

AZ ELEKTROMÁGNESES SUGÁRZÁS TÁVOLHATÁSA, AVAGY MIRE JÓ A POYNTING-VEKTOR; ILLETVE TUDUNK-E A FÉNYNÉL GYORSABBAN HALADÓ JELEKET ELŐÁLLÍTANI?

Fürjes Bálint¹, Dóra Balázs², Simon Ferenc^{3,4}

¹Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium; furjes.balint@gmail.com

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar; dora.balazs@ttk.bme.hu

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar; simon.ferenc@ttk.bme.hu

⁴HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont

Bevezetés

Képzeliük el, hogy egy akkumulátort 300 000 km hosszú kábellel kötünk össze egy fogyasztóval, és az áramkört egy kapcsolóval szakítjuk meg, amint az 1. ábrán mutatjuk. (Itt tekintsünk most el attól, hogy egy 1 mm² keresztmetszetű ilyen hosszú rézdrót ellenállása 5 MΩ.) Vajon függ a lámpa bekapcsolásának késleltetése a kapcsoló használatát követően attól, hogy a fogyasztó 1 m-re van az akkumulátortól, vagy esetleg 300 000 km-re? Függ a megfigyelt hatás attól, hogy a kábel egy sima vezetékpar, esetleg egy koaxiális kábel, vagy esetleg egy úgynevezett csavart érpáras kábel (*twisted-pair cable*)? Cikkünkben ezt a kérdést járjuk körbe és válaszoljuk meg kísérletekkel. A jelen munka a korábbi [1] jelterjedésről szóló mun-

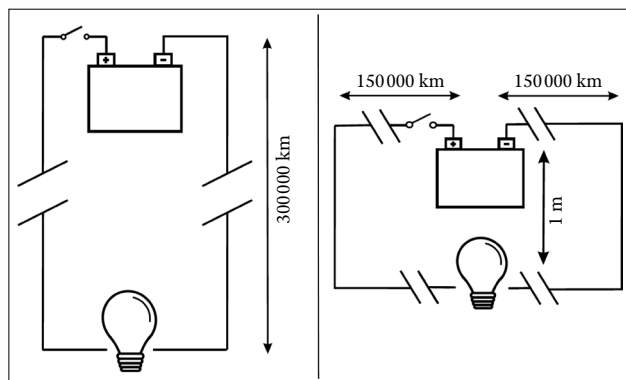
kánk folytatása, de konkrétan egy *YouTube*-videó inspirálta [2], ahol a kérdéskört tárgyalják, azonban magát az említett kísérletet nem végzik el. Mi ezt itt megtettük.

A Poynting-vektor

A Poynting-vektor kérdésköre szorosan kapcsolódik az energia továbbításához is. Nevezetesen felmerül az a kérdés, hogy miközben energia érkezik a háztartásunkba egy erőműből, pontosan hogyan is áramlik az energia. A kérdés még furcsább lesz, amennyiben váltakozóáramot tekintünk: ilyenkor a feszültség folyamatos alternálása miatt valójában egyetlen elektron sem érkezik el hozzánk az erőműből. Példaképp számítsuk ki, hogy amennyiben egyenáramot használnánk, mennyi idő alatt érnek az elektronok a Paksi Erőműből Budapestre (vagy fordítva, hiszen a technikai áram és az elektronok iránya éppen ellentétes)!

A számításban segítségünkre van, hogy kapcsolatot találhatunk az I áramerősség és az elektronok kollektív áramlási sebessége (ez *drift*sebesség néven ismert) között. Utóbbi mennyiséget v_d -vel jelöljük:

$$I = -Anev_d,$$



1. ábra. Egy akkumulátort gondolatban kétszer 300 000 km hosszúságú kábellel kötünk össze egy lámpával és az áramkört egy kapcsolóval szakítjuk meg. Azonban a kísérletet két különböző módon végezzük el, az ábra szerint. A bal oldali ábrán a feszültségforrás és a fogyasztó messze van egymástól, míg a jobb oldali ábrán ezeket közel hozzuk egymáshoz. A két szituáció között vajon lesz különbség a bekapcsolást követően, hogy mikor kezd el világítani a lámpa?



