



Budapesti Műszaki Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Finommechanikai Optikai Tanszék

Műszaki rendszerek automatizált frekvencia-átviteli mérései

Készítette:
Samu Krisztián

Budapest , 1999.

1. Bevezető

A mai gépészetben mind nagyobb szerepet tölt be a rendszertechnika. Ez nem véletlen, hisz a biztonságos és pontos tervezés elengedhetetlen. A tervezés folyamán sokszor találkozunk mechanikai, és egyre gyakrabban villamos rendszerekkel is. Ezeknek a vizsgálatához és a helyes alkalmazásukhoz nyújtanak segítséget a rendszertechnikai módszerek és elméletek.

Az említett tudományágból a gépész számára a legfontosabb és legalkalmazhatóbb módszerek: a modellezés és a rendszerek analízise. Természetes igény, hogy kíváncsiak vagyunk az általunk tervezett szerkezet viselkedésére és esetleg modellezni is kívánjuk azt, hogy azután vizsgálatokat végezzünk a tökéletesítés céljából.

A rendszertechnika kelléktárának alapjai közé tartozik a rendszerek frekvenciaanalízise, aminek a dinamikus elemzéseknél van jelentősége. A másik fontos módszer a rendszermodellezés, ami a fizikai törvényszerűségek és bizonyos egyszerűsítések, közelítések segítségével próbálja meg a vizsgált rendszert matematikailag leírni. A mi esetünkben a legfontosabb a mechanikai rendszerek modellezése és vizsgálata, azonban ne feledjük a gépészetben is mind jobban tért hódító villamos rendszereket. Emellett fontos szempont, hogy a mechanikai modellezés sokkal egyszerűbb analóg villamos rendszeren történő vizsgálattal.

A fentieknek megfelelően egy villamos rendszerek frekvenciaanalízisét vizsgáló rendszert dolgoztam ki, ami kiegészül egy matematikai ellenőrzési lehetőséggel is.

2. Elméleti alapok

A gépészetben előforduló rendszerek általában mechanikai rendszereket tartalmaznak. A modellezés feladata általában valamilyen mozgó, forgó vagy rezgő alkatrész vizsgálata. Amire kíváncsiak vagyunk: az elmozdulás, szögelfordulás, erő vagy nyomaték lehet. Ezeket a mennyiségeket tekinthetjük a modellezés és a vizsgálat kimenetének. Mivel az előbbi mennyiségek valamilyen módon létrejöttek, ezért léteznie kell egy kiváltó fizikai eseménynek is. Ez a gerjesztés, amit a rendszer bemenetének tekintünk. A rendszer tehát felfogható mint egy doboz, ami egy tetszőleges bemenetből, a rendszerre karakterisztikus doboznak megfelelő kimenetet ad ki.



1. ábra

A cél tehát egy olyan matematikai egyenlet leírása ami megfelel a fizikai rendszerünk viselkedésének. A rendszertechnikában ezért egy olyan matematikai összefüggést keresünk, amelyet a kimeneti és a bemeneti jel hányadosaként értelmezünk, és így a bemenetet ismerve bármikor meghatározható a számunkra fontos kimeneti jellemző.

Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban egy egyszerű mechanikai rendszer vizsgálatával mutatom be a rendszerek modellezését és vizsgálatát.

2.1 Mechanikai rendszerek analízise

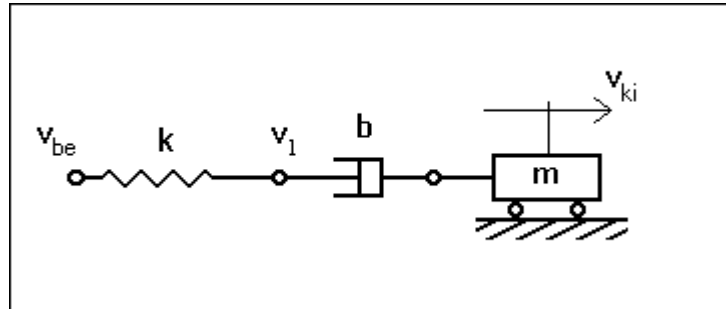
A mechanikai modellezés során a rendelkezésre álló rendszert, három rendszerelem segítségével jelenítjük meg, ezek az:

- ideális rugó
- ideális csillapítás
- tömeg

Tekintsük a 2. ábrán látható mechanika rendszert ahol:

Bemenet: a rugó szabad végének a sebessége

Kimenet: a tömeg sebessége

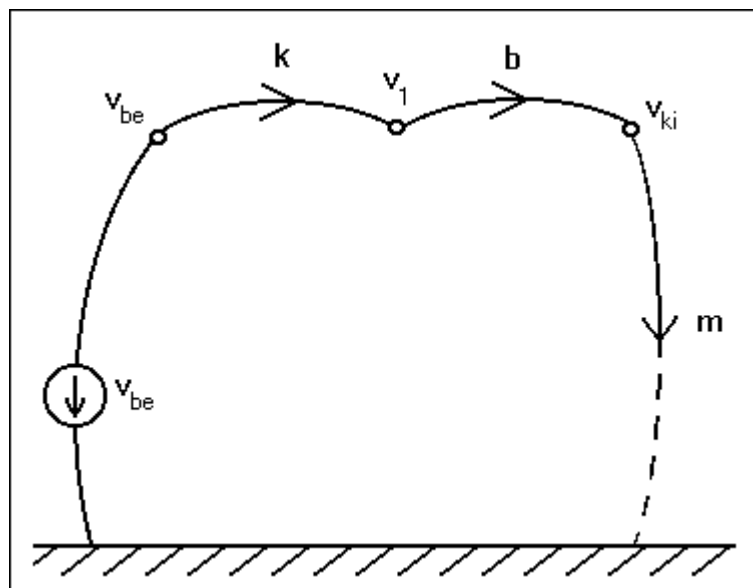


2. ábra

A matematikai egyenlet(ek) felírása több módszerrel történhet: struktúragráf modell, blokk diagram módszer, impedancia módszer stb. Mivel nem feladatom ezek részletes bemutatása, így a struktúra gráfos megoldást választom (3. ábra).

E módszer szintén az előbbi rendszer elemeket tartalmazza. A csomópontok a kereszt változókat (mechanikában: v [m/s], ω [rad/s]) ábrázolják, a pontokat összekötő vonalak pedig az átmenő változókat (F [N], M [Nm]). Külön kell ábrázolni a forrást (gerjesztést), ami szintén lehet átmenő illetve kereszt típusú. Szerepelhet a gráfban átalakítás is, ami eltérő típusú és eltérő fizikai rendszerek közt teremt kapcsolatot.

A fenti rendszer struktúragráfja:



3. ábra

A struktúragráf segítségével már egyszerűbben felírható a rendszer matematikai megfeleltetése, ami differenciálegyenlet formájában lesz kifejezhető. Az ismert mechanikai törvényszerűségek (1), és a villamosságtanból ismert csomóponti törvény ($\Sigma F_{be} = \Sigma F_{ki}$) segítségével felírható a kimenetet és a bemenetet is tartalmazó differenciálegyenlet (2). Ha az átmenő változók segítségével szeretnénk a differenciál egyenletünket felírni, akkor a huroktörvényt ($\Sigma v=0$) kéne alkalmaznunk.

A rugó összefüggései: $F = k \int \Delta v \, dt$

A csillapításra érvényes: $F = b \Delta v$ (1)

A tömegre felírható: $F = m \frac{\Delta v}{dt}$

A csomóponti törvény kapcsolatot teremt a csomópontba be és az onnan kifolyó átmenő mennyiségek között, esetünkben: $\Sigma F_{be} = \Sigma F_{ki}$. A rendszer leírásához, a v_1 és a v_{ki} független csomópontokra szükséges felírni az egyenleteket:

$$\begin{aligned}
 -k \int (v_{be} - v_1) dt + b(v_1 - v_{ki}) &= 0 \\
 -b(v_1 - v_{ki}) + m \frac{v_{ki}}{dt} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Az előbbieken említettem, hogy a célunk egy olyan matematikai összefüggés meghatározása, ami a bemeneti jelből előállítja a kimeneti jelet. Ezt az összefüggést nevezzük átviteli függvénynek. Az átviteli függvény felírásához a fenti egyenleteket azonban Laplace-transzformálnunk (3) kell. Ezzel a differenciálegyenletek könnyebben kezelhetővé válnak, és összevonás majd rendezés után közvetlenül felírható az átviteli függvény (4), ami a kimeneti és a bemeneti jel hányadosa, de többé már nem idő-, hanem operátortartományban.

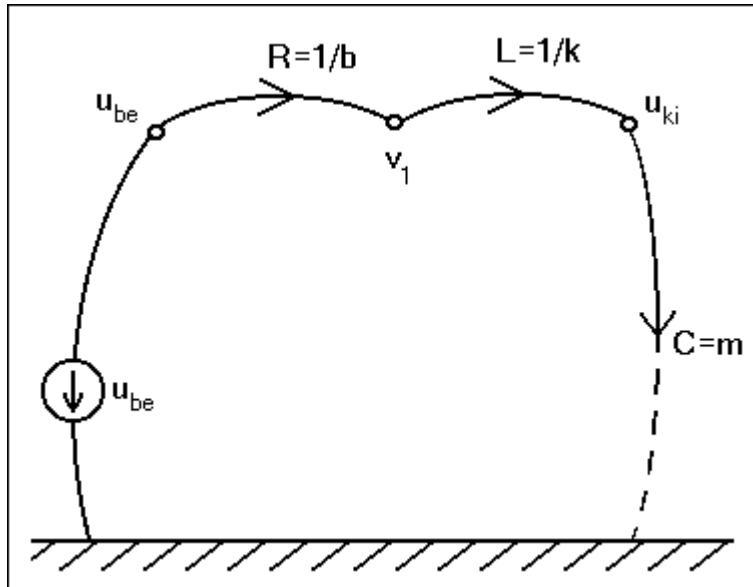
$$\begin{aligned}
 -k \frac{1}{s} (v_{be}(s) - v_1(s)) + b(v_1(s) - v_{ki}(s)) &= 0 \\
 -b(v_1(s) - v_{ki}(s)) + m s v_{ki}(s) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Az átviteli függvény:

$$Y(s) = \frac{v_{ki}(s)}{v_{be}(s)} = \frac{1}{\frac{m}{k} s^2 + \frac{m}{b} s + 1}
 \tag{4}$$

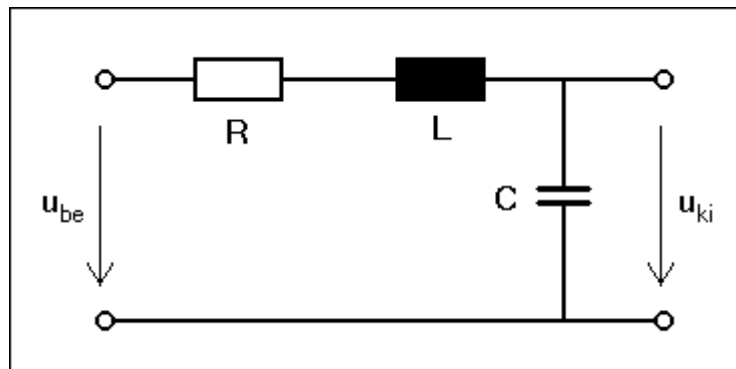
2.2 Villamos rendszer analízise

Az előző mechanikai rendszer fizikai analógia alapján átalakítható villamos rendszerré is, a következő egyenlőségek felhasználásával: $R \leftrightarrow 1/b$; $L \leftrightarrow 1/k$; $C \leftrightarrow m$. Természetesen a módszer más rendszerek esetén is felhasználható. A rendszer elemek cseréjével megváltoztak a ki és bemeneti sebesség dimenziójú keresztváltozóink is, a teljes analógia által megfeleltetett feszültség dimenzióra. Az átmenő változóra érvényes analógia pedig: $F \leftrightarrow I$. Ezek után a villamos rendszerünk struktúragráf segítségével a következőképp ábrázolható:



4. ábra

A felhasznált analógia lehetőséget nyújt számunkra, hogy a viszonylag nehézkesen elemezhető mechanikai rendszereket villamos úton vizsgáljuk. Így jutunk egy jóval egyszerűbben kezelhető és kényelmesebb módszerhez. Az átalakítás után a villamos rendszer struktúragráfja, vagy maga a mechanikai rendszer alapján is felállítható a villamos kapcsolási rajz:



5. ábra

Elvárásaink szerint a villamos rendszerünk átviteli függvényének is meg kell egyeznie a mechanikai szerkezetünk átviteli függvényével. A struktúragráfból - az előzőekben bemutatott módon - itt is meghatározhatók a jellemző differenciálegyenletek ezek után pedig a keresett átviteli függvény, azonban a villamos kapcsolat ismeretének birtokában is könnyen meghatározható az átviteli függvényünk.

