

TMDK-dolgozat

Boromisza László
MA

2012

Érintésmentes, fémlemez vastagságmérő berendezés pontosságának javítási
lehetőségei

Possibilities in enhancing the measurement accuracy of a contactless metal sheet
thickness measuring gauge.

Kézirat lezárása: 2012. 04. 16.

Érintésmentes, fémlemez vastagságmérő berendezés pontosságának javítási lehetőségei

Rezümé

Az ipari környezetbe és a labor körülmények közé készülő méréstechnikai megoldások alapvetően kétféle szempont szerint különböznek. A laborban végzett méréseknek nagy pontossággal kell rendelkezniük, az ehhez szükséges mérési környezet (állandó hőmérséklet...) a szobai körülmények miatt könnyen biztosítható. Az ipari méréstechnikában általában nem biztosíthatók az ideális körülmények, így szükségképpen az alkalmazott eszközök pontossága sem éri el a laborműszerek pontosságát.

Vannak azonban olyan esetek, amikor az ipari méréseknél is nagy pontosság szükséges. Az egyik ilyen eset, amikor fémlemezek vastagságát kell érintésmentesen, röntgensugárzás segítségével megmérni. Az alkalmazott mérőrendszernek egyszerre kell nagy pára-, por-, víz- és hőterhelésnek ellenállni, miközben extrém kis mennyiségek precíz mérése a feladata.

Ebben a dolgozatban bemutatom a röntgensugárzással történő anyagvastagság mérés elvét, miért és hol van rá szükség.

Kitérek a röntgensugárzás keletkezési módjára, milyen eszközökkel és módszerekkel lehet a kibocsátott ionizáló sugárzás intenzitását és energiáját befolyásolni, az aktuális folyamathoz illeszteni.

Felvázolom, hogy a mindennapi gyakorlatban milyen elektronikai megoldásokat alkalmaznak az érzékelő egységekben, rávilágítok azok esetleges hiányosságaira, hibáira.

Ismertetem, hogy milyen passzív és aktív áramköri és csatlakozástechnikai megoldásokkal lehet javítani a pontosságon, és csökkenteni a mérés zaját, előtérbe helyezve a nagyfokú automatizáltságot, a hosszúidejű működést és a megbízhatóságot.

Külön kitérek a röntgensugárzással történő anyagvastagság mérés algoritmusának ismertetésére, annak gyakorlati hiányosságaira, valamint az egész műszer pontosságát befolyásoló tényezők fontosságára.

Annak ellenére, hogy az ismertetett elektronikus egységek tényleges megvalósítása nem született meg a dolgozat beadásáig, minden olyan tervezési kérdést megválasoltam, ami egy precíziós sugárzásmérő detektor előállításához szükséges.

Possibilities in enhancing the measurement accuracy of a contactless metal sheet thickness measuring gauge.

Abstract

Measurement devices made for industrial or laboratory environment are differing mainly in two aspects. Laboratory measurements need to have high accuracy, while the environmental conditions which are needed for this (constant temperature...) can be easily provided. Generally, the ideal environmental conditions can't be established in industrial measurements, thus the industrial devices can't achieve the laboratory devices' accuracy level.

However there are some cases, where the industrial devices must also have high accuracy. One of these is the case when the thickness of metal sheets needs to be measured contactlessly. The applied measuring system must resist intense vapour, dust, water and high temperature load, while its main task is to measure extreme small signals.

In this essay I'll show the principles of the x-ray based thickness measurements, why and where it is needed to be used.

I'll also cover the topics included: x-ray generation method, how to control the energy and the intensity of the x-ray emission and how to fit it into the actual process.

I'll show the solutions in radiation detecting units used in everyday's practice, and I'll reveal their possible imperfections and errors.

I'll give a review what kind of passive and active circuitry and connectivity solutions can improve the accuracy and reduce the measuring noise, highlighting the automated solutions, the long term operation and trustiness.

I expose the algorithm of x-ray thickness measurements, the incompleteness of the algorithm in practice, and the importance of the factors that determine the whole measurement system's accuracy.

Although the presented electronics haven't actually materialized by the time this paper was closed, I've already discussed every designing question, that is needed to create a precision x-ray detecting unit.

László Boromisza

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS.....	1
2. VASTAGSÁGMÉRŐ BERENDEZÉS HELYE A TECHNOLÓGIÁBAN.....	2
3. TRANZMISSZIÓS MÉRÉSI ELV.....	4
4. MÉRÉSI ELRENDEZÉS.....	5
5. RÖNTGENSUGÁRZÁS ELŐÁLLÍTÁSA.....	6
6. RÖNTGENSUGÁRZÁS ABSZORPCIÓJA.....	7
7. KÉMIAI ÖSSZETÉTEL HATÁSA A MÉRÉSI PONTOSSÁGRA.....	9
8. SUGÁRZÁSMÉRŐ DETEKTOR ÉRZÉKELŐ EGYSÉGE.....	11
8.1 Ionizációs kamra.....	11
8.2 PIN dióda.....	15
9. ELEKTROMÉTER ERŐSÍTŐ.....	18
9.1 Általánosan alkalmazott elektrométer erősítő elrendezés.....	18
9.2 Pontosítási lehetőségek.....	21
9.3 Alacsony hőmérsékletű termosztálás.....	24
9.4 Automatizált beállítás.....	26
9.5 Logaritmikus erősítő alkalmazásának lehetőségei.....	31
10. DIGITÁLIS JELFELDOLGOZÁS.....	37
11. ÖSSZEFOGLALÁS.....	41
12. FELHASZNÁLT IRODALOM.....	42

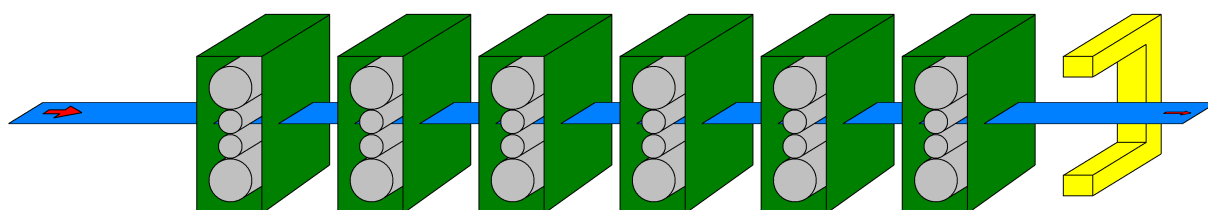
1. BEVEZETÉS

A mérés technika területén rengeteg különféle technika, mérési módszer fordul elő. Különböző megoldások, megvalósítások jellemzik az egyes fizikai jellemzők mérését szolgáló berendezéseket, azonban mindegyik mérési elv ugyanazon alapszik: az adott fizikai jellemzőt valamilyen „egyszerűen” mérhető villamos jellemzővé kell átalakítani, majd ezt a villamos jelet kell megmérni.

A két „legegyszerűbben” mérhető villamos jellemző a feszültség és a frekvencia (vagy periódusidő), ugyanis ezeket a jeleket a legkönnyebb pontosan mérni (természetesen adott körülmények között). pH mérés esetén közvetlenül feszültséget kell mérni, fénymérésnél a fotodióda által generált áramot alakítjuk át feszültséggé, kapacitív érzékelőű differenciálynomás mérőnél a kapacitásváltozás egy rezgőkör frekvenciáját hangolja el, ellenálláshőmérővel történő hőmérsékletmérésnél az ellenállás változása feszültségváltozást okoz stb.

Általános alapelv, hogy az adott fizikai jellemző mérését mindig a legegyszerűbb és a kívánalmaknak megfelelően a legpontosabb módon végezzük. Vannak azonban esetek, amikor a körülmények nem engedik meg akármilyen mérési elv alkalmazását, például ha a technológiai környezet túl agresszív (erősen korrozív), ha túl magas hőmérsékletű, ha a technológiai anyagáramlás sebessége túl nagy, vagy ha nem megengedett a fizikai érintkezés. Ezekben az esetekben célszerű az úgynevezett érintésmentes mérési elveket alkalmazni. Ilyenek többek között az optikai elvű mérések, és az ionizáló sugárzáson alapuló mérések.

Jelen dolgozatban az ionizáló sugárzás felhasználásán alapuló mérések egy szegmensével foglalkozok, az ún. transzmissziós elvű anyagvastagság méréssel. Ilyen típusú mérések főképp a fémiparban használatosak hosszú fémszalagok, fémlemezek vastagságának mérésére, ugyanis fémlemezek (acél, alumínium...) előállítása során az egyik elsődleges kimeneti paraméter azok vastagsága. Egy jellemző példa az acéllemezeket előállító hengerversor. Az 1. ábra egy 6 hengerállványból álló hengerversort mutat.

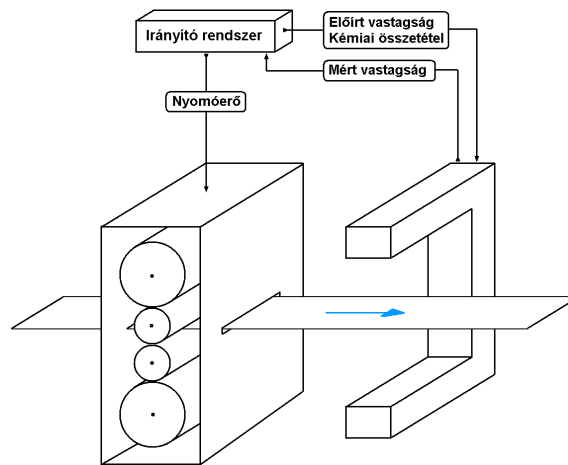


1. ábra
Hengerversor vázlat

2. VASTAGSÁGMÉRŐ BERENDEZÉS HELYE A TECHNOLOGIÁBAN

A hengersor bemenetére egy kb. 100 mm vastag acélbuga kerül, amit a 6 hengerállvány fokozatosan nyom össze úgy, hogy a 6. állvány után kilépő lemez a kívánt vastagságú legyen. A kilépő lemez vastagságát egy, az ábrán sárga színnel jelölt berendezés méri meg.

A 2. ábrán egy vázlatosan ábrázolt gyártósor részlete látható. A hengerállványból kilépő acéllemez vastagságát a hengerek összenyomásával lehet változtatni. A hengerállványt elhagyó lemez vastagságát egy röntgenes berendezés méri.



2. ábra
Hengerállvány vastagságmérővel

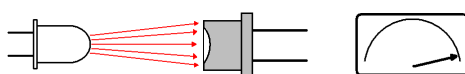
A hengerállvány irányító rendszere (a főlérendelt rendszer) a vastagságmérő által mért értékek alapján úgy állítja be a hengerállvány paramétereit, hogy a kilépő lemez vastagsága kívánt értékű legyen, tehát a röntgenes berendezés egy zárthurkú szabályzási rendszer érzékelő eleme. Ha a vastagságmérő mérési pontossága nem megfelelő, akkor előfordulhat, hogy a ténylegesen kihengerelt acéllemez vastagsága eltér a kívánt értéktől. Mivel az acéllemez tömege nem változik a hengerlés során, így ha a hengerelt lemez vastagabb az előírtnál, akkor a hengerelt lemez teljes hossza rövidebb lesz. Például, ha a hengersorba belépő lemez 100 mm vastag és 20 m hosszú, a hengersorból kilépő lemez pedig 10 mm vastag, akkor a hossza 200 m lesz (a hengerlés során, technológiai okokból a lemez szélessége nem változik), viszont ha (egy szélsőséges példával élve) a kilépő lemez 11 mm vastag, akkor a hossza már csak 181,2 m lesz. Ha az acéllemezt a későbbi feldolgozása során fix méretű táblákká darabolják, akkor a rövidebb lemez hossz miatt kevesebb tábla készül, végeredményben veszteség keletkezik. A probléma lényege, hogy a pontatlanság miatt a

vastagságmérő 10 mm értéket mutat, miközben a valóságos lemezvastagság (pl. mikrométerrel mérve) 11 mm. A hengerállvány irányító rendszere végig a jónak vélt (10 mm-es) érték szerint állítja be a hengerekre ható nyomóerőt, és látszólag teljesen jól működik minden, a végeredmény mégis egy jóval rövidebb lemez hossz (a valóságos 11 mm-es lemezvastagság miatt).

3. TRANSMISSZIÓS MÉRÉSI ELV

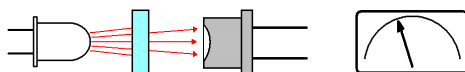
Transzmissziós mérés alapelve, hogy adott sugárzást bocsátunk keresztül a mérendő anyagon, majd megmérjük az áthaladt (a csökkentett) sugárzás intenzitását.

Tekintsünk egy optikai példát. Vizsgálni szeretnénk egy sötétített üveglemez árnyékoló hatását, vagyis végeredményben a fényáteresztő képességét. Ehhez sugárzóként egy LED-et alkalmazunk, ami adott hullámhosszú fényt (látható elektromágneses sugárzást) bocsát ki adott fényerővel (intenzitással). Ezt a fényt a LED-del szemben álló fotodiódával (fototranzisztorral, LDR-rel, stb.) mérjük (a detektorral).



3. ábra
LED-fotodióda páros

Ha a mérendő üveglemezt a sugárzó és a detektor közé helyezzük, akkor a detektorral mért jel lecsökken az üveglemez árnyékoló képességének függvényében. Minél kisebb a detektor által mért jelszint annál kevesebb fényt enged át az üveglemez, és fordítva.



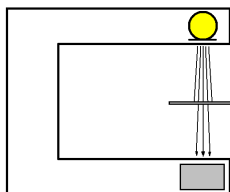
4. ábra
Fényáteresztő képesség mérési elrendezés

A mérési elvet fordítva is értelmezhetjük: Ha az üveglemez fényelnyelő képessége állandó, akkor a fenti elrendezéssel meg lehet mérni az üveglemez vastagságát. Minél vékonyabb a mért üveglemez, annál nagyobb jelet szolgáltat a detektor és minél vastagabb az üveglemez, annál jobban gyengíti a forrás által kibocsátott sugárzás intenzitását, így a detektor által mért jelszintből megállapítható az üveglemez vastagsága.

Ugyanez az elve az ionizáló sugárzással működő anyagvastagság mérésnek is. Azonban itt nem optikai sugárzás hatol át a vizsgálandó anyagon, hanem sokkal nagyobb energiájú röntgensugárzás, így a fémes anyagok vizsgálata is megoldható.

