
Mikroelektronski sistemi
Poglavje 4: AD in DA pretvorniki (Specifikacije)

D. Strle

Pregled poglavja:

1. Tipi AD in DA pretvornikov
2. Pogoji delovanja
3. Specifikacije AD in DA pretvornikov
4. Rešeni primeri in domače naloge.

Specifikacije AD in DA pretvornikov

Lastnosti AD in DA pretvornikov opisuje set specifikacij,

Standardizirane specifikacije potrebujemo za:

- Interpretacijo in definicijo materialov v katalogih
- definicijo parametrov, ki so nujno potrebni za načrtovanje
- Nekatere specifikacije so skupne, nekatere so namenjene AD in druge le DA pretvornikom.

Specifikacije delimo na:

- Splošne
- Statične
- Dinamične
- Digitalne in preklopne

Splošne specifikacije

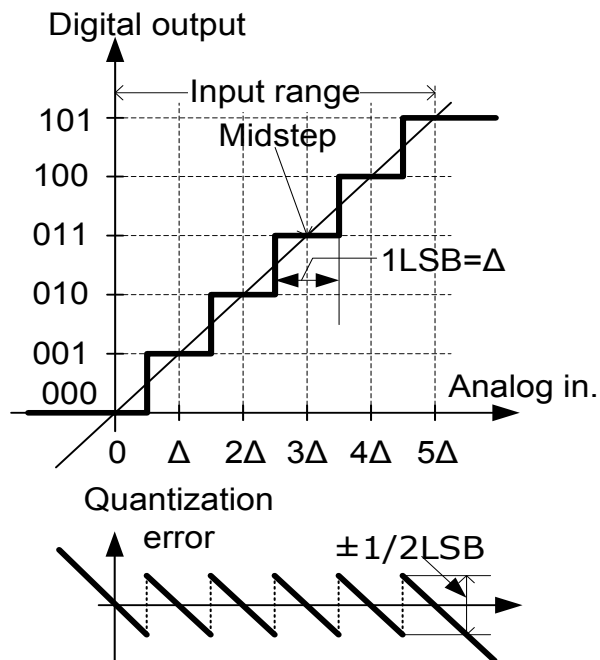
- **Tipi analognih signalov:** (eno-vhodni, diferencialni, napetostni nivo simetrije...)
- **Ločljivost (Resolution):** Št. bitov, ki jih pretvornik uporablja za prezentacijo analognega vhodnega signala (za AD pretvornik) in število bitov, s katerimi DA pretvornik prezentira izhodno napetost.
- **Kvantizacijski korak (Quantization step):** minimalni korak napetosti oziroma toka.
- **Dinamično območje (Dynamic range):** Razmerje med RMS nivojem največjega signala in šumnim nivojem. Razmerje je izraženo v dB in določa največje možno razmerje SnR.
- **Maximalne vrednosti (Absolute max. Ratings):** Limitne vrednosti (napetosti, tokovi, temperature,...), ki jih lahko uporabljamo, da so parametri znotraj specifikacij. Če katerakoli vrednost presega omejitve, vezje ne deluje pravilno. Uporaba v teh pogojih dalj časa lahko vpliva na zanesljivost delovanja.
- **ESD pogoji (ESD conditions):** Integrirana vezja so občutljiva na elektrostatično razelektritev. Nabito telo zlahka doseže potencial 4000V, kar lahko vezje uniči, zato so vsa vezja zaščitena z ESD zaščitnim vezjem. Kljub temu je koristno previdno ravnanje (ozemljitev)
- **Funkcijska definicija priključnih sponk (Pin function-description):** Tabela, kjer je na kratko razložena funkcija vsake priključne sponke.
- **Čas ogrevanja (Warm up time):** čas potreben za stabilno funkcioniranje
- **Lezenje (Drift):** Sprememba parametrov s temperaturo oziroma s staranjem

Statične specifikacije: Kvantizator

Definicije:

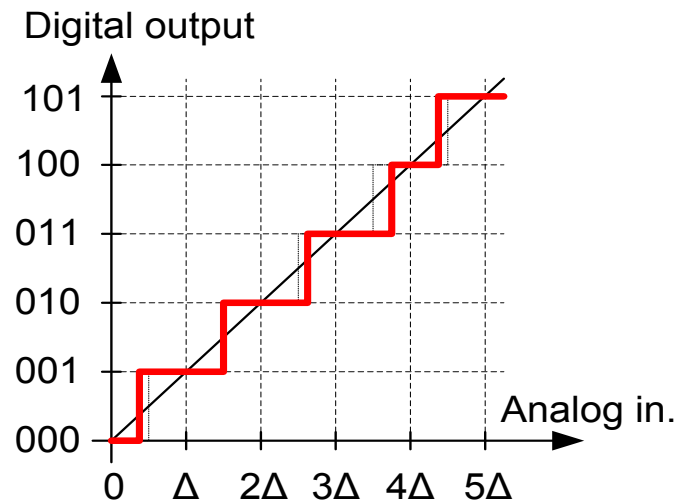
- Analogna ločljivost: $LSB = \frac{V_{in,FS}}{2^N} = 61\mu V; V_{in,FS} = 1V; N = 14$
- Analogno vhodno področje (Analog input range);
- Največja vhodna napetost.