Ha a villamos rendszert, mint impedanciahálózatot frekvenciaterben vizsgáljuk, akkor egyszerűen meghatározható a ki és bemeneti feszültségek viszonya. Az így megkapott egyenlet pedig nem más mint az frekvencia függvény:

$$\frac{u_{ki}(j\omega)}{u_{be}(j\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L} = \frac{1}{(j\omega)^2 LC + (j\omega)RC + 1} = Y(j\omega) \quad (5)$$

Az operátortérbe való áttérés így az átviteli függvény felírása most már egyszerű hiszen az s operátorra érvényes hogy, $s=j\omega$. Láthatjuk hogy a fenti függvény a megfelelő transzformációk után megegyezik a mechanikai rendszer átviteli függvényével.

2.3 A rendszerek vizsgálata frekvenciatartományban

Műszaki problémák esetén, jellemző az állapotváltozóink periodikus ingadozása. Célszerűnek mutatkozik, tehát a bemeneti változóink periodikus jellel való helyettesítése, és az ennek megfelelően a kimenet vizsgálata. Periodikus gerjesztés esetén a gerjesztőfüggvény:

$$\mathbf{x}_{be}(t) = \mathbf{X}_{be0} e^{j\omega t} \quad (6)$$

A gerjesztést a válasz fáziskéséssel követi megváltozott amplitúdó mellett:

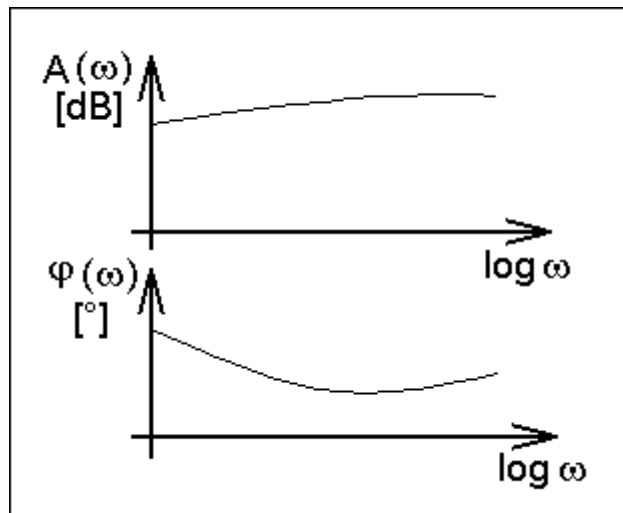
$$\mathbf{x}_{ki}(t) = \mathbf{X}_{ki0}(\omega) e^{j(\omega t + \varphi(\omega))} \quad (7)$$

Most már felírható a frekvencia függvény, ami a ki és bemenő jel hányadosa:

$$Y(j\omega) = \frac{\mathbf{X}_{ki0}(\omega) e^{j(\omega t + \varphi(\omega))}}{\mathbf{X}_{be0} e^{j\omega t}} = \frac{\mathbf{X}_{ki0}(\omega)}{\mathbf{X}_{be0}} e^{j\varphi(\omega)} \quad (8)$$

Láthatjuk, hogy a lineáris rendszereket, jellemezhetjük az adott periodikus jelre adott válasz amplitúdójával és fázistolásával. Ezt kihasználva rajzolhatjuk fel a Bode-diagramot.

A Bode-diagram (6. ábra) az általunk vizsgált rendszer egy fajta karakterisztikája. Információt szolgáltat a számunkra a rendszer viselkedéséről egy vizsgálati frekvenciatartományon belül.



6. ábra

Ezen tartományon külön $A(\omega)$ függvény ábrázolja az amplitúdó viszonyt, és külön $\varphi(\omega)$ diagram ábrázolja a fázistolást. Mivel a vizsgált frekvenciatartomány több nagyságrendű is lehet, ezért logaritmikus frekvencialéptékű diagramot használunk.

Elterjedt az amplitúdóviszony decibel mértékegységben való megjelenítése. A fázisszöget pedig fokban vesszük fel a diagramba.

Az előző megfontolások után, a frekvenciafüggvényben kapott amplitúdóviszony a következő módon kerül bele a Bode-diagram első grafikonjába:

$$\begin{aligned} A(j\omega)[dB] &= |Y(j\omega)| [dB] = \sqrt{(\operatorname{Re} Y(j\omega))^2 + (\operatorname{Im} Y(j\omega))^2} [dB] = \\ &= 20 \log \sqrt{(\operatorname{Re} Y(j\omega))^2 + (\operatorname{Im} Y(j\omega))^2} \end{aligned} \quad (9)$$

A fázistolás ábrázolása másik diagramban történik:

$$\varphi(\omega)[^\circ] = \arctg \frac{\operatorname{Im} Y(j\omega)}{\operatorname{Re} Y(j\omega)} \quad (10)$$

Az (9) és (10) összefüggések, és az analitikus módon kiszámított átviteli függvények segítségével tehát ábrázolható a Bode-diagram, és ezáltal a vizsgált rendszer frekvenciamenetének birtokába jutunk.

3. A frekvenciamenet meghatározásának módszerei

A mérnöki tervezés során, ha periodikus mechanikai igénybevétel, vagy mozgás jellemzi a szerkezetet, rendszert, vagy annak egy részét, szükséges a rendszer különböző frekvenciákon való viselkedését is megvizsgálnunk. A szerkezet működése szempontjából fontos állapothatározók, az egyes frekvencia tartományokon az elvárásoktól eltérő értékeket is felvehetnek, és ebben rejlik a Bode-diagram ismeretének fontossága. Méréssel a frekvenciamenetet az eredeti szerkezeten igen összetett és költséges feladat volna meghatározni, így egyszerűsítésekre van szükségünk. A bemutatott modellalkotási és matematikai módszerek alkalmazásával azonban analitikusan is meghatározhatjuk a gépészeti rendszer frekvenciafüggését.

3.1 Frekvenciamenet meghatározás mechanikai rendszereknél

Miután megalkottuk a gépészeti alkalmazás mechanikai modelljét, ebből az ismert módszerek egyikével előállítjuk a megfelelő differenciálegyenleteket, és az átviteli függvényt. Az átviteli függvény ismeretében a frekvenciamenet meghatározását analitikus módon is elvégezhetjük

A frekvenciafüggvény valós és képzetes részének a meghatározása az első lépés. A második lépésben a számunkra fontos frekvenciatartományokban és azok környezetéből választunk diszkrét körfrekvenciaértékeket. Ezeket az értékeket behelyettesítjük a frekvenciafüggvény valós illetve képzetes részébe, és a kapott értékeket felhasználjuk az (9) és (10) összefüggések kiszámítására. Ezt több körfrekvenciaértékre elvégezve fel is rajzolhatjuk a Bode-diagramot.

A fenti módszernek két fogyatékossága is van. Egyrészt, nem minden körfrekvenciaértéknél ismerjük biztosan az amplitúdó és a fázisértékeket, csak a görbe jellegét. Ez a probléma azonban számítógépes programmal kiküszöbölhető, hisz így több ezer pontra számíthatók az iménti értékek.

A másik nehézség már jelentősebb. Igen bonyolult rendszereknél már a modellalkotás és az átmeneti (vagy frekvencia) függvény létrehozása is igen összetett feladat. A frekvenciamenet meghatározás azonban ennél több, bonyolult számítást igényel. Gondoljunk csak mennyi számolást igényel, egy a nevezőjében másodfokútól nagyobb kitevőjű frekvenciafüggvény, valós és képzetes részének kiszámítása, ami a nevező racionalizálásával jár.

Az általam jónak látott módszer az, ha a mechanika rendszerünket átalakítjuk az előzőekben bemutatott módon villamos rendszerré, és mivel teljes az analógia azon végezzük el a frekvenciavizsgálatot. Feltehetjük a kérdést miért egyszerűbb a villamos rendszernél meghatározni a frekvenciamenetet? A kérdésre a válasz az, hogy eltérően a mechanikai rendszerektől, a villamos rendszer frekvenciamenete mérésrel, gyakorlati úton is meghatározható.

3.2 Villamos rendszer frekvenciamenete

Első teendőnk a mechanikai elemekből felépített modellünk átalakítása impedanciahálózattá. Ettől a ponttól két módon juthatunk el a Bode-diagramig:

- Felrajzolhatjuk a struktúragráfot és innen a frekvenciafüggvényt. De közvetlenül az impedanciákból (5) is felírható az átviteli függvény, majd a frekvenciafüggvény.
- Megépítjük a villamos kapcsolást és méréssel határozzuk meg a frekvenciamenetet.

Én a második módszert próbáltam megvalósítani, így a továbbiakban ezt a módszert próbálom kifejteni.

3.3 Villamos hálózat frekvenciamenetének a meghatározása méréssel

Az 5. ábrán látható kapcsolás alapján felírt (5) frekvenciafüggvény alapján:

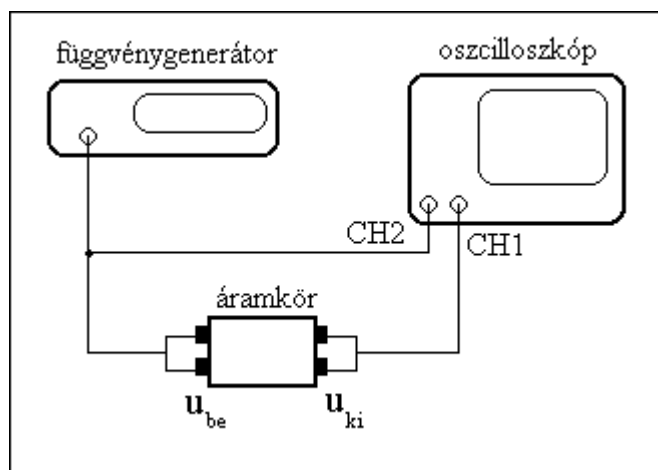
$$\frac{u_{ki}(j\omega)}{u_{be}(j\omega)} = Y(j\omega) \quad (11)$$

Ha u_{be} , egy a (6) kifejezésben szereplő u_{be0} amplitúdójú és ω körfrekvenciájú szinuszos feszültség, akkor az u_{ki} jel egy azonos körfrekvenciájú de φ szöggel késő u_{ki0} amplitúdójú szinuszos feszültséggel egyenlő. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy a megépített kapcsolásra ismert amplitúdójú szinuszos gerjesztést kapcsolva meg kell mérni az u_{ki} kapcsokon mérhető jel amplitúdóját és fáziskésését. Ezek ismeretében meghatározható egy pontra (az adott ω körfrekvenciára) az amplitúdó és a fáziskésés is:

$$A(\omega) = \frac{u_{ki0}(\omega)}{u_{be0}} \quad (12)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_{ki}(\omega) - \varphi_{be}(\omega) \quad (13)$$

3.4 Az amplitúdó és fázis mérésének gyakorlati megvalósítása



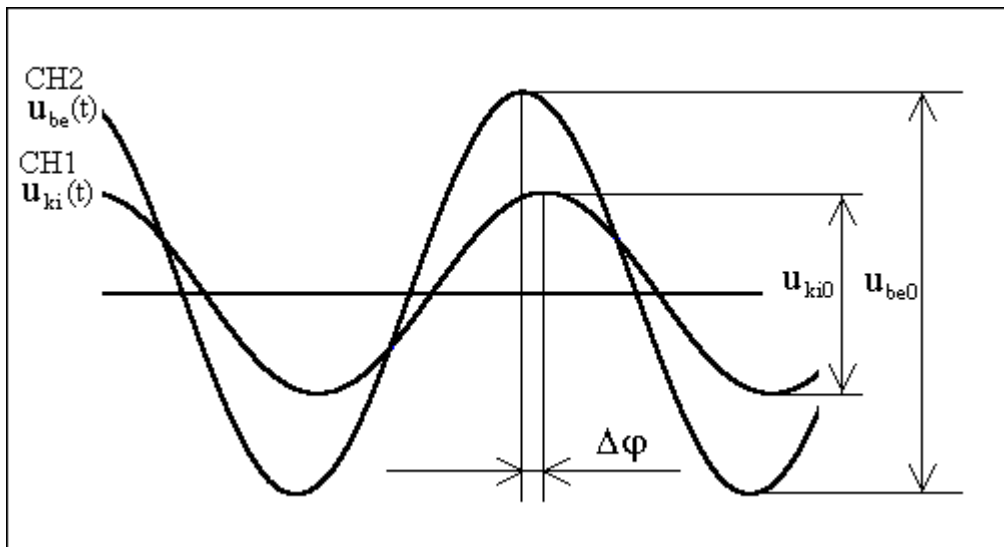
7. ábra

Az impedanciahálózat alapján már megépíthető a villamos áramkörünk, ami a mérés során betölti a mérendő rendszer szerepét. Szükségünk van továbbá az u_{be} gerjesztésre amit

függvénygenerátorral állítunk elő. Az u_{be} szinuszos feszültség rendszerre való kapcsolásával előállítottuk az eredeti mechanikai rendszerünk valós villamos modelljét.