4. MÉRÉSI ELRENDEZÉS

A mérési elrendezés a fentihez teljesen hasonló, általában egy C (esetleg O) formájú mérőkeret két ellentétes végén helyezkedik el a sugárforrás és a detektor.

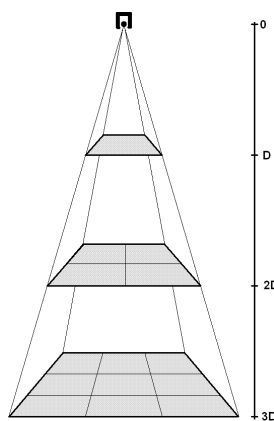


5. ábra
Mérés C-kerettel

A C formájú mérőkeret alkotja a mérőrendszer vázát, elsődleges feladata, hogy adott távolságra legyen a sugárforrás a detektortól. A távolság állandó értéken tartása fontos a mérés szempontjából, ezért a vázrendszernek kellően stabilnak, szilárdnak kell lennie, a mérőkeretet ezért általában acélból készítik. Másik fontos szempont, hogy a forrás által kibocsátott sugárzás merőlegesen érje a detektor felszínét, mert ebben az esetben a legnagyobb a hatásfok és legkisebb a nem kívánt szóródás.

A forrás és a detektor közötti térrész a mérőrész. Bármilyen ionizáló sugárzás veszélyt jelent mind az ember, mind a környezet számára, ezért általános irányelvként és sugárvédelmi szempontból is a mérőrésznek a lehető legkisebbnek kell lennie. Technológiai szempontból viszont a mérőrést a lehető legnagyobbra kell választani, hogy a mérőberendezés könnyen, rugalmasan illeszthető legyen a folyamatba, és elegendő teret adjon a mérendő anyag esetleges rezgéseinek, elhajlásainak anélkül, hogy ez a mérőberendezést veszélyeztetné.

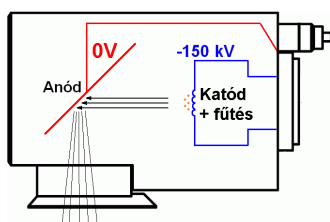
A nagy mérőrész használata méréstechnikai szempontból sem célszerű. A forrás által kibocsátott és a detektor által érzékelt sugárzás intenzitás a mérőrész távolságának növelésével négyzetesen csökken, így nagy távolságok esetén extrém kis jelszintek keletkeznének.



6. ábra
Intenzitás gyengülés a távolság függvényében [1]

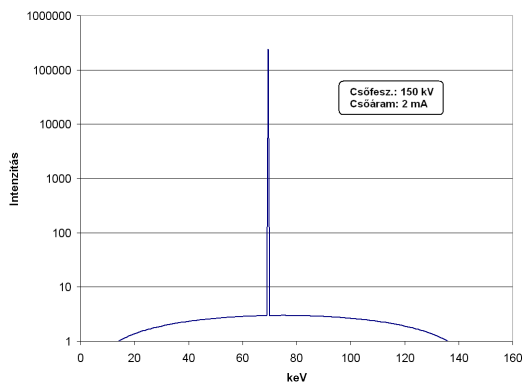
5. RÖNTGENSUGÁRZÁS ELŐÁLLÍTÁSA

Röntgen mérőberendezés esetén az ionizáló sugárzást röntgenső állítja elő nagyfeszültségű tápellátás segítségével. A röntgenső katódja az előállított nagyfeszültség negatív pólusára kapcsolódik, ugyanakkor a katódot egy másik elektronikus egység fűti. A fűtés hatására a katód anyagát alkotó atomok elektronjai gerjesztett állapotba kerülnek, ezek az elektronok a nagyfeszültségű előfeszítés hatására elszakadnak az atomjuktól és az anód target-be csapódnak. A becsapódás során gerjesztődik a fékezési illetve a karakterisztikus röntgensugárzás.



7. ábra
Röntgenső vázlatos működése

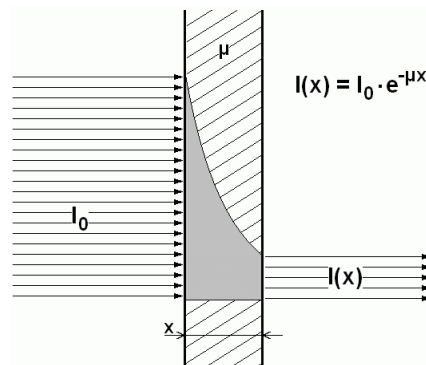
A katódra kapcsolt nagyfeszültség értéke a csőfeszültség, az anód és a katód között folyó áram pedig a csőáram. A csőfeszültség és a csőáram változtatásával szabályozható a kibocsátott röntgen sugárzás intenzitása, az anód anyaga pedig a kibocsátott sugárzás energiáját határozza meg. Az ipari méréstechnikai alkalmazásoknál általában wolfram target-et alkalmaznak. A röntgenső által kibocsátott sugárzás két összetevőből áll: fékezési sugárzásból (ennek energiaspektruma folytonos) és karakterisztikus röntgen-sugárzásból (vonalas spektrum). A kettő aránya függ az alkalmazott csőfeszültségtől, az anód anyagától és a csőáramtól [1]. Egy wolfram anódos röntgensövet, 150 kV-os csőfeszültséggel és 2 mA-es csőárammal működtetve az a 8. ábra szerinti energiaspektrumú sugárzást bocsát ki. Látható, hogy lényegében a kibocsátott röntgen-sugárzás energiája megfelel a karakterisztikus röntgensugárzás energiájával, ami wolfram esetén 69,5 keV.



8. ábra
Röntgenső által kibocsátott sugárzás energiaspektruma ([1] 1.27 és 1.32 képletének felhasználásával)

6. RÖNTGENSUGÁRZÁS ABSZORPCIÓJA

A forrás által kibocsátott sugárzás intenzitásának egy részét a mérendő lemez elnyeli, a maradék jut csak a sugárzásmérő detektorba. Az intenzitás csökkenése arányos a mért lemez vastagságával, azonban ez nem egyenes arányosság, hanem exponenciális jellegű. Az elnyelődés mértékét a következő ábra illusztrálja.



9. ábra

Anyagon áthatoló ionizáló sugárzás abszorpciója

Jelöljük a forrás által kibocsátott sugárzás intenzitását I_0 -al, a mért lemezen áthaladt, gyengült sugárzás intenzitását I -vel. Az intenzitáscsökkenés mértékét a következő (abszorpciós) képlet adja: $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$, ahol x az anyagvastagság, μ pedig az adott kémiai elemre és adott fotonenergiára jellemző elnyelési állandó [2]. Például a tiszta vas (Fe) elnyelési állandója (abszorpciós együtthatója) 69,5 keV energián kb. 7,2 1/cm [3].

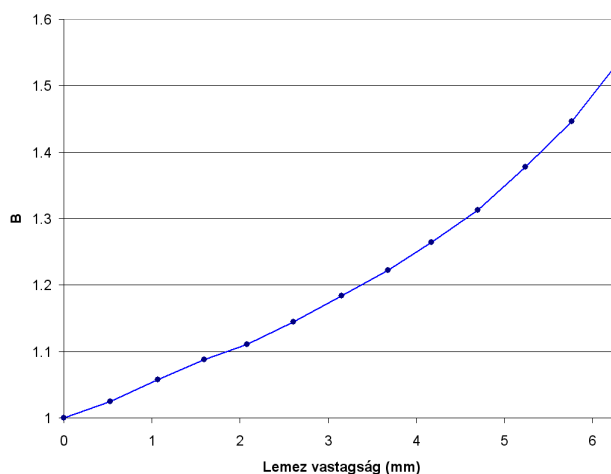
A mért lemezen áthaladó ionizáló sugárzás a detektorban elektromos jellé alakul át. Ennek a jelnek a mérésével valósul meg a mért vastagság meghatározása.

A gyakorlati életben a fenti abszorpciós képlet kis módosításra szorul. A kis módosítás, az ún. Build-up faktor használatát jelenti, amivel korrigálhatók a mérési elrendezésből és szóródásokból adódó pontatlanságok [2]. A képlet így $I = B \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x}$ -re módosul.

A vastagságmérő berendezés úgy lett kialakítva, hogy a sugárzásmérő detektor kimenetén nem a sugárzás intenzitása jelenik meg, hanem egy azzal arányos feszültség. A Build-up faktorról kiegészített elméleti képletben az intenzitás értékek helyére a detektor által mért feszültségek helyettesítendők. A lemezen áthaladt (gyengített) sugárzás intenzitása (I) két összetevőből áll: a mindig jelenlévő háttérsugárzás hatására létrejövő detektor kimeneti feszültség (U_0) és U_m a mért lemezen áthaladt sugárzás hatására a detektor kimenetén létrejövő feszültségérték különbsége ($I = U_m - U_0$). Ugyanígy $I_0 = U_f - U_0$, ahol U_f a teljes

sugárzáshoz (lemez nélküli esethez) tartozó detektor kimentí feszültség. Az abszorpciós képlet így $U_m - U_0 = B \cdot (U_f - U_0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$ alakú lesz.

Valóságos mérőberendezés esetén a Build-up faktor értéke a mért lemez vastagságával együtt változik, nem lineáris módon. A pontos méréshez több ponton kell B értékét meghatározni (több pontos kalibrálás). A pontosítás ismert vastagságú és anyagminőségű „etalon” lemezek használatával történik. Mindegyik etalon lemezre meg lehet határozni a megfelelő B értéket (a 10. ábra pontjai). Bármely B érték kiszámítható lineáris interpoláció segítségével, a pontosításkor felvett Build-up faktorok felhasználásával.



10. ábra
Build-up faktor a vastagság függvényében

7. KÉMIAI ÖSSZETÉTEL HATÁSA A MÉRÉSI PONTOSSÁGRA

A röntgen-sugárzással történő pontos anyagvastagság méréshez ismerni kell a mérendő anyag kémiai összetételét. Ennek oka: ha két egyforma vastagságú lemez közül az egyik tiszta vas, a másik pedig tiszta króm, akkor króm lemez mérése esetén (annak kisebb elnyelési állandója miatt) kisebb lesz a mért vastagság.

A berendezés pontosításakor (a Build-up faktorok felvételekor) ismert a használt etalon lemezek vastagsága és kémiai összetétele. A gyártásban lévő lemezek kémiai összetétele azonban eltér az etalon lemezekétől, így szükséges egy korrekció alkalmazása. Előfordulhat, hogy a gyártott lemez vastagsága megegyezik az egyik etalon lemez vastagságával, azonban az eltérő kémiai összetétel miatt mégsem a jó vastagság érték lesz megjelenítve.

Minden anyagra és adott foton-energiára meghatározható az elnyelési állandó értéke [3]. Ha egy lemez több kémiai összetevőt tartalmaz, akkor az eredő az elnyelési állandó az egyedi összetevők elnyelési állandója és azok összetételi arányának szorzatösszegeként áll elő

[4], tehát $\mu_{\text{eredő}} = \frac{C\% \cdot \mu_C(69,5\text{keV}) + \text{Si}\% \cdot \mu_{\text{Si}}(69,5\text{keV}) + \dots}{100}$, ahol C% a lemez széntartalma

százalékban kifejezve, $\mu_C(69,5\text{keV})$ a szén elnyelési állandója 69,5 keV fotonenergián, $\mu_{\text{eredő}}$ pedig a lemez eredő elnyelési állandója. Az etalon lemezek kémiai összetétele alapján ki lehet számolni μ_{etalon} értékét (az etalon lemezek elnyelési állandóját 69,5 keV energiára), és hasonló módon a gyártott lemez kémiai összetétele alapján $\mu_{\text{gyártási}}$ értékét is. A pontos méréshez szükséges korrekciós faktor (K) az etalon lemez elnyelési állandójának és a gyártott lemez

elnyelési állandójának hányadosaként áll elő $\left(K = \frac{\mu_{\text{etalon}}}{\mu_{\text{gyártási}}} \right)$. A gyártott lemezek mérésekor a

vastagság kiszámításának képlete így $x = \frac{-\ln\left(\frac{U_m - U_0}{B \cdot (U_f - U_0)}\right)}{\mu \cdot K}$ alakú lesz.

A fémiparban a gyártott lemezek általában szabvány szerinti anyagminőségűek. A szabvány előírja, hogy például egy adott típusú acél összetételében egy adott kémiai elem milyen arányban lehet jelen (pl.: széntartalom 0,2 – 0,4 %, szilíciumtartalom 0,1 – 0,35 %

közötti...). Egy adott anyagtípushoz, annak átlagos kémiai összetétele alapján meg lehet határozni a hozzá tartozó korrekciós faktort. Bár az egyes kémiai elemek aránya változó lehet ugyanazon anyagtípusnál, az átlagos összetételtől való eltérés nem jelent túl nagy hibát.

A gyakorlati életben a különböző anyagminőségek miatt keletkező mérési pontatlanság korrigálását a vastagságmérő berendezés automatikusan kezeli. A vastagságmérő berendezés mindig egy ú.n. fölérendelt rendszerhez kapcsolódik, az aktuálisan mért lemez minőségkódját onnan kapja. Adott anyagminőséghez adott korrekciós faktor tartozik (ezeket a vastagságmérő berendezés egy táblázatban tárolja, az anyagminőség – korrekciós faktor táblázatban). Ismeretlen anyagminőségek esetén (amiket az anyagminőség – korrekciós faktor táblázat nem tartalmaz) a berendezés a korrekciós faktort 1-nek veszi, ami bizonyos esetekben nagy eltérést is jelenthet a valós, kívánt korrekciós faktorhoz képest.

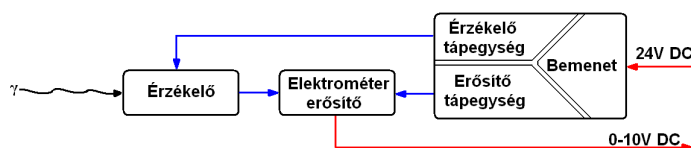
További nehézséget jelent, hogy vannak olyan esetek, amikor a fémlemez szabvány szerinti kémiai összetétele a hengerlési célvastagság függvényében változik. Például egy S355MC minőségkódú acélnál 4 vastagságtartományban gyártható a lemez: 1,8 – 3 mm, 3 – 8 mm, 8 – 12 mm, 12 – 18 mm. Minden vastagságtartományban más és más a kémiai összetétel, így egy adott lemez pontos méréséhez nem elegendő annak minőségkódja.

