

Mikroprocesorová technika

Prednáška č. 7

10 - bitový interný analógovo - digitálny prevodník

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA RÁDIOELEKTRONIKY
Laboratórium DSP a mikroradičov



:: Modul 10-bitového A/D prevodníka

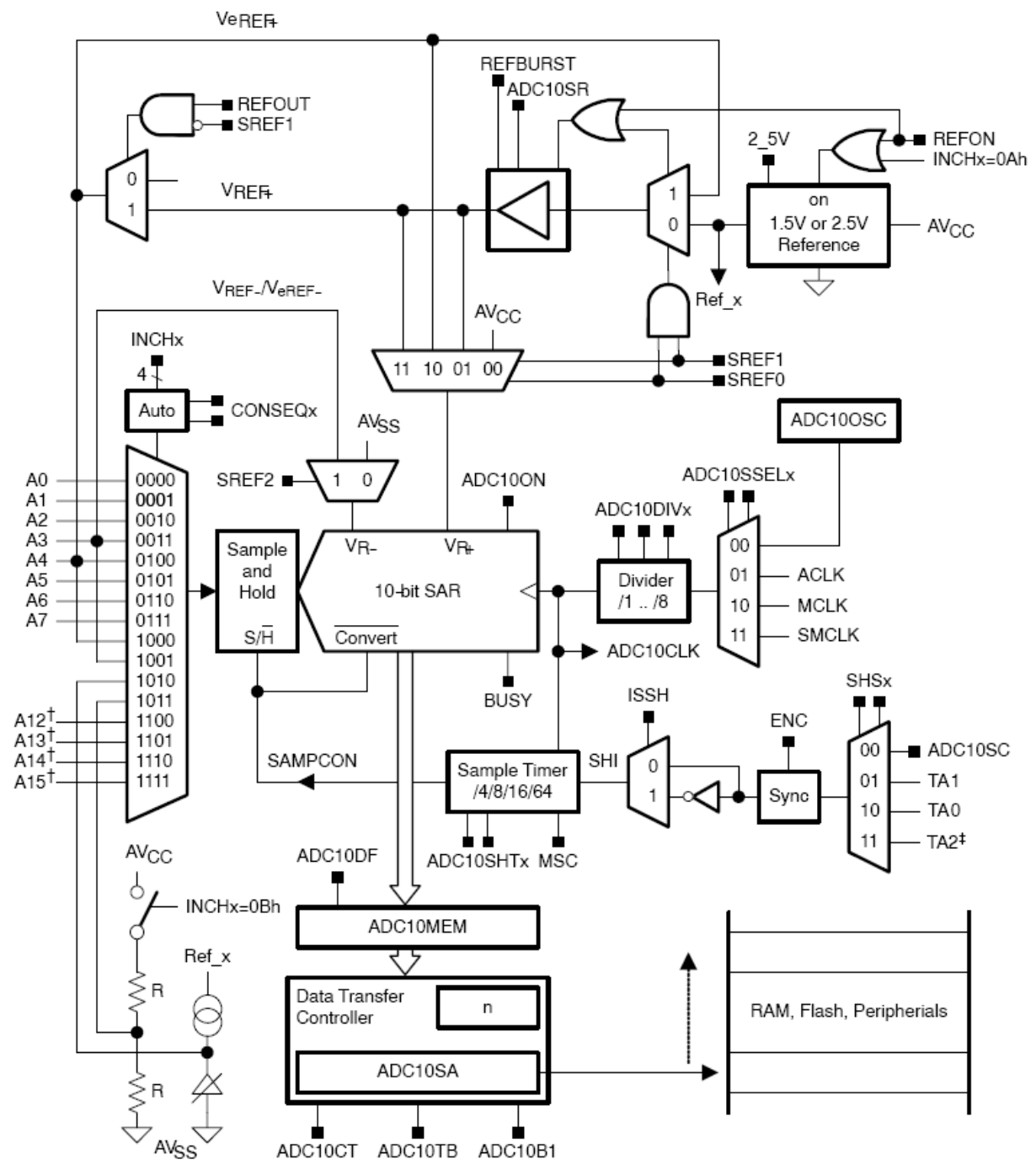
- modul zahŕňa:
 - *10-bitový A/D prevodník typu SAR (**S**uccessive **A**pproximation **R**egister)*
 - *riadenie vzorkovania*
 - *referenciu*
 - *generátor*
 - *radič dátového prenosu (DTC – **D**ata **T**ransfer **C**ontroller)*
- radič dátového prenosu umožňuje automatický prenos zmeraných vzoriek vstupného signálu prevodníka na ktorékoľvek pamäťové miesto bez potreby zásahu CPU
- radič dátového prenosu je možné plne konfigurovať aplikačným softvérom



:: Modul ADC10 – základné vlastnosti

- max. rýchlosť prevodu: **viac ako 200 ksps**
- monotónny prevod bez chýbajúcich kódov
- obvod „sample-and-hold“ s programovateľnou periódou vzorkovania
- prevod môže spúšťať buď aplikačný softvér alebo časovač T_A automaticky
- aplikačným softvérom môžeme zvoliť buď **externú alebo internú napäťovú referenciu (1.5 V alebo 2.5 V)**
- 8-12 externých vstupných kanálov
- **interný senzor teploty**
- voliteľný zdroj hodín prevodníka
- rôzne režimy prevodu: jednokanálový, opakovaný jednokanálový, sekvenčný, a opakovaný sekvenčný
- jadro ADC10 a referenčné napätie môžeme vypínať separátne

