

Bakalářská práce

Programy pro charakterizaci vstupního proudu ADC v mikrořadičích STM32

Jan Rulík



Září 2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Katedra měření

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Podpis autora práce

Poděkování

Velmi bych chtěl poděkovat doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za odborné vedení mé práce a trpělivost a ochotu při konzultacích probírané problematiky. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mě při studiích nepřestala podporovat.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Rulík**

Studijní program: **Otevřená informatika**
Obor: **Počítačové systémy**

Název tématu česky: **Programy pro charakterizaci vstupního proudu ADC v mikrořadičích STM32**

Název tématu anglicky: **Software for ADC Input Current Characterisation in the STM32 Microcontrollers**

Pokyny pro vypracování:

Nastudujte problematiku vnitřních převodníků ADC na čipu mikrořadičů řady STM32 a při tom se orientujte na analýzu chování vstupů ADC z hlediska vnějších budicích obvodů, které jsou tak při vzorkování zatěžovány impulsními proudy.

Vytvořte programy pro mikrořadiče i pro nadřazené PC, s jejichž pomocí se získají data, podle nichž bude možno charakterizovat chování vstupu ADC a vytvořit jeho model. Proveďte podrobná měření na zástupcích všech rodin mikrořadičů STM 32, zpracujte data a vytvořte model chování jednotlivých ADC v mikrořadičích řady STM32. Na základě získaných poznatků definujte obecné zásady tvorby programů pro testování chování vstupů ADC i v mikrořadičích jiných řad.

Seznam odborné literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors,
- [2] STMicroelectronics: DS10362 - STM32F303RE Data sheet
- [3] STMicroelectronics: RM0316 - STM32F3 Reference manual

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 19. ledna 2017

Platnost zadání do¹: 30. září 2018



Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 1. 2017

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Abstrakt

Tato práce se zabývá vstupními proudy AD převodníků procesorů STM32 se zaměřením na rozlišení společných vlastností napříč jednotlivými sériemi. Výstupem práce je charakterizace vstupních proudů do jednotlivých převodníků a vytvoření jejich modelu. Spolu s tím byly vytvořeny metody měření těchto proudů.

Klíčová slova

mikrořadiče STM32, AD převodník, vstupní proud

Abstrakt

This work deals with input current of AD converters of STM32 processors with a focus on the differentiation of common properties across individual series. The output of the thesis is the characterization of the input currents to individual converters and the creation of their model. Meanwhile, methods of measuring these currents have been developed

Keywords

microcontrolers STM32, AD convertor, input current

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozbor zadání	2
3	Vývojové prostředí a využití mikrokontroléry	3
3.1	Využití mikrokontroléry	3
3.2	Vývojové prostředí	3
3.3	Další využití prostředky	3
4	AD převodník v STM32 procesorech	5
4.1	Metoda postupné aproximace	5
4.1.1	12-bit AD převodník	5
4.2	Použití Sampling and hold obvodu	6
4.2.1	Sampling time	7
5	Model vstupu AD převodníku z hlediska určení jeho vstupních proudů	9
5.1	Model vstupního proudu	9
5.2	Metody měření	10
6	Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem	11
6.1	Převod náboje na naintegrované napětí	12
6.2	Schéma zapojení a použité součástky	15
6.3	Postup měření	16
6.4	Měření zbytkového napětí	17
6.5	Parametry měření a reprezentace naměřených dat	18
6.6	Naměřená data	22
6.6.1	STM32F042, STM32F051, STM32F072, STM32F100, STM32F103	22
	STM32F042	22
	STM32F051	24
	STM32F072	28
	STM32F100	30
	STM32F103	32
	Shrnutí	33
6.6.2	STM32F303	33
	Shrnutí	37
6.6.3	STM32F407, STM32F410, STM32F411, STM32F446	37
	STM32F410	37
	STM32F411	42
	STM32F407	44
	STM32F446	46
	Shrnutí	48
6.6.4	STM32L031, STM32L053, STM32L073	48
	STM32L031	48
	STM32L053	50
	STM32L073	52
	Shrnutí	54
6.6.5	STM32L100, STM32L152	55
	STM32L100	55

STM32L152	57
Shrnutí	59
6.6.6 STM32L432, STM32L476	59
STM32L432	60
STM32L476	61
Shrnutí	65
6.6.7 BBC Micro:bit	65
Shrnutí	71
6.6.8 Shrnutí výsledků	71
7 Měření napětí v zapojení s rezistorem	73
7.1 Porovnání modelu se skutečnými hodnotami	73
7.2 Použité součástky	74
7.3 Postup měření	74
7.4 Nastavení výstupu DA převodníku	74
7.5 Převodní tabulka mezi hodnotami nastavené DA převodníkem a měřeným výstupním napětím	75
7.6 Měření zbytkového napětí	76
7.7 Parametry měření a reprezentace naměřených dat	77
7.7.1 STM32F051, STM32F100	81
7.7.2 Shrnutí	82
8 Využití zjištěných informací	83
8.1 Měření v zapojení s rezistorem a korekce naměřených hodnot	83
8.2 Použité součástky	85
8.3 Postup měření	85
8.4 Naměřená data a jejich korekce dle modelu	85
8.4.1 Shrnutí	90
9 Závěr	91
Literatura	92

1 Úvod

Tato práce má za úkol navrhnout metody měření vstupních proudů do AD převodníků mikrokontrolérů STM32, charakterizovat je a vytvořit modely jejich chování.

Používání mikrokontrolérů je každým dnem rozšířenější a vnitřní AD převodník těchto mikrokontrolérů je často využíván pro převod analogových hodnot napětí z různých měřicích zařízení na hodnoty digitální pro další procesorové zpracování. Pokud jsou prováděny jednotlivé odměry AD převodníkem vysokými frekvencemi, je vnější budící obvod zatížen vstupním proudem do AD převodníku a to může zanášet chybu do měření výsledného napětí. Výstupem této práce je charakterizace těchto vstupních proudů, porovnání s modelovými průběhy pro AD převodníky jednotlivých procesorů STM32 a také charakterizace těchto AD převodníků v rámci jednotlivých řad procesorů STM32.

2 Rozbor zadání

Proudy tekoucí do AD převodníku mohou být velký problém při potřebě přesného měření napětí. Pokud bude impedance vnějšího zdroje napětí větší a/nebo bude větší i frekvence vzorkování, může docházet k velké chybě při měření toho napětí. Jelikož proud, který do AD převodníku při vzorkování vtéká, není v dostupných dokumentech k procesorům ST dohledatelný, tato práce se bude zabývat jeho měřením a charakterizací.

Měření jednotlivých procesorů STM32 bude prováděno na vývojových kitech od firmy ST. Tyto kity mají vyvedeny piny jednotlivých bran tak, že je již jednoduché je použít pro toto měření.

Pro každý procesor bude změřeno chování několika vybraných kanálů AD převodníku, aby se potvrdilo, nebo vyvrátilo, stejné chování vstupních proudů pro jednotlivé kanály. V případě, že procesor obsahuje více AD převodníků, budou změřeny i tyto.

Navrhnuty budou dvě metody měření vstupních proudů. Jedna se zapojením operačního zesilovače jako integrátoru napětí, kde se protékající náboj převádí na naintegrované napětí na kondenzátoru, které je dále změřeno a dle jeho velikosti modelován i vstupní/výstupní proud do AD převodníku. Druhá metoda pracuje s úbytkem napětí na odporu při vyšších frekvencích odměřů AD převodníkem. Dle velikosti úbytku napětí lze odvodit vstupní/výstupní proud z Ohmova zákona.

Hodnoty jednotlivých měření budou zasilány přes UART do nadřazeného PC, kde budou zaznamenány a bude vytvořena charakteristika průběhu vstupního/výstupního proudu pro jednotlivé mikrokontroléry.

Změřené výsledky budou porovnány s teoretickým modelem, předpokladem, jak by se vstupní proudy do jednotlivých AD převodníků mohly chovat. Podle podobných charakteristik a vlastností převodníků v jednotlivých mikrokontrolérech lze následně usuzovat na použití stejných převodníků u různých mikrokontrolérů a dle toho budou i výsledky seřazeny.

Jednou z metod bude měření převodník v mikrokontroléru jiné firmy než ST (konkrétně od firmy Nordic v kitu BBC Micro:bit).

Nakonec se využijí získaná data k zpřesnění měření napětí zdroje s větším vnitřním odporem a při vyšších frekvencích vzorkování.

3 Vývojové prostředí a využití mikrokontroléry

3.1 Využití mikrokontroléry

Pro měření byly využity tyto mikrokontroléry: STM32F042, STM32F051, STM32F072, STM32F100, STM32F103, STM32F303, STM32F407, STM32F410, STM32F411, STM32F446, dále STM32L031, STM32L053, STM32L073, STM32L100, STM32L152, STM32L432 a STM32L476. Tyto procesory byly na Discovery a Nucleo vývojových kitech. Dále bylo provedeno měření i na kitu od BBC Micro:Bit s procesorem Nordic nRF51822 [1].

3.2 Vývojové prostředí

Programy pro jednotlivé mikrokontroléry byly psané v jazyce C, v prostředí Keil (přesněji μ Vision) s využitím HAL knihoven od STMicroelectronics. Dále bylo využito prostředí Mbed. K počáteční konfiguraci jednotlivých mikrokontrolérů byl využit také program CubeMX od STMicroelectronics.

Vývojové prostředí μ Vision od Keil je vývojové prostředí pro programování ARM procesorů. Obsahuje typickou správu projektů, C/C++ compiler a debugger s real-time zobrazením nastavení jednotlivých periférií. Nevýhodou může být omezená maximální velikost kódu při využití free verze tohoto programu (maximálně 32 kB).

Vývojové prostředí Mbed je internetové vývojové prostředí, kde psaní kódu i kompilace probíhá na serverech Mbedu. Výhodou využití tohoto vývojového prostředí je, že se o veškeré konfigurace stará samo prostředí. Mbed podporuje řadu mikrokontrolérů (včetně mikrokontrolérů od ST), při vytvoření nového projektu tedy stačí zvolit jeden z podporovaných mikrokontrolérů a následně si nechat vygenerovat projekt s již předpřipravenou konfigurací periférií. Výhodou je rychlost vytvoření nového kódu a jeho přenositelnost mezi jednotlivými mikrokontroléry. Velkou nevýhodou je, že uživatel nemá přehled jak a jaké periférie jsou nakonfigurovány (v některých případech lze změnit určité nastavení jednotlivých periférií, jako je např. rychlost komunikace po UART). K tomu také nepomůže chudá dokumentace knihoven od Mbed.

Program CubeMX od ST slouží k rychlejší konfiguraci jednotlivých mikrokontrolérů. Po zvolení vybraného mikrokontroléru k programování lze intuitivněji aktivovat a nakonfigurovat zvolené periférie. Následně je vygenerován kód pro zvolené vývojové prostředí (v mém případě Keil μ Vision5), který je dále možno rozšiřovat uživatelem.

3.3 Další využití prostředky

Komunikace mezi mikrokontroléry a nadřazeným počítačem probíhala přes UART, využít proto byl terminálový program Putty. Vývojové kity Nucleo mají zabudovaný vnitřní USB-UART převodník. Pro komunikaci přes UART u vývojových kitů Discovery byl použit USB-UART převodník CP2102 od Silicon Labs. V některých případech

3 Vývojové prostředí a využití mikrokontroléry

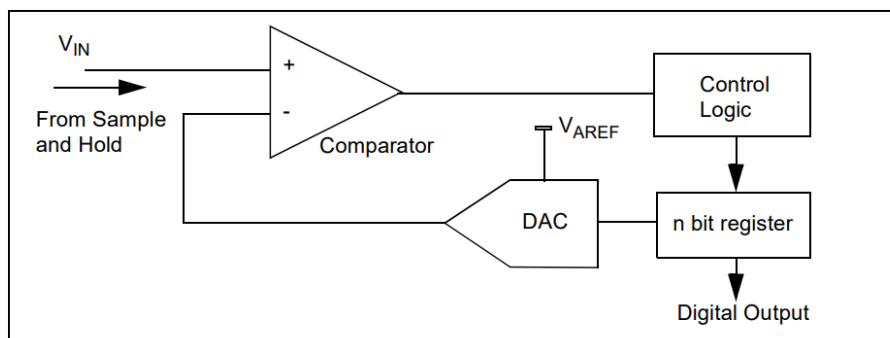
byl dále použit program ST-link Utility pro nahrání firmware do jednotlivých mikrokontrolérů.

4 AD převodník v STM32 procesorech

Ačkoli se AD převodníky v jednotlivých procesorech STM32 mohou lišit svými vlastnostmi a parametry, princip jejich fungování je shodný. Jedná se o 12-bitové AD převodníky s postupnou aproximací a sample and hold obvodem [2] .

4.1 Metoda postupné aproximace

Princip metody postupné aproximace (successive approximation) spočívá v postupné konverzi měřeného napětí na digitální hodnotu. Provádí se po krocích a v každém kroku je porovnáváno napětí na samplovacím kondenzátoru s napětím nastaveném na výstupu DA převodníku. Porovnáním se získá příslušný bit konverze a na DA převodníku se nastaví další hodnota výstupního napětí. Porovnávání pak probíhá znovu pro další bit digitální hodnoty, dokud není vyhodnocen poslední bit.



Obrázek 1 Blokový diagram postupné aproximace [2]

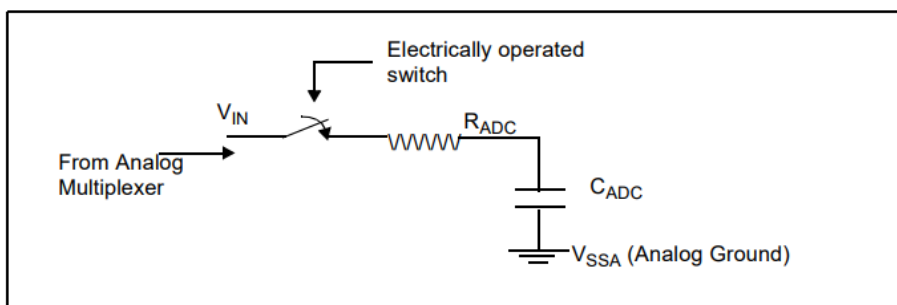
Výhoda této metody spočívá v použití méně součástek, než například u komparačních AD převodníků (kdy je potřeba na převodník s rozlišením n -bitů použít $2^n - 1$ komparátorů) při zachování relativně rychlého času převodu (minimální čas u n -bitového AD převodníku s postupnou aproximací je n tiků hodin AD převodníku (u AD převodníku STM32 typicky 12,5 tiků hodin AD převodníku na převod analogové hodnoty na digitální)).

4.1.1 12-bit AD převodník

Jak již bylo řečeno, procesory STM32 používají 12-bitové AD převodníky. Převodník tak dokáže rozlišit až 4096 napětových úrovní od 0 V do napájecího napětí převodníku (typicky 3,3 V (v některých případech jen 3V)). V případě napájecího napětí 3,3 V je velikost mezi jednotlivými napětovými úrovněmi $3,3/4096 = 0,806$ mV, což je tedy i nejnižší rozlišovací schopnost AD převodníku (v ideálním případě by zvýšení měřeného napětí o 0,806 mV mělo vyvolat změnu digitální hodnoty o 1).

4.2 Použití Sampling and hold obvodu

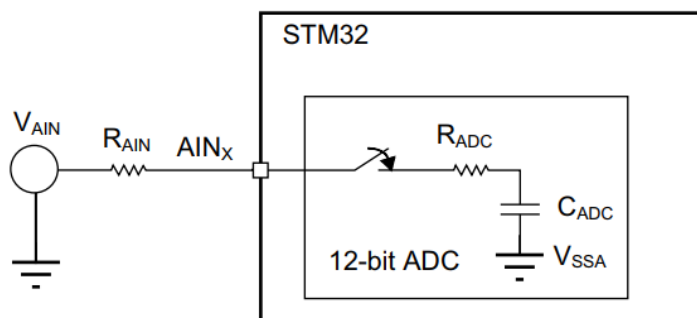
Měření napětí vnějšího obvodu probíhá za pomoci sampling and hold obvodu, tedy přepínače a smplovacího kondenzátoru.



Obrázek 2 Sample and Hold obvod [2]

Po příkazu pro převod AD převodníkem se přepínač nastaví do sepnutého stavu a smplovací kondenzátor C_{adc} (obvykle s kapacitou v jednotkách pF.) se nabije na napětí vnějšího obvodu V_{in} . Doba trvání sepnutí se nazývá sampling time (více v 4.2.1) a udává se v počtu tiků hodin AD převodníku. Po rozepnutí spínače se spustí samotný převod metodou postupné aproximace. R_{adc} je vnitřní odpor AD převodníku, obvykle se pohybuje v řádech k Ω . V některých aplikacích je třeba na něj brát zřetel, jelikož prodlužuje časovou konstantu pro nabíjení smplovacího kondenzátoru C_{adc} a proto při malém sampling time může do výsledku zanést chybu, jelikož se C_{adc} nestihne plně nabít na napětí V_{in} .

Stejný problém, obvykle ve větším měřítku, způsobí také imedance vnějšího zdroje napětí:



Obrázek 3 Zapojení AD převodníku na vnější zdroj napětí s impedancí R_{ain} [3]

V případě, že R_{ain} bude nabývat větších hodnot (řádově desítky až stovky k Ω) a při nastavení malého sampling time (popřípadě zvednutí frekvence hodin AD převodníku), může z již zmíněného důvodu, dojít k chybě v měření vnějšího napětí. Výpočet v následující kapitole (4.2.1).

4.2.1 Sampling time

Sampling time je doba sepnutí přepínače pro nabití samplovacího kondenzátoru C_{adc} . Udává se v počtu tiků hodin AD převodníku, obvykle od jednotek po stovky tiků. Zmenšením sampling time dojde ke zrychlení koverze, ale vlivem odporu R_{adc} a odporu vnějšího zdroje napětí nemusí dojít k plnému nabití samplovacího kondenzátoru C_{adc} na napětí vnějšího obvodu, a tudíž může být výsledný převod zkreslen.

Jako příklad uvedu mikrokontrolér STM32F051. Sampling time můžeme nastavit 1,5 až 239,5 tiků hodin AD převodníku, kapacita C_{adc} je 8 pF, R_{adc} je 1 k Ω (dle datasheetu [4]). Zvolím velikost odporu vnějšího zdroje jako $R_{in} = 100$ k Ω . Časová konstanta τ je rovna:

$$\tau = (R_{in} + R_{adc}) * C_{adc}$$

Jelikož $R_{adc} \ll R_{in}$, mohu ho pro zjednodušení zanedbat, následně rovnice vypadá takto:

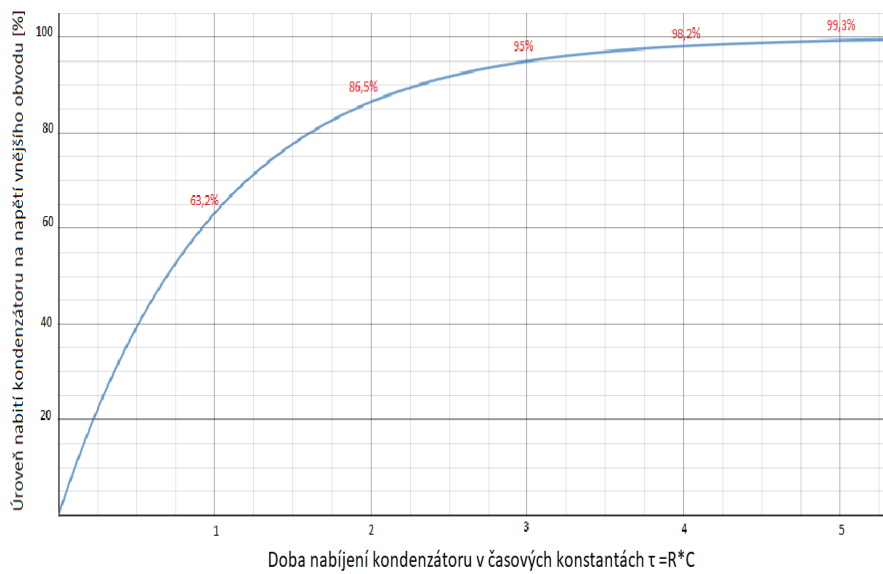
$$\begin{aligned}\tau &= R_{in} * C_{adc} \\ \tau &= 1 * 10^5 * 8 * 10^{-12} \text{ s} \\ \tau &= 8 * 10^{-7} \text{ s}\end{aligned}$$

Kondenzátor C_{adc} je nabit po době τ na 63,2%, po 5τ na 99,3% a po 10τ na 99,99% V_{in} (napětí na kondenzátoru V_{adc} odpovídá průběhu $V_{adc} = V_{in} * (1 - e^{-t/\tau})$, kde t je doba nabíjení, viz obrázek 4). V případě, že hodiny AD převodníku budou nastaveny na 1 MHz je doba odměru (sepnutí spínače) při nastavení nejmenšího sampling time (1,5) rovna $1,5 * 10^{-6}$ s, při sampling time 239,5 pak $2,395 * 10^{-4}$ s.

Při zvolení sampling time 1,5 tiků hodin AD převodníku se provádí samplování jen po dobu $(1,5 * 10^{-6}) / (8 * 10^{-7}) = 1,875\tau$ a samplovací kondenzátor se nabije jen na napětí $V_{adc} = V_{in} * (1 - e^{-1,875\tau/\tau}) = 0,85V_{in}$, tedy na 85% velikosti nabíjecího napětí. Změřená hodnota napětí bude o 15% menší, než skutečná hodnota na vstupu.

Při zvolení sampling time na 239,5 tiků hodin převodníku se AD převodník nabíjí po dobu $(2,395 * 10^{-4}) / (8 * 10^{-7}) = 299,375\tau$, což je prakticky nabití na 100% vstupního napětí (obvykle dostačuje nabíjení po dobu 5τ , kdy lze kondenzátor považovat za plně nabit).

4 AD převodník v STM32 procesorech

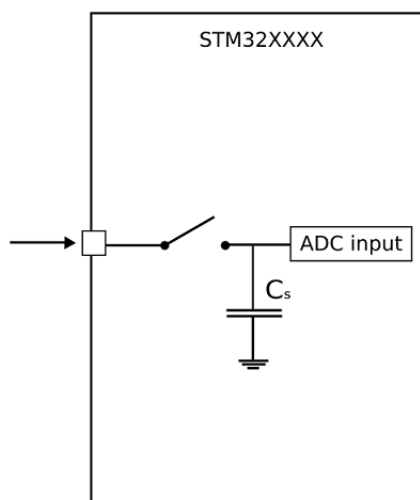


Obrázek 4 Průběh nabíjení kondenzátoru

Dle grafu je vidět, že při době minimálně 5τ je již kondenzátor nabit na 99,3%.

5 Model vstupu AD převodníku z hlediska určení jeho vstupních proudů

Jak již bylo zmíněno, měření AD převodníkem probíhá za použití vnitřního samplovacího kondenzátoru (v dalším značení C_s):



Obrázek 5 Schéma zapojení samplovacího kondenzátoru

Ten je od začátku do konce jednoho odměru nabíjen (nebo vybíjen) vnějším obvodem. To, zda kondenzátor bude nabíjen nebo vybíjen, záleží na velikosti napětí na kondenzátoru před začátkem odměru (tzv. zbytkové napětí, nebo také vnitřní napětí převodníku) a velikosti napětí na vnějším připojeném obvodu. Pokud je napětí na vnějším obvodu větší, než zbytkové napětí na kondenzátoru C_s , pak do kondenzátoru vtéká náboj a tím je nabíjen na napětí vnějšího obvodu. Pokud je menší, pak naopak náboj teče z kondenzátoru ven do vnějšího obvodu a kondenzátor je tímto vybíjen.