Minden hengerlésre kerülő acél buga kémiai összetétele és minden egyéb fontos paramétere ismert, így kiszámítható a hozzá tartozó pontos korrekciós faktor értéke is on-line módon, ezáltal anyagminőségtől és anyagvastagságtól függetlenül a lehető legpontosabb mért érték állhat elő.

8. SUGÁRZÁSMÉRŐ DETEKTOR ÉRZÉKELŐ EGYSÉGE

A sugármérő detektor alapvetően három fő egységből áll:

- Érzékelő: ez alakítja át a mérendő radioaktív sugárzást elektromos jellé, a gyakorlatban ionizációs kamrát vagy félvezető alapú érzékelőt alkalmaznak.
- Elektrométer erősítő: a keletkezett kis szintű jelet felerősíti
- Tápegység: a bemeneti 24V-os tápfeszültségből előállítja az érzékelőnek és az erősítőnek szükséges feszültségeket, a bemenettől galvanikusan elválasztva.



11. ábra
Sugármérő detektor vázlatos felépítése

8.1 Ionizációs kamra

A gáztöltésű detektorok voltak az első olyan elektromos eszközök, amelyeket radioaktív sugárzások mérésére fejlesztettek ki az 1940-es években. Ezek működésének alapja a gáztömlés és a sugárzást alkotó részecskék vagy fotonok közötti kölcsönhatás, aminek folyamán a gáztömlés ionizálódik vagy gerjesztődik. [2]

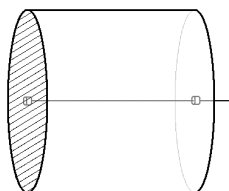
A gáztöltésű detektoroknak három típusát különböztetjük meg:

- Ionizációs kamrát,
- Proporciónális számlálót,
- Geiger-Müller csövet.

Mindhárom detektor típus hasonló felépítésű, különbség a működési módjukban van.

Az ipari gyakorlatban vastagságmérés céljára a fentiek közül az ionizációs kamrák használata az elterjedt.

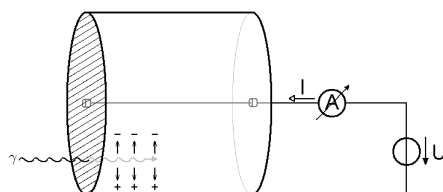
Az ionizációs kamra fizikai felépítése a legegyszerűbb esetben hengeres, koaxiális kialakítású. A henger közepén egy vékony vezetősál helyezkedik el, az anód, a henger fala a katód. Az anódot és a katódtól szigetelő anyag választja el. A henger belseje valamilyen elektromosan szigetelő, inert gázzal töltött. A töltőgáznak nagy rendszámú anyagot célszerű választani a hatékonyság növelése érdekében, például xenont. A hatásfok további növelésére az ionizációs kamrában túlnyomás uralkodik. Általános esetben az ionizációs kamra ún. végablakos kivitelű. Az alábbi ábra satírozott területe a végablak.



12. ábra
Ionizációs kamra felépítése

A mérendő sugárzás a végablakon keresztül lép be az ionizációs kamra belsejébe. A mérendő radioaktív sugárzás egy részét a végablak szükségképpen abszorbálja, így annak minél vékonyabbnak kell lennie. Azonban nem választható akármilyen vékonyra, ugyanis a végablaknak ki kell bírnia a kamra belsejében uralkodó túlnyomást. A két egymásnak ellentmondó feltételnek megfelelő jó kompromisszum a 3-5 bar-os túlnyomás és az 50-100 μm végablak vastagság választás.

Ha egy γ -foton belép a kamra belsejébe és kölcsönhatásba lép a töltőgáz atomjaival, akkor pályája mentén elektron – pozitív ion párok keletkeznek. Ezek egy idő után rekombinálnak. Ahhoz, hogy radioaktív sugárzás mérésére lehessen használni egy ionizációs kamrát, potenciálkülönbséget kell létrehozni az anód és a katód között. Az így létrejött elektromos térerősség hatására az ionizáció során létrejött elektronok az anód felé, a pozitív ionok pedig a katód felé kezdenek vándorolni [2]. Végeredményben elektromos áram kezd folyni az áramkörben.

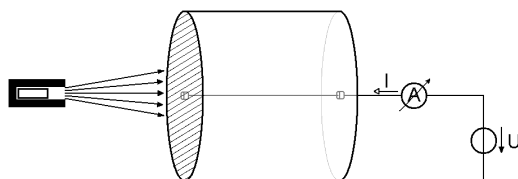


13. ábra
Ionizációs kamra működése

A kialakuló áram értékét befolyásoló tényezők:

- Az elnyelt foton energiája,
- Az ionizációs kamrába érkező fotonok gyakorisága (másodpercenkénti fotonszám),
- Az alkalmazott potenciálkülönbség mértéke.

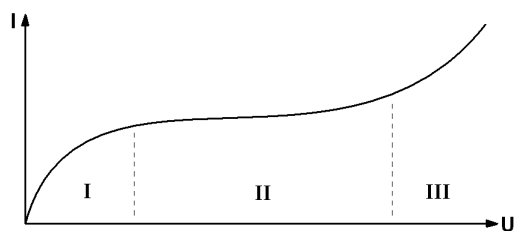
Tekintsük a következő mérési elrendezést: adott egy radioaktív sugárforrás, amit az ionizációs kamra elé helyezünk, így az állandó intenzitású sugárzást kap.



14. ábra

Teszt mérési elrendezés

Az anód és a katód közé kapcsolt feszültséget 0V-ról elkezdjük növelni és közben jegyezzük az áramkörben folyó áramot. A kapott eredmény a következő ábrán látható.



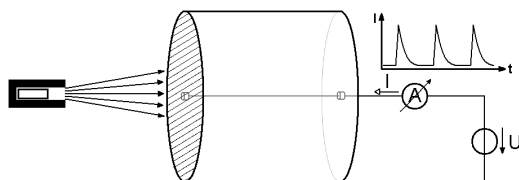
15. ábra
Ionizációs kamra működési tartományai

A fenti diagram három területre osztható. Az I. ún. rekombinációs tartomány. $U = 0$ V esetén nem folyik áram az áramkörben, az összes keletkezett elektron – ion pár rekombinálódik. A feszültség emelésével egyre több és több töltéshordozó éri el az elektródákat (akár az anódot, akár a katódot), egyre több áram kezd folyni, ez indokolja a grafikon kezdeti emelkedését. Egy adott feszültség értéktől kezdve az összes, az ionizációban keletkezett ionpár eléri az elektródákat és a feszültség további növelése esetén alig van áramnövekedés. Ezt, a közel vízszintes szakaszt (a II. tartományt) nevezik telítési tartománynak.

A feszültséget tovább növelve az áram ismét növekszik. Ekkor a kamra belsejében lévő télerősség már elég nagy ahhoz, hogy az elektronok olyan sebességre gyorsuljanak fel mielőtt eléri az anódot, hogy újabb ionpárokat hozzanak létre, vagyis másodlagos, harmadlagos ionizáció következik be. Ezt a III. tartományt nevezik proporcionális tartománynak. [5]

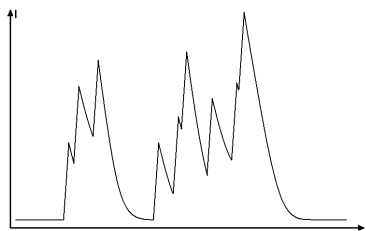
Az ionizációs kamrák a II. tartományban működnek, az alkalmazott feszültség értéke általában 200 – 800 V közötti. A gyártók mindig feltüntetik az adott típusú ionizációs kamra névleges működési feszültségét. Mivel ebben a tartományban a feszültségváltozáshoz minimális áramváltozás párosul („lapos” a görbe), így nincs szigorú megkötés az alkalmazott feszültség stabilitására vonatkozóan.

Az egyes kölcsönhatások során keletkezett áram impulzus jellegű. Az áramimpulzus amplitúdójából megállapítható a γ -sugárzás energiája, az impulzusok gyakoriságából pedig a sugárzás intenzitása. A γ -sugárzás által kiváltott ionizáció során keletkezett ionpárok közül az elektronok sokkal gyorsabban mozognak, mint a pozitív ionok, ez magyarázza a keletkezett impulzus meredek felfutó élét. Az ionizációs kamra fizikai felépítésénél fogva kondenzátorként funkcionál, így a kisüléséhez idő kell, ezáltal a lefutó él kevésbé lesz meredek. [2]



16. ábra
Ionizációs kamra által szolgáltatott jel

Amennyiben a mért sugárzás nagy intenzitású, úgy a keletkezett impulzusok egymásra ülnék, lehetetlenné téve az energia meghatározását.



17. ábra
Jelforma nagy mért dózis esetén

A fentiek alapján az ionizációs kamra kétféle üzemmódban működhet:

- Impulzus üzemmódban, vagy
- Integrális üzemmódban.

Impulzus üzemmódban a keletkezett impulzusok nem túl gyakoriak (kis intenzitások mérése), lehetővé téve az energia meghatározását (γ -spektrometria). Integrális üzemmódban nagy intenzitások mérhetők, ezt az üzemmódot elsősorban a dozimetriában használják.

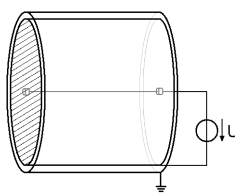
Acéllemezek vastagságmérésénél a nagy dózisú sugárzás miatt az ionizációs detektor integrális üzemmódban működik.

Az ionizációs kamrában létrejövő áram nagyon kicsi, pA – nA nagyságrendű. Ha az ionizációs kamrára csatlakozó árammérő berendezés T_R válaszidővel rendelkezik, akkor a kölcsönhatási események sorozatából származó $I(t)$ jel egy időtől függő áram aminek képlete:

$$I(t) = \frac{1}{T_R} \int_{t-T_R}^t i(t) dt . \quad T_R \text{ megfelelő választásával az egyes kölcsönhatások közötti}$$

töltésfluktuáció kiátlagolódik. [2]

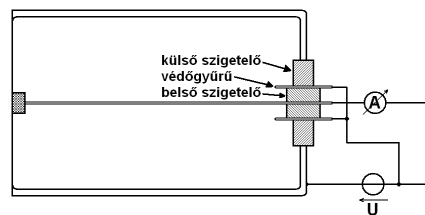
A keletkező kicsi áramértékek miatt különös gondot kell fordítani a jelhozzávezetésre és a csatlakozási pontokra.



18. ábra

Ionizációs kamrák gyakorlati kivitele

Hengeres ionizációs kamránál a nagyfeszültségű (katód) és a gyűjtő elektród (anód) közé segéd elektródot szokás alkalmazni. Ennek szerepe kettős: a felületi szivárgási áramot csökkenti és segít uniformizálni a kamrán belüli elektromos teret. Az elektródák kialakításánál kerülni kell az éles kiszögeléseket, hogy ne jöjjön létre nagy helyi térerősség (a kisülések elkerülése miatt). Az elektródok közötti szigetelők befolyásolják a sugárzástól független áramot, a szivárgási áramot. Célszerű nagy fajlagos ellenállású anyagot választani ($> 10^{16} \Omega\text{cm}$), például teflont.



19. ábra
Ionizációs kamra segédelektrodái [7]

8.2 PIN dióda

Radioaktív sugárzások mérésére félvezető eszközök is használatosak. Ezek egyik típusa a PIN dióda. Nevét onnan kapta, hogy a hagyományos dióda p típusú és n típusú (erősen adalékolt) rétege között egy majdnem teljesen tisztának tekinthető (adalékolatlan), ú.n. intrinszik réteg helyezkedik el.



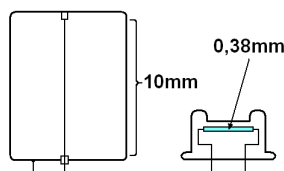
20. ábra
PIN dióda felépítése

A hagyományos dióda pn átmenetének határán egy keskeny kiürített réteg jön létre. A diódát záróirányban előfeszítve ez a réteg kiszélesedik. A kiürített réteg méretének abból a szempontból van jelentősége, hogy a félvezetőt ért sugárzás által keltett töltéshordozók rekombinációja ebben a tartományban a legkisebb, ennek elvi magyarázatára azonban ezen dolgozat keretei nem adnak lehetőséget. A kiürített réteg kiszélesítéséhez egy köztes, intrinszik réteg kerül kialakításra, amivel a kiürített tartomány mérete nagymértékben megnövekszik. [6]

A diódán záróirányú előfeszítést alkalmazva, egy kis mértékű, ú.n. sötétáram folyik keresztül. Ha a PIN diódát sugárzás éri, a keletkezett töltéshordozók a megfelelő pólus felé kezdenek vándorolni, és a sugárzás intenzitásával és energiájával arányos áram kezd folyni az áramkörben. Az általánosan alkalmazott záróirányú feszültség értéke 5-50V tartományú. A

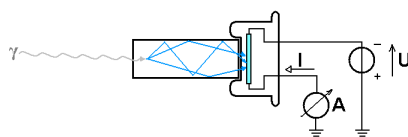
keletkezett elektromos áram impulzus jellegű, csakúgy, mint az ionizációs kamra esetében, azonban míg gázok esetén egy ionpár keltéséhez szükséges átlagenergia kb. 30 eV (pl. xenon esetén 22 eV), addig Si esetén ez 3,65 eV (szobahőmérsékleten). [2] Ez elméletben azt jelentené, hogy ugyanakkora dózis esetén a PIN dióda nagyobb áramjelet szolgáltat, a gyakorlatban viszont míg az ionizációs detektor mérete széles határok között mozoghat, addig a félvezető eszközök mérete gyártástechnológiai okokból korlátozott.

Ha egy PIN dióda (az intrinszik réteget tisztán szilíciumnak tekintve) aktív térfogatának vastagsága 380 μm , akkor az a beeső ionizáló sugárzás (wolfram anódos röntgenforrás esetén 69,5 keV fotonenergiával számolva) kevesebb, mint 3%-át nyeli el, kb. 2,4%-a abszorbálódik. Ezzel szemben ha egy xenonnal töltött ionizációs kamra aktív térfogatának vastagsága 10 mm, akkor az a beeső sugárzás $\sim 4,3\%$ -át nyeli el, 5 bar túlnyomással pedig ugyanez majdnem 20%-ra adódik.



