

hatunk. A 15. ábrán saját fényképeink láthatók, olyan blendével, amelynek a bal oldali képén páratlan, míg a jobb oldalon látható képen páros számú lamellája van.

Ezek mellett különböző fókusztávolságokkal is készítettünk fényképeket. Azt figyeltük meg, ha a tárgy élesre van állítva, akkor a fénysugarak vékonyabbak és sokkal élénkebben láthatók, azonban, ha a fókusztávolság túl kicsi vagy túl nagy, akkor egyre inkább a blende alakja jelenik meg a fényképen.

Kovács Levente

Irodalom

1. Hömöstrei Mihály, Pham Thi Linh, Beregi Ábel, Laukó András, Béda Ármin, Nagy Péter, Ispánovity Péter Dusan, Jenei Péter: Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye magyar szemmel. *Fizikai Szemle* 64/12 (2014) 430–435.
2. instructables.com/id/Acoustic-Levigator – Akusztikus levitáció Asier Marzo-tól (megtekintés: 2018/08/23).
3. H. Bruus: Acoustofluids 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip* 6 (2012).
4. M. Hakan Kandemir, M. Caliskan: Standing wave acoustic levitation on an annular plate. *Journal of Sound and Vibration* 382 (2016) 227–237.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Schlieren_photography Schlieren photography – Wikipédia (megtekintés: 2018/08/23).

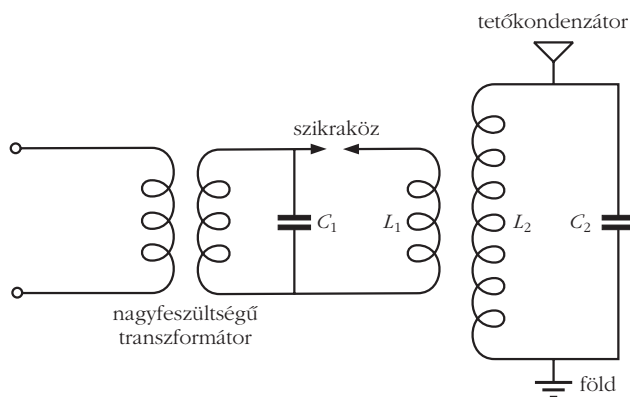
A WIGNER JENŐ SZAKKOLLÉGIUM KÍSÉRLETI KÖR MUNKACSOPORTJA BEMUTATJA: A TESLA-TEKERCS

Träger Magdolna – Eötvös Loránd Tudományegyetem
Buday Csaba – Prolan Irányítástechnikai Zrt.
Sánta Botond – BME Fizika Tanszék

Az első Tesla-tekercs

Az 1800-as évek végén *Nikola Tesla* sokat foglalkozott a váltóárammal és nagyfrekvenciás generátorával. Ekkor alkotta meg az azóta róla elnevezett Tesla-tekercsset is, amellyel nagyfeszültségű (akár 100 kV) és nagyfrekvenciás áramot lehet előállítani.

Az első Tesla-tekercs két egymásra hangolt áramkörből áll (1. ábra). Működésének lényege, hogy a szekunder kör egy rezgőkör, amelyet a primer körrel induktív módon lehet gerjeszteni. A primer körben egy néhány menetes szolenoid tekercs, a hozzá méretezett kondenzátor, egy nagyfeszültségű transzfor-



1. ábra. A Tesla-tekercs egyszerű kapcsolási rajza.



Träger Magdolna az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizika-matematika tanárszakszakszagos ötödéves hallgatója, 2015-től a Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Körének tagja. Szabad idejében szívesen vesz részt természettudományos versenyek szervezésében, illetve a fizika népszerűsítésében.



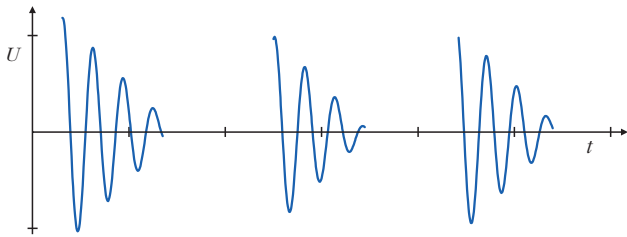
Buday Csaba 2010-ben szerzett mérnökfizikus diplomát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen, majd 2017-ben villamosmérnök BSc-t az Óbudai Egyetemen. Jelenleg hardverfejlesztő mérnökként dolgozik a Prolan Irányítástechnikai Zrt.-nél. Egészen a kezdetektől tagja a Wigner Jenő Szakkollégiumnak és a Kísérleti Körnek, ahol főleg a kísérleti eszközök építésében tevékenykedik.

mátor (vagy induktor) és egy szikraköz van. A másik, a szekunder kör (amely a rezgőkör) egy sokmenetes szolenoid tekercsből és ezen egy tetőkondenzátorból – ami a tekercs tetejére helyezett hengeres alakú fém – áll. Valójában e fém földdel alkotott kapacitása határozza meg a szekunder kör kondenzátorának kapacitását és rezonanciafrekvenciáját.

