A lock-in elv
Mérés számítógépes lock-in erősítővel

Berta Miklós

1. Elméleti összefoglaló

Igen gyakran találkozunk a méréstechnikában azzal a problémával, hogy nagyon kis feszültségszinteket kellene megmérnünk.(nV–μV) Az első ami eszünkbe juthat, hogy a jelet felerősítjük. Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy a legjobb erősítők is rendelkeznek valamilyen input–zajjal.

Tegyük fel, hogy 10 nV-os jelszintet szeretnénk megmérni. Az erősítőnk legyen alacsony bemeneti zajú, mondjuk legyen a bemeneti zaja: $5\,\mathrm{nV}/\sqrt{Hz}$. Az erősítő sávszélessége legyen 200 kHz, és erősítése pedig legyen 1000–szeres.

Tehát az erősítő kimenetén a bemeneti jel ezerszeresét kapjuk, ami 10 μV. Nézzük mi történik az erősítő saját zajával. Természetesen az is felerősödik. Mivel a kimeneti zaj:

$$N_{ki}=N_{be}\cdot\sqrt{sávszélesség}\cdot Erősítés$$

így az erősítő kimenetén mérhető saját zaj szintje 2,2 mV. Látjuk, hogy ebben esélyünk sincs a felerősített mérendő jelet kimutatni. Ha lecsökkentenénk az erősítőnk sávszélességét, a kimeneti zaj is jelentősen csökkenne. (Ekkor persze nem a teljes bemeneti jelet fogjuk erősíteni, hanem annak csak az erősítő frekvenciasávjába eső részét). Csináljunk tehát olyan erősítőt, amely csak *egyetlen* adott frekvencián erősít. Az ilyen erősítőket nevezzük lock–in erősítőknek. Ezekkel – adott frekvencián – nagyon kicsiny, zajjal fedett jelek is kimutathatók.

1.1 A lock–in elv

A lock-in erősítő olyan típusú méréseknél használható, amikor valamilyen fizikai rendszer válaszát kívánjuk megmérni egy kívülről beadott jel hatására. Jelölje a továbbiakban a fizikai rendszerre adott jelet $u_{ref}(t)$ („referencia jel”). Mivel a sávszélesség csökkentése a cél, ezért ideális esetben a jelben csak egyetlen frekvencia szerepel, azaz a referencia jel tisztán harmonikus:

$$u_{ref}(t)=U_r\sin(\omega_r t+\theta_r) \qquad 1)$$

Legyen $u_{sig}(t)$ a rendszerünk válaszjele. Lock-in erősítőnk számára ez lesz a bemenő, „mérendő” jel. Egy pillanatra tegyük fel, hogy ez is tisztán harmonikus. Ezzel nem sokat rontunk az általánosságon, mivel minden jel felbontható harmonikus összetevők szuperpozíciójára. Tehát a válaszjel:

$$u_{sig}(t)=U_s\sin(\omega_s t+\theta_s) \qquad 2)$$

Szorozzuk meg a „válaszjel”-függvényt a referencia-függvénnyel!

$$u_{sig}(t)\cdot u_{ref}(t)=\frac{1}{2}U_sU_r(\cos((\omega_s-\omega_r)t+(\theta_s-\theta_r))-\cos((\omega_s+\omega_r)t+(\theta_s+\theta_r))) \qquad 3)$$

Látható, hogy az eredmény két harmonikus függvény összege, amelyek frekvenciái $(\omega_s-\omega_r)$, ill. $(\omega_s+\omega_r)$. Miután mindkét függvény harmonikus, hosszú időre vett átlaguk nulla, ***kivéve, ha*** $(\omega_s-\omega_r)=0$, mert ekkor az első függvény időtől független konstans lesz, és így az átlaga is konstans.

