

Bakalárska práca

ANALÝZA CHOVANIA VSTUPOV PREVODNÍKOV ADC V MIKRORADIČOCH STM32

Mgr. Zuzana Humplová

Elektrotechnika, elektronika a komunikační technika



Máj 2022

Vedúci: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Humplová** Jméno: **Zuzana** Osobní číslo: **487036**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektrotechnika, elektronika a komunikační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza chování vstupů převodníků ADC v mikrořadičích STM32

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of ADC Converter Input Behavior in STM32 Microcontrollers

Pokyny pro vypracování:

Analýzujte chování vstupů interních převodníků v mikrořadičích STM32 z hlediska vstupních proudů. Navrhněte a sestavte měřicí aparaturu, vytvořte potřebné programy. Naplánujte experimenty tak, aby se, pokud možno, podchytilo chování vstupů ADC na všech pinech mikrořadiče, kde jsou k dispozici. Vyhodnoťte velikosti náboje procházející vstupy ADC mikrořadiče v procesu odběru vzorku při různých vstupních napěťových úrovních. Zobecněte výsledky měření a specifikujte parametry náhradního modelu chování vstupu pro každý měřený mikrořadič. Na základě poznatků z experimentů vytvořte přístroje typu voltmetr s mikrořadiči STM32 s ohledem na dosažení co nejvyšší opakovatelnosti při měření napětí. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors,
- [2] STMicroelectronics: RM0316, STM32F3 Reference manual
- [3] STMicroelectronics: DS10362 - STM32F303 Data

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Fischer, CSc. katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracovala samostatne, a že som uviedla všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe, dňa

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Chcela by som vyjadriť úprimné poďakovanie doc. Ing. Janovi Fischerovi, CSc. za jeho odborné vedenie, ochotu a trpezlivosť, s ktorými som mohla počítať pri vypracovaní tejto práce. Taktiež patrí poďakovanie môjmu manželovi za nekonečnú podporu a povzbudenie, bez čoho by som to až sem nikdy nedotiahla.

Abstrakt

Práca sa zaoberá analýzou vstupov analógovo-číslcových prevodníkov mikroradičov STM32 z hľadiska vstupných prúdov. Vstupné charakteristiky dostupných kanálov prevodníkov vybraných mikroradičov sú merané v zapojení s nábojovým zosilňovačom. Parametre odvodeného náhradného modelu chovania vstupu prevodníka sú odhadnuté pre každý meraný kanál zvlášť. Následne je skúmané ovplyvnenie meraných charakteristík konfiguráciou vedľajších kanálov. Pri hodnotení výsledkov meraní je zvlášť dôležitý celkový rozsah vstupného prúdu tečúceho do prevodníka pri použitej vzorkovacej frekvencii. Na základe analýzy výsledkov je navrhnutý náhradný model chovania vstupu prevodníka rozšírený o únikový prúd. Závety sú formulované vo forme doporučení pri aplikácii mikroradičov ako meracích prístrojov, a predvedené na realizácii pre mikroradič STM32F303RE.

Kľúčové slová:

charakteristika ADC, vstupný prúd, nábojový zosilňovač, mikroradič, merací prístroj, únikový prúd

Abstract

The thesis analyses inputs of analog-to-digital converters of STM32 microcontrollers concerning input currents. Input characteristics of available converter channels of selected microcontrollers have been measured using a circuitry with a charge amplifier. The derived model of converter's input behaviour has its parameters estimated channel-wise. Further, the influence of the configuration of neighbouring channels on the measured characteristics has been examined. In evaluation of the outcomes of measuring, the total range of the input current flowing to the converter conditioned on the used sampling frequency is of special importance. Based on the analysed results, an incorporation of leakage current to the model of converter's input behaviour has been proposed. Conclusions are formulated in form of recommendations relevant for applications of a microcontroller as a measuring device, and demonstrated on the realisation for microcontroller STM32F303RE.

Keywords:

ADC characteristics, input current, charge amplifier, microcontroller, measuring device, leakage current

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Rozbor zadania.....	12
2.1	Cieľ práce	12
2.2	Postup riešenia.....	12
3	Meranie vstupných prúdov prevodníkov ADC s využitím nábojového zosilňovača.....	13
3.1	Prevodníky ADC v mikroradičoch STM32	13
3.2	Náhradná schéma vstupu prevodníka ADC.....	14
3.3	Základná schéma nábojového zosilňovača	15
3.4	Odvodenie základných vzťahov pre model vstupu prevodníka ADC	16
3.4.1	Orientačný odhad výstupného napätia pred realizáciou odmerov	16
3.4.2	Odhady veľkosti náboja a strednej hodnoty prúdu na vstupe prevodníka ADC.....	16
3.5	Realizácia meracieho obvodu s využitím dvoch mikroradičov	17
3.6	Meranie vstupných charakteristík jednotlivých kanálov prevodníkov ADC	20
3.6.1	Základná sada meraní	20
3.6.2	Doplňujúce sady meraní	23
3.7	Meranie výstupnej charakteristiky prevodníka DAC	24
3.8	Meranie vplyvu vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky prevodníkov ADC ..	24
4	Spracovanie nameraných dát.....	26
5	Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC.....	27
5.1	Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32F303RE	27
5.1.1	Základné vstupné charakteristiky jednotlivých kanálov prevodníkov ADC	27
5.1.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC	30
5.1.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	34
5.1.4	Výstupná charakteristika prevodníka DAC	35
5.2	Vstupné charakteristiky prevodníka ADC pre STM32F411RE	36
5.2.1	Základné vstupné charakteristiky jednotlivých kanálov prevodníka ADC	36
5.2.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC	37
5.2.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	40
5.3	Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32G431RB	41
5.3.1	Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC	41

Obsah

5.3.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC.....	42
5.3.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	45
5.4	Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32L476RG.....	46
5.4.1	Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC.....	46
5.4.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC.....	48
5.4.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	51
5.5	Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32F446RE	52
5.5.1	Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC.....	52
5.5.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC.....	54
5.5.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	56
5.6	Vstupné charakteristiky prevodníka ADC pre STM32G031K8	57
5.6.1	Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC.....	58
5.6.2	Doplňujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC.....	59
5.6.3	Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky	61
6	Zhodnotenie výsledkov meraní	63
6.1	Porovnanie mikroradičov z hľadiska vstupov prevodníkov ADC	63
6.1.1	Hodnotenie tvaru charakteristík	64
6.1.2	Hodnotenie linearity charakteristík	64
6.1.3	Zmena charakteristík vzhľadom na vzorkovací kmitočet	65
6.1.4	Porovnanie prúdových rozsahov charakteristík	65
6.1.5	Variabilita charakteristík prevodníka ADC vzhľadom na voľbu kanálu	67
6.1.6	Ovplyvnenie charakteristík konfiguráciou vedľajších kanálov.....	67
6.2	Náhradný model vstupu prevodníka ADC zohľadňujúci únikový prúd	70
6.2.1	Rozšírenie modelu o únikový prúd	70
6.2.2	Odhad parametrov modelu s únikovým prúdom pre mikroradič STM32F411RE..	73
6.3	Využitie výsledkov meraní	77
7	Realizácia jednoduchého meracieho prístroja.....	80
7.1	Využitie mikroradičov STM32 na realizáciu jednoduchých meracích prístrojov	80
7.2	Merací prístroj realizovaný na mikroradiči STM32F303RE	80
8	Záver.....	82
	Referencie	83
A	Zoznam použitých symbolov	85
B	Obsah elektronickej prílohy	86

1 Úvod

Analógovo-číslícové prevodníky patria medzi základné periférie mikroradičov, ktoré prevádzajú elektrický analógový signál – elektrické napätie – na číslicový výstup. S rastúcim výkonom procesorov je v súčasnosti možné dosiahnuť takú rýchlosť prevodov, že sa mikroradiče dajú použiť ako dostupné náhrady jednoduchých meracích prístrojov. Na dosiahnutie požadovanej presnosti a opakovateľnosti meraní je však potrebné poznať chovanie použitého prevodníka. Táto práca sa zameriava na analýzu chovania vstupov prevodníkov rôznych mikroradičov STM32; niektoré závery však môžu byť zovšeobecnené aj na ďalšie typy mikroradičov.

Jednoduché meracie prístroje sa často používajú pri meraniach kvázistacionárnych napätí v obvodoch, ktoré neobsahujú aktívne členy, ako sú napr. operačné zosilňovače. Takéto obvody môžu mať veľkú vstupnú impedanciu, kvôli ktorej dochádza k významnému vzájomnému ovplyvňovaniu medzi meraným obvodom a prevodníkom prostredníctvom elektrického prúdu, ktorý celou meracou sústavou preteká. Namerané údaje tak môžu byť skreslené.

Veľkosť elektrického prúdu, ktorý pri meraniach preteká vstupom analógovo-číslícového prevodníka, je úzko spojená s vlastnosťami použitého prevodníka. Prevodníky sa líšia nielen podľa princípu činnosti, ale aj podľa spôsobu a kvality prevedenia. Preto je pre zvýšenie presnosti meraní nevyhnutné experimentálne zistiť veľkosť vstupných prúdov, ktoré do prevodníka tečú, a to v závislosti od veľkosti meraného napätia. Pri aplikácii meracieho prístroja je potrebné tieto údaje zohľadniť a v prípade potreby prispôbiť buď nastavenia parametrov meracieho prístroja, a/lebo samotný meraný obvod.

Z nameraných dát o vstupných prúdoch tečúcich do prevodníkov je vhodné zostaviť náhradný model. Tento zjednodušený popis chovania vstupného prúdu uľahčí určenie správneho nastavenia meracej aparatury v závislosti na použítom prevodníku. Žiaľ, podobné charakteristiky nie sú v produktovej dokumentácii mikroradičov bežne uvádzané, navyac v súčasnosti je dostupných iba veľmi málo prác, ktoré by sa tejto problematike venovali. Systematické merania a následná analýza vstupných prúdov by tak mohli prispieť k rozšíreniu znalostí o fungovaní analógovo-číslícových prevodníkov a dopomôcť k tomu, aby aplikácie mikroradičov ako jednoduchých meracích prístrojov mohli spoľahlivo slúžiť svojmu účelu.

2 Rozbor zadania

2.1 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto práce je analýza chovania vstupov interných analógovo-číslicových prevodníkov (ADC) v mikroradičoch STM32 z hľadiska vstupných prúdov. Dôvody skúmania vstupných prúdov sú úzko späté s využitím prevodníkov ADC ako meracích prístrojov; priemerná veľkosť prúdu tečúceho vstupom prevodníka v závislosti na veľkosti vstupného napätia je totiž zásadnou charakteristikou, ktorá súvisí s kvalitou nameraných dát. Skreslenie nameraných hodnôt môže nastať v prípade, keď má meraný obvod vysokú vstupnú impedanciu; vtedy je jeho schopnosť poskytnúť dostatočne veľký prúd tak, aby naplnil požiadavky kladené prevodníkom ADC, výrazne obmedzujúcim faktorom. Meranie vstupných prúdov prevodníkov ADC rôznych mikroradičov tak bude dôležitým výstupom tejto práce.

Nadväzujúcim cieľom je zovšeobecnenie výsledkov meraní a zostavenie náhradného modelu chovania vstupu prevodníka ADC vrátane špecifikácie jeho parametrov pre rôzne mikroradiče. Nevyhnutnou súčasťou práce je tiež návrh a príprava meracej aparatury, pomocou ktorej budú merania uskutočnené, vrátane prípravy obslužných programov. K nim patrí i realizácia jednoduchého meracieho prístroja pre mikroradič STM32F303RE.

2.2 Postup riešenia

Na začiatku bude odvodený jednoduchý náhradný model chovania vstupu prevodníka ADC. Na jeho základe bude navrhnutý a pripravený merací obvod, ktorý bude následne využitý pri meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC. Súčasťou bude i návrh postupov meraní, ktoré by mali pomôcť overiť spoľahlivosť nameraných dát, a zároveň garantovať ich porovnateľnosť naprieč rôznymi mikroradičmi.

Namerané údaje budú následne spracované pomocou samostatného užívateľského programu. Výsledky budú zahŕňať grafy nameraných vstupných charakteristík vyvedených kanálov prevodníkov ADC a tiež ich náhradných lineárnych modelov. Súčasťou bude zistenie vplyvu konfigurácie vedľajších kanálov na merané charakteristiky.

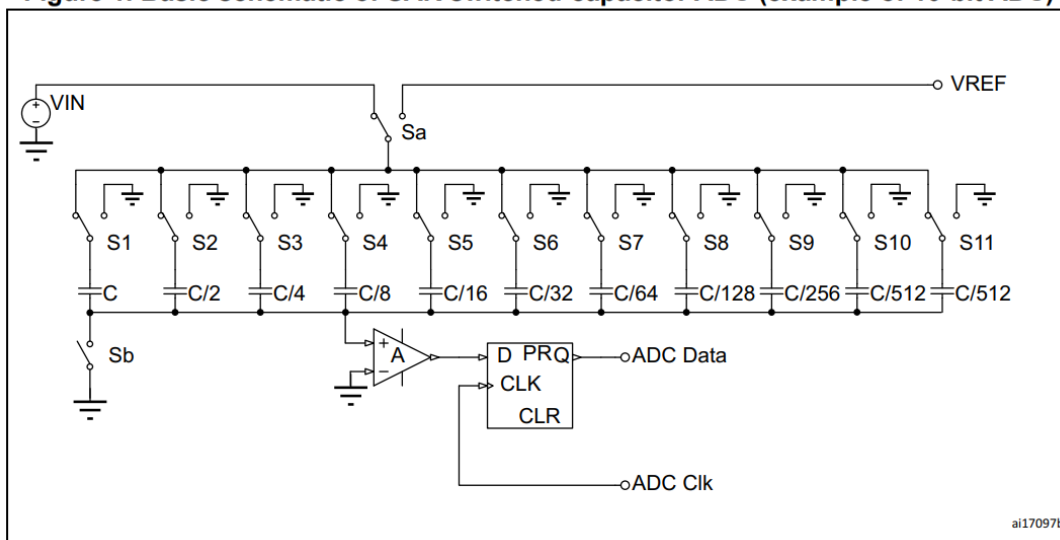
Na základe poznatkov získaných pri meraniach budú vypracované všeobecné odporúčania, ktoré by mali zvýšiť presnosť a opakovateľnosť odmerov pri realizácii meracieho prístroja. Prezentovaná bude aj ukážka realizácie jednoduchého meracieho prístroja pre mikroradič STM32F303RE.

3 Meranie vstupných prúdov prevodníkov ADC s využitím nábojového zosilňovača

3.1 Prevodníky ADC v mikroradičoch STM32

Vlastnosti analógovo-číslcových prevodníkov (prevodníkov ADC) závisia od typu ich konštrukcie a princípu, na základe ktorého pracujú. Podľa informácií uvedených v [1], str. 6: „Mikroradiče STM32 používajú prevodníky ADC typu SAR (s postupnou aproximáciou)...“. Tieto prevodníky sú štandardne 12-bitové, majú niekoľko kanálov pripojených pomocou multiplexeru, z ktorých časť je vyvedených na vstupy a časť je vnútorných (napr. [2], str. 305). Prevodníky pozostávajú zo sústavy prepínačov a kondenzátorov (obr. 1) a pracujú na princípe prelievania náboja ([1], kap. 2). Niektoré typy mikroradičov obsahujú prevodníkov viac.

Figure 1. Basic schematic of SAR switched-capacitor ADC (example of 10-bit ADC)



Obr. 1: Základná schéma prevodníka ADC s postupnou aproximáciou
Zdroj: [1], str. 6, obr. 1

Princíp funkčnosti prevodníka ADC s postupnou aproximáciou pozostáva zo vzorkovania vstupného signálu (*sample/hold*) a jeho prevodu na číslcový signál (kvantovania)¹.

Detailný popis štruktúry a princípu funkčnosti prevodníkov pracujúcich na princípe prelievania náboja, rôznych zdrojov chýb prevodu a v návaznosti na to odporúčaní, ako chyby zredukovať, je uvedený v [1], kap. 2. Najpodstatnejšie skutočnosti sú voľne prevzaté a zhrnuté v nasledujúcom odstavci:

Sústava $(n + 1)$ vnútorných kondenzátorov n -bitového prevodníka sa vo fáze sledovania (*sample*) nabije na vstupné napätie U_{in} , čím sa do prevodníka preniesie odpovedajúce množstvo náboja. Následne sa vstupné napätie odpojí a prevodník prejde do fázy pamätania (*hold*). Sústava kondenzátorov sa pripojí k referenčnému napätiu

¹ Podrobný popis dostupný napríklad v [9], str. 62-64.

U_{ref} . Postupným spínaním prepínačov pri jednotlivých kondenzátoroch sa náboj prelieva sústavou, čím sa mení napätie, ktoré vstupuje do komparátora. Na základe výsledku na výstupe komparátora sa určí hodnota jedného bitu. Pre n -bitový prevodník to znamená, že je potrebných n taktov na kompletný prevod. Kvantovací krok odpovedá najmenej významnému bitu (LSB). V prvom takte je určená hodnota najvýznamnejšieho bitu (MSB) porovnaním s napätím veľkosti $U_{ref}/2$. Ak je $U_{in} > U_{ref}/2$, bit nadobúda hodnotu $b_1 = 1$, v opačnom prípade zasa hodnotu $b_1 = 0$. Všeobecne, hodnota k -teho bitu (b_k) sa určí porovnaním U_{in} s napätím $U_{ref}^k = U_{ref} \cdot \left(\sum_{i=1}^{k-1} \frac{b_i}{2^i} + \frac{1}{2^k} \right)$, kde b_1 až b_{k-1} sú určené v predchádzajúcich taktach. Pokiaľ $U_{in} > U_{ref}^k$, potom $b_k = 1$, inak $b_k = 0$.

Pri jednom odmere teda dojde k prenosu príslušného množstva náboja medzi vonkajším (meraným) obvodom a vstupom prevodníka ADC tak, aby sa nabila sústava vnútorných kondenzátorov na hodnotu napätia U_{in} . Zo známej veľkosti celkového preneseného náboja a doby, počas ktorej tento náboj tiekol vstupom prevodníka, je možné zistiť priemernú veľkosť vstupného prúdu. Práve stredná hodnota vstupného prúdu, počítaná na dobu jednej vzorkovacej periódy T_s , tvorí základnú charakteristiku prevodníka ADC². Zároveň však treba dodať, že stredná hodnota prúdu a veľkosť náboja preneseného vstupom prevodníka ADC počas jednej vzorkovacej periódy nesú pri známej vzorkovacej frekvencii tú istú informáciu a v princípe sú zameniteľné. Obe veličiny preto popisujú vstupnú charakteristiku prevodníka ADC.

Napriek tomu, že priemerná veľkosť vstupného prúdu je dôležitá charakteristika prevodníka ADC, produktová dokumentácia mikroradičov ju neuvádza. Prvé uverejnené merania ukázali, že charakteristiky mikroradičov STM32 z jedného radu sú si podobné, na základe čoho sa dalo usúdiť, že používajú rovnaký typ prevodníkov ADC ([3], str. 72). Vo všeobecnosti ale tieto mikroradiče zrejme rovnaké prevodníky nemali, čo sa prejavilo na nameraných charakteristikách ([3], str. 91). Súčasne táto práca ukázala, že meranie s využitím operačného zosilňovača ako integrátora napätia je metóda vhodná na meranie vstupných prúdov prevodníkov ADC ([3], str. 91), preto bola použitá i v tejto práci.

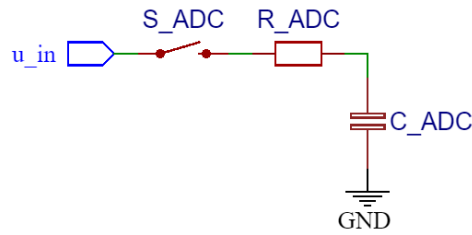
3.2 Náhradná schéma vstupu prevodníka ADC

Zjednodušená náhradná schéma vstupu ADC prevodníka tvorí sériové zapojenie kondenzátora C_{ADC} , rezistora R_{ADC} a spínača S_{ADC} , ktorý určuje dobu sledovania a dobu prevodu (obr. 2)³.

Doba nabíjania kondenzátora je daná časovou konštantou $\tau_{ADC} = R_{ADC} \cdot C_{ADC}$. Doba sledovania t_s musí byť väčšia než τ_{ADC} , aby sa kondenzátor stihol nabiť na hodnotu vstupného napätia u_{in} ([1], kap. 3.2.7).

² Vzorkovacia perióda T_s je prevrátená hodnota vzorkovacej frekvencie f_s .

³ Schémy prezentované v tejto práci boli vytvorené v programe *EasyEDA Designer*: <https://easyeda.com>.



Obr. 2: Náhradná schéma vstupu prevodníka ADC

Nech je hodnota vstupného napätia pri odmeroch konštantná na hodnote U_r . Počas doby sledovania $t_s > \tau_{ADC}$ pritečie na kondenzátor prevodníka ADC náboj $Q_s = Q(t_s) - Q(0)$. Hodnota napätia na kondenzátore sa zmení z počiatočnej hodnoty tzv. zvyškového napätia $u_{in}(0) = U_{zv}$ na hodnotu $u_{in}(t_s) = U_r$, pričom platí:

$$Q_s = (U_r - U_{zv}) \cdot C_{ADC} \quad (1)$$

Zvyškové napätie U_{zv} je napätie, ktoré zostane na meracom kondenzátore, resp. je možné ho namerať na príslušnom pine, pred začiatkom odmeru. Vo všeobecnosti takto definované zvyškové napätie nie je nulové a môže sa meniť v závislosti na konfigurácii kanálov a podmienkach merania, ako bude ukázané neskôr. Veľkosť zvyškového napätia ovplyvňuje smer pohybu nábojov pri následnom odmere, ktorý môže byť aj opačný: pokiaľ $U_{zv} > U_r$, prúd pri odmere netečie v smere z vonkajšieho obvodu do ADC prevodníka, ale naopak.

Pri vzorkovacej frekvencii f_s je možné odhadnúť strednú hodnotu prúdu I_{str} tečúceho do prevodníka ADC pri jednom odmere (resp. počas jednej vzorkovacej periódy)⁴:

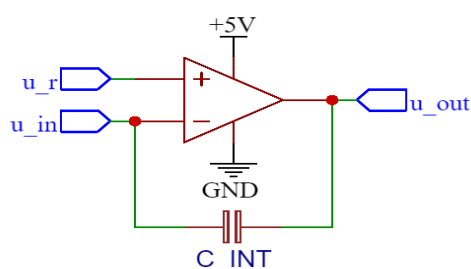
$$I_{str} \approx Q_s \cdot f_s = (U_r - U_{zv}) \cdot C_{ADC} \cdot f_s \quad (2)$$

3.3 Základná schéma nábojového zosilňovača

Prúdy pretekajúce vstupom ADC sú veľmi malé a nie je vhodné ich merať priamo. Na nepriamy odmer je možné využiť zapojenie s nábojovým zosilňovačom, a zistiť tak napätie naintegrované pri určitom počte opakovaní odmerov. Z naintegrovaného napätia sa dá odvodiť odhad veľkosti náboja pretekajúceho obvodom pri jednom odmere a následne odhadnúť priemerná veľkosť vstupného prúdu prevodníka.

Nábojový zosilňovač pozostáva z operačného zosilňovača, ktorý má na kladnom vstupe pripojené generované konštantné napätie $u_r(t) = U_r$ a v zápornej spätnej väzbe kondenzátor C_{int} (obr. 3). Pre záporný vstup platí $u_{in}(t) = u_r(t) = U_r$. Na kondenzátore, resp. výstupe operačného zosilňovača, sa prechodom prúdu postupne integruje napätie, z ktorého je možné pri znalosti kapacity kondenzátora dopočítať veľkosť preneseného náboja.

⁴ K rovnakému vzťahu dospeli tiež práce [3], str. 14, rovnica (2) a [16].



Obr. 3: Základná schéma nábojového zosilňovača

Pred začiatkom odmerov je počiatočná hodnota výstupného napätia $u_{out}(0) = U_0$, po realizácii N odmerov je konečná hodnota tohto napätia $u_{out}(N/f_s) = U_N$. Pre veľkosť preneseného náboja Q_{int} platí:

$$Q_{int} = (U_N - U_0) \cdot C_{int} \quad (3)$$

3.4 Odvodenie základných vzťahov pre model vstupu prevodníka ADC

Prepojením záporného vstupu nábojového zosilňovača na vstup do prevodníka ADC (napätie u_{in} je spoločné) vznikne základný merací obvod, z ktorého je možné odhadnúť priemernú veľkosť náboja preneseného do prevodníka ADC počas jedného odmeru. Musí platiť $Q_{int} = N \cdot Q_s$ a dosadením rovníc (1) a (3) vznikne:

$$(U_N - U_0) \cdot C_{int} = N \cdot (U_r - U_{zv}) \cdot C_{ADC} \quad (4)$$

3.4.1 Orientačný odhad výstupného napätia pred realizáciou odmerov

Úpravou rovnice (4) je možné získať odhad veľkosti výstupného napätia U_N pre N odmerov pri znalosti generovaného napätia na kladnom vstupe zosilňovača U_r , zvyškového napätia U_{zv} , približnej kapacity kondenzátora meracieho prevodníka C_{ADC} , počiatočného výstupného napätia U_0 a kapacity integračného kondenzátora C_{int} :

$$U_N = U_0 + \frac{N \cdot (U_r - U_{zv}) \cdot C_{ADC}}{C_{int}} \quad (5)$$

Hodnota zvyškového napätia nie je pred odmerom známa, ale je možné spraviť odhad výstupného napätia U_N pre rôzne predpokladané hodnoty U_{zv} .

3.4.2 Odhady veľkosti náboja a strednej hodnoty prúdu na vstupe prevodníka ADC

Po realizácii N odmerov je možné z hodnoty výstupného napätia spätne dopočítať odhad kapacity meracieho kondenzátora C_{ADC} za predpokladu, že $U_r \neq U_{zv}$:

$$C_{ADC} = \frac{(U_N - U_0) \cdot C_{int}}{(U_r - U_{zv}) \cdot N} \quad (6)$$

Táto rovnica predpokladá, že je známe zvyškové napätie U_{zv} . V skutočnosti táto hodnota vopred známa nie je, ale je možné ju orientačne odhadnúť nastavením vstupného napätia U_r s využitím rovnice (1). Pokiaľ $U_r = U_{zv}$, je stredná hodnota prúdu I_{str} nulová a na integračnom kondenzátore C_{int} sa neintegruje napätie. Preto stačí nájsť takú hodnotu vstupného napätia U_r , pre ktorú po realizácii N odmerov približne platí $U_N = U_0$; táto hodnota je orientačným odhadom zvyškového napätia U_{zv} .

Odhad veľkosti náboja Q_s , ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru:

$$Q_s = \frac{Q_{int}}{N} = \frac{(U_N - U_0) \cdot C_{int}}{N} \quad (7)$$

Odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} tečúceho vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru pri znalosti vzorkovacej frekvencie:

$$I_{str} \approx Q_s \cdot f_s = \frac{(U_N - U_0) \cdot C_{int}}{N} \cdot f_s \quad (8)$$

Rovnica (8) hovorí, že priemerný prúd tečúci vstupom prevodníka ADC rastie úmerne s kmitočtom. Z tohto dôvodu je pre obvody s veľkou vstupnou impedanciou potrebné zvoliť dostatočne nízku vzorkovaciu frekvenciu.

Náhradný lineárny model chovania vstupu prevodníka ADC s parametrami \hat{U}_{zv} a \hat{C}_{ADC} :

$$Q_s = f(U_r) = \hat{C}_{ADC} \cdot (U_r - \hat{U}_{zv}) \quad (9)$$

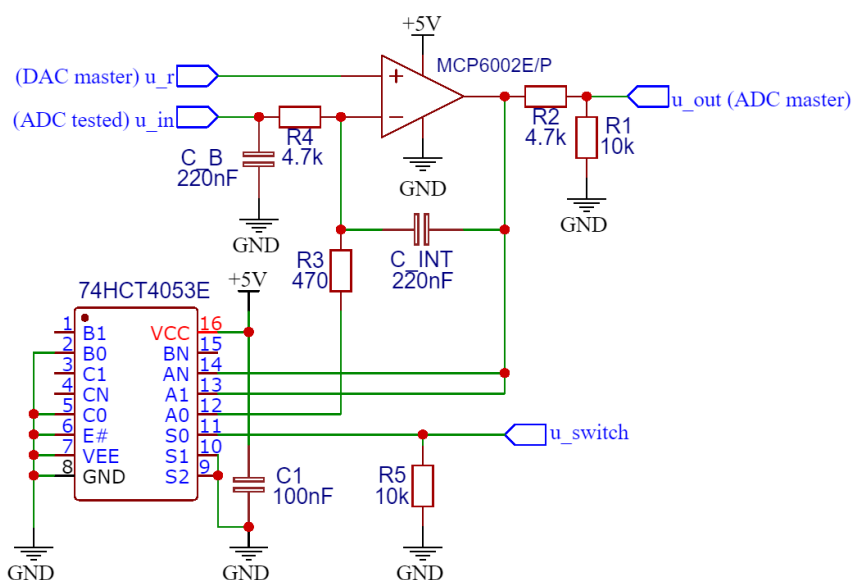
Parametre lineárneho modelu, označené symbolom strechy (\hat{X}), môžu byť odhadnuté napríklad pomocou lineárnej regresie (metódy najmenších štvorcov).

3.5 Realizácia meracieho obvodu s využitím dvoch mikroradičov

Aby boli odmery automatizované s možnosťou opakovaní meraní, bol ako merací prístroj využitý jeden mikroradič STM32F303RE. Uvedený mikroradič slúžil nielen ako štvorkanálový voltmeter, ale tiež ako generátor programom riadeného jednosmerného napätia pomocou číslicovo-analógového prevodníka (DAC). Namerané hodnoty na jednotlivých kanáloch prevodníka ADC boli zasielané na terminálové rozhranie PuTTY v režime logovania a ukladané do súborov.

Zmienený mikroradič – merací prístroj – slúžil ako nadradené zariadenie (*master*), ktoré celý proces odmerov riadilo programom. Samotné meranie prebiehalo na ďalšom mikroradiči, kde sa postupne vystriedali všetky dostupné typy STM32. Meraný podradený mikroradič (*slave*) iba opakovane vykonával konverzie na požadovanom množstve kanálov svojho prevodníka ADC, pričom výsledky nikam nezaznamenával. Záznamy vykonával nadradený mikroradič, ktorý sledoval vždy práve jeden testovaný kanál.

Schéma zapojenia meracieho obvodu s nábojovým zosilňovačom je znázornená na obr. 4. Na kladný vstup nábojového zosilňovača bolo pripojené (programom riadené) napätie generované prevodníkom DAC nadradeného mikroradiča. Súčasne tam bol pripojený aj jeden vstupný kanál prevodníka ADC nadradeného zariadenia (nie je v schéme znázornený), ktorý zabezpečil kontrolný odmer skutočne vygenerovaného napätia vstupujúceho do nábojového zosilňovača. Druhý vstupný kanál prevodníka ADC nadradeného mikroradiča bol zapojený vo výstupe nábojového zosilňovača⁵. Tento kanál meral výstupné napätie pred začiatkom a na konci sady N odmerov; rozdiel bol úmerný napätiu naintegrovanému na kondenzátore C_{int} . Samotný testovaný kanál podradeného mikroradiča bol zapojený vo vetve záporného vstupu nábojového zosilňovača.



