

## MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

<b>A mérés tárgya:</b>	<i>A/D és D/A átalakítók vizsgálata (7. mérés)</i>
<b>A mérést végzi:</b>	<i>Veszelyi Bence Balázs</i>
<b>Mérőcsoport:</b>	<i>H12, 42</i>
<b>A mérés időpontja:</b>	<i>2021.02.15</i>

### Fontos szabályok:

- Az egyes mérési feladatok megoldása során az alkalmazott eljárást minden esetben indokolni is kell!
- A tantárgy honlapján a jelen feladatleírás mellett csatolva megtalálhatók külön fájlban a feldolgozandó mérési eredmények. Minden méréshez több fajta mérési eredmény található, amelyek közül a Neptun kód alapján kell kiválasztani azt, amelyet elemezni kell.
- Az adott feladathoz kijelölt mérési eredményt be kell másolni a jegyzőkönyvbe, nem elég hivatkozni rá!
- Minden méréshez talál videós segédanyagokat, melyek a linkre (🔗 ikon) kattintva (a Ctrl billentyű lenyomása mellett) megnyílnak. Ha problémát tapasztal a videók megnyitásával, a linkekre jobb egérgombbal kattintva a hivatkozás másolható, melyet a böngésző címsávjába beillesztve a videók megtekinthetők.

## Mérési feladatok

### 1. D/A átalakító statikus jellemzőinek mérése

A mérés során először egy 12 bites, 2,5 V referenciafeszültségű unipoláris D/A átalakító hibáit vizsgáljuk. Mind a D/A-k, mind az A/D-k esetén a hibákat az ideális eszközökhöz képest adjuk meg, tehát az ideális karakterisztikától való eltérést jellemezzük. Ha a vizsgált átalakító ideális volna, akkor az LSB értékét az alábbi módon határozhatnánk meg:

$$\text{LSB} = \frac{2.5 \text{ V}}{2^{12}} = 0.6104 \text{ mV}.$$

Az LSB ismeretében pedig tetszőleges D kódhoz az  $U_{ki}(D) = D \cdot \text{LSB}$  kimeneti feszültség tartozik ideális esetben.

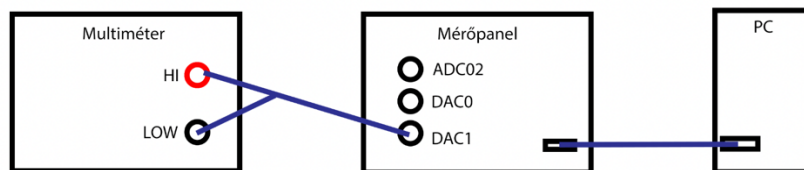
- 1.1. Határozza meg az alábbi táblázatban található adatok alapján a D/A átalakító ofszethibáját és erősítési hibáját!

A mérési feladathoz tartozó segédanyagok:

[Statikus karakterisztika](#) 🔗, [Erősítési és ofszet hiba](#) 🔗

*A mérőkártya DAC1-es kimenetét összekötjük a multiméterrel, amely feszültséget mérünk. A vezérlés egy matlab script (dac\_gui.m) segítségével történik.*

*A mérési elrendezés:*



*A mérés eredményei:*

*Az eredmények megállapításához az alábbi összefüggést használtam:*

$$U_{ki} = LSB * D_{in} + U_{offset}$$

*A DAC kimenetén 0 bemeneti kombináció ( $D_{in}$ ) mellett sincsen 0 V, ez az aktív elemek offsetfeszültségének tudható be, ez az offset feszültség.*

*Az LSB pedig a full scale és a mintavételek számának hányadosa.*

*$LSB = FS / (M - 1)$ , ahol  $FS = 2493 - 8.9$  (mV) (minimális és maximális mért feszültségérték különbsége) és  $M = 4096$ .*

Bemeneti kód	Mért feszültség		
0	8.9 mV	Ofszet	8.9 mV
4095	2493 mV	LSB	0.6066 mV

A fentebb számolt LSB az átalakító igazi kvantálási szintjét adja meg, az 1. feladatban ennek névleges értéke került meghatározásra. Innentől kezdve az LSB-ben megadandó mennyiségeknél mindig a valódi LSB értékkel számoljon!

