

SZEIZMIKUS DIGITÁLIS MŰSZEREK

JACK H. VEASAW – RALPH A. HARRIS

J. H. VEASAW – A. HARRIS

SEISMIC DIGITAL INSTRUMENTS

The limits of analog recording systems are confronted with the advantages of modern digital recording, mainly from the point of view of data processing on digital computers. The differences of these systems are demonstrated by laboratory test records. The necessity and importance of an increased dynamic range are emphasized. Also the requirements to be satisfied in order to utilize the characteristic advantages of digital recording are discussed.

ДЖ. Х. ВИСО – Р. А. ХЭРРИС

О ЦИФРОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

Ограничения аналоговых регистрирующих систем противопоставляются преимуществам современной цифровой регистрации, в основном с точки зрения возможности обработки данных на ЭВМ. Различия обоих видов регистрации иллюстрируются записями, полученными в лабораторных условиях. Подчеркивается необходимость и значение расширения динамического диапазона. Рассматриваются требования, которые должны быть выполнены для использования характерных преимуществ цифровой регистрации.

A szeizmikus módszert alkalmazó kutató geofizikusok ismerik azt a három követelményt, amelyek alapvetőek az esetleges kóolajtelepek lokalizálása szempontjából.

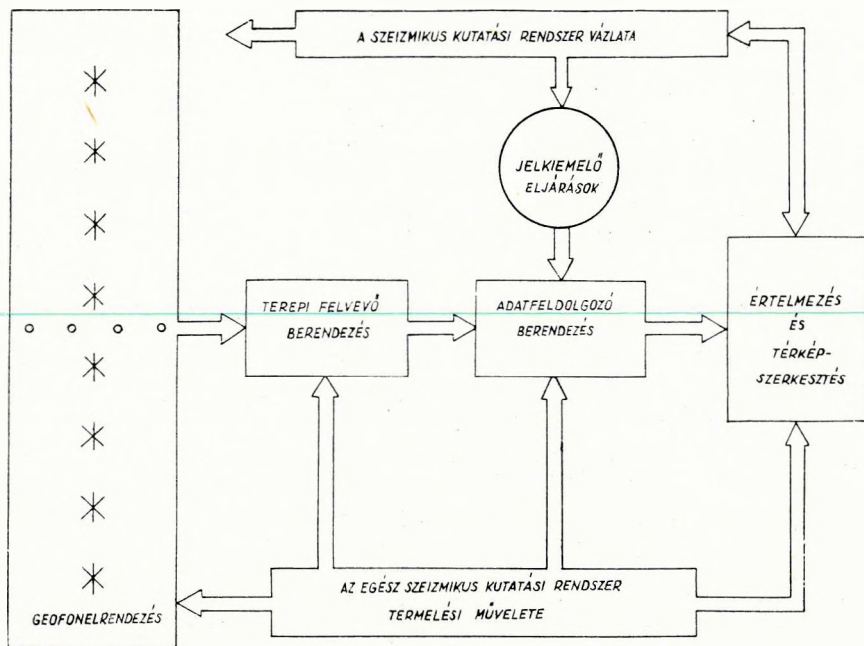
a) Optimális terepi eljárások kiválasztása, hogy maximális mennyiségű értékes információ jusson a geofonokhoz.

b) Ennek az információnak tiszta, hű és olyan alakban való regisztrálása, hogy maximálisan értelmezhető jeleket nyerjünk.

c) Hatékony, pontos feldolgozás a maximális információ érdekében és az adatoknak ábrázolása a kiértékelésre legalkalmasabb alakban.

A három tényező – a terepi mérések, az adatregisztrálás és adatfeldolgozás – szerves összefüggésben áll egymással (1. ábra), és az egyiket érintő korlátozások komoly mértékben szűkítik a másik kettő hatékonyságát.

A statisztikai információelmélet alkalmazását szeizmikus célokra 1950-re már szilárdan megalapozták, de műszakilag és gazdaságilag alkalmas számítógépek még nem álltak rendelkezésre. A kereskedelmi, vagy könyvelési célokat szolgáló számítógépeknek – mint ma sem – akkor sem volt meg a kapacitása és sebessége, amely feltétlenül szükséges a szeizmikus problémákkal kapcsolatos adatmennyiség hatékony feldolgozásához. Az akkoriban rendelkezésre álló általános célú, kutatási típusú számítógépek már csaknem elég gyorsak voltak, de híjával annak a specializált megszervezettségnek, amely ahhoz kell, hogy gazdaságosan birkózzanak meg a megkívánt teljesítménnyel (ahogyan ma ezt teszik).