Obr. 4: Schéma zapojenia meracieho obvodu s nábojovým zosilňovačom

Na realizáciu nábojového zosilňovača bol použitý operačný zosilňovač MCP6002E/P s nesymetrickým napájacím napätím +5 V. Ako integračný kondenzátor C_{int} slúžil polyesterový kondenzátor TESLA TC205 s kapacitou 220 nF.

Na ochranu použitých mikroradičov pri meraní a tiež na zlepšenie kvality odhadov bolo potrebné základný obvod prispôbiť. Na to bol použitý blokovací polypropylénový kondenzátor JFW-X2 s kapacitou 220 nF (v schéme na obr. 4 označený C_B) na vstupe testovaného kanálu prevodníka ADC. Tento kondenzátor redukoval prúdové špičky pri jednotlivých odmeroch a súčasne slúžil ako zdroj nábojov do vstupu meraného ADC prevodníka. Rezistor R_4 mal veľkosť 4,7 k Ω .

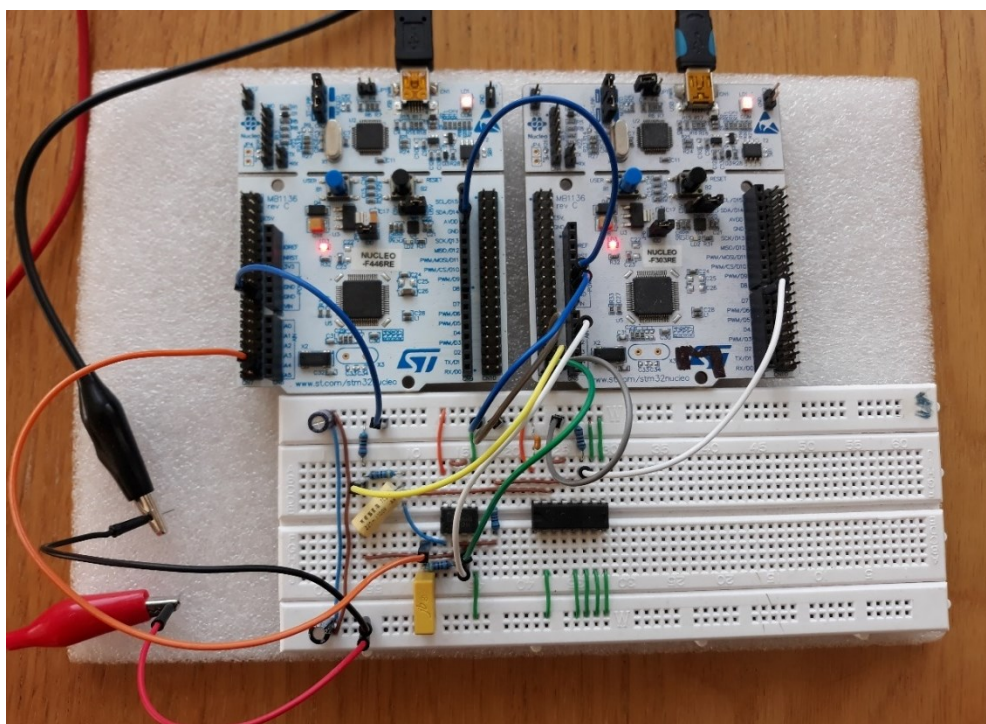
Štandardný rozsah vstupného napätia kanálu ADC je udávaný v rozpätí 0 V ÷ +3,3 V. Keďže výstupné napätie integrátora môže tento rozsah prekročiť (až do veľkosti napájacieho napätia +5 V, keď nastane saturácia), bolo potrebné ochrániť vstup meraného kanálu prevodníka ADC

⁵ Pri realizácii odmerov malo nadradené zariadenie nakonfigurované štyri kanály na prevodníku ADC, pričom výstupné integrované napätie bolo merané na druhom kanále a generované napätie na štvrtom. Prvý a tretí kanál boli uzemnené, aby bol minimalizovaný vplyv vedľajších kanálov.

nadradeného zariadenia. Toto bolo realizované napät'ovou deličkou s rezistormi R_1 a R_2 veľkosti $10\text{ k}\Omega$ a $4,7\text{ k}\Omega$.

Pri automatizácii merania bolo nevyhnutné opakovane vybit' integračný kondenzátor C_{int} . Na to bol využitý elektronický prepínač 74HCT4053E riadený napätím s nesymetrickým napájacím napätím $+5\text{ V}$ a blokovacím keramickým kondenzátorom C_1 s kapacitou 100 nF . Podľa logickej hodnoty riadeného napätia u_{switch} generovaného nadradeným zariadením v polohe HIGH alebo LOW buď prebiehalo štandardné meranie s integráciou napätia, alebo bol integračný kondenzátor skratovaný paralelnou vetvou s rezistorom R_3 s odporom $470\ \Omega$. Navyiac, paralelne k výstupu napätia u_{switch} bol pripojený *pull-down* rezistor R_5 s odporom $10\text{ k}\Omega$.

Výsledné prevedenie meracieho obvodu je vyfotené na obr. 5.



Obr. 5: Skutočné prevedenie meracieho obvodu s nábojovým zosilňovačom

Aby bolo meranie výstupného integrovaného napätia neskreslené v blízkosti saturačného napätia, bolo potrebné sa uistiť, že sa výstupné napätie v priebehu integrácie nedostalo do blízkosti saturačných hodnôt. Na začiatku sady meraní bola veľkosť výstupného napätia daná veľkosťou napätia na kladnom vstupe operačného zosilňovača, teda riadeným napätím U_r generovaným nadradeným mikroradičom v rozsahu $0\text{ V} \div +3,3\text{ V}$; napätie na integračnom kondenzátore C_{int} bolo nulové – kondenzátor bol skratovaný. Pri odmere napätia s deličkou tomu odpovedá napätie v rozsahu $0\text{ V} \div 2,25\text{ V}$. V priebehu meraní a pri integrácii do kladných hodnôt hrozilo priblíženie sa k saturačnému napätiu $+5\text{ V}$, resp. s deličkou k hodnote $3,3\text{ V}$. Tomu sa dalo zabrániť nastavením vhodného počtu opakovaní meraní v jednej sade. Naopak pri integrácii do záporných hodnôt a pri nízkom generovanom napätí v blízkosti 0 V bolo potrebné saturácii zabrániť tak, že sa integračný kondenzátor prednabil na dostatočne vysokú kladnú hodnotu výstupného napätia, aby v priebehu sady odmerov výstupné napätie nedosiahlo 0 V . Proces riadenia odmerov vrátane skratovania a prednabíjania integračného kondenzátora bol realizovaný programom.

3.6 Meranie vstupných charakteristík jednotlivých kanálov prevodníkov ADC

Na realizáciu meraní bol vytvorený program vo vývojovom prostredí *STM32CubeIDE* od spoločnosti *STMicroelectronics*, čo je univerzálny vývojový softvér založený na C/C++ platforme [4]. Pomocou tohto nástroja bola pripravená základná konfigurácia použitých periférií s automatickým generovaním kódu a využívajúcim dostupné knižnice ovládačov hardvéru od *STMicroelectronics* (tzv. HAL - *Hardware Abstraction Layer*). Súčasťou programu bola aplikácia jednoduchého meracieho prístroja pre mikroradič STM32F303RE a samostatný riadiaci program na obsluhu meraní, pretože tento mikroradič bol použitý ako testovacie zariadenie. Ďalšie programy boli pripravené pre merané mikroradiče ako testované zariadenia. Zdrojové kódy programu sú uložené v elektronickej prílohe v adresári /Multimeter_ST.

Hlavným cieľom tejto práce bolo overiť platnosť lineárneho modelu chovania pre všetky dostupné kanály prevodníkov ADC pre vybrané mikroradiče STM32 a zhodnotiť ich namerané charakteristiky. Na dostupných kanáloch, ktoré boli vyvedené na nejaký pin, bola vykonaná základná sada meraní. Podľa potreby boli pre vybrané kanály mikroradičov merania rozšírené o podrobnejšiu analýzu s cieľom upresniť stabilitu nameraných hodnôt, overiť citlivosť na zmenu nastavení a podobne.

3.6.1 Základná sada meraní

V základnej sade meraní pre všetky kanály bolo napätie U_r generované s krokom 0,1 V v rozsahu 0 V ÷ +3,2 V⁶. Počet odmerov pri integrácii bol zvolený $N = 10000$ a vzorkovacia frekvencia $f_s = 10$ kHz.

Zjednodušený algoritmus pre jednu sadu odmerov je nasledujúci:

1. Nadradený aj podradený mikroradič majú nastavený rovnaký vzorkovací kmitočet f_s . Počet odmerov pri integrácii napätia na výstupe nábojového zosilňovača je N . Prepínač je v zopnutej polohe (integračný kondenzátor C_{int} je skratovaný).
2. Nastaví sa generované konštantné napätie U_r nadradeného mikroradiča na zvolenú hodnotu.
3. Do pamäte sa uložia namerané hodnoty zo všetkých kanálov nadradeného mikroradiča (hodnota napätia meraná na kladnom vstupe do nábojového zosilňovača U_r a na výstupe nábojového zosilňovača U_0).
4. Prepínač sa nastaví do rozopnutej polohy a vykoná sa N odmerov.
5. Do pamäte sa uložia namerané hodnoty zo všetkých kanálov nadradeného mikroradiča (hodnota napätia meraná na kladnom vstupe do nábojového zosilňovača U_r ⁷ a na výstupe nábojového zosilňovača U_N).

⁶ Výsledky pre krajnú hodnotu 3,3 V sa ukázali ako nestabilné a nakoniec boli zo základného merania vylúčené. Späťne boli zo spracovania vylúčené hodnoty nespádajúce do intervalu 0,075 V ÷ 3,245 V (kap. 5.1.4).

⁷ Teoreticky by hodnoty U_r namerané v kroku 3. a v kroku 5. mali byť zhodné (a navyše rovnaké ako hodnota požadovaná programom na vstupe do prevodníka DAC). Reálne sa tieto hodnoty budú mierne

6. Prepínač sa vráti do zopnutej polohy. Výsledky meraní z kroku 3. a 5. sa cez terminálové rozhranie uložia do súboru.
7. Kroky 2. až 6. sa opakujú pre všetky požadované úrovne generovaného napätia U_r .

V prípade, keď je generované napätie U_r malé a je potrebné integračný kondenzátor pred samotným odmerom nabiť (nastáva v situácii, keď je zvyškové napätie U_{zv} meracieho kondenzátora C_{ADC} kladné), sú v algoritme upravené a rozšírené kroky 2. až 4. nasledovným spôsobom:

2.
 - a. Generované riadené napätie U_r nadradeného mikroradiča sa nastaví na vysokú hodnotu (napr. 3 V). Spínač sa rozopne a vykoná sa N_c odmerov ($N_c \approx 2N$), čím sa nabije integračný kondenzátor C_{int} .
 - b. Generované napätie U_r sa nastaví na požadovanú (nízku) hodnotu.
3. Do pamäte sa uložia namerané hodnoty zo všetkých kanálov nadradeného mikroradiča (hodnota napätia meraná na kladnom vstupe do nábojového zosilňovača U_r a na výstupe nábojového zosilňovača U_0).
4. Vykoná sa N odmerov.

Nadradené a podradené zariadenia nie sú vzájomne synchronizované, meracie obvody sú asynchrónne. Hoci vzorkovacia frekvencia oboch zariadení musí byť nastavená zhodne, v skutočnosti sa tieto frekvencie môžu nepatrne líšiť. Predpokladá sa však, že táto odchýlka (plynúca z použitia rôznych časovačov) je vzhľadom na požadovaný kmitočet a počet odmerov zanedbateľná. Výraznejší vplyv má asynchrónnosť zariadení na skutočný počet realizovaných odmerov. Nadradené zariadenie síce vyšle signál o rozopnutí meracieho kondenzátora a odpočíta N odmerov, avšak v okamžiku počiatku merania nie je definované, v akom stave meracieho cyklu sa práve nachádza podradené zariadenie. Podobne je to aj s ukončením merania. Preto v skutočnosti na podradenom zariadení môže prebehnúť o pár odmerov menej, prípadne viac. Pri základnom počte odmerov $N = 10000$ a predpoklade, že v skutočnosti sa tento počet môže líšiť až o ± 2 odmery, je však príslušná chyba merania zhruba 0,2 ‰, čo je vzhľadom na požadovanú presnosť meraní zanedbateľné. Počet odmerov však nesmie byť menší ako 1000; tiež platí, že čím väčší počet odmerov, tým menšia je chyba plynúca z asynchrónnosti nadradeného a podradeného zariadenia.

Výsledky meraní sú prezentované graficky. Hlavička grafu (prípadne doplnená legendou) poskytuje základné informácie o spôsobe merania, kde sa v skratke uvádza:

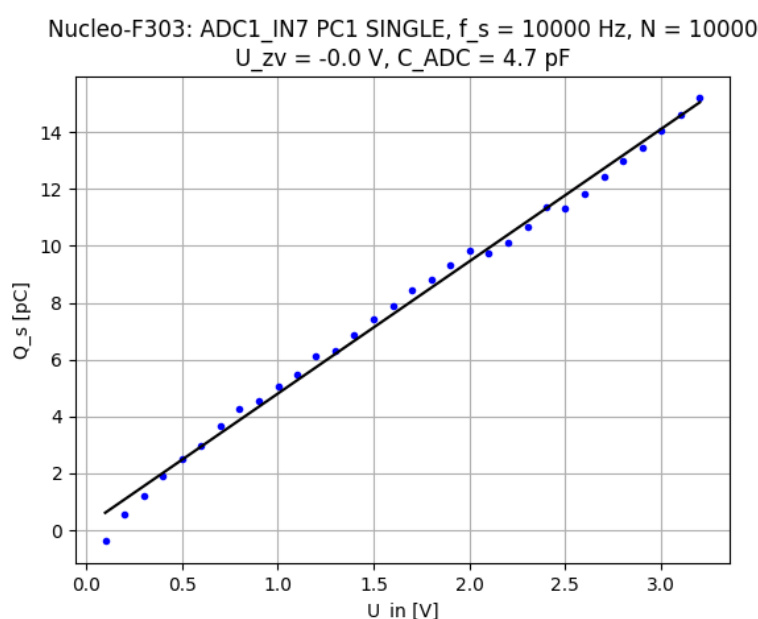
- skrátený názov meraného (testovaného) zariadenia;
- ADC prevodník a jeho kanál vrátane vyvedeného pinu, na ktorom meranie prebehlo;
- typ konfigurácie kanálov (SINGLE znamená, že bol nakonfigurovaný iba jeden kanál, a to meraný)⁸;
- vzorkovacia frekvencia f_s ;

líšiť kvôli rušeniu z okolitého prostredia, kolísaniu napät'ového zdroja, ktorý nie je ideálny, a pod. Preto je za výslednú nameranú hodnotu považovaný ich aritmetický priemer.

⁸ Popis ďalších typov merania vrátane ich označenia sa nachádza v kap. 3.8.

- počet odmerov N .

Základný graf zobrazuje odhad veľkosti náboja preneseného počas jedného odmeru Q_s v závislosti na veľkosti nameranej hodnoty generovaného napätia U_r ⁹, čiže vstupnú charakteristiku príslušného kanálu ADC prevodníka (obr. 6). Pritom sa predpokladá, že vstupné napätie u_{in} prevodníka ADC je rovné generovanému napätiu U_r , resp. že vzorkovací kmitočet f_s je dostatočne nízky, aby sa blokovací kondenzátor C_B stíhal dobíjať. Veľkosť preneseného náboja je odhadnutá s využitím rovnice (7). Keďže meranie prebiehalo pre diskkrétne hodnoty vstupného napätia, namerané hodnoty sú tiež diskkrétne (bodový graf). Tieto hodnoty môžu byť doplnené lineárnym modelom (priamkou) vychádzajúcim z rovnice (9), ktorého parametre (zvyškové napätie \hat{U}_{zv} a kapacita meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC}) sú odhadnuté z nameraných hodnôt pomocou lineárnej regresie.



Obr. 6: STM32F303RE – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC1

Hodnota skutočného zvyškového napätia U_{zv} odčítaná z nameranej charakteristiky sa od modelového odhadu \hat{U}_{zv} môže líšiť kvôli jej nelinearitám. Za zvyškové napätie U_{zv} bola zvolená posledná hodnota vstupného napätia $U_{in} = U_r$, pre ktorú bolo integrované napätie na kondenzátore C_{int} nekladné. V hlavičke grafu zobrazované hodnoty zvyškového napätia i kapacity meracieho kondenzátora sú odhady parametrov lineárneho modelu. V texte je naopak často uvádzaná skutočná hodnota vypočítaná z grafu.

Alternatívne k základnému grafu zobrazujúcemu odhad preneseného náboja počas jedného odmeru je možné zobrazovať odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} , ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru, spočítaný podľa rovnice (8). Grafy sú vizuálne rovnaké, líšia sa iba prenasobením hodnotou vzorkovacieho kmitočtu, ktorý je pre všetky body v grafe zhodný. Prúd tečúci do (resp. vytekajúci z) prevodníka ADC pri jednom odmere môže byť limitujúci pri

⁹ Nameraná generovaná hodnota sa od požadovanej hodnoty môže mierne líšiť. K značnému skresleniu dochádza pri hodnotách blízkyh nule spôsobenému výstupnou charakteristikou prevodníka DAC (kap. 5.1.4).

aplikácii meracieho prístroja pre obvody s veľkou vstupnou impedanciou. Pokiaľ by vstupný prúd nedosahoval požadovanú hodnotu vyplývajúcu z nameranej charakteristiky, výsledky meraní by boli skreslené. Limit tvoria krajné hodnoty vstupného napätia, preto pre každý model je uvedený rozsah prúdov vychádzajúci so zaokrúhlených nameraných hodnôt pre minimálnu a maximálnu hodnotu stredného prúdu¹⁰.

3.6.2 Doplnujúce sady meraní

Pre vybrané kanály jednotlivých prevodníkov ADC boli vykonané doplnujúce merania s cieľom upresniť platnosť špecifických vlastností. V prvom rade to boli merania pri vzorkovacom kmitočte $f_s = 100$ Hz použitom v aplikácii meracieho prístroja. Tieto merania boli časovo náročné, preto v základnom meraní bola použitá vyššia vzorkovacia frekvencia $f_s = 10$ kHz, ktorá by však podľa prepočtov mala byť stále dostatočne nízka na to, aby sa merací kondenzátor prevodníka a blokovací kondenzátor pri opakovaných meraniach stíhali dobíjať. Porovnaním je možné overiť, nakoľko sú výsledky základných meraní odlišné, a teda či je možné závery využiť v realizovanom meracom prístroji.

Pre vybrané kanály prevodníkov boli uskutočnené viacnásobné opakovania základných sád odmerov s rovnakými nastaveniami všetkých parametrov. Z nich bolo možné overiť stabilitu meraných hodnôt (šum), resp. vyhodnotiť rozptyl meraní a odhadnúť tak veľkosť náhodnej chyby meraní. Značnú časť náhodnej chyby tvorí rušenie z okolitého prostredia, predvážne zo zdrojov striedavého napätia elektrickej rozvodnej siete.

Pri vysokom počte odmerov vzhľadom na kapacitu integračného kondenzátora C_{int} sa môže začať výraznejšie prejavovať exponenciálne zakrivenie krivky integrovaného napätia, resp. napätie na kondenzátore sa môže blížiť do saturácie. To môže spôsobiť skreslenie odhadu strednej hodnoty prúdu resp. odhadu preneseného náboja pri jednom odmere v rovnici (7), pretože prírastok napätia pri každom ďalšom odmere nebude približne rovnaký, ale sa bude zmenšovať. Preto boli pre vybrané kanály prevodníkov ADC vykonané kontrolné merania s odlišným množstvom odmerov $N = 1000, 5000, 10000, 15000, 20000$, v prípade potreby aj iné. Porovnaním výsledkov je možné overiť, že skreslenie vzhľadom na voľbu počtu odmerov nie je významné.

Vzhľadom na to, že rozlišovacia schopnosť 12-bitových prevodníkov ADC je rádovo vyššia ako 0,1 V, boli pre vybrané kanály realizované podrobné merania s krokom generovaného riadeného napätia U_r s veľkosťou 0,01 V¹¹. Tieto merania poskytujú detailný pohľad na charakteristiku príslušného kanálu prevodníka.

¹⁰ Keďže modelom je priamka, ktorej smernica je kladná, dá sa očakávať, že minimálna hodnota stredného prúdu bude nameraná pre vstupné napätie blízke 0 V a maximálna hodnota stredného prúdu pre vstupné napätie blízke 3,3 V.

¹¹ Kvantovací krok má veľkosť 1 LSB, čo pri maximálnom napätí 3,3 V odpovedá zhruba 0,8 mV ([1], kap. 3). Rozlišovacia schopnosť v aplikácii meracieho prístroja tak je 1 mV. Pokusné merania vstupnej charakteristiky s krokom 0,001 V z hľadiska vstupných prúdov nové zásadné informácie neprinesli, preto od nich bolo kvôli vysokej časovej náročnosti upustené.

3.7 Meranie výstupnej charakteristiky prevodníka DAC

Číslicovo-analógový prevodník (DAC) nie je dostupný vo všetkých mikroradičoch STM32. Avšak tam, kde dostupný je, môže slúžiť ako generátor jednosmerného napätia požadovanej veľkosti. Navyše, pomocou prevodníka DAC je generované (programom riadené) napätie U_r , ktoré je súčasťou obvodového zapojenia potrebného na meranie vstupných charakteristík analógovo-číslcových prevodníkov (ADC) v zapojení s nábojovým zosilňovačom (kap. 3.5).

Princíp merania spočíva v tom, že sa na vstupe prevodníka DAC nastaví požadovaná číselná hodnota generovaného napätia a výstupný pin príslušného kanálu sa prepojí na vstup kanálu prevodníka ADC, ktorý generované analógové napätie opäť prevedie na číselnú hodnotu. V ideálnom prípade by vstupná číselná hodnota a výstupná číselná hodnota mali byť totožné, avšak pri realizácii merania je výsledná hodnota ovplyvnená chybami. Časť chyby merania je náhodná, spôsobená šumom prostredia, ale časť je systematická a prislúcha jednak chybe prevodníka DAC, ale tiež chybe prevodníka ADC.

Zjednodušený algoritmus merania je nasledovný:

1. Nastaví sa vzorkovací kmitočet f_s a počiatočná (minimálna) číselná hodnota vstupného riadeného napätia U_r na testovanom kanále prevodníka DAC.
2. Odčíta sa výstupná nameraná hodnota z prepojeného meracieho kanálu prevodníka ADC.
3. Nastaví nová (vyššia) hodnota vstupného napätia U_r .
4. Kroky 2. a 3. sa opakujú až kým vstupné riadené napätia U_r nedosiahne konečnú (maximálnu) hodnotu.

Vzhľadom na to, že súčasťou meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC popísaných v kapitole 3.6.1 je tiež meranie generovaného napätia U_r spĺňajúce zmienený algoritmus, je možné pre každé z týchto meraní zobrazit' výstupnú charakteristiku prevodníka DAC nadradeného mikroradiča.

3.8 Meranie vplyvu vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky prevodníkov ADC

Meranie vplyvu vedľajších kanálov v zásade prebiehalo rovnakým postupom, aký bol popísaný v kapitole 3.6.1. Podstatným rozdielom však bolo, že kým základné meranie prebiehalo na testovanom (podradenom) mikroradiči, ktorý mal nakonfigurovaný iba jeden, a to meraný kanál, v týchto meraniach boli nakonfigurované kanály tri. Vzorkovanie kanálov prebiehalo cyklicky v poradí prvý, druhý, tretí kanál. Meraný kanál bol vždy druhý v poradí, aby bolo možné premerať vplyv nielen predchádzajúceho, ale aj nasledujúceho kanálu.

Kým na meranom (druhom) kanále bolo vzorkované napätie U_r generované prevodníkom DAC testovacieho (nadradeného) mikroradiča, na prvý a tretí kanál bolo v rôznych kombináciách

pripojené konštantné napätie s veľkosťou 0 V a 3,3 V (GND a VDD)¹², prípadne ostali nepripojené (AIR). Vzájomným porovnaním nameraných charakteristík bolo možné vyhodnotiť, do akej miery sa kanály navzájom ovplyvňujú.

Pri prezentácii meraní v grafe sú použité skratky GND, VDD, AIR, pričom označenie typu merania je spojením dvoch z nich. Prvá skratka v dvojici znamená pripojené napätie na prvom kanále, druhá skratka na treťom kanále; napr. VDDGND reprezentuje meranie, kde na prvom kanále bolo 3,3 V a na treťom 0 V (tab. 1). Merané boli všetky kombinácie; navyše je v súhrnných grafoch uvedené tiež príslušné základné meranie s nakonfigurovaným iba testovaným kanálom, označené ako SINGLE.

Tab. 1: Typy meraní vzhľadom na konfiguráciu vedľajších kanálov

Typ merania	Napätie privedené na vedľajšie kanály [V]	
	predchádzajúci kanál	nasledujúci kanál
GNDGND	0,0	0,0
GNDVDD	0,0	3,3
GNDAIR	0,0	-
VDDGND	3,3	0,0
VDDVDD	3,3	3,3
VDDAIR	3,3	-
AIRGND	-	0,0
AIRVDD	-	3,3
AIRAIR	-	-

¹² Pripojenie bolo realizované prepojením vstupov prevodníka ADC s výstupmi mikroradičov, ktoré príslušné napätie poskytujú.

4 Spracovanie nameraných dát

Na spracovanie nameraných dát bol pripravený špeciálny program v jazyku *Python 3* [5]. Tento program načíta dáta zo zdrojových súborov¹³, dopočíta požadované veličiny a odhadne parametre jednoduchého náhradného lineárneho modelu s využitím nástroja *scikit-learn* [6]. Výsledky sú vykreslené do grafov, ktoré sú uložené v samostatných súboroch. Vypočítané veličiny sú taktiež zapísané do textových súborov¹⁴.

Dopočty požadovaných veličín vychádzajú zo vzťahov uvedených v kapitole 3.4. Hlavnou meranou veličinou je napätie u_{out} na odporovej deličke výstupu nábojového zosilňovača pred začiatkom a na konci série N odmerov. Táto dvojica hodnôt je meraná pre rôzne generované hodnoty vstupného napätia U_r , pre ktoré je tiež vykonané kontrolné meranie pred a po N odmeroch. Zo známych hodnôt odporovej deličky je možné dopočítať dvojicu napätí U_0 a U_N , ktoré reprezentujú dvojicu hodnôt výstupných napätí nábojového zosilňovača.

Základnými dopočítanými veličinami sú:

- veľkosť náboja preneseného vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru, označená Q_s ;
- odpovedajúca stredná hodnota prúdu tečúceho vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru pri použitej vzorkovacej frekvencii, označená I_{str} .

Tieto veličiny merané pre jeden kanál a dopočítané v závislosti na rôznych hodnotách generovaného vstupného napätia U_r (pri konštantnom vzorkovacom kmitočte f_s a nezmenených ostatných parametroch) predstavujú vstupnú charakteristiku kanálu prevodníka ADC¹⁵.

Zo vstupnej charakteristiky program odhadne parametre náhradného lineárneho modelu pomocou lineárnej regresie (metódy najmenších štvorcov) [7]. Tými sú modelový odhad kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} a modelový odhad zvyškového napätia \hat{U}_{zv} . Pritom parameter \hat{C}_{ADC} reprezentuje smernicu (strmosť) lineárneho modelu a parameter \hat{U}_{zv} je hodnota vstupného napätia, pre ktorú model pretína x-ovú os. Program následne dopočíta aj predikované hodnoty (t.j. body odpovedajúce modelovým hodnotám pre príslušné hodnoty vstupného napätia). Výsledné modelové charakteristiky sú zobrazené v grafoch spolu s vypočítanými parametrami náhradného modelu. Z opakovaných odmerov jedného kanálu program navyše umožňuje dopočítať a zobrazit tiež základné štatistické odhady strednej hodnoty a smerodajnej odchýlky nameraných hodnôt. Na uľahčenie porovnávania vstupných charakteristík prevodníka ADC bol program pripravený tak, aby bolo možné jednoduchým nastavením generovať porovnávacie grafy naprieč rôznymi parametrami merania.

¹³ Elektronická príloha, adresár /BP_DataProcessing/source_files.

¹⁴ Oboje v elektronickej prílohe, adresár /BP_DataProcessing/destination_files.

¹⁵ Obe veličiny sú z tohto pohľadu zameniteľné, pretože sa líšia iba prenasobením konštantnou hodnotou (použitou vzorkovacou frekvenciou).

5 Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC

Nastavenie parametrov meraní sa čiastočne líšilo v závislosti od typu meraného mikroradiča. Týkalo sa to hlavne nastavenia frekvencie časovačov a doby vzorkovania prevodníkov ADC. Doba vzorkovania bola kvôli dosiahnutiu čo najväčšej presnosti meraní zvolená vždy maximálna možná. Prevodníky niektorých mikroradičov umožňovali automatickú kalibráciu.

5.1 Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32F303RE

Mikroradič STM32F303RE bol pri meraniach použitý ako merací prístroj - nadradené zariadenie (*master*), preto je v prehľade uvedený ako prvý. Zároveň na ňom ako na podradenom zariadení (*slave*) prebehli detailné merania.

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

- frekvencia hodín prevodníka ADC: 72 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 601,5 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{601,5+12,5}{72} = 8,528 \mu\text{s}$.

Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{smax} = \frac{1000}{8,528} = 117,264 \text{ kHz}$.

Pred začiatkom merania bola spustená automatická kalibrácia.

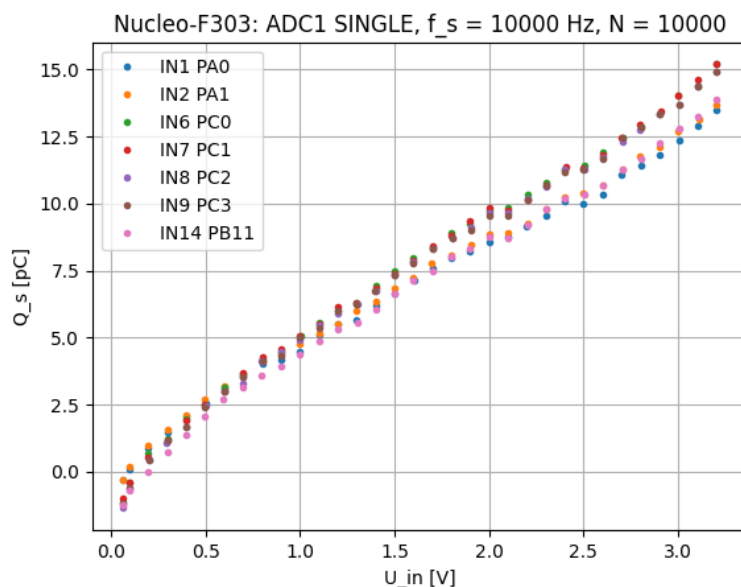
5.1.1 Základné vstupné charakteristiky jednotlivých kanálov prevodníkov ADC

Mikroradič obsahuje štyri prevodníky ADC. Základné meranie prebehlo na všetkých prevodníkoch a kanáloch, ktoré sú vyvedené na nejaký pin (obr. 7 až obr. 10).