5.1 Model vstupního proudu

Velikost náboje Q_1 na samplovacím kondenzátoru C_s před odměrem je:

$$Q_1 = C_s * U_{zbyt}$$

Kde:

U_{zbyt} – zbytkové napětí na samplovacím kondenzátoru před odebráním vzorku
 C_s – kapacita samplovacího kondenzátoru

Velikost náboje Q_2 po odměru:

$$Q_2 = C_s * U_{vnej}$$

Kde:

U_{vnej} – Napětí na smplovacím kondenzátoru po odměru (neboli napětí vnějšího obvodu)

Změna náboje na kondenzátoru C_s je pak:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= Q_2 - Q_1 \\ \Delta Q &= (C_s * U_{vnej}) - (C_s * U_{zbyt}) \\ \Delta Q &= C_s * (U_{vnej} - U_{zbyt})\end{aligned}$$

a kladná velikost změny náboje odpovídá směru toku náboje do smplovacího kondenzátoru C_s .

Velikost náboje, který z kondenzátoru C_s „vytekl“, je tedy závislá na velikosti zbytkového napětí U_{zbyt} , napětí vnějšího obvodu a velikosti kapacity samotného C_s .

Proud je změna náboje za čas, tedy:

$$I = \Delta Q / t$$

Jestliže bude AD převodník vzorkovat přesně danou frekvencí, pak by se střední hodnota proudu, který do něj vtekl (nebo z něj vytkl) měla rovnat:

$$I = \Delta Q * f$$

Po dosazení za ΔQ vyjde modelová rovnice pro výpočet velikost vstupního proudu:

$$I = C_s * (U_{vnej} - U_{zbyt}) * f \quad (1)$$

Kde:

I - střední hodnota proudu tekoucí z/do AD převodníku

f - frekvence smplování a kladná velikost proudu odpovídá směru toku náboje do AD převodníku.

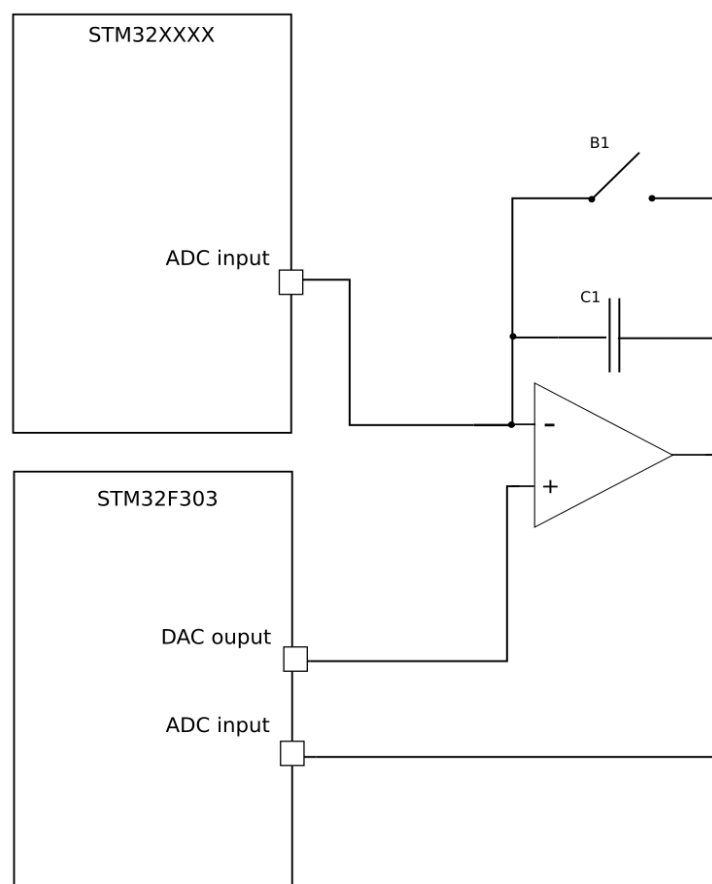
Teoreticky bychom tedy měli vzorcem (1) zjistit velikost proudu tekoucího z/do AD převodníku. Pro vypočítání proudu dle tohoto vzorce je nutné znát velikost smplovacího kondenzátoru C_s , velikost napětí vnějšího obvodu, velikost zbytkového napětí (napětí na kondenzátoru C_s před odměrem) a frekvenci smplování. Mým cílem je ověřit platnost tohoto vzorce, popřípadě zjistit, jak se vstupní proudy do AD převodníků jednotlivých mikrokontrolérů od tohoto modelu liší.

5.2 Metody měření

Pro měření vstupních proudů byly navrženy dvě metody měření. Jedna metoda využívá zapojení s operačním zesilovačem jako integrátoru napětí a měří se náboj naintegrovaný vzorkováním AD převodníku. Druhá za použití minima součástek, jejíž zapojení se skládá pouze z odporu a kondenzátorů. Při této metodě se pracuje se střední hodnotou proudu protékajícím odporem. Obě metody jsou vysvětleny v následujících kapitolách.

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

První z vybraných metod je metoda se zapojením operačního zesilovače jako napěťového integrátoru. V tomto případě se přenášený náboj z/do AD převodníku převádí na naintegrované napětí na kondenzátoru, které je poté změřeno a dle toho lze určit i velikost přeneseného náboje a odvodit vstupní/výstupní proud.



Obrázek 6 Zjednodušené schéma zapojení s operačním zesilovačem

Na invertujícím vstupu je připojen vstup AD převodníku testovaného mikrokontroléru. Na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače je připojen výstup DA převodníku mikrokontroléru STM32F303 (tímto mikrokontrolérem byla provedena všechna měření).

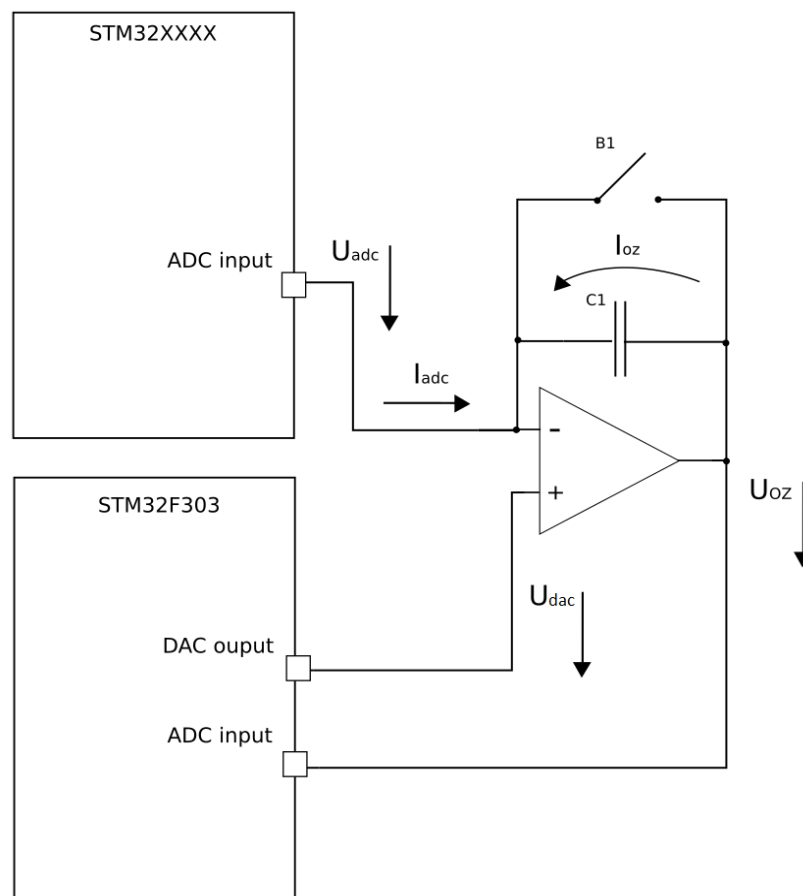
Na počátku měření je spínač B1 sepnut tak, aby došlo k vybití kondenzátoru C1 na napětí nastavené DA převodníkem. Operační zesilovač se snaží na invertujícím vstupu mít stejnou hodnotu napětí jako je velikost napětí nastavené DA převodníkem na neinvertujícím vstupu (virtuální 0 je na napětí nastaveném DAC). Pokud je rozepnut spínač B1, jakýkoli náboj tekoucí ze smplovacího kondenzátoru AD převodníku do kondenzátoru C1, který by způsobil zvětšení napětí na tomto kondenzátoru (a tedy i na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače), se operační zesilovač snaží kompenzovat snížením napětí na svém výstupu (který je přes kondenzátor spojen zpětnou vazbou na invertující vstup zesilovače). Snížením napětí na výstupu operačního zesilovače dojde k tomu, že se do kondenzátoru C1 přenesou náboj ze smplovacího kondenzátoru AD převodníku, aniž by se zvýšilo napětí na něm. Tedy i napětí na invertujícím vstupu zůstane stejné.

Jednotlivými odměry AD převodníku testovaného mikrokontroléru (ve schématu STM32XXXX) se přenáší náboj ze smplovacího kondenzátoru AD převodníku do kondenzátoru C1 (pokud je kondenzátor C1 nabit na menší napětí, než je zbytkové napětí na smplovacím kondenzátoru), popřípadě z kondenzátoru do AD převodníku (pokud je napětí na kondenzátoru větší než zbytkové napětí). Tento přenesený náboj operační zesilovač kompenzuje adekvátním snížením (pokud teče náboj do kondenzátoru C1) nebo zvýšením (pokud teče náboj z kondenzátoru C1) napětí na svém výstupu, které je poté změřeno.

Tím se docílí převodu mezi nábojem tekoucím z AD převodníku do kondenzátoru C1 (nebo naopak) a výstupním napětím operačního zesilovače.

6.1 Převod náboje na naintegrované napětí

Pro vysvětlení vzorce výsledného naintegrovaného napětí slouží následující schéma:



Obrázek 7 Schéma zapojení s operačním zesilovačem s vyznačenými veličinami

Při rozepnutém spínači B1 je případný proud tekoucí z AD převodníku roven proudu tekoucímu do kondenzátoru C1 s opačným znaménkem:

$$I_{adc} + I_{oz} = 0$$

$$I_{adc} = -I_{oz}$$

Kde:

I_{adc} – proud z AD převodníku do kondenzátoru C1

I_{oz} – proud z operačního zesilovače do kondenzátoru C1

Tento jev je způsoben tím, že operační zesilovač udržuje na svém invertujícím vstupu stejnou úroveň napětí jako na svém neinvertujícím vstupu.

Následující vzorec již byl obecněji vysvětlen v kapitole (5.1), zde ho ale vysvětlím znovu ve vztahu k předchozímu schématu (obrázek 7).

Proud tekoucí z AD převodníku lze vyjádřit jako náboj, který se přenesel z AD převodníku za určitý čas:

$$I_{adc} = Q/t = Q_{adc} * f$$

Kde:

Q_{adc} – náboj tekoucí z AD převodníku po jednom odměru

f – frekvence přenášeného náboje (frekvence samplování AD převodníku)
Velikost přeneseného náboje po jednom odměru AD převodníku je poté rovna:

$$Q_{adc} = (U_{dac} - U_{zbyt}) * C_s$$

Kde:

U_{dac} – napětí nastavené DA převodníkem (počáteční napětí na výstupu OP, tedy z pohledu AD převodníku napětí vnějšího obvodu)

U_{zbyt} – zbytkové napětí na samplovacím kondenzátoru AD převodníku

C_s – velikost samplovacího kondenzátoru AD převodníku

Jak je vidět, Q_{adc} bude mít kladnou hodnotu v případě, že U_{dac} je větší, než U_{zbyt} . Tedy, pokud je napětí na kondenzátoru C_1 větší, než zbytkové napětí na samplovacím kondenzátoru C_s , náboj teče z kondenzátoru C_1 do C_s a je označován jako kladný (stejně je označován i proud tekoucí z C_1 do C_s). Náboj tekoucí opačným směrem, z AD převodníku do kondenzátoru C_1 , má pak opačné znaménko. Po dosazení se tedy proud z AD převodníku rovná:

$$I_{adc} = (U_{dac} - U_{zbyt}) * C_s * f \quad (2)$$

Tento vzorec je tedy již dříve vysvětlený teoretický model chování vstupního/výstupního proudu AD převodníku. Ověření platnosti tohoto modelu (nebo také jak se jednotlivé AD převodníky od modelu vychylují) je jedním z cílů této práce.

Pro využití v této metodě měření se nevyužije proud, ale celkový přenesený náboj:

$$Q_{celk} = Q_{adc} * n \quad (3)$$

Kde:

n – počet odměrů AD převodníku

Pokud se podíváme na druhou stranu kondenzátoru C_1 , lze stejný proud (náboj přenesený do kondenzátoru) vyjádřit také takto:

$$I_{oz} = Q_{c1}/t$$

$$Q_{c1} = I_{oz} * t$$

Kde:

Q_{c1} – náboj tekoucí do kondenzátoru C_1

Velikost náboje Q_{c1} který skutečně vtekl do kondenzátoru lze zjistit jako:

$$Q_{c1} = C_1 * \Delta U$$

Kde:

ΔU - změna napětí na kondenzátoru

C_1 - kapacita kondenzátoru C_1

Z tohoto změna napětí na kondenzátoru:

$$\Delta U = Q_{c1}/C_1 = 1/C_1 * Q_{c1}$$

Jelikož $Q_{c1} = I_{oz} * t$, lze změnu napětí vyjádřit jako:

$$\Delta U = 1/C_1 * I_{oz} * t$$

Střední hodnotu proudu za čas lze elegantněji vyjádřit integrálem aktuálního proudu jako:

$$\Delta U = 1/C1 * \int i(t)dt$$

Celkové napětí na kondenzátoru je poté rovno:

$$U = U_{dac} + \Delta U$$

$$U = U_{dac} + 1/C1 * \int i(t)dt$$

Toto napětí U je tedy měřeno na kondenzátoru $C1$ (výstupu operačního zesilovače) po určitém počtu odměřů AD převodníku (aby byl přírůstek napětí měřitelný). Mým cílem je ověřit, zda skutečné napětí na kondenzátoru $C1$ po n odměrech AD převodníkem, odpovídá napětí, které by mělo na tomto kondenzátoru (při daném napětí nastaveném DA převodníkem) vyjít dle modelu. Tedy zda celkový přenesený náboj se rovná náboji, který by měl vyjít dle rovnice (3). Ověřuji tedy, zda:

$$U_{dac} + 1/C1 * \int i(t)dt = U_{dac} + 1/C1 * Q_{celk}$$

Tedy zda:

$$1/C1 * \int i(t)dt = 1/C1 * Q_{adc} * n$$

Po zpětném vyjádření integrálu:

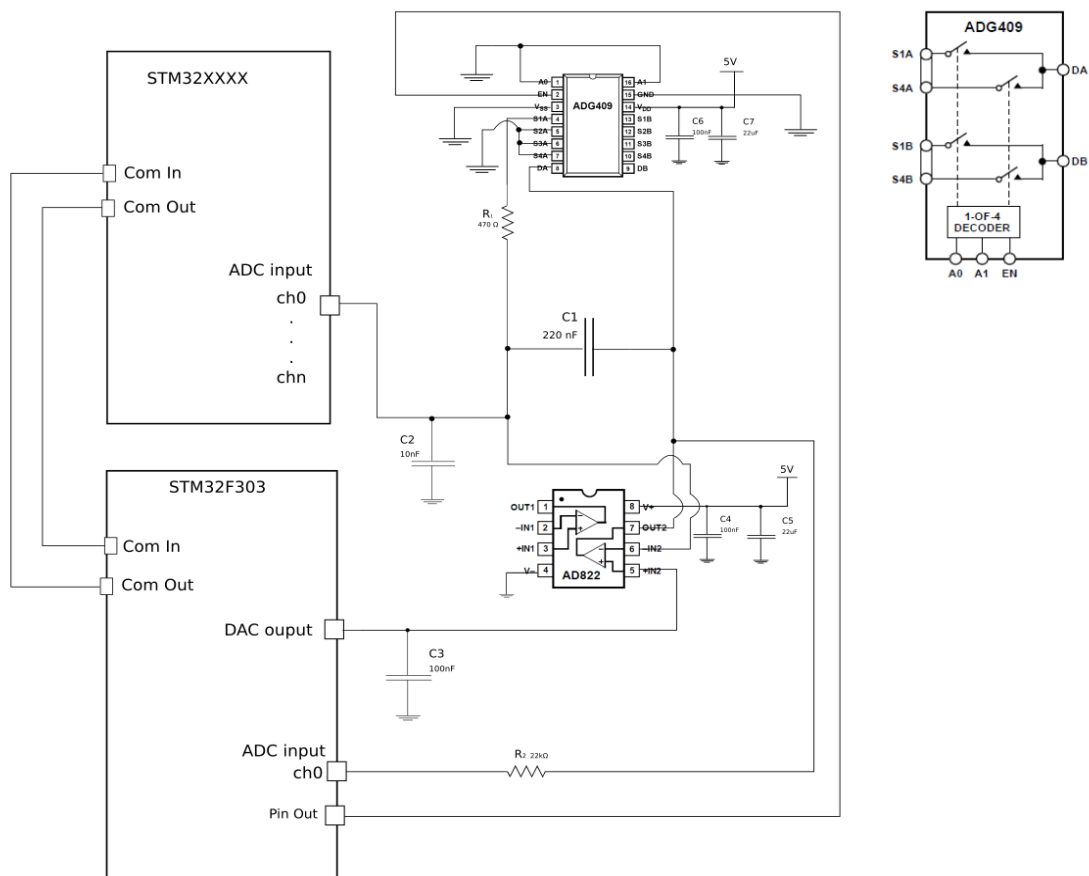
$$\Delta U = 1/C1 * Q_{adc} * n \quad (4)$$

(Z této rovnice (4) bude vycházet modelová křivka v následujících grafech v 6.5)

Pro danou napěťovou úroveň, nastavenou DA převodníkem, tedy změřím naintegrované napětí ΔU po n odměrech. Výsledek porovnám s odhadem z modelové rovnice a mohu zjistit, zda pro danou napěťovou úroveň odpovídá vstupní/výstupní náboj do/z AD převodníku dle modelu (a tedy zda i vstupní/výstupní proud by odpovídal modelu). Toto měření provedu pro několik napěťových úrovní a získám charakteristiku průběhu náboje, tedy i vstupního/výstupního proudu, v závislosti na napětí vnějšího obvodu.

6.2 Schéma zapojení a použité součástky

Pro měření dle výše zmíněné metody byly použity tyto součástky v tomto zapojení:



Obrázek 8 Schéma zapojení součástek při měření v zapojení s operačním zesilovačem

Jako operační zesilovač byl zvolen AD822 a jako přepínač multiplexor ADG409 od Analog Devices. Kondenzátor C1, použitý pro měření napětí, je svitkový kondenzátor Tesla TC205 s kapacitou 220 nF. Dále byly použity blokovací kondenzátory C4, C6 (100 nF, keramické) a C5, C7 (22 μ F, elektrolytické) pro blokování napájení operačního zesilovače a přepínače. Jako blokovací kondenzátor byl použit i kondenzátor C3 (100 nF, keramický) pro blokování výstupu DA převodníku. Dále keramický kondenzátor C2 s kvalitní hmotou s kódovým označením F (E1000) u výstupu AD převodníku, pro absorbování náboje z AD převodníku, pokud by operační zesilovač nestačil vyrovnávat napětí na svém výstupu (z tohoto důvodu byly také zvoleny vysoké hodnoty sampling time při testování jednotlivých AD převodníků, aby měl operační zesilovač čas zareagovat na změnu napětí). Dále byly použity rezistory R1 (470 Ω) a R2 (22 k Ω) pro ochranu vstupu přepínače a kitu STM32F303, kterým se provádělo měření (piny, na které jsou vyvedeny kanály AD převodníku, nejsou 5V tolerantní. Výstup operačního zesilovače ale může dosáhnout až 5V (napájecí napětí je 5V)).

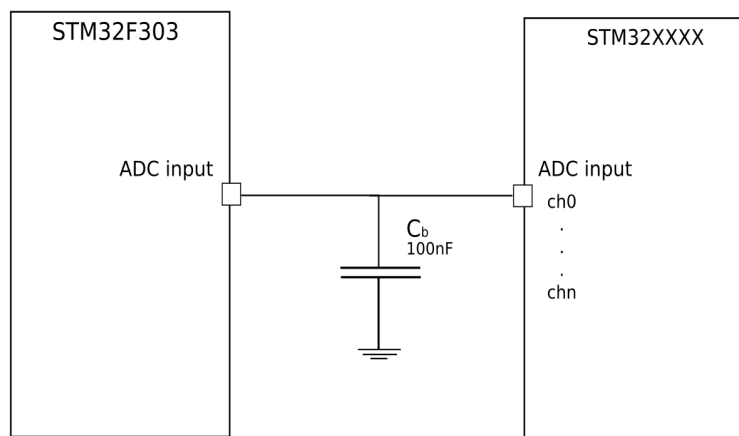
6.3 Postup měření

Následující popis měření vychází z předchozího obrázku (8). Nejdříve bylo nastaveno mikrokontrolérem STM32F303 výstupní napětí DA převodníku (pin DAC output). Sepnutím spínače (pinem Pin Out) se toto napětí dostalo přes výstup operačního zesilovače na kondenzátor C1. Toto napětí bylo změřeno AD převodníkem kitu

s STM32F303 (ADC input, ch0) a uloženo do paměti. Spínač byl následně rozepnut. Příkazem z STM32F303 spustil testovaný mikrokontrolér daný počet odměřů svým AD převodníkem. O dokončení informoval testovaný mikrokontroler hlavní kit STM32F303. Tyto příkazy probíhaly přes piny Com In a Com Out obou dvou mikrokontrolérů, kdy se reagovalo na vysokou a nízkou napěťovou úroveň jednotlivých vodičů. Po obdržení příkazu o dokončení odměřů bylo kitem STM32F303 změřeno napětí na výstupu operačního zesilovače a tato hodnota byla poslána přes UART do nadřazeného PC (včetně informace o pořadí měření a původní nastavené hodnotě DA převodníku). Následovalo měření pro další napěťovou úroveň nastavenou DA převodníkem mikrokontroléru STM32F303 a celý proces se opakoval. Takto probíhalo měření na napěťových úrovních obvykle 100 - 2900 mV s krokem mezi jednotlivými úrovněmi 50 mV.

6.4 Měření zbytkového napětí

Pro výpočet modelu dle vzorce (2) je potřeba znát zbytkové napětí na samplovacím kondenzátoru AD převodníku po každém převodu. Měření zbytkového napětí probíhalo takto:



Obrázek 9 Měření zbytkového napětí AD převodníku

Převodník testovaného mikrokontroléru STM32XXXX vzorkoval velmi vysokou frekvencí (řádově desítky kHz). Tím docházelo k postupnému nabíjení kondenzátoru C_b (keramický kondenzátor, kapacita 100nF) na hodnotu zbytkového napětí samplovacího kondenzátoru AD převodníku testovaného mikrokontroléru STM32XXXX. Toto napětí bylo měřeno mikrokontrolérem STM32F303 (který byl používán pro všechna měření), kdy AD převodník tohoto mikrokontroléru vzorkoval velmi pomalu (100 Hz), aby stejným vlivem (tekoucím nábojem z/do svého samplovacího kondenzátoru) neovlivnil měření. Výsledná hodnota zbytkového napětí byla průměrována ze 100 odměřů (nová hodnota tak byla posílána UARTem do nadřazeného PC každou 1 sekundu). Po ustálení měřené hodnoty byla tato hodnota zbytkového napětí zaznamenána. Měření bylo vždy více kanálů AD převodníku testovaného mikrokontroléru (jak bylo zjištěno později, zbytkové napětí se mezi kanály může lišit).