Az így előállított áramkört oszcilloszkóp segítségével mérjük. Mivel mind az u_{ki} és mind az u_{be} feszültség időbeli lefolyását is mérni szeretnénk, egyszerűbbé teszi a mérést egy kétsatornás oszcilloszkóp (7. ábra).

Az kettes (CH2) csatornán a bemeneti feszültség u_{be0} amplitúdóját olvashatjuk le. Az egyes (CH1) csatornát a kimeneti feszültségre kapcsolva u_{ki0} amplitúdót határozhatjuk meg. A két csatornán ábrázolt harmonikus jel különbségéből pedig lemérhető a $\Delta\varphi$ fáziskülönbség. A két jel kiértékelése a 8. ábrán látható. A mérést különböző frekvenciákon elvégezve a kapott u_{be0} , u_{ki0} és $\Delta\varphi$ eredmények birtokában el is végezhető a Bode kiértékelés.



8. ábra

A kiértékelést itt is nehezíti a számolás szükségessége. Ha pontos diagramot szeretnénk eredményül, sok frekvencián el kell végeznünk a mérést és a számításokat. Ezért célszerű a mérési és kiértékelési feladatot számítógép segítségével automatizálni.

4. Az automatizált Bode kiértékelés megvalósítása

A függvénygenerátoros-oszcilloszkópos mérési módszer nagyban leszűkíti az eredeti mechanikai rendszer vizsgálati lehetőségeit. Mivel csak feszültségi típusú állapothatározót mérhetünk a fenti rendszerrel, ez a mechanikai rendszerre vetítve csak két paraméter vizsgálatára terjedhet ki. A villamos-mechanikai teljes analógia alapján, a mozgó szerkezetben így csak a sebesség illetve szögsebesség frekvenciafüggőségét írhatjuk le. Ez a korlátozás igen jelentős, azonban nem csökkenti a módszer jelentőségét, hisz a műszaki gyakorlatban sok helyen szükség van a sebesség és a szögsebesség vizsgálatára.

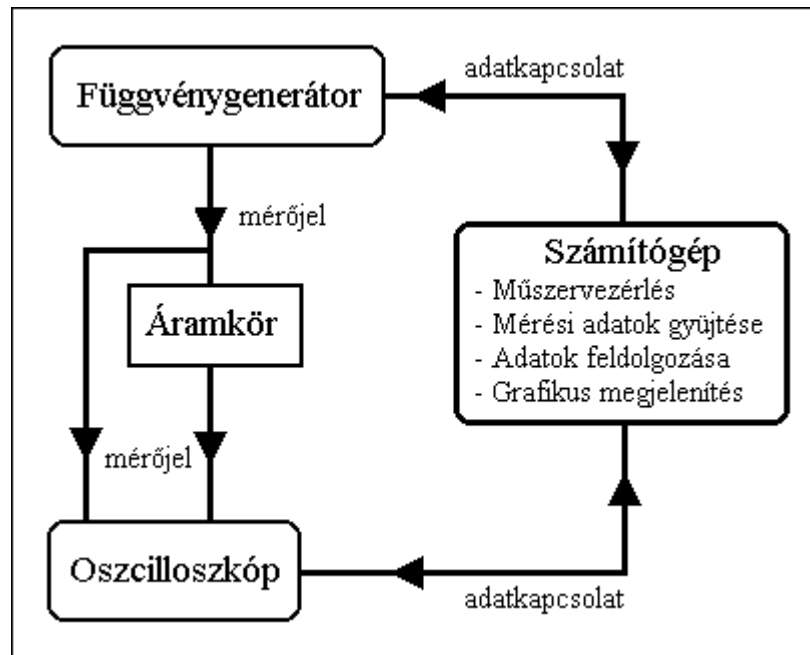
Nem elhanyagolható a villamos alkalmazásban sem egy automata Bode-diagram felvevő rendszer. A felhasználási területek itt is jelentősek:

- ismeretlen áramkörök azonosítása
- áramkörök hibaellenőrzése a számolt frekvenciamenet alapján
- áramkörök tesztelése

4.1 A frekvenciamenet kiértékelésének automatizálása

A mérés menete jól algoritmizálható, ezért kézenfekvő a számítógépes automatizálás. A mérést felbontva látható, hogy a következőket kell elvégeznünk egy lépésben:

- frekvencia-beállítás a generátoron
- adatok leolvasása az oszcilloszkópról
- a Bode-diagramhoz szükséges adatok kiszámítása



9. ábra

A automatizálás tehát a függvénygenerátor és az oszcilloszkóp számítógépes vezérléséből áll (9. ábra). Az egy frekvencián mért fenti részmerést többször kell elvégezni, és ez teszi lehetővé a gyors mérést. Ahány frekvenciapontból szeretnénk felállítani a Bode-diagramot, annyiszor kell a fenti három lépést elvégezni. Az automatizációt három szint figyelembevételével kell végrehajtani. Ezen szinteknek a megfelelő összhangja és illesztése szükséges a pontos és megfelelő formájú eredményhez

1. Műszerek-PC hardver: A számítógépes automatizáláshoz szükséges a műszerekkel való kommunikáció létrehozása. Ez a PC-műszer kapcsolat kétirányú kell hogy legyen, hisz egyszerre vezéreljük a műszereket és adatokat is olvasunk ki belőlük.

2. Szoftver: A vezérlést, az adatok feldolgozását, és a megjelenítését számítógépes program végzi. Ezzel szemben elvárás a felhasználó-barátság, célszerűség és a mérési beállítások sokirányúsága és rugalmassága. A mai követelményeknek megfelelően már grafikus programfelületet igényel egy ilyen alkalmazás. Ennek és az 1. pontnak megfelelően választottam a National Instruments cég Labview nevű fejlesztőeszközét, ami specifikusan műszervezélési és mérési feladatokra alkalmas nyelv.

1. A mérési feladat során fontos a mérési technikák, kiértékelési módszerek megfelelő alkalmazása, a mérési hibák kiküszöbölése végett. Pl.: villamos mérés esetében transziens jelenségek léphetnek fel; ügyelni kell a mérési határookra; a gerjesztőfeszültség beállítására és a hibaszűrésre.

4.2 Alkalmazott műszerek, és a PC

4.2.1 Oszcilloszkóp

A mérés egy oszcilloszkópot és egy függvénygenerátort igényel. Az oszcilloszkóp iránti követelmények:

- kétcsatornás kivitel, két jel egy időben történő kiértékelése végett
- számítógépes vezérlési és adatlekérdezési lehetőség

A HP54603B típusú digitális oszcilloszkóp a fentieknek megfelelőnek bizonyult így ezt a műszert választottam a feladathoz. Ezt a típusú műszert soros vagy párhuzamos (HPIB) vonalon lehet számítógéphez csatlakoztatni, így valósul meg az adatátvitel lehetősége. Az oszcilloszkóp belső A/D átalakítója segítségével a jelalak minden paramétere számszerűleg is megjeleníthető, és lekérdezhető számítógépes úton. A számunkra fontos amplitúdónagyság, és két jel közti fáziseltolás kijelzése szintén beépített lehetőség a műszerben.

A kommunikáció az oszcilloszkóp és a PC közt lehet alkalmazói szoftveres vagy programozói. A szoftveres kezelés általános feladatok kezelésére alkalmas, míg a programozás segítségével egyedi feladatok számítógépes elvégzését teszi lehetővé. Mivel a feladatom automatizálást igényel ezért a programozás módszerét választottam. A HP kifejlesztett egy műszeres programnyelvet a SCPI-t ami egyszerű szöveges parancsok segítségével vezérli a műszereket. A szöveges utasítás a soros vagy párhuzamos úton karakteres ASCII módban jut el az oszcilloszkóp interfész moduljába. Ez az interfész modul nem az oszcilloszkóp tartozéka, hanem illeszthető egység és csak ezen kiegészítő használata esetén lehet összekötni a műszert PC-vel. Mivel a küldött szöveges üzenet szabványos soros illetve párhuzamos protokollal történik, így a PC programozása igen egyszerű. A megírt programot karakterenként kell elküldenünk a soros vagy párhuzamos porton az interfésznek.

Az interfész modul dolgozza fel a kapott jelet és ennek megfelelően vezérli az oszcilloszkópot. Az ellentétes irányú üzemmódban mikor a számítógépnek küld az oszcilloszkóp (pl. mérési adatot), az interfész a műszer belső A/D átalakítója által kapott számszerű értéket, soros vagy párhuzamos adattá alakítja és elküldi a PC-nek. A PC pedig az ismert protokollok segítségével felhasználhatóvá teszi az küldött információt.

Még a programozás megkezdése előtt választanom kellett a párhuzamos és a soros kapcsolat között, mivel rendelkezésemre állt mindkét típusú interfész modul. Az előnyök és hátrányok figyelembevételével a soros kapcsolat mellett döntöttem:

A HP párhuzamos portja a HPIB, előnyei:

- 7 műszer sorbafűzése lehetséges egy portról
- 2MB/s átviteli sebesség
- A műszerhez van Labview vezérlő és mérőprogram

hátránya:

- külön PC-bővítőkártya szükséges, nagy költséggel

A soros kapcsolat igaz hogy sokkal lassúbb (9600 Baud) mint a HPIB kapcsolat, azonban esetünkben a soros kapcsolat sebessége is elégséges. Ugyanis az általam mérendő jelek tranziens jellege, illetve beállási ideje miatt a frekvenciánkénti mérések között különben is időt kell hagyni a rendszernek, és ez bőven elegendő a soros adatelküldésre is. Továbbá nincs szükségem hét, hanem csak két műszer vezérlésére, és szerencsére a PC rendelkezik két soros csatlakozási lehetőséggel.

4.2.2 Függvénygenerátor

A függvénygenerátor esetében nincs különösebb elvárás, hisz szinuszos feszültségű jelet bármelyik függvénygenerátor elő tud állítani. Azonban itt is szükséges a számítógépes kommunikáció lehetősége azzal, hogy ez esetben nem lekérdezni akarunk a függvénygenerátorról, hanem csak vezérelni szeretnénk azt.

Az egységes programozhatóság miatt kézenfekvő a HP 33120A függvénygenerátor választása. Ez a műszer interfész modul nélkül csatlakoztatható mind sorosan mind párhuzamosan is a PC-re. Természetesen ez esetben is a soros kapcsolat mellett döntöttem.

5. Az automatizált mérőrendszer programozása

A számítógépes program Labview 5.0 grafikus programnyelv segítségével készült. Ez a nyelv lehetővé teszi a moduláris programozást, így a számos alprogramot külön önállóan is működő modullal oldottam meg. Így ezek után más, ezen műszereken történő alkalmazások is felhasználhatják őket. Az alprogramok jól reprezentálják az elvégzendő feladatokat és a program működését, ezért szeretném bemutatni őket:

- frekvenciasorozat létrehozás
- mérési ciklus
- kiértékelés
- mérések mentése, betöltése

5.1 Frekvenciasorozat létrehozás

Méréstechnikai szempontból nagyon fontos a mérendő frekvenciák kiválasztása. Ügyelnünk kell a mért frekvenciák számára, a lépésközére az alsó és felső határra. Az egy áramkörre létrehozott optimális frekvencia sorozat ami pontos Bode-diagramot ad nem biztos hogy más rendszer esetén is pontos diagramot eredményez. Nem tudhatjuk előre, hogy hol lesznek a diagram nevezetes pontjai, és hol kell majd sűríteni a mérési pontokat. Mivel a fejlesztés során próbáltam univerzálissá tenni a mérőrendszert eltérő áramkörök esetén is, ezért a programba két lehetőséget építettem be a frekvenciasorozat generálásra.