Z porovnania výsledkov pre jednotlivé kanály prevodníka ADC1 na obr. 7 je vidieť, že namerané charakteristiky sú približne lineárne. Skupina štyroch kanálov IN6 PC0, IN7 PC1, IN8 PC2 a IN9 PC3 má charakteristiky temer totožné, z orientačných odhadov je možné povedať, že majú spoločný model, pre ktorý hodnota zvyškového napätia \hat{U}_{zv} je 0,0 V (platí tiež pre U_{zv}) a kapacita meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} je 4,6 pF¹⁶. Rozsah strednej hodnoty prúdu tečúceho prevodníkom pri jednom odmere odpovedajúci tomuto modelu pri vzorkovacom kmitočte $f_s = 10 \text{ kHz}$ je -10 nA ÷ +155 nA. Kanály IN1 PA0 a IN2 PA1 majú spoločný model so zvyškovým napätím zhruba -0,1 V a kapacitou kondenzátora mierne nižšou (4,0 pF) a kanál IN14 PB11 má model so zvyškovým napätím \hat{U}_{zv} 0,0 V (U_{zv} je 0,2 V) a kapacitou meracieho kondenzátora

¹⁶ Výrobcom udávaná hodnota je typicky 5 pF ([11], str. 133, tab. 79).

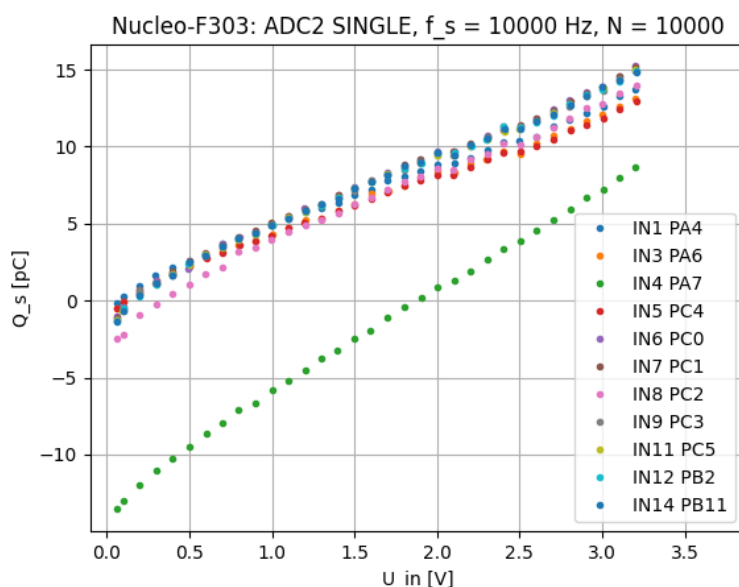
4,3 pF. Z porovnania modelov je vidieť, že aj kanály jedného prevodníka môžu mať odlišné charakteristiky¹⁷.



Obr. 7: STM32F303RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

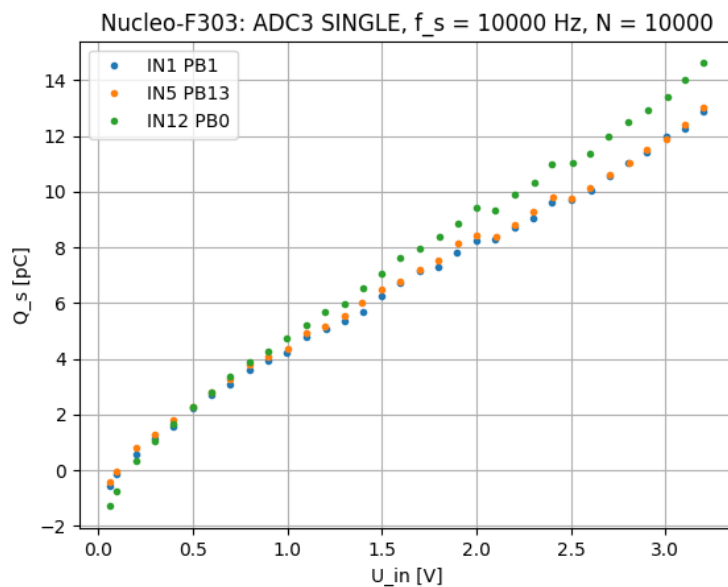
Prevodník ADC2 má vyvedených najviac kanálov, namerané charakteristiky sú uvedené na obr. 8. Opäť je vidieť, že tvarom sú približne lineárne a je možné ich tiež rozdeliť do niekoľkých skupín podobne ako pri prevodníku ADC1. Do prvej skupiny patria kanály IN1 PA4, IN3 PA6 a IN5 PC4 s odhadom kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} okolo 4,0 pF a zvyškovým napätím U_{zv} približne 0,1 V (modelový odhad \hat{U}_{zv} je -0,1 V). Najväčšiu skupinu tvoria zvyšné kanály okrem IN4 PA7, ktorých modelová kapacita meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} dosahuje 4,7 pF a zvyškové napätie \hat{U}_{zv} 0,0 V (0,3 V pre kanál IN8 PC2). Stredná hodnota prúdu tečúceho vstupom prevodníka počas jedného odmeru sa môže pohybovať v rozsahu -10 nA ÷ +155 nA pre vzorkovací kmitočet 10 kHz (s výnimkou kanálu IN8 PC2). Úplne iná charakteristika však bola nameraná pre kanál IN4 PA7, ktorého model má zvyškové napätie zhruba 1,9 V, kapacitu kondenzátora okolo 6,7 pF a rozsah strednej hodnoty prúdu -130 nA ÷ +90 nA.

¹⁷ Prevodník ADC má jeden merací kondenzátor (resp. sústavu kondenzátorov) spoločný pre všetky kanály; rozdiely v odhadoch sú spôsobené parazitnými javmi, ktoré môžu byť pre rôzne kanály odlišné. Významnosť parazitných javov je jedným z kritérií kvality prevodníka ADC.



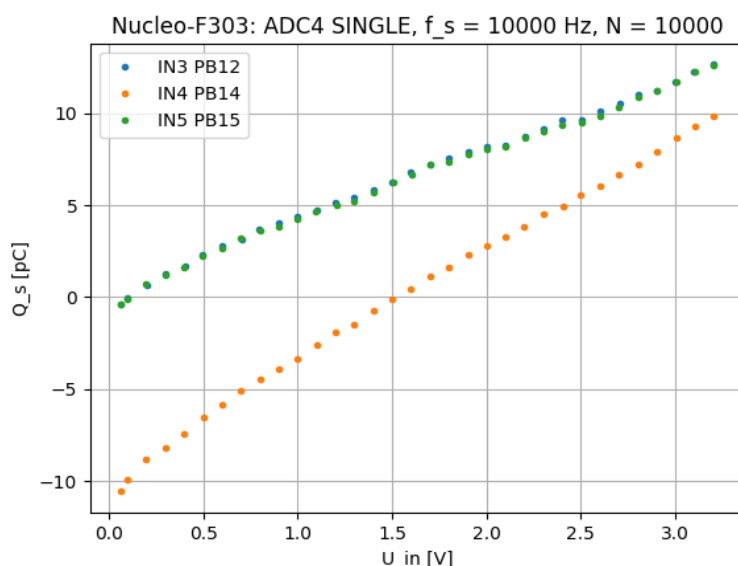
Obr. 8: STM32F303RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC2

Namerané charakteristiky pre prevodník ADC3 sú uvedené na obr. 9, pre prevodník ADC4 na obr. 10.



Obr. 9: STM32F303RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC3

Všetky charakteristiky opäť vykazujú približne lineárny priebeh a ich modely majú podobné parametre ako niektorá zo skupín na prvých dvoch prevodníkoch. Opäť sa tu vyskytla jedna výnimka, ktorou je kanál IN4 PB14 na ADC4, s modelom so zvyškovým napätím okolo 1,6 V a kapacitou meracieho kondenzátora 6,1 pF. Príslušne k tomu je posunutý aj rozsah prúdov.



Obr. 10: STM32F303RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC4

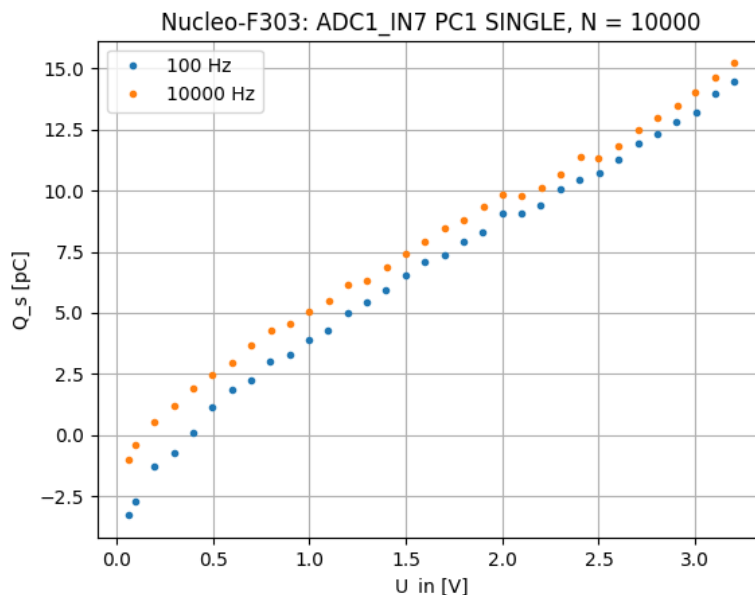
Vzhľadom na to, že kanály IN6 PC0, IN7 PC1, IN8 PC2 a IN9 PC3 prevodníka ADC1 podľa nameraných výsledkov majú približne rovnaké charakteristiky, boli tieto kanály použité v realizácii meracieho prístroja nadradeného zariadenia pri meraní ďalších mikroradičov.

5.1.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

Pre kanály IN6 PC0, IN7 PC1, IN8 PC2 a IN9 PC3 prevodníka ADC1 boli prevedené podrobnejšie a kontrolné merania. V nasledujúcom texte sú prezentované výsledky pre kanál IN7 PC1.

V prvom rade je potrebné overiť, aký vplyv má voľba vzorkovacej frekvencie f_s na prezentované výsledky. Graf na obr. 11 ukazuje, že charakteristika kanálu IN7 PC1 nameraná pri kmitočte 100 Hz je posunutá nadol oproti základnému meraniu s frekvenciou 10 kHz. To súvisí s malým nárastom zvyškového napätia \hat{U}_{zv} na hodnotu okolo 0,3 V a mierne narástla strmosť charakteristiky z 4,7 pF na 5,0 pF. Celkovo však zmena vzorkovacej frekvencie zásadné zmeny na odhade veľkosti preneseného náboja počas jedného odmeru neprinesla, preto možno považovať výsledky meraní zo základnej sady odmerov za približne platné aj pre aplikáciu meracieho prístroja so vzorkovacím kmitočtom 100 Hz.

Výrazný vplyv má voľba vzorkovacieho kmitočtu f_s na odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} tečúceho vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru. Keďže podľa vzťahu (8) je stredná hodnota prúdu priamo úmerná vzorkovacej frekvencii, bude intervalový odhad prúdu pre 100 Hz rádovo v jednotkách nA (-0,30 nA ÷ +1,45 nA) namiesto v stovkách nA (-5 nA ÷ +155 nA) pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz. To má veľký význam pre obvody s veľkou vstupnou impedanciou; objasňuje sa tým, prečo je pre merania takýchto obvodov potrebné voliť dostatočne nízku hodnotu vzorkovacej frekvencie.

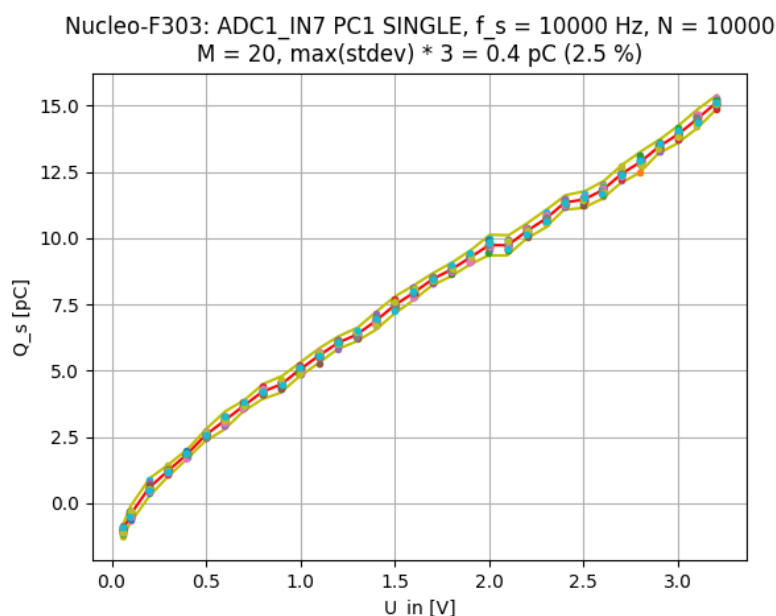


Obr. 11: STM32F303RE – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

Každý odmer je ovplyvnený rušením z okolitého prostredia. Mieru skreslenia výsledkov meraní v dôsledku náhodných vplyvov je možné posúdiť opakovaním meraní a následným štatistickým spracovaním. Najbežnejšími štatistickými odhadmi sú stredné hodnoty a smerodajné odchýlky, ktoré sú vypočítané pre každú hodnotu generovaného napätia U_r . Podrobné meranie bolo vykonané pre kanál IN7 PC1 na prevodníku ADC1 (obr. 12). Na tomto obrázku je zobrazených $M = 20$ opakovaní základnej sady odmerov, prezentovaných farebnými bodmi. Červená lomená čiara spája stredné hodnoty jednotlivých odmerov pre každé vstupné riadené napätie U_r a žlté lomené čiary ohraničujú pásmo dané trojnásobkom ich smerodajných odchýlok¹⁸. V hlavičke grafu je číselne uvedená maximálna absolútna hodnota z odhadov trojnásobku smerodajných odchýlok a v zátvorke relatívna k rozsahu priemerov nameraných hodnôt. Táto hodnota dáva predstavu, s akou optikou je potrebné sa pozerat' na jednotlivé prezentované hodnoty. Pre meraný kanál IN7 PC1 na prevodníku ADC1 má teda štandardná neistota typu A hodnotu 0,4 pC (s koeficientom rozšírenia 3), čo odpovedá 2,5 % z rozsahu náboja pretečeného počas jedného odmeru. Odpovedajúca hodnota trojnásobku maximálnej smerodajnej odchýlky pre strednú hodnotu prúdu pri vzorkovacej frekvencii 10 kHz je 4 nA (2,5 %), pričom prúdový rozsah $-5 \text{ nA} \div +155 \text{ nA}$ bol už zmenený vyššie. Z tohto dôvodu sú intervalové odhady prúdov zaokrúhľované na $\pm 5 \text{ nA}$, čo síce predstavuje dodatočné mierne rozšírenie pásma meranej neistoty, avšak zvýrazní presnosť prezentovaných výsledkov.

¹⁸ Pásmo dané trojnásobkom smerodajnej odchýlky pokrýva zhruba 99,7 % dát pri predpoklade normálneho rozdelenia pravdepodobnosti meraných dát ([9], str. 15).

Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC



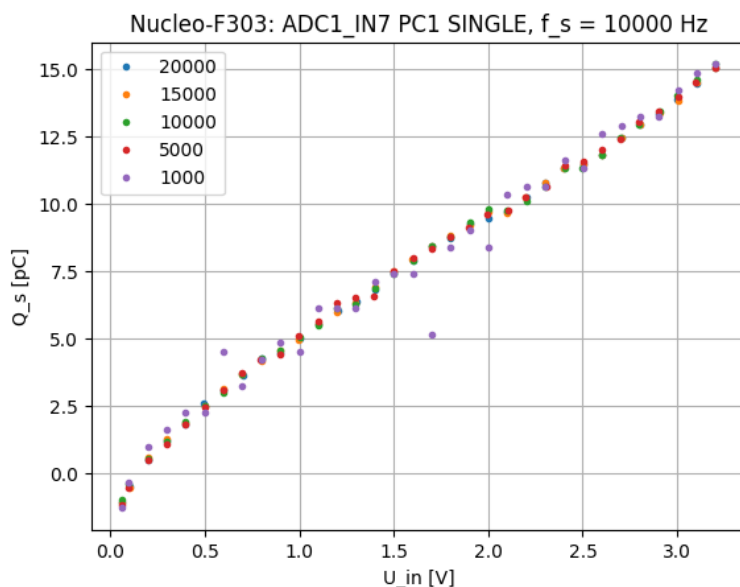
Obr. 12: STM32F303RE – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

Veľkosť napätia na integračnom kondenzátore C_{int} závisí na počte opakovaní odmerov N . Pri voľbe hodnoty N pre základné meranie bolo treba zobrať do úvahy niekoľko kritérií. V prvom rade musí byť táto hodnota dostatočne vysoká, aby bol rozptyl odhadov primerane nízky. Na druhej strane, príliš vysoká hodnota zasa výrazne predĺži čas potrebný na vykonanie odmerov a neprinesie významnejšie spresnenie odhadov. Navyše hrozí, že integrované napätie bude narastať (prípadne klesať) tak veľmi, až sa dostane do saturácie danej napájacím napätím nábojového zosilňovača.

Na obr. 13 sú zobrazené sady meraní pre kanál IN7 PC1 na prevodníku ADC1, ktoré sa líšia voľbou počtu odmerov N . Z grafu je patrné, že menší počet odmerov má za následok zväčšenie rozptylu odhadov. Odhady pre N na úrovni 1000 a 5000 vykazujú výraznejšiu volatilitu. Naopak, pre hodnoty 15000 a 20000 už významnejšie spresnenie odhadov nenastalo. Na základe toho bola pre základnú sadu meraní zvolená hodnota $N = 10000$.

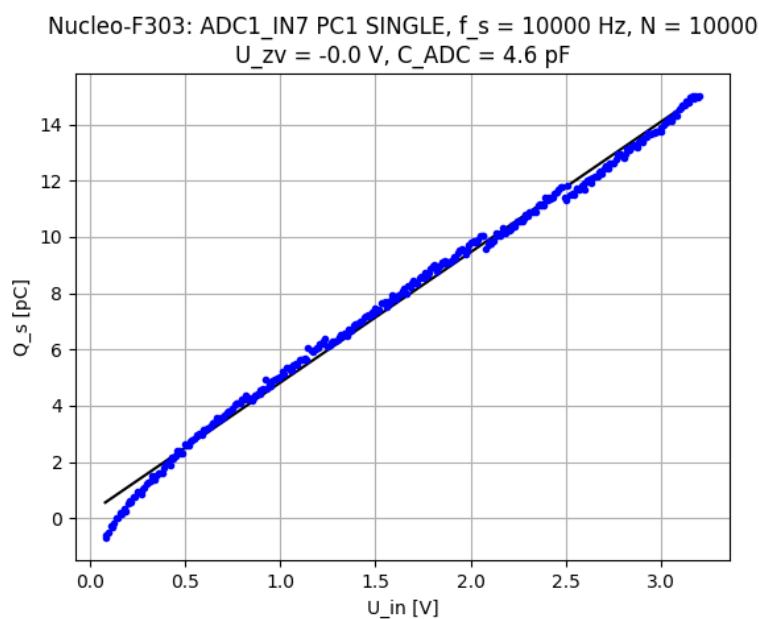
Z grafu na obr. 13 je vidieť, že namerané hodnoty sa zhruba prekrývajú, resp. nie je vidieť systematické odchýlky pre jednotlivé sady meraní s rôznym N . Na základe toho je možné usúdiť, že voľba počtu odmerov N neovplyvnila odhady množstva náboja tečúceho prevodníkom ADC počas jedného odmeru a namerané hodnoty napätia na výstupe nábojového zosilňovača nie sú skreslené nelinearitou prítomnou v oblasti saturácie.

V základnej sade meraní rastie vstupné riadené napätie U_r s krokom 0,1 V, čo poskytuje rámcový prehľad o tvare vstupnej charakteristiky príslušného kanálu prevodníka ADC. Zjemnením kroku je možné získať väčší detail, pričom je možné ísť až do veľkosti kvantovacieho kroku ADC prevodníka, odpovedajúceho jednému bitu. Na grafické znázornenie charakteristiky v celom meranom rozsahu 0 V ÷ 3,2 V však postačuje veľkosť kroku 0,01 V.



Obr. 13: STM32F303RE – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

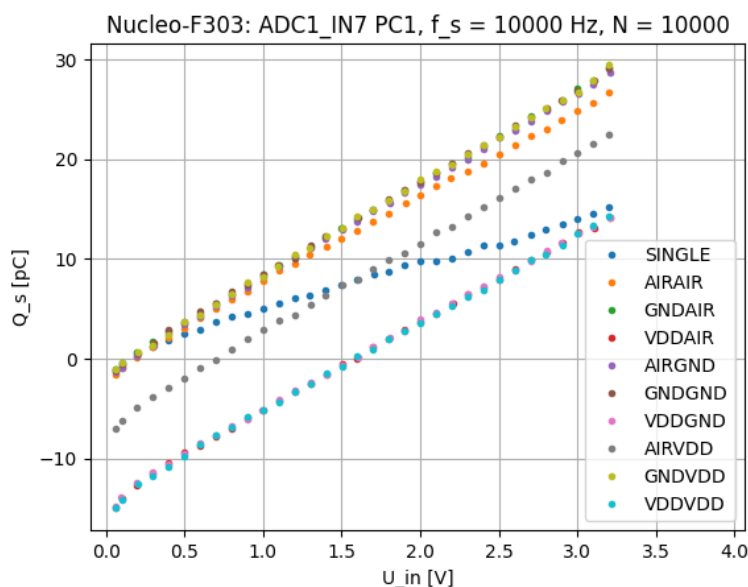
Na obr. 14 je zobrazený odhad veľkosti náboja preneseného vstupom prevodníka ADC a jeho lineárny model s krokom generovaného vstupného napätia $U_{in} = 0,01$ V pre kanál IN7 PC1 na prevodníku ADC1. Z grafu je vidieť, že charakteristika nemá hladký priebeh, ale sú na nej badateľné drobné nespojitosti, ktoré meraný rozsah delia na osem približne zhodných častí. To odpovedá v poradí tretiemu bitu (prvý bit je najviac významný, MSB). Podobné nespojitosti sú znateľné aj pri ostatných kanáloch na zvyšných prevodníkoch ADC, čo pravdepodobne súvisí s konštrukciou prevodníkov.



Obr. 14: STM32F303RE – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

5.1.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Meranie vplyvu vedľajších kanálov bolo vykonané pre kanál IN7 PC1 na prevodníku ADC1 (obr. 15). Vedľajšie kanály boli IN6 PC0 (nakonfigurovaný ako prvý v poradí) a IN8 PC2 (tretí v poradí).



Obr. 15: STM32F303RE – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Pri porovnaní jednotlivých typov meraní je vidieť, že vedľajšie kanály výrazne ovplyvňujú veľkosť preneseného náboja počas jedného odmeru. V prvom rade sa významne navyšuje sklon všetkých kriviek, čo pri odhade kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} modelu implikuje jej výrazné zvýšenie až na hodnoty 8,9 pF (prvý kanál je pripojený na 3,3 V - VDD), resp 9,4 pF (prvý kanál uzemnený - GND).

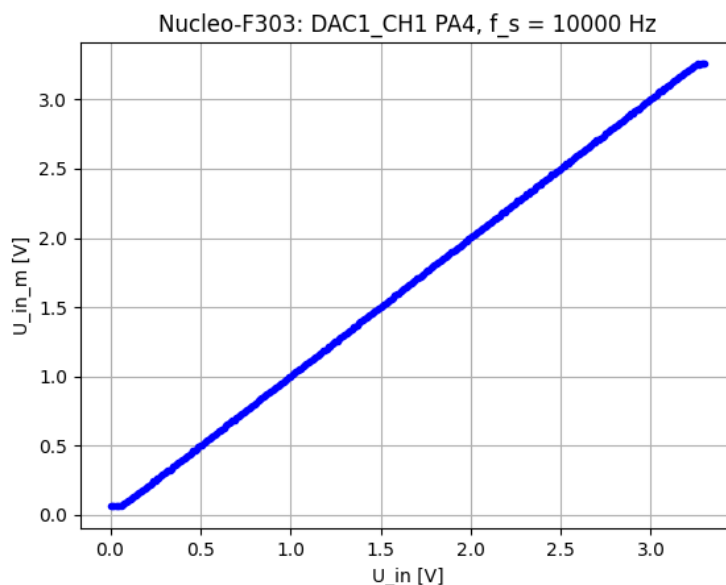
Obr. 15 ďalej ukazuje značnú citlivosť na hodnoty napätia na vedľajších kanáloch, čo sa prejavuje posunom charakteristiky, čiže zmenou zvyškového napätia \hat{U}_{zv} modelu. Najväčší posun nastal pri pripojení prvého kanálu na napätie VDD; vtedy pripojenie tretieho kanálu nehralo žiadnu rolu, všetky tri charakteristiky VDDVDD, VDDGND a VDDAIR sa prekrývajú. Orientačný odhad ich zvyškového napätia \hat{U}_{zv} je 1,6 V, čo je v polovici medzi napätím na prvom kanále a GND. To naznačuje, že merací kondenzátor sa po predchádzajúcom odmere, kde bolo pripojené napätie VDD, vybil iba do polovice. Pri pripojení prvého kanálu na GND sa zvyškové napätie oproti základnému meraniu SINGLE prakticky nezmenilo (0,1 V), opäť sa všetky tri charakteristiky GNDVDD, GNDGND a GNDAIR prekrývajú. Avšak pokiaľ je prvý kanál nakonfigurovaný, ale nepripojený (AIR), charakteristika sa posúva v závislosti na hodnote napätia pripojeného na tretí kanál. To pravdepodobne súvisí s tým, že sa pin nepripojeného kanálu chová ako anténa a môže byť citlivejší na rušenie prostredia. Súčasne je nezapojený kanál ovplyvnený napätím pripojeným na svoj predošlý kanál (pri cyklickom meraní to je práve tretí kanál).

Jednotlivé typy meraní implikujú rozdielne intervaly pre odhady strednej hodnoty prúdu I_{str} pri rovnakej vzorkovacej frekvencii f_s , ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru. Pri aplikácii viackanálového voltmetra a pri meraní obvodov s veľkou vstupnou impedanciou to znamená, že na zaistenie korektného merania v plnom rozsahu musí meraný obvod poskytnúť prúd vo veľkosti zjednotenia jednotlivých prúdových intervalov. Pre konfiguráciu kanálov podľa obr. 15 a vzorkovací kmitočet 10 kHz je interval strednej hodnoty prúdu zhruba $-145 \text{ nA} \div +295 \text{ nA}$, čo je oproti konfigurácii iba jedného kanálu (viď vyššie: $-5 \text{ nA} \div +155 \text{ nA}$) temer trojnásobne širší interval.

5.1.4 Výstupná charakteristika prevodníka DAC

Výstupná charakteristika prevodníka DAC testovacieho mikroradiča na kanále IN1 PA4 je vykreslená na obr. 16. Charakteristika je približne lineárna, avšak nie na celom meranom rozsahu. Pri podrobnejšom zobrazení je patrné systematické skreslenie hodnôt pri vstupných hodnotách blízkych 0 V na jednom konci a 3,3 V na druhom konci. Toto obmedzenie je dané prevodníkom DAC, pretože prevodník ADC je schopný zobrazit' hodnoty vrátane 0 V. Z podrobného merania vyplýva, že prevodník DAC generuje napätie U_r korektne v rozsahu približne $0,075 \text{ V} \div 3,245 \text{ V}$.

Vzhľadom na zistené intervalové obmedzenie pri generovaní programom riadeného napätia boli pri spracovaní výsledkov vylúčené dáta, ktoré boli namerané pri napätí U_r nespádajúceho do vyššie zmieneného napät'ového pásma.



Obr. 16: Výstupná charakteristika prevodníka DAC pre STM32F303RE

5.2 Vstupné charakteristiky prevodníka ADC pre STM32F411RE

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

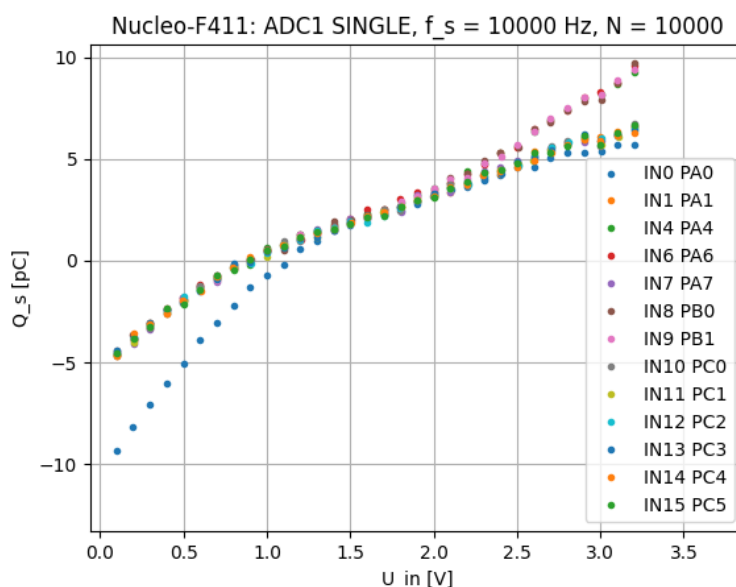
- frekvencia hodín prevodníka ADC: 72 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 601,5 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{601,5+12,5}{72} = 8,528 \mu s$.

Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{s_{max}} = \frac{1000}{8,528} = 117,264 \text{ kHz}$.

Tento prevodník nepodporuje automatickú kalibráciu.

5.2.1 Základné vstupné charakteristiky jednotlivých kanálov prevodníka ADC

Mikroradič STM32F411RE má jeden prevodník ADC1. Základné vstupné charakteristiky namerané pre všetky vyvedené kanály sú uvedené na obr. 17. Z grafu je patrné, že jeden kanál, IN0 PA0, vykazuje výrazne nelineárnu charakteristiku, keď pre hodnoty vstupného napätia U_{in} pod zhruba 1,2 V sa veľkosť preneseného náboja zalomí a je výrazne nižšia ako pri ostatných kanáloch.