Simon Ferenc fizikus, egyetemi tanár, a BME TTK dékánhelyettese. Érdeklődési területei: szilárdtest-spektroszkópia, a spintronika, a kvantum-információelmélet és a fizika népszerűsítése. Legfontosabb eredményei: az itineráns elektronok mágnesesrezonancia-jelének felfedezése új fémekben, a spinrelaxáció egyesített elméletének kidolgozása, spinnel nyomjelzett szén nanocsövek előállítására és triplált optikai állapotok felfedezése nanocsövekben. ERC- és Lendület-pályázatokat vezetöje.



Fürjes Bálint a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium 12. osztályos tanulója, természettudományos tanterví tagozaton. Fizikatanárai: Schnider Dorottya és dr. Schramek Anikó. A BME „Középiskolás Tudományos Diákköri Konferencia” programja keretében végez a BME Természettudományi Karán kutatómunkát. Érdeklődési területe: izgalmas problémák, problémakörök a kísérleti fizikában.



Dóra Balázs fizikus, egyetemi tanár a BME TTK Elméleti Fizika Tanszékén. Érdeklődési területei: nemegyensúlyi kvantumdinamika szilárdtestekben, nemhermitikus fizika, nyílt kvantumrendszerek viselkedése, topológikus szigetelők, az alacsony dimenziós erősen korrelált rendszerek tulajdonságai. Egy Lendület-pályázat vezetöje.

ahol a vezeték keresztmetszete A , n a térfogategységben lévő elektronok száma és e az elemi töltés nagysága ($e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). A negatív előjel arra utal, hogy az elektronok negatív értékű technikai áramot visznek, ezért a számításban kapott driftsebesség is negatív lesz. A vörösréz $\rho = 9000$ kg/m³ sűrűségével és 63,54 g/mol moláris tömegével számolva egy köbméter vörösréz megközelítőleg $1,41 \cdot 10^5$ mol, azaz $8,5 \cdot 10^{28}$ atomot tartalmaz. Mivel a vörösrézben atomonként 1 vezetési elektron van, az elektronok sűrűsége: $n = 8,5 \cdot 10^{28}$ 1/m³. 1 mm² keresztmetszetű rézdrótra és 1 A áramerősségre azt kapjuk, hogy $v_d = -0,07$ mm/s, azaz óránként az elektronok mindössze 26 cm-t tesznek meg, naponta pedig 6 métert! Eszerint a 127 km-es Paks–Budapest távolságot ebben a példában az elektronok mintegy 50 év alatt tennék meg! Az energia nyilván nem ekkora sebességgel áramlik.

Az elektromágnességgel kapcsolatos tanulmányaink során megtanult Poynting-vektor egy segédmennyiségnek tűnik, kevés gyakorlati haszonnal. Megtanuljuk, hogy definíciója:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H},$$

ahol \mathbf{E} az elektromos és \mathbf{H} a mágneses térerősség vektora. \mathbf{S} dimenziója W/m², azaz kifejezi az időegység alatt egységnyi felületen áthaladó energia nagyságát. Azt is megtanuljuk a középiskolában, hogy pl. a tér $+x$ irányába haladó transzverzális elektromágneses sugárzás esetén \mathbf{E} és \mathbf{H} pont úgy vált mindig együtt előjelet, hogy amikor például \mathbf{E} a $+y$ irányba mutat, akkor \mathbf{H} a $+z$ -vel párhuzamos, és együtt fordulnak át majd a $-y$, illetve a $-z$ irányba – így biztosítva, hogy \mathbf{S} mindig a $+x$ irányba mutasson. A *Fizikai Szemle* korábban már foglalkozott a Poynting-vektorral [3], hivatkozva Simonyi Károly és Zombory László klasszikus egyetemi tankönyvére [4], amely mélyebben tárgyalja e fogalmat.

A továbbiakban az egyes vezeték típusok által létrehozott Poynting-vektort vizsgáljuk meg; ami egyben lehetőséget ad arra, hogy a bevezetőben felvetett kísérletet elvégezzük, és a felmerülő kérdésre egyértelmű választ adjunk.