Az első lehetőség az hogy a felhasználó a programban szereplő speciális sorozatú adatsor alsó és felső határának megadásával hozhatja létre a frekvenciasort. Ez a frekvenciasor a következő felbontásban tartalmaz frekvenciaértékeket: 50...100Hz intervallumon tízesével, 100...1000Hz intervallumon százasaival, 10000...25000Hz intervallumon ezresével. Azért döntöttem a fenti sorozat mellett, mert a kiértékelés logaritmikusan történik, és nem volna értelme állandó helyközű léptékezésnek, mivel az úgysem javítaná a Bode-diagram felbontását. Az állandó léptékezés ellen szól az is, hogy az alacsony frekvenciákon szükséges kis lépték miatt, rengeteg mérést kellene elvégezni az egész mérési sávon, ami idővesztéséget jelent.

Az előre definiált sorozatból a felhasználó az intervallum szűkítésével, bővítésével vagy a skála felbontásának változtatásával pontosíthatja a mérést. A kezelő az adatsort három szinten finomíthatja: alap adatskála; kétszeres felbontás (az alapértékek közé helyezett újabb mérési pont) ; illetve négyszeres felbontás (az előző skála értékei közé helyezett újabb pont):

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|----|------|----|------|----|------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| alap frekv. sor [Hz] | ... | 80 | | | | 90 | | | | 100 | | | | 200 | ... |
| kétszeres [Hz] | ... | 80 | | 85 | | 90 | | 95 | | 100 | | 150 | | 200 | ... |
| négyszeres [Hz] | ... | 80 | 82,5 | 85 | 87,5 | 90 | 92,5 | 95 | 97,5 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | ... |

1. táblázat

A másik lehetőséget akkor használhatjuk ha ez előző módszerrel nem tudunk megfelelő mérést végezni. Ez esetben lehetőség van saját mérési pontsorozat létrehozására. A felhasználó által létrehozott, tab elválasztású, txt típusú adatfájl alapján is képes a program mérni.

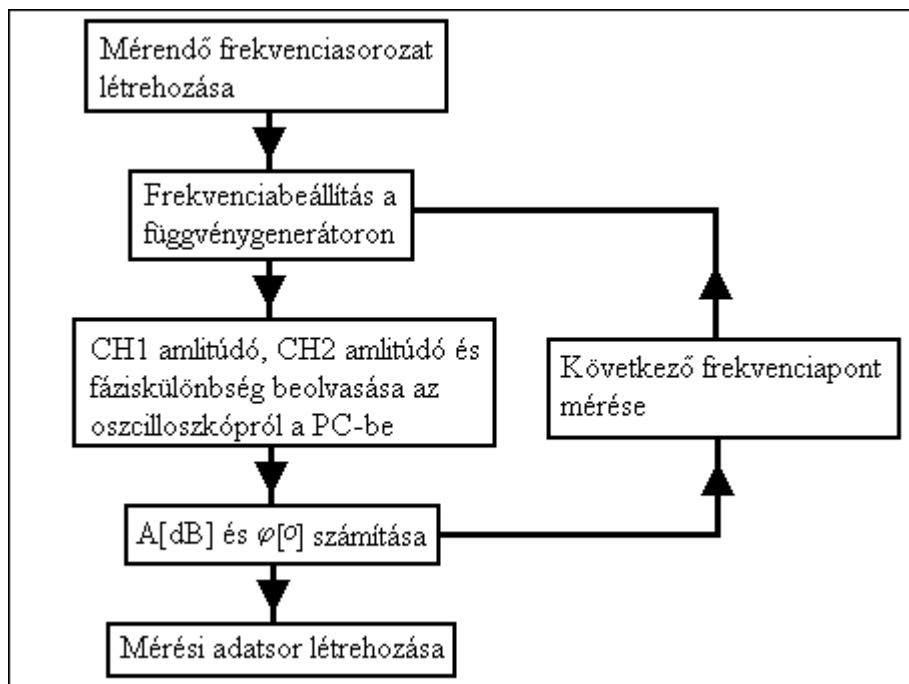
A három fajta felbontású előre definiált és az egyéni adatsort a program adatfájlként kezeli és minden mérésakor innen olvassa be a mérési frekvenciasorozatot egy tömbváltozóba.

5.2 Az automatikus mérési ciklus

Ha már rendelkezünk a mérendő frekvenciasorozattal, akkor már csak a bemenő szinuszos feszültség amplitúdójára van szükség a mérés bemenő adataihoz. A bemenő amplitúdó választása elvileg nincs hatással a Bode-diagramra. Mégis érdemes ezzel foglalkozni. A passzív elektromos elemeink nem ideálisak, ezenkívül korlátozottan terhelhetők. Az oszcilloszkóp érzékenysége és méréshatára is korlátozott. Ezek ismeretében több amplitúdónagyságot is kipróbáltam az 0,01 V-tól 5 V-ig.

Az megépített 8 áramkör mindegyikén végeztem a méréseket, és azt az amplitúdót kerestem ami az összes esetén elfogadható gráfot ad. A kis feszültségeken a jel volt zajos, nagyobb feszültségeken a zaj megszűnt, viszont a kéttárolós kör túlgerjedt. A mérések során tapasztalati úton az 1,5 V-os amplitúdót fogadtam el univerzálisnak.

A számítógépes mérés a soros csatorna paramétereinek beállításával indul, majd a mérési sorozat elemszámának megfelelő ciklus hajtódik végre. Ez a ciklus a frekvencia beállítást és a mérési adatok lekérdezését foglalja magába.



10. ábra

A frekvenciabeállítás a COM2 porton található függvénygenerátor számára küld beállítási adatokat. Az oszcilloszkóp a COM1 porton kommunikál és először egy automata beállító paranccsal, létrehozza az optimális mérőképet, ezután küldi a program a lekérdezőprogramot, amire az oszcilloszkóp válaszol.

A mérés során előforduló mérési hibák általában a lekérdezőkor történnek. Ezek oka a tranziens jelenségek amik a frekvenciaváltás után történnek. Ezt úgy küszöböltem ki, hogy a frekvencia-beállítás után 500ms után történik csak lekérdezés. Ez az érték tapasztalati. Nincs összefüggésben a rendszerek beállási idejével, mert azok nagyságrenddel kisebbek. Ez a hiba az oszcilloszkóp hibájának tekinthető. Néha azonban ezek ellenére is hibás, óriási értékeket küld a műszer, ennek oka a hibás A/D átalakítás. Ezeket azonban könnyű kiszűrni, mert ilyenkor a program mindaddig végrehajtja a mérést amíg nem kap elfogadható $1V \pm 10\%$ értéket.

A kapott kimenő amplitúdó értékből kiszámításra kerül az A[dB], a fázis érték pedig nem is igényel számítást, mivel azt az oszcilloszkóp kész számértékként küldi a PC-nek. Ezek az eredmények: a frekvenciafelbontás típusa (egyszeres, kétszeres, négyszeres), az intervallum alsó és felső határa, egy tömbváltozóba gyűjtve szerepel tovább. A továbbiakban ez az adattömb alkotja egy mérés adatsorát.

5.3 Kiértékelési alprogram

Ha a mérés során létrejött a mérési adatsor, létre kell hoznunk magát a Bode-diagramot grafikus formában. Ennek a programrésznek három feladata van:

1. függvényábrázolás
2. a gráfon szükséges korrekciók végrehajtása
3. a Bode-diagram kinyomtatása

1. Az A[dB] és $\varphi[^\circ]$ ábrázolása a frekvencia függvényében két grafikonon történik. A frekvenciaskálák logaritmikus léptékezésűek. A mérési adatsorban szereplő értékek jelennek meg a grafikonon, így létrehozva a diagramokat.

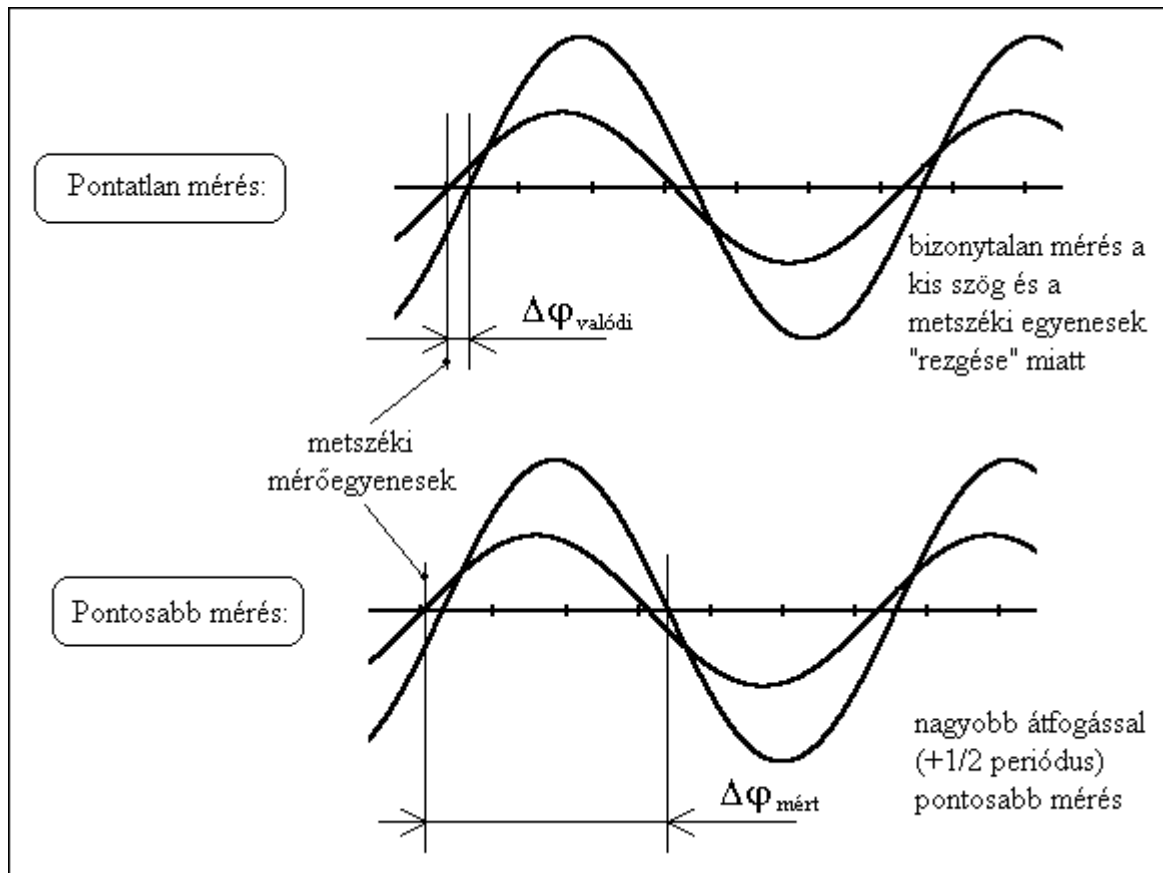
2. A mérés során történő hibaszűrés ellenére különböző okok miatt még mindig vannak hibás adataink, és azok is kizárólag csak a fázisértékeknél, ezek okai a következők:

- Az oszcilloszkópon fáziskés mérése két szinuszcörbe felfutó éle közti szögértékkel egyenlő. Az oszcilloszkóp ezt automatikusan méri, méghozzá oly módon hogy y irányú egyenest illeszt az idő (x) tengely két felfelé futó, legközelebb eső metszékéhez. Ezután a műszer az egyenesek közt lévő idő dimenziójú távolságot, a periódusidő ismeretében szögértékké alakítja. Az oszcilloszkóppal végzett mérések során megfigyeltem, hogy a kis fázistolások (0° - 20°) esetében nem a két legközelebbi felfutó metszékhez állít mérőegyenest a műszer, hanem a két egyenes közé még beiktat egy fél periódusnyi plusz „hézagot” is. Habár a műszer leírásában nem találtam magyarázatot erre, megállapítható hogy ez a módszer javítja a mérés pontosságát, hisz a bizonytalan kis szöget nagyobb távolságon pontosabban mérhetjük. Az ilyen (11. ábra) mérések alkalmával viszont utólagosan értelemszerűen módosítanunk kell a mért fázistolást: $\varphi_{\text{valódi}} = \varphi_{\text{mért}} - 180^\circ$

A programban erre a műveletre egy külön algoritmus szolgál. Ez az algoritmus az adatok feldolgozásánál figyeli a beiktatott fél periódus következtében fellépő hirtelen fázistolás változást, és a fenti képlet segítségével korrigálja az eltérést.