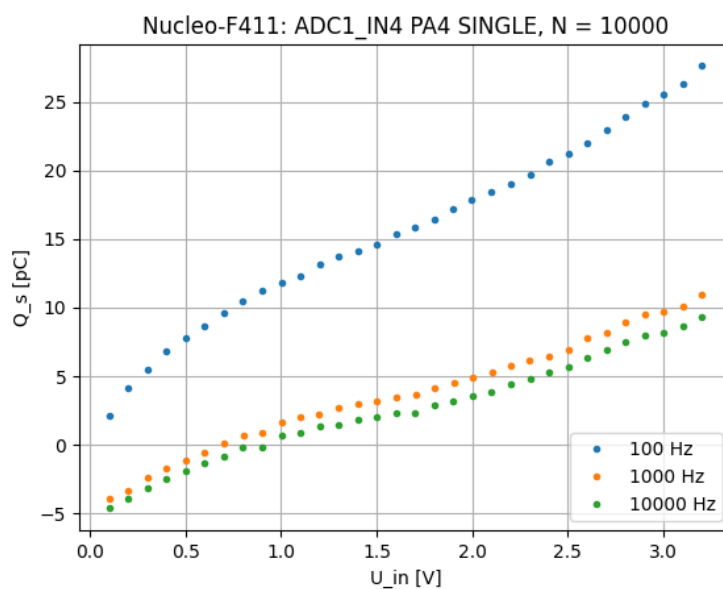
Obr. 17: STM32F411RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

Ďalej je vidieť, že namerané charakteristiky ostatných kanálov je možné rozdeliť do dvoch skupín. V prvej skupine sa nachádzajú kanály IN4 PA4, IN6 PA6, IN8 PB0 a IN9 PB1, ktorých charakteristiky je možné považovať za najbližšie svojmu lineárnemu modelu. Model má zvyškové napätie \hat{U}_{zv} zhruba 1.0 V ($U_{zv} = 0,9 \text{ V}$) a kapacita meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} má

4,1 pF¹⁹. Tomu odpovedá rozsah prúdov $-50 \text{ nA} \div +95 \text{ nA}$ pri vzorkovacom kmitočte $f_s = 10 \text{ kHz}$. Ostatné kanály spadajú do druhej skupiny, pre ktorú sa charakteristika v hornej polovici rozsahu mierne zalamuje smerom nadol. Zvyškové napätie U_{zv} tejto skupiny je tiež zhruba 0,9 V, avšak odhad kapacity meracieho kondenzátora je asi 3,3 pF a tomu prislúchajúci interval prúdov pri rovnakej frekvencii je $-50 \text{ nA} \div +70 \text{ nA}$.

5.2.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

Pre kanál IN4 PA4 z prvej skupiny boli vykonané doplnujúce sady meraní. Na obr. 18 sú znázornené merania pre rôzne vzorkovacie frekvencie f_s . Je vidieť, že kým pre kmitočty 10 kHz a 1 kHz sa charakteristika posúva iba nepatrne, pre kmitočet 100 Hz je posun charakteristiky značný a má strmější priebeh (modelový odhad kapacity \hat{C}_{ADC} je zhruba 7,2 pF). To pravdepodobne súvisí s únikovými prúdmi prevodníka. Zaujímavé je, že zvyškové napätie U_{zv} pre posledný zmieneny kmitočet je posunuté k hodnote 0 V, avšak kvôli nelinearite je zvyškové napätie modelu \hat{U}_{zv} odlišné (-0,5 V).



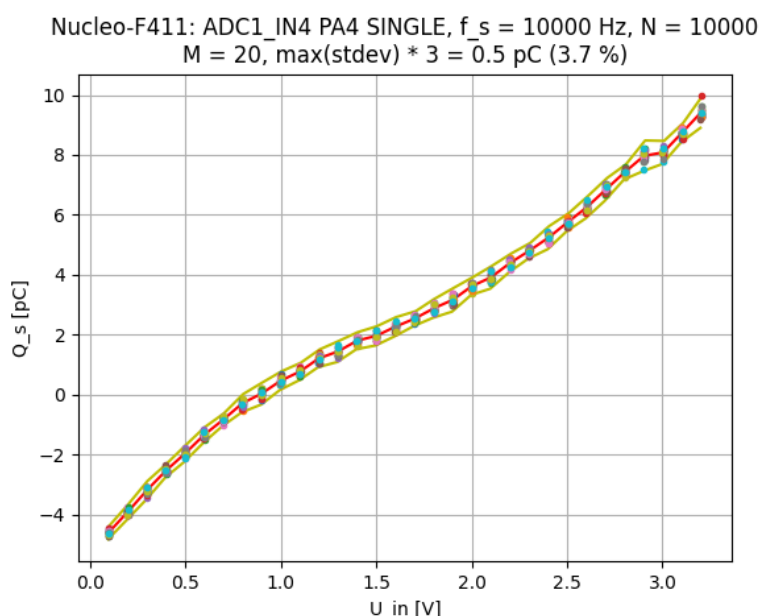
Obr. 18: STM32F411RE – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

Vzorkovacia frekvencia f_s má zásadný vplyv na odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} . Vzhľadom na nameranú charakteristiku pri použitej frekvencii sa mení intervalový rozsah prúdov. Kým pre 10 kHz je prúdové pásmo zhruba $-50 \text{ nA} \div +95 \text{ nA}$, pre 1 kHz je rádovo temer 10-krát užšie ($-4,0 \text{ nA} \div +11 \text{ nA}$). Pre vzorkovací kmitočet 100 Hz je interval prúdov zhruba $0,0 \text{ nA} \div +2,80 \text{ nA}$, pričom tu výraznejšiu rolu hraje aj väčší sklon krivky oproti predošlým dvom prípadom. Posun zvyškového napätia do nuly zasa znamená, že prúdový interval je v nezáporných hodnotách, takže náboje pri odmeroch tečú iba jedným smerom.

¹⁹ Výrobcom udávaná typická hodnota je 4 pF ([12], str. 133, tab. 65).

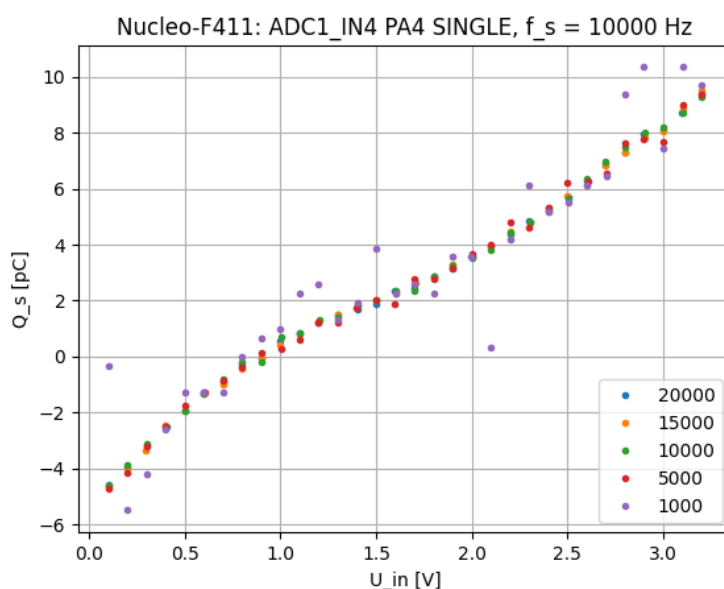
Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC

Analýza meraní z hľadiska ich ovplyvnenia náhodným rušením z okolitého prostredia ukazuje, že obojstranné pásmo štandardnej neistoty s koeficientom rozšírenia 3 nemá pre rôzne hodnoty vstupného napätia U_{in} zhruba rovnakú šírku, ale sú badať na pohľad viditeľné rozdiely (obr. 20). Napríklad pre hodnotu 2,9 V je pásmo zjavne širšie, čo navyšuje odhad maxima trojnásobku smerodajnej odchýlky na 0,5 pC. To predstavuje 3,7 % z intervalu priemerov odhadov náboja preneseného počas jedného odmeru.



Obr. 20: STM32F411RE – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

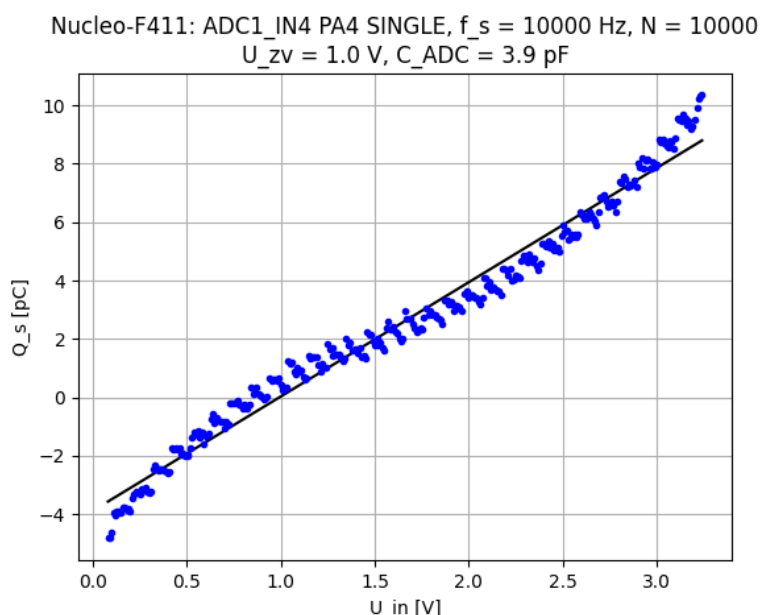
Kontrolné merania overujúce, že namerané charakteristiky nie sú systematicky vychýlené v závislosti na počte odmerov N , sú zobrazené na obr. 19. Voľba počtu odmerov 10000 je



Obr. 19: STM32F411RE – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

dostatočná vzhľadom na požadovanú presnosť odhadov. Pre 1000 odmerov je vidieť veľkú volatilitu odhadov, v menšej miere tiež pre 5000 odmerov. Naopak, počet odmerov výrazne väčší ako 10000 už významné spravenie nepriniesol.

Detailný pohľad na nameranú vstupnú charakteristiku s krokom vstupného napätia $U_{in} = 0,01$ V potvrdil, že hrubý pohľad nemusí byť vždy dostačujúci. Na obr. 21 je vidieť, že v skutočnosti je priebeh vstupnej charakteristiky kanálu IN4 PA4 značne a systematicky nespojitý; po výrazných skokoch vo veľkosti integrovaného napätia nasledujú oblasti stagnácie až slabého poklesu integrovaného napätia s rastúcou hodnotou vstupného napätia, čo je pomerne prekvapivé. Navyše, podobný priebeh bol nameraný aj na iných kanáloch, takže to súvisí s konštrukciou prevodníka ADC.

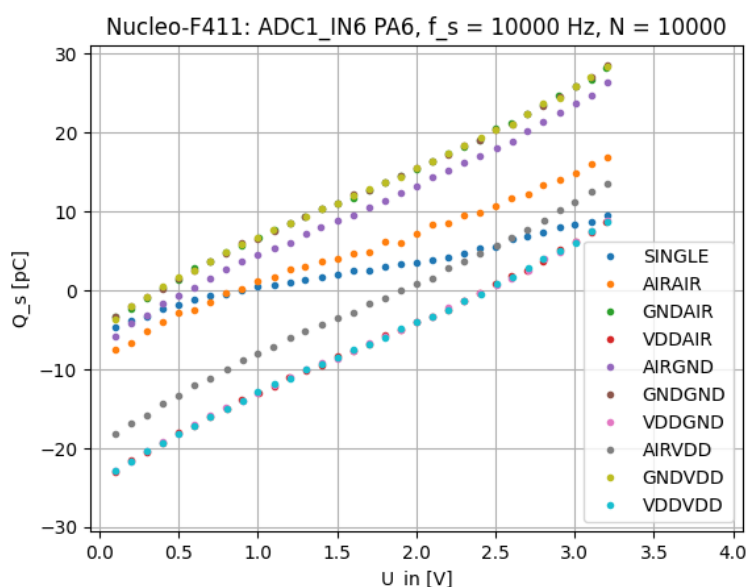


Obr. 21: STM32F411RE – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

Pri podrobnom pohľade na obr. 21 sa dá napočítať 31 skupiniek bodov, čo je zhruba na každú desatinu voltu jedna. Treba si však uvedomiť, že meranie neprebehlo na plnom rozsahu, t. j. do veľkosti maximálneho napätia 3,3 V, ale iba do 3,25 V (dôvodom boli nestabilné namerané hodnoty). Dá sa predpokladať, že chýbajúcej časti do plného rozsahu odpovedá posledná skupinka bodov, čo tvorí dohromady 32 skupiniek. Z konštrukcie prevodníka s postupnou aproximáciou to potom naznačuje, že meraný ADC prevodník vykazuje problematické nespojité chovanie pri spracovaní na úrovni od piateho bitu v poradí od MSB. Stabilita až slabý pokles hodnôt integrovaného napätia pri rastúcom vstupnom napätí v rámci jednotlivých skupiniek zasa môže byť spôsobený nepresnosťou kapacít jednotlivých meracích kondenzátorov spojených sústave, ktorá je v náhradnom modeli vstupu prevodníka nahradená jediným meracím kondenzátorom C_{ADC} .

5.2.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Pri meraní vplyvu vedľajších kanálov boli nakonfigurované tri kanály v poradí IN4 PA4, IN6 PA6, IN8 PB0, pričom testovaný kanál bol prostredný zmienený. Namerané charakteristiky pre rôzne kombinácie napätia privedeného na vedľajšie kanály sú znázornené na obr. 22. Z grafu je vidieť, že zásadný vplyv má napätie privedené na kanále predchádzajúcom ten testovaný. Pokiaľ je tento kanál uzemnený (GND), napätie na treťom kanále nie je podstatné a všetky tri merané charakteristiky majú spoločný model; podobne majú spoločný model všetky tri charakteristiky pre pripojené napätie VDD na prvom kanále. Pokiaľ je však predchádzajúci kanál nepripojený, charakteristiky sa líšia v závislosti od toho, aké napätie je pripojené na kanále nasledujúcom.



Obr. 22: STM32F411RE – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Samotný vplyv predchádzajúceho kanálu na charakteristiku testovaného kanálu naplnil očakávanie. Modely majú približne rovnakú smernicu (teda odhad kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} sa výrazne nelíši a pohybuje sa okolo 9,7 pF), mení sa odhad zvyškového napätia \hat{U}_{zv} . Kým pre uzemnený predošlý kanál má hodnotu 0,4 V, pre kanál s pripojeným napätím 3,3 V dosahuje až 2,4 V. Pokiaľ je však prvý kanál nakonfigurovaný, ale nepripojený, charakteristika testovaného druhého kanálu sa výrazne mení s tretím kanálom.

Posuny v nameraných charakteristikách majú dopad na intervaly odhadov strednej hodnoty prúdu I_{str} pri vzorkovacom kmitočte $f_s = 10$ kHz. Miernejší sklon krivky pre konfiguráciu jediného kanálu (SINGLE) implikuje užší interval (viď vyššie: -50 nA \div $+95$ nA). Pre konfiguráciu viacerých kanálov je potrebné vziať do úvahy zjednotenie všetkých nameraných charakteristík, celkovo sa stredná hodnota prúdu môže pohybovať v rozsahu zhruba -230 nA \div $+290$ nA.

5.3 Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32G431RB

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

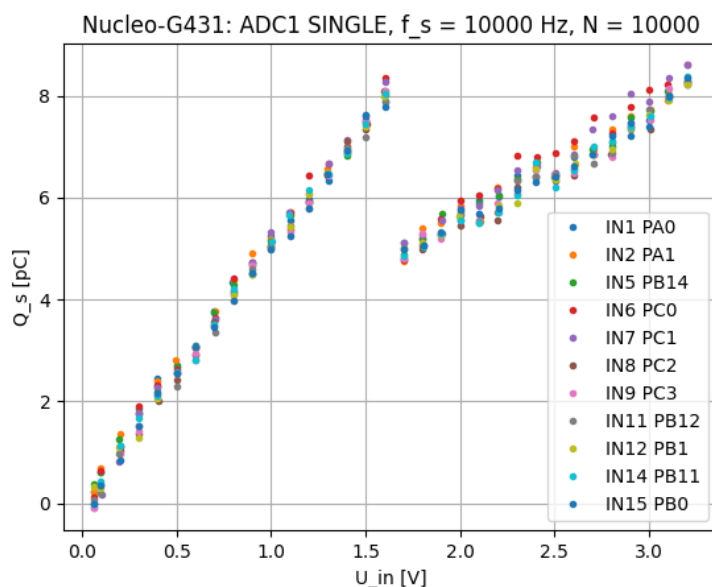
- frekvencia hodín prevodníka ADC: 42,5 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 640,5 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{640,5+12,5}{42,5} = 15,365 \mu\text{s}$.

Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{smax} = \frac{1000}{15,365} = 65,084 \text{ kHz}$.

Pred začiatkom merania bola spustená automatická kalibrácia.

5.3.1 Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC

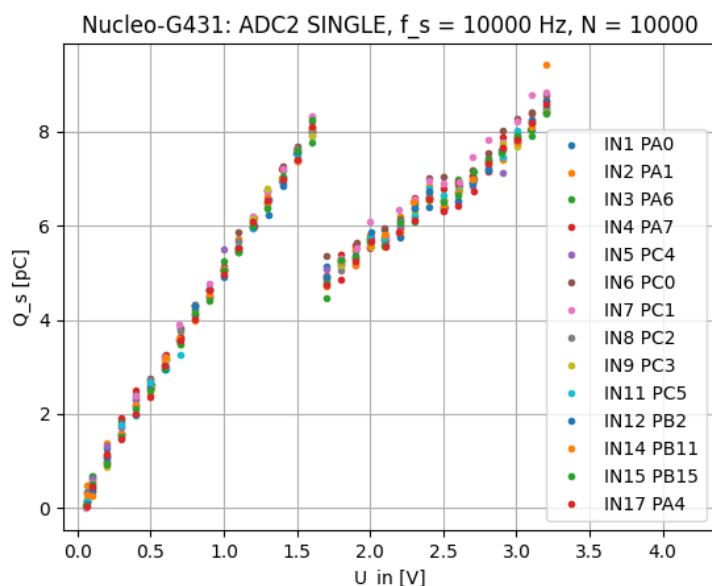
Mikroradič STM32G431RB obsahuje dva prevodníky ADC1 a ADC2, ktorých namerané základné vstupné charakteristiky sú vykreslené na obr. 23 a obr. 24. Je vidieť, že všetky charakteristiky sú si podobné, hoci s malým posunom, a to dokonca na oboch prevodníkoch. Na prvý pohľad je patrné, že zhruba v polovici (pri spresnenom meraní konkrétne pre generované vstupné napätie U_r asi 1,64 V) vykazujú výrazný posun smerom nadol, rozdeľujúc sa tak na dva približne lineárne úseky. Tieto úseky však nemajú rovnaký sklon, pre hodnoty vstupného napätia nad zlomovým bodom je sklon nižší než pred zlomovým bodom.



Obr. 23: STM32G431RB – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

Približný odhad zvyškového napätia \hat{U}_{zv} modelu je blízky 0 V pre všetky namerané charakteristiky tohto mikroradiča. Odhad modelovej kapacity meracieho kondenzátora prevodníka ADC1 je asi 2,2 pF pre celý priebeh; väčší zmysel však dáva popísať obe polovice

charakteristiky prevodníka samostatným modelom. V prvej časti je odhad C_{ADC} zhruba 5,2 pF a v druhej 2,3 pF (\hat{U}_{zv} dosahuje až -0,5 V) – merané pre kanál IN7 PC1. Pre prevodník ADC2 sú odhadnuté hodnoty podobné²⁰.



Obr. 24: STM32G431RB – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC2

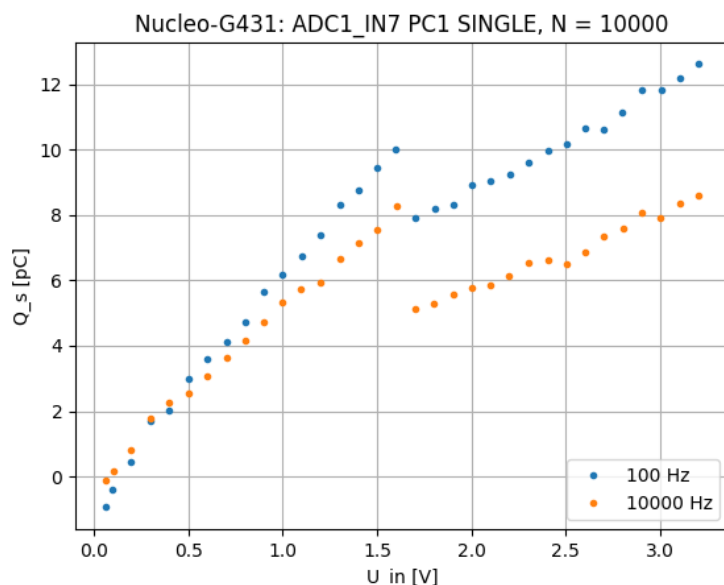
Odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} pretekajúceho vstupom prevodníka ADC sa pri frekvencii 10 kHz pohybuje v medziach $-5 \text{ nA} \div +90 \text{ nA}$ pre všetky merané kanály na oboch prevodníkoch. Toto pomerne úzke pásmo (oproti iným mikroradičom) je dôsledkom zlomu a posunu smerom nadol. Dôvody, prečo sa v charakteristikách zlom vyskytuje, nie sú jasné, ale pravdepodobne súvisia s konštrukciou prevodníka a spôsobom určenia najvýznamnejšieho bitu (MCB).

5.3.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

Doplnujúce merania boli zamerané na kanál IN7 PC1 prevodníku ADC1. Porovnanie základného merania so vzorkovacou frekvenciou 10 kHz a alternatívneho merania s frekvenciou 100 Hz je zobrazené na obr. 25.

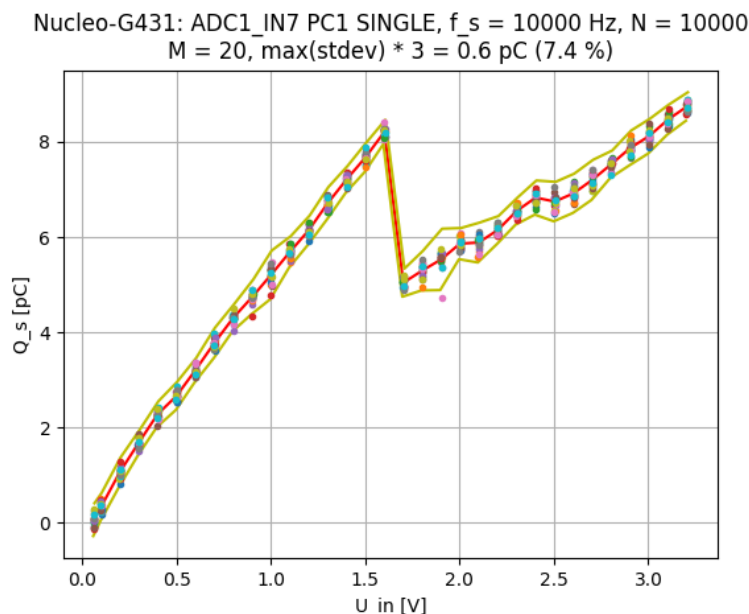
Je vidieť, že odhad zvyškového napätia sa s nízkym kmitočtom f_s príliš nezmenil, v oboch prípadoch bol zhruba 0,1 V. Zväčšila sa však strmosť oboch častí charakteristiky, čo by mohlo súvisieť s únikovými prúdmi prevodníka ADC. Pre nízke hodnoty vstupného napätia sa zvýšil odhad kapacity meracieho kondenzátora modelu \hat{C}_{ADC} z 5,2 pF na 6,9 pF, pre vysoké hodnoty zasa z 2,3 pF na 3,1 pF. Odpovedajúci rozsah strednej hodnoty prúdu sa zmení z pôvodného pásma $-5 \text{ nA} \div +90 \text{ nA}$ pri 10 kHz na $-0,1 \text{ nA} \div +1,3 \text{ nA}$ pri 100 Hz.

²⁰ Výrobcom udávaná hodnota je typicky 5 pF (vid' [10], str. 119, tab. 60).



Obr. 25: STM32G431RB – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

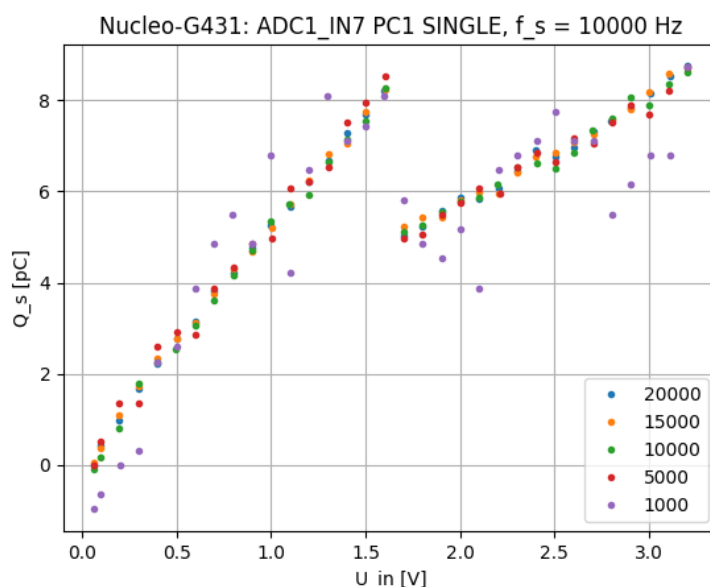
Opakovanie základného merania ($M = 20$) pre kanál IN7 PC1 ukázalo, ako sú namerané hodnoty ovplyvnené náhodným rušením (obr. 26). Maximálna nameraná štatistická odchýlka pre veľkosti náboja preneseného vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru prenásobená koeficientom rozšírenia 3 je približne 0,6 pC, čo odpovedá 7,4 % z rozsahu preneseného náboja.



Obr. 26: STM32G431RB – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

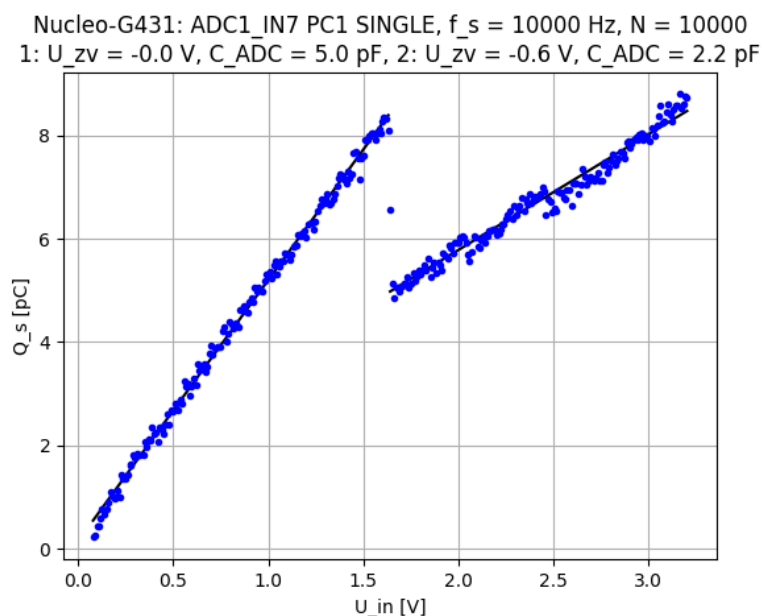
Merania s rôznym počtom opakovaní odmerov N , zobrazené na obr. 27, ukázali, že základná voľba počtu odmerov 10000 je vhodná, pretože pre vyšší počet odmerov už nenastane zásadné spresnenie meraní, avšak pre nižší počet odmerov sú odhady viac volatilné. Súčasne nie sú viditeľné žiadne systematické ochýlky jednotlivých meraní.

Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC



Obr. 27: STM32G431RB – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

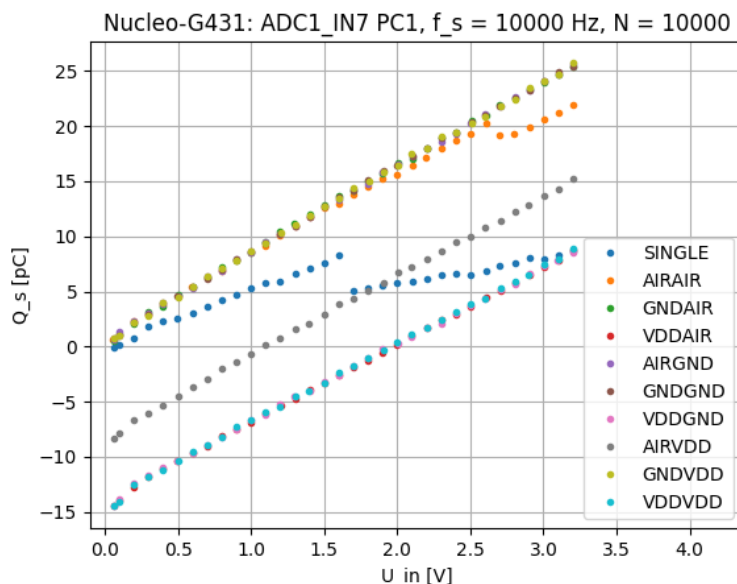
Nameraná vstupná charakteristika kanálu IN7 PC1 s menším krokom vstupného napätia $U_{in} = 0,01$ V je vykreslená na obr. 28. Z grafu je vidieť, že namerané hodnoty v oboch častiach vykazujú výrazne lineárny priebeh, hoci hlavne v druhej časti je badateľný nepatrne schoditý priebeh odpovedajúci v poradí tretiemu najvýznamnejšiemu bitu. To podobne ako pri ostatných mikroradičoch zrejme súvisí s nepresnosťou jednotlivých prvkov v meracej sústave kondenzátorov prevodníka ADC.



Obr. 28: STM32G431RB – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

5.3.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Ovplyvnenie meraní z vedľajších kanálov bolo analyzované na kanále IN7 PC1 prevodníka ADC1; predchádzajúci (prvý v poradí) kanál bol IN6 PC0 a nasledujúci IN8 PC2 (obr. 29).



Obr. 29: STM32G431RB – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Z nameraných údajov je patrné, že nakonfigurovanie ďalších kanálov malo vplyv na zvýšenie strmosti charakteristík meraného kanálu, čo zrejme súvisí s parazitnými javmi medzi kanálmi. Zásadný je však fakt, že tieto charakteristiky už v svojej polovici nevykazujú pokles, pokiaľ je na predošlom kanále pripojené nejaké napätie. Posuny medzi jednotlivými typmi meraní dopadli podľa očakávaní, keď je zrejme, že veľkosť náboja preneseného vstupom meraného kanálu je závislá na napätí na predchádzajúcom kanále. Pokiaľ je prvý kanál uzemnený (GND), zvyškové napätie \hat{U}_{zv} je 0,0 V, pokiaľ je pripojený na napätie 3,3 V (VDD), zvyškové napätie sa zvýši na približne 2,0 V. Ak je predchádzajúci kanál nepripojený (AIR), charakteristika sa mení podľa kanálu nasledujúceho (pri konfigurácii troch kanálov tretí kanál je zároveň predchádzajúci kanál prvého kanálu).

Celkový interval odhadov strednej hodnoty prúdu I_{str} pretekajúceho vstupom prevodníka ADC pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz je zjednotením prúdových intervalov jednotlivých charakteristík. Pre kanál IN7 PC1 prevodníka ADC1 vychádza približne $-145 \text{ nA} \div +260 \text{ nA}$ (pre meranie SINGLE to bolo $-5 \text{ nA} \div +90 \text{ nA}$, čo je zhruba štyrikrát užšie pásmo).

5.4 Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32L476RG

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

- frekvencia hodín prevodníka ADC: 80 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 640,5 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{640,5+12,5}{80} = 8,163 \mu s$.

