

AZ RLC ÁRAMKÖRÖK MŰKÖDÉSÉNEK OSZCILLOSZKÓPSZERŰ SZIMULÁCIÓJA*

Bartos-Elekes István

ADY Endre Líceum, Nagyvárad, Románia; e-mail: beistvan@yahoo.com

Mottó: „Tisztelt Kolléga, arra kérlek, hogy csak a jelenségekre koncentrálj, ne foglalkozzál a Windowsból már nem azonosítható DOS+BP+ASM-alapú rajzeszközökkel!
Fogadd el, hogy az e-mailezhető méretű prezentációmban kizárólag ezek az eszközök tették lehetővé a közel ezer, túléles oszcillogram bemutatását.”

A szokatlan tartalmú mottó után a cím magyarázata következik. Az érthető, hogy egy lapba nem kerülhet élő kísérlet, mert az a szakterembe való (sRLC és pRLC, azaz soros és párhuzamos RLC [01]). Az viszont nehezebben fogadható el, hogy ez a szimuláció miért nem interaktív. Azért, mert a kísérlet nem arról szól, hogy „egy próbát megér”, hanem arról, hogy tudatosan keressük a jelenség belső okait, és ezt csakis a helyes, meggondolt példákkal segíthetjük, az akármilyen értékek csak zavart keltenének! Az interneten számtalan interaktív szimulációt találtam, egyesek bármilyen alkatrésztérteket elfogadnak, mások előre megadják az értékintervallumot, de a hasznosnál jóval kisebbet. Olyannal is találkoztam, ahol a kapcsolásban a legkisebb kondenzátorként a mai legnagyobbnál is nagyobb ajánlanak (a szokásosnál 5-6 nagyságrenddel nagyobb), ráadásul egy ekkora kapacitású kondenzátor kizárólag elektrolitikus lehet, ami a váltóáramban, robban! Igencsak hibás az az elképzelés, hogy vezérlőelv nélkül hagynák a diákat „kísérletezni”. A jelenség működési feltételeinek ismerete nélkül a diák nem ültethető le a drága készülékek mellé; a labor nem a gondtalan játszótér! Az egykori Fizikumiban a diák semmihez sem nyúlhatott, csak ahhoz, aminek megkérdezte, és meg is értette a működési elvét. Ezután együtt építettük fel a kísérleteket, egyesek éveken át dolgoztak velem. Az érdeklődőket bevezettem az assembly programozás rejtelmeibe is.

Néhány szó a prezentáció szerkezetéről

A prezentáció létrehozásakor feltételeztem, hogy az iskolában az élő kísérlet tárgyi feltételei nem állnak rendelkezésre. A prezentációt nem a kísérlet helyett, hanem a táblarajz mellé, de inkább helyette ajánlom. Egy témához csak néhány dia kivetítése szükséges, ezeket helyben, a kétlépcsős tartalomjegyzékkel [02] azonnal kiválaszthatjuk, de előre is el lehet küldeni a diákoknak. Sikert a (szerintem) szép, kontrasztos képekkel teli anyag összességét egy picivel 25 MiB alá szorítanom, így egy gazdag tartalmú, 984 oldalas, e-mailezhető anyag jött létre. A prezentációt hét fejezetre, ezeken belül több kategóriába osztottam. Az egytagú áramkörök három, a kéttagúak a soros és párhuzamos változatok miatt – négy kategóriát képeznek. A háromtagú áramköröknél a rezonancia körüli mérések felbontási finomságára három lehetősé-

get ajánlottam (5, 9, 17 vizsgálati frekvencia), ezért a soros és párhuzamos változatokkal még hat kategória jött létre. A „Háromtagú RLC áramkörök jellegváltása a rezonancia körül” című fejezet egy 112 oldalas ráadás, ott mutatom be a száraznak tartott oszcillogramok hozzáférhető üzeneteinek a felhasználását. Az RLC áramkörök esetében a jellegváltás és a rezonanciaképesség a legfontosabb, ezért oszcillogramokra lebontva mutatom meg a jelenségeket. A „Hátterjelenségek, mérőkapcsolások” című fejezetben mutatom be azokat a megoldásaimat, amelyek lehetővé tették a „mérésekre is alkalmas” oszcillogramok létrejöttét. Végtelen mennyiségű munkám van benne, így örömmel teszem közkinccsé.