1. ábra. Teljes szeizmikus kutatási rendszer

Fig. 1 Total seismic exploration system

Фиг. 1. Полная сейсморазведочная система

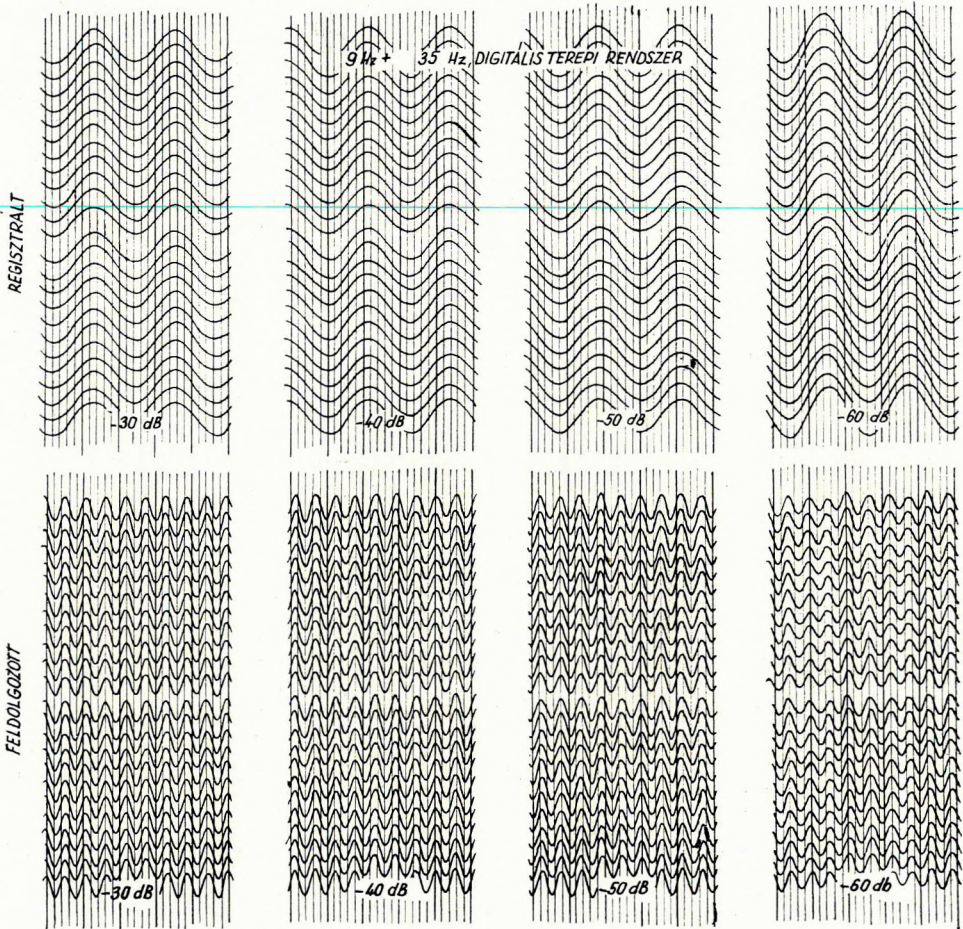
A TIAC 827 1960. évi bevezetése legyőzte a korlátozásokat és a digitális technika pontosságának és hajlékonyságának felhasználása a szeizmikus kutatásban megvalósult. Ez a körülmény a terepi eljárásokat és az adatrögzítést helyezte előtérbe és ezekkel szemben állított új követelményeket.

Adatrögzítés

Az 1953 és 1960 közötti időszakban a kutatás elsősorban nagy szerkezetekre irányult, így a direkt (ún. *AM*) regisztrálók és *FM*-regisztrálók minőségi korlátai nem jelentettek komoly korlátozásokat kőolajfelderítési képességük szempontjából. Valóban sok gazdaságilag jelentős kőolajmezőt találtak olyan műszerekkel, amelyek a mai színvonalhoz képest már primitívnek tekinthetők. De amint a „könnyen kimutatható” nagy szerkezetek száma csökkent, fokozódott a korlátozott specifikációjú analóg műszerek fontossága.

A direkt vagy *AM*-regisztrálók, a jelrögzítő közeg nem lineáris karakterisztikái következtében 3%-os torzításra és 45 dB dinamikartományra korlátozódtak. Az *FM*-rendszerek elkerülték a jelrögzítő közeg problémáit, de a továbbítási sebesség változásai miatt nem lehetett a torzítást 1% alá szorítani, a dinamikartományt pedig 55 dB fölé emelni.

E megszorítások eredményeinek grafikus példája látható a 2. és 3. ábrán. Ezek a próbafelvételek meghatározott mennyiségű szintetikus jel keverésének és szétválasztásának eredményeit mutatják.



2. ábra. Kísérleti szeizmogramok FM analóg regisztrálással

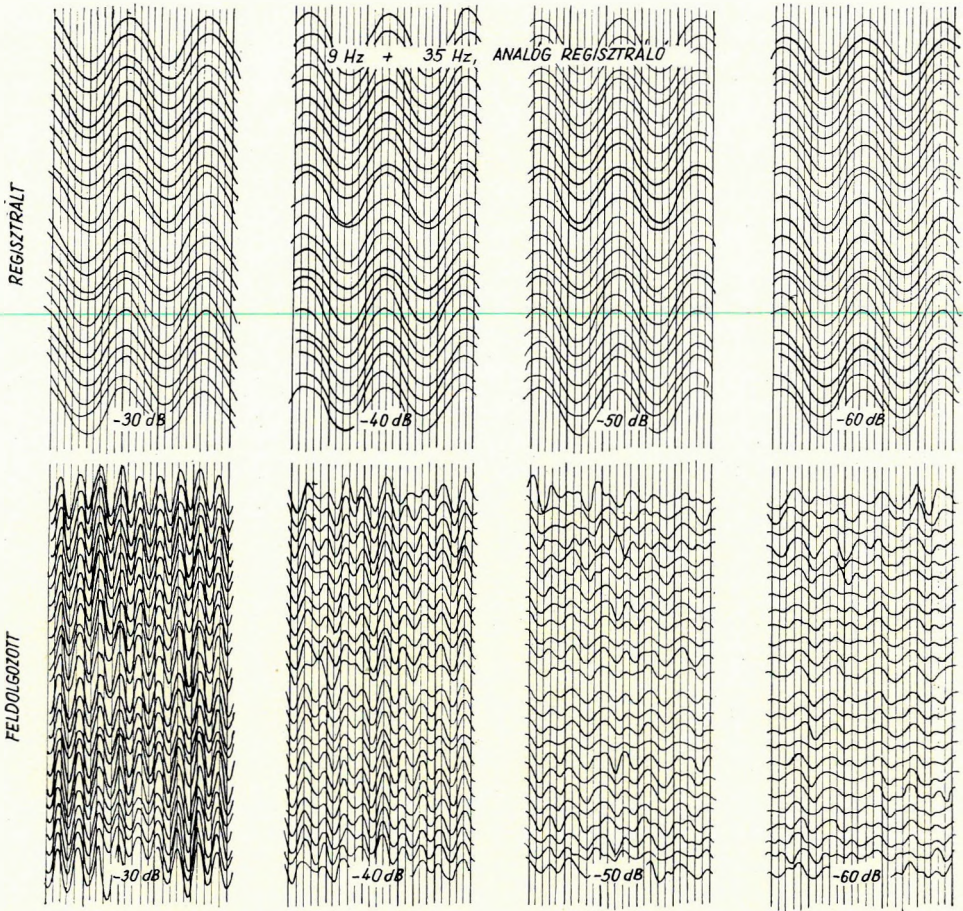
a) regisztrált, b) feldolgozott

Fig. 2 Experimental seismograms with FM analog recording

(a) as recorded, b) processed

Fig. 2. Экспериментальные сейсмограммы, записанные аналоговым регистратором с ЧМ
a) первоначальная запись, б) обработанная запись