- 1.2. Az ön számára kijelölt adatok alapján határozza meg a mérési pontokban az átalakító integrális nemlinearitását. A számítások során az előző feladatban meghatározott karakterisztikával dolgozzon. Adja meg az INL értékét minden mérési pontban, LSB-ben kifejezve. Az eredményeket hasonlítsa össze az adatlapi értékkel (ezeket hivatkozza). Értékelje a mérés eredményét.

A mérési feladathoz tartozó segédanyag:

[Integrális nemlinearitás mérése](#)

*A mérés menete, mérési eredmények:*

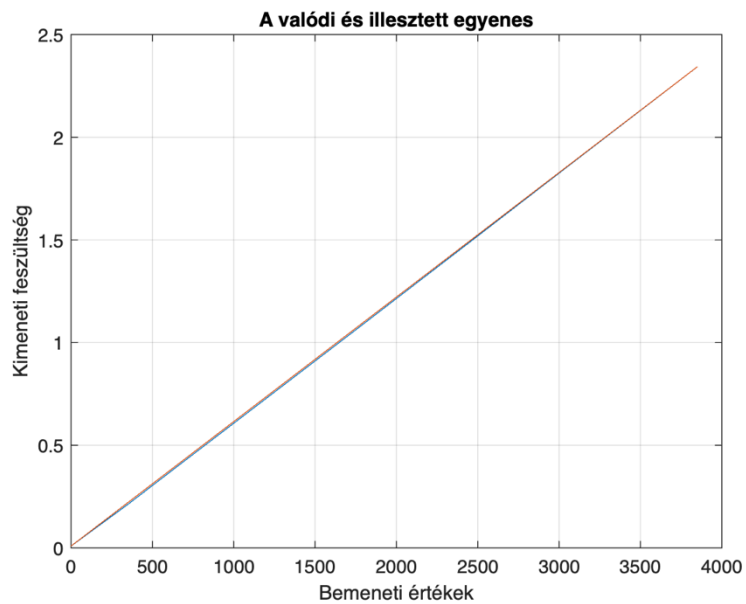
*A mérési elrendezés azonos az 1.1-es feladattal.*

*Az integrális nemlinearitás hiba meghatározásához nemcsak a két végpontban mérünk feszültséget, hanem a teljes tartományon. A 0,4095 tartományt egyenletes részekre felosztjuk és az itt kapott eredményeket összehasonlítjuk az eredeti értékekkel.*

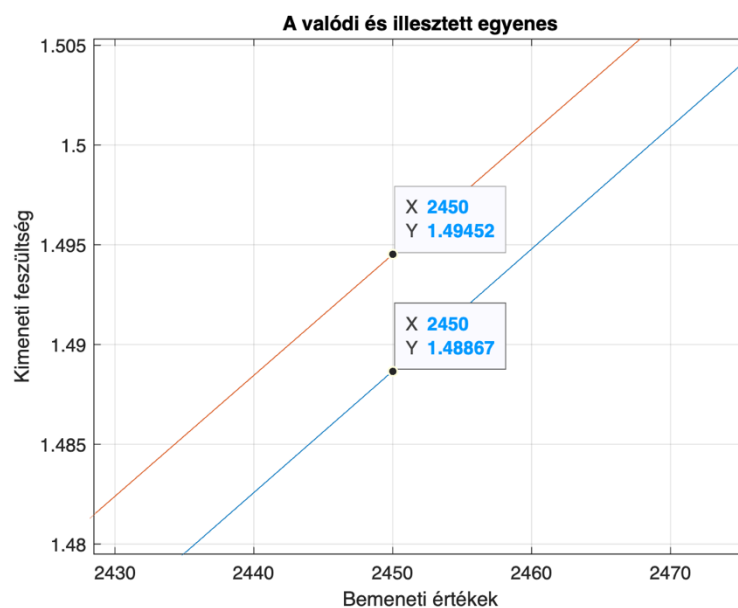
*Az egyenes illesztést végző MATLAB kód:*

```
dacin =[0 350 700 1050 1400 1750 2100 2450 2800 3150 3500
3850];
dacout = [0.00892 0.21244 0.42538 0.63724 0.84967 1.06191
1.27536 1.48867 1.70293 1.91696 2.13016 2.34343];
```

```
plot(dacin,dacout, dacin, U)
grid
title('A valódi és illesztett egyenes')
xlabel('Bemeneti értékek')
ylabel('Kimeneti feszültség')
```