Az ajánlott bemutatóban a valamikori kísérlet idején beépített valódi alkatrészek és frekvenciák szerepelnek, ugyanis a kilencvenes években az áramköröket házi-szabványos, dugaszolható kártyákra szereltem, a kártyacserével egy-egy új kísérlet jött létre. A kártyagyűjtő [03] négyféle (A, B, C, D) kártyát fogadott, egyúttal tápfeszültségeket is biztosított. Az egyszerű egyenirányítók áram- és feszültséjeleitől az RLC kísérleteken [04] át az analóg, majd a CNC-tranzisztor-karakterográfia és a külső fényelektromos hatás görbéinek bemutatásáig mindenre használtam. Nem volt jelgenerátorom, ezért 1964-ben egy át-hidalt T-hidas RC generátort terveztem és építettem [05] A soros RLC áramköröket a belső erősítővel, a párhuzamosokat az 1 M Ω -os belsőellenállású kimeneten vezéreltem. Az oszcillogramok egy SVGA monitoron egyenként jelentek meg, így közben magyarázhattam a görbék sietés-késését, az azonos vagy ellentétes fázisát, a csak belülről látható kioltásukat a rezonancián [06]. Az akkori számítógépem „óriásinak” tartott órajele 20 MHz volt, de nemigen síette el a dolgát. Azt ráadásul értékelem, hogy közben jutott idő a gondolkodásra és a magyarázat befogadására is.

Visszatérve a szimuláció bemutatására, arra nagyon vigyáztam, hogy minden kísérletcsoportban jelezzem az alapfolyamatokat. Az E24-es értéksor alapján szokásos értékű alkatrészeket, feszültségeket vagy áramokat használtam. A jelenség komplexitásától függően az egyedi és a kéttagú áramköröknél három, a háromtagú áramköröknél öt, kilenc és tizenhét frekvencián mutattam be a különböző jeleket. A vizsgálati frekvenciák száma azért páratlan, mert a középső érték a legjellemzőbb az áramkörre (lásd lentebb), illetve az a rezonanciafrekvencia.

- Az egy- és kéttagú áramköröknél az alacsony frekvenciák mellé a kísérletező fizikatanárszertárában található,

* Lásd a Fizikai Szemle mellékletét az írás megjelenését követően: <https://fizikaiszemle.elft.hu/mellekletek>. Az érdeklődő Olvasó minden további vonatkozó dokumentumot a szerzőtől kaphat meg. (szerk.)

esetleg könnyen beszerezhető R, L, C alkatrészeket válogattam, a frekvenciákat 1-2-5 lépésben választottam. A kéttagú áramkörök generátorjelének középső frekvenciáját úgy választottam meg, hogy annak negyedperiódusa nagyjából a kétszerese legyen az áramkör időállandójának, azaz az áramkör hasznos munkaterületének.

- A háromtagú RLC áramköröknél az aktuális frekvenciaértékeket a rezonanciafrekvenciától való eltérés százalékos értékével jellemeztem: 0,0% majd a $\pm 0,1\%$ és a $\pm 20\%$ között a szabványos 1-2-5 lépésben összesen 17 vizsgálati frekvencia. N oszcillogram mutatja az illető áramkör viselkedését a három frekvencián vagy a rezonancia körül. Az N értéke az áramkörtagok számától függ. Az egyedi áramkör oszcillogramjaihoz $J = 2$ jel, a kéttagúhoz $J = 4$ jel szükséges, a háromtagú áramköröket pedig, $J = 5$ jellel ábrázoljuk – persze a megfigyelhetőség érdekében nem egyszerre. A léptetés-kor az új jel adataival egyidőben megjelenik annak szinuszcsoportja is; az oszcillogram balfelső sarkában pedig azonos színnel kiíródik a jel neve. *A színek sok pótlólagos információt hordoznak.*