:: Modul ADC10 – funkčná bloková schéma



:: Modul ADC10 – jadro prevodníka

- ADC uskutočňuje prevod analógového signálu prítomného na vybranom vstupe na jeho 10-bitovú číslicovú reprezentáciu
- výsledok prevodu ukladá do registra **ADC10MEM**
- jadro prevodníka využíva dve programovateľné úrovne (V_{R+} a V_{R-}), ktoré určujú horný a dolný limit prevodu
- číslicový výstup prevodníka dosahuje maximálnu hodnotu (03FFh), keď je vstupný signál rovný alebo väčší ako hodnota V_{R+} , a minimálnu hodnotu (000h), keď je vstupný signál rovný alebo menší ako hodnota V_{R-} .
- vstupný kanál prevodníka ako aj úrovne referenčného napätia je možné určiť nastavením príslušných riadiacich registrov

:: Modul ADC10 – jadro prevodníka

- výsledok prevodu môže byť zapísaný do pamäte buď v priamom kóde alebo v dvojkovom doplnku
- vzťah medzi vstupným napätím prevodníka, úrovňou referenčných hodnôt a číslcovým výsledkom prevodu je vyjadrený vzťahom:

$$N_{\text{ADC}} = 1023 \times \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{R-}}}{V_{\text{R+}} - V_{\text{R-}}}$$

- jadro ADC10 môžeme plne konfigurovať prostredníctvom dvoch riadiacich registrov, **ADC10CTL0 a ADC10CTL1**
- jadro prevodníka je aktívne, keď je nastavený bit ADC10ON
- až na niekoľko výnimiek, môžeme riadiace bity ADC10 modifikovať iba keď bit ENC=0
- bit ENC musí byť pred prevodom nastavený

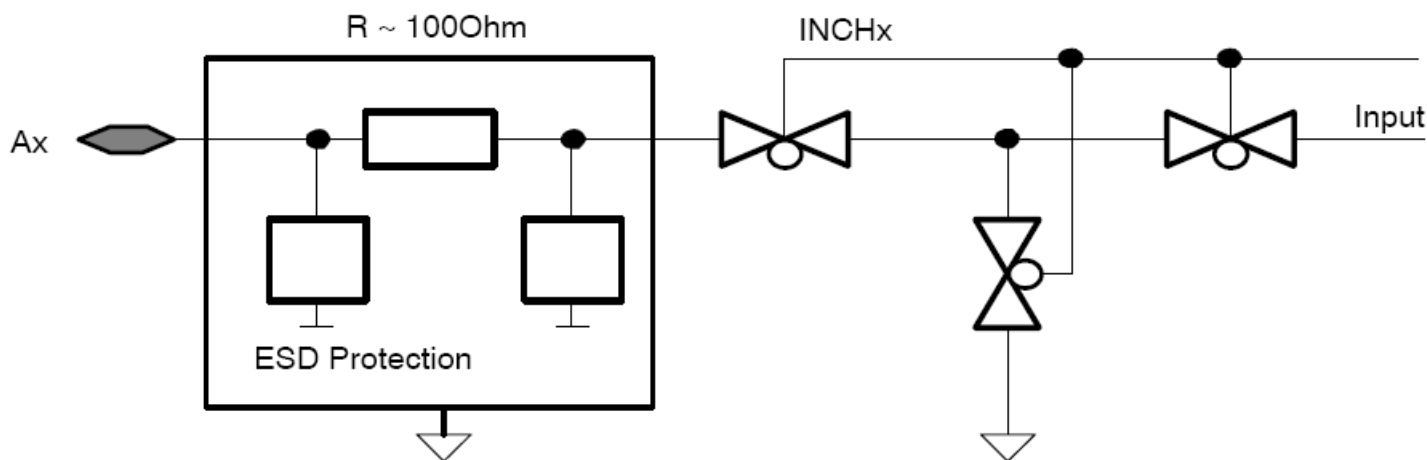


:: Modul ADC10 – zdroj hodín

- ADC10CLK je signál zdroja hodín pre prevod a zároveň generuje periódu vzorkovania
- zdroj hodín ADC10 môžeme vybrať prostredníctvom bitov ADC10SSELx a hodinový signál je možné deliť 1-8 nastavením bitov ADC10DIVx
- zdrojom hodín pre ADC10CLK sú **SMCLK, MCLK, ACLK a interný oscilátor ADC10OSC**
- výstupný signál interného oscilátora **ADC10OSC má frekvenciu cca 5 MHz**, ale kolíše v závislosti od konkrétneho procesora, napájacieho napätia a teploty
- aplikačný softvér musí zabezpečiť, aby **zdroj ADC10CLK zostal aktívny do konca prevodu** v opačnom prípade nedôjde k dokončeniu prevodu a výsledok prevodu bude chybný