Idealni kvantizator



Realni kvantizator:

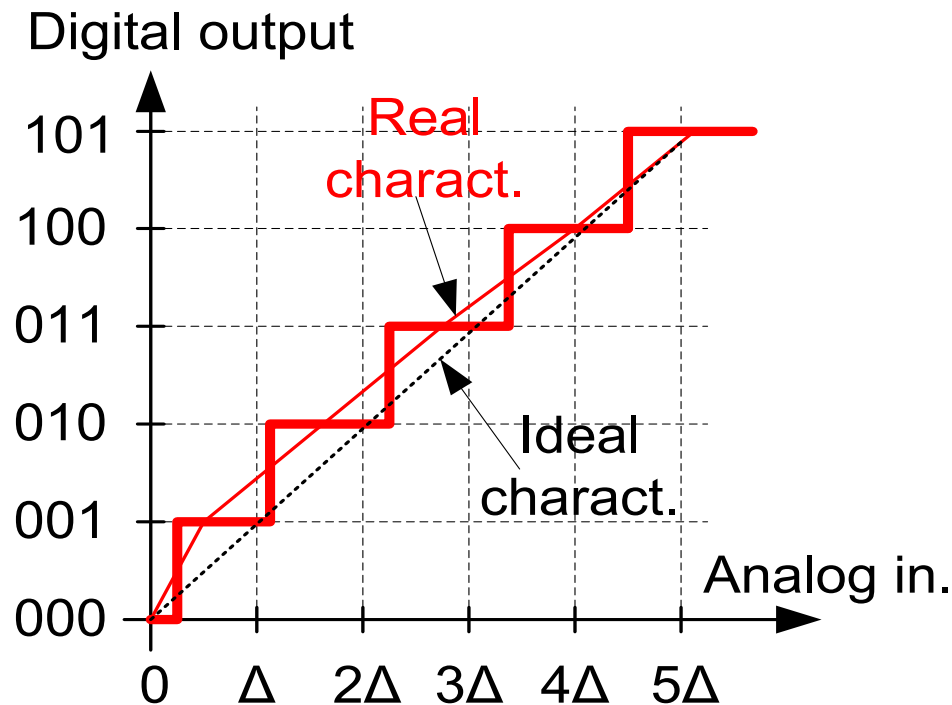
Naključne variacije kvantizacijskega koraka



Statične specifikacije: INL, DNL

INL (integral nonlinearity) je devijacija realne prevajalne funkcije od idealne interpolacijske črte.

Pri tem odstraniš ničelno napetost in napako ojačenja z uporabo „End-point fit line“



DNL (differential nonlinearity):

X_k je prehod med kodo $k-1$ in k ,

Δ je idealen kvantizacijski korak

DNL lahko izrazimo v: LSB, V, %, ppm celotnega območja.

$$\Delta_r(k) = X(k) - X(k-1)$$

$$DNL(k) = \frac{\Delta_r(k) - \Delta}{\Delta}$$

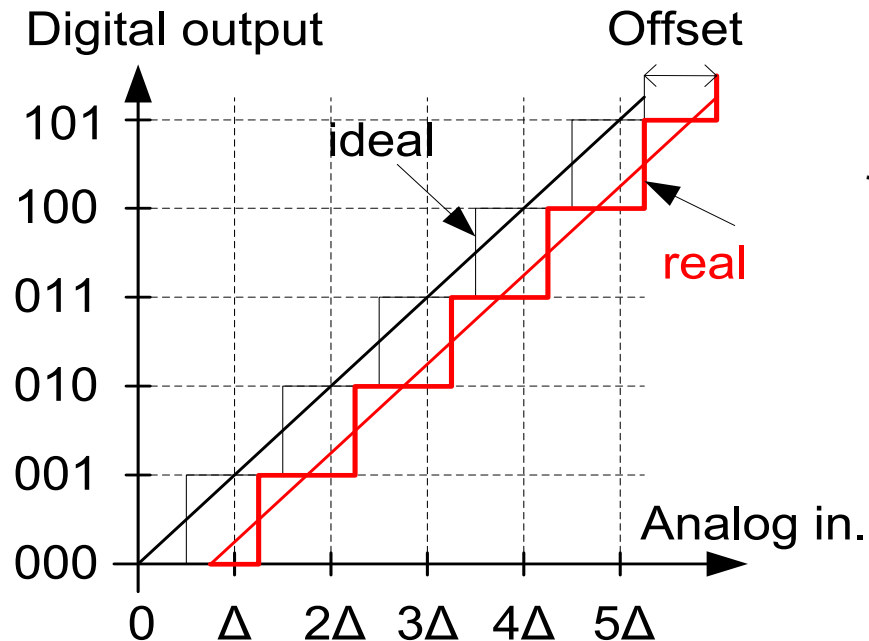
$$DNL_{rms} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2^N - 2} \sum_1^{2^N - 2} [DNL(k)]^2 \right\}}$$

Statične specifikacije: Offset

Ničelna vhodna napetost (Offset)

AD: Premik vhodne napetost, ki povzroči 000...00 na izhodu; vse kode so enako premaknjene

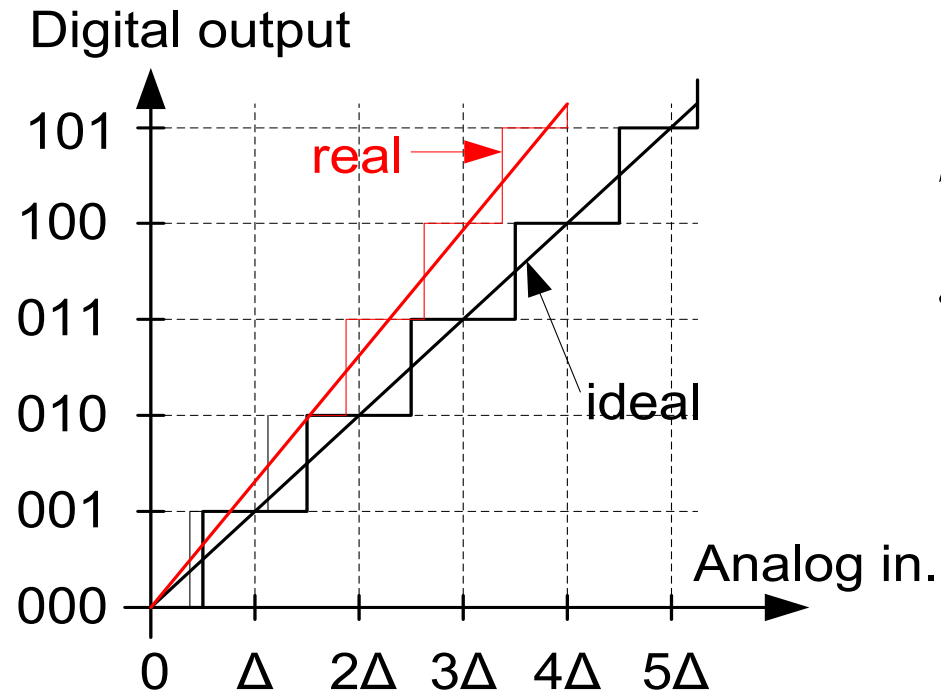
DA: Izhodna napetost pri 00000...00 na vhodu