*A két egyenes között az eltérés minimális (kb 6 mV), de van:*



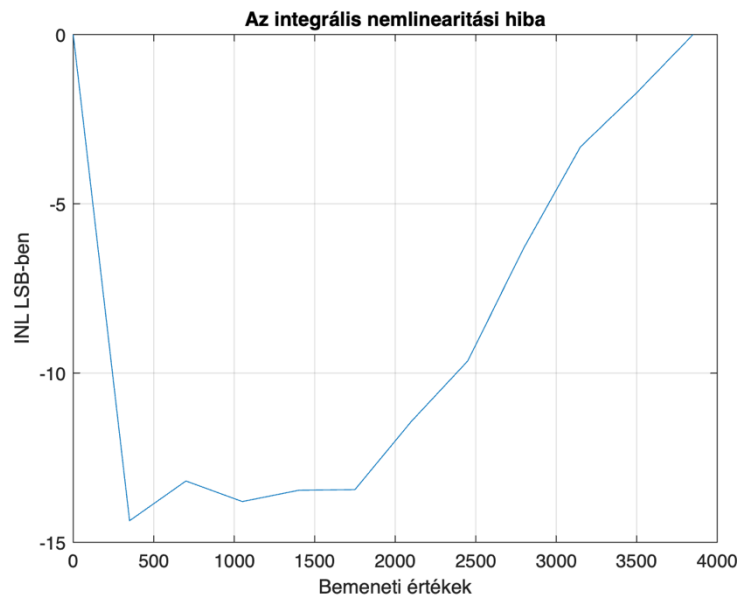
*Az INL-t kiszámoló és ábrázoló MATLAB kód:*

```
dacin =[0 350 700 1050 1400 1750 2100 2450 2800 3150 3500 3850];
dacout = [0.00892 0.21244 0.42538 0.63724 0.84967 1.06191 1.27536 1.48867 1.70293 1.91696 2.13016 2.34343];
```

```
OFFSET=dacout(1);
LSB=((dacout(end)-dacout(1))/3850);
U = (dacin*LSB)+OFFSET;
INL = (dacout - U)/LSB;
```

```
plot(dacin,INL)
grid
title('Az integrális nemlinearitási hiba')
xlabel('Bemeneti értékek')
ylabel('INL LSB-ben')
```

*Az integrális nemlinearitási hiba ábrázolása:*



*Értékelés:*

*Az INL hiba jelentkezik, értéke 0 és -14.5 között található. Az adatlap maximálisan +/- 1 LSB hibát ír, amelynek ez nem felel meg. A görbén láthatjuk, hogy a kb 1700-as ponttól felfele javul az INL értéke, míg a legrosszabb a 350-es pontban.*

- 1.3. Az ön számára kijelölt adatok alapján határozza meg az átalakító differenciális nemlinearitását. A hiba értékét LSB-ben adja meg!

A feladathoz tartozó segédanyag:

[Differenciális nemlinearitás](#)