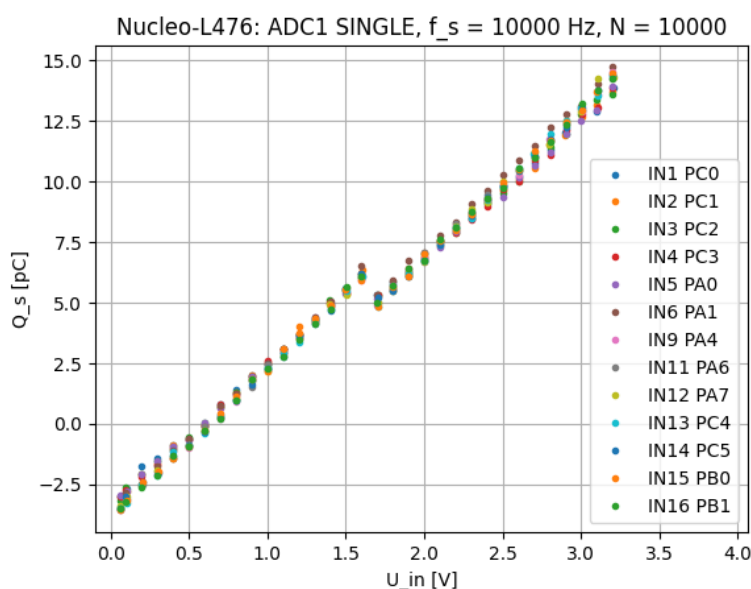
Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{s_{max}} = \frac{1000}{8,163} = 122,511 \text{ kHz}$.

Pred začiatkom merania bola spustená automatická kalibrácia.

5.4.1 Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC

Mikroradič STM32L476RG obsahuje tri prevodníky ADC s kanálmi vyvedenými na piny, pričom všetky dostupné kanály prevodníkov ADC1 a ADC2 sú spoločné. Tiež štyri vyvedené kanály prevodníku ADC3 sú spoločné s predchádzajúcimi dvoma prevodníkmi.

Prehľad základných nameraných vstupných charakteristík prevodníka ADC1 je zobrazený na obr. 30.

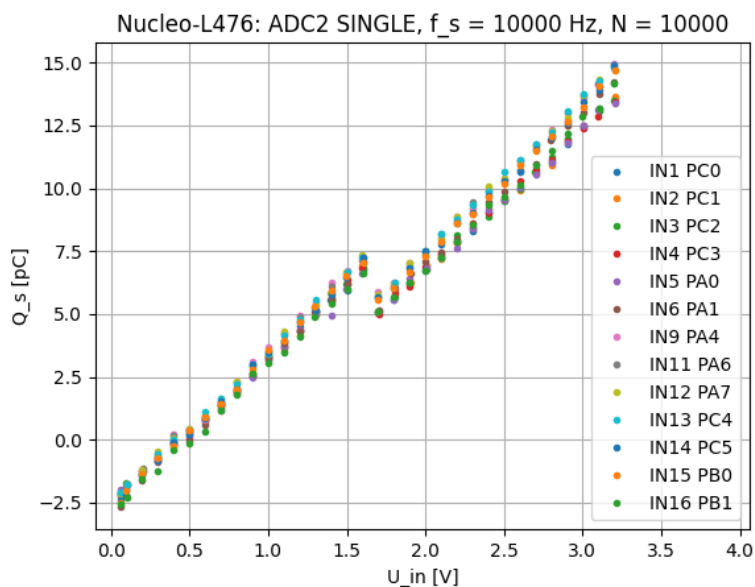


Obr. 30: STM32L476RG – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

Podobne, namerané základné charakteristiky pre prevodník ADC2 sú vykresené na obr. 31.

Tvar všetkých charakteristík je obdobný, keď v blízkosti hodnôt vstupného napätia U_{in} okolo 1,65 V je patrný značný pokles veľkosti preneseného náboja. Tento zlom rozdeľuje charakteristiky na dve prakticky lineárne časti. Odhad zvyškového napätia U_{zv} sa pre prevodník

ADC1 pohybuje v blízkosti 0,6 V, pre ADC2 okolo 0,4 V, čo pri podrobnom skúmaní značí, že prvá časť charakteristík prevodníku ADC1 sa nachádza mierne pod príslušnými časťami charakteristík prevodníku ADC2. Druhé časti sa pre oba prevodníky prekrývajú (hoci aj tu niektoré ležia mierne vyššie než iné). Vďaka tomu je možné povedať, že na prevodníku ADC1 majú charakteristiky menší zlom než na prevodníku ADC2.



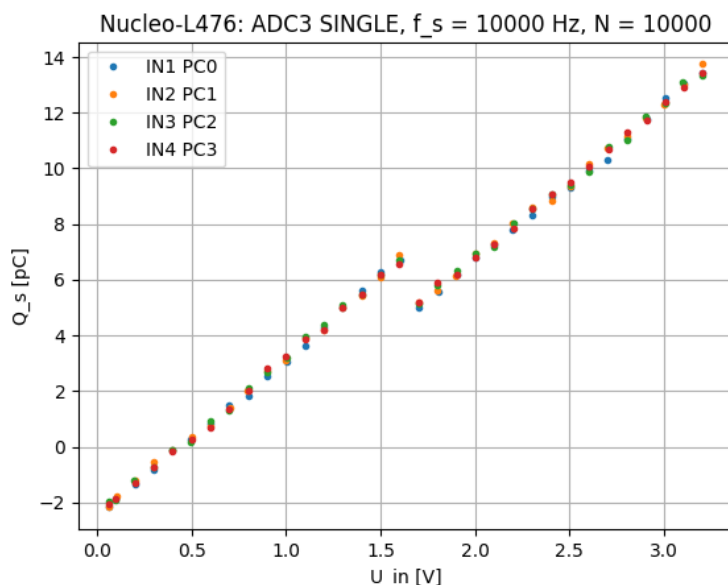
Obr. 31: STM32L476RG – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC2

Zlom v inak lineárnych charakteristikách umožňuje popísať obe časti charakteristík samostatnými modelmi. Pre prevodník ADC1 je pre prvú časť odhad zvyškového napätia \hat{U}_{zv} približne 0,6 V a kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} zhruba 6,2 pF pre všetky kanály²¹. Pre druhú časť sa mierne zvyšuje napätie \hat{U}_{zv} na 0,8 až 0,9 V (závisí na kanále), smernica modelu však zostáva rovnaká ako v prvej časti. Prevodník ADC2 má v prvej časti kanály s modelovou charakteristikou s parametrami \hat{U}_{zv} okolo 0,4 V a \hat{C}_{ADC} v dvoch skupinách s hodnotami zhruba 5,8 pF a 6,1 pF. V druhej časti je zvyškové napätie modelu 0,8 V a kapacita opäť v dvoch skupinách pri hodnotách 5,6 pF a 6,0 pF.

Namerané charakteristiky prevodníka ADC3, vykreslené na obr. 32, môžu byť popísané rovnakými modelmi ako charakteristiky prevodníku ADC2.

Vzhľadom na to, že sú modely vstupných charakteristík všetkých prevodníkov veľmi podobné, je podobný aj rozsah strednej hodnoty prúdov I_{str} , ktoré pretekajú vstupom prevodníka počas jedného odmeru pri použitej vzorkovacej frekvencii $f_s = 10$ kHz. Pre väčšinu kanálov je to -25 nA ÷ $+140$ nA, ale niektoré (tie s väčším sklonom) majú prúdový rozsah až -35 nA ÷ $+150$ nA.

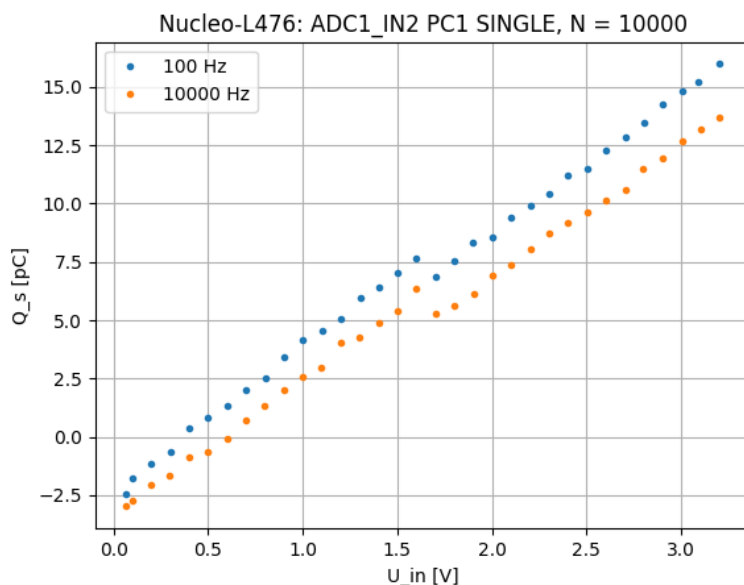
²¹ Výrobcom udávaná typická hodnota je 5 pF ([13], str. 177, tab. 76).



Obr. 32: STM32L476RG – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC3

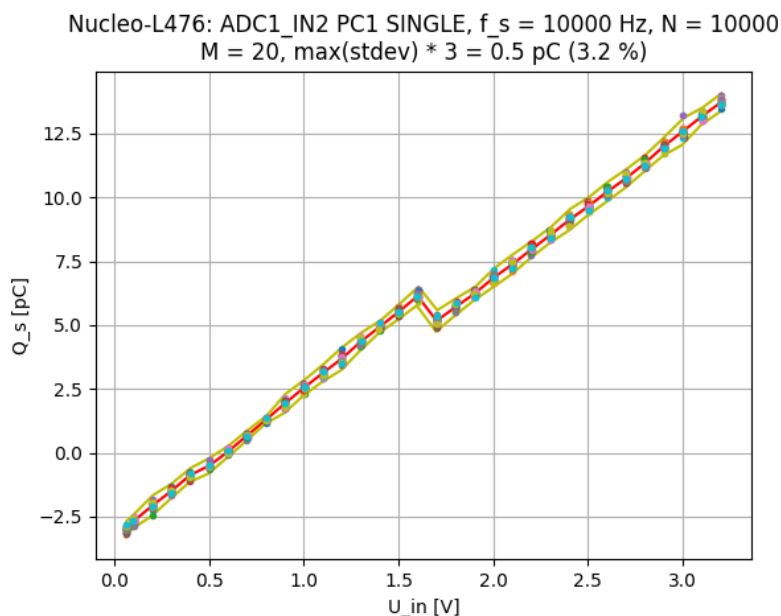
5.4.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

Doplnkové merania, poskytujúce detailný pohľad na namerané hodnoty, boli prevedené pre kanál IN2 PC1 na prevodníku ADC1. V prvom rade je to overenie platnosti modelu pre základnú sadu meraní ($f_s = 10$ kHz) aj pre vzorkovací kmitočet $f_s = 100$ Hz, ktorý je použitý pri realizácii jednoduchého meracieho prístroja. Z obr. 33 je vidieť, že namerané charakteristiky sú skutočne veľmi podobné, hoci nižší kmitočet mierne znižuje zvyškové napätie U_{zv} z hodnoty 0,6 V na 0,3 V, čím sa celá charakteristika posunie smerom nahor. Rozdiel v odhade modelovej kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} je v oboch častiach iba mierne väčší pri frekvencii 100 Hz. V dôsledku toho je interval odhadov strednej hodnoty prúdu I_{str} pre túto frekvenciu (-0,25 nA ÷ +1,6 nA) takmer stokrát užší než obdobný interval odhadnutý pre frekvenciu 10 kHz (-30 nA ÷ +140 nA).



Obr. 33: STM32L476RG – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

Rušenie náhodnými vplyvmi, resp. štatistická odchýlka odmerov, je získaná z $M = 20$ opakovaní základnej sady odmerov pre kanál IN2 PC1 na prevodníku ADC1 (obr. 34). Odhadnutá maximálna smerodajná odchýlka z meraní pre jednotlivé vstupné napätia U_{in} , rozšírená koeficientom 3, dosahuje 0,5 pC, čo odpovedá 3,2 % z celého rozsahu nameraných hodnôt preneseného náboja počas jedného odmeru.

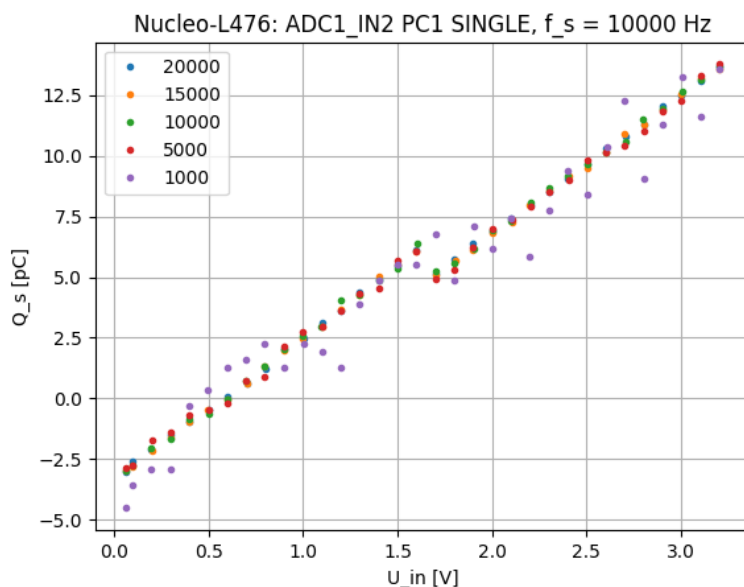


Obr. 34: STM32L476RG – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

Overenie, že merania nie sú systematicky ovplyvnené voľbou počtu odmerov $N = 10000$, je uvedené na obr. 35, kde sú spoločne zobrazené merania pre rôzne hodnoty N . Je vidieť, že

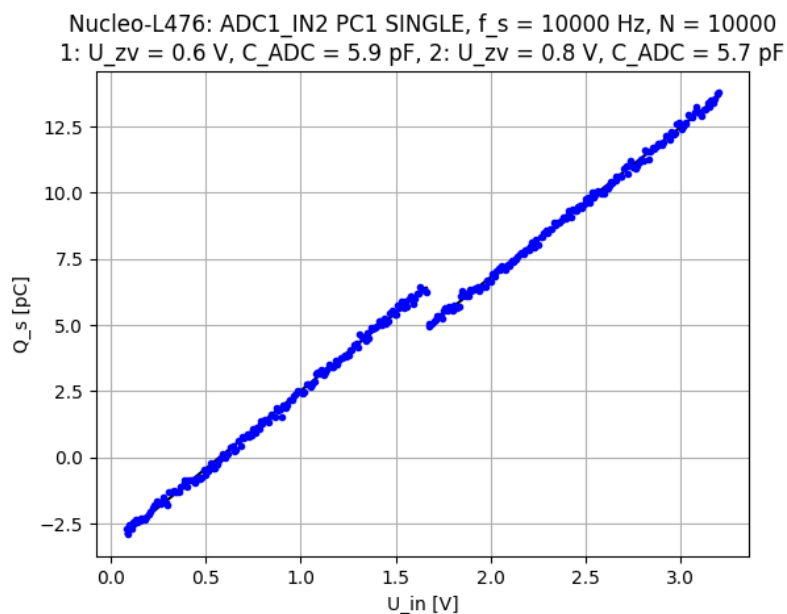
Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC

základná voľba počtu odmerov je primeraná, keď pre nižšie hodnoty sa zvyšuje nepresnosť odhadov, avšak vyššie hodnoty už významné spresnenie nepriniesli.



Obr. 35: STM32L476RG – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

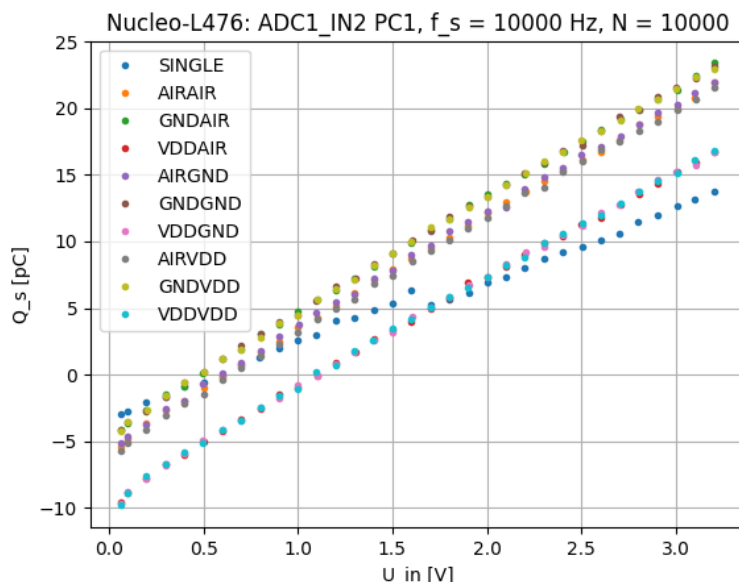
Podrobnejší pohľad na vstupnú charakteristiku prináša meranie s krokom vstupného napätia $U_{in} = 0,01$ V. Na obr. 36 je vidieť, že obe časti charakteristiky sú približne lineárne, naviac v grafe nie sú patrne ďalšie výraznejšie narušenia linearitu modelu okrem už vyššie zmieneného prepadu v polovici rozsahu vstupného napätia.



Obr. 36: STM32L476RG – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

5.4.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Meranie vplyvu vedľajších kanálov bolo vykonané pre kanál IN2 PC1 prevodníku ADC1, vedľajšie kanály boli IN1 PC0 (predchádzajúci, resp. prvý v poradí) a IN3 PC2 (nasledujúci, resp. tretí v poradí). Porovnanie nameraných charakteristík pre rôzne kombinácie napätí privedených na vedľajšie kanály je vykreslené na obr. 37.



Obr. 37: STM32L476RG – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Z grafu je vidieť, že strmosť charakteristík s nakonfigurovanými viacerými kanálmi je vyššia ako pre konfiguráciu iba jediného kanálu (SINGLE), čo naznačuje prítomnosť parazitných javov medzi nimi. Tieto charakteristiky ale nevykazujú zlom. Odhad kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} sa zvýšil na zhruba 8,6 pF. Podľa očakávania, na veľkosť preneseného náboja má vplyv predchádzajúci kanál. Pokiaľ je uzemnený (GND), namerané charakteristiky majú odhad zvyškového napätia U_{zv} približne 0,5 V, kdežto charakteristiky s napätím 3,3 V na predchádzajúcom kanále majú spoločný model so zvyškovým napätím zhruba 1,1 V. Pomerne blízke sú aj charakteristiky s nezapojeným predchádzajúcim kanálom (AIR), čo pri ostatných mikroradičoch nebolo pozorované. Naznačuje to, že ovplyvňovanie meraní prostredníctvom nezapojených kanálov je oproti iným mikroradičom viac obmedzené.

Celkový intervalový odhad strednej hodnoty prúdu I_{str} pretekajúceho vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru pri vzorkovacej frekvencii $f_s = 10$ kHz je zjednotením rozsahu prúdov odpovedajúcich všetkým charakteristikám a nadobúda hodnôt -100 nA \div $+235$ nA, čo je zhruba dvojnásobok oproti konfigurácii iba jediného kanálu (-30 nA \div $+140$ nA).

5.5 Vstupné charakteristiky prevodníkov ADC pre STM32F446RE

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

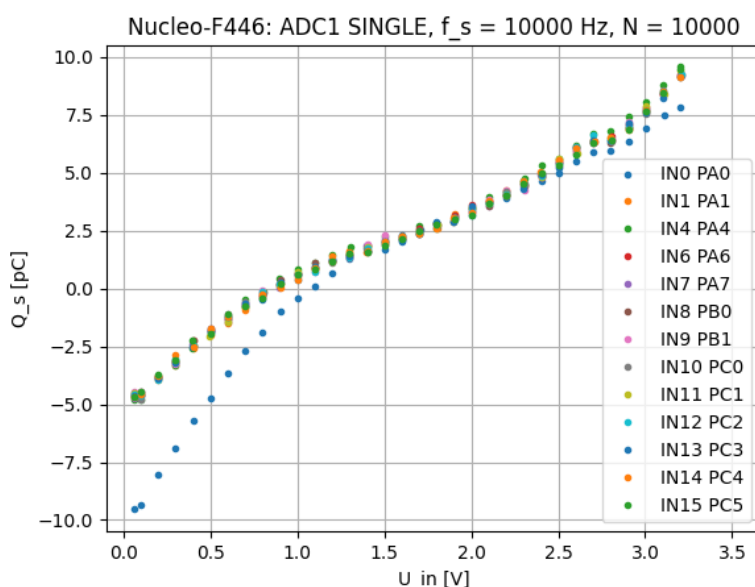
- frekvencia hodín prevodníka ADC: 22,5 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 480 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{480+12,5}{22,5} = 21,889 \mu\text{s}$.

Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{smax} = \frac{1000}{21,889} = 45,685 \text{ kHz}$.

Tento prevodník nepodporuje automatickú kalibráciu.

5.5.1 Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC

Mikroradič STM32F446RE má tri prevodníky ADC, na ktorých bola vykonaná základná sada meraní. Na obr. 38 sú vykreslené namerané hodnoty náboja preneseného vstupom prevodníka počas jedného odmeru pre vyvedené kanály prevodníka ADC1.



Obr. 38: STM32F446RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

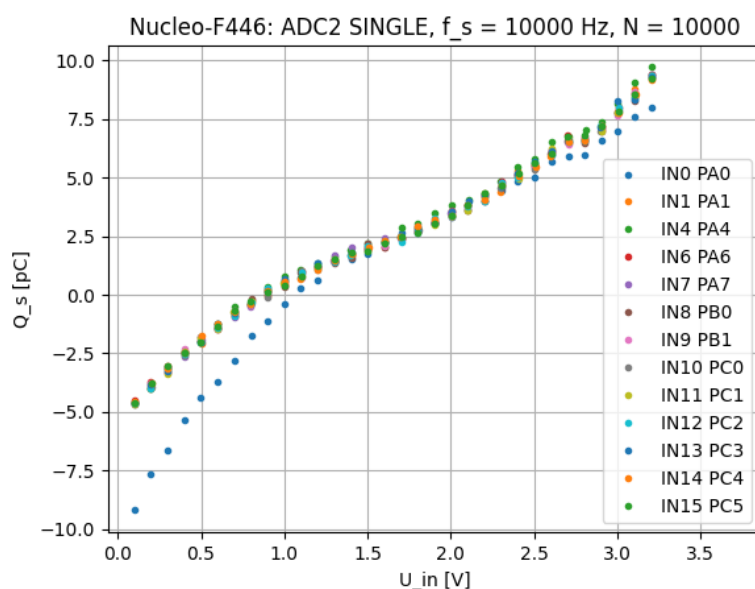
Z grafu je vidieť, že všetky merané kanály s výnimkou IN0 PA0 majú približne rovnakú vstupnú charakteristiku, ktorá môže byť popísaná spoločným modelom s približným odhadom zvyškového napätia \hat{U}_{zv} okolo 1,0 V (U_{zv} je asi 0,8 V) a odhadom kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} zhruba 3,9 pF²². Samotný tvar charakteristík je mierne zvlnený, pričom pre hodnoty vstupného generovaného napätia U_{in} blízke 0 V a tiež 3,2 V je ich sklon väčší, a naopak,

²² Typická hodnota udávaná výrobcom je 4 pF ([14], str. 139, tab. 74).

pre hodnoty v okolí 1,6 V je sklon menší. Odpovedajúci rozsah stredných hodnôt prúdu I_{str} tečúceho vstupom prevodníka je $-50 \text{ nA} \div +100 \text{ nA}$ pri vzorkovacej frekvencii $f_s = 10 \text{ kHz}$.

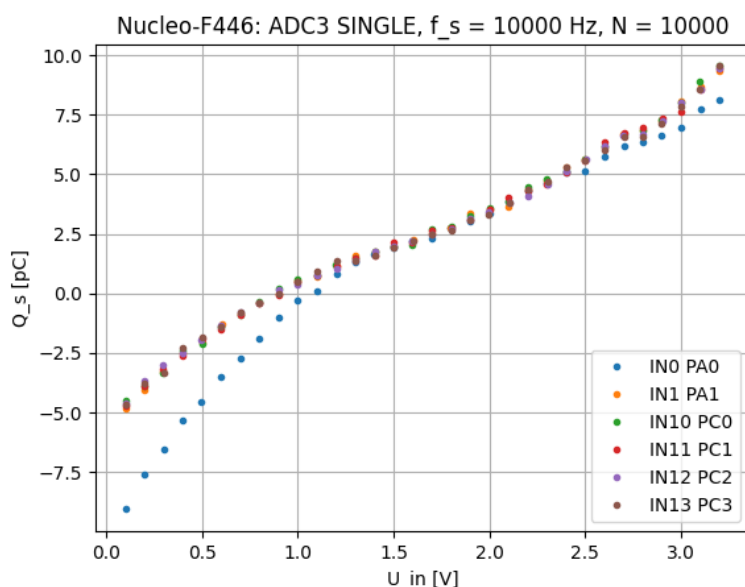
Kanál IN0 PA0 prevodníka ADC1 vykazuje nelineárnu charakteristiku, kde sa zvlášť pre nižšie vstupné napätia výrazne zvyšuje jej sklon. Zvyškové napätie je zhruba 1,0 V (modelové \hat{U}_{zv} až 1,4 V) a kapacita meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} asi 5,0 pF, čomu odpovedá široký interval stredných hodnôt prúdu ($-100 \text{ nA} \div +80 \text{ nA}$).

Kanály prevodníka ADC2 na tomto mikroradiči sú vyvedené na rovnaké vstupy ako pre prevodník ADC1 a majú aj rovnaké označenie. Namerané charakteristiky sú znázornené na obr. 39. Tieto charakteristiky sa zásadne nelíšia od svojich ekvivalentov na prevodníku ADC1, a dá sa povedať, že s výnimkou kanálu IN0 PA0 tiež zdieľajú rovnaký model.



Obr. 39: STM32F446RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC2

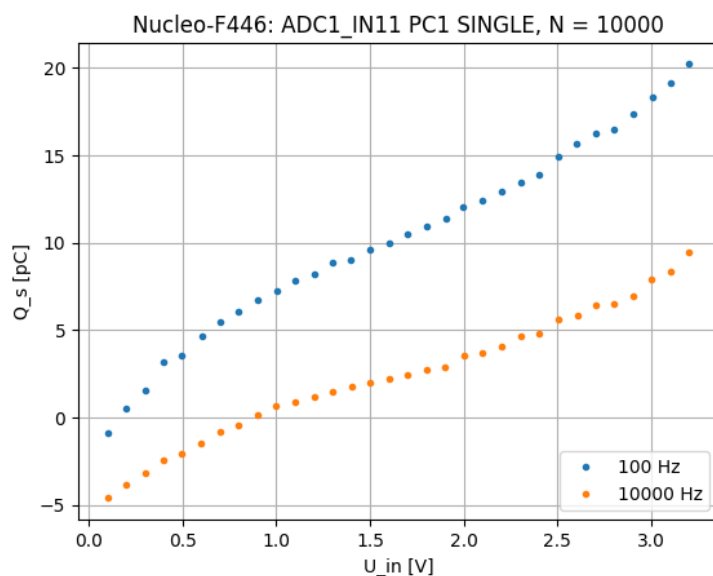
Prevodník ADC3 má vyvedených menej kanálov ako predošlé prevodníky, inak ale platí to isté, čo pre prevodník ADC2. Namerané vstupné charakteristiky majú spoločný model, ktorý je rovnaký ako modely pre prevodníky ADC1 a ADC2 (obr. 40). Výnimkou je opäť kanál IN0 PA0. Tento kanál má na všetkých troch prevodníkoch približne rovnakú charakteristiku, ktorá je nelineárna, a preto nie je vhodný pre využitie v aplikácii meracieho prístroja.



Obr. 40: STM32F446RE – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC3

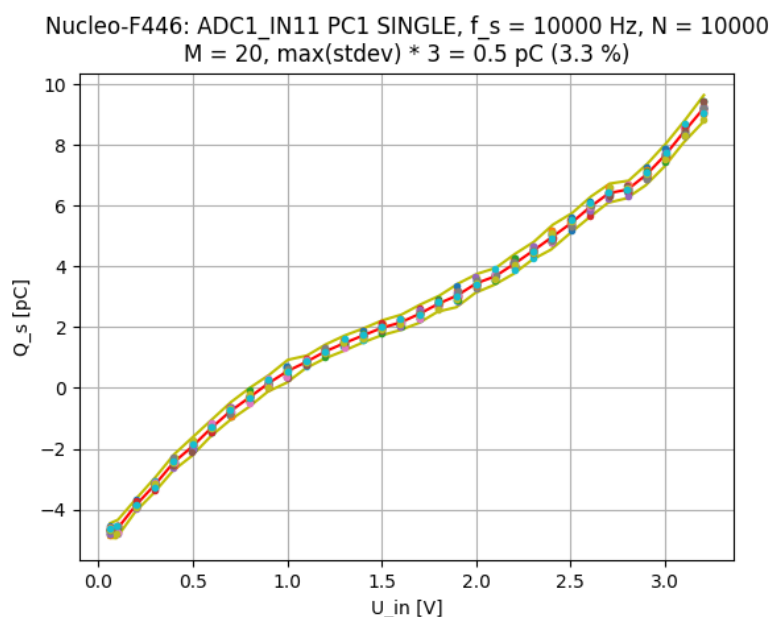
5.5.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

Rozšírené merania boli prevedené pre kanál IN11 PC1 prevodníka ADC1. Porovnanie pre rôzne vzorkovacie frekvencie f_s je uvedené na obr. 41. Pre nižší kmitočet 100 Hz sa nameraná charakteristika posúva smerom nahor a mierne sa zvyšuje jej sklon, v dôsledku čoho je odhad zvyškového napätia zhruba 0,1 V a kapacity meracieho kondenzátora 6,0 pF. Interval stredných hodnôt prúdov I_{str} je približne $-0,25 \text{ nA} \div +2,05 \text{ nA}$.



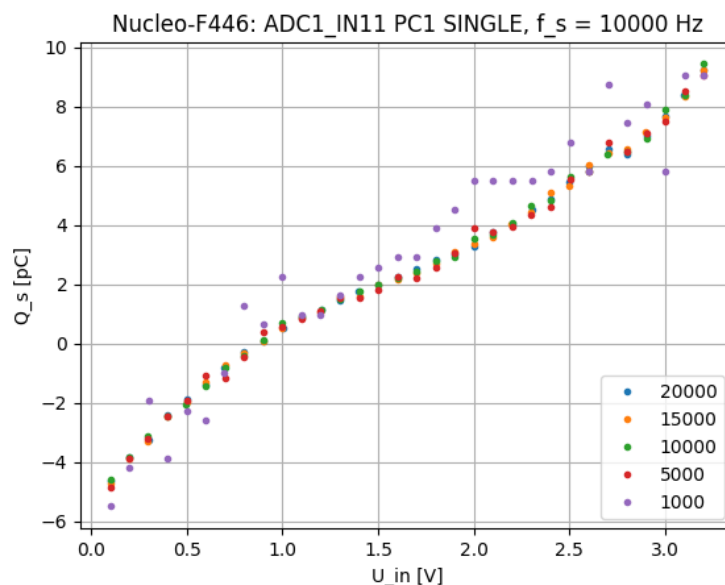
Obr. 41: STM32F446RE – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

Opakovanie základnej sady meraní pre kanál IN11 PC1 prevodníka ADC1 a výsledky následného štatistického spracovania sú zobrazené na obr. 42. Maximálna absolútna smerodajná odchýlka prenášená koeficientom 3 je zhruba 0,5 pC, čo odpovedá 3,3 % z rozsahu meraných hodnôt.



Obr. 42: STM32F446RE – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

Overenie vplyvu závislosti nameranej charakteristiky kanálu IN11 PC1 pre rôzne hodnoty počtu odmerov N je uvedené na obr. 43.