6.5 Parametry měření a reprezentace naměřených dat

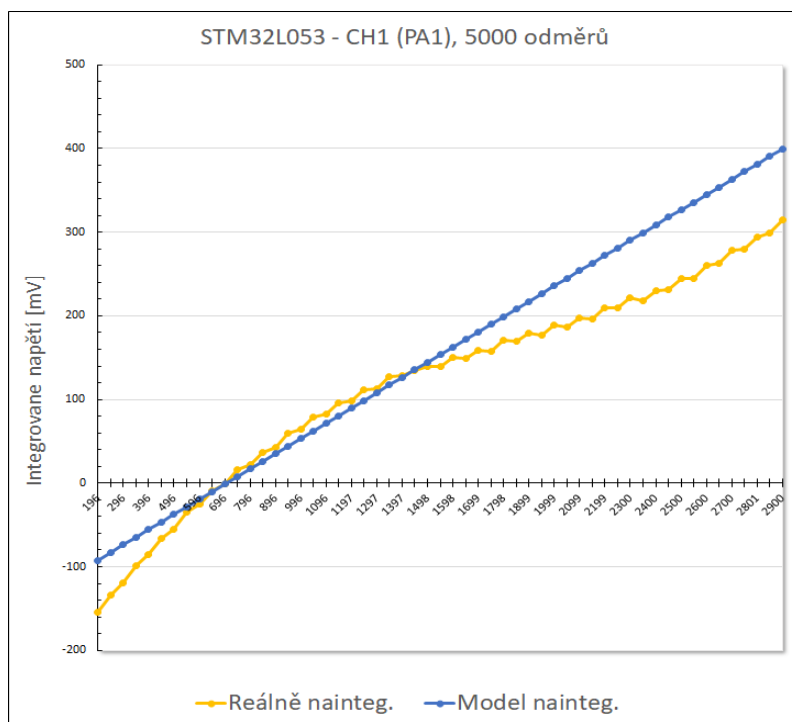
Měření bylo obvykle provedeno na 3 kanálech AD převodníku každého mikrokontroléru, které byly zvoleny tak, aby vstupní pin byl vždy z jiné brány mikrokontroléru (pokud to bylo možno). Pokud měl mikrokontrolér více AD převodníků, měření bylo provedeno na všech z nich. Na každém kanálu bylo měření provedeno 3x, postupně pro 1000, 5000 a 10000 odměřů, aby se overilo lineární zvětšení naintegrovaného napětí (zda naintegrované napětí po 5000 odměrech bude 5x větší, než po 1000 odměrech apod.). Napěťové úrovně, které se nastavovaly DA převodníkem, nabývaly hodnot od 100 do 2900 mV s 50 mV krokem mezi jednotlivými úrovněmi.

U AD převodníku, které to podporovaly, byla předtím provedena automatická kalibrace. Na kitech s STM32F051 a STM32L053 jsem ale ověřil, že výsledné charakteristiky jsou nezávislé na tom, zda byl předtím AD převodník zkalibrován.

Většinou byl software pro jednotlivé mikrokontroléry napsán v Mbedu, což, jak ještě bude zmíněno, neslo určitá negativa. Ověření různého chování AD převodníku při konfiguraci Mbedem nebo softwermem psaném v Keilu za pomoci HAL knihoven proběhlo na mikrokontroléru STM32F051.

Ze zjištěných charakteristik AD převodníku lze odhadovat, v jakých procesorech je použit stejný AD převodník. Dle toho jsou pak seřazeny i výsledky.

Takto vypadá ukázkový graf naměřených výsledků:



Obrázek 10 Ukázkový graf intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L053

V názvu grafu je nejdříve název mikrokontroléru, měřený kanál (s pinem k příslušnému kanálu) a počet odměřů vzorků v daném měření. U mikrokontrolérů s více AD převodníky je doplněn ještě měřený AD převodník.

Na vodorovné ose jsou jednotlivé napěťové úrovně, na kterých bylo měření provedeno (obvykle 100-2900 mV, s 50 mV krokem).

Na svislé ose je velikost naintegrovaného napětí (rozdíl mezi napětím nastaveným AD převodníkem a měřením po n odměrech).

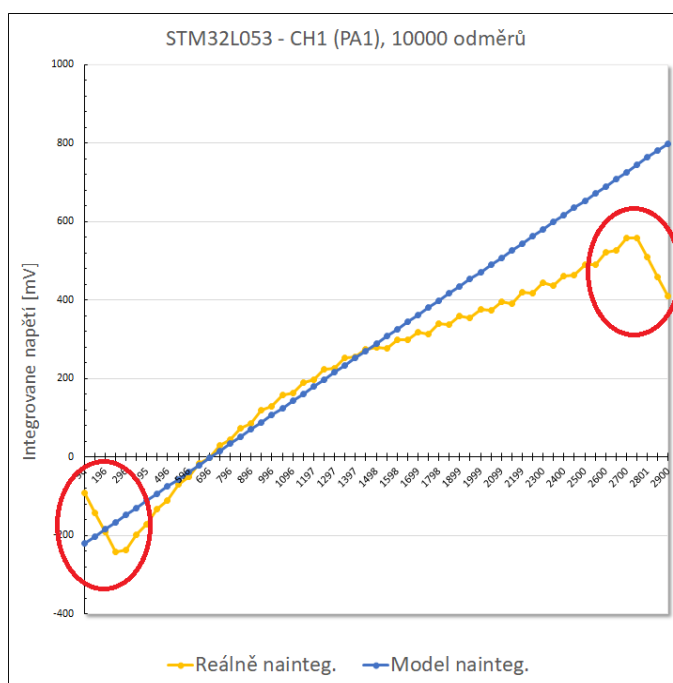
Žlutá křivka (s označením "Reálně nainteg.") znázorňuje jednotlivá skutečně naměřená napětí po n odměrech. Toto napětí bylo měřeno na výstupu operačního zesilovače po n odměrech. V následujícím textu je označovaná jako "reálná křivka" nebo "křivka skutečně naměřených hodnot".

Modrá křivka (s označením "Model nainteg.") ukazuje jednotlivé hodnoty napětí, které by se na dané napěťové úrovni (nastavené DA převodníkem STM32F303) měly naměřit dle modelu (rovnice (4)). Jako velikost smplovacího kondenzátoru C_s jsou použity hodnoty z příslušných datasheetů k jednotlivým mikrokontrolérům. V následujícím textu je tato křivka označovaná jako "modelová křivka", nebo "křivka dle modelu".

Z porovnání těchto dvou křivek vychází, jak reálný průběh naintegrovaného náboje odpovídá modelu a tedy i jak vstupní proudy odpovídají modelové rovnici pro vstupní proud (rovnice (2)).

Při testech s více odměry (především u 10000, v některých případech i u 5000) docházelo k tomu, že se operační zesilovač dostával do saturace. Při testování na nižších napěťových úrovních než bylo zbytkové napětí, docházelo k tomu, že by naintegrovaný náboj měl způsobit posuv napětí mimo rozsah, který dokáže operační zesilovač na svém výstupu poskytnout (pod jeho minimální výstupní napětí). V takovém případě se operační zesilovač dostal do saturace a na změnu náboje již nereagoval, místo toho měl na výstupu konstatně své minimum (asi 3-4 mV).

Při vyšších napětích (větších než zbytkové napětí) zas mohlo přesáhnout výstupní napětí operačního zesilovače 3,3 V, což je horní hranice, kterou dokáže zaznamenat AD převodník mikrokontroléru STM32F303, kterým se změna napětí měřila. Tím byly výsledky pro větší naintegrovaný náboj zkresleny, jelikož jakékoli vyšší napětí na operačním zesilovači bylo interpretováno jako maximální napětí (napájecí napětí, asi 3310 mV) AD převodníku kytu s STM32F303, které dokáže změřit. V těchto případech se pak naintegrovaný náboj zdál nižší (resp. vyšší v předchozím případě) než ve skutečnosti byl a tomu odpovídala i menší hodnota naintegrovaného napětí.



Obrázek 11 Zkreslení výsledků naintegrovaného napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L053

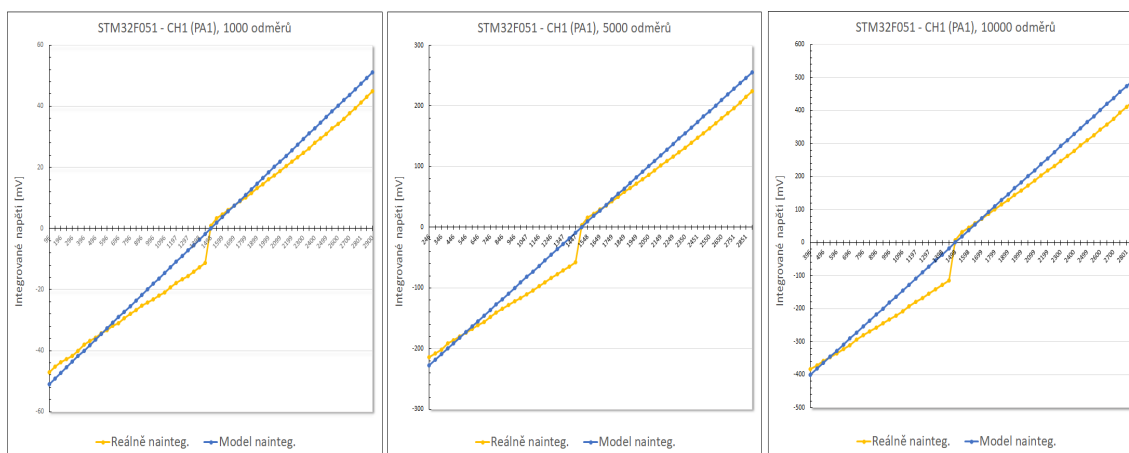
6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

Z důvodu větší přehlednosti byly tyto hodnoty z jednotlivých grafů vyjmuty.

Jak již bylo řečeno, měření byla prováděna s 1000, 5000 a 10000 odměry na každé napětové úrovni. U všech mikrokontrolérů byl ověřen a potvrzen adekvátní nárůst náboje při nastavení více odměrů (při 5000 odměrech bylo naintegrované napětí 5x vyšší, než při 1000 odměrech atd.).

Počet odměrů:	1000		Počet odměrů:	5000		Počet odměrů:	10000	
Nastavené napětí	Reálně nainteg.	Model nainteg.	Nastavené napětí	Reálně nainteg.	Model nainteg.	Nastavené napětí	Reálně nainteg.	Model nainteg.
1798.6 mV	10.2 mV	11.0 mV	1798.5 mV	50.7 mV	55.2 mV	1798.5 mV	101.4 mV	110.4 mV
1848.9 mV	11.6 mV	12.9 mV	1848.8 mV	58.0 mV	64.3 mV	1848.9 mV	116.0 mV	128.7 mV
1898.5 mV	13.2 mV	14.7 mV	1898.7 mV	65.0 mV	73.4 mV	1898.6 mV	129.7 mV	146.8 mV
1949.1 mV	14.4 mV	16.5 mV	1949.2 mV	71.9 mV	82.6 mV	1949.1 mV	143.6 mV	165.1 mV
1999.1 mV	16.1 mV	18.3 mV	1999.2 mV	79.1 mV	91.7 mV	1999.2 mV	158.0 mV	183.3 mV
2049.6 mV	17.4 mV	20.2 mV	2049.7 mV	86.2 mV	100.9 mV	2049.6 mV	172.8 mV	201.7 mV
2099.0 mV	18.9 mV	22.0 mV	2099.0 mV	94.1 mV	109.8 mV	2099.2 mV	188.0 mV	219.7 mV
2148.6 mV	20.4 mV	23.8 mV	2148.7 mV	101.5 mV	118.8 mV	2148.6 mV	202.9 mV	237.7 mV
2198.8 mV	21.9 mV	25.6 mV	2199.0 mV	109.1 mV	128.0 mV	2198.9 mV	217.8 mV	256.0 mV
2249.3 mV	23.3 mV	27.4 mV	2249.2 mV	116.5 mV	137.1 mV	2249.2 mV	232.0 mV	274.3 mV
2299.6 mV	24.8 mV	29.3 mV	2299.6 mV	123.6 mV	146.3 mV	2299.6 mV	247.0 mV	292.6 mV
2350.0 mV	26.3 mV	31.1 mV	2350.1 mV	131.2 mV	155.5 mV	2350.0 mV	262.5 mV	310.9 mV
2400.2 mV	28.0 mV	32.9 mV	2400.0 mV	139.5 mV	164.6 mV	2400.2 mV	278.4 mV	329.2 mV
2450.6 mV	29.5 mV	34.7 mV	2450.6 mV	147.2 mV	173.7 mV	2450.6 mV	294.2 mV	347.5 mV
2499.5 mV	31.0 mV	36.5 mV	2499.4 mV	154.9 mV	182.6 mV	2499.4 mV	309.7 mV	365.2 mV
2549.8 mV	32.7 mV	38.4 mV	2549.8 mV	162.8 mV	191.8 mV	2549.7 mV	325.9 mV	383.5 mV
2600.0 mV	34.2 mV	40.2 mV	2600.0 mV	171.2 mV	200.9 mV	2599.9 mV	341.8 mV	401.8 mV

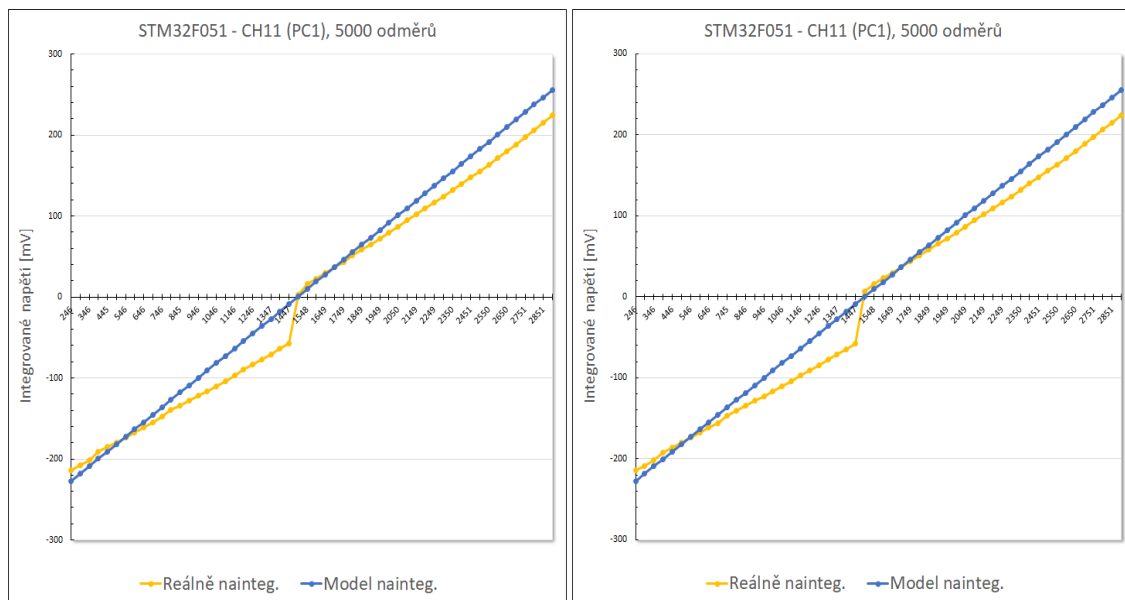
Tabulka 1 Ukázka nárůstu naintegrovaného napětí při měření s 1000, 5000 a 10000 odměry, kanál 1 (PA1)



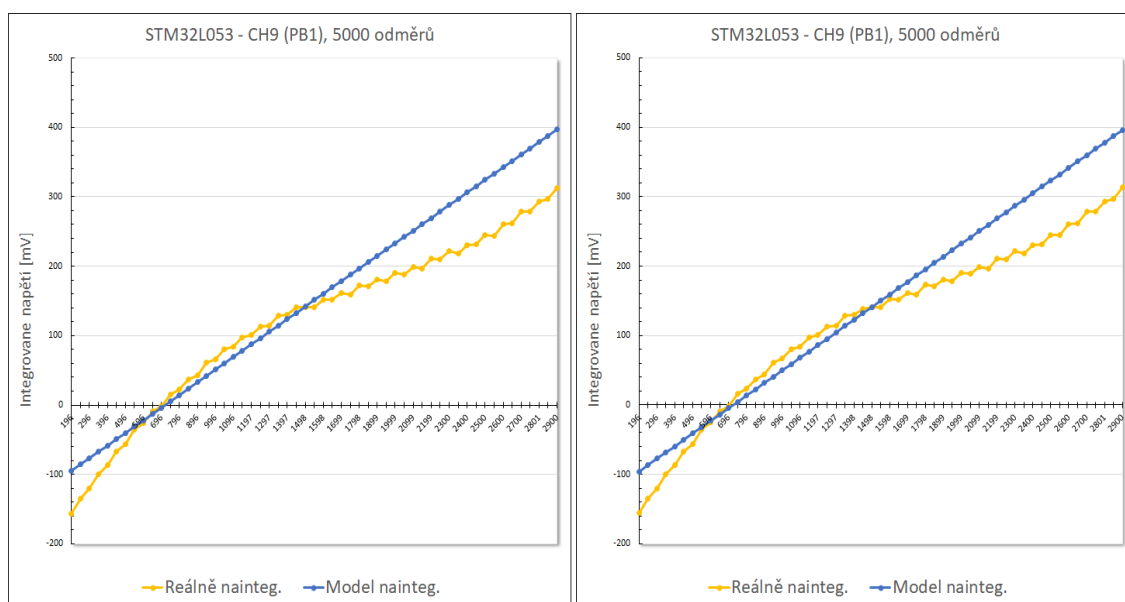
Obrázek 12 Ukázka nárůstu naintegrovaného napětí při měření s 1000, 5000 a 10000 odměry, kanál 1 (PA1) - STM32F051

6.5 Parametry měření a reprezentace naměřených dat

U mikrokontrolérů, které podporovaly vnitřní kalibraci AD převodníků, byla před měřením tato kalibrace provedena. Toto bylo učiněno především z toho důvodu, že i v reálných aplikacích se před použitím AD převodníku kalibrace pro zlepšení přesnosti provádí. Ověření vlivu kalibrace na výslednou charakteristiku bylo provedeno s mikrokontrolérem STM32F051 a STM32L053. Bylo zjištěno, že kalibrace na výslednou charakteristiku nemá vliv.



Obrázek 13 Vliv kalibrace na charakteristiku. Vlevo měření bez kalibrace, vpravo s kalibrací.
Kanál 11 (PC1) - STM32F051



Obrázek 14 Vliv kalibrace na charakteristiku. Vlevo měření bez kalibrace, vpravo s kalibrací.
Kanál 9 (PB1) - STM32L053

Důležité je znát i napájecí napětí AD převodníků. To bylo měřeno na 3/3.3V pinu jednotlivých kitů multimetrem Haoyue M890G. V případě mikrokontrolérů umístěných na Discovery kitech bylo napětí obvykle kolem 3 V, pokud byl mikrokontrolér na Nucleo kitech, pak kolem 3,3 V.

6.6 Naměřená data

6.6.1 STM32F042, STM32F051, STM32F072, STM32F100, STM32F103

U mikrokontrolérů STM32F051, STM32F072, STM32F100 byly měřeny 3 kanály (1 (PA1), 9 (PB1), 11 (PC1)) postupně na branách A,B,C. Mikrokontrolér STM32F042 neměl na kitu vyveden kanál 11 (a žádný kanál, který by byl vyveden na bráně C), proto byl pro ověření změřen kanál 5 (PA5) znovu na bráně A. STM32F103 má 2 AD převodníky. Na prvním z nich, ADC1, byly změřeny kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1). U druhého, ADC3, to byly kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 12 (PC2).

Programy pro mikrokontroléry STM32F042 a STM32F072 byly psané v Mbedu, s vnitřní kalibrací na začátku programu, frekvence odebírání vzorků byla 10 kHz. Mikrokontrolér STM32F051 byl změřen jak za pomoci programu v Mbedu (generován jako kód pro STM32F031, více v příslušné kapitole (6.6.1)), tak za pomoci softwaru napsaném v Keilu s využitím HAL knihoven a konfigurace v programu CubeMX. STM32F100 není podporován v Mbedu, proto software pro tento mikrokontrolér byl také napsán v Keilu, s využitím konfigurace z CubeMX a HAL knihoven. Jelikož STM32F103 má 2 AD převodníky, nebyl opět použit pro programování tohoto mikrokontroléru Mbed, protože ten podporuje k použití jen 1 AD převodník ADC1. Stejně jako STM32F100 a STM32F051, byl kód pro STM32F103 napsán v Keilu s využitím CubeMX a HAL knihoven. U všech mikrokontrolérů byla využita na začátku programu vnitřní kalibrace jejich AD převodníků

Kapacita smplovacího kondenzátoru AD převodníků těchto mikrokontrolérů je dle příslušných datasheetů stejná, 8pF. Tato hodnota tedy byla použita do modelové rovnice (4).

Měření probíhalo na napěťových úrovních 100-2900 mV s 50 mV krokem mezi jednotlivými úrovněmi.

STM32F042

Napájecí napětí AD převodníku STM32F042 bylo 3,29 V a jak jsem již zmínil, kód pro tento mikrokontrolér byl psán v Mbedu, s využitím vnitřní kalibrace na začátku programu.

Měření u STM32F042 bylo provedeno na kanálech 1,5 (piny PA1 a PA5, brána A) a 9 (pin PB1, brána B). AD převodník neměl vyvedeny kanály na jiné brány.

Měřené zbytkové napětí tohoto převodníku nebylo stále (konstantní), jak by se dalo očekávat, ale cyklicky kolovalo mezi dvěma hodnotami. K tomuto jevu nedocházelo jen u tohoto mikrokontroléru, ale i u dalších např. u STM32F072 nebo STM32F303 (který nebyl programován v Mbedu).

Zbytkové napětí na bráně A kolísalo mezi 1662-1672 mV, na bráně B pak mezi 1668-1672 mV. Ve skutečnosti mohly být rozdíly větší, ale díky metodice měření zbytkového napětí (nízká frekvence odběru AD převodníku kitem STM32F303, z kterého se hodnota vyhodnocovala, a také průměrování 100 vzorků) se mohly horní a dolní meze zprůměrovat na menší (resp. větší) hodnotu. Průběh tohoto kolísání byl takový, že zbytkové napětí pomalu rostlo do své horní meze (1672 mV) a pak prudce kleslo na svoji

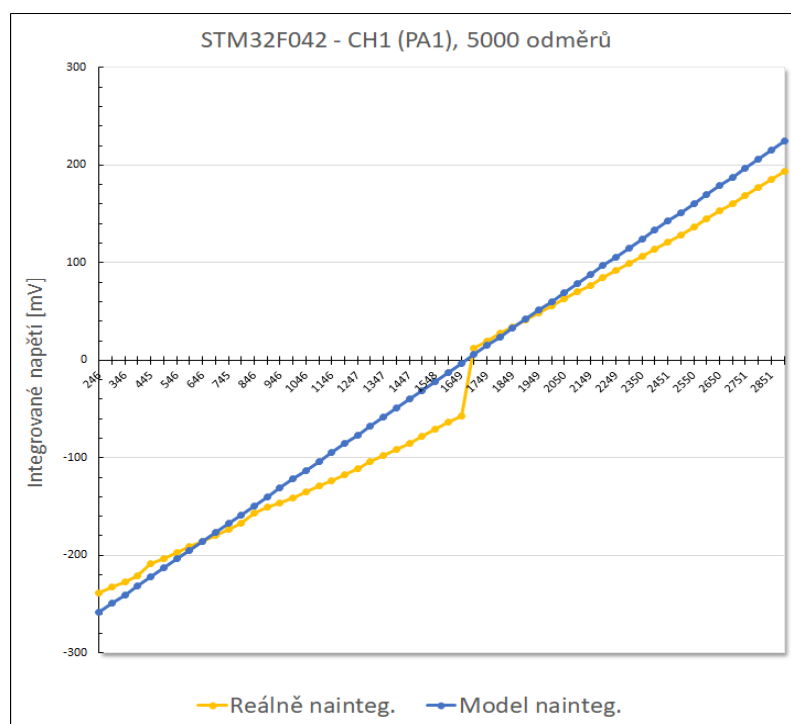
Tabulka 2 Zbytkové napětí na kanálech 1,5,9 - STM32F042

STM32F042	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1669 mV
Kanál 5 (pin PA5)	1669 mV
kanál 9 (pin PB1)	1671 mV

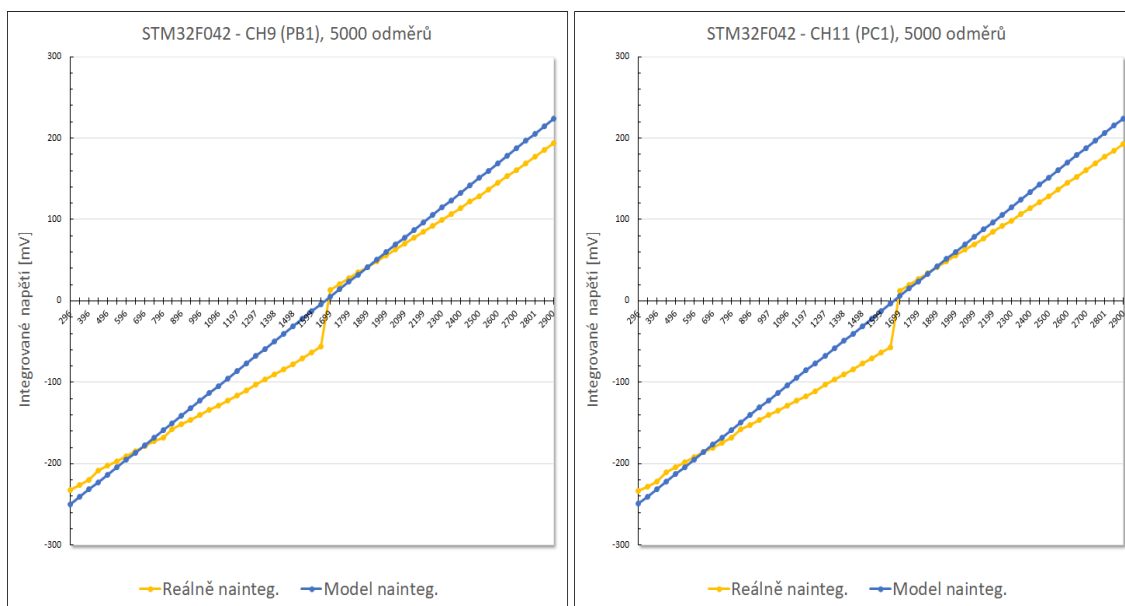
dolní mez.