*A mérés menete, mérési eredmények:*

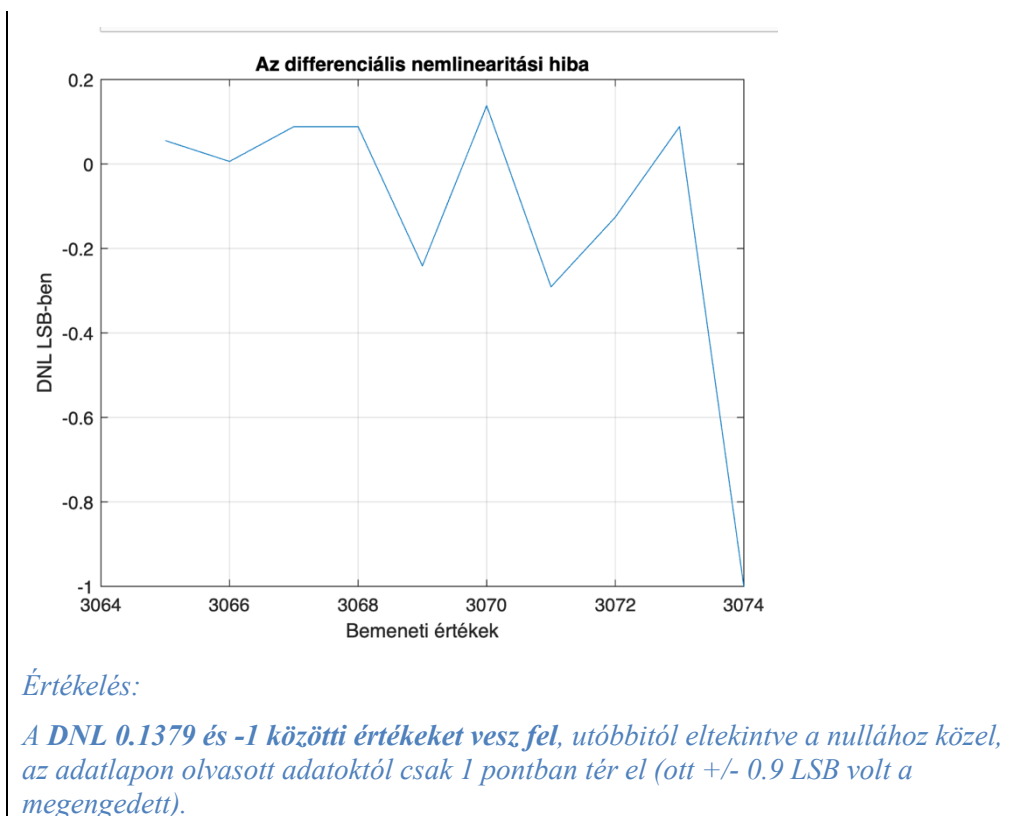
*A mérési elrendezés azonos az 1.1-es feladattal. A DNL meghatározáshoz a szomszédos kódokhoz tartozó kimeneti feszültségeket mérjük meg, ebből a kódszélességeket meghatározzuk. A DNL-t is LSB-ben szokás megadni.*

*Az DNL-t kiszámoló és ábrázoló MATLAB kód:*

```
dacin = [3065 3066 3067 3068 3069 3070 3071 3072 3073 3074];
dacout = [1.86552 1.86616 1.86677 1.86743 1.86809 1.86855
1.86924 1.86967 1.87020 1.87086];
```

```
LSB=6.0637e-04;
dacout1=[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
for i=1:9
    dacout1(i)=dacout(i+1)-dacout(i);
end
```

```
DNL=dacout1/LSB-1;
plot(dacin,DNL)
grid
title('Az differenciális nemlinearitási hiba')
xlabel('Bemeneti értékek')
ylabel('DNL LSB-ben')
```



## 2. D/A átalakító kódváltási tranziensének vizsgálata

A glitch, azaz a kódváltási tranziens egyszerre sok bit megváltozásakor szokott előfordulni a D/A átalakítók kimenetén. Általában azoknál az átalakítóknál figyelhető meg, ahol az egyes biteket egymástól független, ezért időben egymáshoz képest siető vagy késő kapcsolók állítják 1 vagy 0 értékűre. Például vegyük azt az esetet, amikor egy 4 bites D/A kimenete a 0111-es értékről 1000-as értékűre vált, de a bitek váltási sebessége egyenes arányos a helyiértékükkel (a legnagyobb helyiértéken szereplő bit vált a leggyorsabban, stb.). Ekkor a kimeneten az alábbi tranziens játszódik le: 0111, 1111, 1011, 1001 és végül 1000. Mivel mérés során használt átalakító 12 bites, ezért itt a mérést a 2047-es és 2048-as kódok változtatásával végezzük el.

A kódváltási tranziens az öt jellemző impulzus területével szokták jellemezni, ezt nevezik a glitch energiájának. Érdekes tudni, hogy az elnevezés pontatlan, hiszen a kapott mennyiség mértékegysége [Vs] (mivel egy feszültségjelet kell időben integrálnunk), de a terminológia gyakran hivatkozza ezt a mennyiséget energiaként, így ettől most nem fogunk eltérni.

A feladat tehát az oszcilloszkópon rögzített tranziens alatti terület meghatározása, valamilyen integrálközelítő összeggel. A feladat megoldása során használják fel az oszcilloszkóp képernyőjén látható adatokat az időosztásra, illetve a feszültség felbontására vonatkozóan. Itt a feladat az, hogy egy józan becslést adjon a keresett mennyiségre, a rendelkezésre álló adatok alapján.