Kísérleti eredmények és diszkusziójuk

A bevezetőben felvetett gondolat-kísérlet eredményének eldöntésére egy kísérletet végzünk el. Első gondolatként az adódik, hogy mérjük az időt 1 szekundumnál sokkal pontosabban, ezáltal nincs szükség 300 000 km-es drótokra, amelyek beszerzése lássuk be, nem praktikus. Ha pl. 30 m-es drótokat használunk, akkor ezen egy jelgenerátor által keltett rövid impulzus 100 ns alatt halad át, amit egy oktatási célú oszcilloszkóppal már meg tudunk mérni. Azonban hamar rájöhettünk, hogy azt a bizonyos felkapcsolási időt nincs mihez viszonyítanunk. Ugyanabba a problémába szaladunk bele, amit a speciális relativitáselmélet tárgyalásakor szoktunk tárgyalni: mikor is tekinthető két, egymástól távol lévő esemény egyidejűnek? Honnan tudjuk, hogy mikorra is kellene odaérkeznie az impulzusnak? Mihez képest ér oda korábban vagy

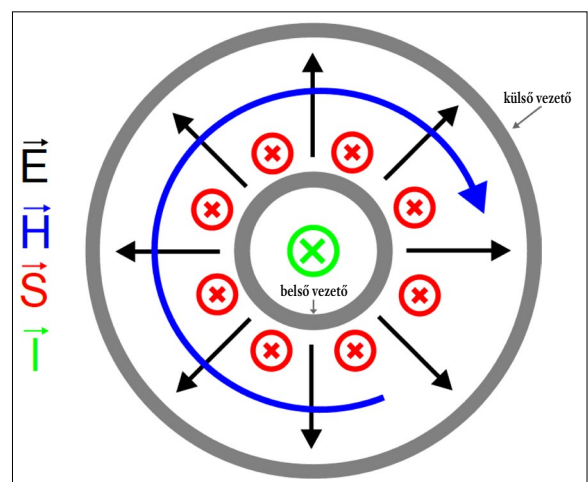
később? Ha komolyan elgondoljuk a kísérletet, a kapcsoló felkapcsolásával egyidőben valahogy jelezniünk kellene – pl. egy lézer impulzusával – annak, aki a stopperével figyel, hogy a beérkező lézerimpulzushoz képest mikor is kapcsolódik fel a vizsgált lámpa.

Érdekes mellékszálként megemlítjük, hogy az a kutatócsoport is hasonló dilemmával nézett szembe, amelyik a CERN-ben keletkező neutrínók repülési idejét szerette volna megmérni kb. 800 km távolságban. Ők referenciajelként a globális helymeghatározási rendszer (GPS) biztosította abszolút időhöz képest próbálták mérni, azonban egy optikai szál rossz csatlakozása és egy frekvenciaforrás pontatlansága miatt azt a zavarba ejtő eredményt kapták – amiről később bebizonyosodott, hogy hibás –, hogy a neutrínók a félynél gyorsabban repültek [5].

Elvben az impulzus indítását jelző referenciajelet adhatná egy gyors lézer és gyors fotodetektor, azonban ez meglehetősen eszközigenyes, illetve egy elektronikai impulzust először fényvé kellene alakítanunk, majd vissza. Emellett biztosítani kellene, hogy a fényimpulzus mindig bejárja az előre definiált hosszúságú utat. Nekünk ezért az az ötletünk támadt, hogy készítünk egy referencia-kábelt (referenciacsatornának nevezzük ezt a továbbiakban), amelyen egy elektronikus impulzus áthaladási ideje független attól, hogy a jelgenerátor és az oszcilloszkóp milyen messze helyezkedik el egymástól. Erre azt találtuk, hogy egy koaxiális kábel a legalkalmasabb (ennek optikai megfelelője egy optikai szál lehetne, de ebben ugyanúgy konvertálnunk kellene az optikai jelet elektronikaivá és vissza).

A koaxiális kábelt pontosan azért javasolta Oliver Heaviside 1880-ban, mert ebben belül helyezkedik el mind a mágneses, mind az elektromos erővonalasereg, ezért az elektromágneses jel, azaz a Poynting-vektor is biztosan benne halad. Ezt a 2. ábrán mutatjuk.