Az eszköz kapcsolásakor a nagyfeszültségű transzformátorról vagy az induktorról a primer kör konden-



Sánta Botond 2016-ban végzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem fizikusok képzésén, jelenleg doktorandusz-ként dolgozik a BME Fizika Tanszékén. Kutatási területe atomi méretű memóriák vizsgálata. Kutatási tevékenysége mellett a Wigner Jenő Szakkollégium Kísérleti Körének vezetőjeként (és egyik alapítójaként) aktív közéleti tevékenységet folytat, számos demonstrációs kísérleti bemutató és laborlátogatás megszervezése és megtartása fűződik a nevéhez.



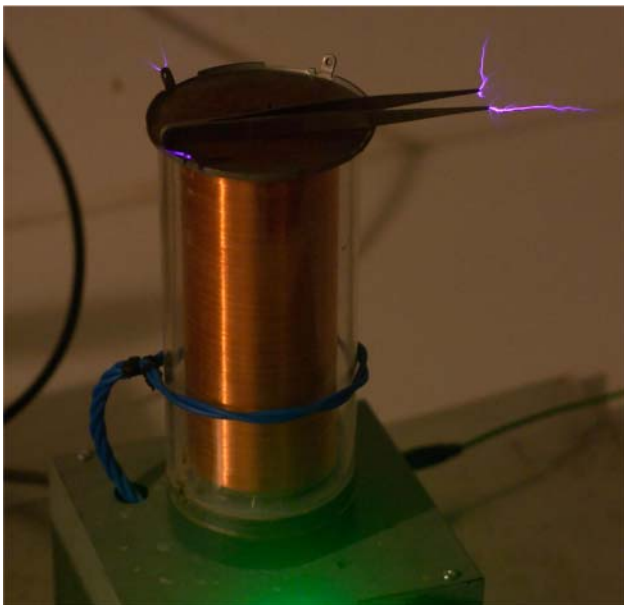
2. ábra. A primer kör feszültségének időfüggése.

zátora elkezdi feltöltődni. Amint eléri azt a feszültséget, amelynél a szikraközben lévő gázban (levegőben) megindul az ívkisülés, az ív – kis ellenállása miatt – gyakorlatilag rövidre zárja a primer kört és a kondenzátor a primer tekercsen keresztül kisül. Oszcilláló kisülés alakul ki, ennek jellegzetes feszültség-görbéjét a 2. ábrán láthatjuk.

Ahogy a csatolás révén az energia átkerül a szekunder körbe és a kondenzátorban a feszültség az ív fenntartásához szükséges feszültség alá csökken, az ívkisülés a szikraközben leáll. Ekkor a kondenzátor ismét töltődni kezd és így a kisülés-töltődés ismétlődik. A primer körben kialakult elektromos rezgés energiája a mechanikai csatolt rezgésekhez hasonlóan átadódik a szekunder körbe, így gerjesztve azt. A Tesla-tekercs szekunder körében tehát a transzformátorhatás (a szekunder kör tekercse sokkal nagyobb menetszámú, mint a primer köré) és a megfelelő induktív gerjesztés miatt jön létre nagy feszültség. Amennyiben a két rezgőkör között rezonanciát alakítunk ki a tekercsek, illetve kapacitások hangolásával, akkor a szekunder oldalon még nagyobb feszültséget, akár 100 kV-ot is kaphatunk [3].

A első Tesla-tekercs működése tehát nagyon hasonló két azonos hosszúságú csatolt matematikai inga viselkedéséhez, amelyeknél az egyikre nagyon kicsi, míg a másikra egy sokkal nagyobb tömeget akasztunk. A primer kör feleltethető meg a nehéz ingának,

3. ábra. A Kísérleti Kör által épített eszköz működés közben [1].



ezt kitérítjük, majd elengedjük. Ahogy ez a nagy tömeg elkezdi lengeni, a csatoláson keresztül elkezdi gerjeszteni a kis tömegű ingát, energiáját átadja annak, ami ezáltal nagy kitérésű lengéseket kezd végezni. Ez történik akkor, amikor a szikraközben elindul az ívkisülés és a kondenzátor a primer tekercssel egy rezgőkört alakít ki, amely a szekunder rezgőkört gerjeszti az induktív csatoláson keresztül.