Takto malý výkyv ve zbytkovén napětí měl ale minimální vliv na modelovou křivku. Zbytkové napětí tohoto AD převodníku bylo tedy přibližně poloviční, než jeho napájecí.

Průběhy intgrovaného napětí byly shodné u všech měřených kanálů.



Obrázek 15 Křivka intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32F042



Obrázek 16 Křivka intergrace napětí, vlevo kanál 9 (PB1), vpravo kanál 11 (PC1) - STM32F042

Neočekávaný byl skok v naintegrovaném napětí v oblasti zbytkového napětí. Tento skok byl podrobně zkoumán na mikrokontroléru STM32F051, kde byl také změřen. Před a po tomto skoku má integrované napětí přibližně lineární průběh, který celkem odpovídá průběhu modelové křivky. Mezi napětovými úrovněmi cca 650 mV - 1800 mV je naintegrované napětí (v absolutní hodnotě) větší než by dle modelové rovnice mělo být. Mezi napětovými úrovněmi 650-1700 mV (do zbytkového napětí) je reálná křivka pod modelovou. Jelikož se měří na napětové úrovni pod zbytkovým napětím, integruje se "záporné" napětí (napětí na výstupu operačního zesilovače klesá s jednotlivými odměry, náboj teče z AD převodníku do kondenzátoru C1 ve schématu (7)). V tomto případě, pokud je reálně naměřená křivka pod modelovou křivkou, to znamená, že náboj tekoucí do kondenzátoru C1 je také větší (úbytek napětí je větší), než dle modelu. To znamená že by z AD převodníku při vysokých frekvencích samplování tekl větší proud, než by dle modelu měl. Při měření na nižších a vyšších napětových úrovních je pak naintegrované napětí převodníku nižší, než dle modelu.

STM32F051

Další měřený AD převodník byl v mikrokontroléru STM32F051. Jak již bylo zmíněno v (6.5), AD převodník byl otestován jak s vnitřní kalibrací, tak bez ní, v obou případech se stejným výsledkem. Dále bylo tedy měření prováděno s vnitřní kalibrací na začátku programu. Převodník byl otestován jak s kódem vytvořeným v Mbedu, tak s kódem vytvořeným v Keilu s HAL knihovnami a počáteční konfigurací vytvořenou programem CubeMX. Hodnota samplovacího kondenzátoru je dle datasheetu 8 pF a proto byla použita i do modelové křivky.

S programem vytvořeným v Keilu byly hodiny AD převodníku nastaveny na 8 MHz, sampling time pak na nejvyšší možnou hodnotu 239,5 cyklu hodin.

Program v Mbed byl kompilován pro procesor STM32F031R8, jelikož Mbed nepodporuje přímo procesor STM32F051R8. Oba dva procesory jsou téměř shodné (včetně velikosti SRAM, 8 Kb) a kód takto zkompilovaný fungoval.

Napájecí napětí AD převodníku, měřené multimetrem M890G na 3V pinu, bylo

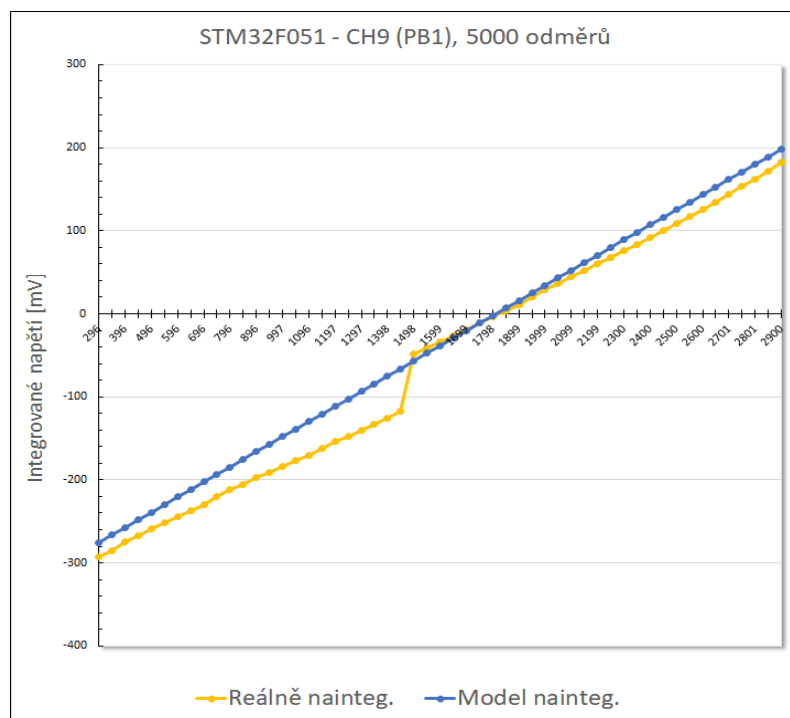
2,95 V.

Zajímavé je následující porovnání mezi naměřenými výsledky s oběma programy, jelikož se hodnoty lišily.

Tabulka 3 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - Programy vytvořeny v Keilu a Mbedu, STM32F051

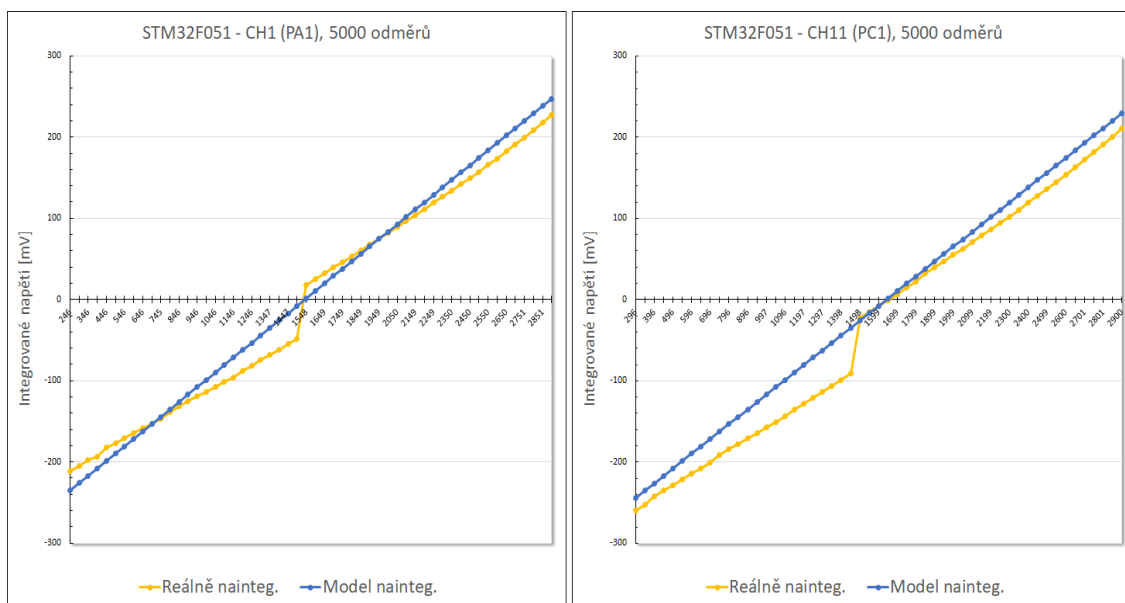
STM32F051		
Měřený kanál	Keil - Zbytkové napětí	Mbed - Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1497 mV	1493 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1488 mV	1816 mV
kanál 11 (pin PC1)	1497 mV	1640 mV

Jak je vidět, naměřená zbytková napětí se liší v závislosti na použitém programu. Téměř shodné zbytkové napětí bylo měřeno jen na Kanálu 1 (PA1). Na kanálu 9 (PB1) a 11 (PC1) bylo měřeno s Mbedem větší zbytkové napětí. Ačkoli bylo napětí mezi kanály s programem z Keilu velmi podobné (přibližně půlka napájecího napětí AD převodníku), napětí mezi kanály s Mbed bylo hodně rozdílné, mezi kanály 1 a 9 až asi o 320 mV. To se projevilo také u charakteristiky naintegrovaného napětí, kdy díky tomu byla vodorovná osa posunuta jakoby výše po křivce. U kanálu s větším rozdílem ve zbytkovém napětí (kanál 9 (PB1), 1816 mV) byl poté posuv větší. K podobnému chování docházelo i u dalšího mikrokontroléru STM32F072 (programovaného také v Mbed).



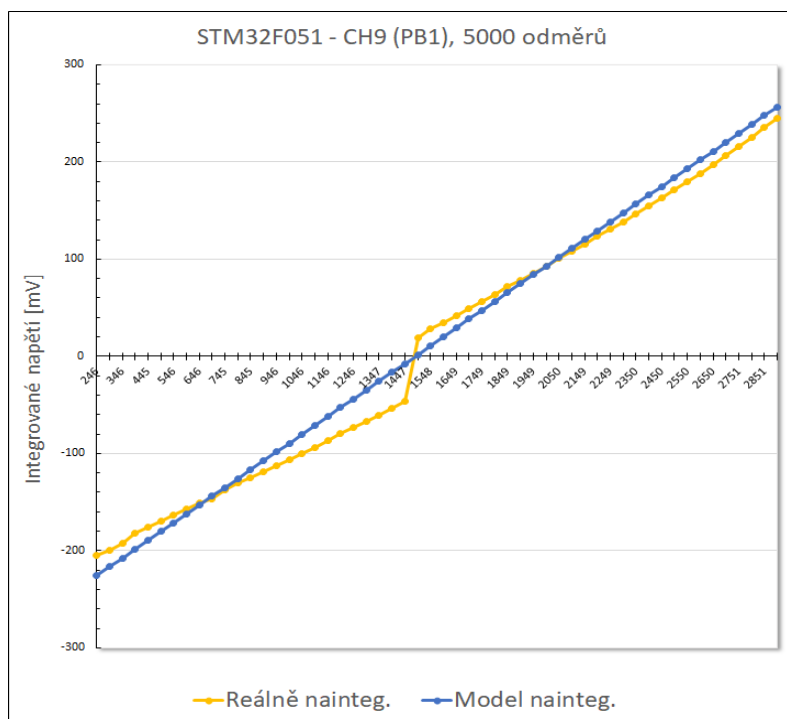
Obrázek 17 Křivka integrace napětí, kanál 9 (PB1) - program v Mbed, STM32F051

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

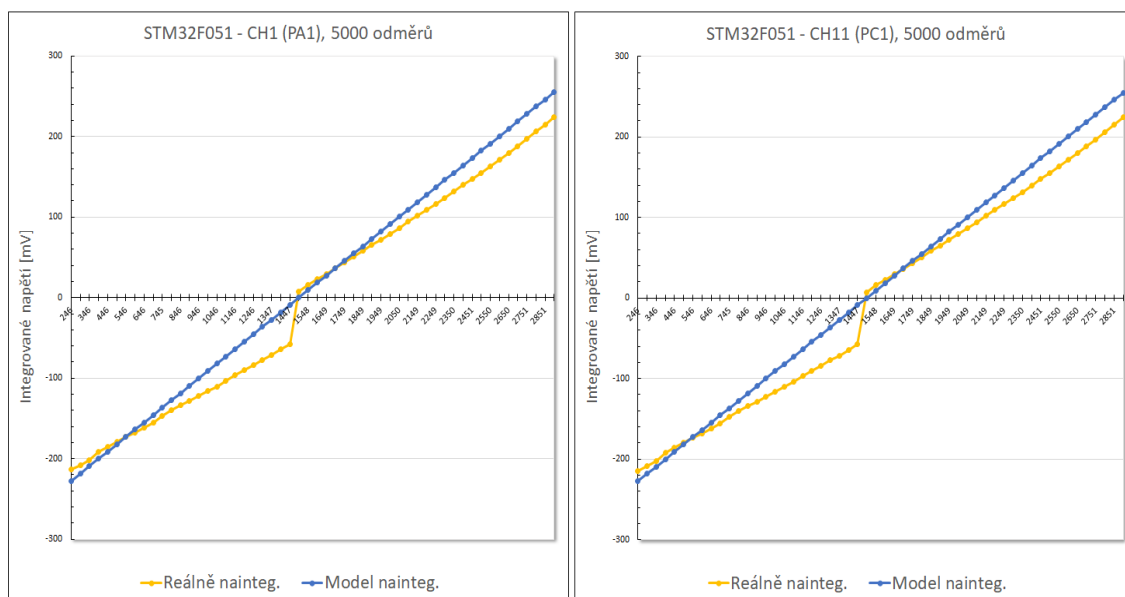


Obrázek 18 Křivka intergrace napětí, vlevo kanál 1 (PA1), vpravo kanál 11 (PC1)) - program v Mbed, STM32F051

Tvar křivky integrovaného napětí byl stejný i při měření s programem psaném v Keilu. Zbytkové napětí bylo blíže polovině napájecího. Napěťový skok, který je pokaždé v oblasti poloviny napájecího napětí AD převodníku, tak tedy byl blíže zbytkovému napětí. Křivky se, tak jako velikosti zbytkového napětí, prakticky nelišily.



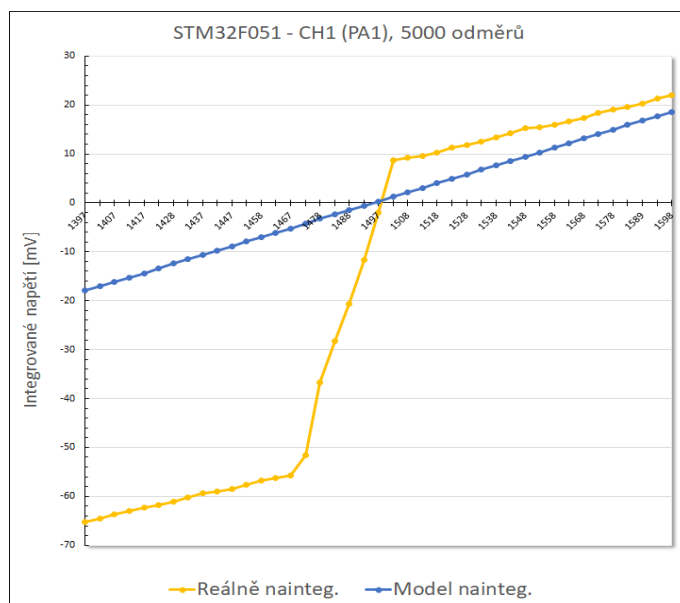
Obrázek 19 Křivka intergrace napětí, kanál 9 (PB1) - program v Keil, STM32F051



Obrázek 20 Křivka integrace napětí, vlevo kanál 1 (PA1), vpravo kanál 11 (PC1) - program v Keilu, STM32F051

Rozdíl v naměřených výsledcích mezi jednotlivými programy byl tedy způsoben rozdílným zbytkovým napětím na jednotlivých kanálech. To muselo být důsledkem konfigurací, kterou Mbed provedl. Jak již bylo řečeno, v Mbedu nemá uživatel moc pod kontrolou nastavení jednotlivých periférií. Nejde proto zjistit, jaké periférie jsou nakonec aktivované, ani jak jsou případně nakonfigurované. Některé pravděpodobně ovlivňují zbytkové napětí na jednotlivých kanálech/celých branách. Programy vytvořeny v Keilu byly nakonfigurované jen ty periférie, které byly nutné k samotnému měření (AD převodník, UART, timer, a přeslušné brány a piny).

Napětový skok přibližně v oblasti poloviny napájecího napětí byl podroben podrobnějšímu měření. Pro toto měření byl použit stejný program napsaný v Keilu. Bylo provedeno měření kanálu 1 na napětových úrovních 1400-1600 mV s napětovým krokem 5 mV.



Obrázek 21 Měření v okolí zbytkového napětí, kanál 1 (PA1) - STM32F051

Dle provedeného měření to vypadá, že napěťový skok není proveden v jednom kroku, ale křivka je zde složena z více jednotlivých bodů a naintegrované napětí lineárně (strmě) roste v okolí zbytkového napětí. Tento posuv charakteristiky jsem měřil přibližně mezi napětími 1470-1505 mV, přes několik napěťových kroků. Důvod tohoto skoku u všech měřecích procesorů STM32F0 a STM32F1 mi není znám, jisté je, že velmi rychle klesá v oblasti poloviny napájecího napětí naintegrovaný náboj, tedy proud z AD převodníku také strmě klesá (skok je v oblasti pod zbytkovým napětím převodníků, proud teče proto směrem z AD převodníku).

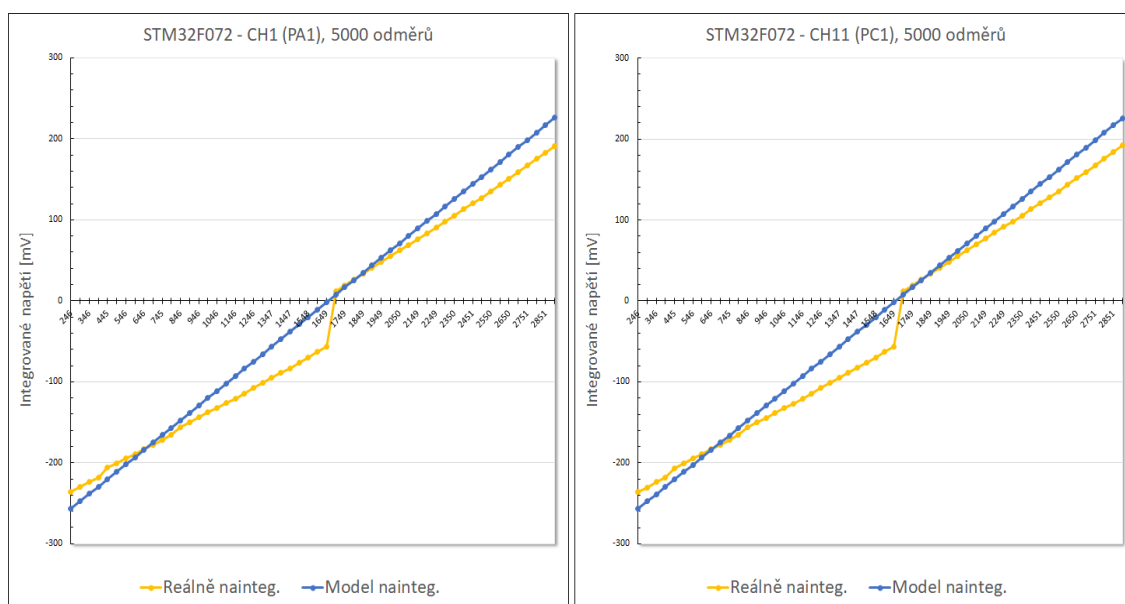
STM32F072

Charakteristiky převodníku v STM32F072 byly obdobné, jako v případě předchozích mikrokontrolérů. Programován byl opět v Mbedu, s využitím vnitřní kalibrace na začátku programu. Napájecí napětí AD převodníku bylo 3,3 V a měření proběhlo na kanálech 1 (pin PA1, brána A), 9 (pin PB1, brána B) a 11 (pin PC, brána C). Brány A a C měly stejné zbytkové napětí 1658 mV, kdežto na kanálu 9 na bráně B jsem naměřil zbytkové napětí skoro o 200 mV větší (1835 mV). V tomto případě bylo zbytkové napětí konstantní (tedy ne jako u STM32F042).

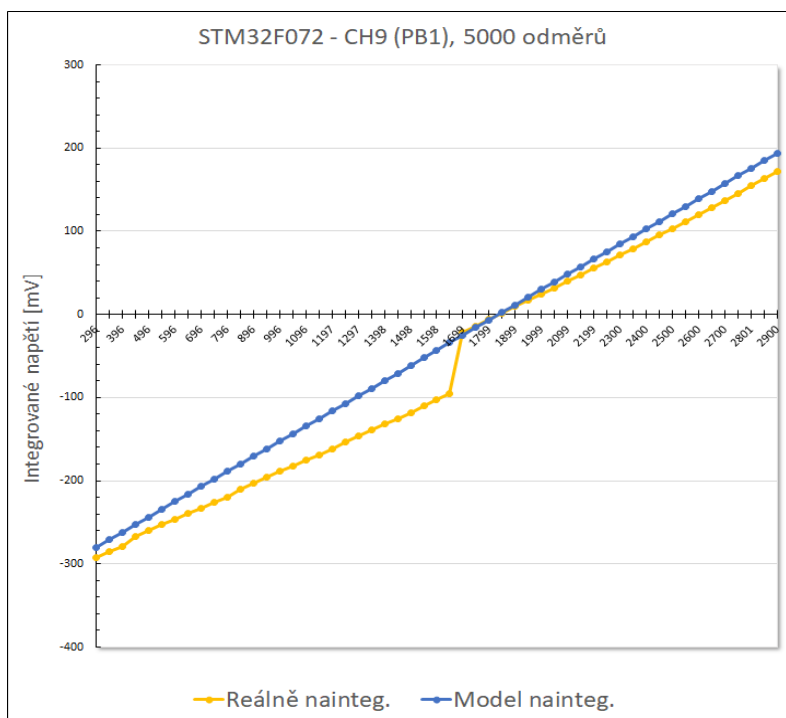
Tabulka 4 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32F072

STM32F072	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1658 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1835 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1658 mV

Jak již bylo zmíněno, charakteristiky byly opět podobné, jako u předchozího měření. Na kanálech 1 (PA1) a 11 (PC1) se průběhy naintegrovaného napětí nelišily a byly stejné, jako u STM32F042 nebo STM32F051 (programovaném v Keilu). Na kanálu 9 na bráně B byl celý průběh posunut jakoby o rozdíl ve zbytkovém napětí (asi 200 mV). Průběh integrovaného napětí odpovídal naměřenému zbytkovému napětí 1835 mV, křivky se protínaly na nulové ose v bodě zbytkového napětí (což odpovídá tomu, že se zde žádný náboj neintegruje). Napěťový skok byl měřen opět přibližně v polovině napájecího napětí. Tato charakteristika tedy byla obdobná jako u AD převodníku STM32F051, když byl program vytvořen v Mbedu. Proto si také myslím, že v i tomto případě bylo ovlivnilo měření na kanálu 9 (PB1) nějakým jiným nastavením, třeba konfigurací jiné periférie, kterou Mbed provedl a která není dohledatelná. Jinak ale byly charakteristiky stejné jako u STM32F042 a STM32F051, opět s lineárním průběhem a napěťovým skokem okolo poloviny napájecího napětí AD převodníku.