Ničelna napetost (Zero scale offset):
je razlika med idealno vhodno napetostjo
ki povzroči prehod ($\frac{1}{2}$ LSB) in dejansko
vhodno napetostjo, ki povzroči enak
prehod

Statične specifikacije: ojačanje (gain)

Je devijacija realne strmine ojačanja do idealne strmine ojačanja



$$S_L = \frac{D_{FS}}{V_{in,FS}}; \text{ Strmina}$$

$$\varepsilon_{gain} = S_{l_{real}} - S_{l_{ideal}}$$

Statične specifikacije: INL, DNL

- **INL: integralna nelinearnost:**

- Je merilo odstopanja relane prevajane funkcije od idealne interpolacijske linije
- Druga definicija pravi, da INL meri odstopanje od tako imenovane „end-point-fit-line“, kjer odstranimo ničelno napetost in napake strmine (gain) (končni točki sta 0 in Xmax)
- INL izrazimo v LSB (ali V, A, %, ppm FS)

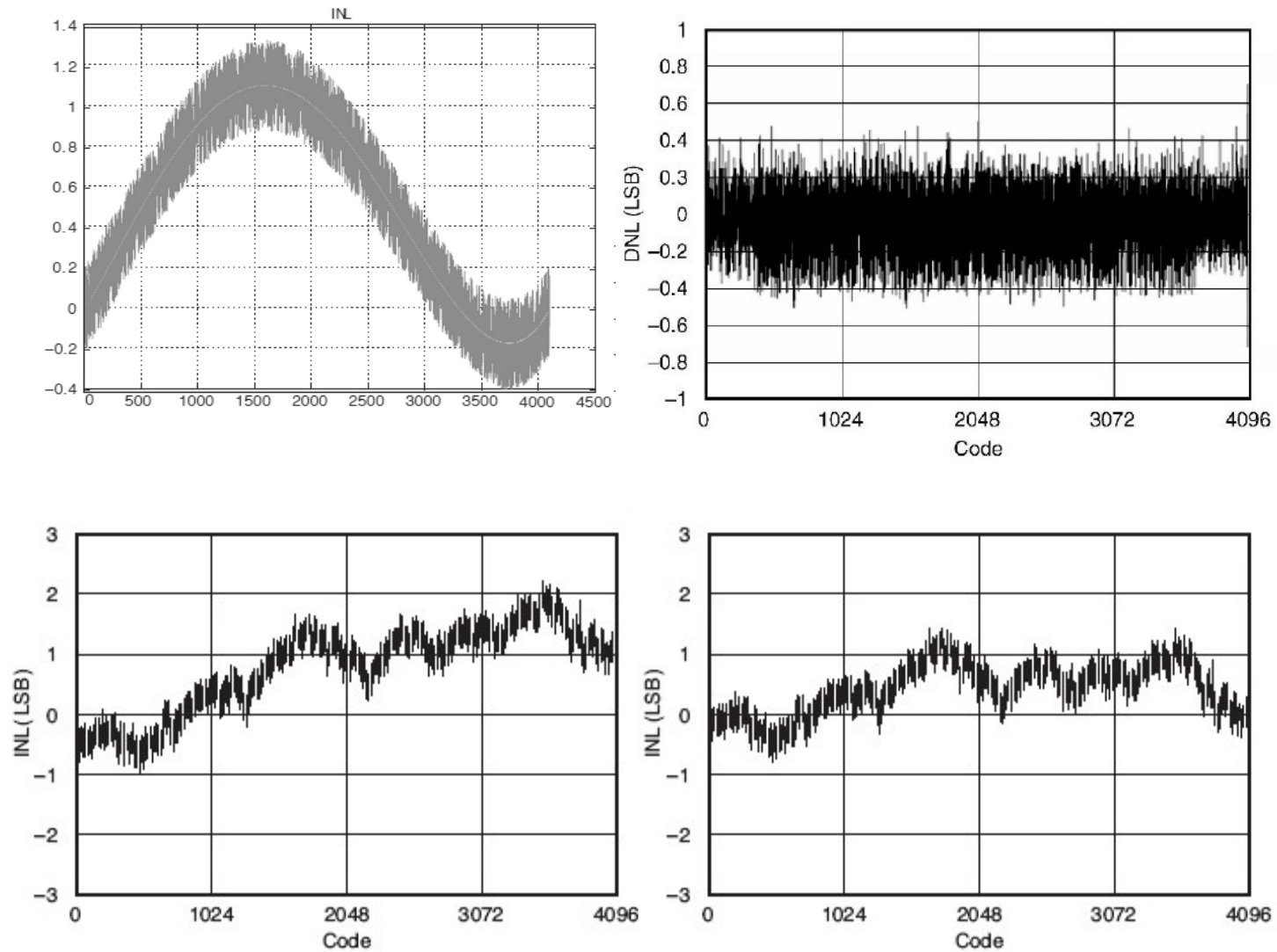
$$X'(k) = \Delta' \left[k_{off} + \sum_{i=1}^k DNL(i) \right]$$

$$\Delta' = \Delta(1+G);$$

$$INL(k) = \frac{X'(k) - k\Delta'}{\Delta} = (1+G) \sum_{i=1}^k DNL(i)$$

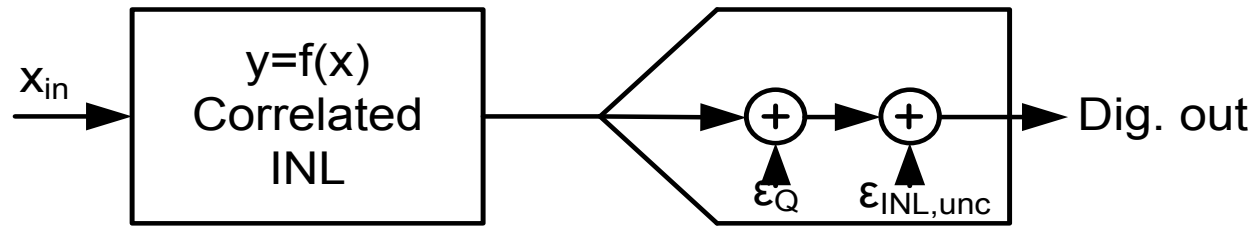
- Kjer je :
 - **X'(x) : je tranzicijska točka med kodami po korekciji**
 - k_{off} : je ničelna napetost izražena v LSB
 - G : je ojačanje
 - $k_{off}\Delta'$: je za ničelno napetost korigirana „end-point fit line“
- Napaki DNL and INL prinašata informacije of razpršenosti kvantizacijskih korakov, šumnega spektra, linearnosti, itd.