A kvantitativ meghatározott komponensek szintetikus jeleit egy FM- (A regisztráló) és egy AM-regisztrálással (B regisztráló) vettük fel. A regisztrálások magukban foglalták a szintetikus jeleknek, vagyis a 9 Hz-es „talajnyugtalanlás”-nak és a 35 Hz-es „reflexiók”-nak áthaladását az ezen rendszereknél általában alkalmazott szeizmikus erősítőn. A felvételeket ezután digitáltuk és



3. ábra. Kísérelti szeizmogramok AM analóg regisztrálással
a) regisztrált, b) feldolgozott

Fig. 3 Experimental seismograms with AM analog recording
[a) as recorded, b) processed]

Fig. 3. Экспериментальные сейсмограммы, записанные аналоговым регистратором с AM
a) первоначальная запись, б) обработанная запись

az így kapott felvételt számítógépbe adtuk, ahol az uralkodóan kisfrekvenciás „talajnyugtalanág” kiszűrésére és a 35 Hz-es „reflexió” kiemelésére digitális sávszűrőt alkalmaztunk. A vizsgálat azt mutatja, hogy 40–50 dB-lel a zajszint alatti reflexiók (attól függően, hogy AM- vagy FM-rendszer-e) minden gyakorlati célra elvesznek. Röviden, ebben a példában a „reflexiók” az erősítőrendszer dinamikatartománya alatt vannak. Nem regisztrálódtak, így vissza sem nyerhetők.

A statisztikai jelkiemelési eljárások, mint pl. a stacking, kissé feljavítják a jeleket, de nem okoznak észrevehető javulást.

A nagy regisztrálási dinamikartomány értéke

Ezeknek a példáknak a gyakorlati geofizikai paralleljei rendkívül fontosak a kutató geofizikusok számára. A regisztrálandó jeleknek a regisztrálómű dinamikartományába kell esniök. Nem kívánt jelek (zajok) a hasznos jelekkel együtt bizonyos fokig mindig jelen vannak. Az erősítési fokot úgy kell beállítani, hogy a maximális jel – akár nem kívánatos, akár hasznos jel – ne legyen nagyobb annál a maximális szintnél, amelyet a regisztráló rögzíteni tud. A legkisebb regisztrálható jelet ekkor a regisztráló dinamikartománya szabja meg. Nehéz területeken a zaj gyakran többszörte nagyobb a hasznos jelnél. Megfelelő adatfeldolgozó eljárásokat használhatunk fel a zaj eltávolítására és a jel visszanyerésére. Ha a zaj-jel amplitudóviszony nagyobb a regisztráló dinamikartományánál, akkor semmiféle adatfeldolgozó eljárással sem tudjuk visszanyerni a jelet. Ez azért van így, mert a jel nem regisztrálódott; kisebb, mint a regisztrálható legkisebb jel és így elvesz.

Az adatfeldolgozó eljárások korlátozó tényezője tehát a terepi regisztráló műszerek dinamikartománya. Ezért értékes a nagy dinamikartomány, amely lehetővé teszi a már most rendelkezésre álló, vagy a jövőben kifejlesztendő adatfeldolgozási eljárások alkalmazását. Megjegyezzük, hogy a jelenleg általánosan alkalmazott adatfeldolgozó eljárások közül sok még meg sem volt akkor, amikor az első nagy dinamikartományú digitális terepi rendszert üzembe helyezték. Folyamatosan fejlesztenek ki új feldolgozó eljárásokat. Ha a terepi mérőrendszer elég nagy dinamikartományú, ezeket az adatfeldolgozó eljárásokat fejlesztésük ütemében alkalmazhatjuk.

A torzítás hatása

Az amplitudótorzulást (amelyet gyakran harmonikus torzulásnak neveznek) az analóg erősítőrendszer nonlinearitása okozza. A torzulás következtében a kimenő hullám olyan harmonikus frekvenciákat tartalmaz, amelyek nincsenek meg a bemenő hullámban. A torzulás a geofizikában különösen azért fontos, mert egy nagy amplitudójú, kisfrekvenciájú jelből eredő torzulás a reflexiós jelekkel azonos frekvenciájú és amplitudójú harmonikus jeleket hozhat létre. A felharmonikus amplitudója a felharmonikusok rendszámával általában gyorsan csökken. A legtöbb esetben a második és harmadik felharmonikus a legnagyobb amplitudójú és ezért elsőrendű fontosságú. Az erősítőáramkörök nem lineáris volta általában túlnyomórészt második felharmonikus torzulást okoz. A bemenő transzformátor csak páratlan rendszámú felharmonikusokat idéz elő, amelyek közül a harmadik felharmonikus dominál. A régebbi szeizmikus erősítőrendszerekre jellemző kétoldalas egyenirányítót alkalmazó AGC-áramkörtípus uralkodóan harmadik felharmonikus torzulást okoz.

Az erősítő torzítása csökkenti a regisztráló dinamikartományát. Példaként vegyünk egy 10 Hz-es zajt, amelynek 3%-os harmadik felharmonikus torzulása van. A harmadik felharmonikus amplitudója az alapharmónikusnak 0,03-a, más szóval 33,33 : 1 arányban van az alapharmónikus alatt; ez 30,5 dB-t jelent. A felharmonikus frekvenciája 30 Hz lesz, s annyira megközelítheti a hasznos jel frekvenciát, hogy lehetetlen szétválasztani őket. Ilyenkor a torzulás