Obrázek 22 Křivka intergrace napětí, vlevo kanál 1 (PA1), vpravo kanál 11 (PC1) - STM32F072



Obrázek 23 Křivka intergrace napětí, kanál 9 (PB1) - STM32F072

STM32F100

Mikrokontrolér STM32F100, jak již bylo řečeno, není podporován Mbedem. Proto kód pro tento procesor byl psán v Keilu s využitím HAL knihoven. Hodiny AD převodníku byly nastaveny na 8 Mhz, sampling time na 239,5 tiků hodin (nejvyšší možná hodnota). Dle datasheetu je hodnota smplovacího kondenzátoru 8 pF, proto byla použita do modelové křivky.

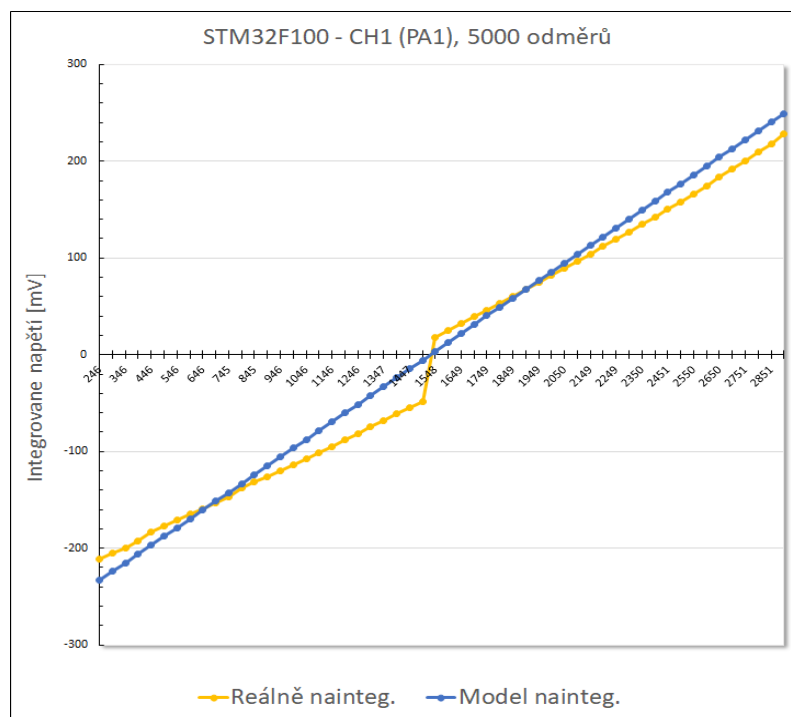
STM32F100 je umístěn na Discovery kitu, napájecí napětí převodníku tedy bylo kolem 3V, přesněji 2,94 V.

Naměřené výsledky se moc nelišily od výsledků naměřených na STM32F051 s kódem psaném v Keilu.

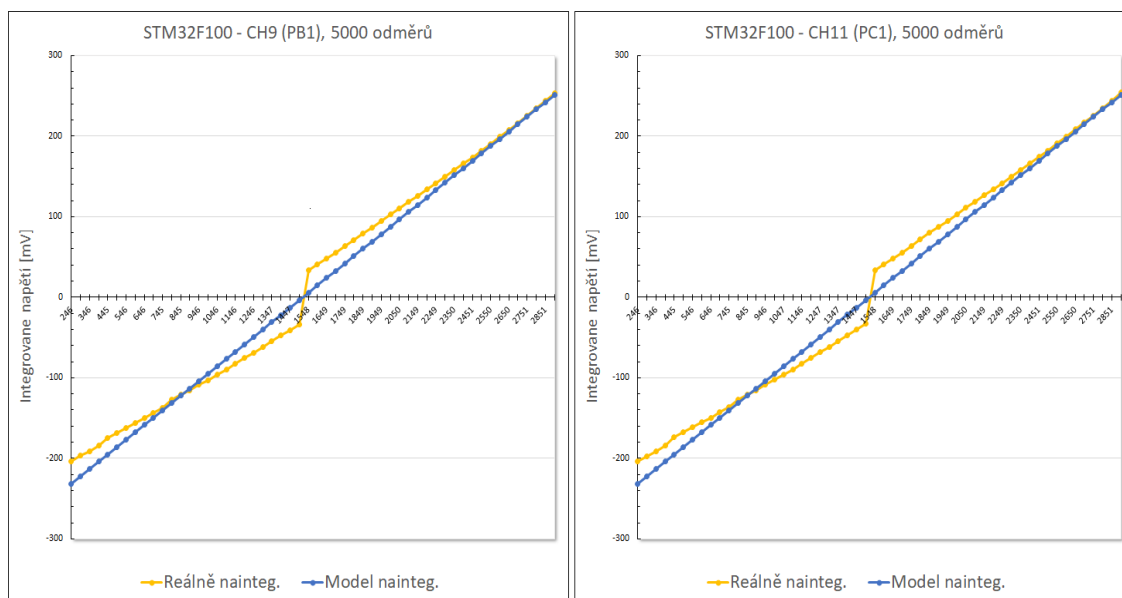
Tabulka 5 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32F100

STM32F100	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1528 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1518 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1518 mV

Zbytkové napětí je přibližně na úrovni poloviny napájecího. Zbytkové napětí se mezi kanály téměř nelišilo (na kanálu 1 (PA1) bylo měřeno o 10 mV větší zbytkové napětí než na ostatních kanálech). Stejně tak průběh naintegrovaného náboje byl velmi podobný.



Obrázek 24 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) - program v Keil, STM32F100



Obrázek 25 Křivka integrace napětí, vlevo kanál 9 (PB1), vpravo kanál 11 (PC1) - program v Keil, STM32F100

Průběhy integrovaného napětí se na kanálech 9 (PB1) a 11 (PC1) prakticky nelišily. U kanálu 1 (PA1) došlo k malému posunu osy díky o něco většímu zbytkovému napětí. Charakteristiky u mikrokontroléru STM32F100 jsou podobné jako charakteristiky procesorů z celé řady STM32F0.

STM32F103

Mikrokontrolér STM32F103 obsahuje 2 12-bitové AD převodníky. Ačkoli je tento mikrokontrolér podporován v Mbedu, jeho kód byl napsán v Keilu s využitím HAL knihoven. V Mbedu lze totiž využít jen 1. z AD převodníků, ADC1. Cílem bylo otestovat oba AD převodníky na několika kanálech.

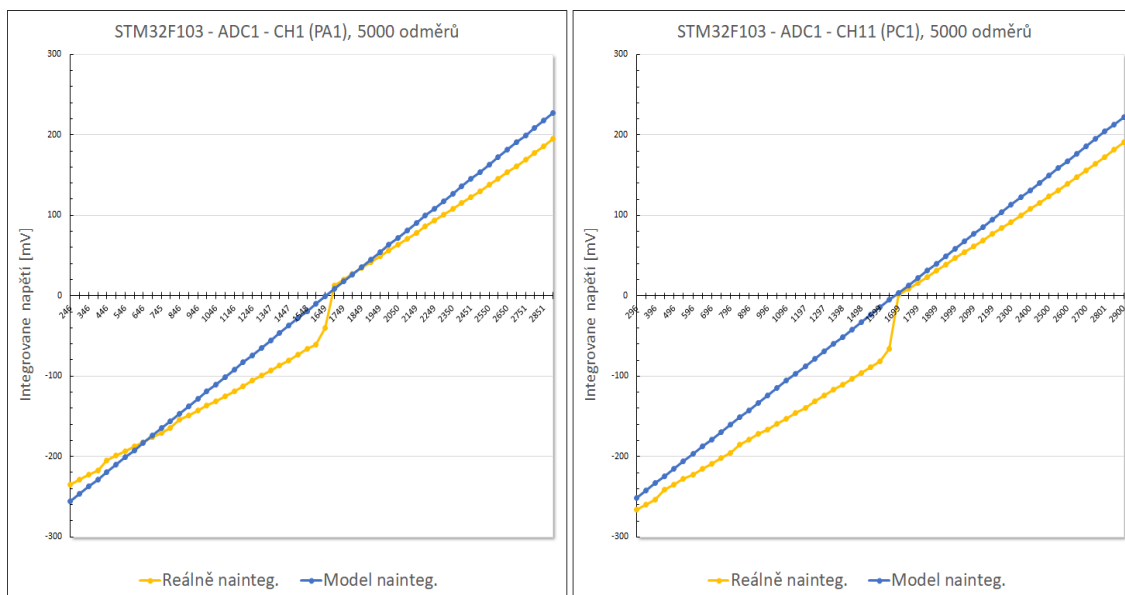
Jak bylo zmíněno, kód byl psán v Keilu s HAL knihovnami, hodiny AD převodníků byly nastaveny na 8 Mhz, sampling time pak na 239,5 tiků hodin (nejvyšší možná hodnota). Měření probíhalo opět na napěťových úrovních 100-2900 mV s krokem o velikosti 50 mV. Napájecí napětí AD převodníků bylo 3,29 V.

Tabulka 6 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 a 12 - ADC1,ADC2 STM32F103

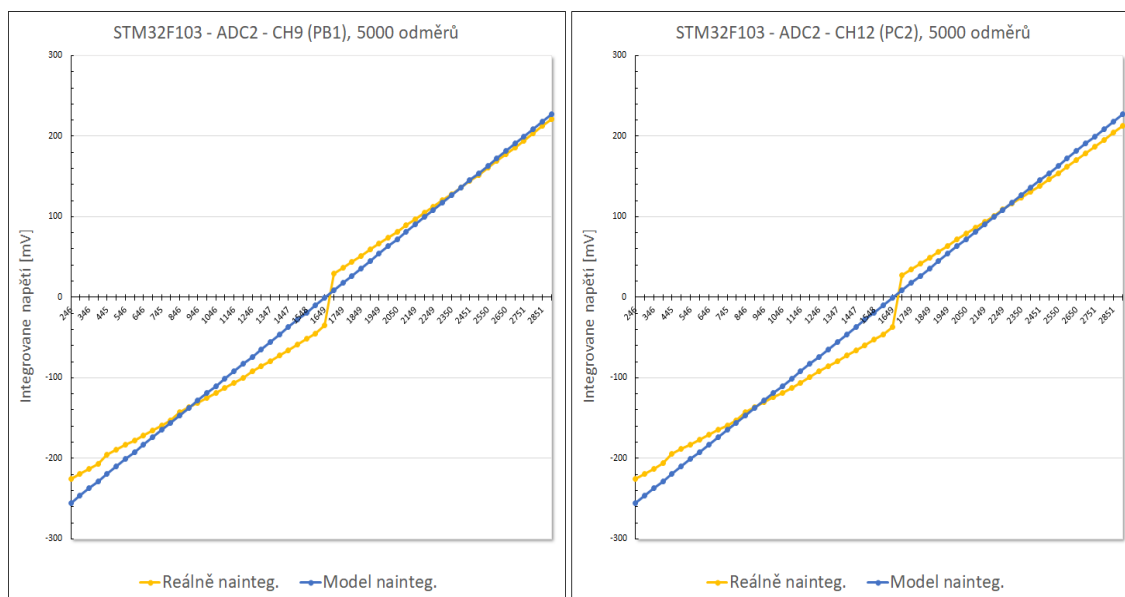
STM32F103 - ADC1		STM32F103 - ADC2	
Měřený kanál	Zbytkové napětí	Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1653 mV	Kanál 1 (pin PA1)	1653 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1651 mV	Kanál 9 (pin PB1)	1652 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1678 mV	Kanál 12 (pin PC2)	1652 mV

Zbytkové napětí bylo na všech kanálech téměř stejné, přibližně v polovině napájecího napětí. Jen na kanálu 11 (PC1) 1. AD převodníku, ADC1, bylo změřeno napětí větší asi o 25 mV v porovnání s ostatními kanály.

Průběhy integrovaného náboje byly stejné, jako u předchozích procesorů řad STM32F0 a STM32F1.



Obrázek 26 Křivka intergrace napětí, vlevo kanál 1 (PA1), vpravo kanál 11 (PC1) - ADC1, STM32F103



Obrázek 27 Křivka integrace napětí. vlevo kanál 9 (PB1) a vpravo kanál 12 (PC2) - ADC2, STM32F103

Shrnutí

Charakteristiky mikrokontrolérů STM32F042, STM32F051, STM32F072, STM32F100 a STM32F103 jsou vesměs stejné, v některých případech se liší jen posunutím vodorovné osy díky rozdílnému zbytkovému napětí. Oba AD převodníky STM32F103 vykazují stejné charakteristiky. Vzhledem k tomuto a také k tomu, že všechny AD převodníky mají podobné vlastnosti (8 pF smplovací kondenzátor, maximální sampling time 239,5 tiků hodin AD převodníku apod.), lze usuzovat, že se ve všech těchto mikrokontrolérech nachází stejné AD převodníky. Pravděpodobně tomu tak bude ve všech mikrokontrolérech z řady STM32F0 a STM32F1.

Zajímavé zjištění bylo, že se zbytkové napětí může lišit v závislosti na použitém kódu. Pravděpodobně zbytkové napětí ovlivňuje konfigurace jiných periférií. To může způsobovat problémy při psaní software např. v Mbedu, kdy programátor nemá konfiguraci plně ve svých rukou.

Charakteristiky všech mikrokontrolérů odpovídají přibližně modelové rovnici. Obecně lze říci, že s přibývajícím měřeným napětím lineárně klesá (resp. roste, pokud se jedná o napětí nad zbytkovým napětím) i vytékající (resp. vtékající, pokud se jedná o napětí nad zbytkové) náboj, přeneseně tedy i proud. Vyjimku tvoří napěťový skok v úrovni poloviny napájecího napětí. Především v oblasti nad nulovým napětím lze modelovou rovnicí korigovat chybu měření vlivem vtékajících/vytékajících proudů.

6.6.2 STM32F303

Měření byl také mikrokontrolér STM32F303 (se stejným mikrokontrolérem (na jiném kitu) se vyhodnocovala všechna měření). V tomto mikrokontroléru jsou 3 AD převodníky. Ačkoliv je podporován v Mbedu, měření bylo s programem vytvořeným v Keilu s HAL knihovnamí. Programování v Keilu bylo zvoleno ze stejného důvodu, jako u STM32F103. V Mbedu lze využít jen 1. AD převodník ADC1.

Program byl tedy psán v Keilu s využitím HAL knihoven a počáteční konfigurační programem CubeMX. Frekvence hodin AD převodníků byla nastavena na 16 Mhz,

sampling time na nejvyšší možnou hodnotu, 601,5 tiků hodin. AD převodník podporuje vnitřní kalibraci, proto byla tato kalibrace na začátku programu provedena. Dle datasheetu má převodník smplovací kondenzátor o velikosti 5 pF, z toho důvodu byla tato velikost použita i pro modelovou křivku.

Napájecí napětí AD převodníků bylo měřeno opět multimetrem Haoyue MG980G na 3V3 pinu. Napětí mělo hodnotu 3,3 V.

Měřeny byly kanály 2 (PA1), 14(PB11), 6 (PC0) na prvním AD převodníku ADC1. Na 2. AD převodníku ADC2 byly měřeny kanály 1(PA4), 12 (PB2) a 7 (PC1). 3. AD převodník ADC3 má vyvedeny kanály jen na bránu B, proto byly měřeny kanály 1 (PB1), 5 (PB13) a 12 (PB0).

Oproti předchozím mikrokontrolérům se zbytkové napětí i průběhy naintegrovaného napětí AD převodníku v STM32F303 značně lišily.

Tabulka 7 Zbytkové napětí na kanálech 1,2,6,7,12 a 14 - ADC1,ADC2 STM32F303

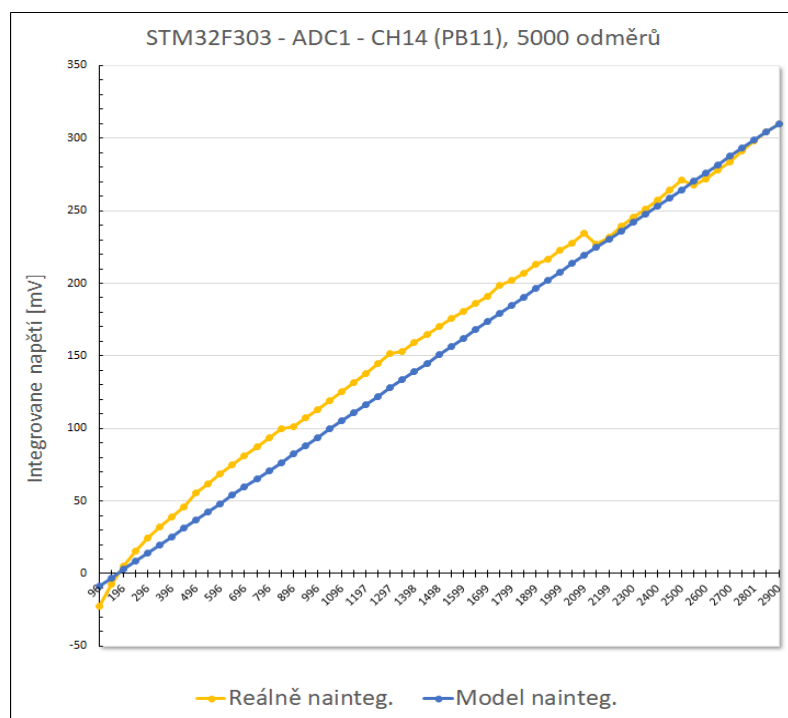
STM32F303-ADC1		STM32F303-ADC2	
Měřený kanál	Zbytkové napětí	Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 2 (pin PA1)	90 mV	Kanál 1 (pin PA4)	95 mV
Kanál 14 (pin PB11)	171 mV	Kanál 12 (pin PB2)	175 mV
Kanál 6 (pin PC0)	148 mV	Kanál 7 (pin PC1)	155 mV

Tabulka 8 Zbytkové napětí na kanálech 1,5,12 - ADC3 STM32F303

STM32F303-ADC3	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PB1)	122 mV
Kanál 5 (pin PB13)	110 mV
Kanál 12 (pin PB0)	166 mV

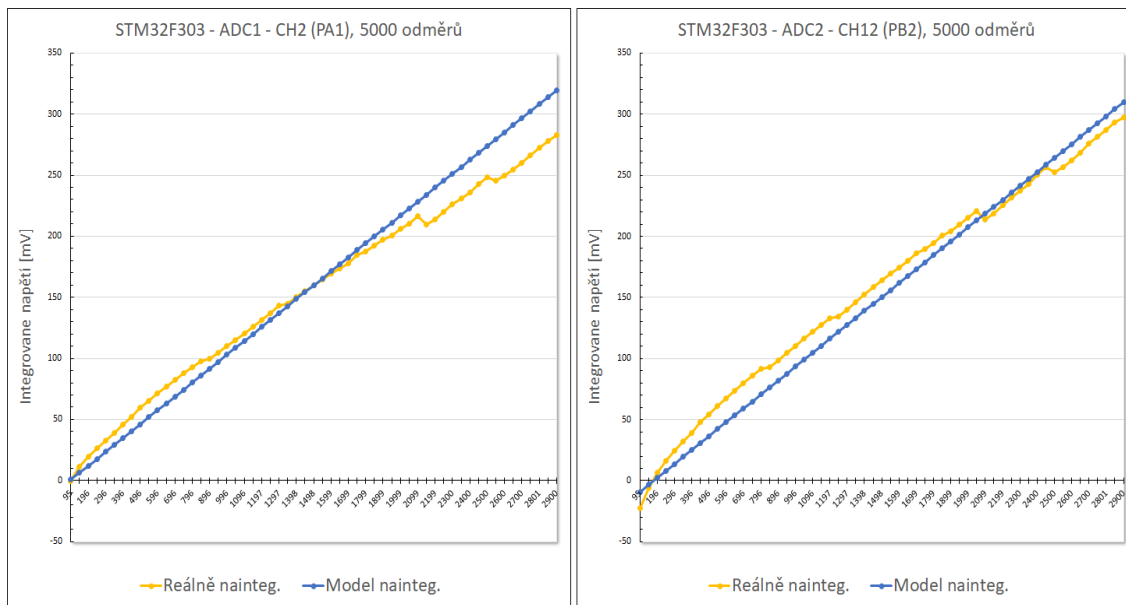
Zbytkové napětí se pohybovalo přibližně od 90-180 mV a lišilo se na každém kanálu. Na všech kanálech docházelo k podobnému jevu jako na kanálu 1 a 9 u STM32F042, tedy že zbytkové napětí nebylo stálé, ale proměnné. Vždy postupně rostlo na svoji maximální hodnotu a poté prudce kleslo na svoji spodní hranici. Tento jev se opakoval pořád do kola, u všech kanálů se jednalo o skok do 10 mV (zbytkové napětí např. na kanálu 2 (PA1) na ADC1 se pohybovalo mezi 88-92 mV, na kanálu 7 (PC1) mezi 151-159 mV). V tabulce (a do modelových křivek) jsou zaneseny přibližně střední hodnoty zbytkového napětí.

Průběhy naintegrovaného napětí na jednotlivých kanálech si jsou velmi podobné. Liší se trochu o posunutí na vodorovné ose díky rozdílnému zbytkovému napětí na jednotlivých kanálech. Na některých kanálech má křivka reálně naměřených hodnot pomalejší průběh (svírá s vodorovnou osou menší úhel) a díky tomu se více rozchází od modelové křivky. Úpravou velikosti smplovacího kondenzátoru v modelové křivce (4) lze docílit jejího strmějšího nebo naopak méně strmého průběhu a tím zvětšit/ zmenšit rozdíl mezi průběhy (více v kapitole u STM32L100 (6.6.5), kde je tato úprava názorně ukázána).

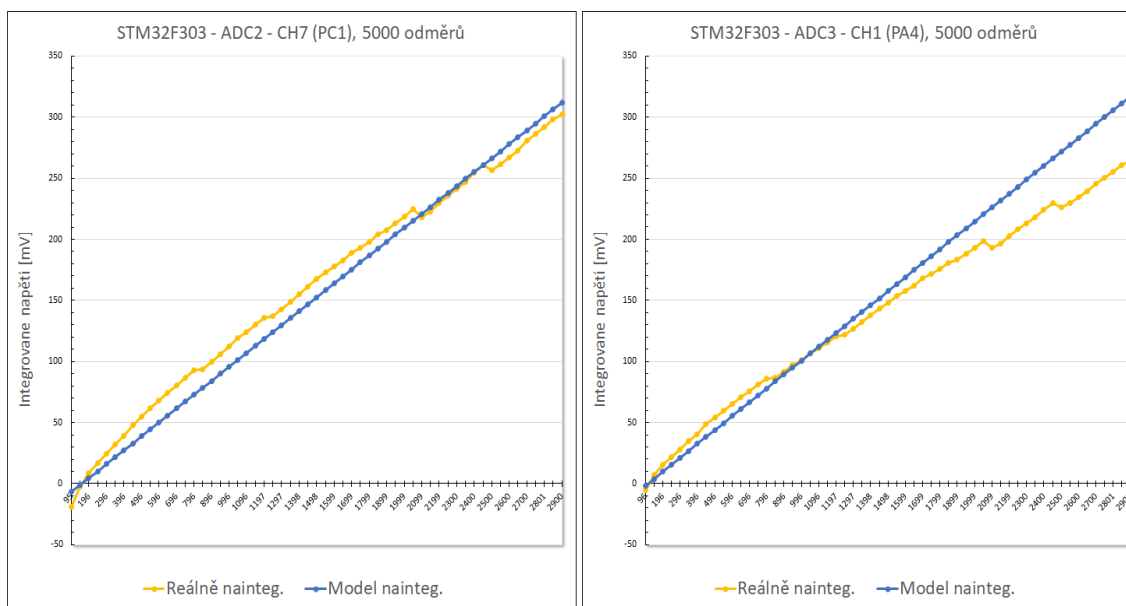


Obrázek 28 Křivka integrace napětí, kanál 14 (PB11) - ADC1, STM32F303

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem



Obrázek 29 Křivka intergrace napětí, kanál 2 (PA1) na ADC1 a 12 (PB2) na ADC2 - STM32F303



Obrázek 30 Křivka intergrace napětí, kanál 7 (PC1) na ADC2 a kanál 1 (PA4) na ADC3 - STM32F303

V relativně lineárním průběhu křivek jsou vidět 4 nepravidelnosti, napěťové skoky, v úrovních napětí přibližně 850,1300,2100 a 2500 mV. Objevují se ve všech charakteristikách. Jelikož nejsou pravidelné (jako třeba u mikrokontrolérů řady STM32F4), neumím si je vysvětlit.