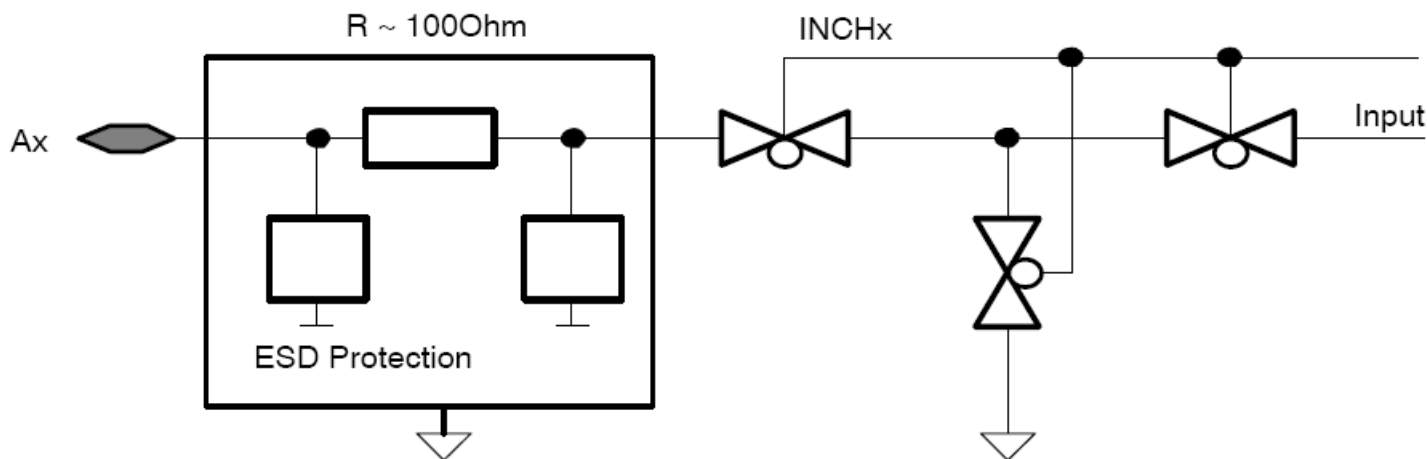
:: Modul ADC10 – vstupné obvody a multiplexer

- modul ADC10 disponuje analógovým vstupným multiplexerom, pomocou ktorého môžeme k jadrú prevodníka pripojiť jeden z ôsmych externých vstupných signálov alebo jeden zo štyroch interných signálov
- vstupný multiplexer je typu „break-before-make“, t.j. pred tým, ako pripojí k jadrú prevodníka iný analógový vstup, najskôr od jadra odpojí predchádzajúci vstup, aby tak redukoval šum vznikajúci medzi vstupmi v dôsledku ich prepínania



:: Modul ADC10 – vstupné obvody a multiplexer

- vstupný multiplexer využíva T-spínač z dôvodu **minimalizácie parazitnej väzby medzi vstupmi**
- vstupy, ktoré nie sú aktívne pripojené k jadru prevodníka sú od neho izolované a stredový uzol T-spínača je pripojený k analógovej zemi (VSS) kvôli uzemneniu parazitných kapacít a tým pomáha eliminovať presluchy medzi vstupmi



:: Modul ADC10 – analógové vstupy

- **externé vstupy modulu ADC10**, označované A_x , vstup kladnej úrovne externej referencie V_{eREF+} , a vstup zápornej úrovne externej referencie V_{eREF-} **zdieľajú vývody procesora s GPIO portom**, ktorý je zostavený z číslicových hradiel typu CMOS
- analógový signál pripojený na vstup hradiel CMOS je príčinou vzniku **parazitného prúdu** tečúceho z uzla napájacieho napätia (VCC) do uzla zeme (GND)
- k uvedenému javu dochádza predovšetkým vtedy, keď dosahuje vstupné napätie prechodovú úroveň hradla
- z tohto dôvodu **je vhodné deaktivovať vyrovnávaciu pamäť vývodov, ktoré používame ako analógové vstupy**, čím eliminujeme parazitné prúdy a zároveň znížime celkovú spotrebu obvodu
- vyrovnávaciu pamäť vývodov môžeme deaktivovať prostredníctvom bitov ADC10AEx

:: Modul ADC10 – zdroj referenčného napätia

- modul ADC10 obsahuje **interný zdroj referenčného napätia**, ktorý aktivujeme nastavením $REFON = 1$ (po aktivácii dosiahne interná referencia ustálený stav za menej ako $30\mu s$)
- zdroj disponuje dvomi voliteľnými úrovňami:
 - *ak bit $REF2_5V = 1$, interná referencia bude mať napätie 2.5 V*
 - *ak bit $REF2_5V = 0$, interná referencia bude mať napätie 1.5 V*
- ak nastavíme bit $REFOUT = 0$, bude referenčné napätie prístupné na vývode V_{eREF+}
- ak potrebujeme presnejšiu externú referenciu, môžeme ju pripojiť prostredníctvom pinov V_{R+} a V_{R-} , resp. vývodov A4 a A3

:: Modul ADC10 – zdroj referenčného napätia

- ak používame externú referenciu, alebo ak ako referenciu používame napájacie napätie, potom môžeme interný zdroj referenčného napätia deaktivovať a znížiť tak spotrebu procesora
- vstup kladnej úrovne externej referencie V_{eREF+} je možné oddeliť od od internej záťaže v module ADC10 pomocou oddeľovacieho zosilňovača (buffer), ktorý aktivujeme alebo deaktivujeme bitom SREF0
- oddelenie je možné s výhodou využiť v prípade vysokého vnútorného odporu externej referencie, samozrejme za cenu zvýšenia prúdovej spotreby danej odberom oddeľovacieho zosilňovača