Statične specifikacije: INL, DNL



Statične specifikacije: INL, DNL

- Ekvivalentni model, ki opisuje INL napake



- Iz spektra DNL:
 - Težko izračunamo INL
 - Akumulacija nekoreliranega dela DNL izgleda kot šum, in ga dodamo kvantizacijskemu šumu.
 - Velik INL pomeni veliko deviacijo realne kvantizacije od ravne črte, ki povezuje $X=0$ in $X=X_{max}$ in pomeni nelinearna popačenja.

Statične specifikacije: ostale napake

- **Napake skupne napetosti (Common mode error):**

Se uporablja pri diferencialnih pretvornikih.

Za AD pretvornike definira spremembo kode kot funkcijo skupne vhodne napetosti za LSB napetost.

Za DA pretvornike predstavlja spremembo skupne izhodne napetosti izražene z LSB napetostjo kot funkcija vhodne kode.

- **Napaka polne napetosti (Full-scale error):**

Je merilo za koliko je zadnja sprememba AD pretvornika oddaljena od idealne zadnje napetosti v LSB.

- **Bipolarna ničelna napetost DA pretvornika (Bipolar zero offset of the DAC):**

Je odstopanje izhodne napetosti DA pretvornika od idealne napetosti pri digitalnem vhodu 000..00.

- **Monotonost (Monotonicity):**

Monoton AD pretvornik generira naraščajoče kode za naraščajočo vhodno napetost.

- **Histereza (Hysteresis):**

Pri AD pretvorniku s histerezo je Izhodna koda odvisna od smeri spreminjanja vhodne napetosti.

Velikost histereze je določena z razliko v kodi

- **Manjkajoče kode (Missing codes):**

Če nekatere kode nikoli ne nastopijo. $DNL(k)=1$ v tem primeru.

Statične specifikacije: ostale specifikacije

- **Poraba moči (Power dissipation):**
 - Poraba moči med normalnim delovanjem
 - Poraba moči v stanju pripravljenosti (stand-by) ali (power down)
- **Temperaturna območje (Temperature range):**
 - Območje temperature, ki zagotavlja delovanja v skladu s specifikacijami.
- **Termična upornost (Thermal resistance):**
 - Kapaciteta vezja da izseva toplo, ki je rezultat delovanja ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
- **Temperatura spajkanja (Lead temperature):**
 - Max. Temperatura priključkov med spajkanjem v času spajkanja, kjer je standardni čas enak 10s.

Dinamične specifikacije

1. Pasovna širina vhdonega signala (Analog input bandwidth):

Frekvančni pas kjer FS vhdni signal priključen na vhdo AD pretvornika povzroči izhodno kodo, ki je zmanjšana za 3dB v primerjavi z kodo pri nizki frekvenci.

2. Vhodna impedanca (Input impedance) :

Impedanca med vhodnimi priključki AD pretvornika. Idealno bi morala biti ta impedanca neskončno velika. Pri visokih frekvencah ima ta impedanca običajno kapacitivni karakter. V primeru S-C realizacije je impedanca kar ekvivalentna impedanci S-C vezja.

Pri VF pretvorniku mora biti vhod primerno zaključen.

3. Regulacija izhoda in izhodna impedanca (Load regulation or output impedance):

Regulacija izhoda meri sposobnost izhodna stopnje DA pretvornika da obdrži izhodno napetost znotraj specifikacij neodvisno od bremena. Izražen je v LSB/mA. Ekvivalentna definicija je izhodna impedanca DA pretvornika

4. Čas približevanja-umirjanja (Settling time):

Je čas, ki je potreben, da izhod DA pretvornika doseže izhodno napetost ki je znotraj specifikacij.

- **Presluh (Cross-talk):**

Merilo za koliko neželjeni signali pokvarijo signal v frekvenčnem pasu. Measures the coupling of other unwanted signals into the signal band

6. Stresanje (Jitter):

Standardna deviacija časa vzorčenja. Druga imena za ta parameter so stresanež vzorčnega časa, fazni šum, itd. Predpostavljamo, da se obnaša kot „beli šum“.