- Mivel a szinuszhullámok időben nem állandóak, igencsak ingadozik a metszéki mérőegyenest helyzete a szinuszhullám x tengelyében levő nagy meredeksége miatt. Így $1-5^\circ$ eltérés is mutatkozhat. A diagramon ez a jelenség tuskék

formájában tapasztalható. Ezt a jelenséget a Labview beépített polinomiális regressziós korrekciójával javítottam ki.



11. ábra

3. A nyomtatásra a Windows eszközmeghajtóján keresztül kerül sor. Így semmi különleges beállításra nincs szükség, hogy nyomtatott formában is rendelkezésünkre álljon a Bode-diagram.

5.4 Az adatsor mentési és betöltési rutinjai

A felhasználó szempontjából célszerű lenne a már lemert áramkör diagramjának a megőrzése. Több szempontból is hasznos ez a lehetőség:

- azonos áramkörök összehasonlításánál
- mérések ismétlésénél
- diagram adatbázis létrehozásánál

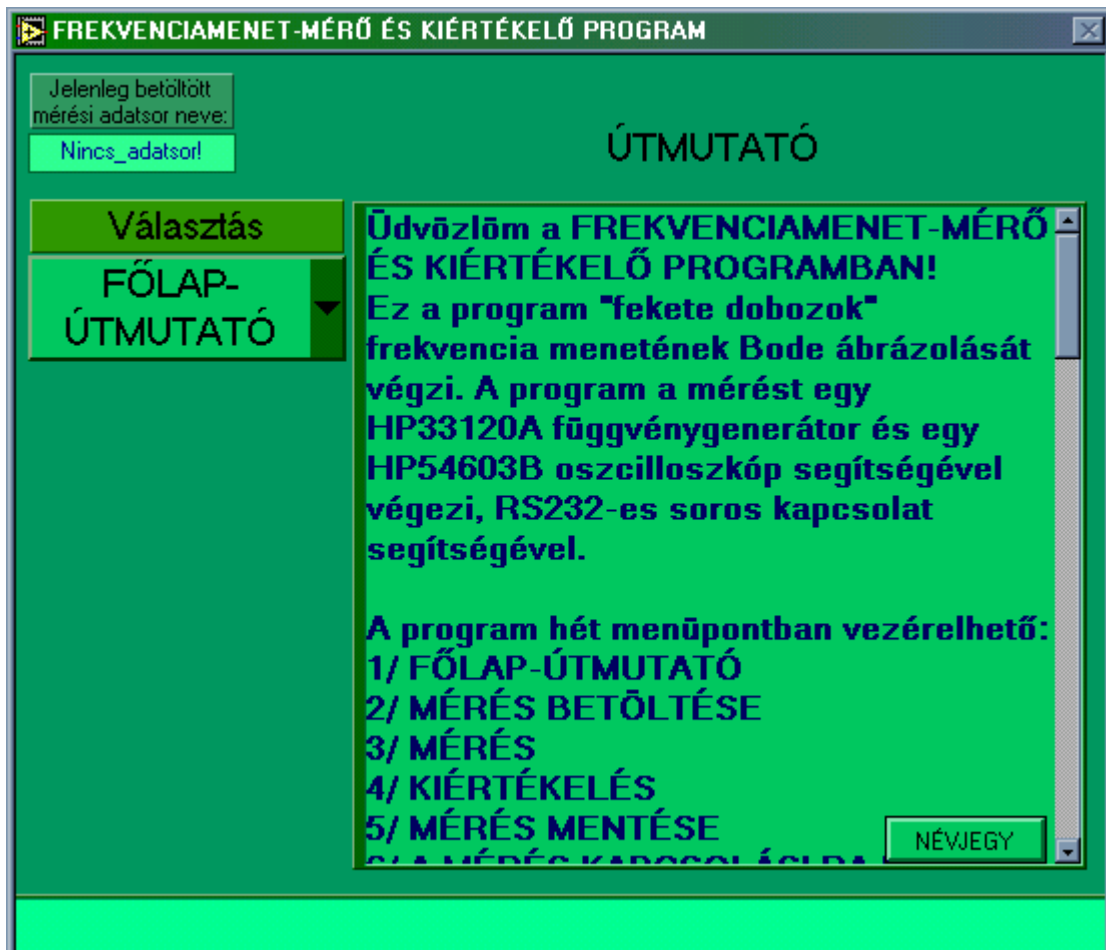
A mérés mentése adatfájlok formájában történik a program egy meghatározott alkönyvtárába. A mentés során a mérési adatokat tartalmazó adattömb kerül szöveges formában való tárolásra. A betöltési rutin ezeket a fájlokat tölti be a merevlemezről majd ismét adattömbbé alakítja ami már újra kiértékelhető grafikus formában is. Mindkét eljárás felhasználóbarát ablakrendszerű, hasonló a Windows saját fájlkezelő objektumaihoz.

6. A Bode-diagram mérő és kiértékelő program lehetőségei és felhasználói leírása

A program lehetőségeinek a bemutatására elegendő ha végigvesszük a program bejelentkező oldalán található menüpontokat, ezek:

1. Főlap/útmutató
2. Mérés
3. Kiértékelés
4. Betöltés
5. Mentés
6. Kapcsolási rajz
7. Kilépés

1. Főlap/útmutató



12. ábra

A program (bode.dll) indításakor a 12. ábrán látható ablak jelenik meg. A jobb felső oldali legördülő menüben található menüpontokban vezérelhető az alkalmazás. A bal oldali görgethető ablakban egy rövid leírás található a program kezeléséről és használatáról. Az alsó világoszöld állapotoszor pedig az aktuálisan a programban történt eseményekről, teendőkről és hibákról tájékoztat. Ez a sáv és a legördülő menü minden további főablakban látható.

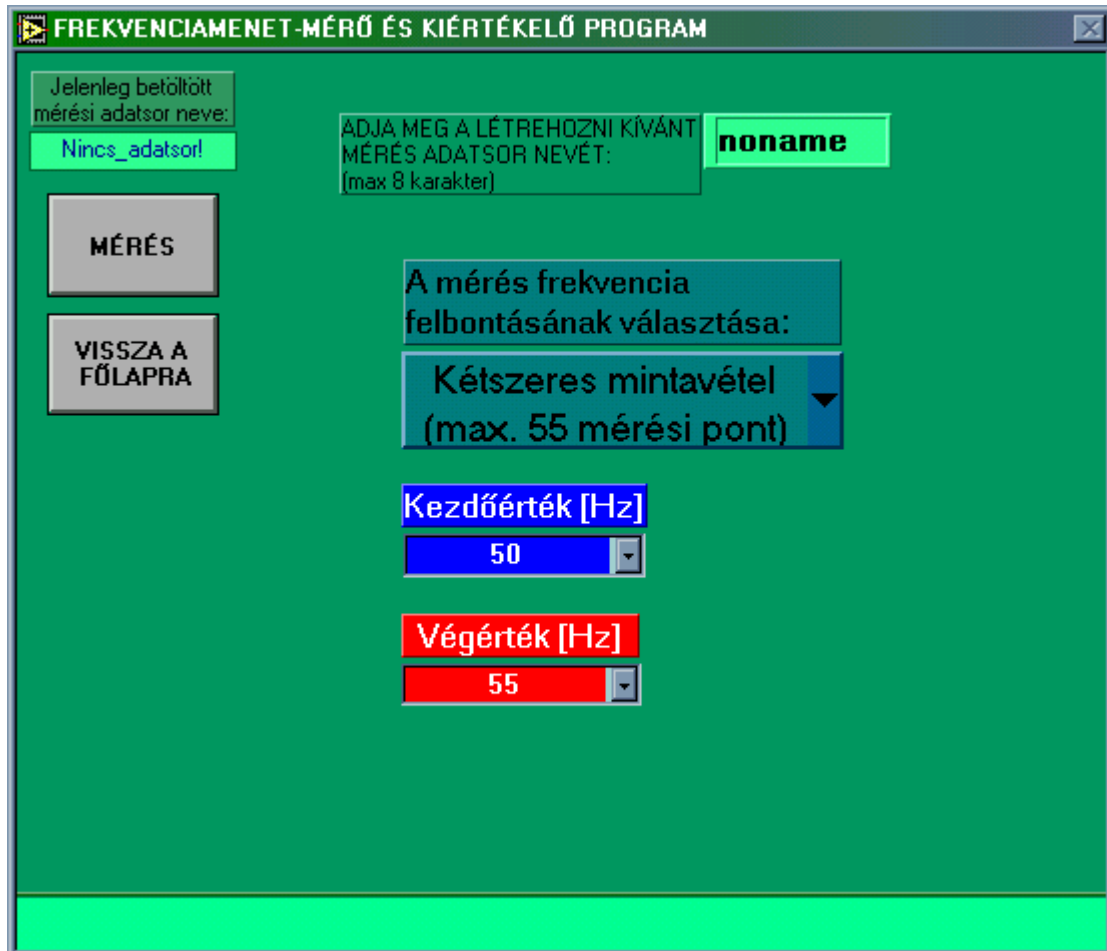
A bal felső sarokban található szövegmező, az aktuálisan programban szereplő mérési adatsor nevét tartalmazza. Természetesen indításkor üres az adattömb, így a nincs_adatsor!

felirat látható. Amint elvégeztünk egy mérést vagy betöltünk a merevlemezről egy adatsort, a szövegmező ennek a nevét fogja kijelezni.

2. Mérés

Ha a legördülő menüben a mérés pontra kattintunk akkor a 13. ábrán látható tartalmúra változik az ablak. Ezen ablakban adhatók meg a mérés paraméterei.

Első lépésként célszerű nevet adni a mérésnek. A mérés nevének megadása után a program ezen a néven fogja a mérési adatsort azonosítani és kezelni, ezen a néven nyomtathatunk és menthetünk.



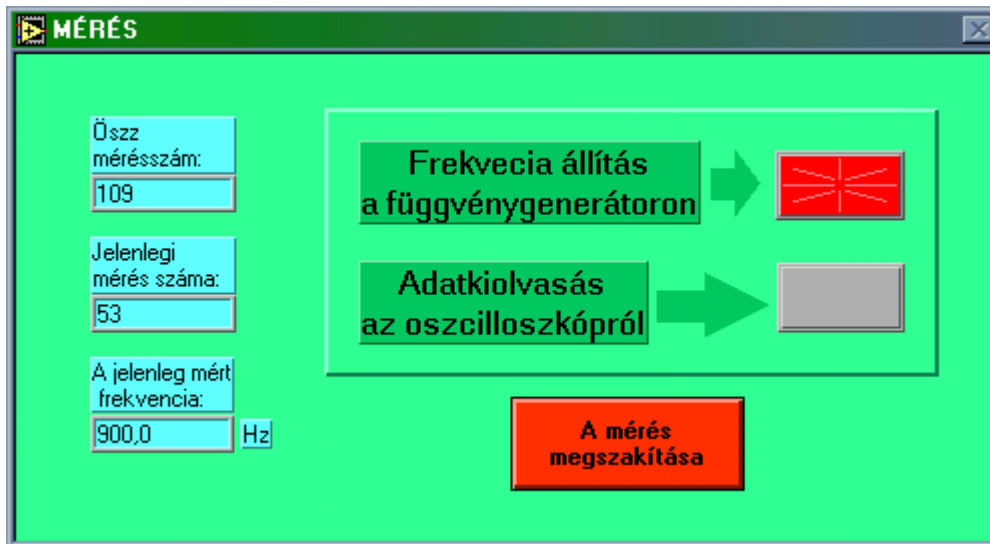
13. ábra

A „Mérés frekvenciafelbontásának választása” nevű legördülő menüben dönthetjük el melyik frekvenciasorozattal szeretnénk mérni. Választási lehetőségként az előbbieken már említett négy frekvencia-pontsorozat szerepel:

- egyszeres
- kétszeres
- négyyszeres
- egyéni pontsorozat

Ha kiválasztottuk a fenti menüből a nekünk megfelelő felbontást, akkor már csak az a feladatunk, hogy megadjuk a frekvenciavizsgálat alsó (kék mező) és felső (piros mező) korlátját.

