokú szűrő nem lett volna-e hatékonyabb a zaj csillapításában? Biztos, hogy egy jelgenerátor a legjobb választás ebben az esetben? Egy SMU, de még lehet, hogy egy adatgyűjtő is alacsonyabb zajú kimenettel rendelkezett volna.

Egy magasabb fokú szűrő beépítésével élesebb levágási frekvenciáját lehetne megvalósítani. A további RC tagok beépítése azonban a soros ellenállás értékének növelésével jár, ami ugyan egy jelenlegi 10Ω -os értéknél nem jelentene óriási különbséget, de mindenképpen figyelembe kell venni. Az elsődleges oka annak, hogy nem használtam magasabb fokú szűrőt, hogy a levágás környéki kis frekvenciás tartományban a vizsgált memrisztorok $1/f$ -zaja tipikusan jóval magasabb, mint az feszültségforrás zaja, így egy élesebb levágás nem járna nagy változással. Helyette arra optimalizáltam, hogy a szűrő időállandója elég nagy legyen, hogy ez

a fenti feltétel teljesüljön, de ne okozza a mérés idejének jelentős megnövelését. Mindezek ellenére, mivel egy magasabb fokú szűrő beépítése nem igényel különösen nagy változtatást, valamint minimális hátránnyal járna, érdemesnek tartanám a jelenlegi szűrőt kicserélni a feszültségforrás zajának biztosabb kiküszöbölésére.

A zajmérő rendszer összeállítását egy alapos tervezési és optimalizálási folyamat előzte meg, melynek részletes dokumentációját Krisztián Dávid MSc-dolgozata tartalmazza [4]. A dolgozatban többek között arra is kitér, hogy milyen megfontolások alapján optimális választás az Agilent függvénygenerátor a feszültség kiadására. Az 5. ábra a függvénygenerátoron kívül három alternatív feszültségforrást vizsgál meg: egy piezoelektromos mozgató tápegységet, a Yokogawa GS200 DC forrást 3 különböző méréshatárban és a Physics Basel DAC SP 927 feszültségforrást. A legalacsonyabb zajszintet a Physics Basel DAC forrás



5. ábra. Különböző feszültségforrások kimeneti zajának összehasonlítása [4].

produkálja, azonban ez annak köszönhető, hogy egy aluláteresztő Bessel-szűrő van beépítve az eszközben. Annyival előnytelenebb ez a megoldás, hogy ez a szűrő nem opcionális, időállandója sem változtatható, így gyors mérésekkel nem kompatibilis. Az Agilent függvénygenerátor kimenetére aluláteresztő szűrő beépítése hasonlóan alacsony zajszintet tud adni.

A Yokogawa egy DC feszültségforrás, aminek 100 mV-os feszültségtartománya különösen alacsony zajszinttel rendelkezik, azonban a tipikus mérésekhez szükséges 1 és 10 V-os méréshatárban az Agilent függvénygenerátorral összevethető zajjal rendelkezik. Ezen kívül az Agilent függvénygenerátor legjelentősebb előnye, hogy tetszőleges jelalak felprogramozható, ami a lépcsőzetes jelek, vagy akár pulzusok kiadásához szükségesek.

Nem tartom kizártnak, hogy egy másfajta eszközök rendelkezhetnek zajmentesebb feszültségkimenettel, és a jövőben érdemes is lehet ilyen irányú fejlesztéseken gondolkodni. Az ilyen speciális mérőrendszer követelményeinek megfelelő feszültségforrás kereséséhez azonban érdemes hozzáfűzni azt a technikai nehézséget is, hogy gyakran a gyártók az eszközök kimeneti zaját vagy egyáltalán nem specifikálják, vagy a legtöbb esetben a zaj frekvenciafüggése nem áll rendelkezésre. Jó példa erre, hogy a Yokogawa GS200 specifikációja a 10 V-os méréshatárra annyi információt ad meg, hogy DC-től 10 kHz-ig a kimenet zaja $< 100 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ [5]. Ezt összehasonlítva az 5. ábra legfelső piros görbéjével látható, hogy a megadott egy érték nem írja le megfelelően a számunkra érdekes zajkarakterisztikát.