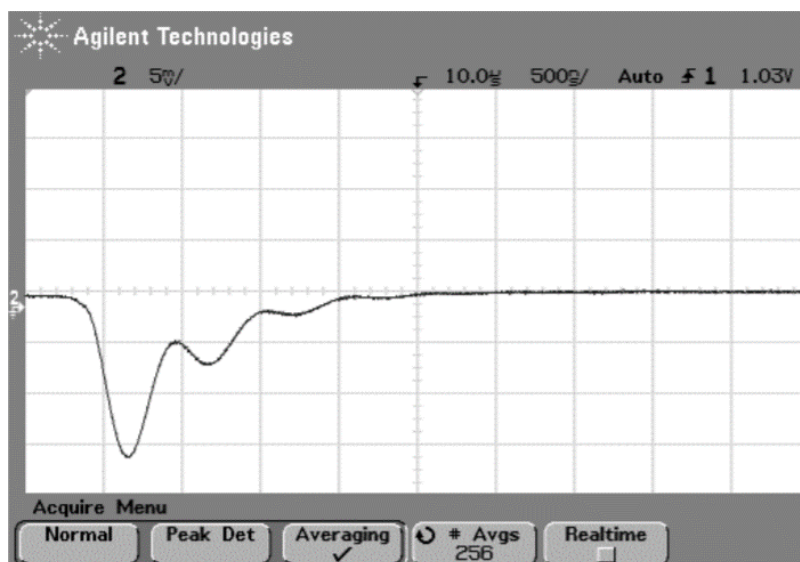
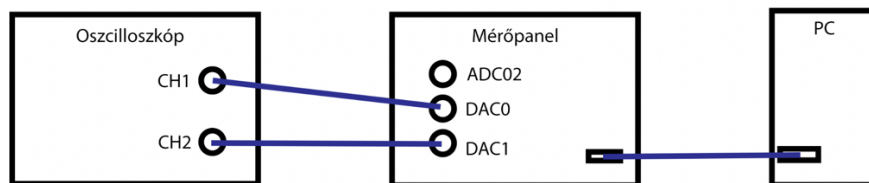
- 2.1. Az ön számára kijelölt ábra alapján határozza meg a DAC1 D/A átalakító glitch energiáját 0111...1 értékből 1000...0 értékbe történő váltás esetén!

A feladathoz tartozó segédanyag:

[Kódváltási tranziens vizsgálata](#)

*Mérés menete, a mérési elrendezés blokkdiagrammja, mérési eredmények:*

A mérőkártya mindkét DAC kimenetét az oszcilloszkópra kötjük (bemeneti csatornáknak), az egyik kimenetet pedig triggerelésre is felhasználjuk.



Az oszcilloszkóp ábrájának jellemzése, a mérés szempontjából releváns információk:

Az ábrán a tranziens kinagyított képét láthatjuk, 500 ns vízszintes és 5mV függőleges osztásközökkel.

Értékelés:

A görbe alatti terület becslése körülbelül 4 téglalap, egy téglalap területe  $5\text{ mV} * 500\text{ ns}$ , azaz  $2.5\text{ nVs}$ , összesen így a glitch területre **10 nVs** adódik. Ez egy durva becslés, pontos eredményt integrálással kapnánk (például az oszcilloszkóp beépített integráló funkciójával).

### 3. Kvantálás vizsgálata

A kvantálási hiba mérésénél a két jel mellett azok különbsége is látható. A feladat megoldása során figyeljen oda, hogy a hibajelnek más a függőleges irányú felbontása, mint az eredetileg mért jeleknek. A feladat ennek a hibajelnek a vizsgálata, és ez alapján annak megbecslése, hogy hány bites átalakítót szimuláltunk az erősen kvantált jel előállításához.

- 3.1. Az ön számára kijelölt mérési eredmény alapján határozza meg a kvantált jelhez tartozó D/A átalakító bitszámát. Vegye figyelembe a hibajel felbontását. Az ábra alapján mekkora lehetett az LSB értéke? Hány bites lehetett a D/A?

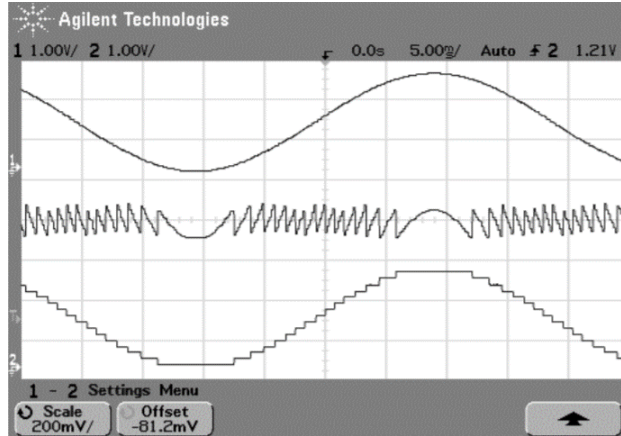
A mérési feladathoz tartozó segédanyag:

[Kvantálási hiba vizsgálata](#)

A mérés blokkdiagrammja, mérési eredmények:

A mérési elrendezés azonos a 2-es feladattal.