Az RLC áramkörök jeleinek bemutatásához egy J csatornaszámú oszcilloszkóp szükséges. Ezt valamikor úgy oldottam meg, hogy az 1989-ben szabadalmazott PIO (parallel input-output) [07] interfészem kapta az öt A/D (analóg-digitális) konverter által küldött TTL jelsorozatot. Az A/D konverter [08] egy egyszerű impulzusüzemű feszültségstabilizátor volt, amely addig változtatta az általa létrehozott 20 μ s-os TTL jel frekvenciáját, míg nem a bemeneti műveleti erősítő elfogadta a mérendő jel és egy kondenzátorba integrált TTL jelsorozat feszültségének a megadott pontosságú egyenlőségét. Valamikor ennek a TTL jelnek a frekvenciáját mértem a PIO belső, front-felületi ciklusideje alapján [09]. A Pentiumoknál az Intel hozzáférhetővé tette a PC belső, vezérlő kvarcoszcillátora 64 bites, bináris osztójának a kiolvasását [10; az *OpCode* a 4. sorban]. Létrejött egy szinte tökéletes óra, amely gyakorlatilag sohasem telítődik, toronyóraként mindig hozzáférhető, a gép bekapcsolásakor mindig újraindul. A nehezen megépíthető lokális termosztát helyett az atomórához kalibrált, ± 20 ppt (*parts per trillion*) pontosságú jelet a GPSDO [11] szolgáltatotta, ezt etalonként fogadtam el, és bevezettem a mérendő jel mellé a PIO-ba. A kísérlet részletes leírása megjelent a *Fizikai Szemle* 2019/12. számának mellékletében.

Az oszcillogram építkezése

A frekvenciaválasztás után először a vizsgálati frekvenciát is tartalmazó „Alapadatok” jelenik meg, és a már kiszámított adatok alapján egy rövid összefoglalót kapunk az alapadatokhoz tartozó mérésekről. A legfontosabb a generátorjel időben kifejezett sietése-késése az időreferencia-jelhez képest. Ebből következik az áramkör jellege az illető frekvencián.

Az ábrázolás könnyebb olvashatósága érdekében először a jelek neve van kiírva. A jelnevek színe fontos, mert az oszcillogram görbéi is azonos színűek (*a programból*). Az időreferencia-jel az első, hiszen ennek a jelnek a pozitív nullátmenetekor indítatom az oszcilloszkóp idővonalát, így a fázisa természetesen $\varphi_{REF} = 0^\circ$. Másodikként a jelgenerátor-színű amplitúdója és az időreferencia-hoz mért fázisa jelenik meg. Ezután következik a többi jel kiírása, mindegyik két lépésben, így a J számú görbét $2J$ lépésben írjuk ki. A szinuszosokat egy Lissajous-ellipszis követi, ez az $N = 2J + 1$ -edik oszcillogram [12]. Az abszcisszatengelyre mindig az időreferencia-jel kerül, hiszen ez a szabadváltozó, az egyetlen idő, amit a triggerjel révén igen pontosan ismerünk (*kalibrált idővonalunk van*). Az ordinátatengelyre a függőváltozó, a jelgenerátor jele kerül. Bár a jelgenerátor adja a jelet, az tűnik a szabadváltozónak, de a triggerjel az úr, nála van az időorigó, mindent onnan kiindulva mérünk. Az egyenestől degradálódott ellipszis adja a legpontosabb rezonanciafrekvenciát.

A Lissajous-ellipszis megszerkesztése [13] igen nehéz. Ott van egy függőváltozó-színnel kiírt *Start*, ami mutatja a függő változó induláskori értékét és időbeni változásának irányát (*az ellipszis körbejárása egy periódus alatt*). Az ellipszis a *Start* időpontjában az ordinátatengely ellipszismetszete (a generátorjel értéke a triggerjel időpontjában) megadja az időreferencia-jelhez képesti generátorjel-késést (*negatív ordinátaérték*) vagy sietést (*pozitív ordinátaérték*). Az időkülönbségből meghatározható az áramkör jellege, az abszcisszától való távolsága pedig, a jelleg „erősségét” mutatja meg. Az ellipszis mellett látható számításaim grafikai ellenőrzése igen gyenge eredményt mutatna, ugyanis a rajz látható kis felbontása erre nem felel meg. A függvény előjelét a *Start* pont ordinátájának előjele adja meg. Az oszcillogramon látható távolságok számértékeit a generáló program analitikus mértannal számította ki legalább hat-hét számjegyes pontossággal. *Minden számjegypontosságot egy-egy globális változóban tároltam, így könnyen változtathattam a kiírások szerkezetét.* A program mindenütt kiírja a nyolc, meghatározott számértékből létrejött, a felhasználó által is érthető kísérleti eredményt és az áramkör jellegét. *Ennek a programozása volt a leghéhezebb, angolul nem mertem vállalni.*