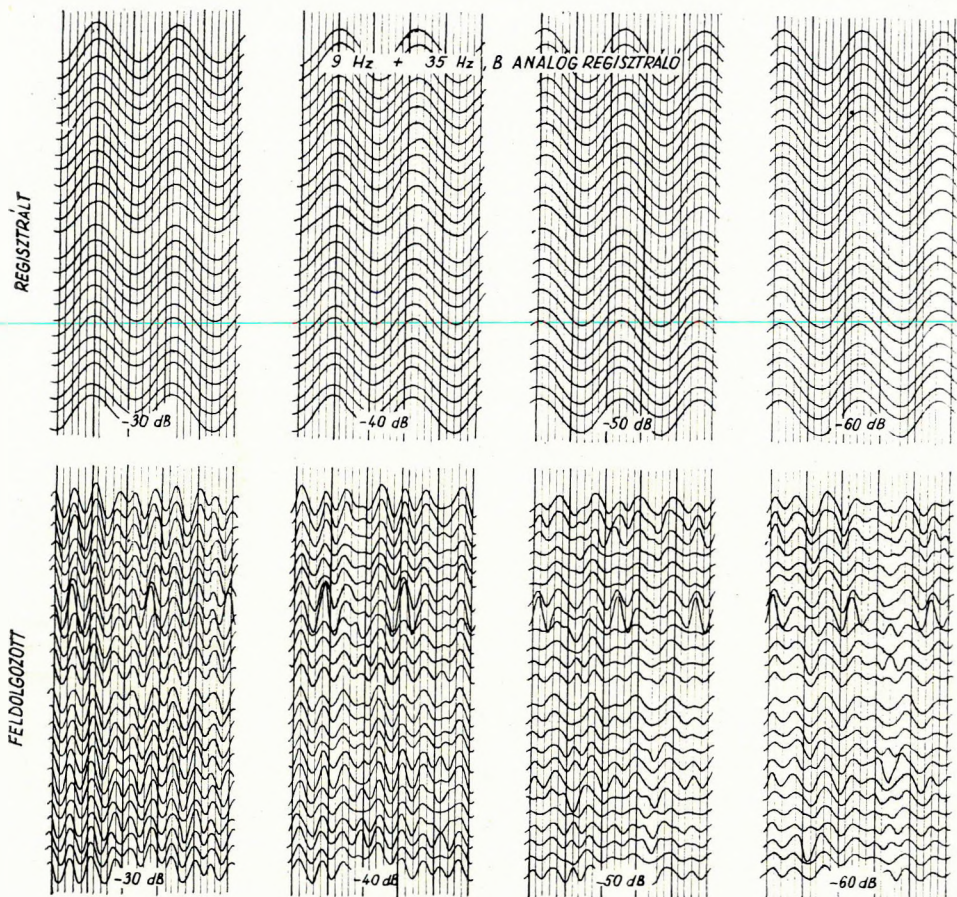
következtében a hasznos tartomány 30,5 dB-re csökken. Ideális esetben a torzítási tartalomnak sokkal alacsonyabbnak kell lennie, mint a regisztráló dinamikatartomány. Az alkotóelemek technológiája azonban még nem érte el azt a pontot, amikor a torzítás „legrosszabb esete” megfelel a korszerű digitális műszerekben elérhető dinamikatartománynak. A 0,1%-os torzítások 10 Hz-en általánosak (a kereskedelmileg beszerezhető digitális szeizmikus műszereknél az eddig elért legjobb szám 5 Hz-nél 0,1%), ez 1 ezrelék, tehát a felharmonikus tartalom 60 dB-lel csökken. Így azokon a területeken, ahol a zaj frekvenciája és amplitúdója olyan, hogy a keletkező felharmonikusok a reflexiókkal azonos frekvenciájúak, azt mondhatjuk, hogy a regisztrálórendszer dinamikatartománya 60 dB-re korlátozódik.

Digitális regisztrálórendszerek

Azt, hogy a korszerű digitális szeizmikus regisztrálórendszer dinamikatartománya jelentősen megnövekedett, részletesen szemlélteti a 4. ábra. Ebben a példában az előzőleg az *AM*- és *FM* regisztrálóra vázolt kísérleti eljárást ismételtük meg azzal a különbséggel, hogy a szeizmikus erősítő-regisztráló rendszer digitális volt. Helyszűke miatt a további vizsgálatot bemutatni nem tudjuk, de megjegyezzük, hogy míg az *AM*- és *FM*-regisztrálók egy bizonyos értékű jel-zaj viszonyt 40 ill. 50 dB-nél érnek el, a digitális rendszer ugyanezt az értéket 80 dB-nél éri el. Az észlelő szabályozásaira is számítva — amelyekre a legtöbb rendszernél szükség van — várható, hogy a felvétel időtartama alatt, a felvett jel kb. 60–80 dB-lel marad a „regisztráló zaja” felett. Így a jel tisztasága megmarad, tekintettel a regisztráló által bevitt zaj minimális szintjére. Minthogy a regisztráló csak számjegyeket regisztrál, önmagában egyáltalán nem járul hozzá a rendszer zajához. A digitális rendszerben a korlátozó zaj a regisztrálóról és a regisztrálási közegekről az analóg kezelő áramkörökre, a multiplexerre és a digitáló körökre tolódik át.

Jeltartomány

Figyeljük meg, hogy a fenti számoknak kevés közülük van a regisztrálendő jelek tartományához. Tegyük fel, hogy a geofonokról érkező maximális jel 100 mV és hogy az erősítő bemenő zaja 0,1 μ V. Ez 1 000 000 : 1 arány, azaz 120 dB. Az ebben a dinamikatartományban változó jeleket megfelelő erősítési tényező beállításával regisztráljuk, de nem valamennyit egyidejűleg. Feltéve, hogy a 15 bites konverterből származó adat olymódon kerül a regisztrálóhoz, hogy mind a 15 bit regisztrálható a mintavétel pillanatában, a regisztrálásnál 84,29 dB maximális elméleti dinamikatartomány érhető el. A gyakorlatban a regisztráló csak 80 dB jeltartományt regisztrálhat. Így regisztrálhatjuk a 100 mV és 10 μ V közötti jeleket, az 1 mV és 0,1 μ V közöttieket, vagy az e két szélső érték 120 dB közötti tetszőleges 80 dB tartományát. Az erősítőrendszerben megfelelő dinamikai erősítésszabályozást feltételezve, a regisztrálás ideje alatt, a rögzített jel közel teljes modulációban tartható, de a rendszer dinamikatartománya egy esetben sem haladja meg a gyakorlati 80 dB-es határt.