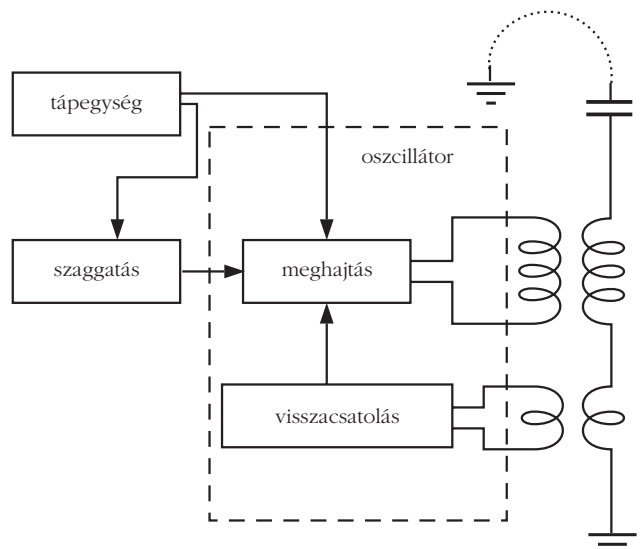
A Kísérleti Kör által épített eszköz

Mostanában gyakori az úgynevezett Solid State Tesla Coil, amelyben a szikraközrel zárt gerjesztő áramkör helyét egy félvezetős oszcillátor váltja fel. A nagyteljesítményű félvezetők, elsősorban a MOSFET-ek fejlődésének köszönhető, hogy egy ilyen meghajtású Tesla-tekercs kis méretben és jó hatásfokkal megépíthető. A Kísérleti Kör (*Skori* tervein alapján, de nem azzal azonos módon) is egy ilyen meghajtású Tesla-tekercs-et épített meg, 3. ábra [7].

Bár külsőre nagyon hasonlít az eredeti Tesla-tekercshez, működése alapjaiban más. Míg a hagyományos Tesla-tekercsben a két rezgőkört egymásra kellett hangolni, a félvezetős megoldás során ez nem jelent korlátozást. A primer kör nem is rezgőkör, nincs benne kondenzátor, hanem csak egy meghajtókör, ami a meghajtó tekercset az oszcilláció által meghatározott frekvencián hajtja meg. A visszacsatolást – más oszcillátorokhoz hasonlóan – magából a rezgőkörből nyerjük, ebben az esetben induktív kicsatolással (4. ábra). Ezáltal csak egy rezonáns áramkörünk van, a szekunder kör, jelentős energia csak ott tárolódik. A soros rezonancia elvén a szekunder körben így is jóval nagyobb feszültség alakul ki, mint ami a transzformátor áttételéből következne.

Ha tisztán ezen az elven építenénk egy Tesla-tekercs-et, az folyamatos üzemben működne, ami nagy terhet jelentene a meghajtó áramkörnek és a tápegységnek. A Kísérleti Kör által épített eszköz életvédel-

4. ábra. A Kísérleti Kör által épített eszköz blokkvázlata.



mi okokból törpefeszültségről működik, de eleve nehéz lenne olyan tápegységet találni, ami ennek folytonos üzemű meghajtását bírná.

Egy kis átalakítással azonban a működés látványának elrontása nélkül csökkenthető a felvett teljesítmény. A lényege, hogy egy NE555 időzítő áramkörrel megszagatjuk az oszcillátor működését, így azt csak az idő kis részében, egy-két milliszekundumra kapcsoljuk be, majd 10-20 milliszekundumra kikapcsoljuk. Ez a rövid működési idő is éppen elég arra, hogy a csúcshőfeszültség megközelítse az állandósult értékét, ugyanakkor a kisülések méretét számottevően nem befolyásolja. Az oszcillátor megépítésekor az is fontos követelmény, hogy a meghajtó áramkör az idő nagy részében kellően nagy visszacsatolást kapjon, hogy a benne lévő MOSFET-ek ne a jelentős energiadiSSIPációval járó lineáris tartományban működjenek.