6. Szintén a 4.7-es ábra esetében, a szerző megemlíti, hogy az adatgyűjtőt a mérések során el kellett távolítani a rendszerből a földhurkok megjelenése miatt. Galvanikusan leválasztott adatgyűjtő használata nem oldotta volna-e meg ezt a problémát?

Az NI USB-6363 adatgyűjtő kártyának a 4.7-es ábrán látható mérési összeállításban az a praktikus oka van, hogy erre az eszközre van egy optimalizált LabVIEW program megírva, amivel élő időben tudjuk követni a rendszer vezetőképességét és a kapcsolások $I(V)$ -görbéit. Méréseim során tipikusan a kontaktus vagy a kapcsolat beállítását monitoroztam ebben az elrendezésben, majd az adatgyűjtő kártya manuális vagy relével való leválasztása után az erőforrásigényesebb zajmérő rendszerben vettem fel a zajméréseket. Egy galvanikusan leválasztott adatgyűjtő kártya használata technikailag megvalósítható, azonban kérdés, hogy mennyi zajt vinne bele a rendszerbe. Galvanikus leválasztást tudna adni transzformátor, optocsatoló vagy relé. A transzformátor csak AC-jelek átvitelére lenne alkalmas, ami nem megfelelő egy zajmérő elrendezésben. Az optocsatolós megoldásnak is vannak az ismert hátrányai, mint a limitált sáv szélesség, és a nemlineáris átviteli karakterisztika. A relével megoldott leválasztást pedig teszteltünk is a zajmérő elrendezésben. A relét könnyen lehetett vezérelni a mérőprogramból, és alapvetően nem hozott zajt az áramkörbe. Végül azonban a zajmérő áramkör lehető legegyszerűbb összeállítását előnyben részesítettük, hogy minimalizáljuk a hibaforrások számát, így a relével való leválasztást hanyagoltuk.

7. Az utolsó tézispont alátámasztásához egy még csak tervezett publikációt használt fel. Milyen konkrét eredményeket fog majd ebben bemutatni, és ez hogyan kapcsolódik ehhez a tézisponthoz?

A tervezett publikáció tartalmazni fogja a dolgozat 4. fejezetének legfontosabb eredményeit. Bemutatja a Ta/Ta₂O₅/Pt keresztaszal mintákon alacsony feszül-

ségeken részletesen kimért zajtérképet. Részletesen ismerteti a zajméréstechnikát, amivel teljes kapcsolás alatt követhető a zaj alakulása, majd az ezzel a technikával megfigyelt ciklusról-ciklusra szórását a zajnak. Definiálja a feszültségfüggő különböző zajtartományokat: egyensúlyi, nemegyensúlyi és kapcsolás alatti tartományokat. Végül pedig részletesen bemutatja küszöbfeszültség alatti zajmentesítési stratégiát. A bemutatni kívánt eredmények jól fedik a dolgozat III. tézispontját, de a publikációban a nemegyensúlyi zajtartomány kapja a főbb hangsúlyt.

A jelen válaszhoz csatolom a tervezett publikációt jelenlegi állapotában, mely tartalmazza a publikálni kívánt eredményeket, azonban a szövegezésen a további szerzők és én is még dolgozunk.

Hivatkozások

- [1] *National Instruments USB-6363 adatgyűjtő kártya specifikációi*, <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6363-specs/page/specs.html>.
- [2] *Agilent 33220A függvénygenerátor specifikációi*, <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01144/data-sheets/5988-8544.pdf>.
- [3] *Femto DLPCA-200 áramerősítő specifikációi*, <https://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-dlpca-200.pdf>.
- [4] D. Krisztián, “Zajmérés SiO_x-grafén memrisztív rendszeren”, MSc-dolgozat (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2019).
- [5] *Yokogawa GS200 DC feszültségforrás specifikációi*, <https://tmi.yokogawa.com/us/solutions/products/generators-sources/source-measure-units/gs200/>.