Kevésbé ismert fogalmak a prezentációban

A következőkben meg kell határozunk az RLC kísérlet alkatrészeit és a jelgenerátorok alaptulajdonságait, hogy azután számokkal is jellemezhesük őket. Mi kizárólag nem ideális alkatrészekkel építhetjük meg a kísérleti kapcsolást, ezért meg kell fogalmaznunk az elvárásokat. A prezentációt úgy szerkesztettem meg, mintha az egy valódi, élő kísérlet lenne (valójában az is volt három évtizeddel ezelőtt). Az egyes rész-kísérletekben a számítások helyesége érdekében megadtam az alkatrészek és a jelgenerátor paramétereit. Az „Alapadatok” beírásánál jutott eszembe, hogy a jelgenerátornak – a szinuszos frekvenciája mellett

a feszültséggenerátor vagy az áramgenerátor tulajdonságaival kell rendelkeznie. Adatként csak akkor írhatom ki, hogy a generátorjel $E_0 = 180 \text{ mV}$ vagy $I_0 = 150 \mu\text{A}$ állandó, ha a terhelés változása miatt az E_0 vagy az I_0 értéke nem változik, más szóval a jelgenerátor egy *feszültséggenerátor*, illetve egy *áramgenerátor*.

Feszültséggenerátor. Egy olyan ideális energiaforrás, amelynek nincs belsőellenállása, így végtelen teljesítményt is szolgáltathat(-na). Ilyen nincs, de a gyakorlatban jól megközelíthető, ha az energiaforrás belsőellenállása több nagyságrenddel is kisebb a fogyasztó ellenállásánál. Az iskolai kísérleteknél egy hangerősítő sokat csökkentheti a jelgenerátor belsőellenállását. Az igazi megoldás a váltóáramú feszültségstabilizátor, ennek belsőellenállása szinte zérus. A kapcsolat a vezérlő jelgenerátor leosztott E_C feszültségének és a leosztott U_{out} kimeneti feszültségnek az egyenlőségét negatív visszacsatolással kényszeríti ki, vagyis a változó terhelés nem befolyásolja a kimenő feszültséget, azaz a belsőellenállás szinte zérus.

Áramgenerátor. Egy olyan ideális energiaforrás, amelynek végtelenül nagy a belsőellenállása, és egyúttal a forrásfeszültsége is, a szolgáltatott áram pedig ennek a kettőnek a hányadosa. Ilyen nincs, de a gyakorlatban jól megközelíthető, ha az energiaforrás belsőellenállása több nagyságrenddel nagyobb a fogyasztó ellenállásánál. Ez alig valósítható meg, ezért olyan eszközöket alkalmaznak, ahol a kimeneti áramot nem a terhelő ellenállás, hanem valamilyen más paraméterezhető jelenség (a *szinuszos bázisárammal vezérelt tranzisztor kollektorárama*) határozza meg. Az iskolai kísérleteknél elfogadható megoldás a nagy kimeneti feszültségű ($\geq 20 \text{ V}_{\text{pp}}$) jelgenerátor „majdnem áramgenerátorra” alakítása egy jóval száz $k\Omega$ feletti ellenállással. Ez olyan, mintha az már a jelgenerátor belsőellenállása lenne. Az igazi megoldás a váltóáramú áramstabilizátor, ennek belsőellenállása szinte végtelen. A kapcsolat a vezérlő jelgenerátor leosztott E_C feszültségének és a kimeneti áramfigyelő ellenálláson megjelenő feszültségnek az egyenlőségét negatív visszacsatolással kényszeríti ki, vagyis a terhelés nem befolyásolhatja a kimeneti áramot, azaz a belsőellenállás szinte végtelenül nagy.