21. ábra
Ionizációs kamra és PIN dióda

Általánosságban elmondható, hogy azonos méretű PIN diódás érzékelő és gázzal töltött ionizációs kamra esetén a PIN dióda érzékenysége sokkal jobb, azonban, ha nincs méretbeli megkötés, akkor egyértelműen az ionizációs kamra rendelkezik nagyobb detektálási hatásfokkal (elsősorban a PIN dióda méretbeli korlátai miatt). A PIN dióda érzékenysége tovább növelhető, ha elé szcintillációs kristályt helyezünk. A PIN diódák érzékenysége nem a γ - vagy a röntgen-sugárzás tartományában a legnagyobb, hanem a látható fény közeli tartományban (0,3 – 1 μm hullámhossz). A szcintillációs kristályban elnyelődő γ -sugárzás fényfelvillanásokat kelt. A kristálynak van egy bizonyos transzformációs hatásfoka, ami azt mutatja meg, hogy az elnyelt ionizáló sugárzás energiájának hány százaléka alakul át fénnnyé. Ez az érték a gyakorlatban alkalmazott szcintillátoroknál 5-20%. A szcintillátor kristály alkalmazásának az a nagy előnye, hogy sokkal nagyobb méretben gyárthatók, mint a PIN diódák intrinszik rétegei, így a sugárzás érzékelésének aktív térfogata nagymértékben növelhető, ezáltal az érzékelő hatásfoka növelhető.



22. ábra
APD + szcintillátor

PIN dióda helyett alkalmazható APD (Avalanche Photo Diode) is, ami nagyobb és stabilabb záróirányú előfeszítést igényel, viszont a kölcsönhatási mechanizmusok során keletkező lavinaeffektus miatt belső erősítéssel rendelkezik, ami nagyobb érzékenységet eredményez. Az APD hátrányát nagyobb hőmérsékletfüggése és nagyobb sötétárama jelenti.

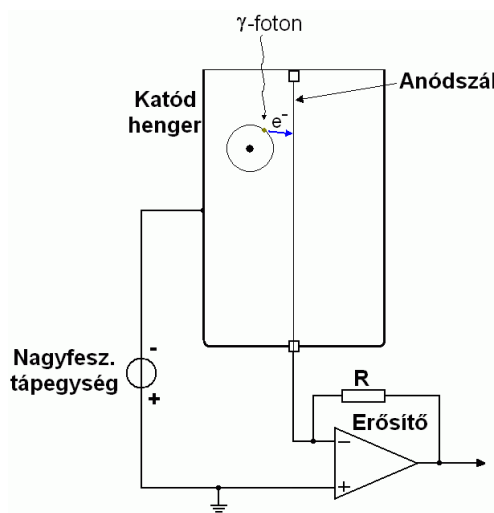
Összegzésként elmondható, hogy az ionizációs kamra és a PIN dióda egyformán jól alkalmazható γ -sugárzás méréséhez. Ionizációs kamra előnyeiként említhető egyszerű felépítése és stabil szerkezete, hátránya, hogy megfelelő hatásfok eléréséhez nagy méretű detektort kell alkalmazni.

PIN dióda alkalmazásával közel ugyanakkora érzékenység mellett kisebb méretű érzékelő készíthető, viszont nagyobb érzékenységet mutat a külső (mechanikai) behatásokra.

9. ELEKTROMÉTER ERŐSÍTŐ

9.1 Általánosan alkalmazott elektrométer erősítő elrendezés

Az erősítő az érzékelőtől érkező kis szintű jelet fogadja. A következő ábra egy ionizációs kamrával működő elektrométer erősítő vázlatát mutatja.



23. ábra

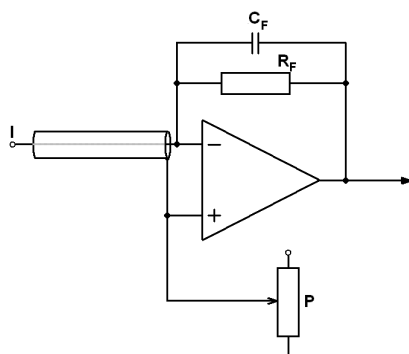
Ionizációs kamra és elektrométer erősítő vázlat

Az ionizációs kamrába érkező γ -foton kölcsönhatásba kerül a kamrában lévő gázzal és a külső elektrórhéjáról leszakít egy elektront. A leszakadó elektron a nagyfeszültségű tápegység által kialakított elektromos erőter hatására az anódszál felé vándorol. Az anódszálon így módon kialakuló elektromos áram egyenesen arányos a beérkező fotonok számával és energiájával. Az anódszál áramát (ami igen kicsi, nA-pA nagyságrendű) egy műveleti erősítő, aktív áram-feszültség konverter alakítja át elektromos feszültséggé. A kis értékű áram miatt az ábrán látható R ellenállásnak nagy értékűnek kell lennie (~100M Ω nagyságrend).

Az ionizációs kamrában létrejövő áramjel nagyon zavarérzékeny, ezért gondoskodni kell a megfelelő árnyékolásról és zavarvédelemről. Mivel az érzékelő által szolgáltatott áramjel nagyon kicsi, így olyan műveleti erősítőt szükséges alkalmazni, aminek bemeneti hibaárama (input bias current) extrém alacsony (kevesebb, mint 1 pA). Néhány az alkalmazható erősítők közül: ICH8500A, AD549, OPA128, OPA129, LMC6001, CA3420A, CA5420, LMP7721.

Az integrális üzemmód megvalósításához szűrni kell a mért jelet. Erre szolgál az alábbi ábra C_F kondenzátora (C_F - R_F páros egy aluláteresztő szűrőt alkot). A műveleti erősítő

ofszet feszültségét a P potenciométerrel lehet kiegyenlíteni. Alapesetben a zavarvédelmet az I bemenet koaxiális árnyékolása végzi.

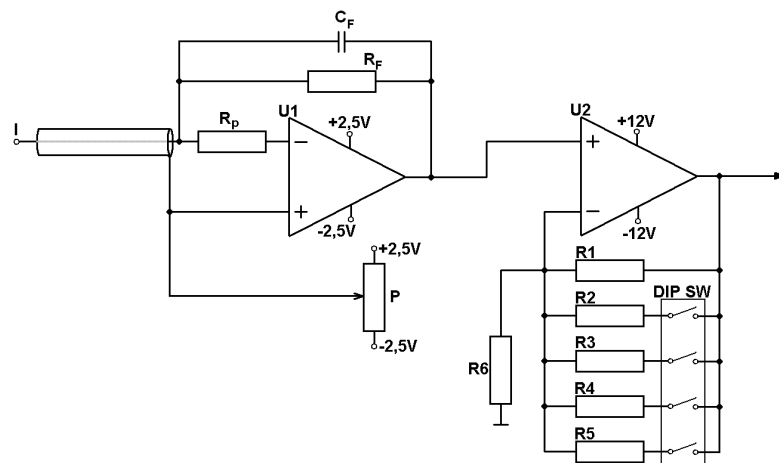


24. ábra
Elektrométer erősítő vázlat

Még egy apró, ámde annál fontosabb momentumot nem szabad kifejezteni az elektrométer erősítő működése kapcsán: a hőfokfüggést. Ha a mérendő áramunk 5 nA, a munkaellenállás pedig 500 M Ω , ekkor a kimenő jelünk 2,5V. Az ellenállás hőfoktényezője 100 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, vagyis 1 $^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletváltozás hatására az ellenállás 0,01%-al megváltozik. Ha a műszer -10 – 30 $^{\circ}\text{C}$ hőmérséklettartományban működik, akkor a munkaellenállás a hőfokfüggése miatt 2 M Ω -ot változik, ami a kimeneti jelben 10 mV-os eltérést jelent (0,4 %-os hiba!). Ezt a hibát semmiképpen sem szabad figyelmen kívül hagyni, ezért célszerű a munkaellenállást termosztálni, állandó hőmérsékleten tartani. Az egyik lehetséges megoldás, hogy a munkaellenállást egy szabályozott fűtéssel látjuk el, ami például 35 $^{\circ}\text{C}$ -on tartja a környezeti körülményektől függetlenül.

A korábban leírtaknak megfelelően a pontos méréshez ismerni kell a háttérsugárzás illetve a teljes sugárzás esetén mért detektor kimeneti jelszintet. Az elektronika hosszúidejű driftje és a környezeti feltételek változása (hőmérséklet páratartalom, por...) miatt, mérés előtt célszerű egy úgynevezett „kiegyenlítést” elvégezni, amikor a műszer megméri a teljes sugárzáshoz és a háttérsugárzáshoz tartozó detektor kimeneti feszültség értéket. A kiegyenlítéskor kapott értékeket egy memóriában el kell tárolni, majd ezek segítségével a mindenkor mért U_m értékből ki lehet számítani a tényleges anyagvastagságot. A műszer pontosságának megőrzése érdekében a kiegyenlítést maximum 8 óránként el kell végezni.

Ahhoz egy elektrométer erősítő univerzálisan használható legyen (különböző sugárforrás intenzitások, eltérő mérő távolságok) szükséges, hogy állítható legyen az erősítés. Ezt az alábbi ábra DIP kapcsolója végzi. Egy 4-es DIP kapcsolóval 16-féle erősítés állítható be. Az U1 erősítő előtti R_p ellenállás védelmi célokat szolgál, használatával kicsit nő U1 ofszet feszültsége, ez azonban P-vel kinullázható.

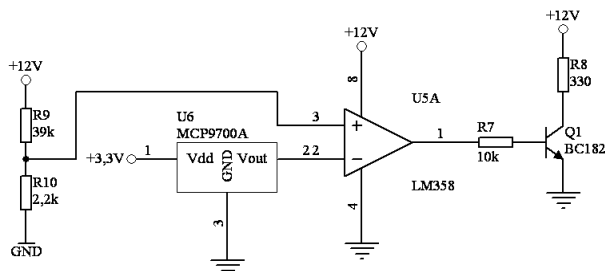


25. ábra

Gyakorlatban használt detektor elektorméter erősítője

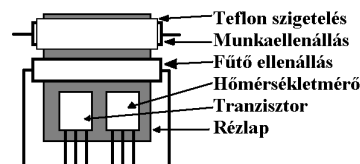
U1 erősítő $\pm 2,5\text{V}$ -os tápfeszültséggel működik. Az alacsony tápfeszültség oka az erősítő IC házán létrejövő kúszóáramok csökkentése. Az U2 precíziós erősítő $\pm 12\text{V}$ -os tápfeszültsége a kimeneti 0-10V-os jelszint előállításához szükséges.

A mérőellenállás termosztálásához minimálisan egy hőmérséklet érzékelő, egy műveleti erősítő és egy tranzisztor + ellenállás alkotta fűtőáramkör szükséges. A hőmérséklet érzékelő méri a munkaellenállás hőmérsékletét, a műveleti erősítő pedig úgy vezérli a tranzisztor + ellenállás páros áramát, hogy mindig a kívánt hőmérséklet álljon elő.



26. ábra

Termosztáló áramkör kapcsolási rajza



27. ábra

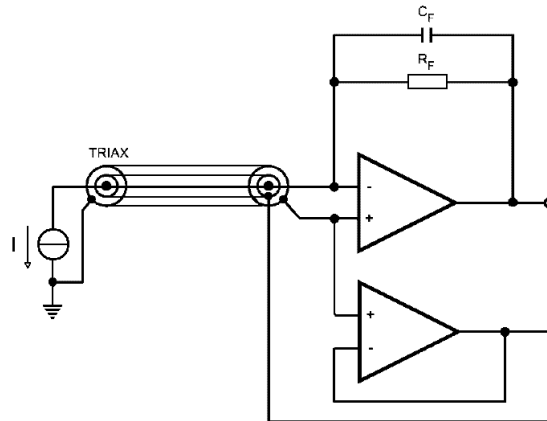
Termosztáló áramkör alkatrész elhelyezése

A munkaellenállást és a fűtő áramkört egymáshoz közel kell lenni a jó hőcsatolás érdekében. A 27. ábrán egy rézlapon egymás mellett foglal helyet a tranzisztor és a hőmérséklet érzékelő, felettük a fűtőellenállás, afelett pedig a munkaellenállás. A réz nagyon jól vezeti a hőt, így a kis rézlap egész felületén egyenletesnek tekinthető a hőmérséklet, az alkatrészeket hővezető pasztával kell rögzíteni a laphoz, a munkaellenállást pedig teflon szigeteléssel kell ellátni, hogy minél kisebb legyen a szivárgási áram.

A fent vázolt elektrométer erősítő megoldás általánosan használt az ipari gyakorlatban napjainkban. Az ofszet kiegyenlítésre általában egyszer van lehetőség (kézi úton), a műszer telepítéskor. Az érzékelőben keletkező igen kicsi áramjel érzékenysége miatt nem feltétlenül elegendő a koaxiális kábelezés.

9.2 Pontosítási lehetőségek

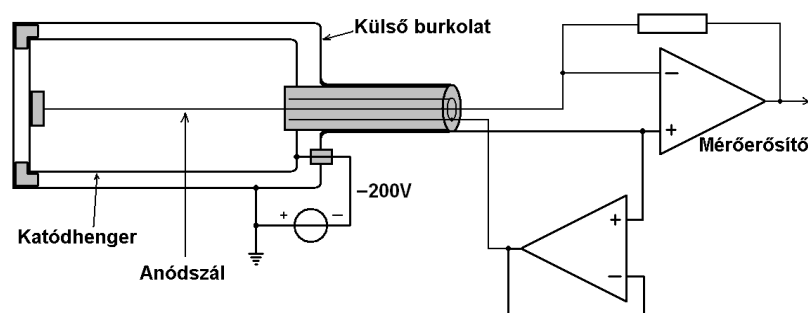
A nagy zavarérzékenységű áramjel védelme miatt az alábbi ábrán látható triaxiális kábelezés és csatlakozás javasolt. [7]



28. ábra
Triaxiális jelvezetés

A külső köpeny az árnyékolást szolgálja, a belső köpeny az ún. Guard rendszeré, míg a legbelső vezetősálon a mérőerősítő (az áram-feszültség átalakító erősítő) felé folyik az áramjel. A fenti ábrán látható alsó, követő műveleti erősítő a belső köpeny potenciálját tartja a mérőerősítő virtuális földpontjával azonos potenciálon, így a vezetősál és a belső köpeny között minimálisra csökken a hibát okozó szivárgási áram. A plusz egy szigetelő és a plusz egy vezető réteggel a triaxiális kábelezés egyben nagyobb zavarelnyomást nyújt, mint a koaxiális kábelezés.