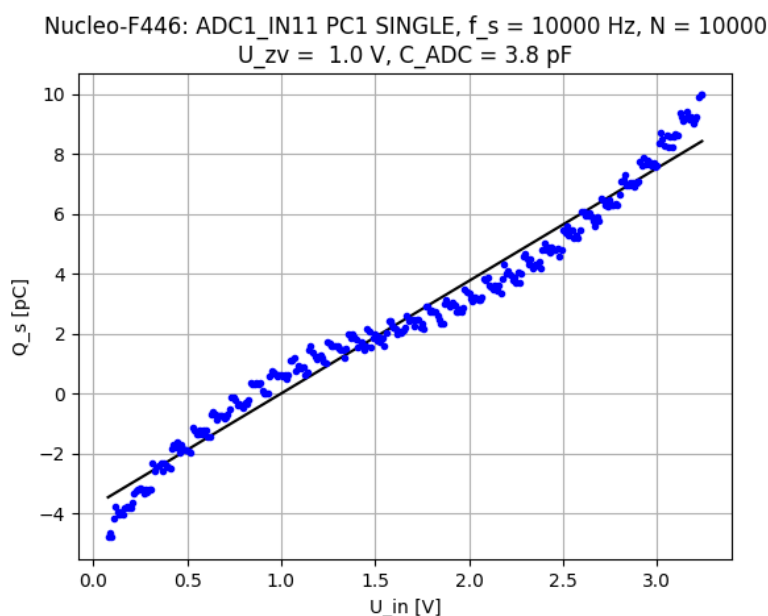
Obr. 43: STM32F446RE – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

Je vidieť, ako s klesajúcim N narastá volatilita odhadov. Ukazuje sa, že voľba počtu odmerov 10000 je vhodná na získanie dostatočne presných odhadov; nižší počet odmerov (1000, 5000) by

Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC

vhodný nebol, keďže špeciálne pre 1000 odmerov je badať dokonca systematické vychýlenie charakteristiky smerom nahor.

Detailný pohľad na tvar nameranej charakteristiky pre kanál IN11 PC1 s menším krokom generovaného vstupného napätia U_{in} poskytuje obr. 44. Je vidieť, že charakteristika nie je ideálna, keďže na úrovni od piateho bitu v poradí od najvýznamnejšieho (MSB) vykazuje výrazné nespojitosti, ktoré ju rozdeľujú na 32 úsekov. V jednotlivých úsekoch je charakteristika dokonca klesajúca. Podobné vlastnosti má meraná vstupná charakteristika mikroradiča STM32F411RE.

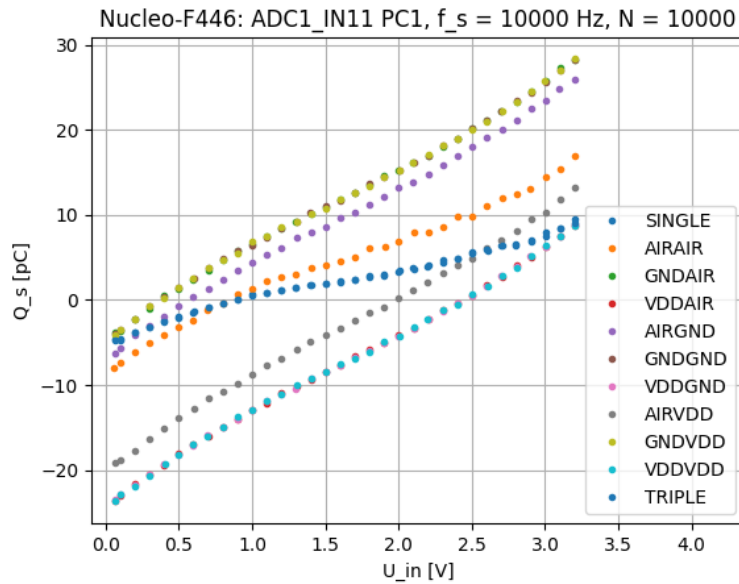


Obr. 44: STM32F446RE – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

5.5.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Meranie prebiehalo opäť na kanále IN11 PC1 prevodníka ADC1. Nakonfigurované vedľajšie kanály boli IN10 PC0 (predchádzajúci) a IN12 PC2 (nasledujúci). Namerané vstupné charakteristiky pre rôzne kombinácie napätí privedených na vedľajšie kanály sú vykreslené na obr. 45.

Výsledky sú obdobné ako pri iných mikroradičoch. Meraný kanál ovplyvňuje napätie privedené na predchádzajúci kanál; všetky charakteristiky s uzemneným predchádzajúcim kanálom (GND) sa prekrývajú bez ohľadu na to, aké napätie je na kanále nasledujúcom. Podobne sa prekrývajú namerané charakteristiky pre napätie 3,3 V privedené na predchádzajúci kanál (VDD). Nezapojený nakonfigurovaný predchádzajúci kanál (AIR) však má rôzne charakteristiky v závislosti na kanále nasledujúcom (kanál nasledujúci po meranom kanále je súčasne kanál, ktorý sa pri cyklických odmeroch vzorkuje pred predchádzajúcim kanálom). Preto nie je vhodné nechávať kanály nezapojené.



Obr. 45: STM32F446RE – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Tvar charakteristík pre definované napätie privedené na predchádzajúci kanál je približne lineárny so zhruba rovnakým sklonom (odhad kapacity meracieho kondenzátora je rádovo 9,7 pF), avšak odlišným zvyškovým napätím \hat{U}_{zv} . Pre merania GNDxxx je zvyškové napätie okolo 0,3 V, pre VDDxxx až 2,4 V. Sklon charakteristiky s nakonfigurovaným iba jedným kanálom (SINGLE) je výrazne menší (viď vyššie: odhad 3,9 pF). Celková šírka pásma stredných hodnôt prúdu pretekajúceho vstupom prevodníka počas jedného odmeru pre rôzne kombinácie vstupných napätí pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz ($-240 \text{ nA} \div +285 \text{ nA}$) je preto niekoľkonásobne širšia než pre jediný kanál.

5.6 Vstupné charakteristiky prevodníka ADC pre STM32G031K8

Pri meraniach boli použité tieto základné nastavenia:

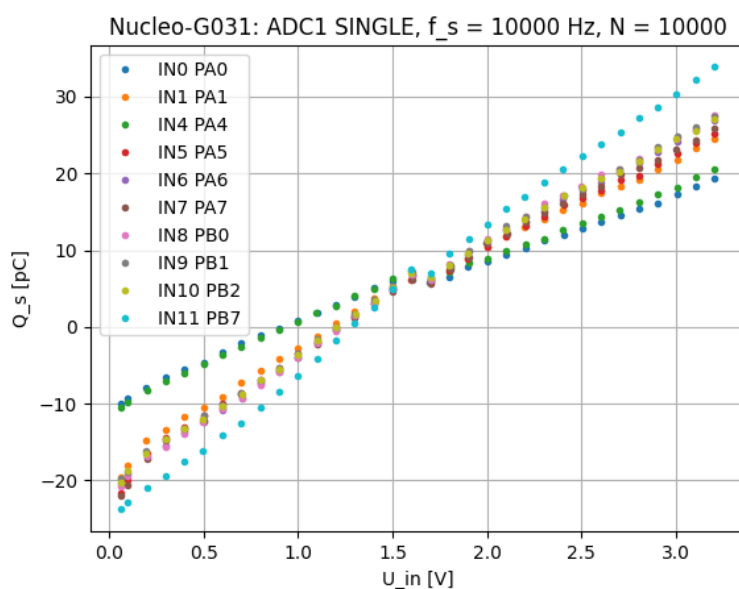
- frekvencia hodín prevodníka ADC: 32 MHz;
- doba sledovania signálu (maximálna): 160,5 hodinových cyklov;
- doba konverzie (12 bitov): 12,5 hodinových cyklov;
- celková doba konverzie: $t_{conv} = \frac{160,5+12,5}{32} = 5,406 \text{ } \mu\text{s}$.

Maximálna vzorkovacia frekvencia: $f_{smax} = \frac{1000}{5,406} = 184,971 \text{ kHz}$.

Pred začiatkom merania bola spustená automatická kalibrácia.

5.6.1 Základné vstupné charakteristiky kanálov prevodníka ADC

Mikroradič STM32G031K8 má jeden prevodník ADC; základné merania vstupných charakteristík jeho kanálov sú uvedené na obr. 46. Všetky charakteristiky majú obdobný tvar – v polovici pri napätí zhruba 1,65 V vykazujú mierny zlom smerom nadol, inak sú v oboch častiach približne lineárne. Druhá časť (pre väčšie vstupné napätia) pritom vykazuje nepatrne menší sklon oproti prvej časti.



Obr. 46: STM32G031K8 – porovnanie vstupných charakteristík prevodníka ADC1

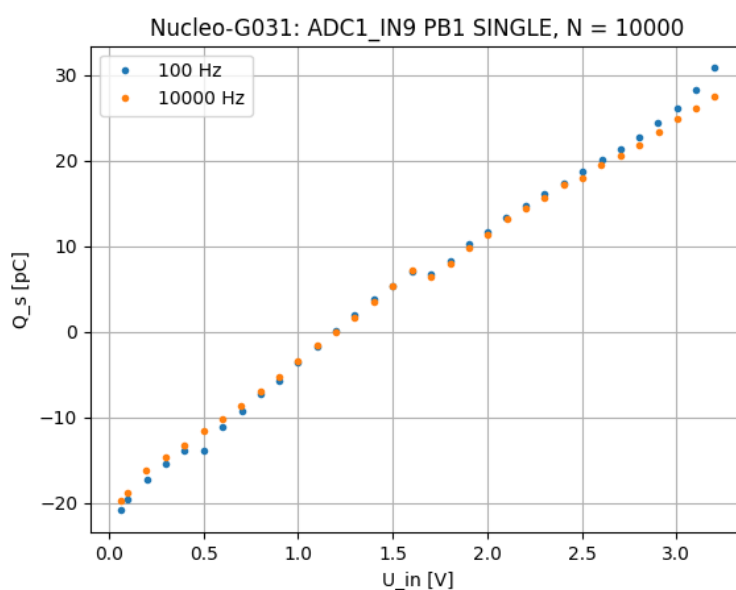
Namerané vstupné charakteristiky je možné nahrubo rozdeliť do troch skupín podľa parametrov lineárnych modelov, ktorými môžu byť popísané. Do prvej skupiny patria kanály IN0 PA0 a IN4 PA4, ktorých lineárny model má najmenší sklon. Približný odhad zvyškového napätia \hat{U}_{zv} je 1,0 V a odhad kapacity meracieho kondenzátora modelu \hat{C}_{ADC} je zhruba 9 pF. Do druhej skupiny sa dá zaradiť väčšina kanálov prevodníka ADC s modelom so zvyškovým napätím 1,3 V a kapacitou kondenzátora približne 14,8 pF. Samostatnú skupinu tvorí kanál IN11 PB7, ktorého odhad kapacity meracieho kondenzátora modelu dosahuje až 18,6 pF pri zvyškovom napätí 1,3 V²³.

V dôsledku veľkej strmosti nameraných vstupných charakteristík prevodníka ADC sú aj intervaly odhadov strednej hodnoty prúdu I_{str} prechádzajúcich vstupom pri jednom odmere a základnej vzorkovacej frekvencii $f_s = 10$ kHz pomerne široké. Pre model prvej skupiny kanálov je odhadované pásmo prúdov -105 nA \div $+205$ nA, pre model druhej skupiny rádovo -210 nA \div $+270$ nA a pre poslednú skupinu (jeden kanál) s modelom s najväčšou strmosťou až -240 nA \div $+340$ nA.

²³ Výrobcom udávaná typická hodnota je 5 pF ([15], str. 78, tab. 57).

5.6.2 Doplnujúce merania vstupných charakteristík prevodníka ADC

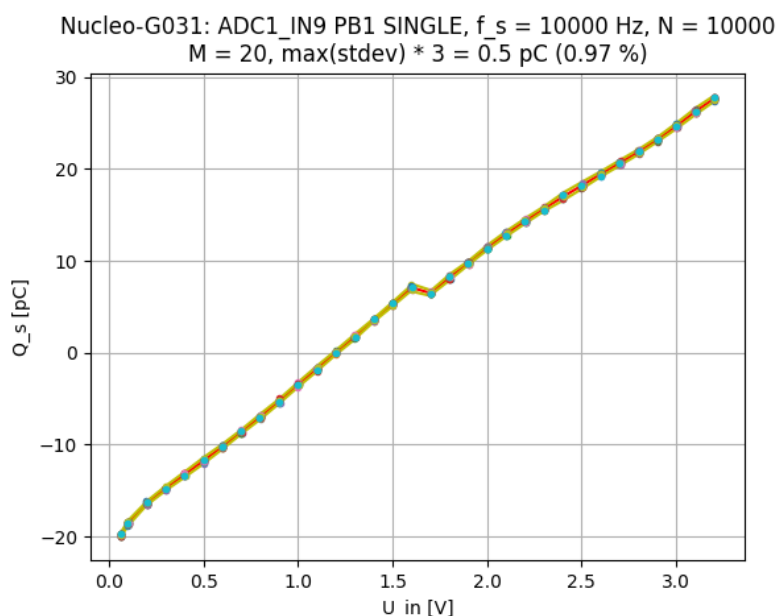
Doplnujúce merania boli vykonané pre kanál IN9 PB1. Na obr. 47 je zobrazené porovnanie nameraných charakteristík pre tento kanál pri vzorkovacom kmitočte základnej sady odmerov ($f_s = 10$ kHz) a pri vzorkovacom kmitočte 100 Hz použitom pri realizácii meracieho prístroja. V tomto prípade sa namerané charakteristiky prakticky prekrývajú, mierne rozdiely je vidieť pri vstupných napätiach blízkyh 0 V a 3,3 V. Na základe toho je možné povedať, že vyššia vzorkovacia frekvencia je dostatočná na to, aby sa dosiahli kvalitatívne obdobné výsledky odmerov ako pri nižšej vzorkovacej frekvencii. Výrazný rozdiel však je v odhade intervalu strednej hodnoty prúdov pretekajúcich vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru, ktorý je pri kmitočte 100 Hz ($-2,1$ nA \div $+3,1$ nA) o dva rády užší než pri frekvencii 10 kHz (-200 nA \div $+275$ nA).



Obr. 47: STM32G031K8 – vstupné charakteristiky jedného kanálu pri rôznych frekvenciách

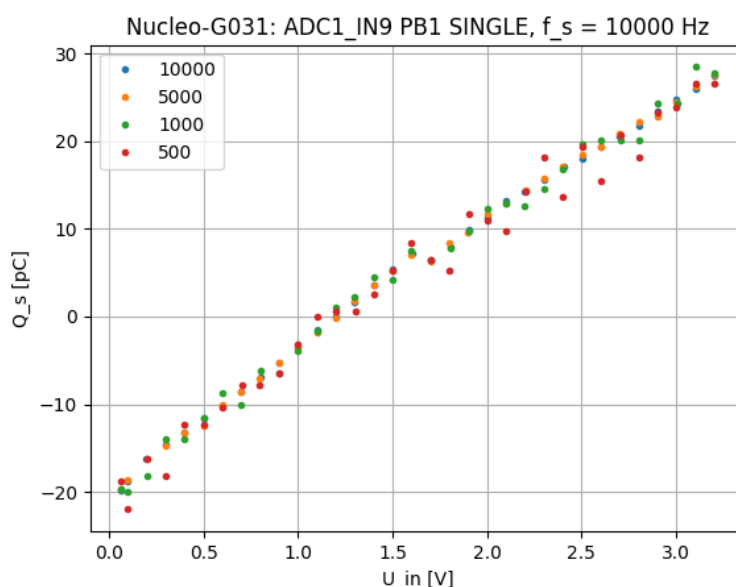
Miera skreslenia výsledkov vplyvom náhodného rušenia z okolitého prostredia je posúdená z opakovaní meraní a následného štatistického spracovania, ktoré je pre kanál IN9 PB1 uvedené na obr. 48. Pri $M = 20$ opakovaníach dosahuje maximálna absolútna smerodajná odchýlka rozšírená koeficientom 3 (pre rôzne vstupné napätia U_{in}) veľkosti náboja preneseného počas jedného odmeru zhruba 0,5 pC, čo tvorí vzhľadom na celkový rozsah nameraných hodnôt malú relatívnu odchýlku (0,97 %). Pre strednú hodnotu prúdov a vzorkovaciu frekvenciu 10 kHz to implikuje absolútnu odchýlku 4,6 nA, preto sú (podobne ako pri ostatných mikroradičoch) rozsahy prúdov zaokrúhlené a udávané s presnosťou 5 nA.

Výsledky meraní vstupných charakteristík prevodníkov ADC



Obr. 48: STM32G031K8 – stredná hodnota (červená) a pásmo trojnásobku smerodajných odchýlok (žlté) vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC

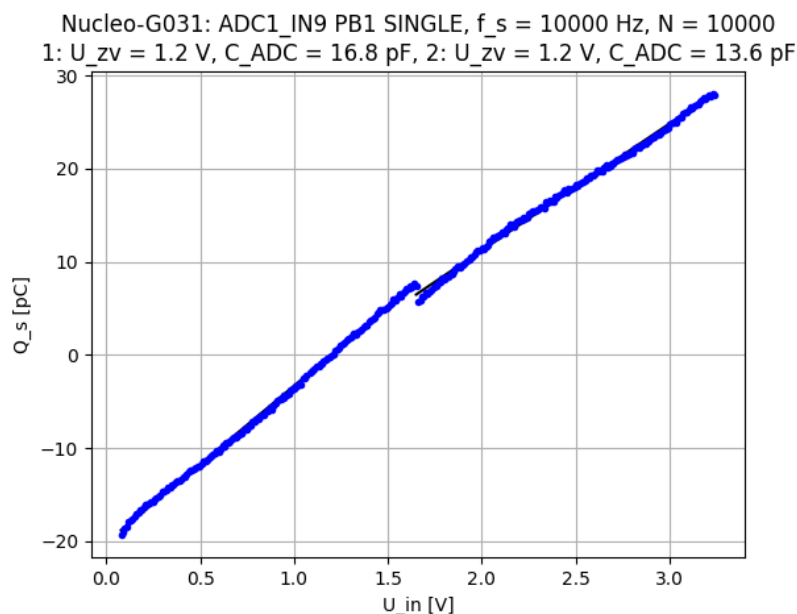
Porovnanie nameraných hodnôt pre kanál IN9 PB1 pre rôzne hodnoty počtu opakovaní odmerov počas integrácie napätia N je uvedené na obr. 49.



Obr. 49: STM32G031K8 – závislosť nameranej vstupnej charakteristiky kanálu prevodníka ADC na počte odmerov N

Vzhľadom na veľké množstvo náboja preneseného počas jedného odmeru (oproti iným mikroradičom) nebolo možné vykonať merania pre $N = 15000$ resp. 20000 , pretože integrované napätie pri vysokých vstupných napätiach dosahovalo saturačných hodnôt nábojového zosilňovača. Na druhej strane, je vidieť, že v tomto prípade by postačoval aj nižší počet odmerov $N = 5000$ na získanie odhadov s dostatočne nízkou volatilitou (v základnej sade meraní je $N = 10000$, kap. 3.6.1).

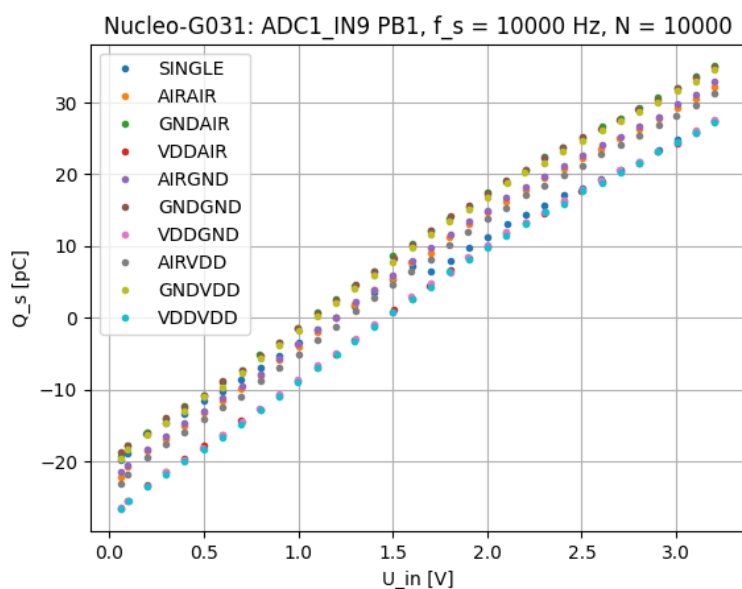
Meranie vstupnej charakteristiky pre kanál IN9 PB1 s menším krokom vstupného napätia U_{in} s veľkosťou 0,01 V je vykreslené na obr. 50. Je vidieť, že ani pri podrobnejšom skúmaní charakteristika nevykazuje viditeľné nespojitosti okrem už zmieneného zlomu pri vstupnom napätí zhruba 1,65 V.



Obr. 50: STM32G031K8 – vstupná charakteristika kanálu prevodníka ADC

5.6.3 Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov na vstupné charakteristiky

Pri meraní vplyvu vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku prevodníka ADC boli nakonfigurované tri kanály v nasledujúcom poradí: IN8 PB0, IN9 PB1 a IN10 PB2, pričom merania prebiehali na prostrednom z nich. Namerané charakteristiky pri rôznych kombináciách vstupného napätia privedeného na vedľajšie kanály, vykreslené na obr. 51, sú zhruba lineárne a s podobnou strmou (odhad kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} modelu je 17,4 pF). Na rozdiel od charakteristiky nameranej pri konfigurácii iba jedného kanálu (SINGLE), nevykazujú zlom, avšak sú strmšie. Podobne ako pre ostatné mikroradiče, jednotlivé modelové charakteristiky sa líšia hlavne veľkosťou zvyškového napätia \hat{U}_{zv} , ktorá je najnižšia pre uzemnený (GND) predchádzajúci kanál (1,1 V) a najvyššia pre 3,3 V pripojené na predchádzajúcom kanále (VDD; 1,5 V). V prípade pripojeného napätia na predchádzajúcom kanále nasledujúci kanál meranie neovplyvňuje.



Obr. 51: STM32G031K8 – vplyv vedľajších kanálov na vstupnú charakteristiku jedného kanálu prevodníka ADC

Interval odhadov strednej hodnoty prúdu I_{str} tečúceho vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru pri vzorkovacej frekvencii $f_s = 10$ kHz pre všetky charakteristiky je $-270 \text{ nA} \div +350 \text{ nA}$. V porovnaní s konfiguráciou iba jedného kanálu (viď vyššie, $-200 \text{ nA} \div +275 \text{ nA}$) to nie je tak výrazné rozšírenie pásma ako pri ostatných mikroradičoch, pretože táto charakteristika má výrazný sklon a súčasne posun zvyškového napätia pre rôzne charakteristiky konfigurácie viacerých kanálov nie je veľký.

6 Zhodnotenie výsledkov meraní

Hlavným výstupom tejto práce je experimentálne zistenie vstupných charakteristík vyvedených kanálov analógovo-číslcových prevodníkov (ADC) pre vybrané mikroradiče zo skupiny procesorov STM32 od spoločnosti *STMicroelectronics*. Merania boli uskutočnené pre nasledujúce procesory:

- STM32F303RE,
- STM32F411RE,
- STM32G431RB,
- STM32L476RG,
- STM32F446RE,
- STM32G031K8.

V prvej fáze bol realizovaný jednoduchý merací prístroj (štvorkanálový voltmeter a generátor konštantného napätia) na mikroradiči STM32F303RE s využitím vývojového prostredia *STM32CubeIDE* [4]. Tento merací prístroj bol následne použitý pri meraniach vstupných charakteristík prevodníkov ADC.

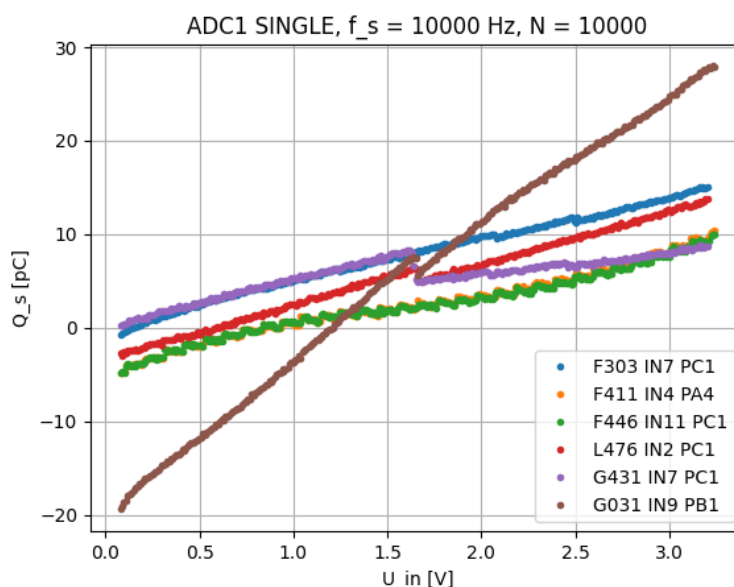
V ďalšej fáze bol odvodený náhradný model chovania vstupu prevodníka ADC a na jeho základe bol navrhnutý merací obvod so zapojením nábojového zosilňovača. Využíval systém prepojenia *master – slave* dvoch mikroradičov, pričom nadradené zariadenie (STM32F303RE) riadilo celý proces odmerov a slúžilo ako merací prístroj. K tomuto účelu bol vytvorený špeciálny užívateľský program využívajúci dostupné knižnice HAL, ktorý sa nachádza v elektronickej prílohe v adresári `/Multimeter_ST`. Jeho súčasťou sú aj obslužné programy pre podradené zariadenia (vyššie menované mikroradiče).

Výstupy meraní sa prostredníctvom terminálového rozhrania PuTTY zobrazovali na obrazovke, prípadne sa ukladali do textových súborov. Tieto zdrojové súbory sú dostupné v elektronickej prílohe v adresári `/BP_DataProcessing/source_files`.

V nasledujúcej fáze bol pripravený užívateľský program v programovacom jazyku *Python 3*, spracúvajúci namerané dáta, ktorý sa nachádza v adresári `/BP_DataProcessing`. Grafické výstupy tohto programu sú použité v tejto práci na prezentáciu výsledkov meraní. V adresári `/BP_DataProcessing/destination_files` sa nachádzajú základné výstupy pre jednotlivé merania vo forme obrázkov a textových súborov s odhadnutými parametrami modelu.

6.1 Porovnanie mikroradičov z hľadiska vstupov prevodníkov ADC

Mikroradiče sú porovnané na základe vstupných charakteristík nameraných pre jednotlivé kanály prevodníkov ADC. Nadväzne, pre každý mikroradič bol vybraný kanál s typickou vstupnou charakteristikou prevodníka ADC (viď obr. 52), na ktorom sú prezentované výsledky meraní.



Obr. 52: Typické vstupné charakteristiky meraných mikroradičov

Pri hodnotení boli uvažované nasledujúce kritériá:

- tvar nameraných vstupných charakteristík;
- ich miera linearity;
- rozsah (strednej hodnoty) vstupných prúdov pri danej vzorkovacej frekvencii;
- odlišnosť vstupných charakteristík pre rôzne kanály jedného prevodníka ADC;
- zmeny vstupnej charakteristiky jedného kanálu v závislosti na vzorkovacom kmitočte;
- zmeny vstupnej charakteristiky pri konfigurácii vedľajších kanálov.

6.1.1 Hodnotenie tvaru charakteristík

Na základe vizuálneho zhodnotenia tvarov nameraných charakteristík je možné mikroradiče roztriediť do skupín s obdobnou štruktúrou prevodníku ADC. Do jednej skupiny bezpochybné patria mikroradiče STM32F411 a STM32F446, ktorých charakteristiky sa do veľkej miery prekrývajú, majú prakticky rovnaké parametre lineárneho modelu a sú na nich badateľné drobné zlomy na úrovni piateho bitu (od MSB)²⁴. Do ďalšej skupiny je možné zaradiť mikroradiče STM32G431RB, STM32L476RG a STM32G031K8, ktorých spoločným znakom je výrazný zlom v polovici rozsahu charakteristík (na úrovni prvého bitu - MSB), hoci aj medzi nimi sú značné rozdiely. Vstupná charakteristika mikroradiča STM32G031K8 má v porovnaní s ostatnými mikroradičmi významne väčší sklon. Samostatnú skupinu tvorí mikroradič STM32F303RE, ktorého tvar charakteristiky naznačuje najpriaznivejšie vlastnosti.

6.1.2 Hodnotenie linearity charakteristík

Miera linearity nameranej charakteristiky môže byť posúdená na základe jej blízkosti k svojmu náhradnému lineárnemu modelu. Jedným zo štatistických kritérií popisujúcich túto vlastnosť je

²⁴ K podobnému záveru dospela aj práca [3], str. 48.

koeficient R^2 (koeficient determinácie, „R na druhú“) [8]. Tento koeficient nadobúda hodnoty v intervale $(0,1)$, pričom 1 znamená dokonalý prekryv dát s lineárnym modelom.

Hodnoty R^2 boli porovnané pre reprezentatívne kanály mikroradičov a meraniach pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz a počte odmerov 10000 s krokom vstupného napätia 0,01 V. Najlepšiu hodnotu R^2 pre celý rozsah vstupného napätia má mikroradič STM32G031K8 (0,996), hoci rozdiely medzi väčšinou mikroradičov sú prakticky zanedbateľné a dosahujú hodnoty R^2 nad 0,97. Výnimkou je mikroradič STM32G431RB, ktorý kvôli výraznému zlomu v strede charakteristiky a navyše rozdielnym sklonom v jednotlivých jej častiach má koeficient determinácie iba 0,73. Avšak popisom každej časti charakteristiky pomocou samostatného lineárneho modelu sa vďaka vysokej linearite koeficienty R^2 dostanú k hodnotám nad 0,97²⁵.

6.1.3 Zmena charakteristík vzhľadom na vzorkovací kmitočet

V kapitole 5 boli pre reprezentatívne kanály mikroradičov zobrazené porovnania vstupných charakteristík prevodníkov ADC nameraných pri vzorkovacích frekvenciách 10 kHz a 100 Hz. Z príslušných grafov je patrné, že na zmenu kmitočtu reagujú charakteristiky rozličných mikroradičov odlišne. Mikroradiče STM32F411RE a STM32F446RE majú charakteristiky pre nižšiu frekvenciu posunuté významne smerom nahor, pričom sa znížilo ich zvyškové napätie a zvýšil sa ich sklon. Charakteristiky mikroradičov STM32G431RB a STM32L476RG sa pri 100 Hz tiež posunuli nahor, hoci nie tak výrazne; zvýšil sa ich sklon, no zvyškové napätie sa posunulo iba nepatrne. Pre STM32F303RE sa charakteristika nameraná pri nižšej frekvencii posunula mierne smerom nadol, a pri nepatrne väčšom sklone tak mala vyššie zvyškové napätie. Napokon, obe charakteristiky mikroradiča STM32G031K8 sa prakticky prekrývajú, drobné rozdiely je vidieť iba pre vstupné napätia okolo 3 V a vyššie, a tiež v blízkosti 0 V.