A Kísérleti Kör által épített Tesla-tekerces primer tekercest egy szimmetrikus push-pull áramkör hajtja, a primer tekerces központi megcsapolású. Ez a topológia egyszerű és hatékony, de érzékeny arra, hogy a meghajtás valóban szimmetrikus legyen. Ellenkező esetben a két félperiódusban létrehozott fluxus nem oltja ki egymást és eredő egyenáram indul meg a primer tekercesben, ami megterheli a meghajtó áramkört és a tápegységet is. A tapasztalat szerint ezekben a topológiákban a meghajtó MOSFET-ek pozitív hőmérsékleti együtthatója segít e probléma megoldásában: ha az egyik ágon nagyobb áram indulna meg, ott a FET melegedése miatt nő a vezetési csatorna ellenállása, ami csökkenti az ágba folyó áramot és stabilizálja a rendszert. Csodákra – természetesen – ez a hatás sem képes, mint azt az évek során tapasztaltuk: a meghajtó FET-et mindig párban kell használni, két különböző típus nem működik együtt hatékonyan. A FET-ek meghajtása teljesen analóg módon történik: egy ellenállásosztóval beállítjuk a FET-ek (közös) munkapontját, a visszacsatoló tekerces pedig – megfelelő áttétellel – erre szuperponálva hajtja a FET-ek gate-jét. Ezt kiegészíti még annyi védelem, hogy a specifikált maximum gate-source feszültséget ne hogy túllépjük.

E Tesla-tekerces fontos része a kisülőcsúc, ami a tetőkondenzátorra tett csúcsos alakú fémelektroda. Ugyanis mindenhol nagy görbületi sugarú tetőkondenzátor esetén előfordulhat, hogy nem alakul ki kitörési pont, ahol az energia távozni tud a rezgőkörből, így azt csak a tekerces ohmikus veszteségein és sugárzással tudja leadni. Ez ahhoz hasonlítható, mint ha egy rádióadót antenna nélkül üzemeltetnénk, ami ott is és eszközünkben is képes lenne tönkretenni a végfokozati áramkört.

Jelenségek a Tesla-tekerccsel

A Tesla-tekerces működése során többféle szikrát, kisülést is megfigyelhetünk.

- Koronakisülés közeli, néhány centiméterre lévő elektrodák közt alakulhat ki, ha ezekre több ezer voltos feszültséget kapcsolunk. Az elektrodák felületén ilyen-



5. ábra. Ív kisülés a Tesla-tekercesen [1].

kor keskeny fényréteg, vagy világító pontok láthatók. Amennyiben legalább az egyik elektróda csúcsos alakú, akkor csúcskisülésnek hívjuk. Ilyen koronakisülés egyetlen elektróda körül is ki tud alakulni, ha ott az elektromos tér akkora, hogy maga körül másodlagos ionizációt hoz létre. A levegőben mindig képződnek ionok (például kozmikus sugárzás miatt), ezért, ha az elektromos tér elég erős ahhoz, hogy a szabad úthossz alatt annyira felgyorsítsa az iont, hogy az újabb ionizációt okozzon, akkor kialakul a koronakisülés.

- Szikrakisülést akkor tapasztalhatunk, ha a fémelektrodák közt a feszültséget tovább növeljük. Ekkor egy szikra impulzusszerűen átugrik, rövid idő alatt nagy áram folyik át. A szikra ideje alatt az elektrodák között végig kialakul egy vezetési csatorna, amelyben ütközési ionizáció játszódik le.

- Ív kisülés (5. ábra) két fémelektroda között alakulhat ki, nagyobb áramú vezetési csatorna, amelyben jellemzően folyamatosan folyik áram [3].

Egyenfeszültség alkalmazásakor a levegő átütési szilárdsága – páratartalomtól, hőmérséklettől függően – 10–30 kV/cm, viszont a Tesla-tekercesben váltófeszültség van, tehát a szikrák méretéből nem tudjuk közvetlenül megbecsülni a keletkezett feszültséget. Amikor a kisülés elindul a föld felé, egy lokális, kicsiny vezetési csatornát hoz létre, amelyben a levegőben lévő ionok adják a vezetést. Ha minden egyes kisüléskor új vezetési csatornának kellene létrejönnie, csak milliméteres szikrák tudnának keletkezni. A Tesla-tekerces azonban nagyfrekvenciás eszköz, így olyan gyorsan jön az újabb kisülés, hogy a köztes idő alatt a korábban felépült ioncsatorna nem tud eltűnni. Az ionok mozgási sebessége – a sok ütközés miatt – kicsi és ehhez képest a rekombinációjukhoz szükséges idő is nagyobb. A kisülés – természetesen – többfelé is elindulhat, a vezetési csatornában is



6. ábra. Hagyományos izzóban kialakuló kriptonkisülés [1].

körül erős, váltakozó elektromos teret hoz létre, amit a szigetelő nem, vagy csak nagyon kicsit árnyékol le. Maga a szigetelőanyag nem válik vezetővé, ez az elektromos tér nem elég erős ahhoz, hogy töltések induljanak meg benne, ahhoz viszont elég nagy, hogy az eszköztől távolabb, a szigetelő túloldalán lévő fémbe elmozdítsa a töltéseket, azaz abban a fémbe is folyhasson áram.

keletkezhetnek elágazások, ezért láthatjuk a faágszerűen szétfutó, változatos alakú kisülési mintákat.