:: Modul ADC10 – zdroj referenčného napätia

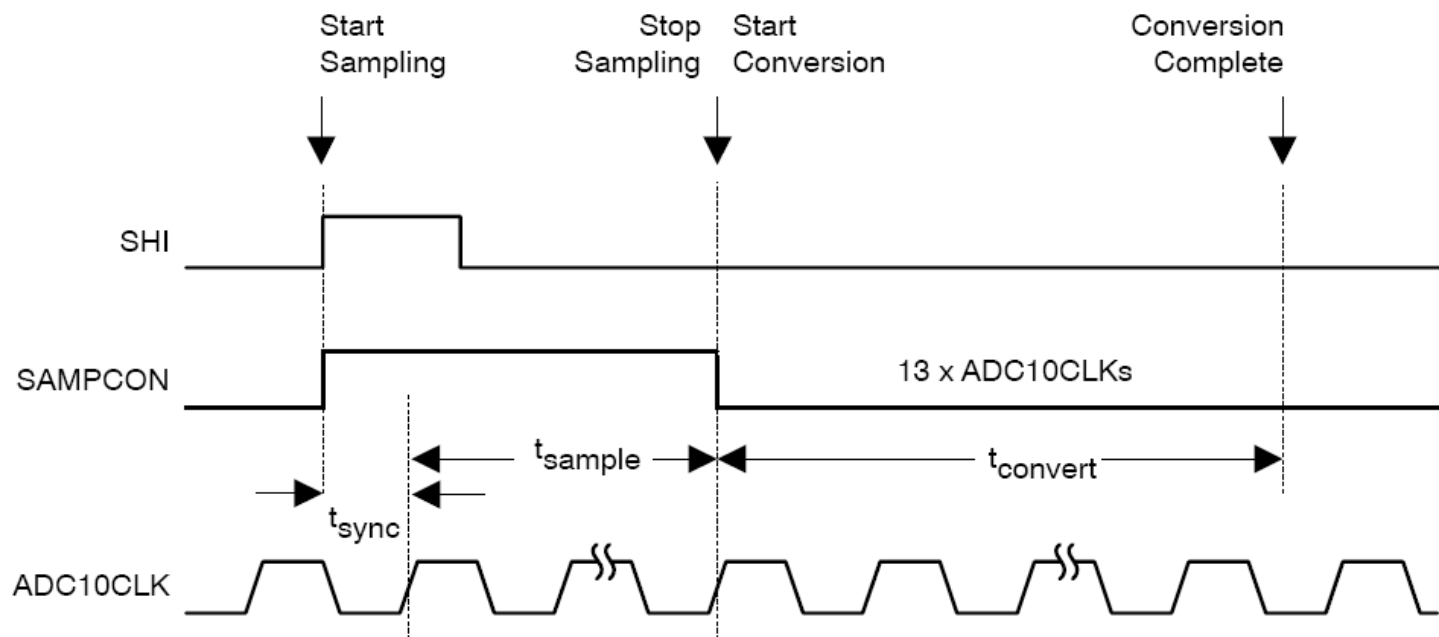
- zvýšenú prúdovú spotrebu môžeme obmedziť nastavením bitu REFBURST = 1, kedy bude oddeľovací zosilňovač napájaný iba v čase prebiehajúceho vzorkovania a prevodu
- oddeľovací zosilňovač internej referencie je možné nastaviť aj z hľadiska pomeru rýchlosti prevodu a spotreby
- ak maximálna rýchlosť vzorkovania nepresiahne 50 ksps, môžeme nastavením bitu ADC10SR = 1 znížiť spotrebu oddeľovacieho zosilňovača približne o 50%

:: Modul ADC10 – časovanie vzorkovania a prevodu

- analógovo – číslicový prevod začne pri nábežnej hrane vstupného vzorkovacieho signálu SHI, ktorého zdroj určujeme prostredníctvom bitov SHSx. Týmto zdrojom môže byť:
 - *nastavenie spúšťacieho bitu ADC10SC*
 - *výstupná jednotka č. 0 časovača T_A*
 - *výstupná jednotka č. 1 časovača T_A*
 - *výstupná jednotka č. 2 časovača T_A*
- polaritu signálu SHI môžeme invertovať nastavením bitu ISSH
- bitmi SHTx nastavujeme vzorkovaciu periódu $t_{\text{sample}} = \{4, 8, 16, 64\}$ cyklov ADC10CLK

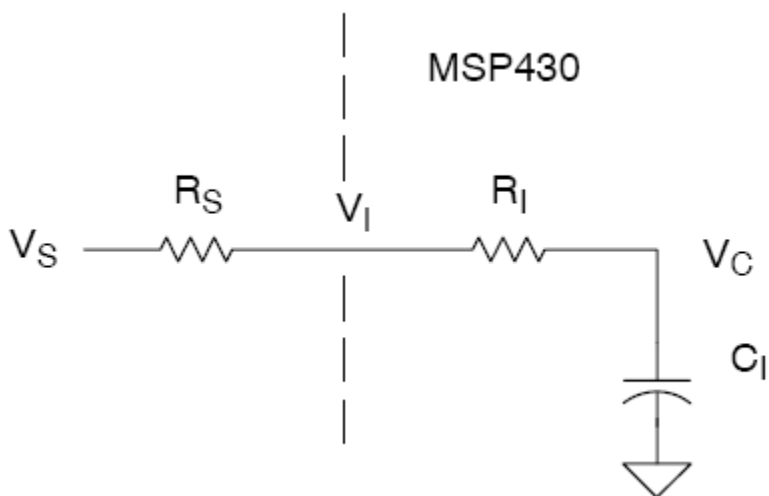
:: Modul ADC10 – časovanie vzorkovania a prevodu