A szimulációnál elég volt az E_0 vagy az I_0 állandóságának a kijelentése, és azzal számítottam ki a jellemzőket. Az élő RLC kísérletnél az r_1 belsőellenállás befolyásolja a rezonancia élességét! Az sRLC-nél az r_1 legyen kicsi, a pRLC-nél pedig nagy!

R, L, C elemek. Ideális alkatrészek, amelyek csak a saját tulajdonságukkal rendelkeznek: az egyébként tekercselt ellenállásnak nincs induktivitása, az induktivitásnak pedig nincs ellenállása, sem a menetek közötti kapacitása. A kondenzátor dielektrikuma tökéletes, az ellenállása végtelen, a feltekert fóliának nincs induktivitása. Egy-egy valódi alkatrész esetében ezen elemi alkatrészekből „összeszerakott” egyenértékű kapcsolással helyettesítjük a valódi alkatrész elképzelt szerkezetét. Ki gondolná, hogy az egyszerű oszcilloszkópok bemeneti feszültségosztóiban éppen a „bajt okozó” pótkondenzátorok okos megnövelésével ($R_1 C_1 = R_2 C_2$) hátrították el a jelek durva torzítását?

Az így kialakított RC osztók csak körülbelül tíz MHz-ig használhatóak, a nagyobb frekvenciáknál újabb, pici kondenzátorok és néhánymenetes „tekercek” hozzák létre a majdnem tökéletes kompenzációt.

Létrehozható kombinációk. A bemutatóban ezeket az elemeket egyenként vizsgáljuk, majd kettesével (az LC csak a krétafizikában létezik) vagy hármasával sorba, esetleg párhuzamosan kötjük, és a viselkedésüket figyeljük. A gerjesztés során az egyszerű és a soros kapcsolatokat egy feszültséggenerátorra, a párhuzamos kapcsolatokat egy áramgenerátorra kötjük, és a kialakult feszültségeket az oszcilloszkóp bemeneteihez csatlakoztatjuk. Az áramkör jellegét (kapacitív, rezisztív, induktív) a rákapcsolt váltófeszültség és a felvett áram fázisviszonya adja meg. Az egyedi és a kéttagú kapcsolásoknál a reaktív elem (L, C) jellege a meghatározó, más nem is lehet, de a kéttagúak „jellegességét” a kialakult sietési-késési idő határozza meg. A jelleg akkor „erős”, ha ennek az időnek az abszolút értéke közel áll gerjesztő jel negyedperiódusához. A jelenség fordítottja az, amikor ez az idő a negyedperiódusnak csak alig néhány százaléka, ilyenkor az áramkör jellegét az ellenállás határozza meg.

A háromtagú kapcsolások jellegmeghatározási elve ugyanaz, de a referencijelhez való sietés-késés erősen változik a frekvenciával, és magát a jellegét is meghatározza. Ha a dipólusként elképzelt (soros vagy párhuzamos, esetleg hibrid) RLC áramkör által felvett áram késik a pólusokon megjelent feszültséghez képest, akkor az áramkör (a szerkezetétől függetlenül) induktív jellegű, ellenkező esetben pedig kapacitív jellegű. Amikor az áramkör által felvett áram fázisban van az RLC kombinációra kapcsolt jellel, akkor az áramkör rezisztív jellegű és rezonanciáról beszélünk. Ekkor a jellegmeghatározó belső feszültségek (sRLC) vagy áramok (pRLC) azonos nagyságúak és ellentétes fázisúak, vagyis kívülről nézve kioltják egymást, és a jelgenerátor megmaradt feszültsége vagy árama az áramkör ellenállásán jelenik meg [14]. Kívülről csak a létrejött extrém értéket láthatjuk: a felvett áram rezonanciája az sRLC-nél, és az áramkörön megjelent feszültségrezonancia a pRLC-nél. Ez a két jelenség az elektronikai eszközök és mérések legfontosabb jelensége, ezért erre nagyobb hangsúlyt fektetve, külön kísérleti fejezetben tárgyaltam (*Háromtagú RLC áramkörök jellegváltása a rezonancia körül*).