A gyakorlatban ez a kialakítás a következő ábra szerinti:



29. ábra
Ionizációs kamra és elektrométer erősítő összekapcsolása triaxiális kábelezéssel

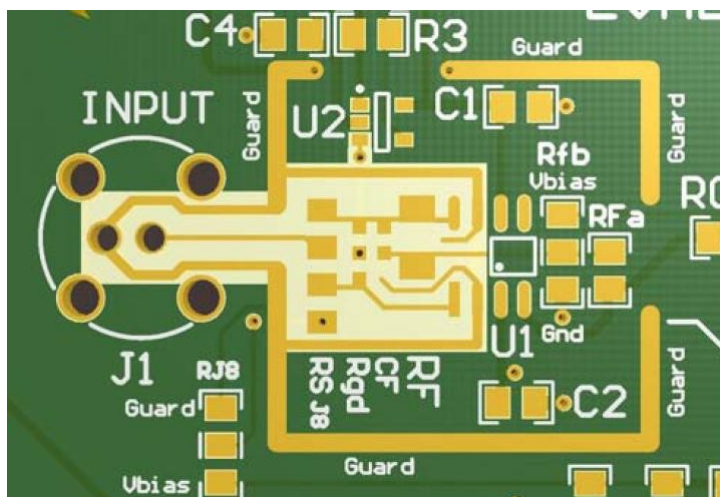
Az ionizációs kamra külső burkolata érintésvédelmi okokból a védőföldre van kötve. A nagyfeszültségű tápegység pozitív pólusa is a védőföldre csatlakozik, a negatív póluson így ahhoz képest áll elő a (példánkban) 200 V-os negatív feszültség. A -200V-os feszültség a belső, katódhengerre csatlakozik. A katódhengeren belül található a már korábban említett inert gáz, valamint az anódszál is. Az ábrán szürkével jelöltem a szigeteléseket. Az anódszál a

triaxiális kábel középső vezetőjéhez, azon keresztül kapcsolódik a mérőerősítő invertáló bemenetéhez. A triaxiális kábel külső árnyékoló köpenye az ionizációs kamra külső burkolatához, azon keresztül a védőföldhöz csatlakozik, így a mérőerősítő neminvertáló bemenete is a védőföld potenciáljára kerül, ennél fogva a mérőerősítő invertáló bemenete – ezzel együtt az anódszál is – virtuális földpotenciálon lesz. Az ionizációs kamrában lévő gázból felszabaduló elektronok a negatív katódhenger előfeszítés miatt az anódszál felé fognak vándorolni. Ha triaxiális helyett koaxiális kábelezést használnánk, akkor a koaxiális kábel szigetelésén keresztül folyó (egyébként minimális) szivárgási áram is túl nagy hibaáramot jelentene, ezt egy plusz műveleti erősítő és egy plusz árnyékolóköpeny közbeiktatásával lehet lecsökkenteni. A második műveleti erősítő feszültséggenerátorosan, a virtuális földponttal azonos feszültséggel táplálja meg a belső árnyékolást, a szivárgási áram útja ezáltal „el lett vágva”.

Mérőerősítőnek olyan műveleti erősítőt célszerű választani, aminek extrém kicsi a bemeneti hibaárama, vagyis ún. elektrométer erősítőt. A típusválasztékból a National gyártmányú LMP7721 típusú műveleti erősítőnek van a legkisebb bemeneti hibaárama, tipikusan 3 fA(!).

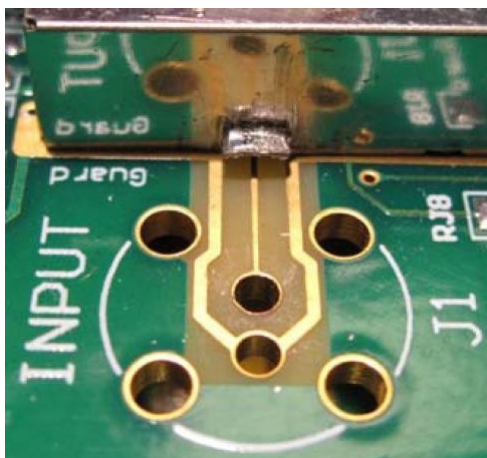
A gyártó ajánlása szerint, triaxiális kábelezés esetén a belső árnyékolóköpeny „meghajtására” az LMP7715 típusú precíziós műveleti erősítő használandó. [7] Fontos kiemelni, hogy a földhurok kialakulásának elkerülése érdekében az analóg bemeneti rész tápellátásának galvanikusan függetlennek kell lennie a védőföldtől. Ahogy a fenti ábrán látható, az ionizációs kamra nagyfeszültségének értéke a védőföldhöz képest értendő, ezért a triaxiális kábel külső árnyékolóköpenye is a védőföldhöz csatlakozik.

Az ilyen extrém kis áramok mérésekor külön figyelmet kell fordítani a nyomtatott áramköri elrendezésre is. A továbbiakban a National Semiconductor LMP7721-es típusú precíziós műveleti erősítőjének gyári próbapaneljén keresztül mutatom be a nyomtatott áramköri kialakítás lényeges elemeit. [9] A következő ábrán egy olyan nyomtatott áramkör részlete látható, ahol a jelhővezetés triaxiális csatlakozón keresztül történik.



31. ábra
Guard gyűrű

A gyári panelen olyan Guard gyűrű van kialakítva, ami lehetővé teszi, hogy az érzékeny területet további, elektromágneses zavarok elleni védelmet nyújtó Faraday kalitkával lássunk el. Ezt illusztrálja a következő ábra. Árnyékoló dobozként egy, a kereskedelmi forgalomban kapható ónozott acéldobozt javasolnak használni. A gyártó ajánlása szerint elegendő az árnyékolás két sarkát a Guard vezetékhez forrasztani.



32. ábra
Nyomtatott áramkör árnyékoló dobozzal

A fenti óvintézkedések figyelembe vételével az áramkör hibaárama 20 fA alatt tartható.

9.3 Alacsony hőmérsékletű termosztálás

A korábban bemutatott termosztáló áramkör kétségtelenül jól működik, de létezik alternatív megoldás is. Ha egy ipari környezetben működő áramkörnek 0°C - 35°C hőmérséklettartományban kell üzemelnie, akkor a fűtő, termosztáló egységnek pl. 40°C -on kell hőn tartani a mérőellenállást (maximális környezeti hőmérséklet + az elektronikus egységek saját működéséből fakadó hőtermelés). Bár a termosztálás kiküszöböli a

hőmérsékletváltozásból eredő hibát, az emelt hőmérséklet miatt megnövekszik az alkatrészek termikus zaja. Célszerű tehát inkább alacsonyabb hőmérsékleten tartani az alkatrészeket (nem csak a mérőellenállást). Egy Peltier-elemes aktív hűtés megfelel a célra, kiegészítve természetesen egy hőmérséklet szabályzó egységgel.

Röviden összefoglalva a Peltier-elem egy félvezető alapú termoelektromos egység, aminek kapcsaira egyenfeszültséget kapcsolva hőmérsékletkülönbség alakul ki a Peltier-elem két oldala között.

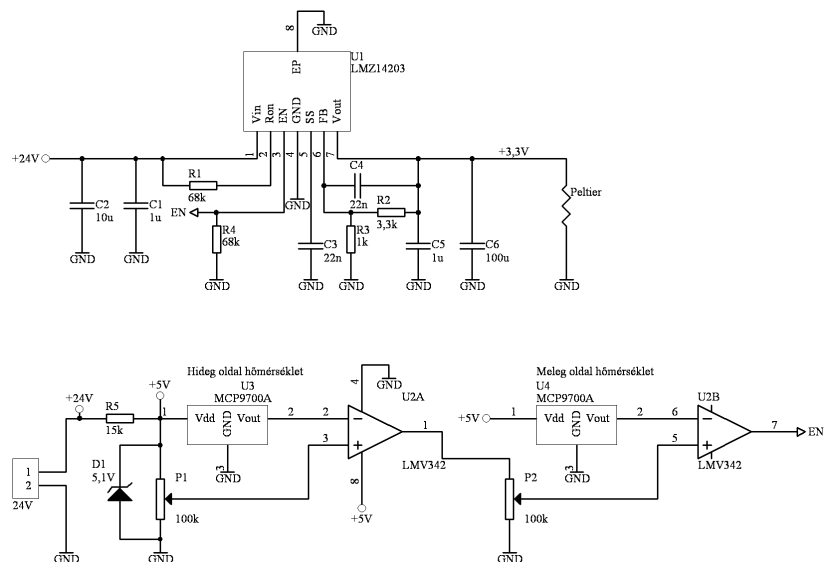
Ha a hűteni kívánt alkatrészeket egy kis, NYÁK-ba forrasztható, fém árnyékolókupak alá helyezzük, akkor egyszerre árnyékoljuk le elektromágnesesen (Faraday-kalitka) és képezünk egy jól hűthető térrészt az elektrométer erősítőnek és a hozzá kapcsolódó elektronikus egységeknek. A Peltier-elem hideg oldala az árnyékoló kupakhoz, meleg oldala pedig például a detektor fém dobozához kapcsolódik termikusan.

Bár a Peltier-elem egy félvezető eszköz, a működési tartományában jó közelítéssel tekinthető ellenállásnak. Az általam választott típus a PE-031-10-13, aminek főbb jellemzői között a maximálisan megengedett 3,8 V-os feszültséget, 3,9 A áramot és 75°C-os hőmérsékletkülönbség szerepel. Legegyszerűbb esetben egy 3,3V kimenetű, 3A terhelhetőségű, rövidzárvédett, kapcsoló üzemű tápegység táplálja a Peltier-elemet. A választott Peltier-elem típus adatlapja szerint a 3,3V/3A táplálás jó munkapontnak számít.

Szem előtt tartva azt az általános igényt, hogy az eszköz kompakt legyen, a kapcsoló üzemű tápegység IC a National Instruments által gyártott LMZ14203 típusú, az IC tokjában integrált induktivitású áramkör jó választás.

A hőmérséklettartás nem igényel pontos szabályozást, elegendő a kapcsoló üzemű (ki/be típusú) hőmérsékletszabályzás. Ezt a kapcsoló üzemű szabályzást könnyen meg lehet valósítani az LMZ14203 IC Enable (engedélyező) bemenetének vezérlésével.

Fontos még megemlíteni, hogy a Peltier-elemet nem szabad úgy működtetni, hogy a hideg és meleg oldal közötti hőmérsékletkülönbség nagyobb, mint 75°C, így szükséges a meleg oldali hőmérsékletfigyelés is. Az alábbi ábrán egy kettős komparátorral megvalósított huzalozott ÉS kapcsolat látható, amivel mind a hőmérsékletszabályzás, mind a hővédelem megoldott. A határértékek beállítását a P1 és P2 potenciométerrel lehet elvégezni.



33. ábra
Peltier-elem és áramkörei

9.4 Automatizált beállítás

A mért vastagság meghatározásának képletében –
$$x = \frac{-\ln\left(\frac{U_m - U_0}{B \cdot (U_f - U_0)}\right)}{\mu \cdot K}$$
 – a detektor a

feszültségértékeket adja, minden matematikai műveletet a számító egységnek (például egy PLC-nek) kell elvégeznie. Kiegyenlítéskor – a korábban leírt módon – a műszer lemez nélküli állapotban megméri a háttérsugárzáshoz tartozó és a teljes sugárzáshoz tartozó detektor kimeneti feszültségeket.

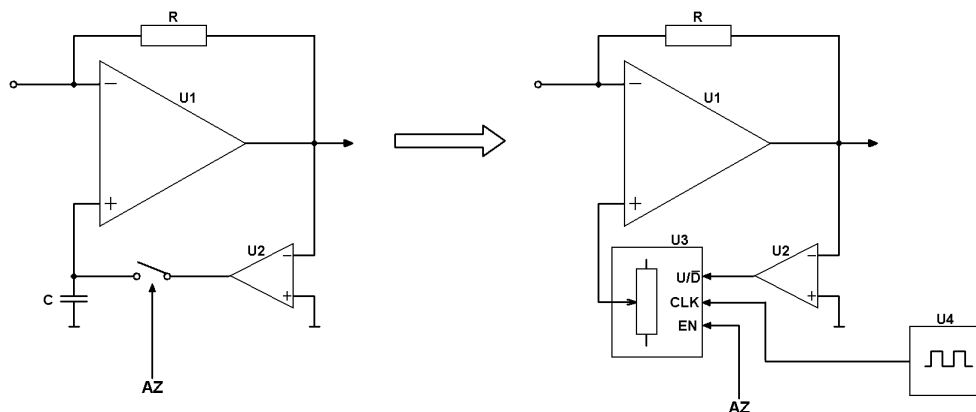
Az elektrométer erősítő P potenciométerével lehet az ofszet feszültséget nullázni. Ennek beállításával elérhetnénk, hogy háttérsugárzás mérésekor a detektor kimenetén 0V legyen ($U_0 = 0V$), így az anyagvastagság kiszámításának képletéből U_0 kivonását el lehetne hagyni a logaritmus kifejezés számlálójából és nevezőjéből is.

Gyakorlati szempontból nem célszerű nullázásra mechanikus potenciométert használni, ugyanis a 8 óránkénti kiegyenlítéskor mindig szét kéne szedni a detektort és beszedni az ofszet feszültséget, ami rendkívül ember- és időigényes feladat. Ehelyett automata módon kéne megvalósítani az ofszet nullázását.

Az alábbi ábra bal oldalán a „tankönyvi példa” látható aktív invertáló áram-feszültség átalakító áramkör esetére. Itt U2 egy precíziós műveleti erősítő, ami az U1 erősítő kimeneti feszültségét figyeli és amint az 0V-tól eltér úgy tölti / sűti ki a C kondenzátort, hogy az U1 kimenete a földpotenciállal egyenlő legyen. A nullázást (auto-zéró műveletet) az AZ nevű

kapcsoló zárásával lehet elvégezni, majd miután az U1 kimenete 0V lett, az AZ kapcsoló nyit, C pedig tartja a töltését (ezáltal folyamatosan kompenzálja U1 offset feszültségét).