A DAC DAC0-s kimenetén egy 12 bites szinuszjelet látunk, az oszcilloszkóp 1-es csatornájára kötve, míg a másik csatornán egy kisebb felbontású (kisebb bitszámú) szinuszjelet láthatunk. Az oszcilloszkóp MATH funkciója segítségével különbségjelet képzünk ezen kettő bemenetből és ez lesz a kvantálási hiba.



A becsült bitszám zárt alakú kifejezése és értéke, az eredmények levezetése.

Az alsó jel „lépcsőinek” számát megszámlálva 16-ot kaptam, amely egy 4 bites D/A átalakító által kiadott kimenetnek tűnik ( $2^4=16$ ). Az LSB kiszámításához az  $FS/(2^N)$  képletet alkalmazva 0.15625 V érték jön ki, azaz **156.25 mV**.

#### 4. Nem koherens mintavételezés hatása

A mintavételezés akkor nevezhető koherensnek, ha adott számú minta mellett a jelből egész számú periódust mérünk. Például ha  $N$  mintán szeretnénk  $D$  periódust mérni,  $f_s$  mintavételi frekvenciával, akkor a szükséges jelfrekvencia az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$\frac{D}{N} = \frac{f_x}{f_s}$$

A koherens mintavételezés előnye, hogy ekkor a mért jel diszkrét Fourier transzformáltját kiszámítva nem találkozunk a DFT eredményében a spektrumszivárgás jelenségével. Ennek magyarázata, hogy a DFT felbontása

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}$$

így egész számú  $D$  esetén  $\Delta f$  osztója  $f_x$ -nek, így a jelfrekvencián található harmonikus pontosan a DFT  $J \cdot \Delta f$  frekvenciájú pontjára fog esni. A véges számú ( $N$ ) minta miatt a DFT eredményében megjelennek a diszkrét sinc() ablak mintái is, azonban (mivel ez a frekvenciatartományban konvolválódik a szinusz DFT-jével) ennek nem válnak a mintái láthatóvá, mivel a DFT-ben megjelenő frekvenciákra éppen a nullahelyek (más nevükön leszívási pontok) fognak esni:

$$x_i = \begin{cases} 0 & i < 0 \\ 1 & 0 \leq i < N \\ 0 & i \geq N \end{cases}$$

$$X_k = DFT\{x\} = e^{-j\pi k \frac{N-1}{N}} \cdot \frac{\sin(k\pi)}{\sin\left(\frac{k\pi}{N}\right)}$$

Nem koherens mintavételezés esetén az alapharmonikus két DFT pont közé esik, a fenti ablak mintái megjelennek a DFT eredményében. Ezt a jelenséget nevezzük a fentebb is említett spektrumszivárgásnak. Ezzel együtt megjelenik az úgynevezett léckerítés hatása is: mivel a DFT eredményében a harmonikus komponens a DFT két pontja között van, nem tudjuk az amplitúdóját pontosan leolvasni.

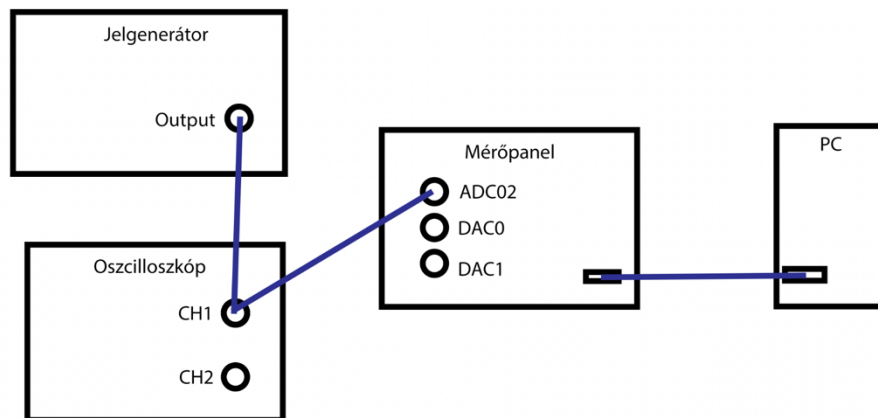
- 4.1. Az ön számára kijelölt mérések alapján határozza meg, hogy az adott mérés koherens-e vagy sem. Számolja ki közelítőleg a jelfrekvenciát mindkét esetben, a mért periódusok száma alapján.