Akarattal hagytam ki az oszcilloszkópos árammérés elvét, ugyanis a normál oszcilloszkópok nem alkalmasak az RLC áramkörök bemutatott méréseinek az elvégzésére. Az elv és a meghökkenítő megoldásokat is tartalmazó mérési kapcsolat az elvi magyarázattal együtt a mellékletekre ajánlott pdf-ben van. Az oszcilloszkópok csak feszültségeket képesek érzékelni, ezért áramfigyelő ellenállásokat helyezünk el, és visszaszámoljuk az ott folyó áramot. Ez egyszerűnek tűnik, de az oszcilloszkópok bemenetei közös nullponton rendelkeznek, így az áram- és a feszültségjel nem választható szét, de egy kapcsolással szétválasztottam őket, lásd az [RLC Signals Collection.pdf](#) prezentációt! A komplexebb digitális oszcilloszkópok bemenetei szigetelten is készülnek.

Egyes gyártók a drágább változatokhoz kalibrált áram-söntöket is adnak.

Virtuális oszcilloszkóp. Csak a szimulációnak állítottam meg! A szabványos, 10×8 -as képernyőjű oszcilloszkóp idővonalának indítása és az X bemenete megfelel egy közepes kategóriájú analóg oszcilloszkópénak. Az Y öt BNC bemenete közül csak kettő szigetelt, $1 \text{ M}\Omega$ -os, 10 MHz -ig kompenzált, saját osztóik vannak. Az X, Y csatornák érzékenysége a jelek nagysága függvényében 1-2-5 lépésben, automatikusan állítódik, a beállításokat mindig kijelezzük. *Velem történt meg, hogy a 961-es és a 962-es kép váltásakor az I_L amplitúdója fizikailag csökkent, de a 962-es képen az I_L szinusza jóval nagyobb lett [15].* Átvizsgáltam a programot, de a „hiba” az automatikus érzékenységváltásban volt, ugyanis nem vettem észre, hogy az addigi két, egyenlő érzékenység a $0,5 \text{ mA/div}$ és a $0,5 \text{ mA/div}$ a váltáskor $0,2 \text{ mA/div}$ és $0,5 \text{ mA/div}$ lett.

LH Trigger. Pozitív frontú (Low-High) nullátmeneti jel, ez indítja el az oszcilloszkóp idővonalát. A felhasználandó feladata a jel forrásának a kiválasztása, majd az indítási front és az indítási szint beállítása. A kiválasztás kizárólag olyan jelre eshet, amely globálisan határozza meg jelenséget, és zavarkeltés nélkül hozzáférhető! A nullátmenet szintjét egy kicsi háromszög jelzi az Y csatorna függőleges nullvonalánál. Mindig az időreferencia-jelből származtatjuk, így megfigyelhetjük a többi jelnek az időreferencia-jelhez mért sietését-késését. Az egyszerű áramkörnél a referencia a feszültséggenerátor nullátmeneti LH frontja, a soros kapcsolásoknál feszültséggenerátor a gerjesztő, az áram közös, ezért ez a referencia. A párhuzamos kapcsolásoknál az áramgenerátor gerjeszt, de az áramkörön kialakult feszültség a közös, így az a referencia.

A prezentáció tartalomjegyzéke

A kétlépcsős tartalomjegyzék a majdnem ezer oszcillogramból szinte azonnal kiválasztja a célnak megfelelőt. Ez nem egy „hosszas diasor”! A fejezetek a fent említett R, L, C lehetséges kombinációira vonatkoznak, az egyedi (onlyR, onlyL, onlyC) elemeken kívül vannak kéttagú kategóriák: az sRL és a pRL, az sRC és a pRC, az LC csak a krétafizikában létezik.