- počas zvolenej periódy vzorkovania časovač vzorkovania nastaví vysokú úroveň signálu SAMPCON po synchronizácii so signálom ADC10CLK
- celkový čas vzorkovania je potom daný súčtom t_{sample} a t_{sync}
- zostupná hrana signálu SAMPCON iniciuje fázu analógovo – číslicového prevodu, ktorý vyžaduje 13 cyklov ADC10CLK



:: Modul ADC10 – detaily časovania vzorkovania

- keď $SAMPCON = 0$, sú všetky analógové vstupy Ax v stave vysokej impedancie
- keď $SAMPCON = 1$, môžeme zvolený vstup Ax počas intervalu vzorkovania t_{sample} modelovať ako dolnopriepustný RC filter
- z hľadiska zdroja analógového signálu vstup predstavuje vstupnú impedanciu interného multiplexera R_I (max. 2 k Ω) v sérii s kapacitorom C_I (max. 27 pF)
- kapacitor C_I musí byť nabitý na napätie $\frac{1}{2}$ LSB zdroja napätia V_S , aby bol 10-bitový prevod presný



V_I = Input voltage at pin Ax
 V_S = External source voltage
 R_S = External source resistance
 R_I = Internal MUX-on input resistance
 C_I = Input capacitance
 V_C = Capacitance-charging voltage

:: Modul ADC10 – detaily časovania vzorkovania

- vnútorná impedancia zdroja napätia R_S a vstupná impedancia R_I vývodu ovplyvňuje t_{sample}
- minimálny potrebný čas vzorkovania pri 10-bitovom prevode môžeme určiť z nerovnice:

$$t_{\text{sample}} > (R_S + R_I) \times \ln(2^{11}) \times C_I = (R_S + 2k) \times 7.625 \times 27\text{pF}$$

- ak napríklad $R_S = 10 \text{ k}\Omega$, potom $t_{\text{sample}} > 2.47 \mu\text{s}$
- ak používame oddeľovací zosilňovač v režime $\text{REFBURST} = 1$, musí pre čas vzorkovania platiť:

$$t_{\text{sample}} > \begin{cases} (R_S + R_I) \times \ln(2^{11}) \times C_I \\ t_{\text{REFBURST}} \end{cases}$$

- kde t_{REFBURST} je čas ustálenia oddeľovacieho zosilňovača

:: Modul ADC10 – detaily časovania vzorkovania

- čas ustálenia oddeľovacieho zosilňovača, ak používame externú referenciu, môžeme vypočítať na základe:

$$t_{\text{REFBURST}} = S_R \times V_{\text{Ref}} - 0.5\text{ms}$$

kde:

- S_R strmosť oddeľovacieho zosilňovača
($\sim 1 \mu\text{s/V}$ keď $\text{ADC10SR} = 0$ a $\sim 2 \mu\text{s/V}$ keď $\text{ADC10SR} = 1$)
- V_{ref} napätie externej referencie

:: Modul ADC10 – režimy prevodu

CONSEQx	Režim	Opis
00	Jeden kanál, jednoduchý prevod	Jeden prevod napätia prítomného na zvolenom analógovom vstupe.
01	Sekvencia kanálov	Sekvencia prevodov napätí prítomných na jednotlivých analógových vstupoch.
10	Jeden kanál, opakovaný prevod	Opakovaný prevod napätia prítomného na zvolenom analógovom vstupe.
11	Sekvencia kanálov, opakovaný prevod	Opakovaná sekvencia prevodov napätí prítomných na jednotlivých analógových vstupoch.

:: Modul ADC10 – zastavenie prevodu

- zastavenie činnosti ADC10 závisí od aktuálneho režimu činnosti
- odporúčaný spôsoby zastavenia aktívne prebiehajúceho prevodu alebo sekvencie prevodov sú
 - *resetom bitu ENC v režime jednokanálového jednoduchého prevodu zastavíme prevod okamžite a preto výsledok prevodu nebude správny*
 - aby bol výsledok prevodu korektný, je potrebné sledovať príznak ADC10BUSY pred zmazaním bitu ENC
 - *reset bitu ENC v režime opakovaného jednokanálového prevodu zastaví prevodník až po ukončení práve prebiehajúceho prevodu*
 - *reset bitu ENC v sekvenčnom alebo opakovanom sekvenčnom režime zastaví prevodník až po ukončení práve prebiehajúcej sekvencie prevodov*
 - *ktorýkoľvek režim môžeme zastaviť okamžite nastavením bitov CONSEQx=0 a zmazaním bitu ENC. Výsledné dáta prevodníka budú však nespoľahlivé.*

:: Modul ADC10 – radič prenosu dát

- modul ADC10 zahŕňa interný radič prenosu dát (DTC – **Data Transfer Controller**)
- radič umožňuje **automatický prenos výsledkov prevodov** z registra ADC10MEM na iné pamäťové miesto internej pamäte procesora
- radič prenosu dát aktivujeme uložením nenulovej hodnoty do registra ADC10DTC1
- ak je DTC aktívny, potom dokončenie prevodu a uloženie výsledku do registra ADC10MEM spustí prenos dát
- počas prenosu preddefinovaného počtu dát **nie je potrebný žiadny zásah aplikačného softvéru** do modulu
- každý prenos DTC si vyžaduje jeden cyklus CPU MCLK
- aby sa zabránilo kolízii na zbernici počas prenosu, je vykonávanie CPU (ak je aktívna) počas jedného cyklu CPU, potrebného na prenos dát, pozastavené
- **prenos dát nesmie byť iniciovaný pokiaľ trvá prevod**
- aplikačný softvér musí zabezpečiť, aby pri aktivácii DTC neprebíhal žiadny prevod ani sekvencia prevodov