7. Moč neželenih prehodov (Glitch power):

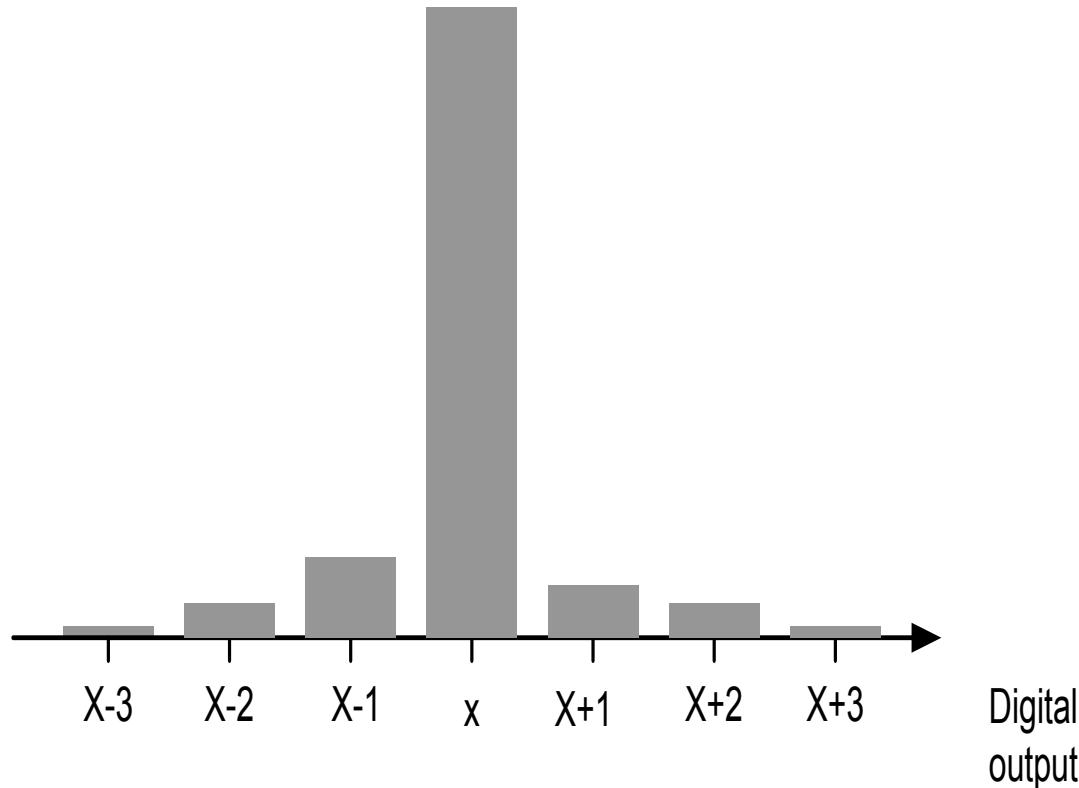
ZA DA pretvornik ta parameter predstavlja amplitudo (moč) signala ki se injicira iz digitalnih vhodov ob preskokih kode na na anaogni izhod. Najpogosteje je največji „glitch“ ob spremembi najpomembnejših bitov (od 011111..1 do 100000...0). Običajno se ti pojavi merijo kot površina impulza in se meri v Usually Vs or As.

8. Ekvivalentni šum preračunan na vhod (Equivalent input referred noise):

Je merilo šuma, ki se generira v AD pretvorniku. Za konstatno vhodno napetost, izhodna koda variira okrog povprečne vrednosti pričakovane kode. Histogram izhodnih kod ima običajno Gaussovo porazdelitev. Standardna deviacija porazdelitve običajno definira kar ekvivalentno vhodno šumno napetost izraženo v LSB ali RMS napetost.

Dinamične specifikacije

Primer porazdelitve za DC vhodno napetost



$$V_{in} = \frac{V_{FS}}{2^N} D_{out}$$

$$V_n \cong \sigma_n = 0.63 \text{ LSB}$$

Dinamične specifikacije

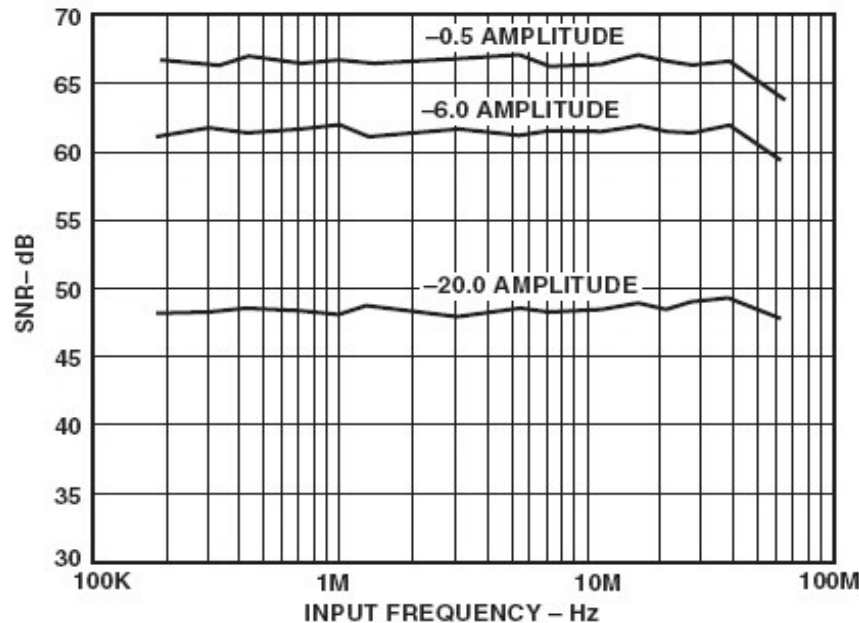
9. Razmerje Signal Šum (SNR Signal to Noise Ratio):

Je razmerje med močjo signala in močjo šuma. SNR je lahko odvisen od frekvence, vhodnega signala, temperature, itd.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)$$

V_s : rms signala

V_n : equivalentna rms šumna napetost v Nyquistovem pasu



Primer ADC pretvornik:

$N=12$

$f_s=50\text{MHz}$

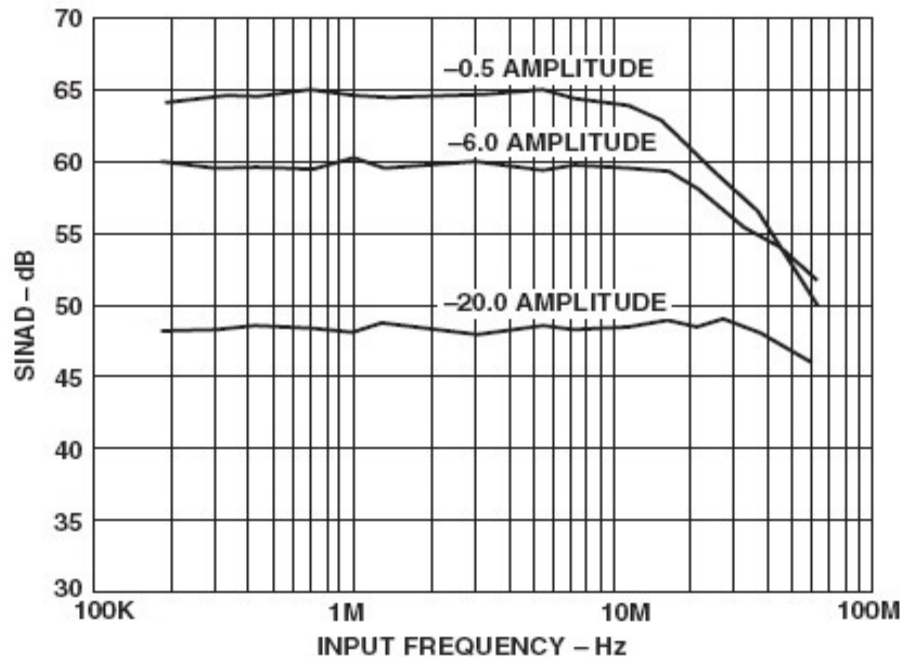
SNR je funkcija frekvence in amplitude,
Šum vezja je večji kot kvantizacijski šum

AD pretvornik ima dobro frekvenčno karakteristiko.