A prezentáció a háromtagú sRLC és a pRLC kapcsolásokat bővebben tárgyalja. A prezentáció 984 számozott oldalból áll, de az egy fogalomkörbe (mindenféle soros vagy párhuzamos kombináció) tartozó oszcillogramokat a jobb alsó sarokban a generáló program vastag, fehér számokkal sorszámozza. A kiválasztott frekvencia az első, majd jön az időreferencia-jel értéke, ezután a feszültségek vagy az áramok. Az RLC áramkörök vizsgálatát a jelenségek gazdagsága miatt három részre osztottam. A rezonanciafrekvencia körüli eltérést 1-2-5 lépésű, %-ban kifejezett 17 frekvencián mértem. Az ötfrekvenciás (sRLC05, pRLC05) változatban csak a rezonancia körüli két-két frekvenciát, a kilencfrekvenciásnál (sRLC09, pRLC09) a $\pm 20\%$ között minden másodikat, míg a tizenhét frekvenciás (sRLC17, pRLC17) változatnál mind a tizenhetet

megtartottam. Ennyi méréssel már rezonanciagörbét és fázismenetet is lehet rajzolni – ezeket láthatjuk az sRLC és pRLC diasoron [16]. Az oszcilloszkóp természetesen ábrázolja az időpontokat, ezért nem az időkülönbségből kiszámított szögeltérést, hanem a frekvenciatolás függvényében a magát az időtolást is ábrázoltam. Ekkor az „S görbe” jól ismert formája igencsak megtréfált! Nem az eddigi szimmetrikus formát hiányoltam, az aszimmetriát is „megbocsátottam”, de azt nehezen nyeltem le, hogy a Δt S görbéje a pozitív Δt értékek vége felé csökkent (lásd a megjegyzéseimet).

Összefoglaló helyett két ajánlat és néhány „nem értem”

A prezentációban található 960 + 6 oszcillogram az RLC áramkörökkel kapcsolatos jelenségek gazdag tárháza. Nem a kísérletek helyett, hanem azok előkészítését segítő, a táblarajzok mellé (inkább helyettük) ajánlom. *Második ajánlat:* a prezentációból számtalan képet lehet kiemelni, és belőlük új elképzelésben minidemókat készíteni, ezekkel egyénivé tehetik a fizikaórát. *A megalapozott, szakmailag helyes bírálatokat szívesen veszem, és ha elfogadhatónak tartom, átírom a prezentációt is. A rajzeszközöim a Windows alól nem azonosíthatóak, ezért csak a tűéles képeket csodáljátok!*

A szövegben található linkek által mutatott illusztrációk bővebb, néhány képpel és gondolattal kiegészített összefoglalója ([RLCSignals Képgyűjtemény.pdf](#)) külön is meghívható. A 47 képből felvillantom, esetleg magyarázom is azokat a saját tervezésű készülékeket, amelyek közvetlenül vagy közvetve segítettek az oszcillogramok létrehozásában.

*Nem értem, hogy az sRLC két ellentétes fázisú belső reaktív feszültségének kioltását miért neveznék csak egy feszültségrezonanciának! Azt sem értem, hogy miért neveznék a pRLC belsejében létrejött két ellentétes fázisú belső reaktív áram kioltását csak egy áramrezonanciának. Nem lenne elég a kívülről látható (sRLC) áram- és (pRLC) feszültségrezonancia? Szerintem a rezonancia a hozzáférhető jel legnagyobb értékét, és nem két belső jel kioltását jelenti. A Tacoma-hídnál és a hintánál is (tanárként és nagyapaként) csak az egyre nagyobb kilengést (rezonanciát) látom. Erre még ráteszem a hat-hét évtizedes elektronikai konstrukcióimat, az abból szerzett tapasztalataimat, és maradok az sRLC áramkör által felvett áram, meg a pRLC áramkörön megjelenő feszültség rezonanciájánál. **Másként is érvelek:** a XX. század rádió- és TV-technikája, az NMR ma is, a feszültségrezonanciás párhuzamos RLC-ről szól, de fontos szerepet kapott a hullámcsapdaként működő soros, áramrezonanciás RLC is.*

Lenzcel érvelve, nem hiszek a „nyugalmi” elektromágneses indukcióban sem. Az elektromágneses indukció kizárólag kölcsönhatáskor (energiacsere) jöhet létre, és a munkavégzést követelő ellenszegülés legyőzéséből keletkezik. „Nyugalomról” szó sem lehet, az félrevezeti a diákot!

Kísérletező típusú tanár lévén, én csak a kísérleti tapasztalataimból merek kiindulni!