A koaxiális kábel tulajdonságait részletesen bemutatunk korábbi cikkünkben [1], most csak azt a tulajdonsá-

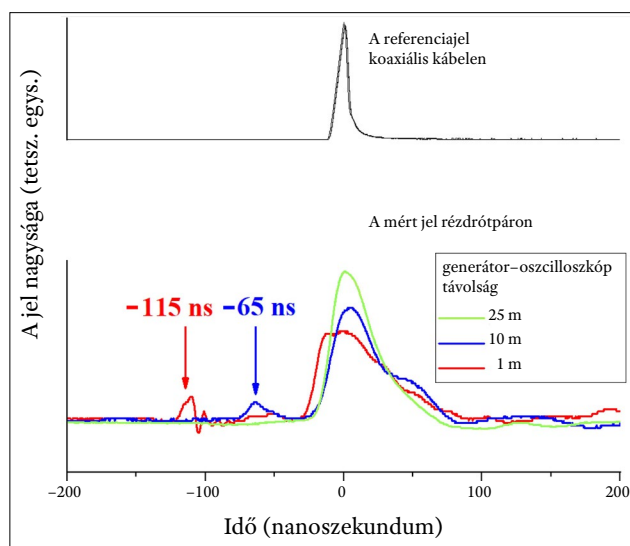


2. ábra. A koaxiális kábelben kialakuló elektromos és mágneses erővonalak, illetve a Poynting-vektor. Vegyük észre, hogy az energia a belső és külső vezető közötti dielektrikumában halad

got emelnénk ki – amire később szükségünk lesz –, hogy a leggyakrabban használt, úgynevezett BNC csatlakozós, RG58 típusú kábelben a terjedési sebesség a fénysebesség kb. $2/3$ -a, azaz $v = 2 \cdot 10^8$ m/s (egészen pontosan 65% -a).

A kísérlethez egy Rigol DG5252-es típusú függvénygenerátort használtunk. Ennek előnye, hogy igen rövid, 10 ns, hosszúságú impulzusokat tud előállítani két független csatornán. Ha csak egyetlen csatornát használnánk, akkor a kábelvégi reflexiók miatt kevésbé egyértelműen lehetne a kapott eredményeket értelmezni. A rövid impulzusokat előállító jelgenerátor mindkét kimenetét összeköttöttük egy Tektronix MDO3024 típusú oszcilloszkóppal. Az egyik csatornán egy 25 m hosszú koaxiális kábel volt, a másikon pedig egy 25 m-es közös réz drótpár, melynek két vezetékdarabját egyszerűen a földre helyeztük.

A 10 ns hosszúságú impulzusokat 1 ms-onként ismételtgettünk. Ez megfelelő várakozási idő ahhoz, hogy a két impulzus ne csússzon egymásra, és hogy az oszcilloszkóp stabilan tudjon mérni. A kísérlet során a két eszköz távolságát változtattuk, miközben össze voltak kötve az említett vezetékekkel. A 3. ábra mutatja a különböző távolságértékek esetén kapott eredményeket. A mérések során a jelgenerátor és az oszcilloszkóp először 25 m-re volt egymástól, majd 10 m-re végül pedig 1 m-re.



3. ábra. Az ismertetett összeállítás mellett kapott jelek. A referenciajelet függőleges irányban eltoltuk, hogy a réz vezetéken kapott jelet jobban be tudjuk mutatni. A rézdróton mért jeleknél vegyük észre, hogy a jelgenerátort és az oszcilloszkópot egymáshoz közelítve megjelenik a nyíljal jelzett korábbi jel

Az ábrán mutatjuk a referenciajelet is függőlegesen eltolva és egy kettes faktossal összenyomva, hogy a mért jeleket jobban lássuk. A referenciajeleket úgy állítottuk be, hogy ezek csúcsa a 0-hoz essen, és ehhez képest mértük a jeleinket. Egyetlen, aránylag erős jelet figyelhetünk meg akkor, amikor a jelgenerátor és az oszcilloszkóp távolsága 25 m (zöld vonal), bár a referenciához képest ki

van szélesedve.¹ Ezen a jelen két változást figyelhetünk meg, amikor a két műszert egymáshoz közelítjük: a kapott csúcs nagysága csökken, és megjelenik a fő csúcs előtt egy másik (nyíljal jelzett) csúcs is, időben korábban. Az előbbi jelenség is már utal arra, hogy a jel egy része nem a fő csúcsban van, azonban az utóbbi jelenség, a kisebb csúcs jelenléte már egyértelműen azt jelzi, hogy a koaxiális kábelben áthaladó jelet megelőzve is megjelenik egy jel a sima rézkábel használata esetén. Ez egyértelmű bizonyíték arra, hogy a sima rézkábeleket használva a jel „átugrik” a drót egyik darabjáról a másikra, ha elegendően közel vannak egymáshoz – azaz a Poynting-vektor terjedhet a szabad térben.