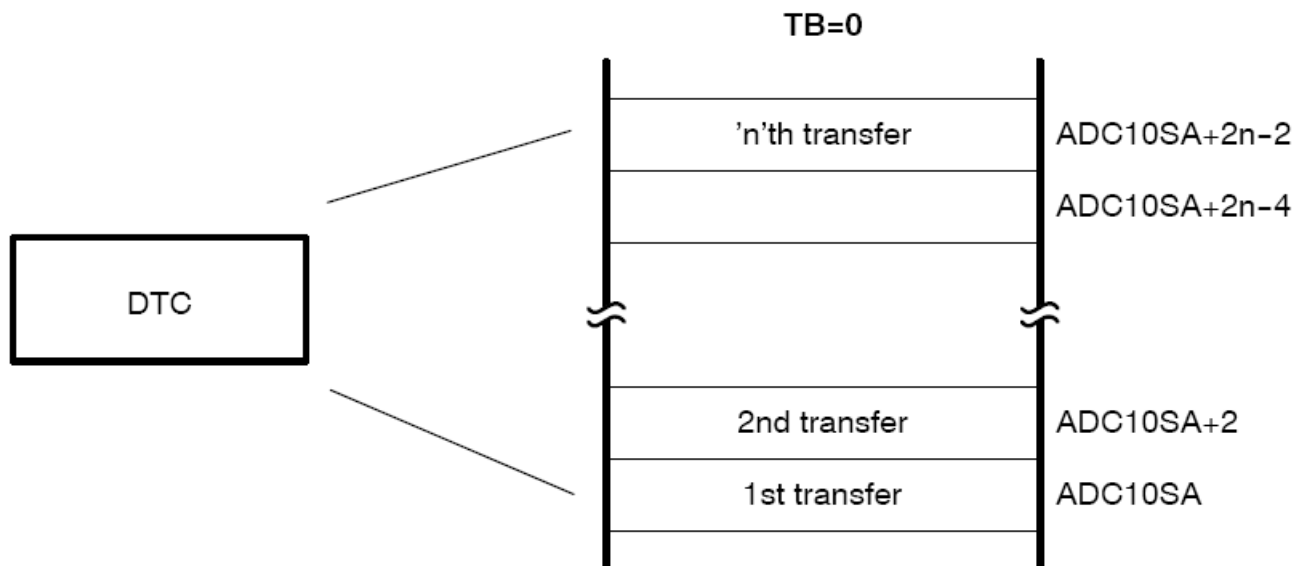


:: Modul ADC10 – radič prenosu dát, režimy prenosu

- prenos do jedného bloku
- prenos do dvoch blokov
- kontinuálny prenos

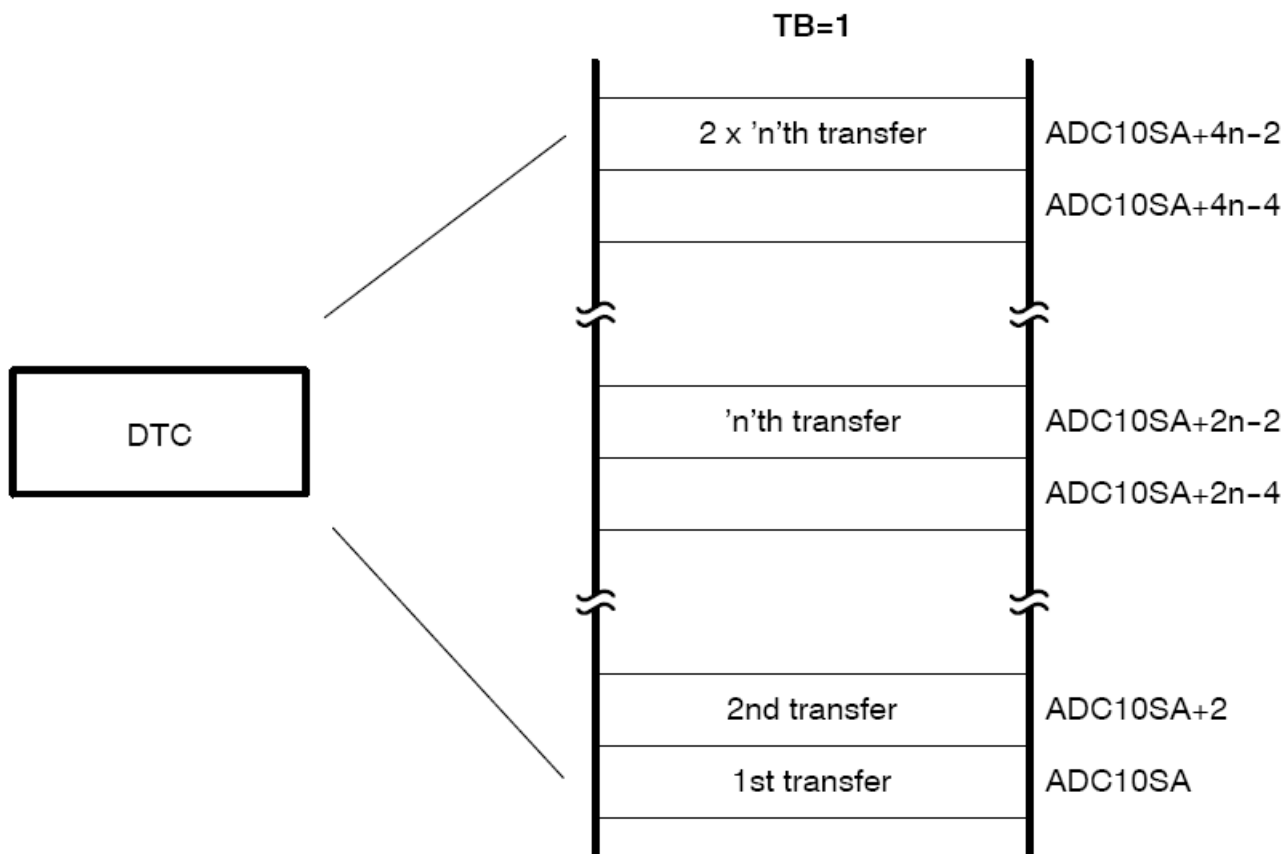
:: Modul ADC10 – radič prenosu dát, režimy prenosu