4. ábra. Kísérleti szeizmogramok digitális terepi regisztrálással
a) regisztrált, b) feldolgozott

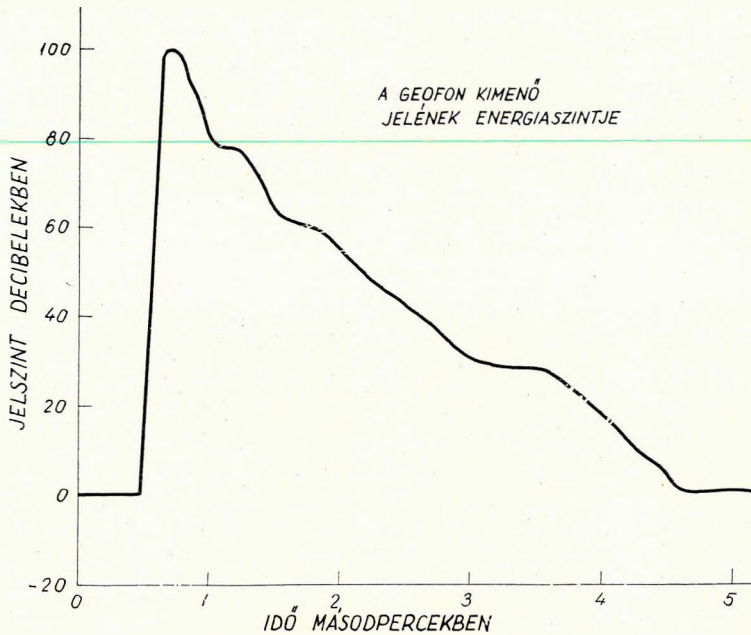
Fig. 4 Experimental seismograms with digital field recording
[a) as recorded, b) processed]

Фиг. 4. Экспериментальные сейсмограммы, записанные цифровым полевым регистратором
a) первоначальная запись, б) обработанная запись

Dinamikus erősítésszabályozás

A kutatott területtől és az alkalmazott energiaforrástól függően a regisztrálható jelek tartománya 90–100 dB-es is lehet. A nagyteljesítményű digitális típusú geofon bevezetésével a tartományok még nagyobbak is lehetnek. A mágneses regisztrálás bevezetését megelőző időszakban ezeket a jeleket úgy kellett összeszorítani, hogy megfeleljenek a monitor papírfelvétel 20 dB-es tartományának. A mágneses regisztrálás megjelenésével ennek a kompresszióknak még fontosabb eredménye az volt, hogy a jel messze a regisztráló zaja felett tartható.

A kompresszió az erősítőben úgy valósult meg, hogy a nagy jeleknél az erősítési tényezőt nagyon kicsire állították, a jel amplitudójának csökkenésével pedig egyre fokozták. Az erősítésszabályozás alkalmazása az 5. ábrához hasonló geofonlecsengési görbét a mágneses regisztráló tartományának megfelelően alakította ki (6. ábra).



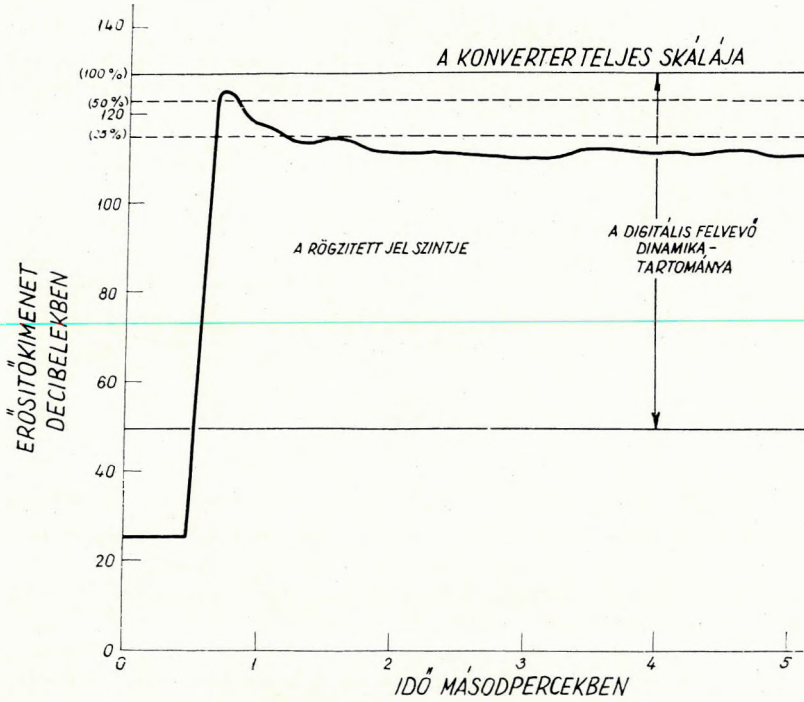
5. ábra. Geofonlecsengési görbe

Fig. 5 Geophone decay pattern

Фиг. 5. График затухания сейсмоприемника

Az erősítés minden esetben valamely alacsony, kézilleg kiválasztott kezdeti értékből indult ki, majd az idő függvényében, vagy egy előre meghatározott görbe mentén fokozódott, (mint pl. az a 7. ábra programozott erősítésszabályozásánál) vagy pedig egy olyan tetszőleges görbe mentén, amelyet a geofonlecsengési görbéje határozott meg (mint a 8. ábrán bemutatott kétoldalú egyenirányító típusú AGC-nél). Az erősítő által elért legnagyobb erősítési fokozatot a kézilleg kiválasztott végerősítés határozta meg.