Shrnutí

Jak již bylo zmíněno, charakteristiky integrovaného napětí jsou jiné než u procesorů z řad STM32F0 a STM32F1, i zbytkové napětí se hodně liší. Jinak lze ale modelovou křivkou celkem dobře modelovat vstupní/výstupní proud do AD převodníku tohoto mikrokontroléru. Na některých kanálech se větší odchylka od modelu objevuje až od 3. napěťového skoku, tedy přibližně od napěťové úrovně 2100 mV. Korekcí velikosti smplovacího kondenzátoru lze docílit přiblížení křivek a průběhy si pak více odpovídají (více v kapitole 6.6.5). Mohlo by to znamenat, že některé piny/brány mají větší parazitní kapacitu, která se mohla právě tímto způsobem (zdánlivě větší/menší smplovací kondenzátor) projevit na nainegrovaném náboji.

6.6.3 STM32F407, STM32F410, STM32F411, STM32F446

Jiné charakteristiky integrovaného napětí měly mikrokontroléry z řady STM32F4. STM32F410 a STM32F411 obsahují jeden AD převodník, který nepodporuje vnitřní kalibraci, tudíž jeho parametry byly měřeny bez ní.

Programy pro oba mikrokontroléry byly psané v Mbedu. Kapacita smplovacího kondenzátoru je dle datasheetů 4pF, pro výpočet modelové křivky byla tedy použita tato hodnota. Napájecí napětí AD převodníků bylo změřeno multimetrem M890G a bylo shodné u STM32F410 i u STM32F411, konkrétně 3,29 V.

Mikrokontroléry STM32F407 a STM32F446 mají 3 AD převodníky. Záměrem bylo otestovat kanály na všech z nich. Z toho důvodu nebyl použit pro programování těchto mikrokontrolérů Mbed (v něm je nakonfigurován k použití opět jen 1 AD převodník ADC1). Kód byl tedy psán v Keilu za pomoci konfigurace programem CubeMX a využití HAL knihoven. Kapacita smplovacího kondenzátoru je dle datasheetů opět pro oba kontroléry stejná, 4pF. Tato hodnota byla použita i pro modelovou křivku. Napájecí napětí převodníků bylo 2,94 V u STM32F407 a 3,29 V u STM32F446.

Jako u STM32F410 a STM32F411 ani AD převodníky STM32F407 a STM32F446 nepodporjí vnitřní kalibraci, proto bylo provedeno měření bez ní (také nemají v paměti uloženou kalibrační hodnotu (stejně jako STM32F410 a STM32F411), takže se za pomoci měření vnitřní reference nedá dopočítat skutečné napájecí napětí).

STM32F410

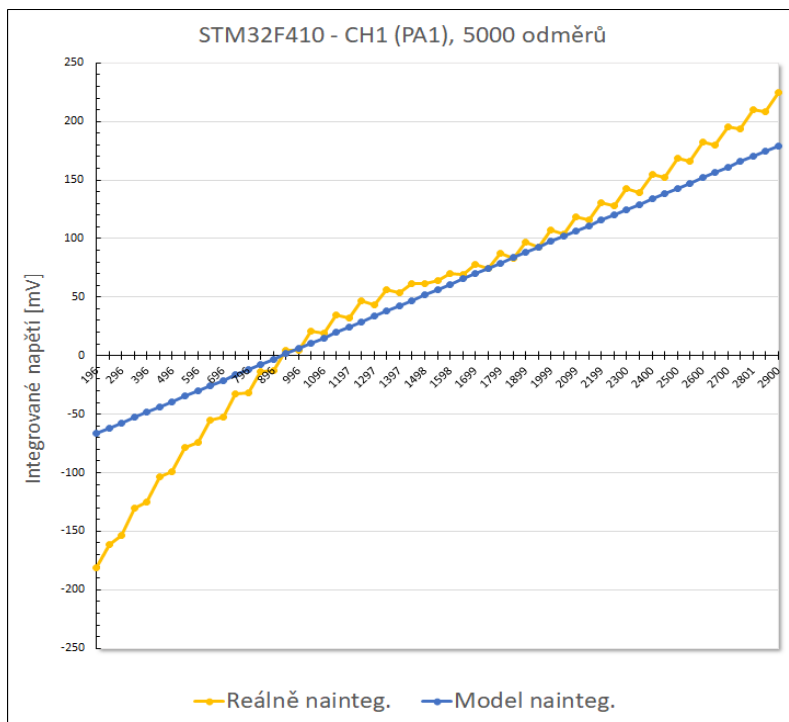
U mikrokontroléru STM32F410 bylo změřeno zbytkové napětí na kanálu 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1). U kanálů 1 a 9 bylo zbytkové napětí téměř shodné (928 a 924 mV). Zbytkové napětí na kanálu 11 (pin PC1) bylo asi o 200 mV vyšší.

Tabulka 9 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32F410

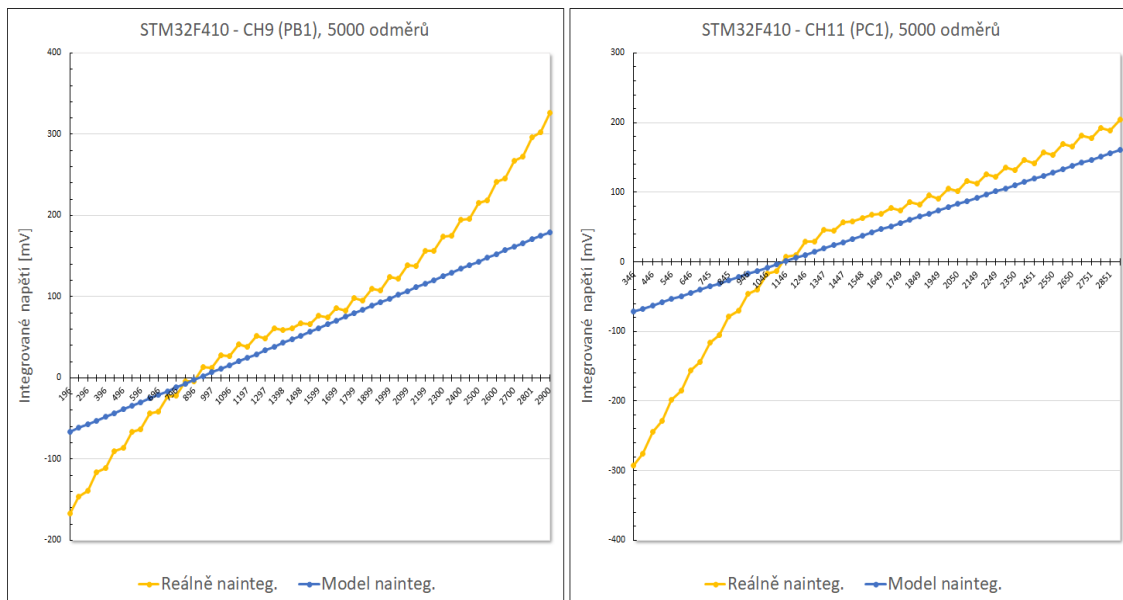
STM32F410	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	928 mV
Kanál 9 (pin PB1)	924 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1136 mV

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

Ačkoli byly charakteristiky naintegrovaného napětí napříč kanály podobné, u kanálu 9 (PB 1) došlo dříve ke strmému nárůstu integrovaného náboje, ke kterému ale směřovaly i křivky zbývajících kanálů:



Obrázek 31 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32F410



Obrázek 32 Křivka integrace napětí, kanál 9 (PB1) a 11 (PC1) - STM32F410

Jelikož zbytkové napětí na kanálu 11 (brána C, pin PC1) bylo odlišné než na ostatních kanálech, rozhodl jsem se proměřit více kanálů na této bráně. Konkrétně kanál 10,11 a 15 (piny PC0, PC1 a PC5).

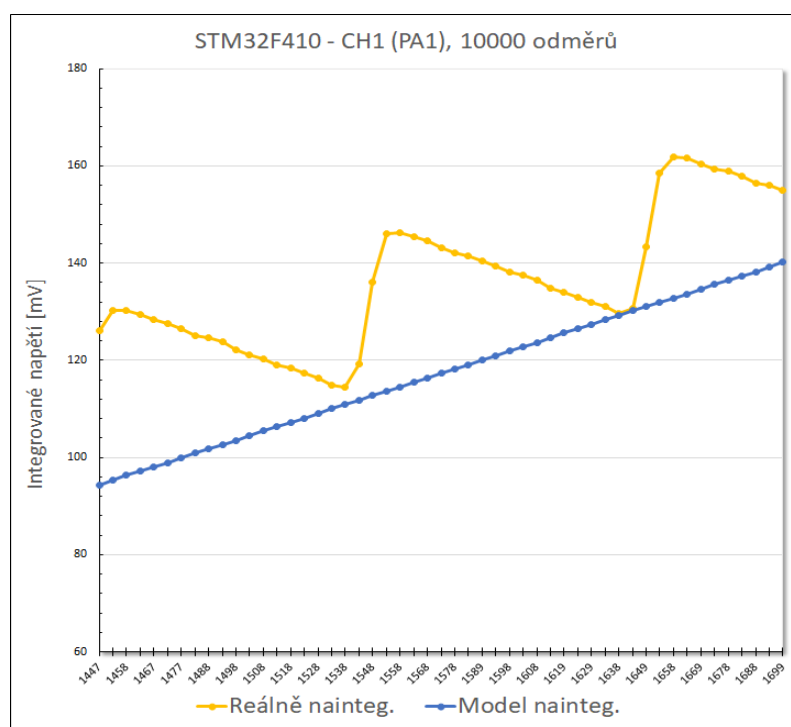
Tabulka 10 Zbytkové napětí na kanálech 10,11,15 - STM32F410

STM32F410	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 10 (pin PC0)	1136 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1136 mV
Kanál 15 (pin PC5)	928 mV

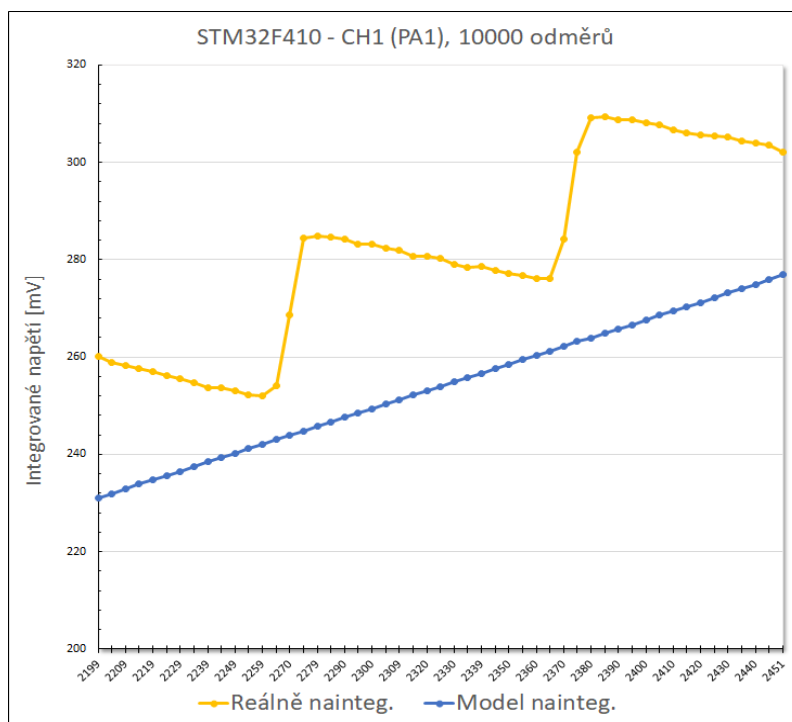
Zbytkové napětí na kanálu 10 (PC0) bylo shodné se zbytkovým napětím na kanálu 11 (PC1). Stejně tak byla shodná charakteristika naintegrovaného napětí. Kanál 15 (PC 5) měl stejné zbytkové napětí jako kanál 1 (PA1) a stejná byla také charakteristika naintegrovaného napětí na tomto kanálu. Proto zde tyto grafy neuvadím. V tomto případě se domnívám, že posun ve zbytkovém napětí mohl být způsoben opět konfigurací (např. jiných periférií, které by mohly zbytkové napětí ovlivňovat), která byla nastavena Mbedem a proto nedohledatelná.

Zajímavé byly napětové skoky, "zuby", které se v těchto charakteristikách periodicky opakovaly. Proto jsem se rozhodl změřit jejich průběhy podrobněji.

Kód pro STM32F410 zůstal shodný. Měření probíhalo mezi 1450-1700 mV (kde se zdá, jakoby se tento jev chvíli nevyskytoval) a 2200-2450 mV (kde je jasně patrný), s krokem o velikosti 5 mV. Měření jsem provedl na kanálu 1 (PA1).



Obrázek 33 Křivka intergrace napětí 1450-1700 mV, kanál 1 (PA1) - STM32F410



Obrázek 34 Křivka intergrace napětí 2200-2450 mV, kanál 1 (PA1) - STM32F410

Z měření mezi napětími 1450-1700 mV (obr. 34) je patrné, že i zde se tyto napěťové skoky, "zuby", vyskytují (pravděpodobně byly při měření s větším napěťovým krokem (50 mV) zprůměrovány a tím vyhlazeny). V obou dvou případech jsou napěťové skoky stejně velké, asi 32 mV (při měření s 10000 odměry na jedné napěťové úrovni). Zajímavá je zde ale spíše perioda těchto skoků. V obou případech je to přibližně 102 mV.

Délku, periodu, těchto skoků můžeme přepočítat na počet kvantizačních úrovní AD převodníku takto:

$$PocetKvant = DelkaSkoku / (Vdd / 4096) \quad (5)$$

Kde:

PocetKvant – délka periody v počtu kvantizačních úrovní

DelkaSkoku – délka periody v mV

Vdd - napájecí napětí AD převodníku v mV

Délka skoků 102 mV vychází tedy v počtu kvant (zaokrouhлено na jednotky):

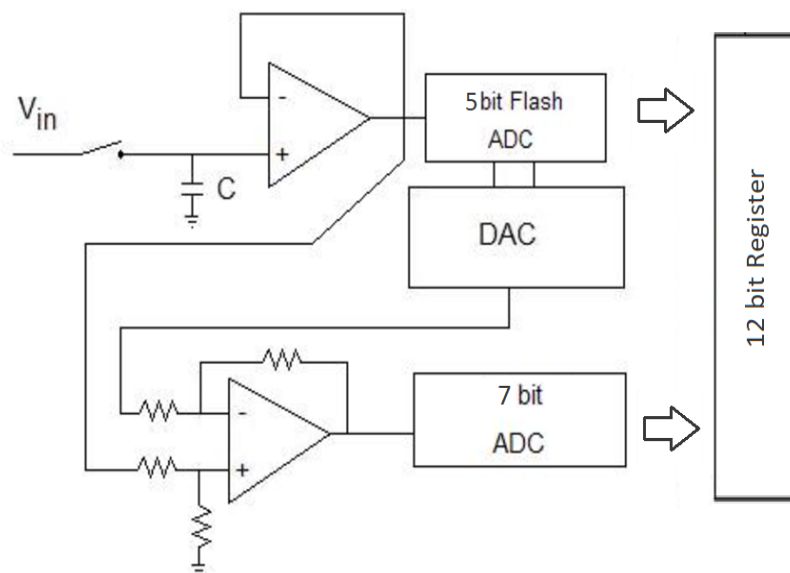
$$PocetKvant = 102 / (3290 / 4096)$$

$$PocetKvant = 127$$

Délka periody v počtu kvant by nám mohla říci něco více o vnitřním uspořádání AD převodníku. Je velmi blízko číslu 128, což je 2^7 (aby počet kvant takto vycházel, musela by být perioda 103 mV. Jelikož byl větší napěťový krok mezi jednotlivými úrovněmi (5 mV) a také se mohl projevit šum a chyba měření, je možné, že perioda skutečně byla 103 mV).

Důvodem tohoto chování by mohlo být vnitřní uspořádání AD převodníku. AD převodník tohoto mikrokontroléru je velmi rychlý (až 2,4 Msps) a proto díky výše zmí-

něným napětovým skokům s periodou téměř 128 převodních bitů, mohl být použit komplikovanější převodník s rozděleným převodem, kdy je nejprve převedeno horních 5 bitů číselné hodnoty napětí a poté, s touto hodnotou nastavenou DA převodníkem jako referenční, dopřevodeno zbylých 7 bitů. Tím by mohlo být dosaženo vyšší rychlosti převodu za cenu složitějšího řešení.



Obrázek 35 Rozdělený převod AD převodníku (někdy nazývaný jako odečítací nebo hybridní), převzato z [5] a upraveno pro chování 12-bit AD převodníku s rozdělenými vrchními 5 a spodními 7 bity převodu

Při "přetékání" hodnoty v dolních 7 bitech se změní LSB (least significant bit) v horních 5 bitech a tím by mohlo docházet k napětovému skoku, který byl naměřen. Dle změřených hodnot se může zdát, že tento skok není proveden v jednom kroku (nýbrž asi ve 3). Zde se může projevit šum na AD převodníku, kdy je jedna napětová úroveň na hranici přetečení spodních 7 bitů a vlivem šumu může tuto hranici někdy překročit ("přetéct") a někdy ne. Výsledkem odměru n vzorků, kdy střídavě přetéká spodních 7 bitů (a střídavě se mění LSB horních 5 bitů), by mohlo dojít přesně ke změřenému chování, kdy se jednotlivý skok nezdá diskrétní mezi 2 hodnotami, ale pozvolný s více naměřenými úrovněmi v průběhu skoku.

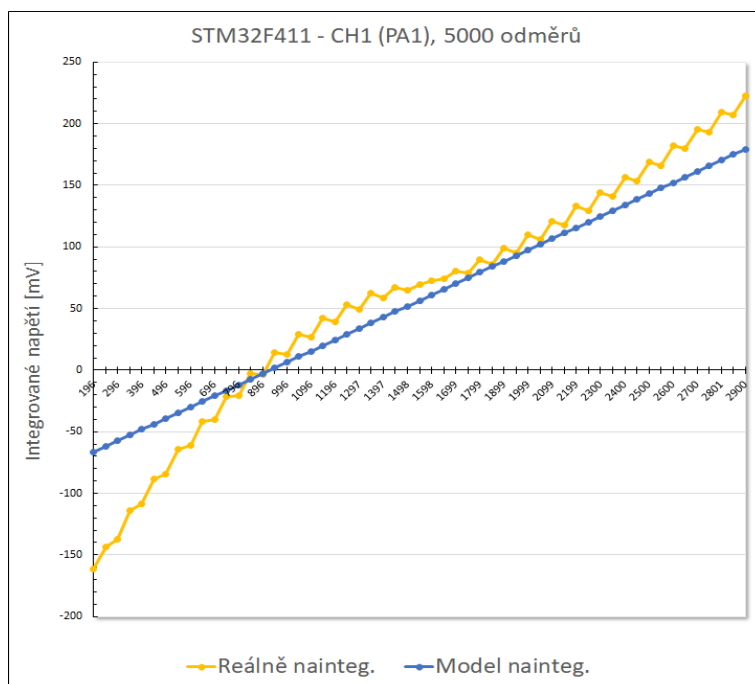
K rychlejšímu převodu by mohlo dojít díky rozdílným způsobům převodu napětí na digitální hodnotu u horních 5 a spodních 7 bitů. Je možné, že k převodu horních 5 bitů byl použit Flash (komparační) AD převodník. Ten je mnohonásobně rychlejší v převodu než převodník založený na metodě postupné aproximace, jeho nevýhodou je náročnost na součástky (na převodník s rozlišením n -bitů je třeba použít $2^n - 1$ komparátorů), větší velikost i spotřeba. Přibližně do rozlišení 8-bitů je ale možné jeho použití i přímo v AD převodnících v mikrokontrolérech. Výhodou by bylo téměř okamžité převedení horních 5 bitů hodnoty velikosti měřeného napětí a časově náročnější převod metodou postupné aproximace použít jen na spodních 7 bitů.

STM32F411

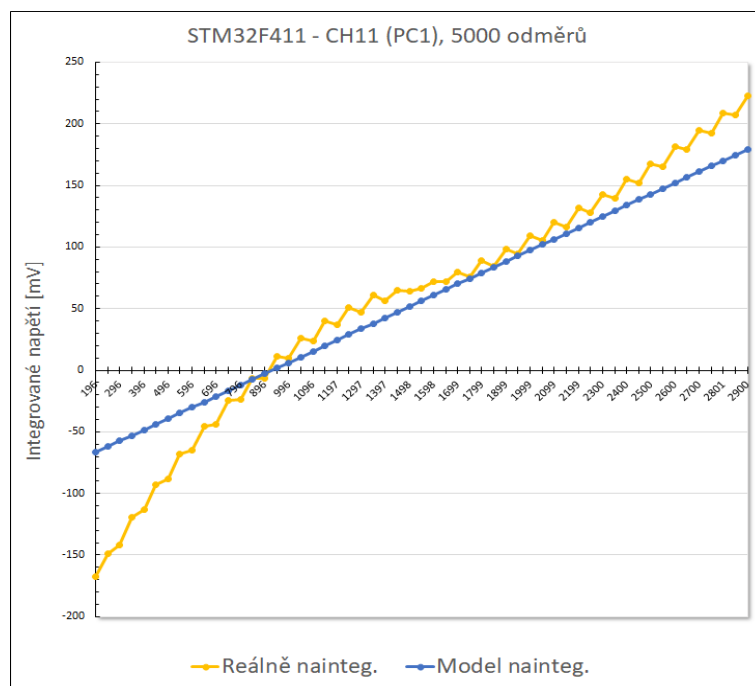
AD převodník mikrokontroléru STM32F411 vykazoval velmi podobné chování, jako u STM32F410. Byly měřeny stejné kanály 1 (PA1), 9 (PB1), 11 (PC1), napájecí napětí převodníku bylo 3,29 V. Rozdíl oproti STM32F410 byl měřen na kanálu 11 (PC1), kde bylo téměř stejné zbytkové napětí jako na ostatních kanálech (oproti chování STM32F410, kde na kanálu 11 (PC1) bylo měřeno zbytkové napětí o asi 200 mV větší než na jiných kanálech)). Tomu odpovídala i charakteristika integrovaného napětí, která nyní byla u tohoto kanálu shodná, jako na jiných kanálech (a stejná jako u STM32F410 kanálu 1 a 15 (PA1, PC5)).