- prenos do jedného bloku



:: Modul ADC10 – radič prenosu dát, režimy prenosu

- prenos do dvoch blokov

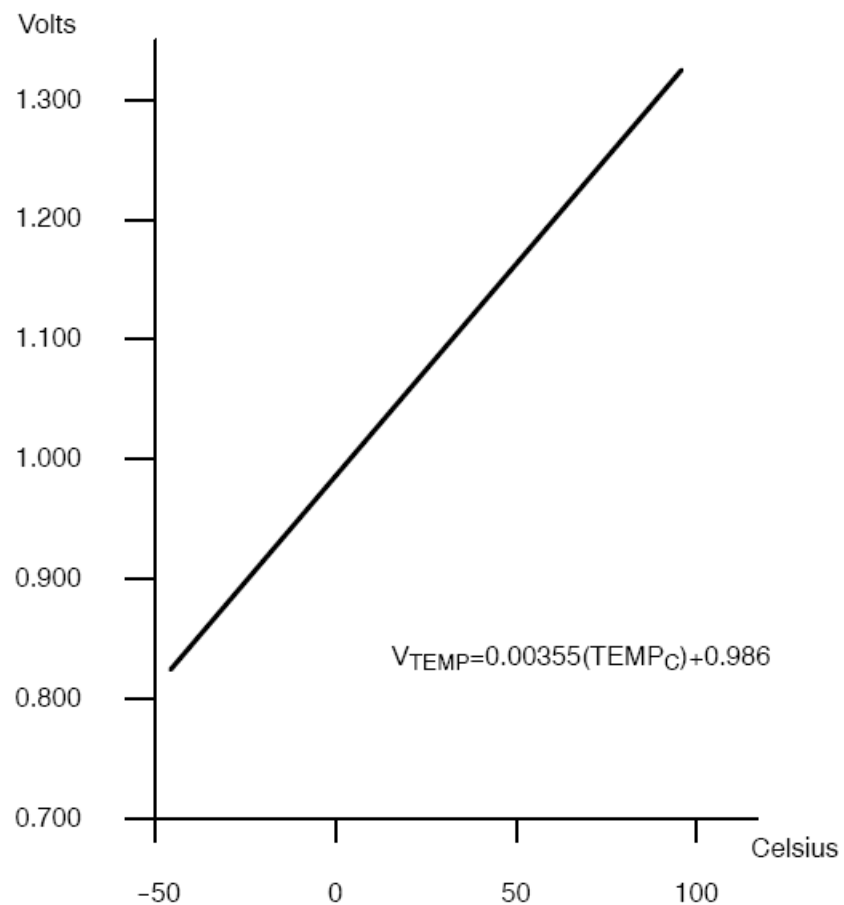


:: Modul ADC10 – integrovaný senzor teploty

- integrovaný senzor teploty pozostáva zo **zdroja konštantného prúdu a diódy v sériovom zapojení**, tečúci prúd vytvára na dióde úbytok napätia, ktorý je možné priviesť do modulu prevodníka a zmerať
- úbytok napätia na dióde je prítomný na **internom analógovom vstupe prevodníka**, ktorý vyberieme nastavením kanálu $INCHx = 1010$
- ďalšia konfigurácia prevodníka je rovnaká ako v prípade merania externého napätia
- ak používame interný senzor teploty, musí byť vzorkovacia perióda väčšia než $30 \mu s$
- **chyba offsetu senzora teploty je pomerne veľká** a pre praktické aplikácie vyžaduje kalibráciu
- pripojenie senzora k prevodníku automaticky aktivuje interný zdroj referenčného napätia ako zdroj pre senzor, ale nenastaví $VREF+$ ako výstup referenčného napätia ani neovplyvní výber referencie pre fázu prevodu
- výber referencie pri používaní senzora je rovnaký ako pri akomkoľvek inom analógovom kanále