Dinamične specifikacije

9. Razmerje Signal proti Šumu in Popačenjem (SnDR: signal to noise and distortion ratio):

Podobno kot SnR le da dodamo moč višjih harmoničnih komponent.
SNDR je odvisen od statičnih in dinamičnih karakteristik pretvornika



Enak Ad pretvornik kot na prejšnji strani, le da so vključene komponente HD.

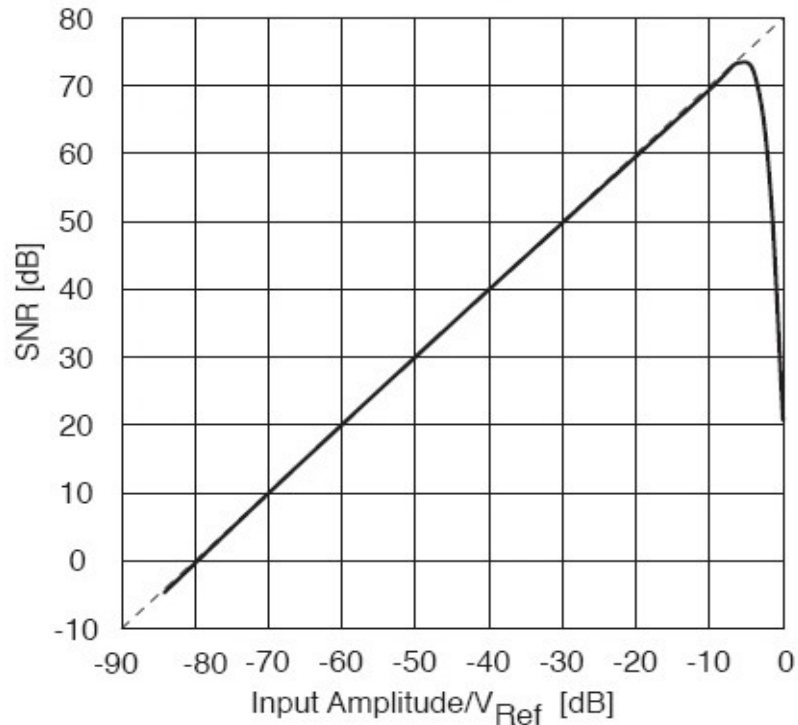
Za vhodni signal -20dB FS je
 $SNR = SNDR$

Vhodni signal -6dB FS je SNDR slabši za
12 dB

Karakteristike AD pretvornika so slabše pri
VF

10. Dinamično območje DR (Dynamic range):

DR je nivo vhodnega signala kjer je $SNR=0dB$. Ta paramete je posebej uporaben pri Σ - Δ Pretvornikih, kjer max. SNR ne dosežemo pri 0 db FS0dBFS.



$SNR=f(a_{in})$ za Σ - Δ AD converter:

Največji SNR = 80dB

Pri -6dBFS=74dB

DR=80dB

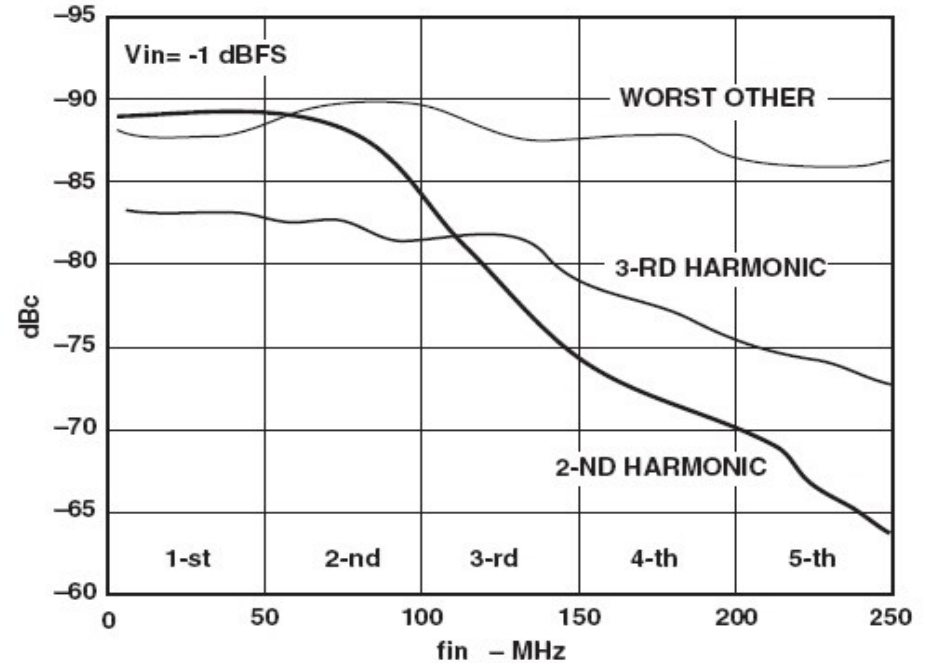
11. Efektivno število bitov ENOB (Effective Number Of Bits):

$$N_B = \frac{SNDR_{[dB]} - 1.76}{6.02}$$

12. Popačenja HD (Harmonic distortions):

$$HD \triangleq \frac{V_{H_1,rms}}{\sqrt{\sum_{i=2}^{10} V_{H_i,rms}^2 + \sum_1^{all} V_{image}^2}}$$

HD definicija vključuje tudi komponente ki so posledica aliasing efekta („image components“)