Az „átlagolást” az elektronikában egy „integráló áramkörön” (alul-áteresztő szűrőn) való átvezetéssel

valósíthatjuk meg. A fentiek alapján nullától különböző eredményt csak akkor kapunk, ha $\omega_s=\omega_r$. Ebben az esetben az átlagolás utáni eredmény:

$$X=\frac{1}{2}U_sU_r\cos(\theta_s-\theta_r) \qquad 4)$$

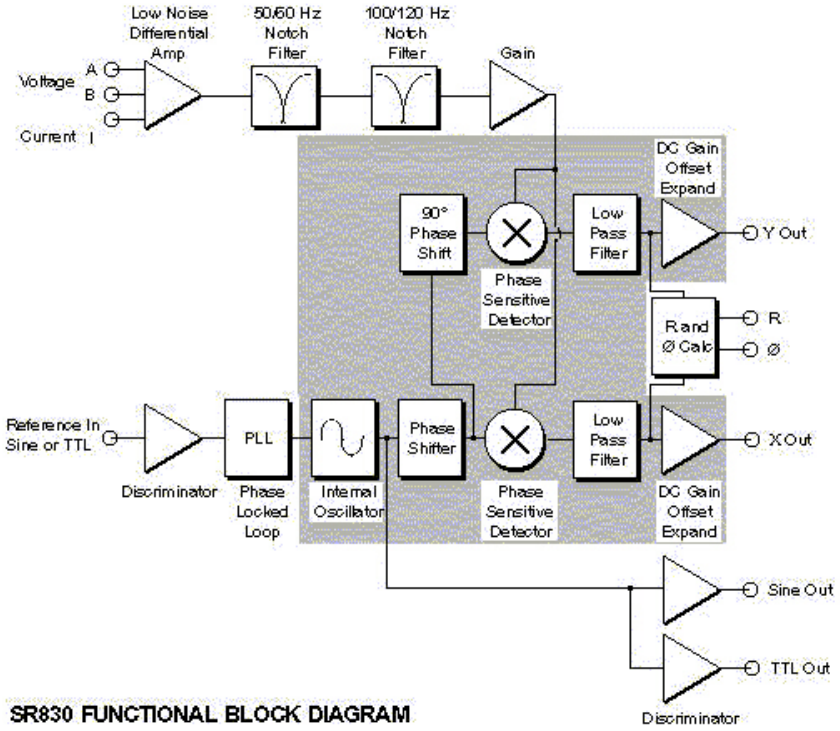
Ez az összefüggés jelenti a lock–in erősítők működésének lényegét. A mérendő válaszjelet szorozzuk meg a rendszer lekérdezésére használt harmonikus referenciajellel, majd a kapott szorzatot vezessük át egy alul-áteresztő szűrőn. Ennek kimenete az időtől független mennyiség lesz, amelyik arányos a mérendő jel amplitúdójával és függ a mérendő jel és a referenciajel fázisainak különbségétől. A két jel fáziskülönbségének változtatásával megkereshető a lock–in erősítő kimenetének maximuma, amiből a mérendő jel amplitúdója már könnyen meghatározható.

Látható, hogy nagyon fontos, hogy a mért jel és a referenciajel fáziskülönbsége időben állandó legyen. Ennek biztosítására két módszer is használatos. Az egyik módszer akkor használható, ha a mérendő rendszerben már úgyis működik valamilyen „belső” jelgenerátor, amelyre a mérendő rendszer „válaszjelet” ad. Ilyenkor az adott mérési összeállításból vehetjük a „referenciajelet”, s a lock-in erősítő csak a szorzást és az átlagolást valósítja meg. (Megjegyezzük, hogy általában ilyenkor is szükség van egy „megfelelő minőségű” referencia-jelre, ezért a lock-in erősítő tartalmaz egy jelgenerátort, azt azonban – az időben állandó fázisviszonyok biztosítása érdekében - szinkronizálni kell a mérési összeállításból jövő „referenciához”. Ilyen szinkronizációt valósít meg az 1. ábrán látható kapcsolásban a PLL áramkör). A másik lehetőség, hogy a lock-in erősítő szolgáltatja a referenciajelet, s azzal „kérdezzük le” a mérendő fizikai rendszert. A mai mérésben mi ezt a második típusú megoldást fogjuk követni.