Természetesen mindez csak abban az esetben működik megfelelően, ha az auto-zéró ideje alatt U1 bemenete nyitott, nem folyik a bemenetére áram (esetünkben ez a kiegyenlítéskori háttérsugárzás mérésének felel meg, a háttérsugárzás miatt keletkező kimeneti feszültséget nullázzuk).



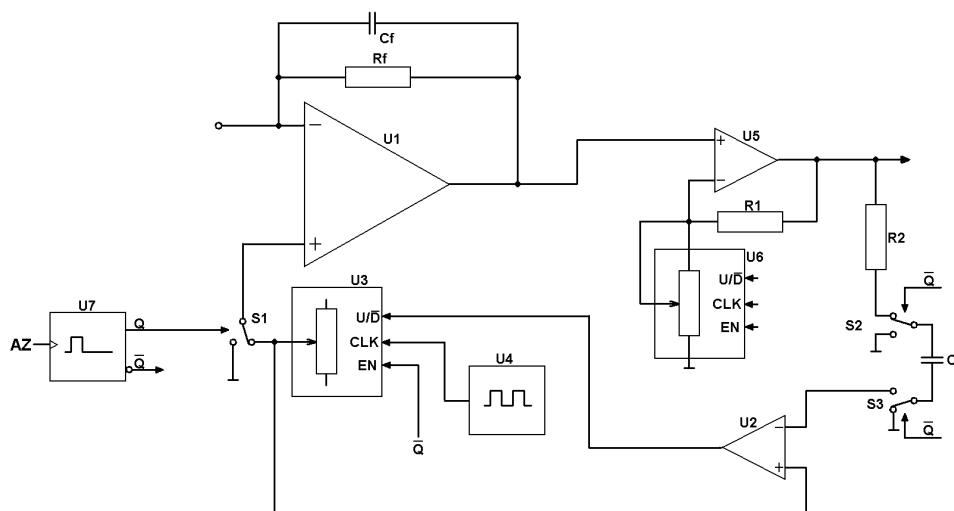
34. ábra
Auto-zéró áramkörök

Bár ez a megoldás egyszerű és csábítónak tűnik a használata, van egy óriási hátránya: C kondenzátor által tárolt töltés szépen lassan változik az U1 neminvertáló bemenetének nyugalmi árama, az AZ kapcsoló szivárgó árama és C saját vesztesége miatt. Ha 8 óránként végzünk kiegyenlítést, $C = 1\mu\text{F}$ és C töltésveszteségét kicsire is választjuk – pl. 1 pA-re – akkor $C \cdot \Delta U = I \cdot \Delta t$ képlet alapján ($C = 1\mu\text{F}$, $I = 1\text{pA}$, $\Delta t = 28800\text{s}$) majdnem 29 mV-ot változik C feszültsége, ami megengedhetetlenül sok (a gyakorlatban U_0 értéke 10 mV nagyságrendű).

Digitális potenciométer használatával viszont egyszerre küszöbölhető ki a töltésveszteség és a kézi beállítás problémája. A fenti ábra jobb oldalán a C kondenzátor helyett ez a megoldás látható. Olyan digitális potenciométert ajánlatos használni, ami nem digitális buszrendszeren keresztül (pl. I²C, SPI), hanem egyszerű fel/le protokollal vezérelhető. Egy ilyen eszköznek általában három vezérlő bemenete van: a középkivezetés fel illetve le léptetésének irányát kijelölő $U/\bar{D}$ (up-down) bemenet, a lépések számát meghatározó órajel bemenet (CLK) és a középkivezetés mozgatását engedélyező (EN) bemenet. Nullázáskor a CLK bemenetre egy fix frekvenciával működő astabil multivibrátor (U4) ad négyszögjelet, az U2 kimenete az U1 kimenetétől függően vezérli az $U/\bar{D}$ bemenetet. Az auto-zéró addig tart, amíg az EN bemenet engedélyezi a digitális potenciométer állítását. Az U1 – U2 – U3 együtt egy zárthurkú szabályzási rendszert alkot, így ügyelni kell a stabilitásra. Mivel U1 és U2 működési határfrekvenciája viszonylag magas

(> 10 MHz), így U4 frekvenciájának alacsonyan tartásával (~100Hz) az auto-zéró biztosan stabil lesz.

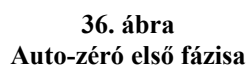
Az elektrométer erősítőben két műveleti erősítő segítségével áll elő a kimeneti 0-10 V feszültség: egy invertáló aktív áram-feszültség átalakítóból és egy neminvertáló erősítóből. Mivel a neminvertáló erősítő erősítését DIP kapcsolókkal lehet beállítani, így célszerű azt is digitális potenciométerre cserélni, hogy távolról, digitális jelekkel lehessen változtatni az értékét. Az alábbi ábra már a ténylegesen megvalósítandó kapcsolás vázlatát mutatja, az érthetőség kedvéért csak a főbb komponensek szerepelnek az ábrán.



35. ábra
Autozéró és erősítés beállítás

Az U1 – R_f – C_f alkotja az aktív áram-feszültség átalakítót (ami egyben elsőfokú aluláteresztő szűrőként is funkcionál), az U5 – R_1 – U6 pedig a neminvertáló erősítőt (itt az erősítés beállítása az U6 digitális potenciométerrel lehetséges). Az U3 digitális potenciométer az U1 offset nullázását végzi.

Figyelembe véve a valós körülményeket, szükség volt egy pár plusz alkatrész beiktatására. Először is háttér sugárzás mérésekor a mért jel sosem tiszta DC áram, hanem egy olyan áram ami sztochasztikusan ingadozik egy középérték körül. Ennek csillapítására szolgál az R2 – C1 páros. Auto-zéró alatt C1 kondenzátor a kimeneti offset feszültségre töltődik fel. Ahhoz, hogy C1 a tényleges offset feszültségre töltődhessen az U1 erősítő neminvertáló bemenetét földpotenciálra kell kapcsolni az S1 kapcsoló segítségével.



The circuit diagram shows a digital filter with feedback and a clocked output. It includes the following components and connections:

- U1:** An operational amplifier configured as an inverting integrator. The input signal is connected to the inverting input (-). The non-inverting input (+) is grounded. The feedback path consists of a resistor R_f and a capacitor C_f connected in parallel.
- U2:** A buffer or inverter that takes the output of U1 and provides a clock signal (CLK) to U3 and U4.
- U3:** A D-type flip-flop. Its D input is connected to the output of U1. Its clock input (CLK) is connected to the output of U2. Its enable input (EN) is connected to the output of U4. Its output (Q) is connected to the input of U7.
- U4:** A square wave generator that provides a periodic clock signal to U3.
- U5:** An operational amplifier configured as a voltage follower (buffer). Its input is connected to the output of U1, and its output is connected back to its input.
- U6:** A D-type flip-flop. Its D input is connected to the output of U5. Its clock input (CLK) is connected to the output of U2. Its enable input (EN) is connected to the output of U4. Its output (Q) is connected to the input of U7.
- U7:** A square wave generator that takes the output of U3 and U6 and provides a clock signal to U1.
- U8:** A square wave generator that provides a clock signal to U5.
- U9:** A square wave generator that provides a clock signal to U2.
- U10:** A square wave generator that provides a clock signal to U3.
- U11:** A square wave generator that provides a clock signal to U4.
- U12:** A square wave generator that provides a clock signal to U5.
- U13:** A square wave generator that provides a clock signal to U6.
- U14:** A square wave generator that provides a clock signal to U7.
- U15:** A square wave generator that provides a clock signal to U8.
- U16:** A square wave generator that provides a clock signal to U9.
- U17:** A square wave generator that provides a clock signal to U10.
- U18:** A square wave generator that provides a clock signal to U11.
- U19:** A square wave generator that provides a clock signal to U12.
- U20:** A square wave generator that provides a clock signal to U13.
- U21:** A square wave generator that provides a clock signal to U14.
- U22:** A square wave generator that provides a clock signal to U15.
- U23:** A square wave generator that provides a clock signal to U16.
- U24:** A square wave generator that provides a clock signal to U17.
- U25:** A square wave generator that provides a clock signal to U18.
- U26:** A square wave generator that provides a clock signal to U19.
- U27:** A square wave generator that provides a clock signal to U20.
- U28:** A square wave generator that provides a clock signal to U21.
- U29:** A square wave generator that provides a clock signal to U22.
- U30:** A square wave generator that provides a clock signal to U23.
- U31:** A square wave generator that provides a clock signal to U24.
- U32:** A square wave generator that provides a clock signal to U25.
- U33:** A square wave generator that provides a clock signal to U26.
- U34:** A square wave generator that provides a clock signal to U27.
- U35:** A square wave generator that provides a clock signal to U28.
- U36:** A square wave generator that provides a clock signal to U29.
- U37:** A square wave generator that provides a clock signal to U30.
- U38:** A square wave generator that provides a clock signal to U31.
- U39:** A square wave generator that provides a clock signal to U32.
- U40:** A square wave generator that provides a clock signal to U33.
- U41:** A square wave generator that provides a clock signal to U34.
- U42:** A square wave generator that provides a clock signal to U35.
- U43:** A square wave generator that provides a clock signal to U36.
- U44:** A square wave generator that provides a clock signal to U37.
- U45:** A square wave generator that provides a clock signal to U38.
- U46:** A square wave generator that provides a clock signal to U39.
- U47:** A square wave generator that provides a clock signal to U40.
- U48:** A square wave generator that provides a clock signal to U41.
- U49:** A square wave generator that provides a clock signal to U42.
- U50:** A square wave generator that provides a clock signal to U43.
- U51:** A square wave generator that provides a clock signal to U44.
- U52:** A square wave generator that provides a clock signal to U45.
- U53:** A square wave generator that provides a clock signal to U46.
- U54:** A square wave generator that provides a clock signal to U47.
- U55:** A square wave generator that provides a clock signal to U48.
- U56:** A square wave generator that provides a clock signal to U49.
- U57:** A square wave generator that provides a clock signal to U50.
- U58:** A square wave generator that provides a clock signal to U51.
- U59:** A square wave generator that provides a clock signal to U52.
- U60:** A square wave generator that provides a clock signal to U53.
- U61:** A square wave generator that provides a clock signal to U54.
- U62:** A square wave generator that provides a clock signal to U55.
- U63:** A square wave generator that provides a clock signal to U56.
- U64:** A square wave generator that provides a clock signal to U57.
- U65:** A square wave generator that provides a clock signal to U58.
- U66:** A square wave generator that provides a clock signal to U59.
- U67:** A square wave generator that provides a clock signal to U60.
- U68:** A square wave generator that provides a clock signal to U61.
- U69:** A square wave generator that provides a clock signal to U62.
- U70:** A square wave generator that provides a clock signal to U63.
- U71:** A square wave generator that provides a clock signal to U64.
- U72:** A square wave generator that provides a clock signal to U65.
- U73:** A square wave generator that provides a clock signal to U66.
- U74:** A square wave generator that provides a clock signal to U67.
- U75:** A square wave generator that provides a clock signal to U68.
- U76:** A square wave generator that provides a clock signal to U69.
- U77:** A square wave generator that provides a clock signal to U70.
- U78:** A square wave generator that provides a clock signal to U71.
- U79:** A square wave generator that provides a clock signal to U72.
- U80:** A square wave generator that provides a clock signal to U73.
- U81:** A square wave generator that provides a clock signal to U74.
- U82:** A square wave generator that provides a clock signal to U75.
- U83:** A square wave generator that provides a clock signal to U76.
- U84:** A square wave generator that provides a clock signal to U77.
- U85:** A square wave generator that provides a clock signal to U78.
- U86:** A square wave generator that provides a clock signal to U79.
- U87:** A square wave generator that provides a clock signal to U80.
- U88:** A square wave generator that provides a clock signal to U81.
- U89:** A square wave generator that provides a clock signal to U82.
- U90:** A square wave generator that provides a clock signal to U83.
- U91:** A square wave generator that provides a clock signal to U84.
- U92:** A square wave generator that provides a clock signal to U85.
- U93:** A square wave generator that provides a clock signal to U86.
- U94:** A square wave generator that provides a clock signal to U87.
- U95:** A square wave generator that provides a clock signal to U88.
- U96:** A square wave generator that provides a clock signal to U89.
- U97:** A square wave generator that provides a clock signal to U90.
- U98:** A square wave generator that provides a clock signal to U91.
- U99:** A square wave generator that provides a clock signal to U92.
- U100:** A square wave generator that provides a clock signal to U93.

37. ábra
Auto-zéró második fázis

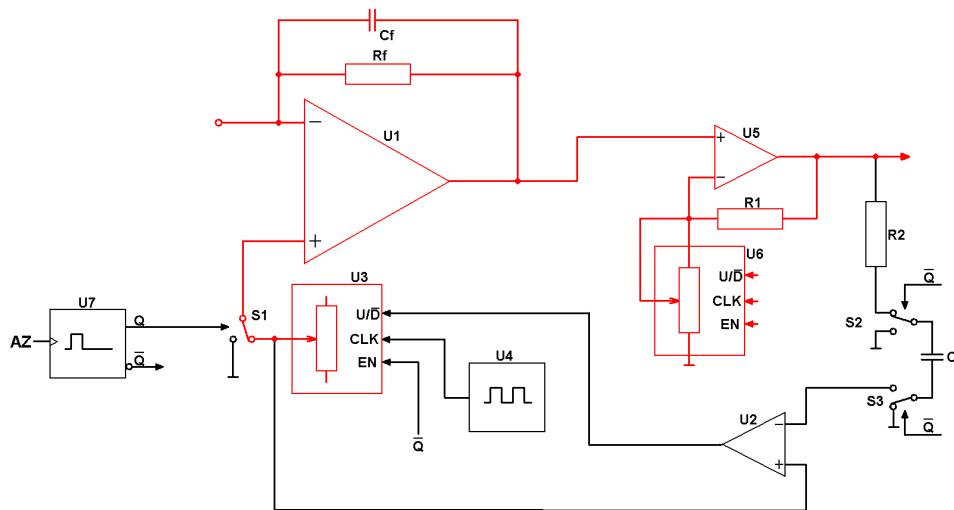
Lényegében az auto-zéró két fázisból áll: C1 kondenzátor feltöltéséből és U3 beállításából. A két fázis az U7 monostabil multivibrátor irányítja. Először magas szintet ad ki a Q kimenetén, amivel U1 neminvertáló bemenetét földpotenciálra kapcsolja. Ezzel megkezdődik C1 töltése. A töltés időtartama gyakorlati esetekben 6-10 másodperc, ennek megfelelően R2 és C1 értékeit úgy kell megválasztani, hogy a töltési idő leteltével C1

feltöltését befejezettnek tekinthessük. A töltési idő letelte után U7 $\overline{Q}$ kimenete lesz aktív és S1, S2 kapcsolók átkapcsolnak, U3 pedig elkezdi beállni C1 feszültségére.