A főoldalra a „Vissza a főlapra” gombbal juthatunk, a mérés pedig a „Mérés” gomb megnyomásával indul. A mérés során történő eseményeket a felbukkanó MÉRÉS nevű ablakban (14. ábra) kísérhetjük figyelemmel. Ebben az ablakban láthatjuk a pillanatnyilag adatot fogadó illetve küldő műszer működését a piros indikátor segítségével. Ezenkívül látható az össz és a jelenleg mért mérések száma, valamint az aktuálisan mért frekvenciaérték. A mérés végeztével a program visszatér a kezdőoldalra, ahol az üzenetsávban értesít a sikeres mérésről, vagy az esetleges problémákról. Természetesen az új mérési adatsor is létrejött a mérési oldalon megadott névvel. Ettől fogva ez a név látható a bal felső sarokban.



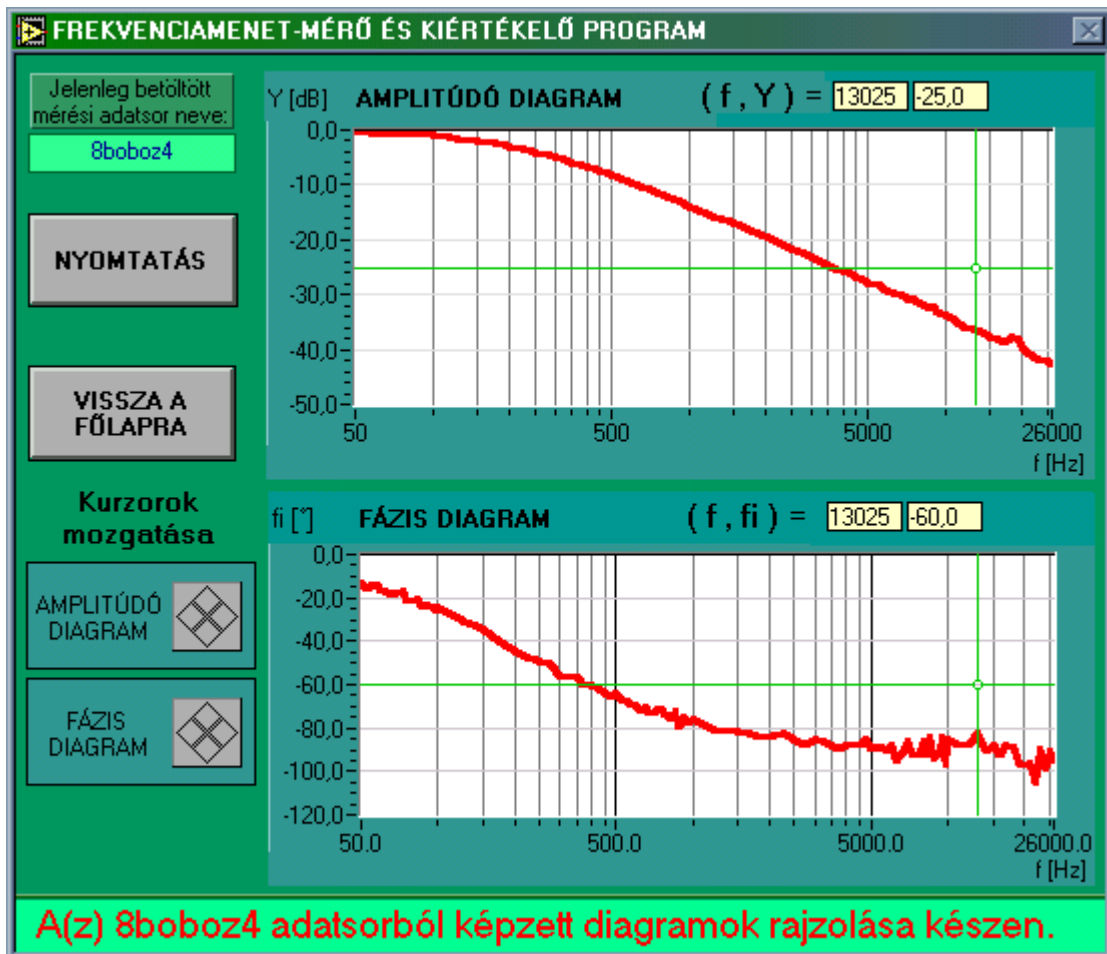
14. ábra

3. Kiértékelés

A mérés által létrehozott illetve a lemezzől beolvasott mérési adatsor kiértékelése a főoldal menüjének 3. pontjával történik. A megjelenő ablakban (15. ábra) a fázis és amplitúdódiagramok láthatók.

A diagramok a „NYOMTATÁS” gombbal kinyomtathatók, névvel dátummal együtt. „A kurzorok mozgatása” opció segítségével a diagramon látható zöld színű célkeresztet mozgathatjuk a grafikon területén, így a diagram tetején lévő kurzor-koordináták segítségével számszerűen is kiértékelhető a diagram.

A kiértékelés ablakból ismét a „VISSZA A FŐLAPRA” feliratú gombbal juthatunk a főablakba (és menübe).



15. ábra

4. Betöltés

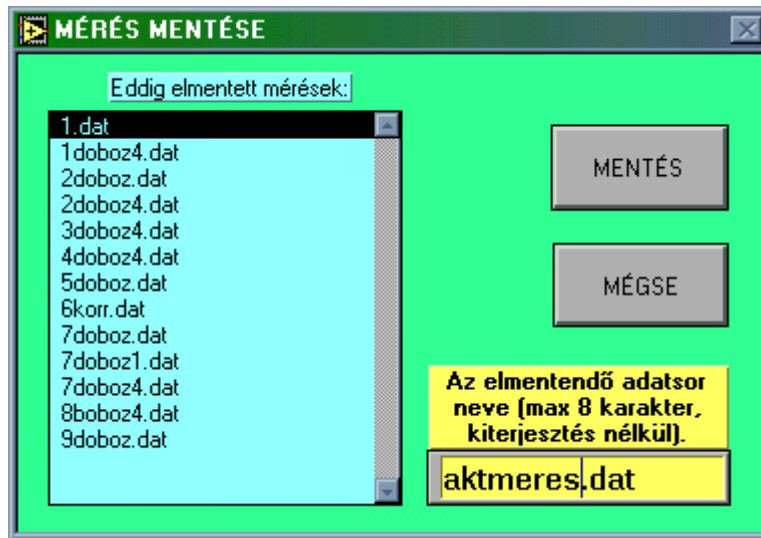


16. ábra

A betöltés menüpont egy új ablakot nyit meg (16.ábra), ahol a mérési eredmények számára fenntartott könyvtár állományai jelennek meg. A betöltendő mérést kijelölve és a

„MEGNYIT” gombra kattintva, vagy kétszer a mérés nevére kattintva az ablak eltűnik, és az így betöltött állomány válik a programban aktuális méréssé.

5. Mentés

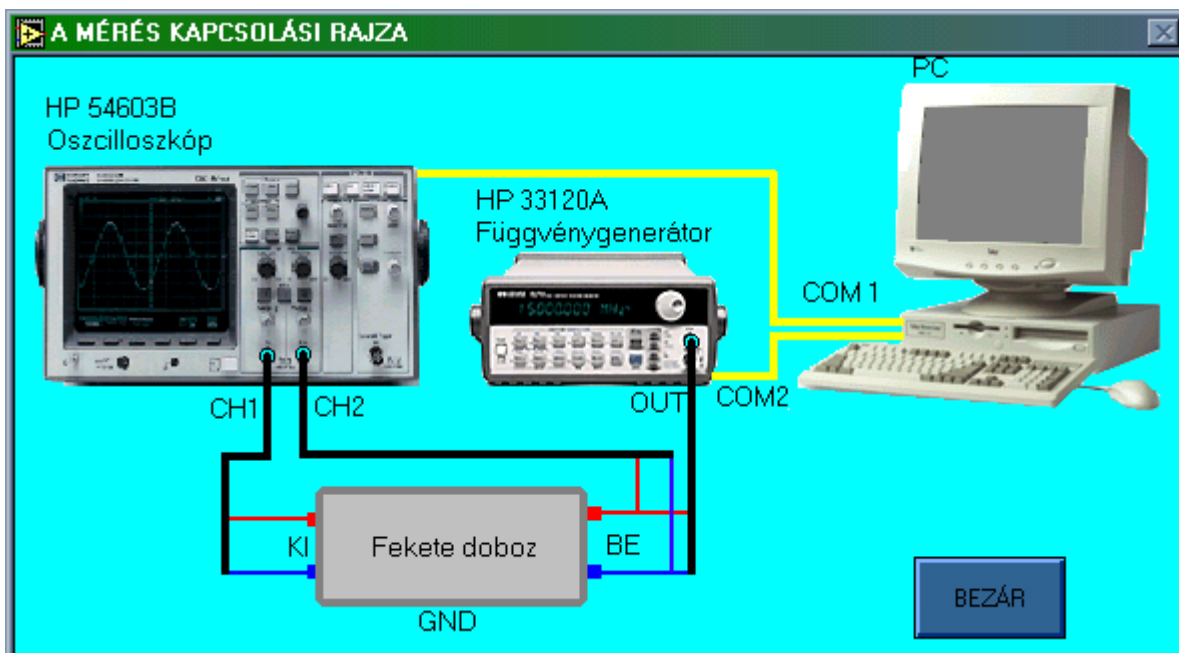


17. ábra

A mérések mentése ezen menüponttal történik. Az adatsorok mentése egy új ablakban történik (17. ábra). Az ablakban láthatók az eddig elmentett mérések, valamint a elmenteni kívánt adatsor neve. Ezt a mentési nevet a program ajánlja fel a mérés nevének alapján.

6. Kapcsolási rajz

A hibátlan mérés feltétele a műszerek helyes összekötése és csatlakozása a számítógéppel. Ez a menüpont a pontos kapcsolási rajzot jeleníti meg (18. ábra) egy külön ablakban.



18. ábra

7. Kilépés

A „kilépés” menüpont befejezi a program működését. Elmentetlen adatsor esetén felkínálja a mérés mentését.

7. A programmal mért Bode-diagram ellenőrzése

A mérés során felmerült a kérdés, hogy valóban a mért áramkör karakterisztikáit kaptuk-e eredményül. Ennek ellenőrzésére próbáltam egyszerű, gyors és az összes áramkörre általános módszert keresni.

7.1 A Bode-diagram meghatározása számítással

Ha ismerjük a passzív hálózatunk frekvencia (vagy átviteli) függvényeit, akkor egy diszkrét frekvenciaértékre az (9) és (10) összefüggések segítségével kiszámítható az amplitúdó és fázis. Ha ezt a módszert kiterjesztjük egy frekvenciaintervallumra, akkor már felrajzolható a Bode-diagram.

Az általam épített áramkörök közül a legösszetettebb, a sorba kötött két párhuzamos RC tagot tartalmazó hálózat. Ennél a körnél a kimenő feszültséget a két párhuzamos tag között mérjük. A már ismertetett módszerek segítségével meghatározható a frekvenciafüggvény. Ennek általános alakja a következő:

$$Y(\omega) = \frac{A(j\omega)^2 + B(j\omega) + C}{D(j\omega)^2 + E(j\omega) + F} \quad (14)$$

Ahol A,B,C,D,E,F együtthatók a az impedancia-hálózatban levő passzív tagok (R,L,C) függvényei. Látható, hogy a fenti függvény a nevezőjében és a számlálójában is másodfokú (másodrendű D,E.). Ez a frekvenciafüggvény tartalmazza az egyszerűbb (kisebb rendű) rendszerek frekvenciafüggvényeit is. Így az együtthatók megfelelő helyettesítésével létrehozható egyszerűbb kapcsolású rendszerek frekvenciafüggvénye is. Például A=0, B=0, C=1, F=1 esetén kéttárolós integráló tagot kapunk, ami egy RLC kört jelent. Az együtthatók bevezetése azért szükséges, hogy egy eljárás segítségével több eltérő rendszert is vizsgálni tudjunk, így kiterjesztve a számítási módszert. Fontos az, hogy az általános frekvenciafüggvényként a legmagasabb rendű rendszer szolgáljon.