Természetesen nem készíthető olyan alul-áteresztő szűrő, ami csak az egyenáramú összetevőt engedi át, a váltóáramúakat pedig teljesen kiszűri. Emiatt az erősítőnk sávszélessége sem lesz nulla, s így a zaj is erősödik. Ez szab alsó határt a még kimutatható jelszintre. Az integrálási időállandó növelése (a szűrő sávszélességének csökkentése) javítja a jel/zaj viszonyt.

Lock-in analizátor

Az 1. ábra egy valóságos, professzionális digitális lock–in erősítő működési sémáját mutatja olyan mérési elrendezésnél, amikor a referencia jelet kívülről adjuk a lock-in erősítőre.



SR830 FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

1. ábra: Egy valódi lock–in erősítő sémája

Látható, hogy a fent leírtak itt megkettőzve jelennek meg. Ennek oka, hogy itt egy dual–phase erősítő (lock-in analizátor) kapcsolását látjuk. Ez annyiban különbözik a fent leírtaktól, hogy lehetővé teszi az erősítő kimenetének függetlenítését a referenciajel és a mért jel fáziskülönbségétől. Ezt úgy lehet elérni, hogy egy másik csatornában a jelet a referenciajelhez képest éppen 90 fokos fáziseltolású másik referenciajellel szorozzuk, így az átlagolás után itt a kimenet:

$$Y=\frac{1}{2}U_sU_r\sin(\theta_s-\theta_r) \qquad 5)$$

Könnyen belátható, hogy:

$$R=\sqrt{X^2+Y^2}=\frac{1}{2}U_sU_r \qquad 6)$$

s ez pedig már nem függ a fáziskülönbségtől.
A kétcsatornás (dual – phase) elrendezés lehetőséget ad a fáziskülönbség meghatározására is.

$$\theta_s-\theta_r=\arctan(\frac{Y}{X}) \qquad 7)$$

1.2 Rezonancia mérése lock-in erősítővel

Tudjuk, hogy vannak olyan fizikai rendszerek, amelyek az őket érő külső hatások egyes speciális értékeire nagyon érzékenyen reagálnak. Ez akkor fordul elő, amikor a rendszernek van valamilyen - átvitt értelemben vett - sajátfrekvenciája („rezonanciája”), és a gerjesztés a rendszer sajátfrekvenciájának közelébe esik. (Azért írtuk, hogy „átvitt értelemben”, mert ez nem szükségképpen valamilyen frekvencia, lehet más fizikai paraméter is). Ez azt jelenti, hogy az ilyen fizikai rendszerek válasza (y) a következő módon függ egy ilyen külső fizikai paramétertől (x):

$$y_{out}=\frac{1}{(x_{in}-x_0)^2+\frac{\Delta^2}{4}} \qquad 8)$$

y_{out} - a rendszer válasza
x_{in} - valamilyen, a rendszer körülményeit jellemző fizikai mennyiség
x_0 - a rezonancia helye (a fenti paraméter egy adott értéke)
Δ - a rezonanciagörbe félértékszélessége (dimenziója /mértékegysége/ ugyanaz, mint x paraméteré)

A fenti rezonanciagörbét **Lorentz – féle rezonancia**görbének nevezzük. Látható, hogy $x_{in} = x_0$ esetében ennek a görbének maximuma van.

Lock – in erősítővel a rezonanciagörbe alakja kimérhető[1]. Ehhez biztosítani kell, hogy a kimenet időben