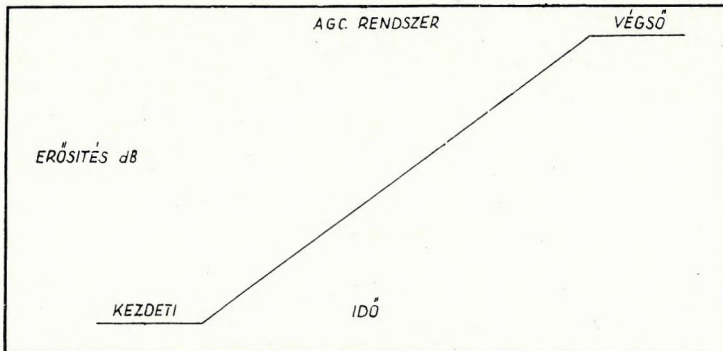
Mind a programozott, mind az automatikus erősítésszabályozás erősen korlátozott. Az erősítésváltoztatás programozásához ismernünk kell a geofonlecsengési görbéjét. Az ehhez szükséges kísérleti beszabályozás költséges és időigényes. Minthogy az erősítést maga a geofonlecsengési görbe határozza meg, ez nem jelent problémát az automatikus erősítésszabályozó rendszerekben. Ezt az előnyt azonban az így bevitt torzulás árán kapjuk meg, ez viszont komolyan korlátozza a rendszer dinamikatartományát olyan területeken, ahol a torzulás a reflexiók frekvenciatartományába esik.



6. ábra. Geofonlecsengési görbe az erősítőszabályozás után

Fig. 6 Geophone decay reshaped by utilizing gain control

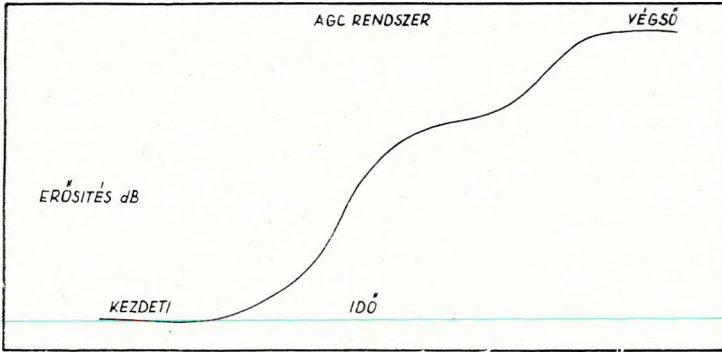
Фиг. 6. График затухания сейсмоприемника при применении регулировки усиления



7. ábra

Fig. 7

Фиг. 7.



8. ábra

Fig. 8

Фиг. 8.

A modern digitális rendszerek ezt az *AGC*-torzítást gyakorlatilag megszüntetik azzal, hogy regisztrálják az erősítő erősítési fokát, a valódi (amplitúdó-) jeleket pedig, a számítógépes feldolgozás alatt, inverz erősítési függvény alkalmazásával visszaállítják.

Mint előbb már rámutattunk, a jel/zaj-viszonynak az adatfeldolgozásban elérhető javulását csak a regisztráló dinamikatartománya korlátozza. Minthogy a torzulás hatással van a rendszer tényleges dinamikatartományára, az a pontosság, amellyel az erősítés ismert, jelentősen hathat a jel/zaj-viszonynak bármilyen adott számítógépes feldolgozással elérhető javulására.

Geofizikai szempontból ez azt jelenti, hogy ha egy adott földtani területen olyan zavarójelek lépnek fel, amelyeknek frekvenciaspektruma olyan, hogy a torzítás a reflexiós frekvenciatartományba esik, a jel/zaj-viszony elérhető maximális javulása 40 dB lenne, ha a regisztrált erősítés 1%-os pontosságú, ill. 60 dB, ha az 0.1% pontosságú volna.

A múltban kevés adatfeldolgozási eljárással lehetett 40 dB-es javítást elérni, de amint a programok bonyolultabbakká váltak, az erősítés pontossága mind fontosabb lett.

A pontosabb erősítés igényének felismerése vezetett a bináris erősítő kifejlesztéséhez.

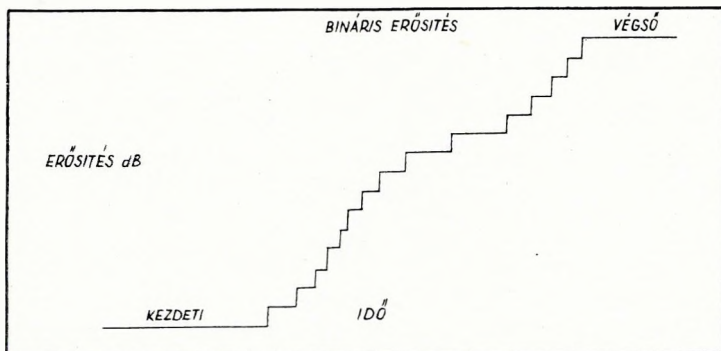
A bináris erősítő

Bár a régi programozott erősítésszabályozójú erősítőrendszereknek számos komoly műveleti hiányosságuk volt, az erősítést egészen pontosan lehetett meghatározni, mivel a változás általában előrelátható és reprodukálható volt. Azt a körülményt, hogy nem lehetett előrejelezni, miként viselkedik az erősítő erősítése az *AGC*-rendszerekben, a második generációs digitális rendszereknél azzal szüntették meg, hogy valamennyi erősítő azonosan reagál és azt méri, ami történt. E megoldásnak egy bizonyos mértékben kifogásolható mellékhatása az

volt, hogy mivel az erősítést egy „átlagos” geofonlecsengési görbe határozta meg, a felvétel kezdeti szakaszán a dinamikatarományban bizonyos veszteség következett be a hosszú terítések távoli csatornáin.

A bináris erősítési rendszerek erősítik a programozott erősítésszabályozás és az AGC legjobb tulajdonságait, vagyis a modern bináris erősítőkonstrukciókban az erősítés előrelátható és pontosan 6,02 dB fokozatokban reprodukálható. Az egyedi geofonlecsengési görbétől függ, hogy a fokozatok közül melyikre pontosan mikor kerül sor. A fokozatok elég kicsik, így gyakorlatilag nincs különbség köztük és az erősítés folytonos változása között.