Szükség szerint a fenti általános frekvenciafüggvény tovább bővíthető magasabb rendű tagokkal, így még több lehetséges kapcsolás frekvenciafüggvényét írhatjuk így fel. Most csak a (14) függvény Bode-diagramjának létrehozását ismertetem, mert az általam épített áramkörök esetében ez is elégséges, de egy összetettebb rendszer és annak részeinek elemzésekor bővítésre van szükség.

Képezzük a frekvenciafüggvény valós és képzetes részét az ω körfrekvencián, az általános együtthatók segítségével:

$$\operatorname{Re}Y(\omega) = \frac{(C - A\omega^2)(F - D\omega^2) + EB\omega^2}{(F - D\omega^2)^2 + E^2\omega^2} \quad (15)$$

$$\operatorname{Im}Y(\omega) = \frac{\omega(B(F - D\omega^2) - E(C - A\omega^2))}{(F - D\omega^2)^2 + E^2\omega^2}$$

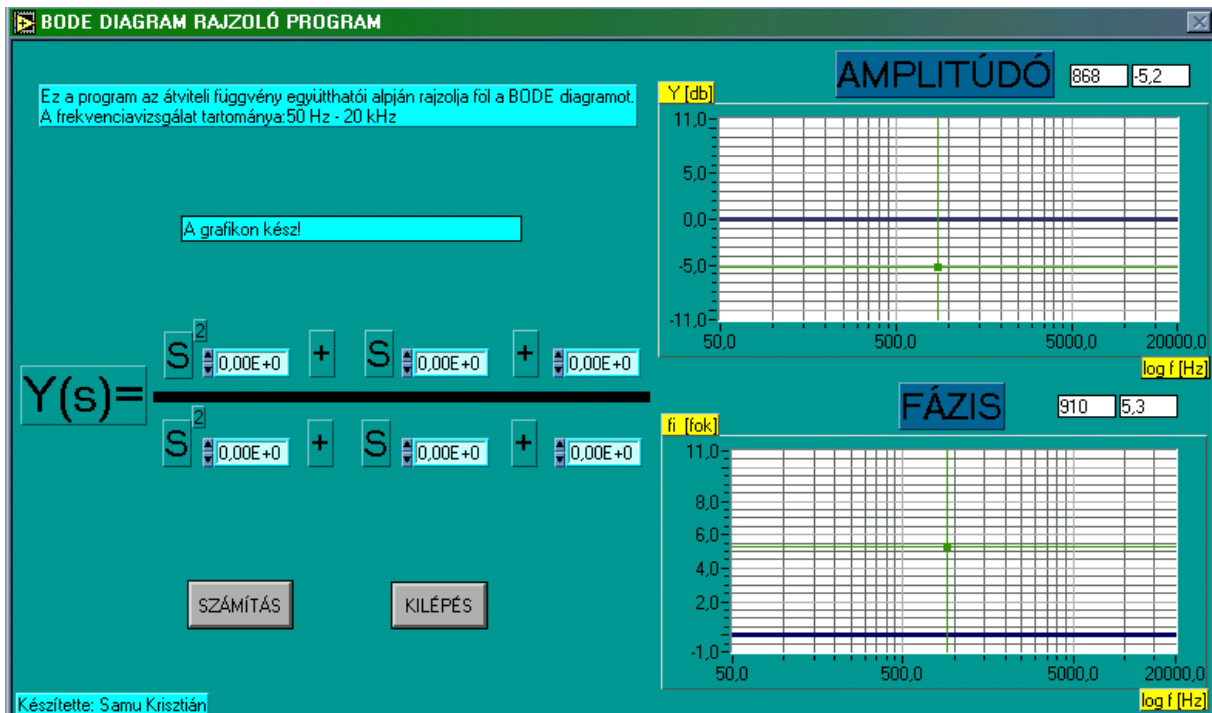
A valós és képzetes értékek ω frekvencián kiszámított értékeiből a fázis és amplitúdó a (9) és (10) összefüggésekkel számítható. Mivel így csak egy körfrekvencián kapjuk meg az említett jellemzőket, szükséges egy intervallumon belül kiszámítani az $A(\omega)$ és $\varphi(\omega)$ értékeket. Ez kézi módszerrel igen csak nehézkes és hosszú munka, ezenkívül az ω értékek kiválasztására is figyelmet kell fordítani. Célszerű tehát számítógépes programmal megoldani ezt a módszert is.

7.2 Bode kiértékelés számítással, számítógépen

A bode_ell.llb program szintén Labview 5.0 nyelven íródott, és az amplitúdó-fázis diagramok ábrázolását végzi számítással. Az (15), (9), (10) összefüggések alapján számíthatók a $A(\omega)$ és a $\varphi(\omega)$ függvények. A vizsgált intervallum a mérési programban megadott szélső értékeknek felel meg. A pontok számítása pedig a Bode-mérésnél található négyszeres pontsűrűségű (ω) frekvenciasor szerint történik. Így a mérés során kapott Bode-diagram jól összehasonlítható a számítottal.

7.2.1 A program használata

A bode_ell.llb ikonra kattintva indul a BODE DIAGRAM RAJZOLÓ PROGRAM című ablak (19. ábra) jelenik meg. Az impedanciahálózat alapján felírt átviteli vagy frekvenciafüggvény alapján meghatározható az $A...F$ együtthatók. A bal oldalon levő szövegmezőkbe kell beírni a tetszőleges rendszerre számított együtthatóinkat. A „SZÁMÍTÁS” gombra kattintva a program kiszámítja és ábrázolja a keresett diagramokat. A mérési programnál ismert módon, itt is lehetőség van a célkereszttel való kiértékelésre. A koordináták a diagram tetején láthatók, a célkereszt pedig a fölé helyezett lenyomott gombbú egérrel mozgatható. Új diagram rajzolása a változók cseréjét követő „SZÁMÍTÁS” gomb lenyomásával lehetséges.



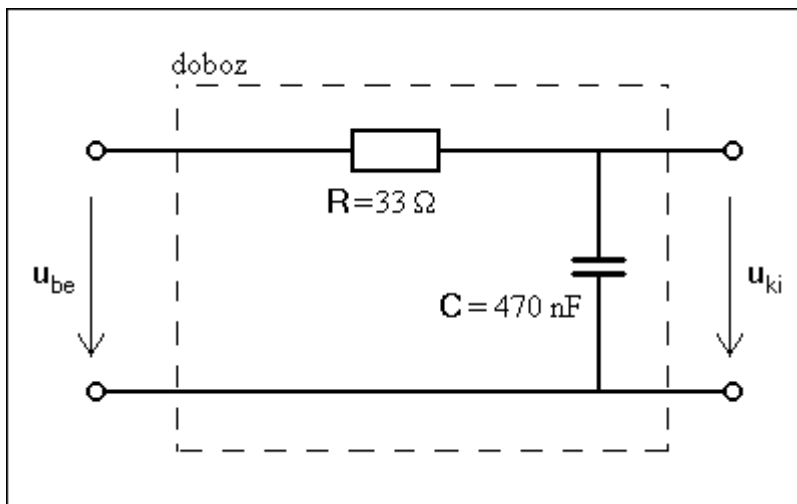
19. ábra

8. Mérési eredmények

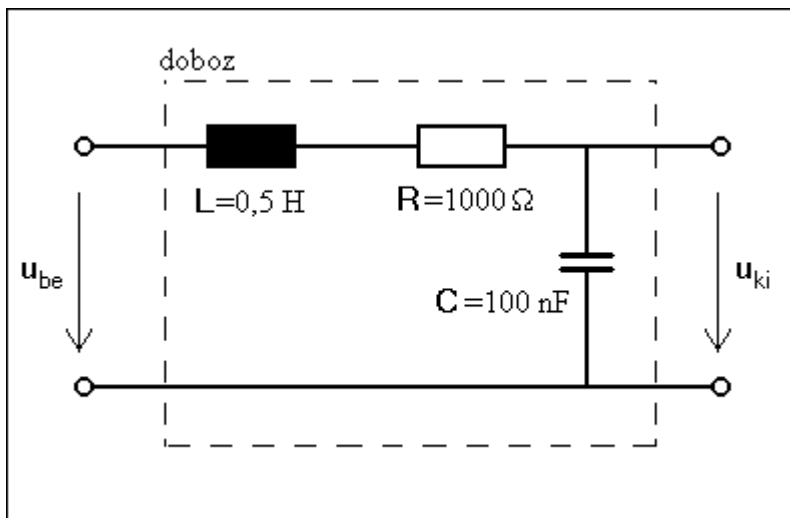
8.1 A megépített áramkörök

A villamos rendszerek vizsgálatához 10 doboz építésére került sor. Az áramkörök passzív elemeit az Electronics Workbench 3.0 szoftver segítségével választottam ki. Először ott építettem meg az áramköröket, és az elemek paramétereinek (Ω, F, H) változtatásával kerestem olyan köröket, amelyek jellegzetes pontjai (vágási, rezonancia frekvencia) nem esnek a mérőrendszerem mérési értékhatárain kívül. Ezen dobozok segítségével teszteltem a Bode-mérő, és a Bode-számító programot. A kiértékelt dobozok közül szeretném bemutatni a három legjellegzetesebb áramkör-rendszer vizsgálati eredményeit:

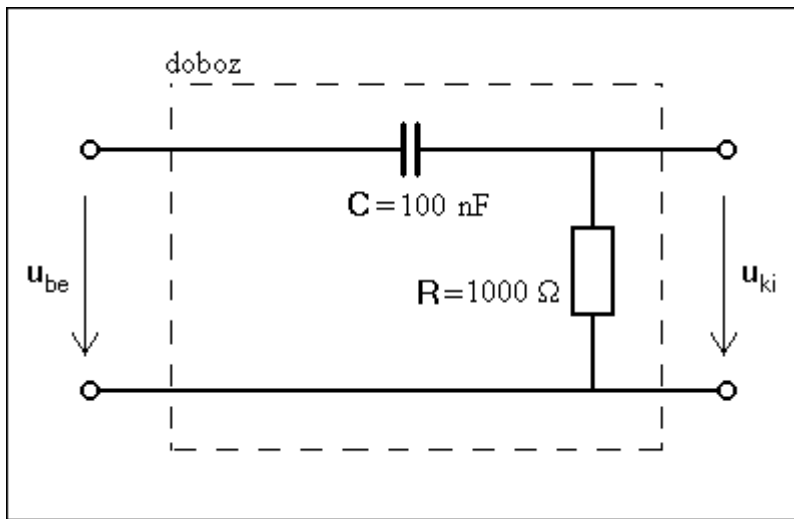
- A. egytárolós tag (aluláteresztő szűrő) (20. ábra)
- B. kéttárolós tag (lengő tag) (21. ábra)
- C. egytárolós differenciáló tag (feluláteresztő szűrő) (22. ábra)



20. ábra



21. ábra



22. ábra

8.2 Az számítógépes mérési eredmények

Az áramkörök egyenként kerültek mérésre a kapcsolási rajz alapján. A mérés során ajánlatos a következők szerint haladni: Első alkalommal célszerű a teljes rendelkezésre álló frekvenciasávon mérni, a legkisebb felbontással. Ennek a mérésnek nem lesz a legjobb minőségű a Bode-diagramja, azonban levonhatjuk a következtetést, hogy mely intervallumban szükséges a következő mérést elvégezni, és azt is eldönthetjük elegendő felbontású-e a diagram. Az intervallum változtatásával és a felbontás variálásával érhetünk el pontos diagramot.