Náhradný model vstupu prevodníka ADC, popísaný v kapitole 3.2, zmenu nameraných charakteristík pri rôznych vzorkovacích kmitočtoch nedokáže vysvetliť. Jedno z možných vysvetlení dáva prítomnosť únikového prúdu, ktorý však jednoduchý náhradný model nezachycuje.

6.1.4 Porovnanie prúdových rozsahov charakteristík

Z praktického hľadiska je dôležitým kritériom rozsah stredných hodnôt vstupného prúdu pre rôzne hodnoty vstupného napätia a danú vzorkovaciu frekvenciu. Pre obvody s veľkou vstupnou impedanciou predstavuje prúdový interval minimálnu požiadavku na prúd, ktorú musí meraný obvod poskytnúť, aby sa kondenzátory prevodníka ADC stihli dobiť a meranie tak nebolo vychýlené.

Výsledky odhadov prúdových intervalov pri vzorkovacej frekvencii 10 kHz a konfigurácii jedného reprezentatívneho kanálu (merania označené ako SINGLE) sú uvedené v tab. 2.

²⁵ Zlepšenie koeficientov R^2 po rozdelení na dva samostatné modely platí aj pre charakteristiky mikroradičov STM32G031 a STM32L476, ktoré tiež vykazujú zlom.

Tab. 2: Odhad strednej hodnoty vstupného prúdu prevodníka ADC pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz

Mikroradič	Prevodník	Kanál	Stredná hodnota vstupného prúdu I_{str} [nA]	
			min	max
STM32F303RE	ADC1	IN7 PC1	-5	155
STM32F411RE	ADC1	IN4 PA4	-50	95
STM32G431RB	ADC1	IN7 PC1	0	90
STM32L476RG	ADC1	IN2 PC1	-30	140
STM32F446RE	ADC1	IN11 PC1	-50	95
STM32G031K8	ADC1	IN9 PB1	-190	275

Väčšinové rozpätie prúdov sa pohybuje okolo 150 až 170 nA. Z tohto rozpätia výrazne vybočuje mikroradič STM32G431RB s prúdovým intervalom šírky iba 90 nA, ktorý navyše nezasahuje do záporných hodnôt (teda prúd tečie vždy v smere do prevodníka ADC). Dôvodom je výrazný zlom v strede charakteristiky v kombinácii so smernicami jej lineárnych modelov (pre obe časti) a nulovým zvyškovým napätím. Z tohto pohľadu sa vstupná charakteristika mikroradiča STM32G431RB javí ako najvýhodnejšia. Na opačnej strane sa pohybuje mikroradič STM32G031K8, ktorý má kvôli mimoriadne strmej charakteristike prúdové rozpätie až 465 nA, čo je zhruba trikrát viac ako priemerné rozpätie väčšiny meraných mikroradičov.

Ešte dôležitejšie sú výsledky nameraných prúdových intervalov pri frekvencii 100 Hz, ktorá bola použitá pri realizácii meracieho prístroja (viď tab. 3).

Tab. 3: Odhad strednej hodnoty vstupného prúdu prevodníka ADC pri vzorkovacom kmitočte 100 Hz

Mikroradič	Prevodník	Kanál	Stredná hodnota vstupného prúdu I_{str} [nA]	
			min	max
STM32F303RE	ADC1	IN7 PC1	-0,30	1,45
STM32F411RE	ADC1	IN4 PA4	0,20	2,80
STM32G431RB	ADC1	IN7 PC1	-0,05	1,30
STM32L476RG	ADC1	IN2 PC1	-0,20	1,60
STM32F446RE	ADC1	IN11 PC1	-0,10	2,05
STM32G031K8	ADC1	IN9 PB1	-2,00	3,10

Pri porovnaní oboch tabuliek je vidieť, že jednoduché pravidlo prepočtu intervalov z jednej frekvencie do druhej – pre násobenie podielom frekvencií – neplatí. Dôvodom sú zmeny v posune aj sklone jednotlivých charakteristík pri inom vzorkovacom kmitočte, popísané v kapitole 5.

Pri vzorkovacej frekvencii 100 Hz sa mení poradie mikroradičov z hľadiska rozpätia prúdov. Značné zhoršenie nastalo pre mikroradiče STM32F411RE a STM32F446RE (relatívne k menšiemu zhoršeniu pre ostatné mikroradiče). Najmenší prúdový rozsah má síce naďalej STM32G431RB, ale za nimi nasledujú mikroradiče STM32F303RE a STM32L476RG. Niekoľkonásobne väčší interval prúdov než priemer vykazuje naďalej STM32G031K8.

6.1.5 Variabilita charakteristík prevodníka ADC vzhľadom na voľbu kanálu

Ideálne by všetky kanály jedného prevodníka ADC mali mať rovnakú vstupnú charakteristiku. V skutočnosti sa ale namerané charakteristiky môžu odlišovať, ako je vidieť na grafoch zobrazujúcich porovnanie charakteristík vyvedených kanálov jednotlivých prevodníkov pre rôzne mikroradiče, uvedených v kapitole 5. Rozdiely sú dôsledkom obvodovej realizácie kanálov, a neplynú priamo z prevodníka ako takého. Na niektorých kanáloch sa tak môžu výraznejšie prejaviť nepriaznivé javy, ako sú napríklad parazitné kapacity alebo únikové prúdy.

Pri popise nameraných charakteristík v kapitole 5 bolo zmienené, že sa charakteristiky jedného prevodníka dajú zaradiť do niekoľkých skupín, v rámci ktorých zdieľajú spoločný model, teda majú približne rovnaký odhad modelových parametrov zvyškového napätia \hat{U}_{zv} a kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} . Pre účel aplikácie viackanálového voltmetra je potom vhodné zvoliť kanály z jednej skupiny, a (pokiaľ je to možné) sa vyhnúť kanálom, ktoré majú výrazne odlišné vlastnosti.

Nasledujúce kanály mikroradičov nie sú vzhľadom na ich odlišnú a/lebo svojimi vlastnosťami nepriaznivú charakteristiku odporúčané pri aplikácii voltmetra:

- STM32F303RE: ADC2 kanál IN4 PA7, ADC4 kanál IN4 PB14;
- STM32F411RE: ADC1 kanál IN0 PA0;
- STM32F446RE: ADC1 kanál IN0 PA0, ADC2 kanál IN0 PA0, ADC3 kanál IN0 PA0;
- STM32G031K8: ADC1 kanál IN11 PB7.

6.1.6 Ovplyvnenie charakteristík konfiguráciou vedľajších kanálov

Vplyv konfigurácie vedľajších kanálov pre jednotlivé mikroradiče pri vzorkovacej frekvencii 10 kHz a počte odmerov $N = 10000$ bol popísaný v príslušných častiach kapitoly 5. Na ich základe sa dajú vyvodiť všeobecné závery.

V prvom rade, vstupná charakteristika meraného kanálu je bezprostredne ovplyvnená predchádzajúcim meraním (zvyčajne prebieha na vedľajšom kanále, ale môže sa jednať aj o opakované merania na tom istom kanále)²⁶. Dôvodom je princíp fungovania prevodníka ADC s postupnou aproximáciou pracujúcom na princípe prelievania náboja. Ako bolo zmienené v kapitole 3.1, pri odmere sa počas doby vzorkovania sústava meracích kondenzátorov nabije nábojom odpovedajúcim veľkosti vstupného napätia a v ďalších fázach sa tento náboj prelieva sústavou kondenzátorov pomocou prepínačov až do konca doby konverzie. V ideálnom obvode sa tento náboj nestratí, takže teoreticky na začiatku nasledujúceho odmeru už sú kondenzátory prednabité na hodnotu odpovedajúcu veľkosti vstupného napätia z predchádzajúceho odmeru a počas doby vzorkovania sa „prebijú“ na novú hodnotu vstupného napätia. To však významne ovplyvňuje tok nábojov; napríklad v ideálnom bezstratovom prevodníku by sa pri opakovaných

²⁶ Týmto je zasiahnuté aj meranie typu SINGLE, ktorého nameraná charakteristika oproti ostatným typom merania má preto výrazne menší sklon.

odmeroch konštantného vstupného napätia prenos nábojov realizoval iba pri prvom odmere, pri ďalších odmeroch by bol prenos náboja nulový (taktiež nameraná stredná hodnota prúdu by bola nulová).

Samozrejme, skutočné prevodníky nie sú bezstratové a navyše nie je zřejmé, či sa medzi koncom jedného a začiatkom ďalšieho odmeru náboj z meracích kondenzátorov nevybija (či už zámerne – napríklad uzemnením, alebo iba ako dôsledok doprovdných procesov v prevodníku napr. pri spínaní jednotlivých prepínačov). Ďalším faktorom, ktorý spôsobuje zmenu náboja na meracích kondenzátoroch, sú parazitné javy ako napr. únikové prúdy. Zatiaľ nezodpovedanou otázkou ostáva, čo sa deje s nábojom v sústave meracích kondenzátorov od skončenia odmerov na všetkých nakonfigurovaných kanáloch až do konca periódy, teda do doby, než sa spustí ďalšie kolo odmerov. Je zřejmé, že v tejto dobe dochádza k poklesu (resp. všeobecne k zmene) napätia v dôsledku obvodových strát a únikov, ale bolo by tiež možné nechať prevodník napríklad zámerne uzemniť. Autorovi dostupná literatúra sa o týchto procesoch priamo nezmieňuje.

Dôležitým faktorom je hodnota napätia, na ktorú by sa sústava meracích kondenzátorov samovoľne vybila, čiže tzv. zvyškové napätie. Toto napätie je možné namerať na vstupe prevodníka ADC nezapojeného kanálu. Typické hodnoty zvyškového napätia sú niekoľko desiatín volta, ale líšia sa medzi jednotlivými mikroradičmi i medzi kanálmi jedného prevodníka ADC. Hodnoty zvyškového napätia, uvádzané pri rôznych typoch meraní v predchádzajúcich kapitolách, nemusia odpovedať (a zvyčajne ani neodpovedajú) zvyškovému napätiu chápanému v zmysle tohto odstavca, a to už z toho dôvodu, že sa pri rôznych typoch meraní líšia. Pre vybrané kanály skúmaných mikroradičov a špeciálne typy charakteristík sú tieto namerané hodnoty uvedené v tab. 4.

Tab. 4: Namerané zvyškové napätie rôznych charakteristík mikroradičov pri frekvencii 10 kHz

Mikroradič	Prevodník	Kanál	Zvyškové napätie U_{zv} [V]		
			SINGLE	GNDGND	VDDVDD
STM32F303RE	ADC1	IN7 PC1	0,1	0,1	1,6
STM32F411RE	ADC1	IN6 PA6	0,9	0,3	2,4
STM32G431RB	ADC1	IN7 PC1	0,0	0,0	2,0
STM32L476RG	ADC1	IN2 PC1	0,6	0,5	1,1
STM32F446RE	ADC1	IN11 PC1	0,9	0,4	2,4
STM32G031K8	ADC1	IN9 PB1	1,2	1,1	1,5

Druhý významný fakt, ktorý sa dá vyvodit' z meraní s nakonfigurovanými vedľajšími kanálmi, je približná veľkosť úbytku napätia na vstupe prevodníka medzi dvoma odmerni. Tú je vidieť z nameraných charakteristík typu VDDxxx. Pri odmere prvého kanálu, na ktorého vstup je privedené napätie VDD, do sústavy kondenzátorov pritečie náboj odpovedajúci veľkosti napätia zhruba 3,3 V. Hodnota vstupného napätia pretínajúca x-ovú os, čiže zvyškové napätie tejto charakteristiky, je potom hodnota napätia, na ktorú sa sústava meracích kondenzátorov vybila z predošlého odmeru, t.j. z 3,3 V. Podobne, ale z opačnej strany, sa dá interpretovať zvyškové napätie zistené z nameraných charakteristík typu GNDxxx. Táto hodnota hovorí, na aké napätie sa medzi odmerni nabili meracie kondenzátory z hodnoty 0 V.

Z tab. 4 je možné vyčítať, že rozličné mikroradiče sa medzi odmermi vybijú odlišne rýchlo. Navyiac, asymetria medzi vybitím z 3,3 V a z 0 V dáva tušiť polohu „skutočného“ zvyškového napätia, daného napäťovou deličkou obvodov. Relatívne rýchlo sa k tejto hodnote vybijajú kondenzátory mikroradiča STM32G031K8, pre ktorý leží zvyškové napätie niekde v intervale 1,1 V ÷ 1,5 V. Naopak, pomaly uniká náboj medzi odmermi z mikroradičov STM32F411RE, STM32F446RE a STM32G431RB. Najbližšie k „skutočnej“ hodnote zvyškového napätia sú hodnoty získané z merania typu SINGLE. Z nameraných hodnôt vyplýva, že napríklad mikroradič STM32F303RE má straty medzi dvoma odmermi odpovedajúce úbytku zhruba polovice napätia. To priamo súvisí so sklonom jednotlivých charakteristík, preto pre tento mikroradič smernica charakteristiky GNDxxx (odhad $\hat{C}_{ADC} = 9,4$ pF) približne dvakrát väčšia ako pre smernicu typu SINGLE ($\hat{C}_{ADC} = 4,7$ pF).

Tretie pozorovanie hovorí viac o vzájomných polohách charakteristík SINGLE, GNDxxx a VDDxxx pre jednotlivé mikroradiče. Keby boli prevodníky bezstratové, tak by sa charakteristiky SINGLE a GNDxxx prekrývali pre vstupné napätie 0 V, a charakteristiky SINGLE a VDDxxx zasa pre vstupné napätie 3,3 V²⁷. Pri porovnaní vzájomných polôh pre rôzne mikroradiče sú aj v tomto rozdiely, keď napríklad mikroradiče STM32F411RE a STM32L476RG vykazujú výraznejšie odchýlky. To signalizuje prítomnosť väčších parazitných javov v dobe po skončení odmerov až do konca periódy²⁸.

Posuny charakteristík vplyvom konfigurácie vedľajších kanálov ústia v posuny intervalových odhadov pre strednú hodnotu prúdu pretekajúceho vstupom prevodníka ADC pri danom vzorkovacom kmitočte. Najnepriaznivejšia situácia z hľadiska požadovanej veľkosti prúdu nastáva v dvoch krajných prípadoch, keď sa musí náboj v sústave meracích kondenzátorov prebijať z jednej extrémnej hodnoty vstupného napätia na druhú, čiže z 0 V na 3,3 V a naopak. Tieto hodnoty prúdu je možné dopočítať z charakteristiky GNDGND pre vstupné napätie 3,3 V a z charakteristiky VDDVDD pre 0 V. Výsledky pre jednotlivé mikroradiče pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5: Odhad strednej hodnoty vstupného prúdu prevodníka ADC pri vzorkovacom kmitočte 10 kHz a konfigurácii vedľajších kanálov

Mikroradič	Prevodník	Kanál	Stredná hodnota vstupného prúdu	
			I_{str} [nA]	
			min	max
STM32F303RE	ADC1	IN7 PC1	-145	295
STM32F411RE	ADC1	IN6 PA6	-230	290
STM32G431RB	ADC1	IN7 PC1	-145	255
STM32L476RG	ADC1	IN2 PC1	-90	235
STM32F446RE	ADC1	IN11 PC1	-230	285
STM32G031K8	ADC1	IN9 PB1	-255	350

²⁷ Merania pre tieto hraničné body však neboli prevedené kvôli obmedzeniam daným prevodníkom DAC nadradeného zariadenia. Boli však prevedené pre hodnoty 0,1 V a 3,2 V, pre ktoré by mali zmienené charakteristiky ležať už dostatočne blízko.

²⁸ Rozdiely môžu byť spôsobené aj tým, že mikroradiče majú túto dobu rozdielnu.

Merania charakteristík typu AIRxxx demonštrujú fakt, že nezapojené kanály nepredvídateľne (pretože hodnota napätia na predchádzajúcom kanáli nie je vopred známa) posúvajú vstupnú charakteristiku meraného kanálu. Tiež naznačujú, k akým veľkým úbytkom napätia medzi odmermi dochádza. Pokiaľ je dôležité poznať vstupnú charakteristiku meraného kanálu (napríklad pri obvodoch s vysokou vstupnou impedanciou), tak nie je vhodné nechávať kanály nezapojené.

6.2 Náhradný model vstupu prevodníka ADC zohľadňujúci únikový prúd

Merania vykonané podľa postupov popísaných v kapitole 3.6 naznačujú z niekoľkých uhlov, že jednoduchý model popísaný v kapitolách 3.2 až 3.4 neposkytuje dostatočné vysvetlenie pre namerané hodnoty. Nasledujúce body zhrňajú základné pozorovania:

1. Posuny charakteristík meraného kanálu pri meraniach pre rôzne frekvencie nie sú jednoduchým modelom vysvetliteľné. Pre rôzne mikroradiče sú posuny odlišné, a to nielen v relatívnej významnosti, ale aj v smere, vid' napr. obr. 11 a obr. 18. Signalizujú tak prítomnosť ďalších (parazitných) javov, pravdepodobne únikového prúdu.
2. Meniace sa zvyškové napätie pri rôznych napätiach privedených na predchádzajúci kanál naznačuje, že popis zvyškového napätia, ako je chápaný pri odmeroch, neodpovedá zvyškovému napätiu prevodníka ADC. Toto by malo byť nezávislé na odmeroch²⁹.
3. Jednoduchý model nevysvetlí významné rozdiely v nameraných vstupných charakteristikách rôznych kanálov na jednom prevodníku ADC (vid' napr. obr. 8). Keďže sústava meracích kondenzátorov je spoločná, rozdiel musí plynúť z odlišných obvodových zapojení jednotlivých kanálov. Jedným zo spôsobov, ako tieto rozdiely zachytiť modelom, je zavedenie únikového prúdu.

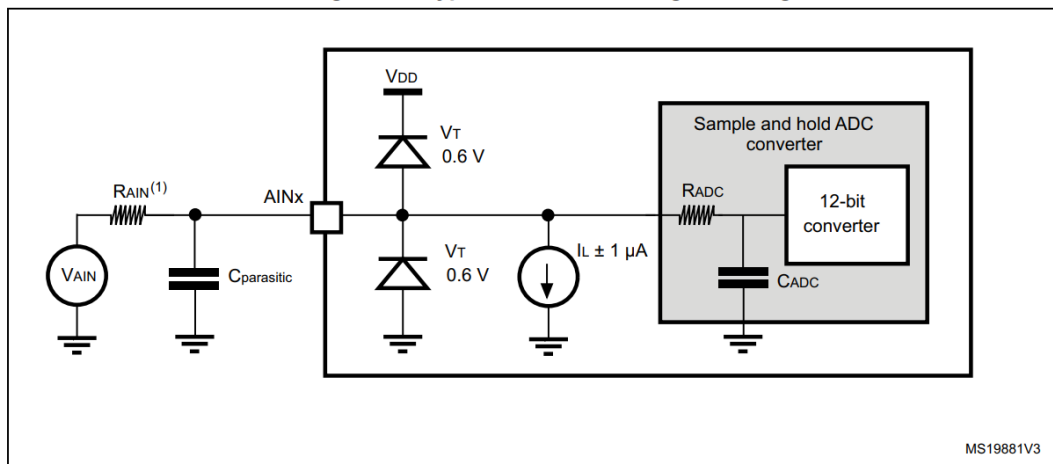
6.2.1 Rozšírenie modelu o únikový prúd

Model rozšírený o únikový prúd bol inšpirovaný typickou schémou zapojenia prevodníku ADC uvádzanou v popise procesorov od *STMicroelectronics* a zobrazenou na obr. 53.

Rozšírený náhradný model predpokladá, že náboj Q pretekajúci vstupom prevodníka ADC pri jednom odmere má dve zložky. Prvá zložka odpovedá náboju Q_s , ktorý skutočne nabije sústavu meracích kondenzátorov s kapacitou C_{ADC} . Druhú zložku tvorí únikový prúd I_L , ktorý tečie po obvodoch prepojujúcich vstupný pin a samotný prevodník ADC.

²⁹ Model pracuje s predpokladom, že doba vzorkovania signálu je dostatočne dlhá na to, aby sa merací kondenzátor stíhal plne nabiť.

Figure 51. Typical connection diagram using the ADC



Obr. 53: Typická schéma zapojenia prevodníku ADC

Zdroj: [11], str. 144, obr. 51

Za predpokladu, že v rámci jednej vzorkovacej periódy sa vykoná práve jeden odmer jedného kanálu, je možné celkový náboj Q^P , ktorý pretečie cez vstup (pin) prevodníka ADC počas jednej periódy popísať vzťahom:

$$Q^P = Q_s + \frac{I_L}{f_s} \quad (10)$$

Rovnica (10) pritom platí za predpokladu, že vstupné napätie U_{in} privedené na pin meraného kanálu je konštantné a tiež únikový prúd je pri tomto napätí konštantný a nezávislý na vzorkovacou kmitočte f_s . Zároveň je potrebné dôsledne rozlišovať dobu, za akú sa veľkosť preneseného náboja počíta. Kým Q^P vyjadruje veľkosť náboja preneseného počas jednej periódy T_s (jedna perióda odpovedá času $\frac{1}{f_s}$), Q_s je veľkosť náboja, ktorý nabije sústavu meracích kondenzátorov počas jedného odmeru³⁰. Vzťah sa dá zovšeobecniť pre k opakovaní odmeru toho istého kanálu v rámci jednej periódy:

$$Q_k^P = k \cdot Q_s + \frac{I_L}{f_s} \quad (11)$$

Meranie náboja pretekajúceho vstupom (pinom) prevodníka ADC počas jedného odmeru ostáva naďalej platné. Pre merania jediného kanálu ($k = 1$, čo odpovedá meraniam SINGLE) potom platí $Q_1^P = \frac{Q_{int}}{N}$, kde Q_{int} je veľkosť náboja integrovaná na kondenzátore C_{int} počas N periód, získaná s využitím vzťahu (3).

³⁰ V jednoduchom modeli popísanom v kapitole 3.3 toto rozlíšenie nie je podstatné. Korektne však symbol Q_{int} predstavuje veľkosť náboja naintegrovaného na integračnom kondenzátore C_{int} počas N periód. Slovný výraz „odmer“ v kontexte času sa vzťahuje k celkovej dobe konverzie t_{conv} , zvyčajne udávanej v jednotkách hodinových cyklov, pre ktorú platí $t_{conv} \leq T_s$.

Rovnica (11) môže byť využitá ako náhradný model pre odhad únikového prúdu pri danej vzorkovacej frekvencii pre rôzne hodnoty vstupného napätia. Konkrétne, voľbou $k = 0$ je možné získať odhad priamo zo vzťahu:

$$I_L = Q_0^p \cdot f_s \quad (12)$$

Meranie náboja Q_0^p sa vykoná v schéme so zapojením nábojového zosilňovača; meraný bude jeden kanál, ktorý bude nakonfigurovaný, ale nebude sa vykonávať vzorkovanie. Zo známych hodnôt únikového prúdu potom bude možné z rovnice (11) pre $k = 1$ (a z merania typu SINGLE) dopočítať odhad náboja Q_s .

Model popísaný vzťahom (11) sa dá odhadnúť aj alternatívne, pre voľbu ľubovoľných dvoch rôznych hodnôt pre parameter k (ozn. k_1 a k_2), pričom sú k tomu potrebné opäť dve merania. Merania sa pripravujú tak, že sa v rámci jednej periódy vykonajú k -krát odmery toho istého kanálu. Podmienkou je, aby celková doba konverzie vynásobená hodnotou k neprekročila dobu trvania jednej periódy T_s . Únikový prúd I_L a náboj prenesený do prevodníka ADC počas jedného odmeru Q_s sa potom určia zo vzťahov:

$$I_L = \frac{k_1 Q_{k_2}^p - k_2 Q_{k_1}^p}{k_1 - k_2} \cdot f_s \quad (13)$$

$$Q_s = \frac{Q_{k_1}^p - Q_{k_2}^p}{k_1 - k_2} \quad (14)$$

Pokiaľ model zhruba odpovedá realite, budú odhady I_L a Q_s pre voľbu rôznych kombinácií parametrov k_1 a k_2 približne rovnaké (pri danej vzorkovacej frekvencii f_s).

Za predpokladu, že riadené napätie generované prevodníkom DAC pri realizácii odmerov, označené U_r , je rovné napätiu U_{in} privedenému na vstup prevodníka ADC (t.j. platí predpoklad $U_r = U_{in}$), je možné popísať veľkosť náboja Q_s potrebného na nabitie meracieho kondenzátora C_{ADC} v závislosti na veľkosti vstupného napätia U_r vzťahom (1). Únikový prúd môže byť taktiež popísaný lineárnym modelom, v ktorom sa predpokladá, že je počas celej periódy konštantný a závisí lineárne na veľkosti vstupného napätia U_r :

$$I_L = \frac{U_r}{R_L} + I_0 \quad (15)$$

Vzťahom (15) sú zavedené dva parametre modelu, kde R_L odpovedá náhradnému odporu, ktorý má dráha únikového prúdu a I_0 je veľkosť únikového prúdu pri nulovom vstupnom napätí.

Náhradný model vstupu prevodníka ADC zohľadňujúci únikový prúd vznikne kombináciou vyššie zmienených vzťahov:

$$\frac{(U_N - U_0) \cdot C_{int}}{N} = (U_r - U_{zv}) \cdot C_{ADC} + \frac{U_r}{R_L \cdot \bar{f}_s} + \frac{I_0}{\bar{f}_s} \quad (16)$$

Model má jednu nezávislú premennú U_r a je parametrizovaný pre voľbu vzorkovacej frekvencie f_s , čo je zdôraznené označením \bar{f}_s ³¹. Po realizácii odmerov s využitím zapojenia s nábojovým zosilňovačom a vyhodnotením výrazu na ľavej strane je možné získať odhad veľkosti náboja Q_1^P .

Úpravou vznikne výsledný tvar náhradného modelu:

$$Q_1^P = \left(C_{ADC} + \frac{1}{R_L \cdot \bar{f}_s} \right) \cdot U_r + \left(\frac{I_0}{\bar{f}_s} - C_{ADC} \cdot U_{zv} \right) \quad (17)$$

Odhady parametrov \hat{C}_{ADC} , \hat{U}_{zv} , \hat{R}_L a \hat{I}_0 je možné získať aplikáciou lineárnej regresie na rovnice (1) a (15).

6.2.2 Odhad parametrov modelu s únikovým prúdom pre mikroradič STM32F411RE

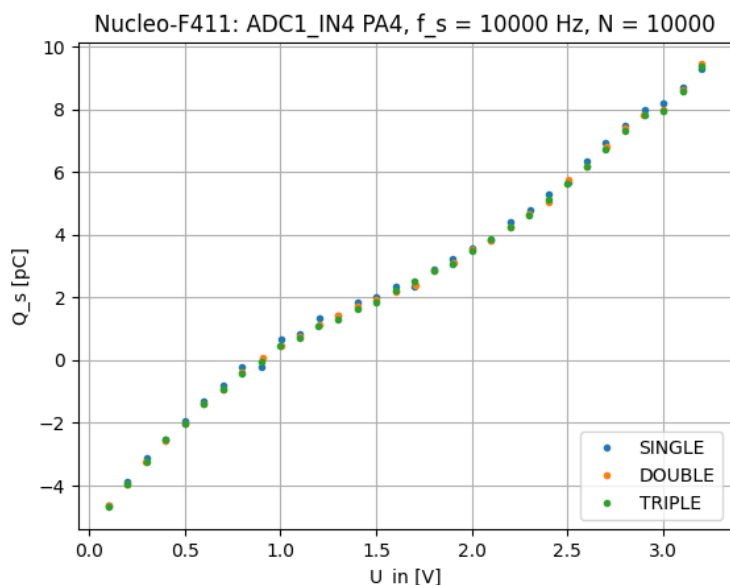
Výber mikroradiča STM32F411RE na predvedenie analýzy náhradného modelu s únikovým prúdom súvisí s tým, že výsledky meraní a následné odhady parametrov pôvodného jednoduchého modelu naznačili, že rola únikového prúdu bude pomerne významná.

Merania boli prevedené pre dve hodnoty vzorkovacieho kmitočtu f_s – 10 kHz a 100 Hz. Pre každý z nich boli vykonané tri sady meraní vstupnej charakteristiky kanálu IN4 PA4 prevodníka ADC1 (resp. jedna sada bola prevzatá z predošlých meraní a doplnené boli ďalšie dve). Tieto sady mali nastavené rovnaké parametre pre počet odmerov $N = 10000$ a krok vstupného napätia 0,1 V. V prvej sade bol nakonfigurovaný meraný kanál, na ktorom prebehol jeden odmer za periódu (t.j. je to meranie typu SINGLE základnej sady odmerov, ktoré bolo popísané v kapitole 3.6.1 a výsledky meraní prezentované v kapitole 5). V druhej sade meraní sa vykonali dva odmery vybraného kanálu za periódu (označenie typu merania DOUBLE). Podobne, tretia sada meraní (TRIPLE) použila tri odmery za periódu.

Ako výsledky meraní (popísané vzťahom (11) pre $k = 1, 2, 3$) boli s využitím rovnice (3) dopočítané odhady veľkosti náboja preneseného počas jednej periódy Q_k^P pre $k = 1, 2, 3$. Pre vzorkovací kmitočet 10 kHz sú vykreslené na obr. 55, pre 100 Hz na obr. 54³².

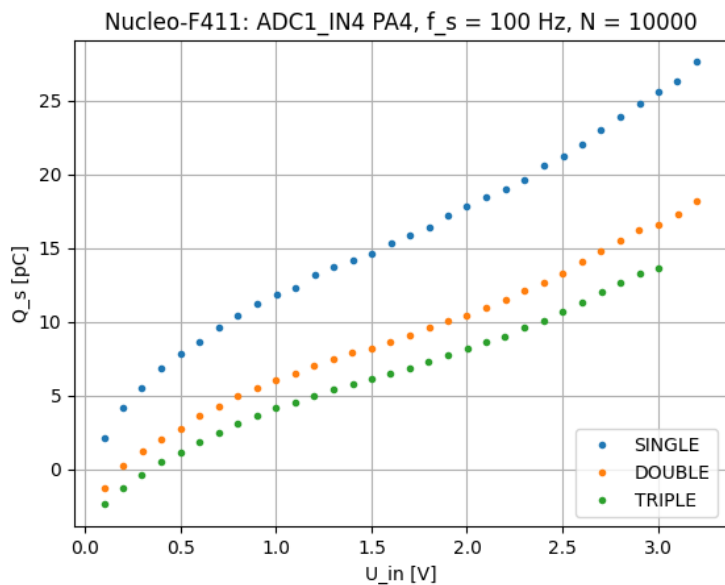
³¹ Inými slovami, parametre modelu sa môžu meniť v závislosti od hodnoty vzorkovacej frekvencie.

³² V grafoch sú hodnoty preneseného náboja prepočítané na jeden odmer; pôvodné odvodené hodnoty sa vzťahujú na jednu periódu. Vzťah medzi nimi je v prenasobení koeficientom k .