Megvizsgálhatjuk, hogy a kisebb jel mennyivel előzi meg a referenciajelet és a csupasz rézdróton kapott, nagyobb csúcsot. Erre 115 ns-ot kapunk, amikor a két műszer 1 m-re van egymástól. Tekintve, hogy a referenciaként használt koaxiális vezetéken a jel $v = 2 \cdot 10^8$ m/s sebességgel halad, ez 23 m-t ad a várt 24 m-es értékhez képest. Ez a két érték megfelelő egyezésben van – tekintve, hogy a nagyobb csúcs is kb. 30 ns-ra kiszélesedik az eredeti 10 ns-hoz képest. Ezért megállapíthatjuk, hogy a kísérletünkben a csupasz rézdrót használata mellett a jel *instant* módon megjelenik az oszcilloszkópon, amit a Poynting-vektor segítségével tudunk magyarázni. Ez egyben meg is válaszolja a cikkünk bevezetőjében feltett kérdést: az 1. ábra jobb oldalán látható helyzetben a jel azonnal megjelenne a fogyasztón a kapcsoló felkapcsolását követően, 1 s-mal korábban, mint az 1. ábra bal oldalán bemutatott helyzetben. Megjegyezzük, hogy elvégeztünk egy kontrollkísérletet, amikor is különböző hosszúságú csupasz rézdrótot és azonos hosszúságú koaxiális kábelt használtunk, a forrást és az oszcilloszkópot messzire eltávolítva egymástól. Ebből azt kaptuk, hogy a csupasz rézdróton terjedő jel közel azonos sebességgel halad, mint a koaxiális kábelben.

A koaxiális kábel – és ennek optikai analógiája az optikai szál – fontos szerepet tölt be a hírközlésben, mégis az otthoni jelátvitásban gyakrabban találkozunk az csavart érpáras kábelekkel. Ebből is az ún. árnyékolatlan csavart érpár a legerterjedtebb (*unshielded twisted pair*, vagy UTP), ami az otthoni vezetékes hálózati megoldásokban használt. Ezt a kábeltípust a koaxiális kábel feltalálása után 1 évvel, 1881-ben szabadalmaztatta Graham Bell. Kiderül, hogy a koaxiális kábelekhez képest hasonlóan jó tulajdonságokkal bír ez a megoldás a nagyfrekvenciás jelek továbbítására, azonban mechanikailag sokkal rugalmasabb, és kisebb helyen nagyobb adatmennyiség továbbítását teszi lehetővé.

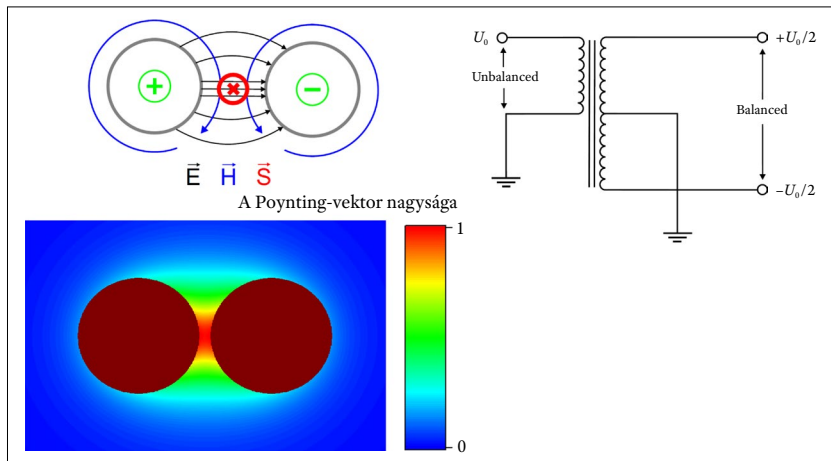
¹ Ennek oka valószínűleg az, hogy az egyszerű kábelben ún. diszperzió lép fel, azaz a különböző frekvenciájú jelek terjedési sebessége nem azonos, ennek részletesebb tárgyalása azonban túlmutat a jelen vizsgálaton. Érdekesképpen említjük meg, hogy sokan a diszperzió jelenségével magyarázzák a távoli villámcsapásokat követő mennydörgés időbeni hosszabb lefutását. Utóbbi jelenségnek sokkal összetettebb okai vannak, pl. a mennydörgés nem egy helyről érkezik a felhőből, illetve a különböző helyről érkező hanghullámok különböző hőmérsékletű levegőn haladnak át, ami a hangsebességet jelentősen befolyásolja.