:: Modul ADC10 – integrovaný senzor teploty

- typická prenosová funkcia senzora teploty modulu ADC10 procesora MSP430

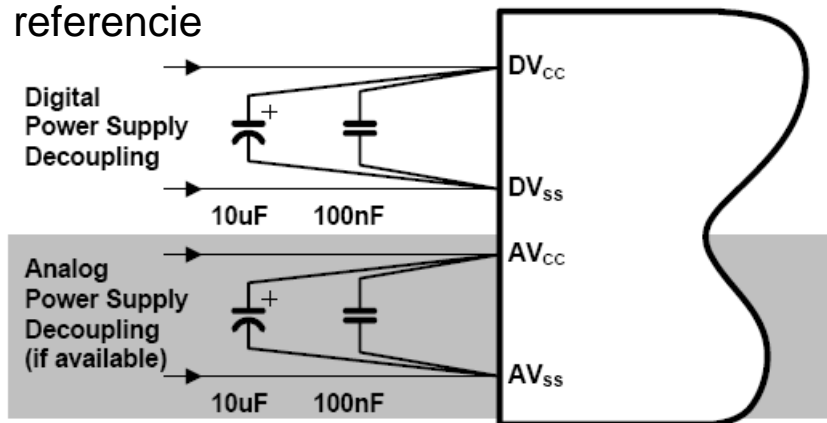


:: Modul ADC10 – metodika zemnenia a eliminácie šumu

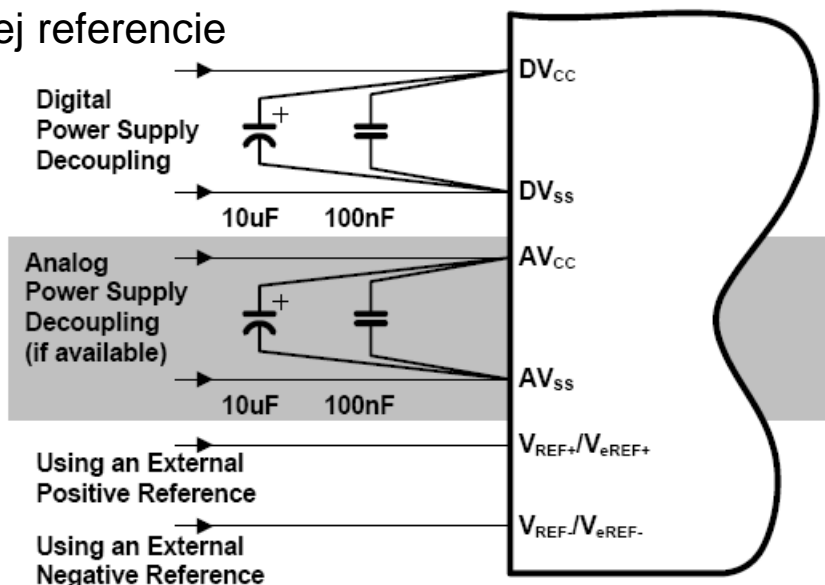
- v prípade návrhu systémov so zmiešanými precíznymi analógovými a rýchlymi digitálnymi obvodmi **je potrebné dôsledne zvážiť spôsob napájania a zemnenia**, aby bolo možné eliminovať vznik rušenia a presluchov
- tiež je potrebné pri návrhu DPS postupovať tak, aby na nej **neexistovali zemné slučky** a bol obmedzený vplyv parazitných efektov a šumu
- zemné slučky vznikajú vtedy, keď prúd tečúci z prevodníka tečie cez vodiče, ktoré sú spoločné pre analógové aj digitálne časti obvodu
- ak nezvážime vplyv zemných slučiek na pomery v obvode, môže takýto prúd vytvárať malé nežiaduce napät'ové ofsety, ktoré môžu ovplyvňovať referenciu alebo vstupné napätia prevodníka
- ďalším **zdrojom nežiaducich efektov v obvode**, ktoré môžu výrazne ovplyvniť výsledok prevodu, **je zvlnenie a šum napájacieho napätia**, ktoré je spôsobené spínaním digitálnych častí obvodu alebo spínaným zdrojom napájacieho napätia

:: Modul ADC10 – metodika zemnenia a eliminácie šumu

- lokálna filtrácia v prípade internej referencie



- lokálna filtrácia v prípade externej referencie



:: Modul ADC10 – prerušenia

- modul ADC10 je schopný generovať jedno prerušenie a má priradený jeden vektor prerušenia
- ak nepoužívame DTC ($ADC10DTC1 = 0$), potom k nastaveniu príznaku prerušenia ADC10IFG dôjde pri uložení výsledku prevodu do registra ADC10MEM
- ak DTC používame ($ADC10DTC1 > 0$), potom k nastaveniu príznaku prerušenia ADC10IFG dôjde po ukončení blokového prenosu dát
- ak povolíme prerušenie od modulu ADC10 bitom ADC10IE a zároveň globálne povolíme prerušenia bitom GIE, potom príznak ADC10IFG generuje žiadosť o prerušenie
- príznak ADC10IFG je obsluhou prerušenia automaticky zmazaný, môže však byť zmazaný aj aplikačným softvérom



:: Otázky ku skúške

- 1) Uvedte, z akých základných častí sa skladá modul A/D prevodníka procesora MSP430G2231!
- 2) Uvedte základné vlastnosti modulu A/D prevodníka procesora MSP430G2231!
- 3) Opíšte princíp činnosti A/D prevodníka s postupnou aproximáciou!
- 4) Uvedte, akým spôsobom môžeme pripojiť k procesoru MSP430 externú referenciu a aké možnosti ponúka interná referencia!
- 5) Aký je vzťah medzi vstupným napätím prevodníka, úrovňou referenčných hodnôt a číslicovým výsledkom prevodu?
- 6) Aké zdroje hodín môžeme použiť pre modul ADC10?
- 7) Opíšte vstupné obvody modulu ADC10 a zjednodušený model analógového vstupu!
- 8) Aké režimy prevodu umožňuje modul ADC10?
- 9) Opíšte radič prenosu dát DTC modulu ADC10 a uvedte, aké režimy prenosu dát podporuje!
- 10) Opíšte princíp činnosti interného senzora teploty modulu ADC10!

Koniec prednášky č. 7

10 - bitový interný analógovo - digitálny prevodník