Ilyen nagyfrekvenciás váltóáram az emberi szervezetre nem veszélyes, holott egészen kicsi, 0,005 A-es egyenáram is már komoly károsodást tud okozni. A sejteinkben nagyon sok ion vándorol, amire a rajtunk átfolyó áram hatással van: ha akár csak kicsi egyenáram éri sejteinket, a bennük lévő ionok mozgását az adott irányba megváltoztatja, ami a sejtek károsodásához vezet. Ilyen nagy frekvenciájú áramoknál viszont már annyira gyors az elektromos tér váltakozása, hogy az ionok nem tudnak olyan távolságra elmozdulni, ami károsodást okozhatna szervezetünkben.¹ A nagyfrekvenciájú áramokat az orvosi gyakorlatban gyógyászati célokra is használják [4]. Azonban nagyon fontos kihangsúlyozni, hogy a ténylegesen megvalósított Tesla-tekerccsek esetén óhatatlanul megjelennek alacsony frekvenciás komponensek is, amelyek rázásérzetet adhatnak és szervezetkárosító hatásuk is van. A bemutatókon ezért fontos felhívni a figyelmet arra, hogy senki ne nyúljon a szikrákba.

Ha egy izzólámpát (6. ábra) vagy fénycsövet a Tesla-tekerccs szekunder tekercsének nem földelt végéhez érintünk, akkor az izzólámpa vagy a fénycső világitani kezd a kezünkben, mert megindul benne az ívkisülés. Ilyen gázkisülésekkor a keletkező fény színképe vonalas szerkezetű, ahol a színképvonalak helye legfőképp a gáz anyagi minőségétől, szélessége pedig a gáz nyomásától függ. A 7. ábrán a neon jellegzetes vörös színét láthatjuk [5].

Nagyon érdekes a szigetelők viselkedése a Tesla-tekerccs által létrehozott nagyfrekvenciás térben. Ha a tetőkapacitásra, azaz a szekunder tekercs tetején lévő fémre szigetelőt, majd arra ismét egy fémet teszünk, az ugyanúgy szikrázni fog, mintha a szigetelő dielektrikum ott sem lenne. A Tesla-tekerccs maga

Talán pont a gyönyörű jelenségek miatt, a Tesla-tekerccset a Kísérleti Kör már nagyon sokszor vitte bemutatni például *A fizika mindenkié* rendezvényre, a *Kutatók Éjszakájára*, a *BME Nyílt napokra* és más hasonló rendezvényekre, ahol érdeklődő gyermekek, felnőttek láthattak bele a fizika varázslatos világába (lásd a címképet). A legkülönlegesebb helyszín a Magyar Állami Operaház volt, ahol ez a Tesla-tekerccs járt. 2015. február 14-én, Goethe *Faust* című műve első tőredékes megjelenésének 225. évfordulóján rendezték meg a Faust-bált, amely a tudományokat és a művészeteket kapcsolta össze. Ezen az eseményen a BME Fizikai Intézet hat kutatója és diákjaik, köztük a Kísérleti Kör tagjai mutattak be fizikai kísérleteket, amelyek közt az említett Tesla-tekerccs is sikeresen szerepelt [2].

Irodalom

1. Kísérleti Kör oldala: <https://wjsz.bme.hu/~kiskor/wiki/SSTC>
2. https://www.bme.hu/hirek/20150220/A_tudomany_karakteres_fuszerkent_jarul_hozza_a_vegso_izharmoniahoz
3. Budó Á.: *Kísérleti fizika*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
4. Gombás P.: *Fizika mérnököknek*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
5. Litz J. (szerk.): *Általános fizika, III. kötet*. Dialóg–Campus Kiadó, Budapest–Pécs, 2003.
6. Sánta Botond: *Tesla-transzformátor továbbfejlesztése*. Szakdolgozat, BME, 2013.
7. <http://skory.gylcomp.hu>
8. <http://donkclipstein.com/skin.html>

7. ábra. Ívkisülés egy neonsőben [1].



¹ A jelenség pontos háttere vitatott, vannak, akik a skineffektust (nagyfrekvenciás áramok esetén a vezető belsejében gyakorlatilag nem halad áram, csak a vezető felületi rétegében) is lényegesnek tartják [8].