[1] Az ún. Elektronspin Rezonancia- Abszorpció (ESR) ilyen rezonanciagörbék kimérését követeli meg. Ha egy „szabad” elektronspineket is tartalmazó mintát állandó B_0 mágneses térbe helyezünk, az elektronok egy része - mágneses momentumuk miatt – „beáll” a tér irányába. Az elektronok mágneses momentumát azonban a mintára adott nagyfrekvenciás (mikrohullámú) elektromágneses térrel „át lehet fordítani”, s a mágneses momentumok egy magasabb energiájú, a térrel „szemben” álló állapotba kerülnek. Az ehhez szükséges energiát a minta a mikrohullámú üregrezonátorban kialakult térből veszi fel, azaz abszorbeál. Adott (rögzített) mikrohullámú frekvencia mellett ez a „rezonancia-abszorpció” azonban csak egy jól meghatározott B_0 mágneses térnél következik be. Az abszorpció a mikrohullámú tér intenzitásának kicsiny csökkenésével jár. Ha tehát a mikrohullámú tér intenzitását a mintára adott homogén mágneses tér függvényében ábrázolnánk, egy „fejjel lefelé” álló rezonanciagörbét kapnánk, amelynek a minimális intenzitású helye éppen a B_0 mágneses térnél van. Ez az elnyelés azonban olyan kicsiny, hogy a jelenlevő zajok teljesen elfedik ezért „közvetlen” módszerekkel lehetetlen kimérni. Moduláljuk azonban a mintára adott mágneses teret valamilyen alacsonyfrekvenciás jellel! A mágneses tér pillanatnyi értékétől függően más és más lesz az abszorpció pillanatnyi értéke is. Ez azt jelenti, hogy az időben változó abszorpció miatt a mikrohullámú tér detektorai is időben változó

változó legyen. Ehhez gerjesszük a rendszert a következő bemeneti jellel:

$$x_{in}(t) = A_0 + A_1 \sin(\varpi t + \theta) \qquad 9)$$

Ilyen gerjesztés esetében a kimenet is időfüggő lesz, így semmi akadálya annak, hogy lock–in erősítővel mérjük meg. Ha az A_0 paramétert egy olyan intervallumon „sepertetjük” végig, amely tartalmazza az x_0 rezonanciahelyet, akkor a rezonanciagörbe kimérhető.

Ezt a módszert akkor célszerű alkalmaznunk, amikor a kimeneti jel zajjal fedett, így a rezonancia miatt bekövetkező erősítés még mindig kisebb hasznos jelet eredményez, mint a zaj. A kimért rezonanciagörbe alapján a rezonanciahely és a görbe félérték-szélessége is meghatározható.

2. A számítógépes lock-in erősítő ismertetése

Számítógépes lock–in erősítőnk olyan szimulációs program (készítette Dr. Sükösd Csaba), amelyik három panelből áll:

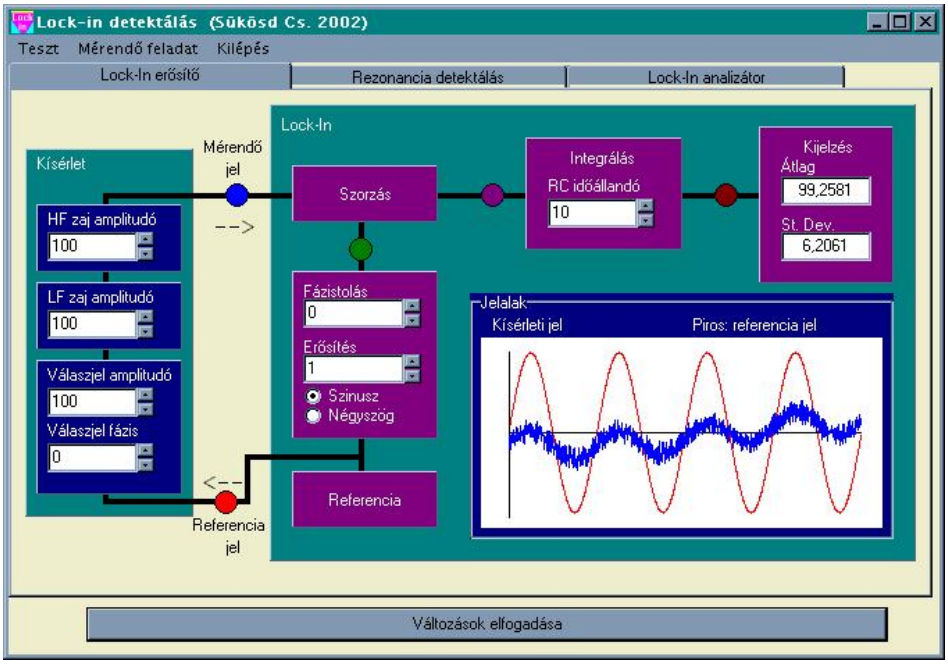
- Lock– in elv demonstrációja
- Rezonancia – abszorpció mérésének demonstrációja
- Lock – in analizátor (dual–phase lock-in) demonstrációja