A második fázis ideje rövidebb az elsőnél. Ha a digitális potenciométer felbontása 7 bit (128 órajel alatt beállítható minimumtól a maximum állásig), a CLK bemenetre érkező órajel 100 Hz, akkor legrosszabb esetben 1,28 másodperc kell a nullázáshoz. Kiegyenlítések során az előző értéktől csak kis mértékben tér el az ofszet érték, így elegendő pl. 0,5 másodpercet hagyni U3 beállítására. A legnagyobb eltérés bekapcsolás után lehetséges, ekkor 3 kiegyenlítést elvégezve biztosan nullázva lesz az ofszet feszültség.

Külön kiemelendő, hogy S1 – S2 – S3 kapcsolókkal az ofszet nullázást elvégző áramkörök már nem egy zárthurkú szabályzási rendszer részei, így nincs szükség stabilitás vizsgálatra, sőt az U4 által szolgáltatott órajel sokkal nagyobb frekvenciájú is lehet. Nem érdemes túl nagy frekvenciát választani, mivel C1 töltődési ideje mindenképpen 6-10 másodperc, ami mellett lényegében mindegy, hogy U3 beállítása 0,1 vagy 0,01 másodpercet vesz igénybe. Az 1 kHz – 10 kHz közötti választás megfelelőnek tűnik.

A fent vázolt ofszet beállítás csak logikailag kétfázisú, valójában három különböző állapotból áll: a korábban is említett C1 töltési fázisból, U3 beállítási fázisából és magából a mérési fázisból.



38. ábra
Mérés fázis

Mérési fázis alatt az S1 – S2 – S3 kapcsolók a fenti ábra szerinti állapotban vannak. Egyéni mérlegelés kérdése, hogy milyen módon valósul meg a különböző fázisok vezérlésének megvalósítása. Lehetséges akár „tisztán analóg” módon megtervezni az áramkört (pl. 555 típusú időzítő IC-kkel), vagy az egész nullázást irányíthatja valamilyen egyszerű (8 bites) mikrovezérlő. Előbbi megoldás előnye, hogy nem szükséges programozni

az áramkört, utóbbi esetben pedig kevesebb elemszámmal és egyszerűbb nyomtatott áramkörti tervezéssel valósítható meg ugyanazon funkció.

Harmadik lehetőségként megemlíteném, hogy elképzelhető a nullázás direkt vezérlése is, amikor külső digitális jelek irányítják a kapcsolókat és külső forrásból származik U_3 órajele is.

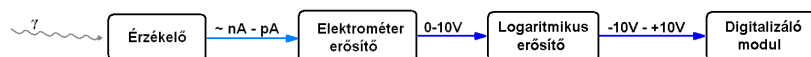
9.5 Logaritmikus erősítő alkalmazásának lehetőségei

A mért anyagvastagság kiszámítási képlete U_0 elhagyásával a következőre

egyszerűsödik:
$$x = \frac{-\ln\left(\frac{U_m}{B_m \cdot U_f}\right)}{\mu \cdot K}$$
. Bár U_0 kiküszöbölése célszerű volt és nagyban

egyszerűsítette a képletet, mégis megmaradt a természetes alapú logaritmus függvény használata, ami egy igen időigényes számítási művelet.

Következő lépésként végezzük el a logaritmus képzést az analóg jeleken, ahelyett, hogy ezt a mintavételezett adatokon tennénk. Ehhez egy logaritmikus erősítőt kell tenni az elektrométer erősítő és a digitalizáló modul (pl. PLC A/D bemeneti kártyája) közé, az alábbi ábrán látható módon.



39. ábra
Detektor logaritmikus erősítővel

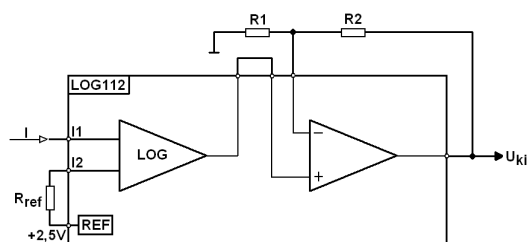
Az eddig ismertetett összeállításban az elektrométer erősítő 0-10 V-os (unipoláris) kimenetét a digitalizáló modul -10 – +10V (bipoláris) bemenetű A/D IC-je fogadta, ami a mérési tartomány felét használaton kívül hagyta (az A/D effektív felbontása így 1 bittel kevesebb). A logaritmikus erősítő a bemenetén 0-10V-ot fogad, a kimenetén pedig -10 – +10V tartományú feszültség jelenik meg, kihasználva ezzel az A/D teljes felbontását.

A választásom a Texas Instruments által gyártott LOG112 típusú logaritmikus erősítőjére esett. Ez az IC a bemenetére érkező jelet széles tartományban képes feldolgozni (több, mint 7 dekád dinamikus bemeneti tartomány) és mindezt nagy precizitással (ha a bementi jeltartomány nem több, mint 5 dekád átfogású).

Az erősítő kettős tápfeszültséget igényel, két áram bemenettel rendelkezik, az általa

megvalósított átviteli függvény pedig:
$$U_{ki} = \frac{K}{2} \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$
, ahol I_1 és I_2 a két bemeneti áram, K

az IC utolsó fokozatának erősítése. A gyártó által ajánlott működés vázlata az alábbi ábrán látható.



40. ábra
LOG112 vázlat

Az IC rendelkezik egy pontos 2,5 V-os referencia feszültség kimenettel, ami az R_{ref} ellenálláson keresztül konstans árammal látja el az I_2 bemenetet. A logaritmizált jel további erősítését a kimeneten lévő műveleti erősítő végzi, az erősítés (K) beállítására szolgálnak az R_1 és R_2 ellenállások. A LOG112 az I_1 bemenetén áramjelet fogad, de akár feszültségjelet is fogadhat egy soros ellenállás közbeiktatásával (ugyanúgy, mint az ábrán az I_2 bemenet az R_{ref} használatával). Az I_2 bemenet állandó árammal való táplálásával a kimeneti jel mindössze az

I_1 bemeneti áram függvénye az $U_{ki} = \frac{K}{2} \cdot \lg\left(\frac{R_{ref} \cdot I_1}{2,5}\right)$ képlet szerint. Ha a bemeneti feszültségjelet pl. egy R_{be} ellenállással áramjellé alakítjuk, akkor az átviteli függvény

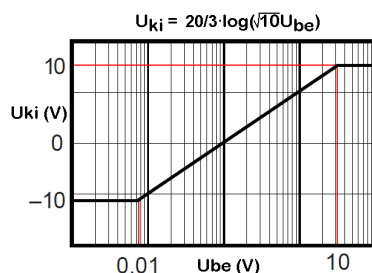
$$U_{ki} = \frac{K}{2} \cdot \lg\left(\frac{R_{ref} \cdot \frac{U_{be}}{R_{be}}}{2,5}\right) \text{ lesz.}$$

A célkitűzés, miszerint a logaritmikus erősítő 0-10 V-os bemeneti feszültségjelből -10 – +10 V-os kimeneti jelet állítson elő, nem teljesíthető teljes mértékben, ugyanis 0 V bementi feszültségnél a logaritmus függvény nem értelmezett, így egy minimális bemeneti feszültség szükséges az áramkör normális működéséhez.

Fémlemezek vastagságmérésénél a radioaktív sugárzás elnyelődésének mértékét mindig a teljes sugárzás esetén az elektrométer erősítő kimenetén mért feszültséghez viszonyítjuk. Minél vastagabb a lemez annál több sugárzást nyel el. A gyakorlati életben a legkisebb és a legnagyobb mért jelszint aránya 1:400 – 1:500 körüli. Ha a maximális arányt 1:1000-nek választjuk (biztonsági tartalékot hagyva a szélsőséges esetekre), akkor a logaritmikus erősítőnek 10 V bemeneti feszültség esetén 10 V kimeneti feszültséget, 0,01 V

$\left(\frac{10 \text{ V}}{1000}\right)$ bemeneti feszültség esetén pedig -10 V kimeneti feszültséget kell előállítania.

A megvalósítandó átviteli függvény így $U_{ki} = \frac{20}{3} \cdot \lg(\sqrt{10} \cdot U_{be})$.

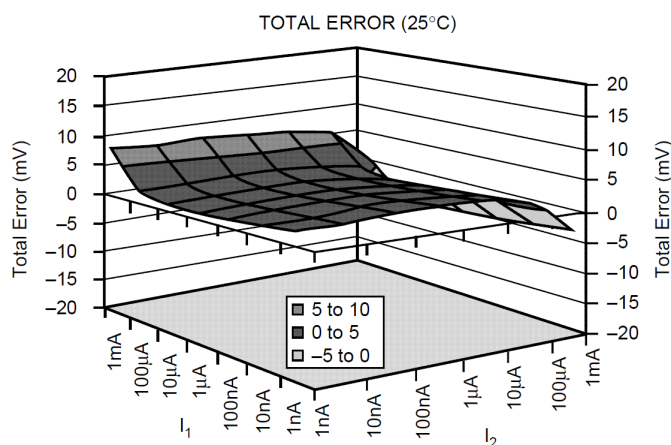


41. ábra

Logaritmikus erősítő átviteli függvénye

Bár nekünk a bemeneti feszültség természetes alapú logaritmusa kell, nem számít lényeges eltérésnek, hogy a logaritmikus erősítő kimenetén 10-es alapú logaritmus szerint áll elő a kimeneti feszültség, mivel a logaritmikus azonosságok felhasználásával $\ln(a) = 2,3 \cdot \log(a)$.

A LOG112-nek, mint minden valós életben működő áramkörnek van valamekkora hibája. A gyártó grafikus formában közli is a hiba mértékét különböző bemeneti áramok esetére. Olyan I_2 munkaponti áramot kell választani, ahol az I_1 bemeneti áram 3 dekádosa esetén (1:1000 átfogás) minimális az áramkör hibája.



42. ábra

LOG112 teljes hibája különböző bemeneti áramok esetén [8]

A fenti ábra szerint jó választásnak tűnik az $I_2 \approx 0,5 \mu A$. Ha $R_{ref} = 4,7 M\Omega$, akkor $I_2 \approx 0,53 \mu A$, így I_1 maximális értéke (amikor $U_{ki} = 10 V$) $16,82 \mu A$, minimális értéke pedig $16,82$

nA ($U_{ki} = -10 V$). R_{be} értéke ezután már könnyen kiszámítható $\frac{U_{be \max}}{I_{1 \max}}$ képlettel.

A fentebb leírtak szerint egyszerűen meg lehet határozni K értékét is $\left(\frac{40}{3}\right)$.

A logaritmikus erősítő egy lehetséges megvalósítása az alábbi ábrán látható (nem jelölve a tápellátó alkatrészeket):

Logaritmikus erősítő használatával a fenti ábra exponenciális görbéje „kiegyenesíthető”, lineárisra transzformálható, így egységnyi mért detektor kimeneti feszültség változás, egységnyi mért vastagság változást jelent. Emiatt nem feltétlenül szükséges az A/D-nek olyan típust választani, ami egyszerre nagy felbontású (24 bit) és ugyanakkor viszonylag gyors is. Az IC adatlapja szerint a LOG112-t alkalmazva A/D előtt

olyan mértékű dinamika tartomány növekedés érhető el egy 12 bites felbontású A/D-nél, mintha az 20 bites felbontású lenne [8]. Természetesen ez a fenti exponenciális összefüggéssel jellemezhető érzékelő átviteli függvényekre érvényes.

Utolsó lépésként még módosításra van szükség még a mért vastagság kiszámításának képletén a logaritmikus erősítő alkalmazása miatt. A korábban, az A/D által teljes sugárzás esetén mért U_f helyett most $\frac{20}{3} \cdot \lg(\sqrt{10} \cdot U_f)$ értéket kapunk, és hasonlóképpen U_m esetén

$$\frac{20}{3} \cdot \lg(\sqrt{10} \cdot U_m) \text{-et.}$$

$$\text{A logaritmus azonosságait felhasználva: } \frac{20}{3} \cdot \lg(\sqrt{10} \cdot U_m) = \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_m)$$

Kiindulva az eredeti (ofszet nélküli) képletből ($U_m = U_f \cdot B \cdot e^{-\mu \cdot x}$), adódik: $\ln(U_m) =$

$$\ln(U_f) + \ln(B) - \mu \cdot x, \text{ ami átrendezve kapjuk a már ismert képletet: } x = \frac{-\ln\left(\frac{U_m}{B \cdot U_f}\right)}{\mu}.$$

A probléma ott van, hogy az A/D által mért érték nem $\ln(U_m)$, hanem

$$\frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_m). \text{ A fenti képletben a zárójelet felbontva: } x = \frac{\ln(U_f) - \ln(U_m) + \ln(B_m)}{\mu}.$$

$$\ln(U_m) \text{ helyére } \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_m) \text{-et, } \ln(U_f) \text{ helyére } \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_f) \text{-et írva:}$$

$$x = \frac{\frac{20}{3 \cdot 2,3} [\ln(\sqrt{10} \cdot U_f) - \ln(\sqrt{10} \cdot U_m)] + \ln(B_m)}{\mu} = \frac{\frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln\left(\frac{U_f}{U_m}\right) + \ln(B_m)}{\mu}, \text{ ahonnan a } \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot$$

os szorzót nem lehet „eltüntetni” B segítségével. Ráadásul a $\frac{20}{3 \cdot 2,3}$ érték ideális esetre vonatkozik, nem számolva pl. az ellenállások pontatlanságából eredő erősítéshibákkal. Szükség van tehát a Build-up faktorok olyan módosítására, amivel kiküszöbölhető a fenti probléma.

Használjunk B érték helyett c-t a következő módon: $U_m = U_f \cdot e^{-\mu \cdot x \cdot c}$.

$$\text{Ekkor } x = \frac{\ln(U_f) - \ln(U_m)}{\mu \cdot c \cdot K} \text{ lesz. Legyen } C = \frac{20 \cdot c}{3 \cdot 2,3}, \quad T = \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_f) \text{ és}$$

$$L = \frac{20}{3 \cdot 2,3} \cdot \ln(\sqrt{10} \cdot U_m), \text{ így } x = \frac{T - L}{\mu \cdot C \cdot K}.$$

A különbség B és C között alapvetően az, hogy a korrekciót milyen adaton végezzük el. B esetében az elektrométer erősítő kimeneti feszültségét korrigáljuk, míg C esetén ezt a mért vastagságon végezzük el.