Azonban ahhoz, hogy az árnyékolatlan csavart érpáras (UTP) megoldás működjön, szintén a Poynting-vektor megértésén alapuló trükkre van szükség. A 4. ábrán mutatjuk a csavart érpáras UTP kábelek esetén kialakuló erővonalképet, amennyiben egy úgynevezett kiegyenlítési eljárást alkalmazunk. Az ehhez használt kiegyenlített–kiegyenlítetlen átalakítót (*balanced–unbalanced converter*, vagy *balun*) is mutatja az ábra. A magyar nyelvű szakirodalom ezt az eszközt „csavartérpár-átalakítónak”, de igen gyakran csak *balunnak* hívja – mi is az utóbbi kifejezést használjuk a továbbiakban. A balun használata úgy válik érthetővé, ha felidézünk, hogy a koaxiális kábelben a külső vezeték mindig földön van, míg a belső vezetéken van csak az időben váltakozó jel. Ez ún. kiegyenlítetlen jelátvitelt eredményez. A *balun* használatával viszont az érpár két vezetékén egymással ellentétes polarítású, azonos nagyságú jeleket vihetünk át. A tényleges jel a két vezetéken lévő jelek különbségeként áll elő.

A 4. ábra szerint ekkor az így meghajtott vezetékpártól távol a mind a mágneses, mind az elektromos tér elhanyagolható: az elektromos tér eltűnését az ellentétes polarításokból, míg a mágneses tér eltűnését a két vezetékdarab körüli éppen ellentétes körüljárású mágneses térből kapjuk. Ezáltal a Poynting-vektor csak a két vezeték közötti kicsiny térrészben terjed, ezért nem is szór ki jelentősen, így nincs szükség a vezetékek árnyékolására, ami a fent említett technikai előnyöket adja. A 4. ábra kontúrdiagramon mutatja a Poynting-vektor nagyságát. Az ábrán kvalitatívan látszik, hogy \mathbf{S} a két vezetékdarab között összpontosul. Az kevésbé látszik, de a számításból kijön, hogy a vezetékpáron kívül az egyedüli vezeték esetén várt $1/r^2$ -es függésnél (r a vezetékektől vett távolság) gyorsabban tűnik el a Poynting-vektor. Amennyiben a két R sugarú vezetékdarab a koordináta-rendszerünk x tengelyén helyezkedik el, a $+x_0$ és $-x_0$ helyeken (R kisebb, mint x_0), az ábrán mutatott polarításokkal, akkor az \mathbf{E} , illetve \mathbf{H} értékek vektorkomponenseire felírva a drótokon kívüli térre ez adódik (konstansokat és töltésmennyiséget, valamint áramnagyságokat nem tartalmazza a képlet, továbbá egyik vektornak sincs z komponense):

$$\mathbf{E} = [E_x, E_y]$$

$$\sim \left[\frac{x+x_0}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2+y^2}, \frac{y}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{y}{(x-x_0)^2+y^2} \right]$$



4. ábra. Balra lent: (csavart) érpár körül kialakuló erővonalképek és Poynting-vektor. Balra lent: a Poynting-vektor nagysága a vezetékpar körül. Jobbra lent: egy csavartérpár-átalakító vagy „balun” sematikus rajza. A balun egy transzformátormagon alapul, ami a bal oldali kiegyenlítetlen jeltől a jobb oldalon egy kiegyenlített, a két vezetékben egymással ellentétes polarítású jelet hoz létre

$$\mathbf{H} = [H_x, H_y]$$

$$\sim \left[\frac{-y}{(x+x_0)^2+y^2} + \frac{y}{(x-x_0)^2+y^2}, \frac{x+x_0}{(x+x_0)^2+y^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2+y^2} \right]$$

A Poynting-vektornak ezzel szemben csak az (x, y) síkra merőleges z komponense lesz, amely a vektorszorzás szabályai szerint az $S_z = E_x H_y - E_y H_x$ alakban áll elő. Az így számított mennyiséget mutatja a 4. ábra.