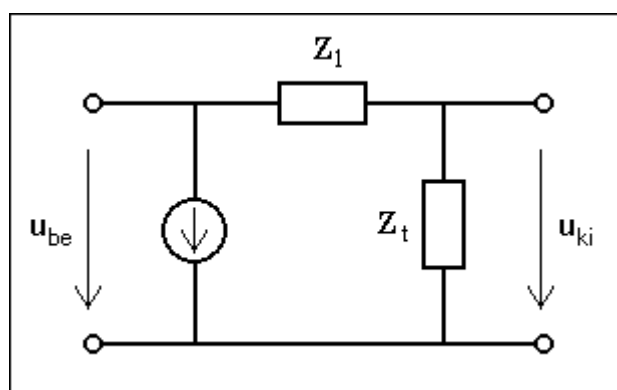
A három doboz mérési eredményei a következő paraméterekkel történtek:

- | | | |
|----|-----------------------------|------------------------------|
| A: | Frekvencia sáv: 50-26000 Hz | Felbontás: 4x (1. melléklet) |
| B: | Frekvencia sáv: 50-10000 Hz | Felbontás: 1x (2. melléklet) |
| C: | Frekvencia sáv: 50-26000 Hz | Felbontás: 4x (3. melléklet) |

8.3 A számított Bode-diagramok

A Bode-számító program segítségével ellenőriztem a mért eredményeket. Hogy analitikusan is meg tudjuk határozni a frekvenciamenetet, ismernünk kell az előző fejezetben szereplő frekvencia-átviteli függvény együtthatóit (A,B,C,D,E,F). Ez nem okoz különösebb számítást, és az áramkört alkotó elemek paramétereit is ismerjük (20.-22 ábra).

Az együtthatók meghatározása az impedanciahálózat egyszerűsítése és a feszültségosztás összefüggéseivel történik:



23. ábra

| A. egytárolós tag | B. kéttárolós tag | C. differenciáló tag |
|--|---|---|
| $Z_1=R$ | $Z_1=R+j\omega L$ | $Z_1=1/j\omega C$ |
| $Z_t=1/j\omega C$ | $Z_t=1/j\omega C$ | $Z_t=R$ |
| $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{j\omega RC + 1}$ | $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1}$ | $\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega\omega} = \frac{1}{(j\omega)^2 LC + j\omega RC + 1}$ |
| A=B=D=0 C=F=1 E=RC=33Ω·470nF=1,55e-4 | A=B=0 C=F=1 D=LC=0,5H·100nF=5e-7 E=RC=1000Ω·100nF=10e-4 | A=C=D=0 F=1 B=E=RC=1000Ω·100nF=1,00e-4 |

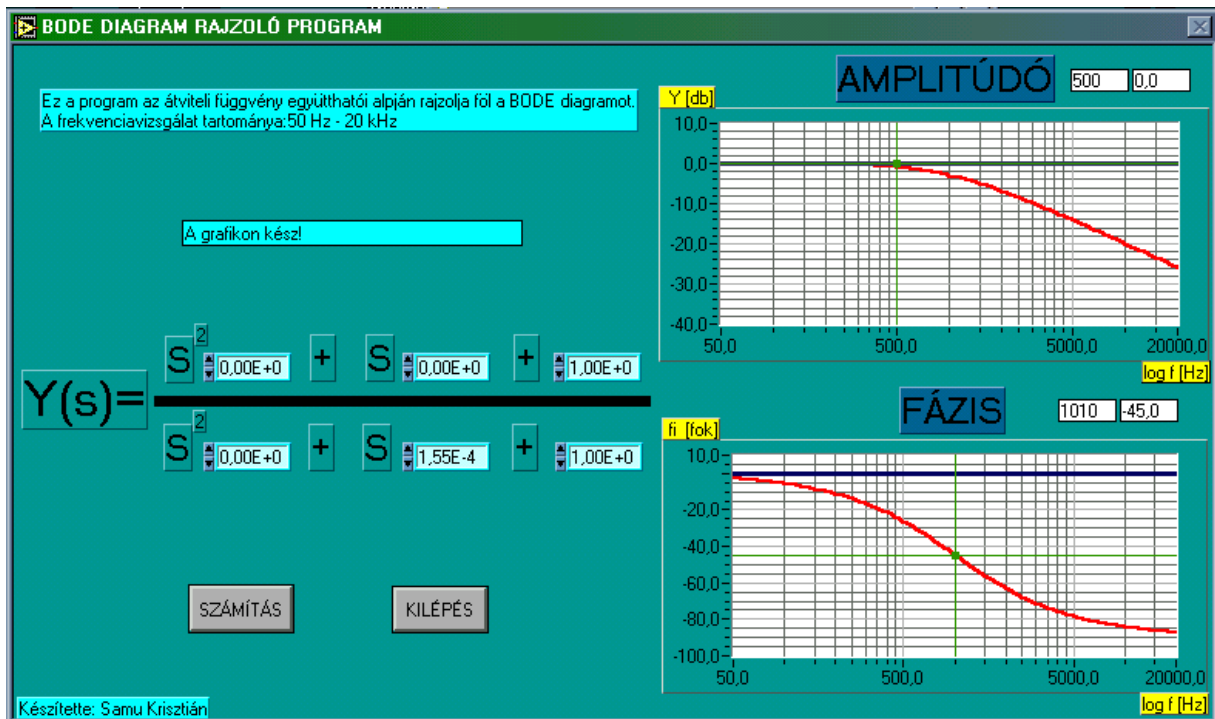
2. táblázat

A Bode-számító programba helyettesítve az együtthatókat, a következő diagramokat kapjuk eredményül:

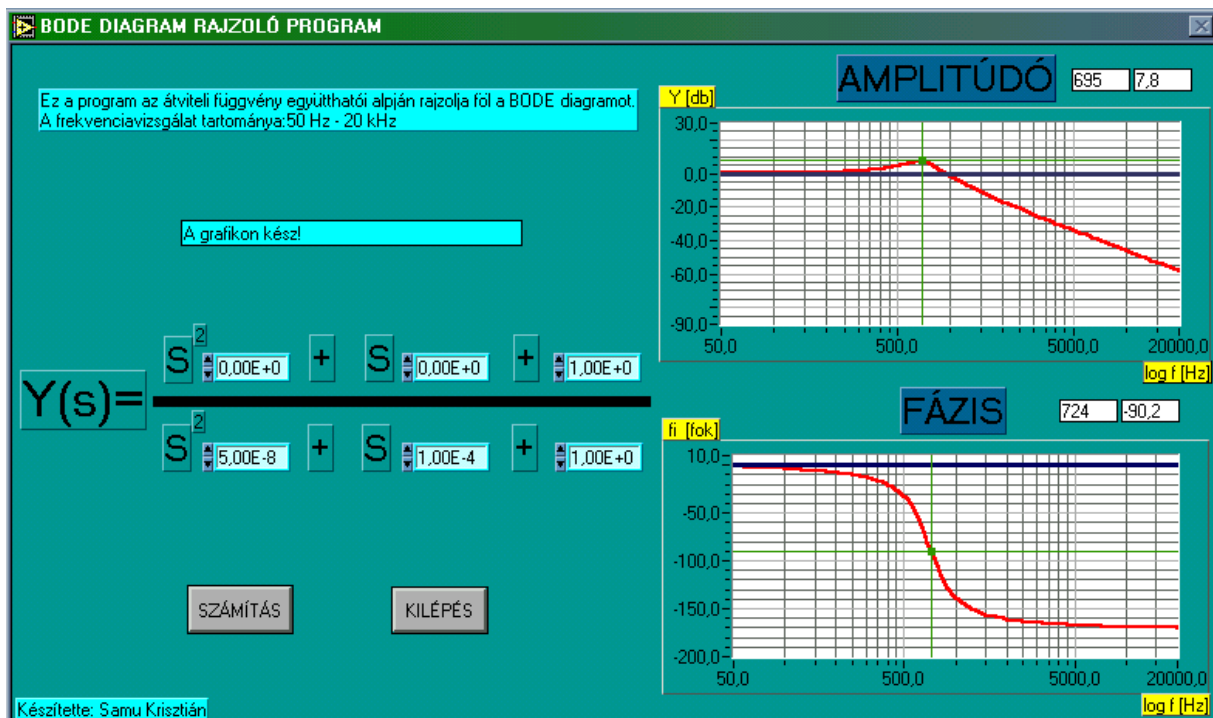
A áramkör-24. ábra;

B áramkör-25. ábra;

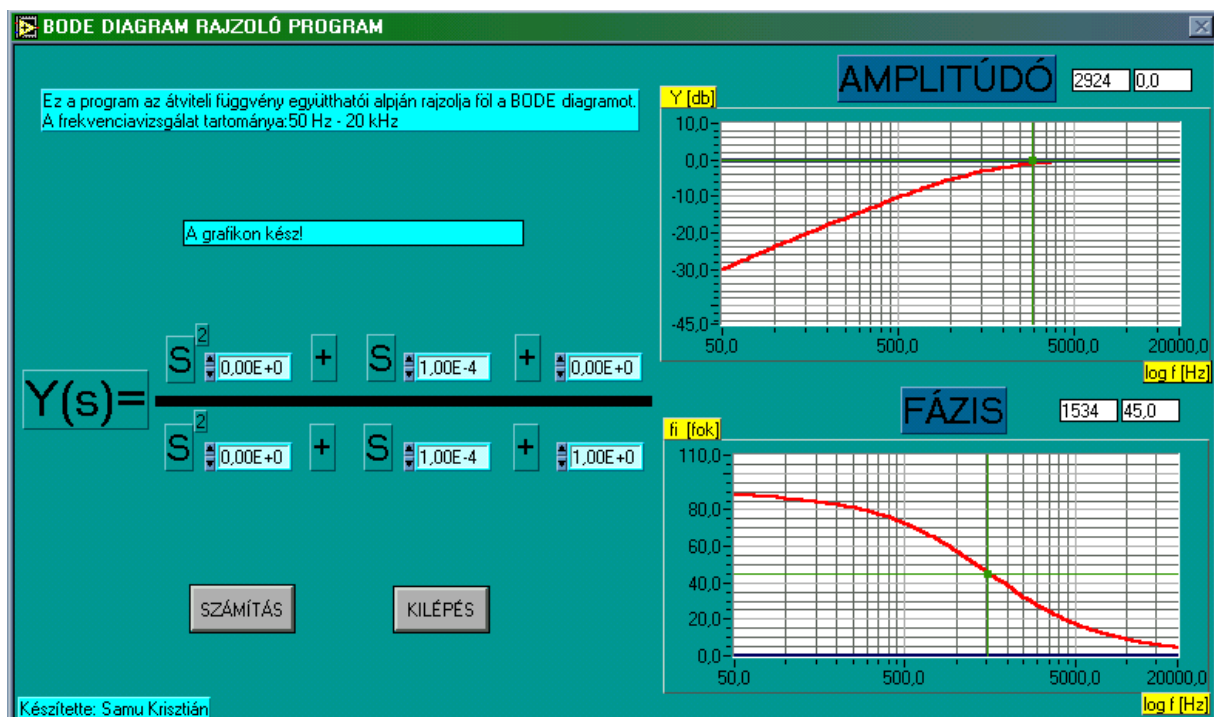
C áramkör-26. ábra



24. ábra



25. ábra



26. ábra

8.4 Az eredmények értékelése

Mindhárom esetben összehasonlítva a mért és számított diagramok jól illeszkednek egymáshoz. Az aluláteresztő szűrő (A) esetében a jellegzetes pont a diagramon a vágási frekvencia, ez a pont mind a mért, mind a számított esetben 500 Hz szűk környezetében van.

A lengő tag esetében (B) a rezonancia frekvencia mindkét esetben 700 Hz körüli, a C esetben lévő vágási frekvencia pedig egyaránt 3000 Hz. Az A és C esetben a fázis diagramok elején található „szálkásság”, a kis frekvencián való gerjesztés esetén az oszcilloszkópnál fellépő hibával magyarázható.

Mindhárom mért esetben 20 dB/dekád a vágási egyenes. Ez is megfelel a számított értékeknek.

Megállapítható tehát a PC vezérlésű oszcilloszkópos frekvenciamenet mérés helytállósága és pontossága. A további 7 doboz kapcsolási rajza és mérési eredményei a 4. mellékletben található meg.

10. Szakirodalom

- Ervin Samal: A gyakorlati szabályozástechnika alapjai
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- Nagy István: Elektrotechnika (előadási segédletek)
BME Automatizálási Tsz., Budapest, 1979.
- Petrik Olivér, Huba Antal, Szász Gábor: Rendszertechnika
Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- Szabó Imre: Rendszer- és irányítástechnika
Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
- Sztrancsik Zsolt: Rendszer- és irányítástechnika példatár
Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1996.