A feladathoz tartozó segédanyag:

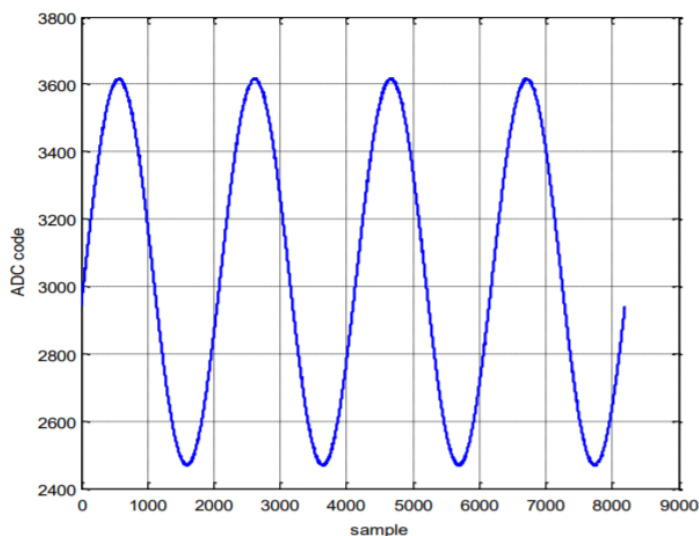
[Mintavételezés vizsgálata](#)

*A mérés elrendezés blokkdiagramja, mérési eredmények:*

*A mérőkártya analóg-digitális átalakítóját használjuk, a jelgenerátort a mérőpanel ADC02-es csatornájára kötjük, a jelet az oszcilloszkópra is bevezetjük egy T elosztó segítségével. A jelgenerátor által létrehozott szinuszelet 8192 mintával digitalizáljuk,  $f_s = 115200$  Hz frekvencián.*



*Eredmények ábrázolása:*



*Az alábbi egyenlőség ismerete esetén az egyetlen ismeretlen tényező a jel frekvenciája, amely könnyedén kiszámítható:*

*$f_i/f_s = J/M$ , itt  $J=4$ ,  $M=8192$ ,  $f_s=115200$  Hz*



*A jel frekvenciája ( $f_i$ ) ebből 56.25 Hz.*

*A koherens mintavételezés mindkét feltétele teljesül:  $J$  és  $M$  egész számok, illetve  $J < M$ .*

- 4.2. Állítson elő Matlabban egy egységnyi amplitúdójú szinuszjelet a koherens mérés periódusszámával,  $N=8192$  mintán. Számítsa ki a DFT-t. Adja meg pontosan az összefüggést a jelfrekvencia és a DFT eredményében látható csúcs helye között. Ábrázolja a DFT eredményének abszolút értékét. Mi az összefüggés a legnagyobb csúcs magassága és a szinuszjel amplitúdója között?