Tabulka 11 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32F411

STM32F411	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	926 mV
Kanál 9 (pin PB1)	926 mV
Kanál 11 (pin PC1)	928 mV



Obrázek 36 Křivka intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32F411

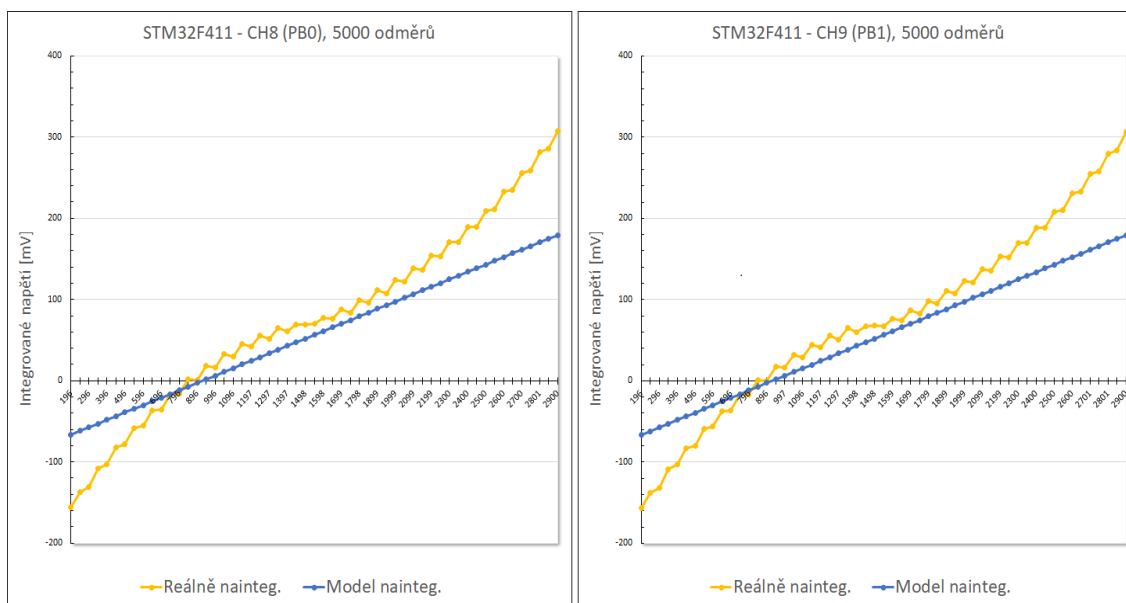


Obrázek 37 Křivka intergrace napětí, kanál 11 (PC1) - STM32F411

Jelikož kanál 9 (PB1) vykazoval trochu jiné chování než ostatní kanály (integrovane napětí při vyšších napětových úrovních bylo větší, průběh křivky byl ale obdobný), byl ještě změřen jediný další volný kanál na bráně B, kanál 8 (PB0). Výsledky byly u obou kanálů shodné.

Tabulka 12 Zbytkové napětí na kanálu 8 a 9 - STM32F411

STM32F411	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 8 (pin PB0)	926 mV
Kanál 9 (pin PB1)	926 mV



Obrázek 38 Křivka intergrace napětí, kanál 8 (PB0) a 9 (PB1) - STM32F411

STM32F407

Jak již bylo zmíněno, STM32F407 má 3 AD převodníky. Kód byl psán v Keilu za pomoci konfigurace programem CubeMX a využití HAL knihoven, kapacita samplovacího kondenzátoru je 4pF, napájecí napětí převodníků 2,94 V. AD převodníky nepodporují vnitřní kalibraci, proto bylo provedeno měření bez ní.

U STM32F407 byly hodiny do AD převodníku nastaveny na 16 MHz, sampling time pak na nejvyšší možnou hodnotu, 480 tiků hodin. Měření byly kanály 1 (PA1), 9 (PB1), 11 (PC1) na ADC1. Na druhém AD převodníku ADC2 byly měřeny kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 12 (PC2). ADC3 nemá vyveden kanál na bránu B, proto u něj bylo provedeno měření na kanálech 1 (PA1), 3 (PA3) a 11 (PC1).

Zbytkové napětí bylo na všech kanálech a u všech AD převodníků naměřeno přibližně stejné, kolem 650 mV.

Tabulka 13 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 ADC1 a kanálech 1,9,12 ADC2 - STM32F407

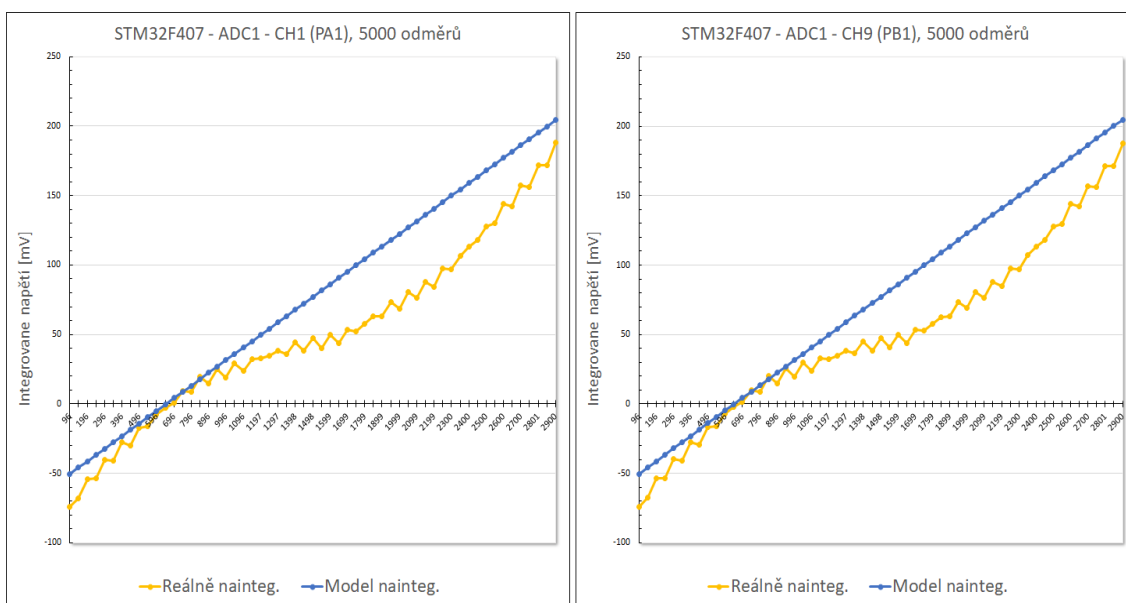
STM32F407 - ADC1		STM32F407 - ADC2	
Měřený kanál	Zbytkové napětí	Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	651 mV	Kanál 1 (pin PA1)	651 mV
Kanál 9 (pin PB1)	649 mV	Kanál 9 (pin PB1)	649 mV
Kanál 11 (pin PC1)	650 mV	Kanál 12 (pin PC2)	649 mV

Tabulka 14 Zbytkové napětí na kanálech 1,3,11 ADC3 - STM32F407

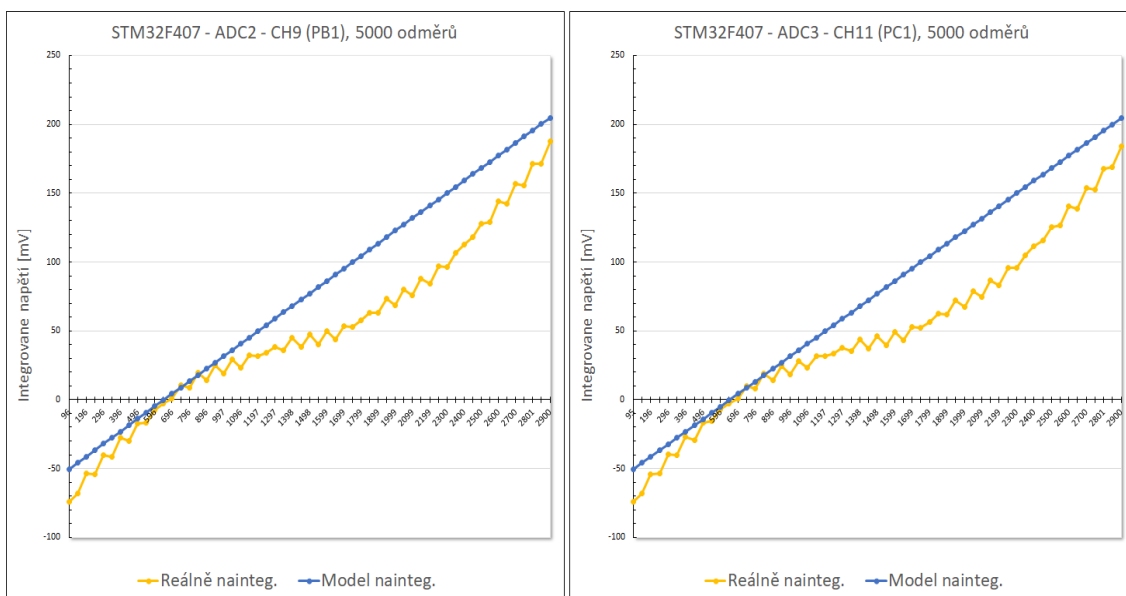
STM32F407-ADC3	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	650 mV
Kanál 3 (pin PA3)	648 mV
Kanál 11 (pin PC1)	650 mV

Shodné byly i charakteristiky integrovaného napětí. Opět jak mezi kanály v jed-

nom AD převodníku, tak mezi AD převodníky navzájem. Níže ukázka z několika měření:



Obrázek 39 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) a 9 (PB1) - ADC1, STM32F407



Obrázek 40 Křivka integrace napětí, kanál 9 (PB1) na ADC2 a kanál 11 (PC1) na ADC3 -STM32F407

Průběhy integrovaného náboje jsou si velmi podobné s průběhy na mikrokontrolérech STM32F410 a STM32F411, především v porovnání s jejich průběhy na branách B. Rozdíl je v tom, že v případě STM32F410 a F411 je křivka integrovaného náboje od bodu zbytkového napětí nad modelovou křivkou (odebíraný náboj AD převodníkem je větší, než dle modelu), kdežto u STM32F407 je pod modelovou křivkou (odebíraný náboj je menší, než dle modelu). To může být způsobeno zaprvé rozdílným zbytkovým napětím na AD převodnících STM32F407 a STM32F410/STM32F411 a zadruhé i jinou reálnou kapacitou samplovacího kondenzátoru. Změnou jeho velikosti můžeme opět (jako u STM32F303) upravit modelovou křivku tak, aby výsledky byly téměř shodné jako u předchozích mikrokontrolérů řady STM32F4 (v tomto případě by muselo dojít ke zmenšení samplovacího kondenzátoru v modelové rovnici, více v kapitole s STM32L100 (6.6.5), kde je tato úprava názorně ukázána).

STM32F446

U STM32F446 byly hodiny AD převodníků a sampling time nastaveny stejně jako u STM32F407. Hodiny na 16 MHz, sampling time pak na 480 tiků hodin (nejvyšší možná hodnota). Stejně jako u modelů řady STM32F4 ani AD převodníky STM32F446 nepodporují vnitřní kalibraci, proto bylo provedeno měření bez ní.

Kód byl psán v Keilu za pomoci konfigurace programem CubeMX a využití HAL knihoven, kapacita samplovacího kondenzátoru je 4pF (použito pro modelovou křivku), napájecí napětí převodníků bylo 3,29 V.

Měření byly kanály 1 (PA1), 8 (PB0), 10 (PC0) na ADC1 a ADC2. ADC3 opět nemá vyveden žádný kanál na bránu B, proto u něj bylo provedeno měření na kanálech 1 (PA1), 10 (PC0) a 13 (PC3). Napříč všemi AD převodníky a všemi kanály bylo naměřeno zbytkové napětí téměř shodné, asi 822 mV.

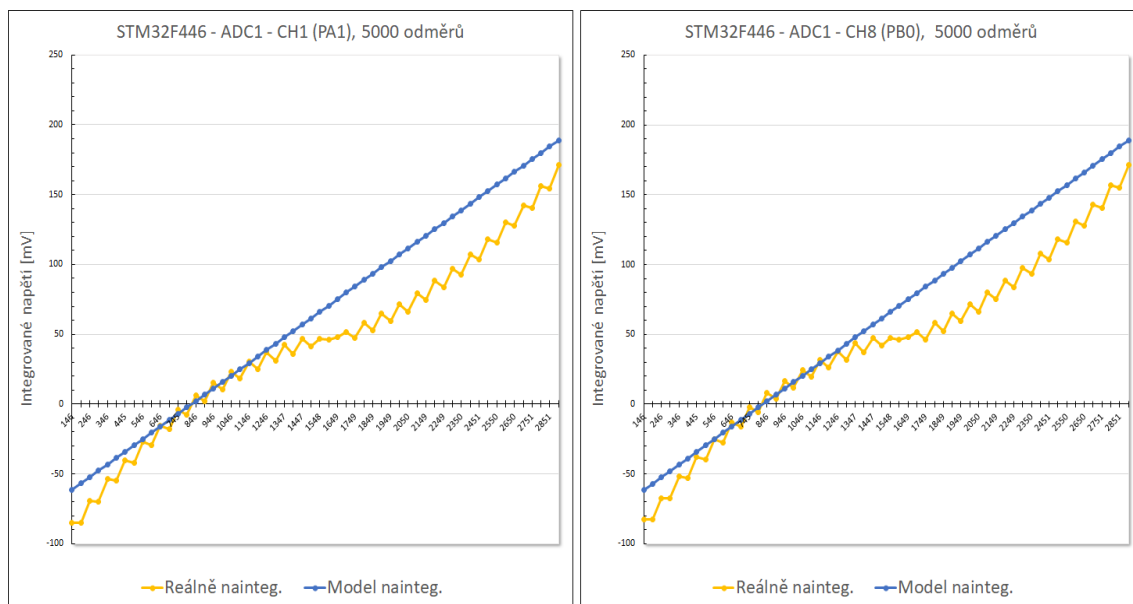
Tabulka 15 Zbytkové napětí na kanálech 1,8,10 - ADC1,ADC2 STM32F446

STM32F446 - ADC1		STM32F446 - ADC2	
Měřený kanál	Zbytkové napětí	Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	822 mV	Kanál 1 (pin PA1)	822 mV
Kanál 8 (pin PB0)	822 mV	Kanál 8 (pin PB0)	821 mV
Kanál 10 (pin PC0)	822 mV	Kanál 10 (pin PC0)	822 mV

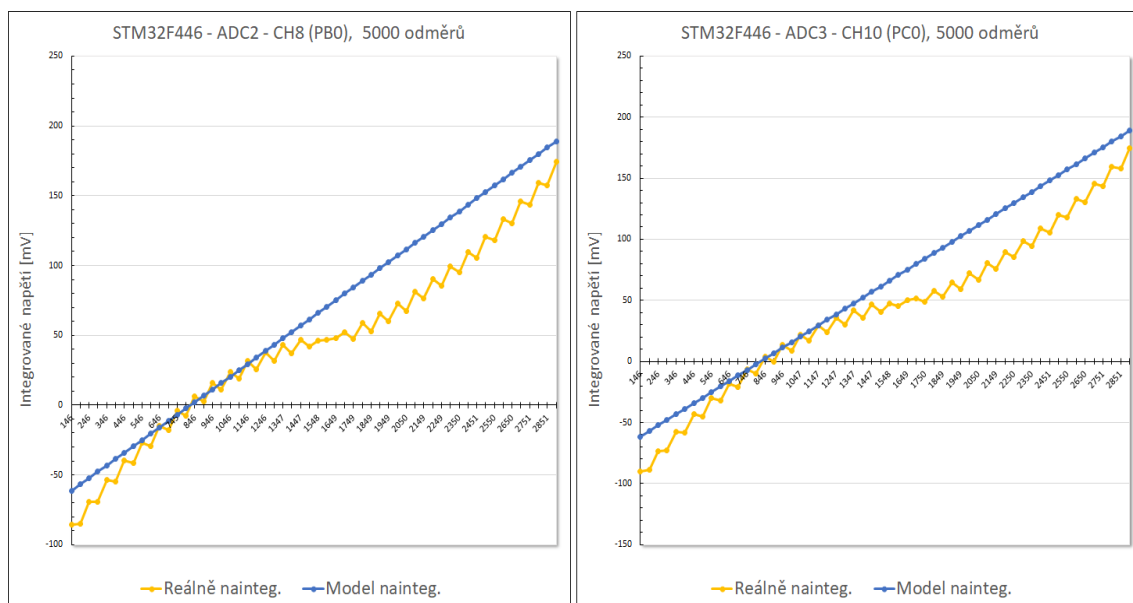
Tabulka 16 Zbytkové napětí na kanálech 1,10,13 - ADC3, STM32F446

STM32F446 - ADC3	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	821 mV
Kanál 10 (pin PC0)	822 mV
Kanál 13 (pin PC3)	822 mV

Shodné byly i charakteristiky integrovaného napětí, jak mezi jednotlivými kanály u jednoho AD převodníku, tak napříč všemi AD převodníky. Níže ukázka z několika měření:



Obrázek 41 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) a 8 (PB0) - ADC1, STM32F446



Obrázek 42 Křivka integrace napětí, kanál 8 (PB0) na ADC2 a kanál 10 (PC0) na ADC3 - STM32F407

Průběhy integrovaného napětí jsou shodné, jako u mikrokontroléru STM32F407 a velmi podobné jako u STM32F410 a STM32F411.

Shrnutí

S ohledem na společné vlastnosti, jako třeba že žádný z uvedených mikrokontroléru nenabízí vnitřní kalibraci AD převodníku (ani nemají uloženou kalibrační hodnotu pro měření skutečného napájení AD převodníku za pomoci vnitřní reference) a nabízejí stejný maximální počet odměrů za sekundu (2,4 Msps), usuzuji, že mikrokontroléry celé řady STM32F4 používají stejné AD převodníky.

Jak již bylo naznačeno, z naměřených hodnot by mohlo vyplývat, že je u těchto převodníků použit složitější převod napětí, rozdělený na dvě části po 5 bitovém a 7 bitovém převodu. Bylo zjištěno, že pravděpodobné projevy složitějšího vnitřního uspořádání AD převodníků jsou pozorovatelné na charakteristice průběhu naintegrovaného náboje, což přináší novou informaci o samotném AD převodníku v těchto mikrokontrolérech.

6.6.4 STM32L031, STM32L053, STM32L073

Mikrokontroléry STM32L031, STM32L053, STM32L073 mají všechny jeden AD převodník a jsou podporované v Mbedu, proto byl kód pro ně napsán v tomto prostředí.

AD převodníky těchto mikrokontrolérů podporují vnitřní kalibraci, proto byla vždy při spuštění programu provedena. Jak již bylo zmíněno v (6.5) AD převodník mikrokontroléru STM32L053 byl měřen i s programem, kde vnitřní kalibrace nebyla provedena. Výsledné charakteristiky ale byly totožné.

Dle datasheetu mají AD převodníky všech těchto mikrokontrolérů samplovací kondenzátor o velikosti 8 pF. Tato hodnota byla použita i pro modelovou křivku.

U všech zmíněných mikrokontrolérů jsem se potýkal s problémem nestálého zbytkového napětí, které se projevovalo způsobem, který již byl zmíněn dříve. Periodicky pomalu rostlo do určité hodnoty a poté o několik mV najednou pokleslo. Toto se cyklicky opakovalo.

STM32L031

AD převodník mikrokontroléru STM32L031 na Nucleo kitu nemá vyveden žádný kanál na bránu B, proto byly měřeny kanály 1 (PA1), 5 (PA5) a 11 (PC1).

Napájecí napětí bylo opět měřeno multimetrem Haoyue M890G a mělo velikost 3,29 V.

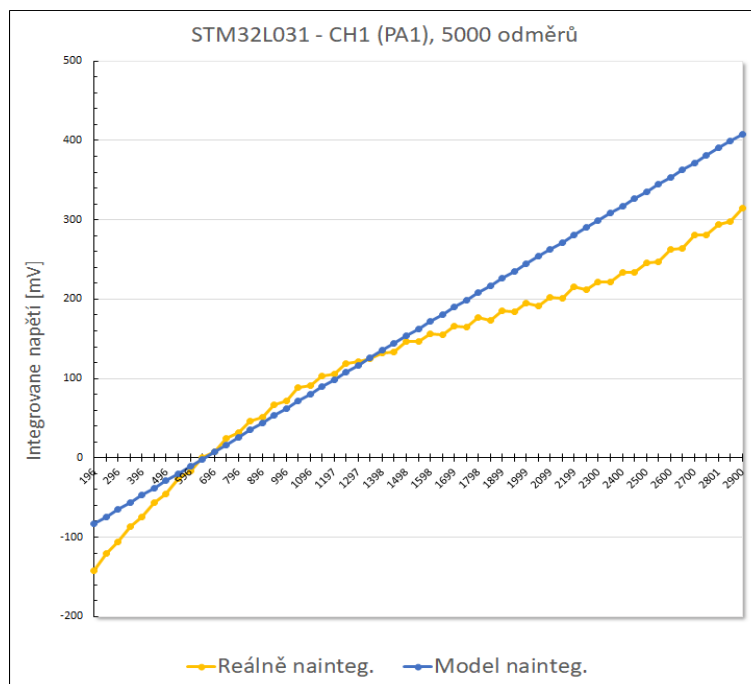
Zbytkové napětí na kanálu 1 (PA1) bylo mezi 648-660 mV, na kanálu 11 (PC1) pak mezi 636-646 mV. V tabulce a pro modelovou křivku jsou použity střední hodnoty tohoto rozpětí.

Tabulka 17 Zbytkové napětí na kanálech 1,5,11 - STM32L031

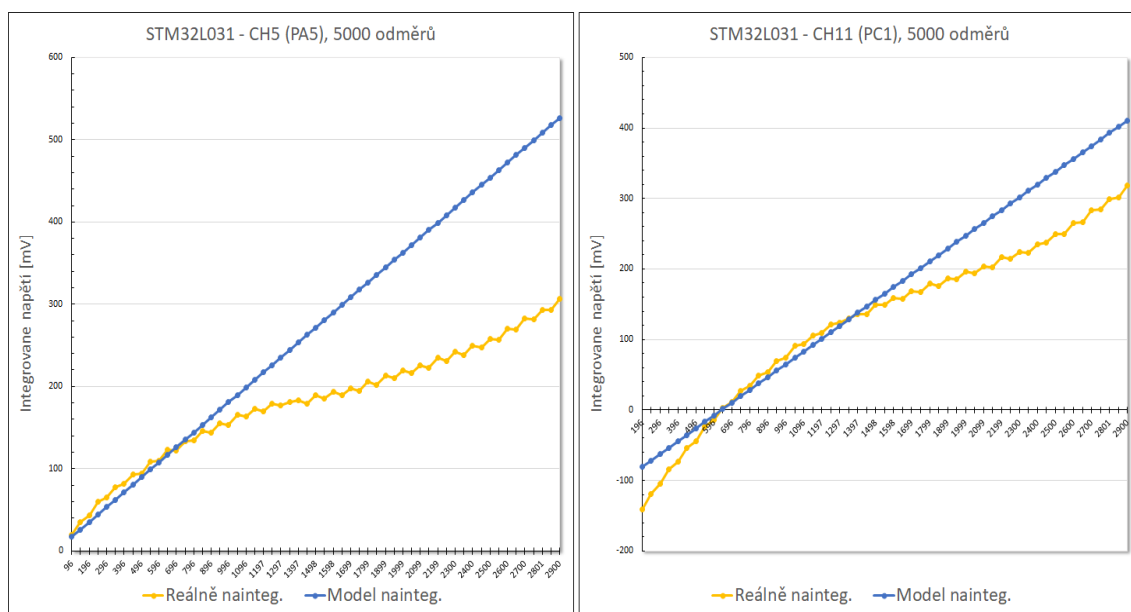
STM32L031	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	654 mV
Kanál 5 (pin PA5)	3 mV
Kanál 11 (pin PC1)	640 mV

Velmi rozdílné zbytkové napětí oproti zbývajícím kanálům bylo na kanálu 5 (PA5). Naměřený průběh naintegrovaného náboje ale odpovídal tomuto zbytkovému napětí 3

mV (tedy křivka by se zdánlivě protla s modelovou křivkou na nulové ose, v bodě přibližně 3 mV).



Obrázek 43 Křivka intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L031



Obrázek 44 Křivka intergrace napětí, kanál 5 (PA5) a kanál 11 (PC1) - STM32L031

Křivky integrovaného napětí mají velmi podobnou charakteristiku jako u procesorů řady STM32F4. Objevuje se zde i podobný jev, kdy je křivka zubovitého charakteru. Tyto "zuby", napěťové skoky, byly blíže měřeny na mikrokontroléru STM32L053.