Minden panelben lehetőség van arra, hogy „teszt-üzemmódban” megismerkedjünk az egyes paraméterek változásainak hatásával. Ez után egy mérendő feladat következik, amikor is egy ismeretlen rendszer referenciajelre adott válaszának paramétereit kell meghatároznunk. Minden panelen vannak grafikus elemek, amelyek általában jelek időfüggvényeit mutatják (mintha egy oszcilloszkópon néznénk a jeleket). A paneleken lévő színes köralakú „mérőpontokra” való kattintással választhatjuk ki azokat a jeleket, amelyeket az „oszcilloszkópon” meg szeretnénk vizsgálni. Az egyes kezelőszerveken beadott változtatásokat a panel alján lévő széles nyomógombbal lehet „érvényesíteni”.

2.1 Lock – in elv

A lock–in elvet demonstráló panel a 2. ábrán látható.

jelet fognak adni. Persze ez a váltakozás is olyan kicsi, ami hagyományos eszközökkel kimutathatatlan. Mivel azonban a mikrohullámú tér intenzitásának váltakozása szoros (fázis)kapcsolatban áll a moduláló mágneses térrel, ezért a detektálásra lock-in technikát alkalmazhatunk, s így ez a változás mérhetővé válik. A lock-in technika teszi tehát lehetővé a rezonancia-abszorpció kimérését. Az ESR csak egy példa a lock-in technika alkalmazására, a gyakorlatban nagyon sokfelé alkalmazzák még ezt a különlegesen érzékeny mérési módszert.