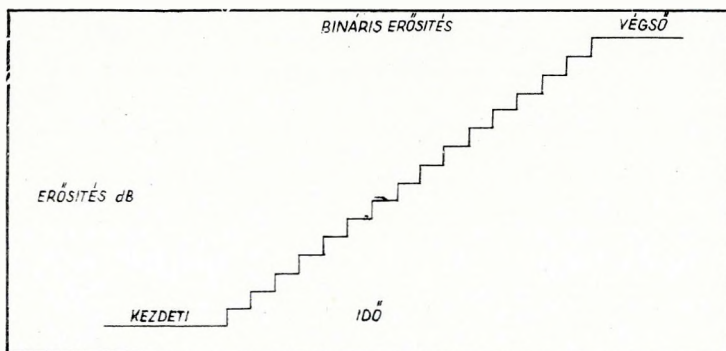
A papírra visszajátszott ellenőrző felvétel vizuális megítélése szerint a regisztrátumok azonosak. A 9. és 10. ábrák szemléltetik, hogyan változik az erősítő erősítése az idő függvényében. Ezek az ábrák a 7., ill. 8. ábrák bináris erősítési ekvivalensei. A 11. ábra az 5. ábrán bemutatott kimenő görbe bináris erősítésű ekvivalense.



9. ábra

Fig. 8

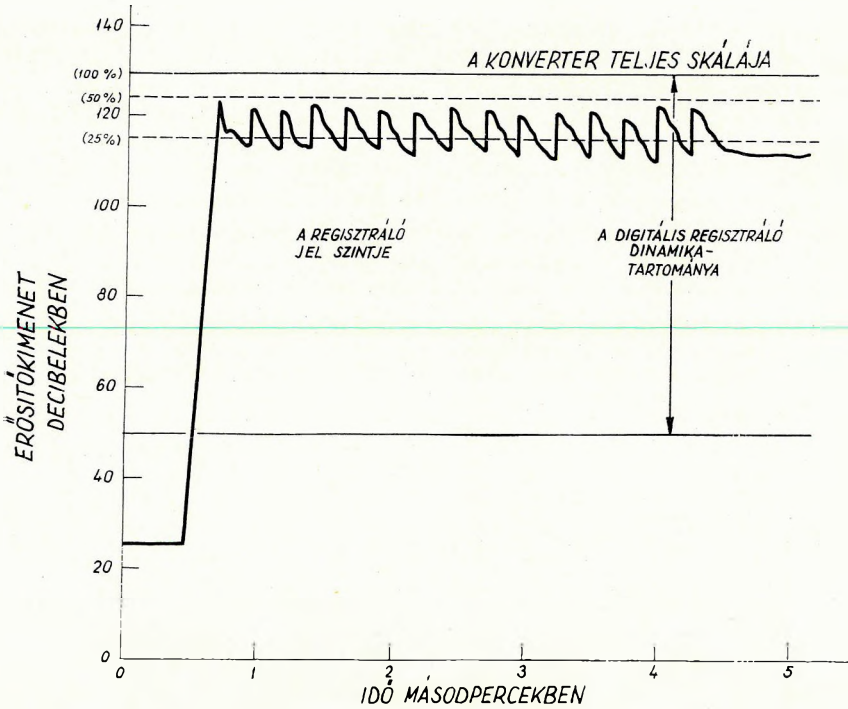
Фиг. 9.



10. ábra

Fig. 10

Фиг. 10.



11. ábra. Geofonlecsengési görbe bináris erősítésű ekvivalense

Fig. 11 Binary gain equivalent of the geophone decay pattern

Fig. 11. Эквивалент графика затухания сейсмоприемника с бинарным усилением

A bináris erősítő konstrukciója

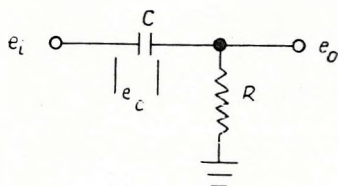
A bináris erősítőnél az erősítés változtatása fokozatokban történik, ezért a jelszint lépcsőzetesen változik. E változások áthidalására az erősítőnek egyen-
 áramú válaszfüggvényűnek kell lennie. A 12. ábra egyetlen olyan típusú RC -
 csatolást mutat, amelyet a váltóáramú csatolású erősítőkben az erősítési foko-
 zatban alkalmaznak. Ha egy A amplitudójú lépcsős függvényt alkalmazunk
 t_1 -hez, megkapjuk a bemutatott, jól ismert exponenciálist. A t_1 időpillanatban
 a kimenet azonos a bemenettel.

Ha a 13. ábrán bemutatotthoz hasonlóan a bemenetnél egy váltóáramú
 szinuszhullámot alkalmazunk, a kimeneten szintén szinuszhullám lesz, de a
 bemenethez viszonyítva fázistolással. A kimenet irányítja a bemenetet. A kon-
 denzátoron áthaladó e_c feszültség azonos a bemenet és a kimenet közötti
 különbséggel, amint azt a (3) egyenlet mutatja.

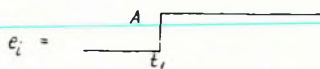
$$e_c = e_i - e_o \quad (1)$$

$$= E_0 \left[\frac{\sin(\omega t - \Theta)}{\cos \Theta} - \sin \omega t \right] \quad (2)$$

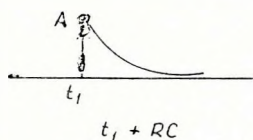
$$= -E_0 \operatorname{tg} \Theta \cos \omega t. \quad (3)$$



LEPCSŐS BEMENET



$$e_o = \frac{t - t_l}{A e^{RC}}$$



12. ábra

Fig. 12

Фиг. 12.

Ha feltételezzük, hogy a bemenő jel amplitudójának 2 : 1 arányú növekedése van, a kimenet értéke ebben az időpillanatban a (4) egyenletben megadott:

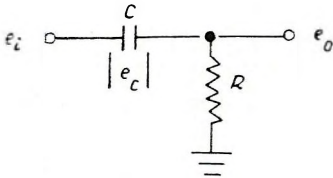
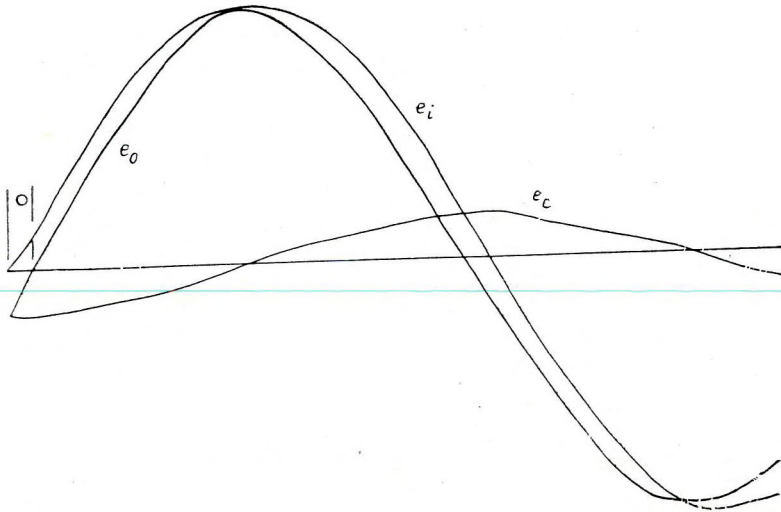
$$e_o = E_0 \sin \omega t + \frac{E_0}{\cos \Theta} \sin(\omega t - \Theta). \quad (4)$$