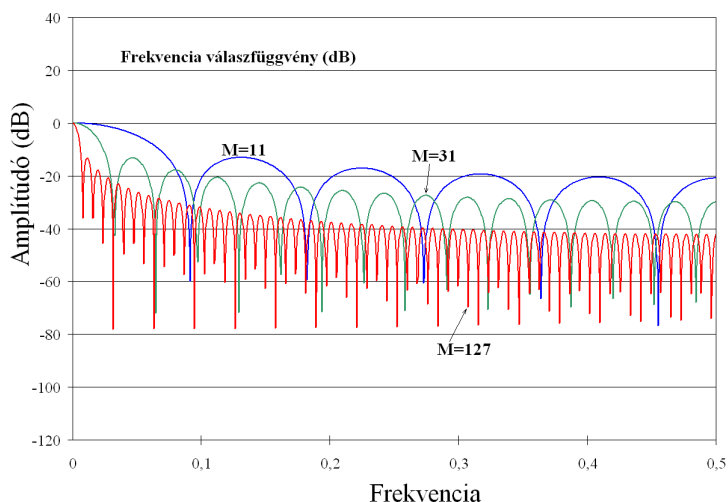
C értékét etalon lemezes pontosítás alkalmával meg lehet határozni minden mért etalon lemez esetére (ezek lesznek C_m -ek), oly módon, ahogy B_m értékek is meghatározhatók a korábbi képletnél (ezzel együtt kiesik az ellenállások pontatlanságából adódó hiba is).

10. DIGITÁLIS JELFELDOLGOZÁS

Ahogy a technika és technológia fejlődik a mérés technika területén is érezhető az az általános igény, hogy az újabb mérések minél nagyobb pontosságúak és a mintavételi idők minél rövidebben legyenek. Természetesen ez a két feltétel egymásnak ellentmond, nagy pontosság eléréséhez hosszú mérési idő szükséges, és fordítva...

Legegyszerűbb esetben – és ez az általános gyakorlat is – nagy mintavételi gyakorisággal mérnek (például PLC-s mérőrendszer esetén 1-2 ms-onként) és ha a mért jel ingadozása túl nagy (túl zajos), akkor adott számú (8-16-32) minta átlagából képeznek egy mért értéket, aminek a maradék ingadozása, zaja már az elfogadható szint alá csökkent. Ez a megoldás nagyon könnyen megvalósítható, nem igényel nagy számítási kapacitást, sőt sok, a kereskedelmi forgalomban kapható PLC A/D kártyája már beépített beállítási lehetőséggel tartalmazza ezt, megkönnyítve a programozók munkáját.

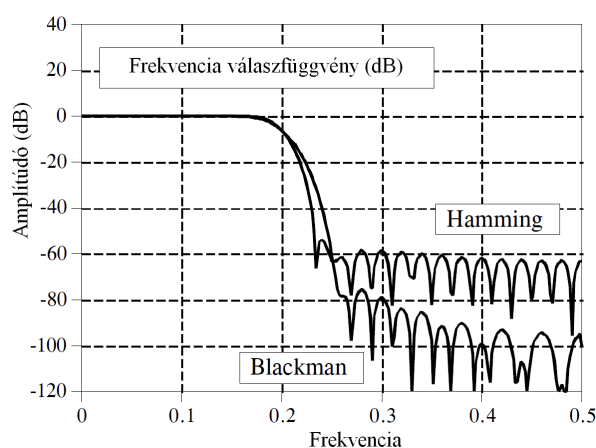
Ez a fajta szűrés lényegében a FIR típusú digitális szűrők legegyszerűbb változata, az ún. átlagoló szűrő. Annak ellenére, hogy egyszerű és könnyen megvalósítható, a frekvenciatartománybeli viselkedése alapján nem mondható túlságosan hatékonynak. Ahogy azt már korábban is említettem célszerű az 50 Hz-es zavarelnyomás miatt $n \cdot 20$ ms-os átlagolási időt választani. 1 ms-os mintavételi idővel számolva ez 20, 40, 60, stb. minta átlagát jelenti. Az alábbi ábrán az átlagoló szűrő frekvenciaválasza látható különböző számú átlagolt minta esetén (M: átlagolt minták száma). A frekvenciaskála nem konkrét frekvenciaértéket jelent, hanem a jelfrekvencia és a mintavételi frekvencia arányát. 1 ms-os mintavételi idő (1000 Hz-es mintavételi frekvencia) esetén a 0,1-es érték 100 Hz-et jelent.



45. ábra
Átlagoló szűrő frekvenciaválasza

Annyi világosan látszik, hogy az átlagoló szűrő zárótartománybeli csillapítása nem túl nagy (kivéve az átlagolt minták számával arányos frekvenciákat). Ez javítható az átlagolt minták számának növelésével, de a javulás mértéke nem jelentős, ellenben az áteresztő tartomány frekvenciahatára drasztikusan csökken (és ez nem is skálázható) és az átlagolt minták számának növelésével növekszik a szűrési idő. Míg egy általános ipari méréstechnikai feladat esetén kielégítő megoldást nyújt az átlagoló szűrő használata, addig a dolgozat témáját érintő esetben nem elegendő. Célszerű ablakozott $\sin(x)/x$ FIR szűrőt használni, ez ugyanis nagyobb zárótartománybeli csillapítással és állítható frekvenciahatárral rendelkezik. Választhatnánk kisebb számítási igényű IIR típusú szűrőt is, de – mint azt a későbbiekben látni fogjuk – jelen esetben egy tetszőleges frekvenciaválaszú szűrőre van szükségünk, erre a célra pedig a FIR típusú szűrők alkalmasak. A dolgozat keretei nem adnak lehetőséget a FIR és IIR szűrők összehasonlítására, ez a [10] felhasznált irodalomban részletesen olvasható. Annyit azonban mindenképpen érdemes megjegyezni, hogy míg az IIR szűrők esetén a szűrés határfrekvenciájának változtatása kihat a szűrő fázisválaszára is, addig a FIR szűrőnél „bármilyen” törésponti frekvenciánál ugyanakkora a fázistolás. Mivel a vastagságmérő berendezés általában egy zárthurkú szabályozási rendszer érzékelő eleme, így a fix értékű fázisválasz a zárthurkú szabályozási rendszerben fix értékű holtidőként jelentkezik, amire sokkal könnyebb a szabályozás finomhangolását elvégezni.

Az alábbi ábrán egy aluláteresztő FIR szűrő frekvencia válaszfüggvénye látható Blackman és Hamming ablakozás esetén.



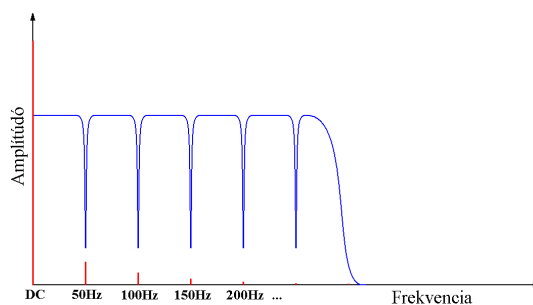
46. ábra
Ablakozott, $\sin(x)/x$ FIR szűrő frekvenciaválasza [20]

Amennyiben a megvalósítandó vastagságmérési feladat nagy vastagság átfogást igényel, úgy a vastag anyagtartományban mérhető kis jelszintek miatt a nagynak mondható átlagolt mintaszám esetén is lengések tapasztalhatók a szűrt jelben. A lengéseket az átlagolási

mintaszám növelésével lehet csökkenteni, de ekkor egy mért érték túl hosszú idő alatt állna elő, valamint indokolatlanul megnövekedne a vékonyabb anyagok mérési ideje is.

Ablakozott FIR szűrő használatával mindig ugyanannyi számú minta felhasználásával áll elő a kimeneti érték, a határfrekvencia változtatásával pedig a lengés mértéke szinte tetszőlegesen mértékben csökkenthető.

Statikus esetben (amikor egy darab fixen rögzített lemezt mérünk), elegendő lenne egy aluláteresztő szűrőt alkalmazni, hiszen csak az alábbi ábra DC jele a hasznos komponens. Futó lemez esetén a lemez vastagságának változásai is hasznos jelnek számítanak, ezért mindent figyelembe véve egy egyedi digitális szűrőt kell tervezni, ami egyszerre valósítja az 50 Hz-es zavarelnyomást és az aluláteresztő funkciót (az alábbi ábra kék színnel jelzett átviteli függvénye, piros színnel a hasznos, DC jelkomponens és az 50 Hz-es zavarjelek láthatóak.).

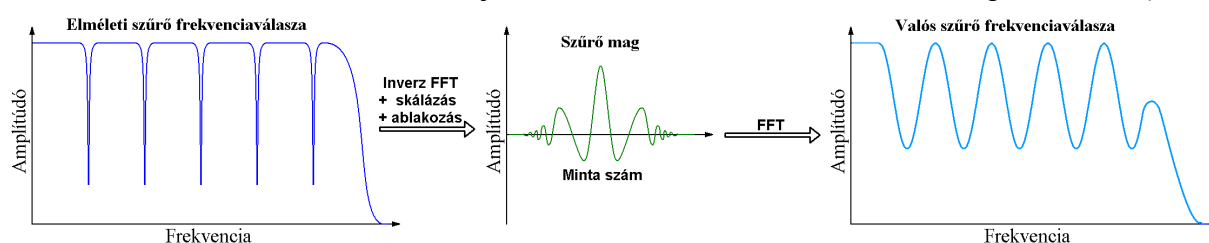


47. ábra
Egyedi FIR szűrő frekvenciaspektruma

A szűrőtervezés menete nagy vonalakban (A dolgozatnak nem célja és nem is témája a digitális szűrőtervezés részletes ismertetése):

- Meghatározni a kívánt frekvenciaválaszt,
- Inverz FFT művelettel előállítani a FIR szűrő magját (kernel),
- Eltolni és ablakozni a kernel-t,
- A valós frekvenciaválaszt meghatározni.

A fenti lépéseket különböző mintavételi időkre és különböző felbontású frekvenciaválaszokra el kell végezni, hogy optimális eredmény születhessen (minél nagyobb felbontású a frekvenciaválasz, annál jobban közelíti a valós szűrő az eredeti paramétereit).



48. ábra
Egyedi szűrő tervezése

Figyelembe kell venni, hogy ha jó közelítéssel akarjuk megvalósítani az elméletileg tervezett digitális szűrőt, akkor a szükséges számítási teljesítmény megnövekszik (a szűrő magjának méretnövekedéséből fakadóan). Végeredményben célszerű lehet a digitális szűrést egy DSP processzorral elvégeztetni.

Megemlítendő még, hogy lehetőség van a szűrő működés közbeni hangolására is. A gyakorlatban azonban ez kis jelentőséggel bír.

11. ÖSSZEFOGLALÁS

Fémlemezek előállítása során a késztermék sokféle fizikai jellemzőjének pontos mérése szükséges. Az előállított termék, a fémlemez egyik fontos paramétere a vastagsága. A gyártási folyamatok nem teszik lehetővé a fizikai érintésen, vagy optikai elven alapuló mérőberendezések használatát, ezért elterjedten alkalmaznak radioaktív sugárzással működő vastagságmérő berendezéseket. Ezek az eszközök gyakran a gyártósor szabályozási rendszerének érzékelő elemei, így pontosságuk alapvetően befolyásolja a késztermék minőségi paramétereit.

A jelen dolgozatban bemutatott radioaktív sugárzást mérő detektor a fémfeldolgozó iparban használatos, ionizációs sugárzással működő vastagságmérő berendezések egyik fontos eleme. Ezek a berendezések igen nehéz üzemi körülmények között működnek, nem ritka a nagyfokú por-, pára-, hőmérséklet- és olajterhelés.

A dolgozatban bemutattam az ionizációs sugárzással működő transzmissziós mérési elvet, a röntgensugárzást előállító berendezések működési vázlatát, az ionizáló sugárzás abszorpcióját és annak gyakorlati használhatóságát, az általános ipari használatra tervezett elektrométer erősítők jellemzőit és kitértem a javítási lehetőségekre.

Külön figyelmet fordítottam a precíziós méréstechnikai megvalósításokra és a mérési sebesség fokozására.

Vázoltam az elektronikus egységek továbbfejlesztési lehetőségeit (offset kompenzálás, analóg jeleken végzett logaritmus képzés) elsődleges szempontként az automata működést és az automatizálhatóságot szem előtt tartva.

Kitértem még a mért értékek digitális jelfeldolgozására is, aminek segítségével tovább javítható a mérési rendszer impulzusválasza.

Nem volt lehetőségem prototípus eszközzel tényleges méréseket végezni, ez magyarázza, hogy a dolgozatban szereplő megvalósítások elméleti jellegűnek tűnnek, azonban a vázolt irányelvek betartásával nagymértékben javítható egy adott berendezés pontossága és mérési ideje.

12. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] E. P. Bertin: Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis, Second edition, Plenum Press, 1975
- [2] Bódizs Dénes: Atommagsugárzások mérés technikái, Typotex Kiadó, 2006
- [3] Tables of x-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements $Z = 1$ to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest (<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>)
- [4] R. P. C. Schram: Application of X-ray imaging for desinty analysis (<ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/nrg/nrglib/2004/44395i111-%20X%20ray%20attenuation.pdf>)
- [5] Gáztöltésű (gázionizációs) detektorok feszültségkarakterisztikája (http://nasa.web.elte.hu/NewClearGlossy/Flash/gas_filled_Jensen/index.html)
- [6] C. W. Thiel: An introduction of semiconductor radiation detectors, Physics Department, Montana State University, Bozeman Montana (<http://www.physics.montana.edu/students/thiel/docs/Detector.pdf>)
- [7] LMP7721 datasheet (<http://www.ti.com/lit/ds/snosaw6b/snosaw6b.pdf>)
- [8] LOG112 datasheet (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/log112.pdf>)
- [9] LMP7721 Multi-function evaluation board users' guide (<http://www.ti.com/lit/ug/snou004/snou004.pdf>)
- [10] Steven W. Smith: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Pub, 1997