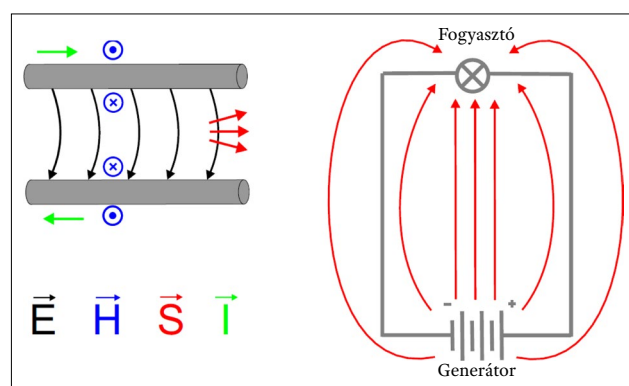
További érdekességként megemlítjük, hogy a Poynting-vektorokra nem alkalmazhatjuk a vektoros szuperpozíció törvényét: könnyen belátható, hogy a drótpár két darabja külön-külön ad két egymással párhuzamos Poynting-vektort a vezetékektől távol is. Ennek oka, hogy bár a vezetéken kívül a két vezetékdarabból ellentétes irányú elektromos és mágneses tér származik, mégis az $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ és $(-\mathbf{E}) \times (-\mathbf{H})$ művelet eredményei párhuzamos vektorok. Azonban, amennyiben a szuperpozíciót az elektromágneses teret jellemző \mathbf{E} és \mathbf{H} vektorokra alkalmazzuk, azok lényegében kiejtik egymást a *vezetékeken kívül*, így ott az eredő Poynting-vektorra is kis eredményt kapunk. Amikor a drótpár két darabját egymáshoz közelítjük, kívül eltűnik a Poynting-vektor, azonban közöttük felerősödik, az átvitt energia tehát átrendeződik, és a két drótszál között összpontosul.

Mindezen tudás birtokában elvégeztük a kísérleteinket csavart érpáras kábel használata mellett. A referenciacsatorna továbbra is egy koaxiális kábel volt, míg egy közönséges 25 méteres UTP ethernetkábel volt a csavart érpárunk. Ennek meghajtásához a jelek átalakítása végett szükség volt egy kereskedelemben is kapható kb. 2000 Ft költségű balunra (típusa: RJ45 UTP-KOAX video balun), amelyeket párban árulnak (a jeleket vissza is kell alakítani az UTP után), és videójelek távoli átvitelére használ-

ják. Azt az eredményt kaptuk, hogy bármennyire közel hozzuk is egymáshoz a jelgenerátort és az oszcilloszkópot, az UTP kábelben átvitt jel nem érkezik meg hamarabb, mint a koaxiális kábelben átterjedő. Ez megerősíti azt, amit várunk; azaz, hogy az UTP kábelből sem jut ki a Poynting-vektor. Ehhez az eredményhez egyébként az is kell, hogy a legtöbb UTP kábelben a terjedési sebesség szintén a vákuumbeli fénysebesség kb. 65%-a. Érdekesképpen megemlítjük, hogy a méréseink szerint az UTP kábelben átvitt jel alakja nem torzul annyit, mint a csupasz rézdróton átvitt jelé. Ez is arra utal, hogy az UTP kábel kiválóan megfelel nagyfrekvenciás jelek átvitelének céljára.

Energiaterjedés a forrástól a fogyasztóig és a Poynting-vektor

Miután ismertettük a Poynting-vektort a leggyakoribb kábeltípusokra, meg tudjuk magyarázni a fentebb feltett kérdést, hogy az 50 Hz-es váltakozó feszültségű hálózatban hogyan is halad az energia az erőműből a fogyasztó felé.