Ennek $2E_0 \sin \omega t$ -re kellene kétszereződnie. A kimenő feszültség hibáját az ezen értékek közötti különbség jelenti, a (6) egyenlet szerint:

$$\text{Hiba} = -2E_0 \sin \omega t + E_0 \sin \omega t + \frac{E_0}{\cos \Theta} [\sin(\omega t - \Theta)] \quad (5)$$

$$= -E_0 \operatorname{tg} \Theta \cos \omega t. \quad (6)$$

Így a lépcsőváltás időpillanatában a hiba a kondenzátoron levő feszültséggel azonos, amint ezt a (3) és (6) egyenletek ekvivalenciája mutatja. Hasonlóképpen kimutatható, hogy a 2 : 1 lépés olyan hibát okoz, amelynek maximális amplitudója a kondenzátoron levő feszültség felével azonos és azzal ellenkező polaritású.



$$\begin{aligned}
 e_o &= E_o \sin wt \\
 e_i &= \frac{E_o}{\cos \theta} \sin (wt - \theta) \\
 e_c &= e_i - e_o \\
 &= -E_o \operatorname{tg} \theta \cos wt \\
 \text{ahol} \\
 \operatorname{tg} \theta &= \frac{1}{wRC} \\
 \theta &= \operatorname{ARC} \operatorname{tg} \frac{1}{wRC} \\
 \text{és} \\
 f_c &= \frac{1}{2\pi RC} = \frac{.159}{RC}
 \end{aligned}$$

13. ábra

Fig. 13

Фиг. 13.

A lehetséges hibák nagyságának szemléltetésére tételezzünk fel egy 1,68 értékű RC időállandót, amely csaknem valamennyi geofizikai erősítőre jellemző. Az alulvágás:

$$f_c = \frac{0,159}{1,68} = 0,095 \text{ Hz}, \quad (7)$$

és ha az érdeklődésre számot tartó legalacsonyabb frekvenciát 5 Hz-nek tekintjük, $\text{tg } \Theta = 0,019$ azaz $\Theta = 1^\circ 5'$. A maximális hiba ott jelenik meg, ahol $\cos \omega t = \pm 1$, vagy ahol a kimenő hullámalak harántolja a nulltengelyt. Az adott numerikus példában ez $0,019 E_0$ lesz. Ahol $\cos \omega t = 0$, vagyis ahol a hullámalaknak csúcsa van, ott nincs hiba. Így a hiba a zérus és a változás előtti kimenő szint 1,9%-a között bárhol lehet.

A tényleges erősítőben levő fokozatokban alkalmazott ilyen RC -körök száma miatt a gyakorlatban a helyzet csaknem lehetetlenül bonyolulttá válik.

Ha a bináris erősítő bevezetését az erősítési pontosság tette szükségessé, akkor nyilvánvaló, hogy ilyen nagyságrendű hibák nem engedhetők meg. Ha a bináris erősítőrendszernek gyakorlati értékét bizonyítani akartuk, erre megoldást is kellett találni.

A bináris erősítési fokozat hibájának megoldása

Az olyan megoldások, amelyek hardware logikát alkalmaznak ahhoz, hogy az erősítés a $\cos \omega t = 0$ pontban változzék, elvetendő, mivel túl bonyolultak ahhoz, hogy megbízhatóan működjenek terepi geofizikai körülmények között. Ezenkívül bizonyos adattörzítési formátumok sem teszik lehetővé ennek a megoldásnak az alkalmazását. Így három mód marad a helyzet megoldására:

1. Egyenáramú csatolású erősítő alkalmazása. Ez megoldja a problémát, de egyenáramingadozást visz be az erősítőbe.

2. Az RC időállandó növelése a Θ fázisszög csökkentésére, így a hiba csökkentésére is. A szükséges javítás 100 : 1 vagy 200 : 1 nagyságrendű. Ahhoz, hogy az RC csatolást 200-szorosára növeljük, olyan kondenzátorokra van szükség, amelyek túl nagyok a gyakorlati alkalmazáshoz. Az időállandó is több perc lenne. Az erősítőnek kb. egy órai időre lenne szüksége, hogy teljesen stabilizálódjék egy-egy zavar, árambekapcsolás stb. után.

3. A jelnek magasabb frekvenciákra való korlátozása, amely a Θ fázisszöget kis értéken tartja. A frekvencia 200 : 1 növelése 1000 Hz-et adna. Így egy 1000 Hz-es vibrátor alkalmazásával a jelek kiszűrt vivő-, kétoldali sáv-típusú modulált hullámmá alakulnak át. Ennek folytán az erősítőben nincsenek kis frekvenciák, és a csatlakozó kapacitáson levő feszültség igen kis értéken tartható. Az RC -értékek ugyanolyanok, mint amelyeket egy kisfrekvenciás erősítőben alkalmaznánk. Az $RC = 1,68$ jellegzetes érték. Az 1000 Hz-es vibrálással az a maximális idő, amely alatt a kondenzátor egy irányban feltölthető, 500 μ sec. Kétoldalas vibrálást alkalmazunk, így a kondenzátor egyik irányban is 500 μ sec-ig, a másik irányban is 500 μ sec-ig tölthető. Az a feszültség, amellyel a kondenzátor tölthető, igen kicsi. Mivel a maximális hiba a kondenzátoron levő feszültséggel egyenlő, a hiba is igen kis értéken tartható.