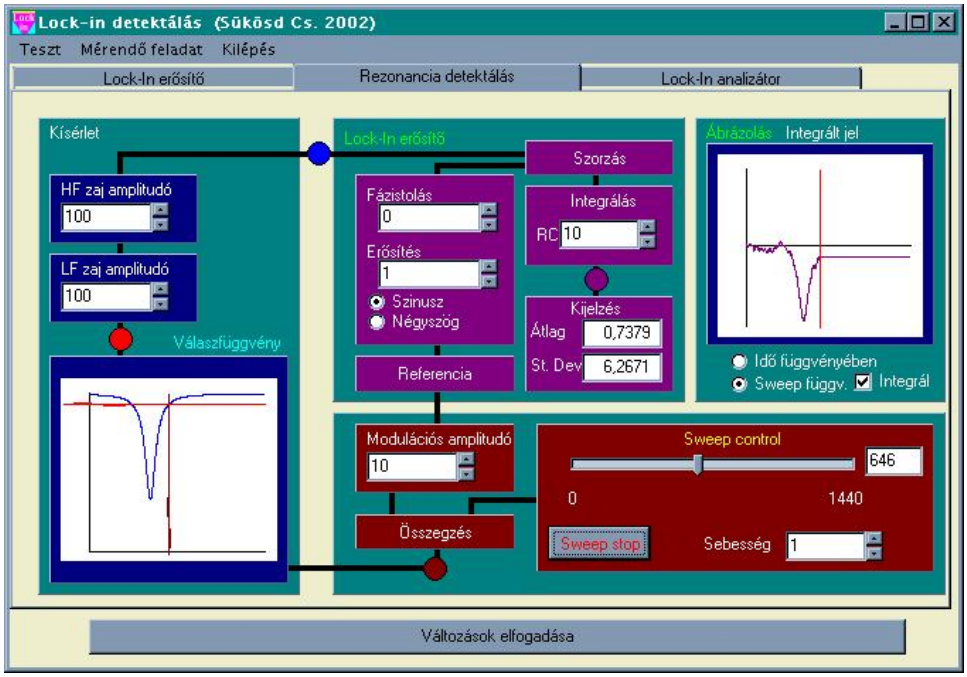


2.ábra A lock–in elvet demonstráló panel

A panel jobb oldali blokkja maga a lock-in erősítő, a bal oldali blokk pedig a fizikai „kísérlet”. A fizikai rendszert a lock-inból származó referencia jellel lekérdezzük (ld. alul), mire a rendszer valamilyen jellel válaszol. A „kísérletről” csak annyit tudunk, hogy a referenciajelre adott „válaszhoz” hozzákeveredik valamekkora nagyfrekvenciás (HF), ill. alacsonyfrekvenciás (LF) zaj. A „teszt” üzemmódban lehetőségünk van megvizsgálni az egyes komponensek hatását. A referenciajelet (amely mindig szinuszos) használjuk a *Szorzás* modulban is. Itt lehetőség van arra, hogy a referenciajelből a „*Szorzás*” modulra jövő jel alakját megváltoztassuk. Választhatunk harmonikus jelalakot, vagy négyszögjelet (egyes „hardware” Lock-in erősítők is ezt teszik). Érdemes megvizsgálni ezen jelalakok hatását a lock–in erősítő kimenetére. Az integráló modulban az aluláteresztő szűrő időállandóját állíthatjuk be. A lock–in kimenetét kétféle módon követhetjük nyomon: numerikusan és grafikusan. A panel tanulmányozásakor érdemes jól megfigyelni az egyes állítható paraméterek kimenetre gyakorolt hatását.

2.2 Rezonancia – abszorpció panel

A rezonancia – abszorpciót demonstráló panel a 3. ábrán látható.