5. ábra. Az elektromos- és mágneses térerősségvektorok és a Poynting-vektor egy hagyományos vezetékkel használt áramkörben egy forrás és fogyasztó között. A két vezetékdarab között elektromos teret találunk, ami a mágneses térrel közösen egy jól definiált irányba mutató Poynting-vektort ad, attól függően, hogy hol történik a feszültségesés, azaz hol van a fogyasztó [6]. Hasonló vezetéseket használunk energiatovábbításra is az erőmű és fogyasztók között. Vegyük észre, hogy amennyiben a forráson felcseréljük a polaritást, egyszerre fordul meg az elektromos és a mágneses terek iránya, ezért a Poynting-vektor iránya nem fog változni, azaz az energia továbbra is a forrástól áramlik a fogyasztó felé.

Az 5. ábrán mutatjuk, hogy egy hagyományos vezetékkel tartalmazó áramkörben hogyan néz ki a helyzet a forrás és a fogyasztó között. Az ábrán egy egyenáramú telepet mutatunk. Ez áramot hoz létre a vezetékben. Mivel a fogyasztón feszültségesés van, az áramot vivő odamenő és visszatérő vezetékdarabok nem azonos potenciálon vannak, és emiatt közöttük elektromos térerősséget találunk (fekete nyilak). Ennek van egy enyhén az áram irányába mutató komponense, hiszen a vezetékdarabon is esik feszültség. A vezeték körül mágneses tér jön létre

re a Biot–Savart-törvénynek megfelelően (kék jelölés). E két vektormennyiség alapján az ábrán mutatott módon kialakul a Poynting-vektor (pirossal jelzett nyilak), ami egyértelműen a teleptől a fogyasztó felé mutat. A Poynting-vektor iránya változatlan marad akkor is, ha felcseréljük a telep polaritását.

Némiképp zavaró, hogy a Poynting-vektor miért mutat mindig a teleptől a fogyasztó felé: a látszólagos aszimmetriát onnan kapjuk, hogy hogyan történik a feszültségesés, és ehhez milyen áramirány tartozik. A telep polaritásának felcserélése esetén az elektromos és a mágneses tér együtt vált előjelet, ezért a Poynting-vektor iránya változatlanul a telep felől a fogyasztó irányába mutat. Ez jól szemlélteti, hogy a Poynting-vektor iránya váltakozó áramú esetben is mindig jól meghatározott módon az energia forrásától a fogyasztó felé mutat. Érdekes az a gondolat, hogy az erőművektől a fogyasztók felé haladva az egész világunkat behálózza a Poynting-vektor – természetesen a két vezeték között a legnagyobb ennek az értéke.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy cikkünkben a Poynting-vektor szerepét szemléltettük. Egy konkrét kísérlet elvégzésén keresztül bemutattuk, hogy az energia vagy jelek terjedésénél fontos, hogy milyen vezetéken keresztül is továbbítjuk a jeleket vagy az energiát. Ez jól bemutatja, hogy a Poynting-vektor nemcsak egy fontos segédmennyiség, ami az energiatovábbítás valódi helyét és irányát leírja, hanem segít megérteni az elektromosenergia-továbbítás fizikáját és látszólagos ellentmondásait a diákok számára.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői köszönetet mondanak Halbritter Andrásnak a jelgenerátor biztosításáért, továbbá a Czigány Tibor rektor által kezdeményezett BME Középiskolás TDK programjának. A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a K137852, K142179, TKP2021-EGA-02 és TKP2021-NVA-02 és V4-Japán programok (2019-2.1.7-ERA-NET-2021-00028) révén, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében.

Irodalom

1. Simon F.: Nagyfrekvenciás jelek terjedésének fizikai alapjai. *Fizika Szemle* 2018/7–8. szám, 278. o. és 2018/9. szám, 314. o.
2. <https://www.youtube.com/watch?v=bHIhgXav9LY&t=793s>
3. Veszely Gy.: Áramvezetékhez kapcsolódó felületi töltés és külső villamos tér. *Fizika Szemle* 2008/9. 300. o., <http://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz0809/veszely0809.html>
4. Simonyi Károly, Zombory László: *Elméleti Villamosságtan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (2000) 55. oldal, 1.30 ábra
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly
6. Holics László: *Fizika 1–2.*, Műszaki Könyvkiadó 1992.