*A jel előállításához és a DFT kiszámításához szükséges Matlab kód:*

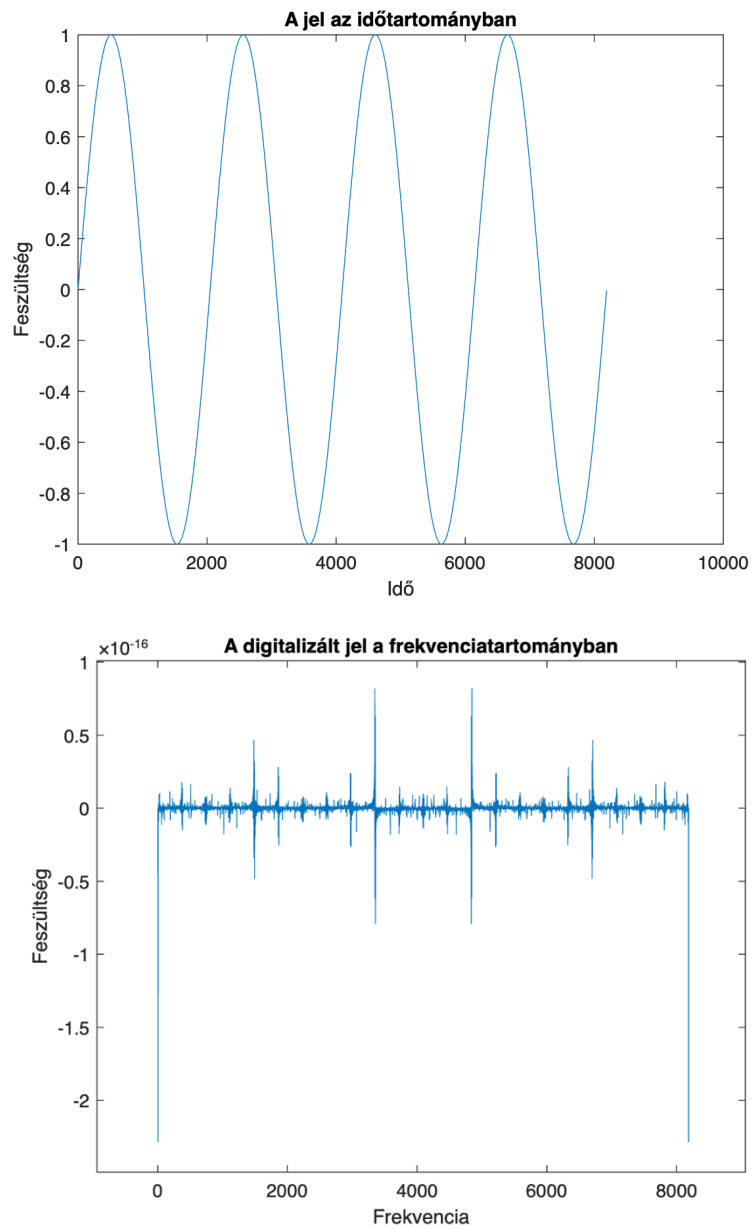
```
fs=115200;
fi=56.25;
f=fi/fs;
M=8192;
A=1;
t=0:M-1;
y=A*sin(2*pi*f*t);
dft_y=fft(y)/M;
abs_dft_y=abs(dft_y);

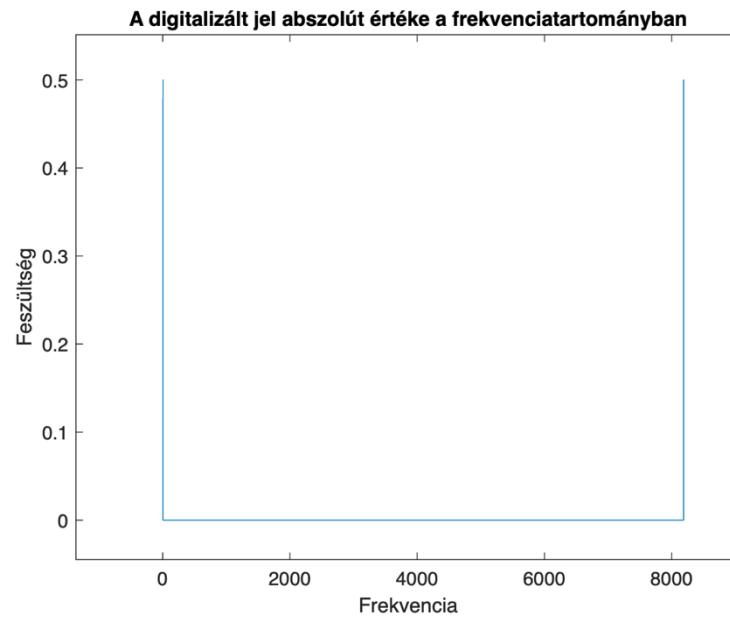
figure(1)
plot(t,y);
title('A jel az időtartományban');
xlabel('Idő');
ylabel('Feszültség');

figure(2)
plot(t, dft_y);
title('A digitalizált jel a frekvenciatartományban');
xlabel('Frekvencia');
ylabel('Feszültség');

figure(3)
plot(t, abs_dft_y);
title('A digitalizált jel abszolút értéke a frekvenciatartományban');
xlabel('Frekvencia');
ylabel('Feszültség');
```

*Ábrák:*





*Tapasztalatok:*

*A digitalizált jelnél jól látszik a 0.5 amplitúdójú „pálcika”, amely az ' amplitúdójú szinusznak felel meg.*