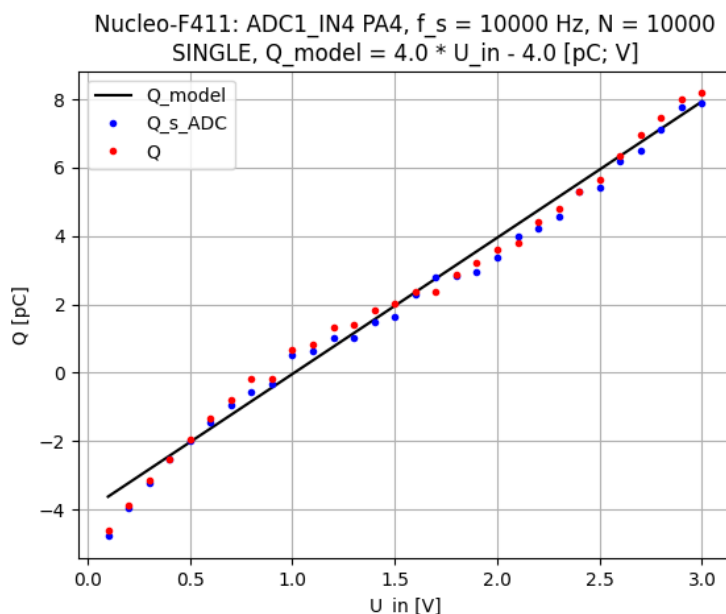
Obr. 55: STM32F411RE – vstupné charakteristiky kanálu pre rôzny počet odmerov za periódu

Z obr. 55 je vidieť, že veľkosť náboja preneseného počas jedného odmeru pri frekvencii 10 kHz sa prakticky nezmenila pre rôzne hodnoty k . Už z tohto grafu je možné usudzovať, že únikový prúd pri tomto kmitočte bude zanedbateľný. Naopak, pri vzorkovacom kmitočte 100 Hz sú vstupné charakteristiky kanálu IN4 PA4 na obr. 54 (po prepočítaní na jeden odmer) výrazne odlišné a únikový prúd pri tejto frekvencii zanedbateľný nebude.



Obr. 54: STM32F411RE – vstupné charakteristiky kanálu pre rôzny počet odmerov za periódu

Na odhad parametrov náhradného lineárneho modelu s únikovým prúdom boli pre oba vzorkovacie kmitočty použité merania typu TRIPLE a DOUBLE³³. Model bol následne použitý na predikciu meraných hodnôt SINGLE. Modelová predikcia (priamka) by pre dobre zvolený model mala prechádzať nameranými dátami z merania SINGLE (červené body v grafoch); navyše je vykreslený odhad veľkosti náboja preneseného do prevodníka ADC počas jedného odmeru. Výsledky experimentu sú znázornené na obr. 56 pre frekvenciu 10 kHz a obr. 57 pre 100 Hz.



Obr. 56: STM32F411RE – porovnanie predikcie modelu s nameranými hodnotami (náboj prenesený za odmer)

Ako vidieť z obr. 56, modelová predikcia dobre popisuje dáta namerané pomocou zapojenia s nábojovým zosilňovačom pri vzorkovacej frekvencii 10 kHz a typom merania SINGLE. Podľa očakávania, celková veľkosť náboja preneseného vstupom prevodníka ADC počas jednej periódy (v grafe označená Q) je podobná veľkosti náboja preneseného do sústavy meracích kondenzátorov počas jedného odmeru (v grafe $Q_{\text{s_ADC}}$). To implikuje, že únikový prúd je pri kmitočte 10 kHz zanedbateľný.

Odhad parametrov modelu je uvedený v tab. 6. Odhady pre zvyškové napätie a kapacitu meracieho kondenzátora je možné porovnať s odhadmi pomocou pôvodného modelu (1,0 V; 4,1 pF – kapitola 5.2.1). Tieto hodnoty sú veľmi podobné, pretože únikový prúd je zanedbateľný.

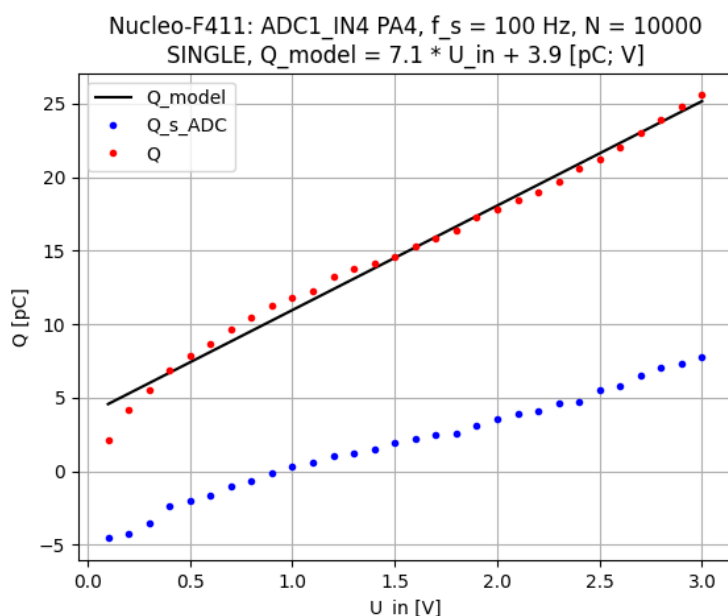
Tab. 6: Odhad parametrov modelu ($f_s = 10$ kHz)

Parameter	Hodnota	Jednotka
\hat{U}_{zv}	1,0	V
\hat{C}_{ADC}	4,0	pF
\hat{R}_L	6,2	G Ω
\hat{I}_0	1,38	nA

³³ Ako kontrola boli prevedené aj odhady zo zvyšných dvoch kombinácií, teda TRIPLE a SINGLE, DOUBLE a SINGLE. Výsledky odhadov boli podobné, čo hrá v prospech modelu s únikovým prúdom.

Zhodnotenie výsledkov meraní

Pri vzorkovacej frekvencii 100 Hz modelová predikcia tiež dobre popisuje namerané dáta s typom merania SINGLE (obr. 57). Únikový prúd nie je zanedbateľný, čo je vidieť pri porovnaní celkového náboja preneseného vstupom prevodníka ADC počas jednej periódy (červené body v grafe) a odhadu veľkosti náboja preneseného do sústavy meracích kondenzátorov počas jedného odmeru (modré body v grafe). Ich rozdiel odpovedá náboju prislúchajúceho únikovému prúdu, preneseného počas jednej periódy.



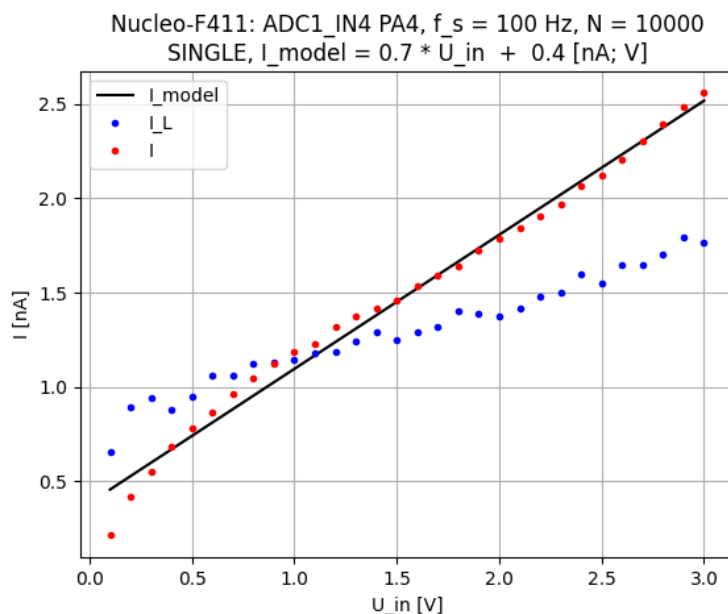
Obr. 57: STM32F411RE – porovnanie predikcie modelu s nameranými hodnotami (náboj prenesený za odmer)

Únikový prúd odhadnutý pri vzorkovacom kmitočte 100 Hz je znázornený na obr. 58 (modré body). Súčasne sú na porovnanie zobrazené stredná hodnota prúdu dopočítaná z nameraných dát (červené body) a jej príslušná modelová predikcia (priamka). Graf ukazuje, že pri frekvencii 100 Hz únikový prúd zanedbateľný nie je.

Odhadnuté koeficienty modelu pri frekvencii 100 Hz sú uvedené v tab. 7. Oproti odhadom zvyškového napätia a kapacity meracieho kondenzátora pomocou pôvodného modelu (-0,5 V; 7,2 pF – vid' kapitola 5.2.2) sa značne líšia; dôvodom je práve nezanedbateľný vplyv únikového prúdu.

Tab. 7: Odhad parametrov modelu ($f_s = 100$ Hz)

Parameter	Hodnota	Jednotka
\tilde{U}_{zv}	1,1	V
\hat{C}_{ADC}	3,9	pF
\hat{R}_L	3,1	G Ω
\hat{I}_0	0,8	nA



Obr. 58: STM32F411RE – porovnanie predikcie modelu s nameranými hodnotami (únikový prúd)

Pri porovnaní parametrov uvedených v tab. 6 a tab. 7 je vidieť, že hoci sú ich odhady vykonané pri rôznych vzorkovacích kmitočtoch, tak sa hodnoty zvyškového napätia \hat{U}_{zv} a kapacity meracieho kondenzátora \hat{C}_{ADC} z oboch modelov významne priblížili. To značí, že aj predikovaná veľkosť náboja Q_s preneseného do sústavy meracích kondenzátorov počas jedného odmeru je zhruba podobná. To je v súlade s tým, že náboj potrebný na úplné nabitie sústavy meracích kondenzátorov (pokiaľ boli na začiatku úplne vybité) nezávisí na vzorkovacom kmitočte (samozrejme za predpokladu, že tento kmitočtet umožní ich úplné nabitie).

Naopak, z porovania odhadov parametrov \hat{R}_L a \hat{I}_0 je vidieť, že vplyv únikového prúdu I_L významne závisí na vzorkovacej frekvencii. Vzťah je nepriamo úmerný – pri klesajúcom kmitočte vplyv únikového prúdu na meranie (relatívne k prúdu odpovedajúcej kapacite ADC) rastie.

Celkovo je možné zhodnotiť, že výsledky získané pomocou náhradného modelu rozšíreného o únikový prúd nie sú v rozpore s nameranými dátami a pomáhajú lepšie popísať vstupnú charakteristiku prevodníka ADC. Na overenie platnosti modelu by ale bolo potrebné vykonať a spracovať viacero meraní (niektoré alternatívne postupy boli naznačené v kapitole 6.2.1), štatisticky vyhodnotiť kvalitu predikcií a následne postupy aplikovať pre ďalšie typy mikroradičov.

6.3 Využitie výsledkov meraní

Na základe meraní vstupných charakteristík kanálov prevodníkov ADC a ich následnej analýze je možné vyvodiť niekoľko odporúčaní, užitočných pri aplikácii jednoduchých voltmetrov. Zvlášť vhodné sú pri meraniach obvodov s veľkou vstupnou impedanciou, kde ich presnosť ovplyvní najmä to, či sa meracie kondenzátory pri odmere stihnú dobiť na hodnotu vstupného

napätia. Predpokladá sa pritom, že meranie sa koná pre vstupné napätie (resp. napätia, ak je potrebné merať viac kanálov súčasne), ktoré je približne konštantné alebo iba pomaly sa meniace.

Hoci boli merania uskutočnené iba na vybraných mikroradičoch STM32, odporúčania je možné zovšeobecniť. Zvýšeniu presnosti odmerov môžu pomôcť jednak úpravy vonkajšieho obvodu tesne pred vstupom prevodníka ADC, ale tiež nastavenia parametrov použitého meracieho zariadenia. Niektoré typy úprav, uvedené v nasledujúcich bodoch, sú zmenené aj v [1].

Úpravy meracieho obvodu:

1. Použitie blokovacieho kondenzátora: Tento kondenzátor, zapojený tesne pred vstupom do prevodníka, spolu s odporom obvodu vytvorí RC filter a pomôže tak redukovať prúdové špičky a šum. Zároveň slúži ako zdroj nábojov pre prevodník. Jeho kapacita však musí byť voči kapacite meracieho kondenzátora dostatočná na to, aby neovplyvnila odmer – maximálne nabitie meracieho kondenzátora nesmie spôsobiť zmenu napätia na blokovačom kondenzátore, ktorá by bola väčšia ako polovica najmenej signifikantného bitu (LSB). Odporúčané hodnoty sa pohybujú rádovo v stovkách nF³⁴.
2. Uzemnenie nakonfigurovaných, ale nevyužívaných kanálov: Ako vyplynulo z meraní popísaných v predchádzajúcich kapitolách, ovplyvnenie vstupných charakteristík meraných kanálov vedľajšími kanálmi je pomerne silné. Nepripojené kanály navyše robia tieto vplyvy prakticky nepredvídateľné.

Nastavenie parametrov meracieho prístroja (mikroradiča):

1. Maximálna doba vzorkovania signálu: Každý mikroradič STM32 má možnosti voľby rozdielne, maximálne hodnoty sa pohybujú v stovkách hodinových cyklov. Frekvencia hodín prevodníka ADC je tiež nastaviteľná a v prípade potreby sa môže znížiť³⁵.
2. Voľba vzorkovacej frekvencie: Predchádzajúci bod spolu s voľbou počtu kanálov určuje maximálny možný vzorkovací kmitočet, avšak pre meranie obvodov s vysokou vstupnou impedanciou je vhodná podstatne nižšia vzorkovacia frekvencia (priemerný vstupný prúd totiž s frekvenciou rastie)³⁶.
3. Výber meracích kanálov: Pokiaľ je to možné, je vhodné si vybrať kanály so spoločným modelom vstupnej charakteristiky; ich výhodou je, že majú rovnaké vlastnosti. Charakteristiky by mali byť blízko svojmu lineárnemu modelu a rastúce v celom rozsahu. Ak toto spĺňa viacero kanálov, je príhodné si vybrať tie, čo majú menší sklon (smernicu), pretože tomu odpovedá užší intervalový rozsah strednej hodnoty prúdu.
4. Kalibrácia prevodníka ADC: Niektoré typy mikroradičov majú možnosť pred odmermi prevodník nakalibrovať z hodnôt uložených v registroch.
5. V niektorých prípadoch môže pomôcť medzi meracie kanály vložiť nakonfigurované uzemnené kanály, pokiaľ je dôležité zabrániť ich vzájomnému ovplyvňovaniu. Zároveň

³⁴ Ďalšie podrobnosti vrátane spôsobu odhadu vhodnej hodnoty blokovacieho kondenzátora sú uvedené v [1], kap. 4.4.

³⁵ Viac o nastavení doby vzorkovania a doby prevodu spolu s príkladmi vid' [1], kap. 4.2.6.

³⁶ Na realizáciu meracieho prístroja bola vedúcim práce požadovaná vzorkovacia frekvencia 100 Hz. Táto hodnota je zvolená aj preto, lebo minimalizuje skreslenie meraní spôsobené rušením z rozvodnej siete (50 Hz).

sa tým vstupná charakteristika meraného kanálu posunie maximálne smerom nahor, čo pri niektorých mikroradičoch so zvyškovým napätím blízkym 0 V znamená, že stredná hodnota prúdu bude (temer) v celom rozsahu vstupných napätí kladná. Všeobecne z meraní vyplýva, že voľbou veľkosti napätia pripojeného na predchádzajúci (nakonfigurovaný, ale nemeraný) kanál je možné posúvať prúdový interval meraného kanálu, čo sa môže ukázať v špeciálnych prípadoch ako užitočné.

6. Priemerovanie odmerov: Výsledky ukázali, že merania sú doprevádzané nežiaducim rušením a náhodným šumom. Vplyv náhodných chýb sa dá obmedziť opakovaním odmerov a následným spriemerovaním výsledkov, čo platí za predpokladu, že sa vstupné napätie počas týchto odmerov systematicky nezmení viac ako o polovicu LSB³⁷.
7. Cyklické vs. sekvenčné poradie odmerov kanálov: Z hľadiska minimalizácie veľkosti preneseného náboja by malo byť výhodnejšie pri odmeroch postupovať sekvenčne, čiže niekoľkokrát vykonať odmer jedného kanálu a hodnoty spriemerovať, potom prejsť na meranie ďalšieho kanálu (taktiež s opakovaním odmerov a priemerovaním výsledkov). Ako však bolo experimentálne zistené, meracie kondenzátory sa značne vybíjajú, takže prakticky rozdiel medzi cyklickým a sekvenčným odmerom kanálov nebude tak veľký a v niektorých prípadoch môže byť dokonca výhodnejší. Najväčšiu požiadavku na prenos náboja má meranie napätia na dvoch kanáloch, kde jeden je uzemnený a druhý pripojený na maximálne napätie (3,3 V). Nastavenie meracieho prístroja musí byť také, aby túto situáciu zvládol.

³⁷ Vedúcim práce odporúčaný počet priemerovaných hodnôt pre aplikáciu voltmetra je 40.

7 Realizácia jednoduchého meracieho prístroja

7.1 Využitie mikroradičov STM32 na realizáciu jednoduchých meracích prístrojov

Jednoduchý merací prístroj realizovaný na mikroradičoch STM32 môže slúžiť ako učebná pomôcka pre študentov a nadšencov, ktorí sa chcú zaoberať základmi elektroniky. S jeho pomocou je možné skúmať parametre elektrických obvodov skladajúcich sa z niekoľkých pasívnych a/lebo aktívnych členov, ako sú rezistory, kondenzátory, cievky, diódy a prípadne operačné zosilňovače.

Základom meracieho prístroja je viackanálový voltmeter, realizovaný pomocou analógovo-číslícového prevodníka (ADC). Voltmeter má niekoľko užívateľských funkcií:

- voliteľný počet odmerov, z ktorých sa spočíta aritmetický priemer a výsledok sa zobrazí ako nameraná hodnota;
- možnosť zobrazenia absolútnych hodnôt napätia na jednotlivých kanáloch a diferenčných meraní napätia medzi kanálmi;
- možnosť nulovania výstupu.

Výsledky meraní sa zobrazujú na monitore počítača, ku ktorému je mikroradič pripojený, prostredníctvom terminálovej aplikácie (napr. PuTTY). Alternatívne je možné výstupy z meraní ukladať do súboru v režime záznamu. Základná komunikácia s užívateľom je jednoznaková pomocou klávesnice počítača.

Ďalšou aplikáciou meracieho prístroja je generátor. Základ tvorí dvojkanálový generátor napätia s moduláciou šírky pulzu (generátor PWM), s možnosťou nastavenia frekvencie a striedy pulzu a synchronizácie oboch kanálov. V prípade, že mikroradič obsahuje číslicovo-analógový prevodník (prevodník DAC), je možné realizovať aj generátor jednosmerného napätia.

7.2 Merací prístroj realizovaný na mikroradiči STM32F303RE

Pri realizácii meracieho prístroja bolo použité vývojové prostredie *STM32CubeIDE* od spoločnosti *STMicroelectronics* [4]. Pomocou tohto nástroja bola nastavená základná konfigurácia použitých periférií s automatickým generovaním kódu a využívajúcim dostupné knižnice ovládačov hardvéru (tzv. HAL - *Hardware Abstraction Layer*) od *STMicroelectronics*.

Jednoduchý merací prístroj zahŕňa štvorkanálový voltmeter s nakonfigurovanými kanálmi IN6 PC0, IN7 PC1, IN8 PC2 A IN9 PC3 prevodníka ADC1 s meracím rozsahom $0\text{ V} \div 3,3\text{ V}$ a vzorkovacou frekvenciou 100 Hz. Ďalšie dva kanály sledujú teplotu procesoru a napájacie napätie prevodníkov V_{DDA} . Doba sledovania signálu je maximálna (601,5 hodinových cyklov), čomu odpovedá celková doba konverzie 8,528 μs . Odmery sú spúšťané časovačom a zber nameraných hodnôt prebieha automaticky pomocou DMA (*Direct Memory Access*) raz za

vzorkovaciu periódu 100 Hz. Zobrazené sú namerané absolútne hodnoty napätia pre každý kanál aj diferenčné hodnoty medzi vedľajšími kanálmi vo voltoch.

Voltmeter má niekoľko voliteľných funkcií. Je možné nastaviť počet vzoriek v rozsahu $1 \div 1000$, z ktorých sa bude zobrazovať ich priemerná hodnota (východzie nastavenie je 40 vzoriek). Disponuje tiež funkciou nastavenia kompenzácie odchýlky (*offset*) na aktuálnu hodnotu. Výsledky meraní sa dajú uložiť do súboru v režime záznamu.

Merací prístroj ďalej obsahuje jednoduchý generátor konštantného napätia v rozsahu $0 \text{ V} \div 3,3 \text{ V}$, vyvedený na pin PA4³⁸, a dvojkanálový generátor PWM, dostupný na pinoch PB4 a PB6 s frekvenciou nastaviteľnou v rozsahu $1 \text{ Hz} \div 1 \text{ MHz}$ a striedou nastaviteľnou s presnosťou na jedno percento. PWM má implementovanú funkciu synchronizácie kanálov, ktorú je možné použiť (v prípade, že oba kanály pracujú na rovnakom kmitočte) na zviazanie oboch kanálov na nábežnú hranu.

Multimeter zobrazuje svoj výstup na monitore pripojeného počítača s využitím jednoduchého terminálového rozhrania (napr. PuTTY), pričom využíva základné ANSI ESC sekvencie. Pripojenie je realizované cez ST-link pomocou rozhrania UART. Komunikácia s užívateľom je jednoznaková, možnosti voľby sa priebežne zobrazujú vo forme nápovedy.

Ukážka z aplikácie meracieho prístroja na Nucleo-F303RE je znázornená na obr. 59.

```

COM6 - PuTTY
Multimeter ST 1.2.0
Nucleo-F303RE
Application: Voltmeter
Sample frequency: 100 Hz
Samples per average: 40
VDDA: 3.315 V
TEMP: 38.0 °C

PC0: 0.682 V    PC1: 0.392 V    PC2: 0.310 V    PC3: 0.285 V
PC1-PC0: -0.290 V    PC2-PC1: -0.082 V    PC3-PC2: -0.025 V

Application: Generator
Channel to edit: PB4
PB4:  PWM    10000.000 Hz    0.000 %
PB6:  PWM    10000.000 Hz    0.000 %
PA4:  DAC     0.000 V

SPACE : redraw screen
0 .. 9 : write numbers
n : set number of samples per average
q : leave without change

Set number of samples per average (1 .. 1000): 100

```

Obr. 59: Ukážka realizácie meracieho prístroja na Nucleo-F303RE

³⁸ Skutočný rozsah je mierne zúžený: $0,075 \text{ V} \div 3,245 \text{ V}$ (kap. 5.1.4).

8 Záver

Táto práca sa zaoberala chovaním vstupov analógovo-číslicových prevodníkov vybraných mikroradičov STM32 z hľadiska vstupných prúdov. Bola navrhnutá a realizovaná meracia aparátúra, pomocou ktorej sa uskutočnili rozsiahle merania vstupných charakteristík pre všetky vyvedené kanály a prevodníky týchto mikroradičov. K tomu boli pripravené programy pre jednotlivé mikroradiče, ktoré proces odmerov riadili a výsledky meraní zaznamenávali, a tiež programy na následné spracovanie a prezentáciu dát. Ďalej bol odvodený jednoduchý model chovania vstupu prevodníka a na základe nameraných dát boli pre jednotlivé kanály mikroradičov odhadnuté jeho parametre.

Namerané vstupné charakteristiky udávajú veľkosť náboja preneseného vstupom analógovo-číslicového prevodníka počas jedného odmeru v závislosti od veľkosti vstupného napätia. Pri danej vzorkovacej frekvencii je možné charakteristiky prepočítať a vyjadriť tiež ako strednú hodnotu prúdu pretekajúceho vstupom prevodníka počas jedného odmeru v závislosti od veľkosti vstupného napätia. Získaním námerov týchto charakteristík pre vybrané mikroradiče STM32 bola splnená kľúčová časť zadania práce.

Nadväzujúce dopĺňujúce merania nielen overovali robustnosť nameraných údajov vzhľadom na nastavenie vybraných parametrov meracej aparatúry, ale zároveň pomáhali objasniť podstatu niektorých procesov, ktoré pri meraní prebiehajú. Potvrdil sa výrazný vplyv konfigurácie vedľajších kanálov, keď vstupná charakteristika závisí na veľkosti napätia privedeného na predchádzajúci kanál. Odhady parametrov náhradných modelov pri rôznych vzorkovacích frekvenciách zasa viedli k záveru, že chovanie vstupu prevodníka nie je týmto modelom dostatočne vysvetlené a bol pripravený návrh modelu rozšíreného o únikový prúd. Analýza a vzájomné porovnávanie charakteristík meraných mikroradičov viedli k niekoľkým odporúčaniam, ktoré boli aplikované pri ukážke realizácie meracieho prístroja na mikroradiči STM32F303RE.

Celkovo sa dá zhodnotiť, že sa cieľ práce sa podarilo splniť, čo však neznamená, že by sa práca nedala viac obohatiť. Napríklad, merania by sa dali vykonať pre mnoho ďalších typov mikroradičov nielen zo skupiny STM32. Z hľadiska chovania vstupov prevodníkov by zasa bolo možné pracovať s modelom rozšíreným o únikový prúd a experimentálne overiť platnosť jeho predpokladov i vysvetľujúcu schopnosť modelu. Vzhľadom na to, že tieto rozšírenia by si vyžadovali uskutočnenie nemálo ďalších meraní a analýz, zostávajú nateraz nezrealizované.

Referencie

- [1] STMICROELECTRONICS. *AN2834 Application Note: How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontrollers* [online]. Revízia 8. STMicroelectronics, 2008 [cit. 12. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [2] STMICROELECTRONICS. *RM0316 Reference manual: STM32F303xB/C/D/E, STM32F303x6/8, STM32F328x8, STM32F358xC, STM32F398xE advanced ARM®-based MCUs* [online]. Revízia 8. STMicroelectronics, 2013 [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [3] RULÍK, Jan. *Programy pro charakterizaci vstupního proudu ADC v mikrořadičích STM32*. Praha, 2017. Dostupné také z: <https://dSPACE.cvut.cz>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, Katedra měření. Vedoucí práce Jan Fischer.
- [4] *STM32CubeIDE: Integrated Development Environment for STM32* [online]. In: . STMicroelectronics, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
- [5] *Python* [online]. Python Software Foundation [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.python.org>
- [6] PEDREGOSA, Fabian, Gael VAROQUAUX a Alexandre GRAMFORT. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* [online]. 10/11, **2011**(12), 2825-2830 [cit. 2022-05-15]. ISSN 1532-4435. Dostupné z: <https://jmlr.csail.mit.edu/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>
- [7] *Linear Models: Ordinary Least Squares* [online]. In: . Scikit-learn, c2007-2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://scikit-learn.org/stable/modules/linear_model.html#ordinary-least-squares
- [8] *Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions: R² score, the coefficient of determination* [online]. In: . Scikit-learn, c2007-2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html#r2-score
- [9] HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [10] STMICROELECTRONICS. *DS12589 Datasheet: STM32G431x6 STM32G431x8 STM32G431xB* [online]. Revízia 6. STMicroelectronics, 2019 [cit. 13. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>

- [11] STMICROELECTRONICS. *DS10362 Datasheet: STM32F303xD STM32F303xE* [online]. Revízia 5. STMicroelectronics, 2015 [cit. 12. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [12] STMICROELECTRONICS. *DS10314 Datasheet: STM32F411xC STM32F411xE* [online]. Revízia 7. STMicroelectronics, 2014 [cit. 13. 5. 2022]. DocID026289. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [13] STMICROELECTRONICS. *DS10198 Datasheet: STM32L476xx* [online]. Revízia 8. STMicroelectronics, 2015 [cit. 13. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [14] STMICROELECTRONICS. *DS10693 Datasheet: STM32F446xC/E* [online]. Revízia 10. STMicroelectronics, 2015 [cit. 13. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [15] STMICROELECTRONICS. *DS12992 Datasheet: STM32G031x4/x6/x8* [online]. Revízia 3. STMicroelectronics, 2019 [cit. 13. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com>
- [16] TRETTER, Kevin. Understanding the Function of Analog-to-Digital (ADC) Drivers. In: *Microchip* [online]. Microchip [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.microchip.com>

Prílohy

A Zoznam použitých symbolov

C_{ADC}	merací kondenzátor prevodníka ADC resp. jeho kapacita
\hat{C}_{ADC}	odhad kapacity meracieho kondenzátora prevodníka ADC z náhradného modelu
R_{ADC}	vstupný odpor v náhradnej schéme vstupu prevodníka ADC
S_{ADC}	spínač v náhradnej schéme vstupu prevodníka ADC
τ_{ADC}	časová konštanta
t_s	doba sledovania prevodníka ADC
t_{conv}	celková doba konverzie
T_s	vzorkovacia perióda
u_{in}	napätie na zápornom vstupe v náhradnej schéme nábojového zosilňovača; vstupné napätie prevodníka ADC
U_r	výstupné (konštantné) napätie generované prevodníkom DAC (riadené programom)
U_{zv}	zvyškové napätie namerané na pine prevodníka ADC po skončení odmeru
\hat{U}_{zv}	odhad zvyškového napätia kanálu prevodníka ADC z náhradného modelu
U_{in}	vstupné (konštantné) napätie prevodníka ADC v procese odmeru
Q_s	veľkosť náboja, ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru
f_s	vzorkovací kmitočet prevodníka ADC
I_{str}	stredná hodnota prúdu, ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jedného odmeru
u_r	napätie na kladnom vstupe v náhradnej schéme nábojového zosilňovača
C_{int}	integračný kondenzátor, resp. jeho kapacita v náhradnej schéme nábojového zosilňovača
u_{out}	výstupné napätie v náhradnej schéme nábojového zosilňovača
N	počet odmerov pri integrácii napätia na integračnom kondenzátore C_{int}
U_0	počiatočná hodnota výstupného napätia nábojového zosilňovača pred spustením odmerov
U_N	hodnota výstupného napätia nábojového zosilňovača po realizácii N odmerov
Q_{int}	veľkosť náboja, ktorý vtečie do integračného kondenzátora C_{int} počas N odmerov
C_B	blokovací kondenzátor, resp. jeho kapacita na vstupe ADC prevodníka
u_{switch}	logický signál riadiaci prepínač v schéme zapojenia meracieho obvodu
N_c	počet odmerov použitých na prednabitie integračného kondenzátora C_{int}
M	počet opakovaní jednej sady odmerov
Q^P	veľkosť náboja, ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jednej periódy
Q_k^P	veľkosť náboja, ktorý pretečie vstupom prevodníka ADC počas jednej periódy pre k meraní jedného kanálu v rámci periódy
I_L	únikový prúd resp. jeho stredná hodnota v rozšírenom náhradnom modeli vstupu prevodníka ADC
I_0	stredná hodnota únikového prúdu pri vstupnom napätí 0 V
R_L	odpor resp. jeho veľkosť, ktorú má dráha únikového prúdu v rozšírenom náhradnom modeli vstupu prevodníka ADC

B Obsah elektronickej prílohy

/BP_DataProcessing	Súbory programu na spracovanie dát (<i>Python 3</i>)
/source_files	- zdrojové súbory
/destination_files	- namerané vstupné charakteristiky prevodníkov ADC (programom vygenerované súbory)
/Multimeter_ST	Súbory programu na vykonanie odmerov s využitím <i>STM32CubeIDE (C/C++)</i>
/README.md	- základný popis adresára s programom
/Nucleo-F303RE.hex	- kompilovaná aplikácie Multimeter_ST vo formáte vhodnom pre <i>ST-LINK Utility</i>