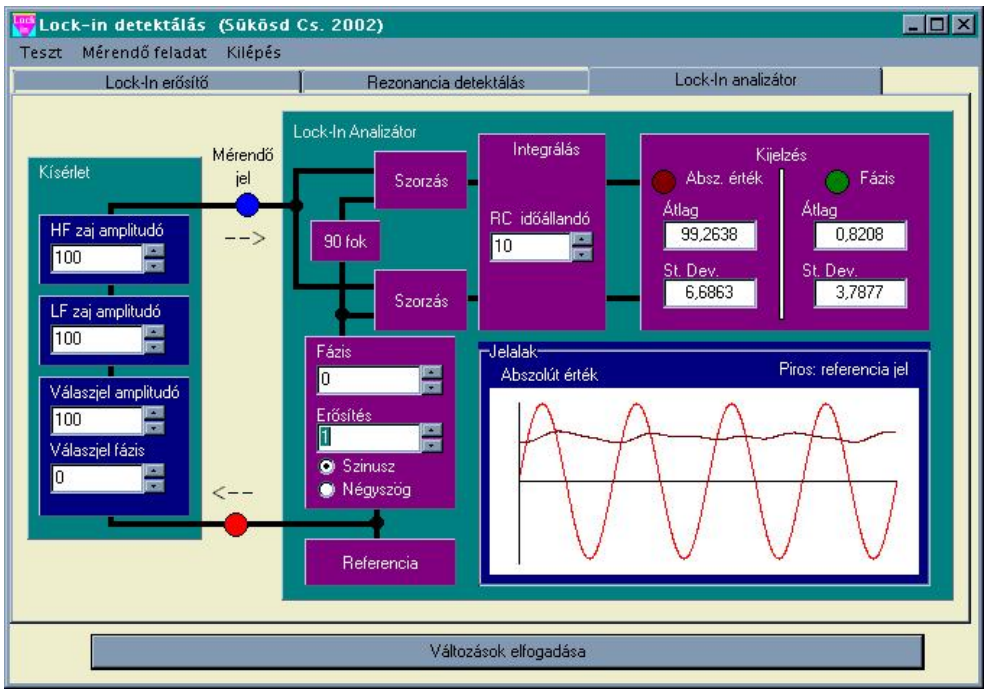


3.ábra Rezonancia – abszorpciót demonstráló panel

Itt is megtalálható a „*lock-in erősítő*” blokk, és a „*kísérlet*” blokk, de most a kísérleti válasz bonyolultabb, mint az előző esetben, mert egy „lefelé fordított” rezonanciagörbe határozza meg (gondolhatjuk ezt akár egy ESR készülék szimulációjának is /ld. fentebb/). Az ábra mutatja, hogy hogyan alakul ki a rendszerre adott referenciajelből a – néha különleges alakú - válaszjel. Feltűnik, hogy van egy harmadik blokk is, a „*Sweep control*” blokk. Itt a (9) egyenletben szereplő A_0 paraméter értékét tudjuk beállítani. Ezt akár „kézzel”, akár pedig automatikus sweepeléssel („söpörtetéssel”) is megtehetjük. Ha automatikus sweepet használunk, annak a sebességét is megválaszthatjuk. A panel jobb oldalán szintén megtaláljuk az „oszcilloszkópot”, ezúttal azonban a jelek időfüggvényei mellett a kijövő jel amplitúdójának „sweep”-paramétertől való függését is kirajzolhatjuk. Sőt, a program lehetőséget ad ennek a jelnek az integrálására is (ez nem keverendő össze a lock-inban szükségszerűen alkalmazott időszerinti integrálással !!!) A „*Sweep függv.*” üzemmódban az ábrára kétszer kattintva egy nagyobb ablak jelenik meg, amelyben „finomabb” méréseket is végezhetünk, és kirajzoltathatjuk, vagy fájlba menthetjük az adatokat (pl. más programokkal való feldolgozás céljából).
A panel további elemei magukért beszélnek, talán nincs szükség a körbemagyarázásukra. Egyedül arra hívjuk fel a figyelmet, hogy a modulációs amplitúdó értéke nagymértékben befolyásolja a kimenet alakját, így ennek hatását érdemes tüzetesebben megvizsgálni. Hasonlóan érdekes az időszerinti integrálási idő és a sweepelési sebesség megválasztásának tanulmányozása (próbáljunk pl. hosszú integrálási időt és gyors sweepelést választani).

2.3 Lock – in analizátor

A *Lock – in analizátor* panel a 4. ábrán látható. Az előzőek alapján az egyes kezelőszervek magyarázatára már nincs szükség. Annyit jegyzünk csak meg, hogy a fázisszög-tartományt a program [-180,180] terjedő intervallumban jelzi ki.



4.ábra Lock – in analizátor

3. Ellenőrző kérdések

1.Mely paraméter állításával lehet javítani a jel – zaj viszonyt?
2.Milyen hatással van az integrálási idő a kimeneti értékek szórására?
3. Milyen lépésekből áll egy lock-in erősítővel történő mérés? (nem dual lock-in!)
4.Változik-e a mért amplitúdó értéke, ha szinusz függvény helyett négyszögjelet használunk szorzó függvényként? Ha nem, akkor miért nem, ha pedig igen, akkor milyen kapcsolat van a két érték között?
5.A rezonancia–abszorpció kimérésekor a kimeneti jelalak (sweep szerinti integrálás kikapcsolva) a Lorentz–görbe deriváltjának tűnik. Miért? Mindig így van ez? Mi a feltétele annak, hogy ez így legyen?

4. Mérési feladatok

1.Tanulmányozza a *lock–in elvet* demonstráló panelen az egyes állítható paraméterek hatását a mérés kimenetelére! Tapasztalatait foglalja össze!
2.Határozza meg a mérendő feladatban az ismeretlen kísérleti jel amplitúdóját és fáziseltolódását a referenciajelhez képest! Irja le a mérés egyes lépéseit, a „nyers” mérési adatokat és következtetéseit.
3.Tanulmányozza a „*Rezonancia–abszorpció*” panelen az egyes állítható paraméterek hatását a mérés kimenetelére! Tapasztalatait foglalja össze!
4.Határozza meg a mérendő feladatban a rezonancia–abszorpció helyét, valamint a rezonanciagörbe félérték-szélességét. Irja le a mérés egyes lépéseit, a „nyers” mérési adatokat és következtetéseit.
5.Határozza meg a „*Lock–in analizátor*” panelen a mérendő feladatban az ismeretlen kísérleti jel amplitúdóját és fáziseltolódását a referenciajelhez képest. Irja le a mérés egyes lépéseit, a „nyers” mérési adatokat és következtetéseit.