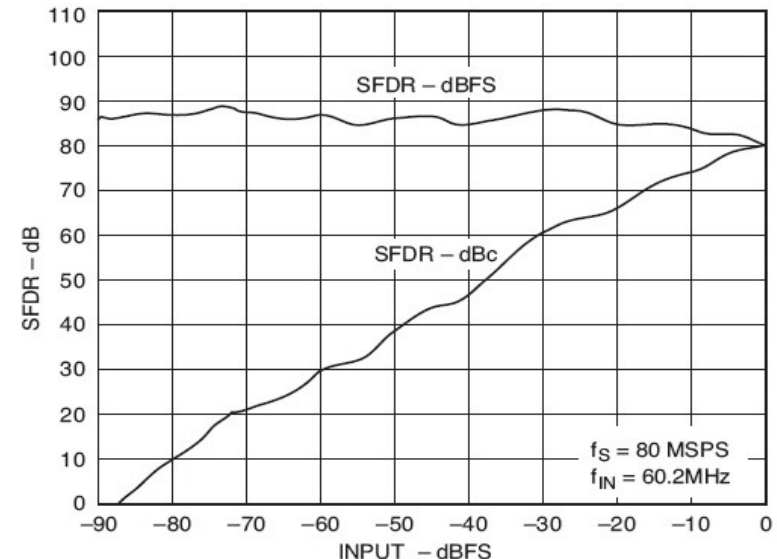
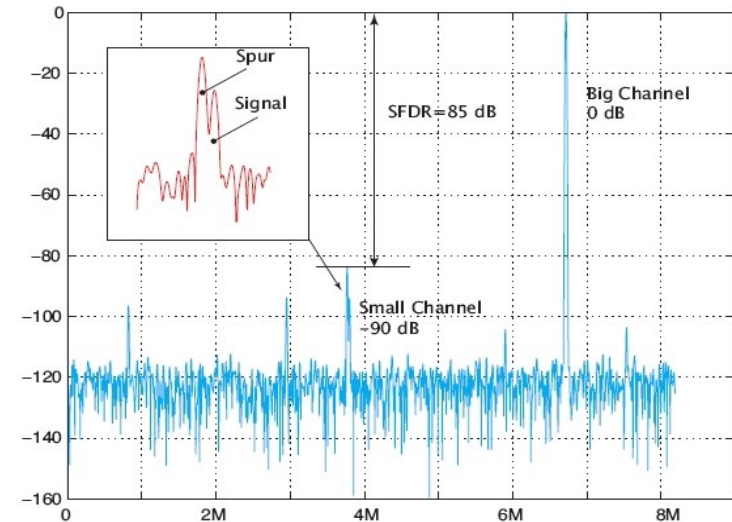
13. Kompletna popačenja TSD (Total Spurious distortion):

Je razmerje med močjo vseh motilnih komponent v osnovnem pasu in močjo vseh vhodnih komponent.

$$TSD = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{all} V_{s,i}^2}}{V_{s,fin}} \right)$$

14. Dinamično območje brez parazitnih komponent SFDR (Spurious Free dynamic range)

Je razmerje med močjo signala in močjo najvišje motilne komponente v coni 0. Informacija je podobna kot HD, vendar upošteva le najmočnejšo komponento v osnovnem pasu. Ta definicija se uporablja v komunikacijskih sistemih.



13. Intermodulacijska popačenja IMD (Intermodulation distortions):

Intermodulacijska popačenja nastanejo z nelinearnostjo AD pretvornika in ob prisotnosti kompleksnega vhodnega signala, ki vsebuje različne komponente.

Če je npr. Vhodni signal sestavljen iz mnogih sinusoid potem nelinearnost povzroča intermodulacijske produkte, ki so signali s frekvencami, ki so vsote in razlike frekvenc vhodnih signalov. IMD₂ je za 2 tona in je definiran z:

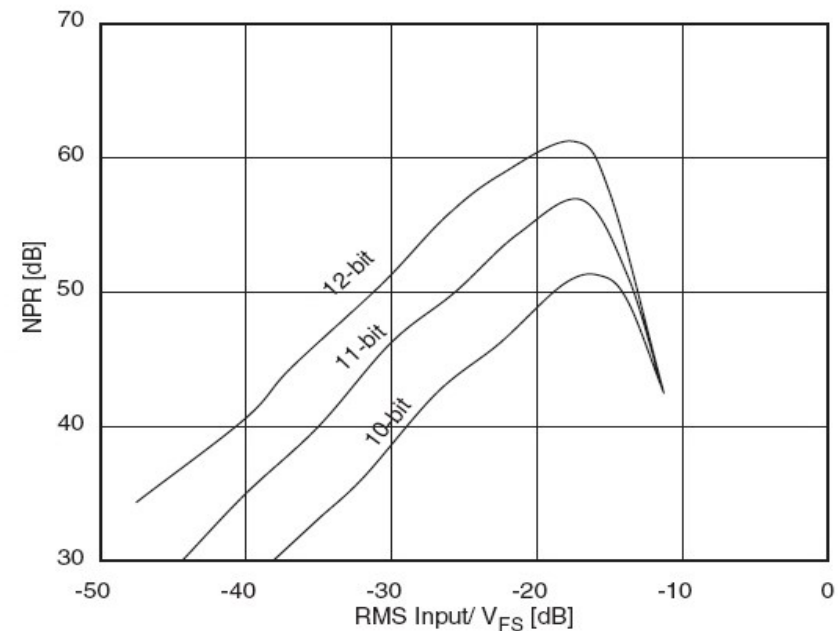
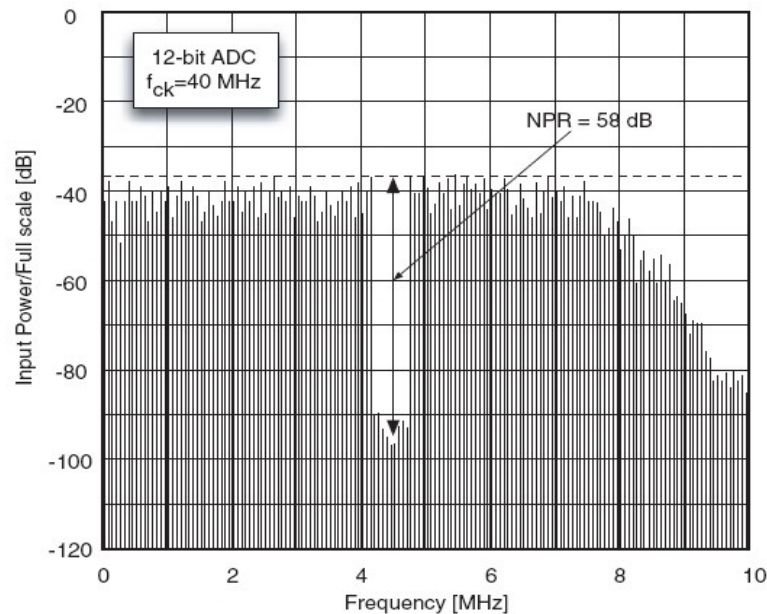
$$IMD_2 [dBc] = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{in,rms,x}}{V_{worst-prod,rms}} \right)$$

Za signale s frekvencama f_1 in f_2 je intermodulacijski produkt 3.reda pri frekvencah $2f_1 - f_2$ in $2f_2 - f_1$.

Če sta f_1 in f_2 blizu, potem komponente IMD₂ lahko padejo v osnovni pas. VF komponente ali komponente višjega reda padejo ven iz zanimivega frekvenčnega področja in jih lahko digitalno odstranimo.

14. Razmerje NPR (Noise power ratio):

Se uporablja v komunikacijskih vezjih. Obravnava linearne lastnosti AD pretvornika, ki se uporablja pri FDM (frequency division multiplex) sistemu. Signal sestavlja mnogo sinusnih signalov različnih frekvenc in faz (signal ima podoben spekter kot beli šum, ki smo ga poslali skozi BP filter. Eno sinusoido odstranimo in tako dobimo globoko luknjo v spektru.



15. Efektivna pasovna širina ločljivosti ERBW (Effective resolution bandwidth):

Je definirana kot pas frekvenc v katerem SNDR pade za 3dB v primerjavi z SNDR pri nizkih frekvencah. Govori o pasovni širini AD pretvornika. Za Nyquistove pretvornike mora biti ERBW večji kot je Nyquistov pas

16. Efektivnost izvedbe FoM (Figure of merit):

Je parameter, ki določa učinkovitost implementacije s stališča različnih parametrov. Različne definicije vključujejo različne parametre, ki so odvisni tudi od arhitekture in implementacije AD pretvornika.

$$FoM = \frac{P_{tot}}{2^{ENOB} 2 BW}$$

Dobri pretvorniki imajo FOM v razredu

$$FoM \cong 1 \frac{pJ}{conv - step}$$

FoM ni enoten parameter. Odvisen je od arhitekture, izvedbe, frekvence,

Digitalne in preklopne specifikacije

Digitalne in preklopne specifikacije potrebujemo za pravilno načrtovanje in uporabo pretvornika glede na komunikacijo s pretvornikom:

1. Logični nivoji (Logic levels)

Običajno v skladu s standardi (CMOS, ECL, TTL, ...)

2. Frekvenca ure (Clock rate)

Območje urinih frekvenc v katerem pretvornik deluje v skladu s specifikacijami. Navzdol je omejeno z plazečimi tokovi (leakage pri nekaterih izvedbah); navzgor je omejen z tranzientnimi lastnostmi gradnikov.

3. Oblika urinega signala (Clock timing):

Specificira karakteristike signala ure (nivoji, čas vzpona in padanja, perioda, razmerje med dolžino impulza in pavzo (duty ratio)), itd.

4. Lastnosti urinega signala (Clock source)

Jitter, diferencialni signal? , PLL lastnosti, etc.

5. V pripravljenosti (Sleep mode)

Definira lastnosti v pripravljenosti, aktivacijske nivoje, časovne razmere, itd.

Naloge

1. Izhodni spekter AD pretvornika, ki je posledica nelinearnosti s frekvenco prve harmonske komponente f_{in1} in vzorčno frekvenco f_s je podan s tabelo:

H	:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ah [dB]:		0	-50	-40	-65	-55	-70	-75	-80	-100	-90

- $f_{in1}=671$ Hz (sinusni signal)
- $f_s=16.38$ kHz

Predpostavi, da frekvenca vhodne sinusoide naraste na $f_{in2}=1.711$ kHz in da višje harmonske komponente ohranijo svoje amplitude.

Narišite spekter za prvi in drugi primer ter vključi zrcakne komponente, ki nastanejo z vzorčenjem.

Kaj se zgodi, če je frekvenca vhodnega signala $f_{in3}=2.339$ kHz?

Katera frekvenca vhodnega signala bi povzročila harmonske prepognjene komponente, ki bi imele natančno enako frekvenco kot f_{in} ?

Pripravi Matlab program, ki bo simuliral zgornji problem.

Naloge

1. Poiščite specifikacije AD pretvornika (vsak dobi različen tip AD pretvornika, sledi predstavitev)
2. Z uporabo Matlab modela narišite vhodno izhodno prevajalno funkcijo 8-bitnega pretvornika. z varianco $\text{var}(\text{DNL})=0.4 \text{ LSB}$, interpolacijska krivulja je: $y = x + 0.01(x - 0.5)^3$; $0 > x > 1$.
3. INL 12-bitnega pretvornika z idealno interpolacijsko črto med is -0.4 LSB za kodo 0 in 1.3 LSB za zadnjo kodo. Maksimum je pri $2/3 \text{ FS}$ in je 2.1 LSB . Ocenite: Ofset, napako ojačenja in največjo vrednost „endpoint-fit line“.
4. Poiščite tipe AD pretvornikov, ki omogočajo ločljivost več kot 14-bitov za različne pasovne širine: 44 kHz, 150 kHz, 2 MHz, 20 MHz and 80 MHz.
5. Poišči specifikacije 12-bitnih AD pretvornikov. Oцени interpolacijsko krivuljo, ki modelira INL S programom Matlab in modelom preveri, kakšen spekter generira takšna nelinearnost za FS vhodni sinusni signal.