STM32L053

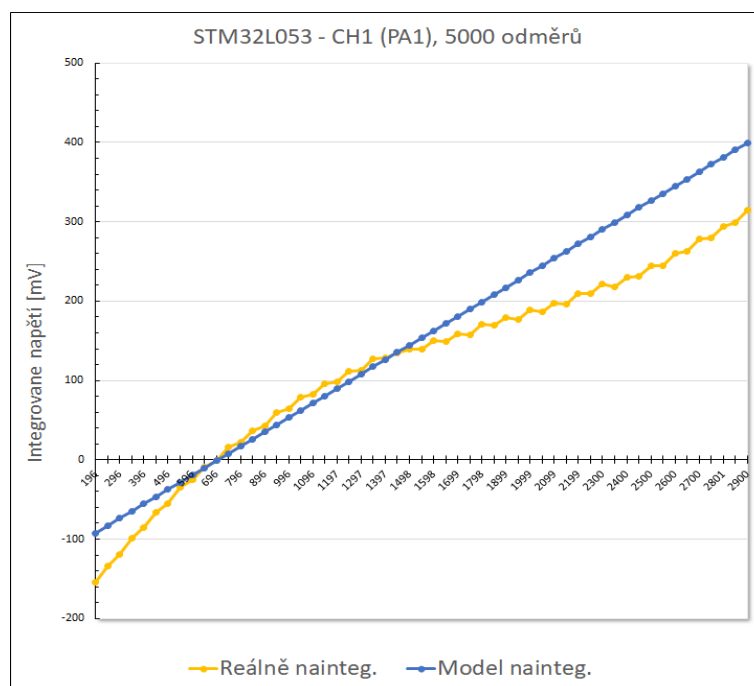
U STM32L053 byl měřen kanál 1 (PA1), kanál 9 (PB1) a kanál 11 (PC1). Napájecí napětí AD převodníku v tomto mikrokontroléru bylo 3,3 V.

U mikrokontroléru STM32L053 bylo napětí proměnné na kanálech 1 a 11 (PA1 a PC1), shodně mezi 695-710 mV. Obecně ale bylo zbytkové napětí na všech kanálech podobné.

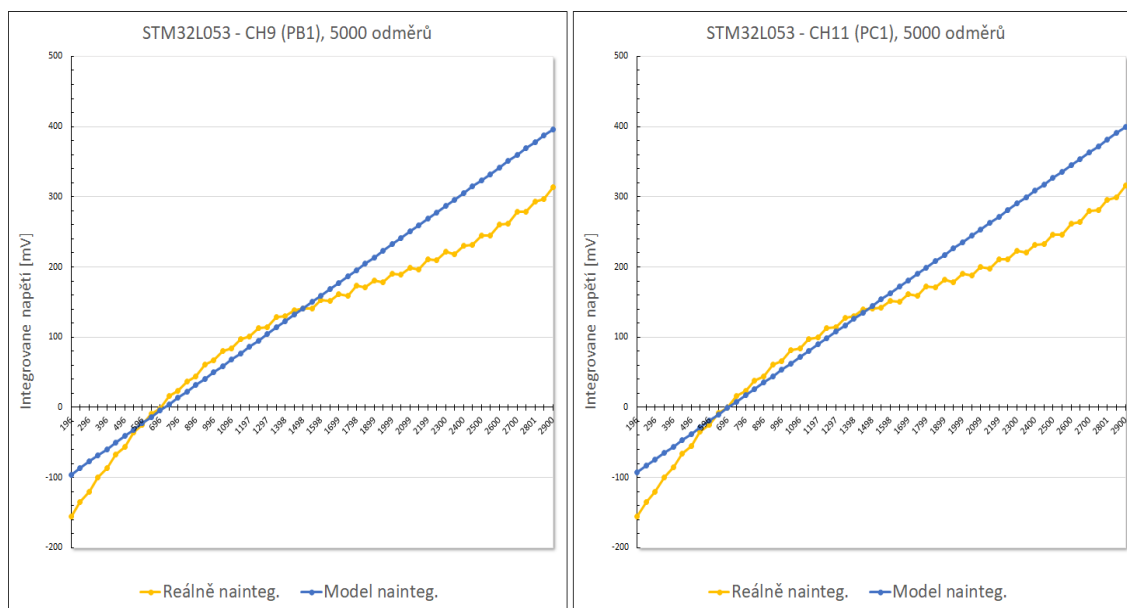
Tabulka 18 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32L053

STM32L053	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	703 mV
Kanál 9 (pin PB1)	722 mV
Kanál 11 (pin PC1)	703 mV

Stejně tak si byly podobné charakteristiky naintegrovaného napětí mezi jednotlivými kanály a byly také stejné jako u STM32L031.

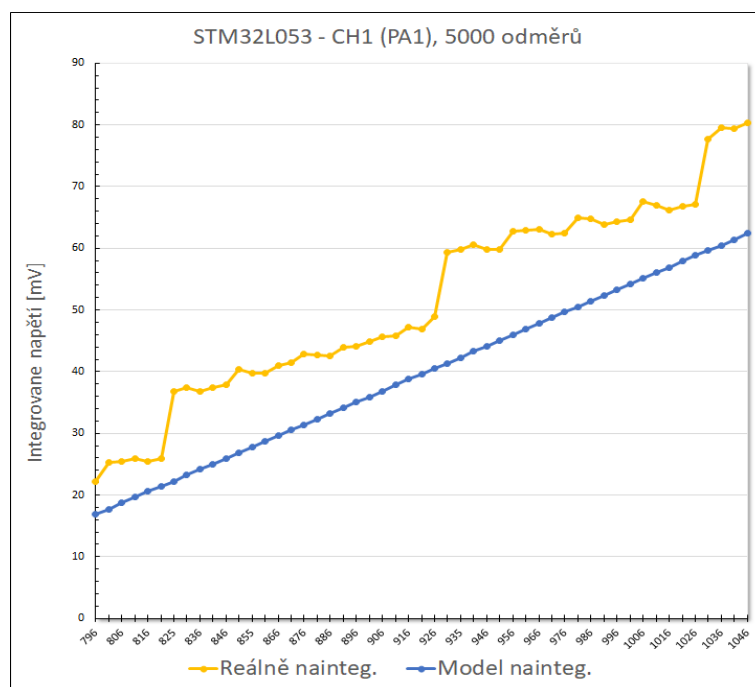


Obrázek 45 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L053

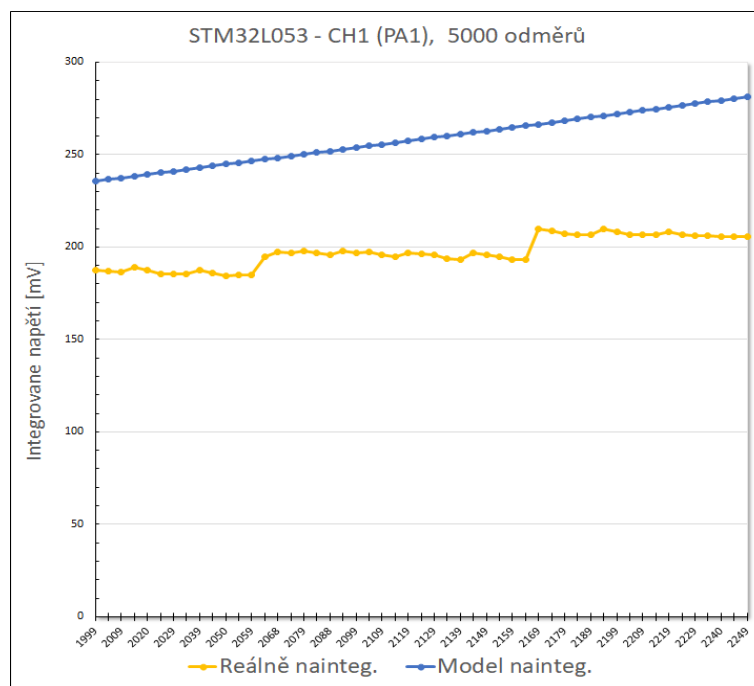


Obrázek 46 Křivka intergrace napětí, kanál 9 (PB1) a kanál 11 (PC1) - STM32L053

Jako u STM32L031 a u AD převodníku mikrokontrolérů řady STM32F4 i zde se vyskytovaly malé napětové skoky, "zuby", v průběhu celé křivky. S mikrokontrolérem STM32L053 jsem je podrobil bližšímu měření. Kód pro STM32L053 zůstal stejný, jen se nyní měřilo integrované napětí na napětových úrovních 800-1050 mV (oblast kdy je reálně změřená křivka nad modelovou křivkou) a 2000-2250 mV (reálná křivka pod modelovou křivkou). Měření proběhlo na kanálu 1 (PA1).



Obrázek 47 Křivka intergrace napětí 800-1050mV, kanál 1 (PA1) - STM32L053



Obrázek 48 Křivka intergrace napětí 2000-2250mV, kanál 1 (PA1) - STM32L053

Napěťový skok v naintegrovaném napětí má ve všech případech přibližně 10 mV (při 5000 odměrech). Při bližším zkoumání jsou vidět další menší napěťové skoky, které mají určitou pravidelnost. Perioda velkých napěťových skoků, "zubů", je přibližně 104 mV. Zde je podobnost jako u mikrokontroléru řady STM32F4.

Převod periody na kvantizační úroveň AD převodníku dle (5) pak dává hodnotu 129. Tato hodnota je opět velmi blízko hodnotě 128, tedy 2^7 .

Perioda menších "zubů" je přibližně 25 mV. Převod periody na kvantizační úroveň AD převodníku dle (5) je 31, což je blízko hodnotě 32, tedy 2^5 .

Naměřené velikosti period se mohou lehce rozcházet od svých skutečných hodnot ze stejného důvodu, které byly probrány u STM32F410 (6.6.3) (relativně velký napěťový krok 5 mV, šum a vliv chyby měření).

Díky těmto zjištěním lze znovu usuzovat na rozdělený převod analogové hodnoty na digitalní. V tomto případě by mohlo jít o ještě komplikovanější obvod, než u řady STM32F4. Větší napěťové skoky by odpovídaly rozdělení převodu na horních 5 a spodních 7 bitů. Menší napěťové skoky by mohly ukazovat na to, že i spodních 7 bitů bude u převodu rozděleno na horní 2 a spodních 5 bitů.

STM32L073

Poslední z měřených procesorů ze série STM32L0 byl STM32L073. Měřeny byly kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1), kód opět psán v Mbedu s vnitřní kalibrací AD převodníku na začátku programu. Jako u AD převodníků předchozích procesorů i zde je smplovací kondenzátor o velikosti 8 pF, která byla použita do modelové křivky.

Napájecí napětí AD převodníku v tomto mikrokontroléru bylo stejné jako u STM32L053, tedy 3,3 V.

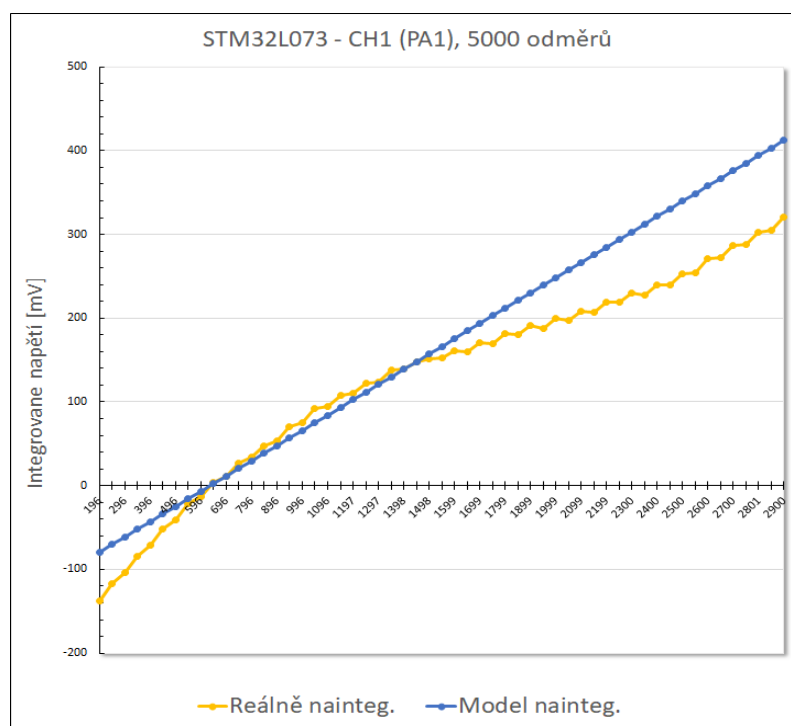
Zbytkové napětí bylo proměnné jen na kanálu 1 (PA1) a to jen mezi napětími 632-634 mV (opět upozorňuji, že výkyv mohl být větší, ale metodikou měření zbytkového napětí se hodnota zaokrouhlila na toto rozpětí). Zaznamenána tak byla střední hodnota

633 mV.

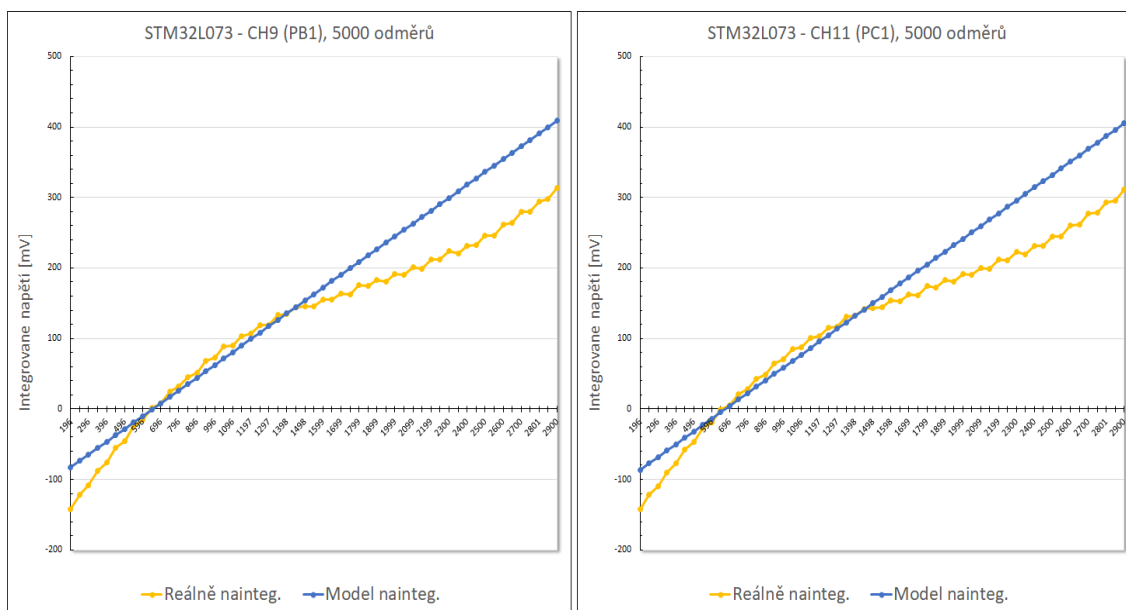
Tabulka 19 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32L073

STM32L073	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	633 mV
kanál 9 (pin PB1)	652 mV
kanál 11 (pin PC1)	672 mV

Charakteristiky naintegrovaného napětí pak byly opět shodné jako u AD převodníku předchozích mikrokontrolérů na kanálech s podobným zbytkovým napětím.



Obrázek 49 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L073



Obrázek 50 Křivka integrace napětí, kanál 9 (PB1) a 11 (PC1) - STM32L073

Shrnutí

Charakteristiky naintegrovaného napětí mikrokontrolérů řady STM32L0 se zásadně neodchylují od modelové křivky. V oblasti pod zbytkovým napětím (které bylo obvykle 650-700 mV) je výstupní náboj z AD převodníku větší, než dle modelu. Větší je také i od zbytkového napětí do necelé poloviny napájecího napětí (do asi 1500mV. V tomto případě se již jedná o vstupní náboj). Znamená to, že vstupní/výstupní proud do/z AD převodníku by byl o něco málo větší, než dle modelové rovnice. Následně je reálně naměřené křivka pod modelovou, tedy vstupní náboj (a zároveň i vstupní proud) je menší, než odhadovaný dle modelu.

Vzhledem ke stejným parametrům AD převodníků (např. velikost samplovacího kondenzátoru 8 pF), podobným charakteristikám a i na většině kanálech podobným zbytkovým napětím lze usuzovat, že všechny mikrokontroléry série STM32L0 mají stejný AD převodník. Charakteristiky si jsou také velmi podobné s charakteristikami mikrokontrolérů z STM32F4 a to včetně malých napěťových skoků, "zubů". Od řady STM32F4 se ale AD převodníky mikrokontrolérů řady STM32L0 v některých parametrech liší (např. ve velikosti samplovacího kondenzátoru nebo maximálního sampling time (převodníky mikrokontrolérů řady STM32L0 mají maximální sampling time 160,5 cyklů hodin AD převodníku, u STM32F4 je to 480 cyklů)). Proto pravděpodobně není použit stejný AD převodník, ale dle charakteristiky rozhodně velmi podobný.

I u mikrokontrolérů řady STM32L0 byly měřeny menší napěťové skoky, "zuby", v průběhu celé charakteristiky. Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že tyto skoky mají pravděpodobně složitější strukturu, než u STM32F4, kde se také objevovaly (u mikrokontrolérů řady STM32L0 se místo větších skoků s periodou asi 104 mV objevovaly i menší s periodou asi 25 mV). Opět lze z toho usuzovat na rozdělený převod analogového napětí na horních 5 a spodních 7 bitů (kdy je pravděpodobně spodních 7 bitů ještě rozděleno na horní 2 a spodních 5 (projev napěťového skoku s periodou 25 mV)).

6.6.5 STM32L100, STM32L152

Dalším měřením bylo měření série STM32L1. Kódy pro STM32L100 i pro STM32L152 byly psané v Keilu s využitím HAL knihoven. STM32L100 není totiž v Mbedu vůbec podporován. U STM32L152 byl podporován jen Nucleo kit s STM32L152RE. Kód pro tento mikrokontrolér se nepovedlo zprovoznit na Discovery kitu s STM32L152RB, který jsem měl k dispozici.

Hodiny AD převodníků v obou mikrokontrolérech byly nastaveny na 8 MHz, sampling time pak na 384 tiků hodin (nejvyšší možná hodnota). Ani jeden z AD převodníků nepodporuje vnitřní kalibraci, proto nebyla provedena. Dle datasheetu pro STM32L100 je kapacita smplovacího kondenzátoru 8 pF, u STM32L152 pak 16 pF.

Napájecí napětí AD převodníků v těchto mikrokontrolérech bylo měřeno opět multimetrem Haoyue M980G. U STM32L100 mělo hodnotu 2,93 V a u STM32L152 2,95 V.

Měřeny byly kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1) u STM32L100. U STM32L152 byl místo kanálu 9 na bráně B měřen kanál 8 (PB0).

STM32L100

Měřeny byly kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1) a jak bylo zmíněno, napájecí napětí AD převodníku tohoto mikrokontroléru bylo 2,93 V.

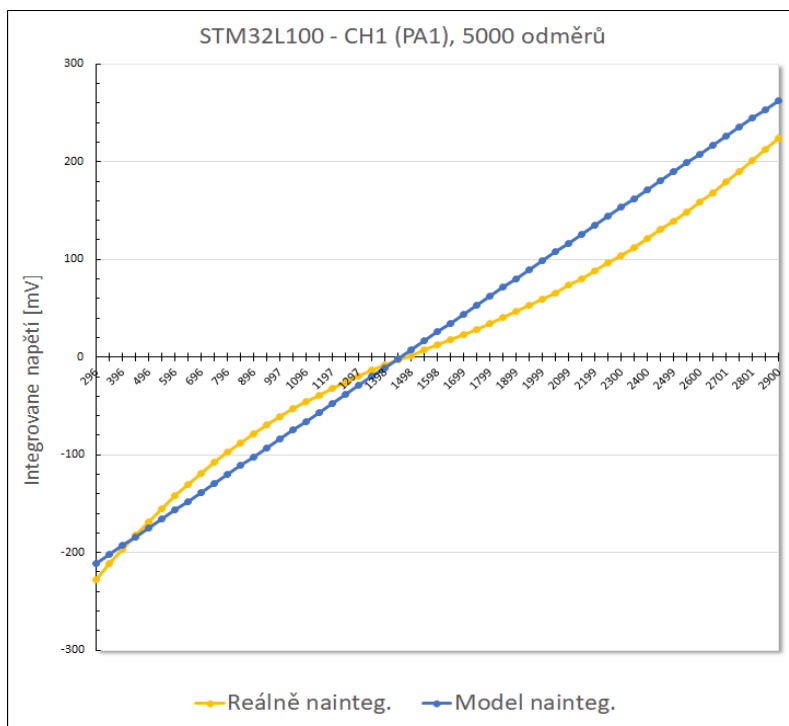
Zbytkové napětí měřené na STM32L100 bylo na všech kanálech stabilní, přibližně v polovině napájecího napětí.

Tabulka 20 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32L100

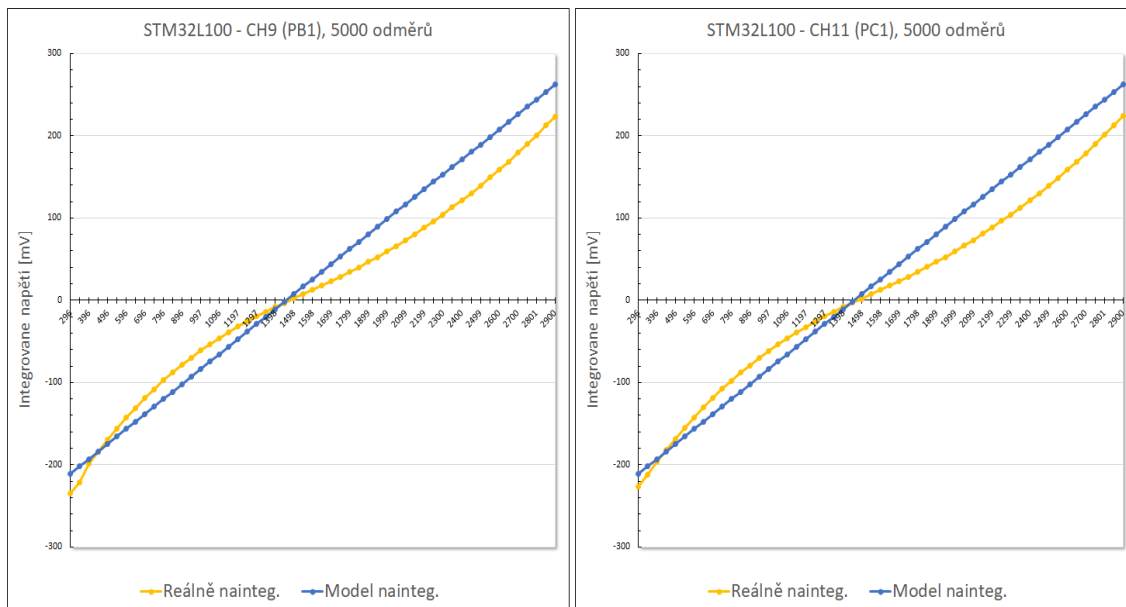
STM32L100	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1457 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1457 mV
kanál 11 (pin PC1)	1457 mV

Průběhy naintegrovaného náboje jsou shodné u všech kanálů.

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem



Obrázek 51 Křivka intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L100



Obrázek 52 Křivka intergrace napětí, kanál 9 (PB1) a 11 (PC1) - STM32L100

Jak je vidět, průběh naintegrovaného napětí na napěťových úrovních nad zbytkovým napětím je pod modelovou křivkou. Průběh pod zbytkovým napětím je nad modelovou křivkou. To znamená, že naintegrované napětí bylo vždy menší než odhad dle modelu, tedy že vstupní/výstupní proud je menší, než odhadovaný dle modelové rovnice (2). Toto platí přibližně od měřené napěťové úrovně asi 400 mV. Do té doby je měřené naintegrované napětí větší (v absolutní hodnotě) než u modelové křivky, tudíž i výstupní proud by byl větší.

STM32L152

Chování AD převodníku u STM32L152 bylo podobné jako u STM32L100. Jak již bylo zmíněno, kód pro tento mikrokontrolér byl psán v Keilu s využitím HAL knihoven, bez vnitřní kalibrace převodníku na začátku programu. Velikost samplovacího kondenzátoru je dle datasheetu 16 pF, proto byla tato hodnota použita pro modelovou křivku. Velikost napájecího napětí AD převodníku pak byla 2,95 V.

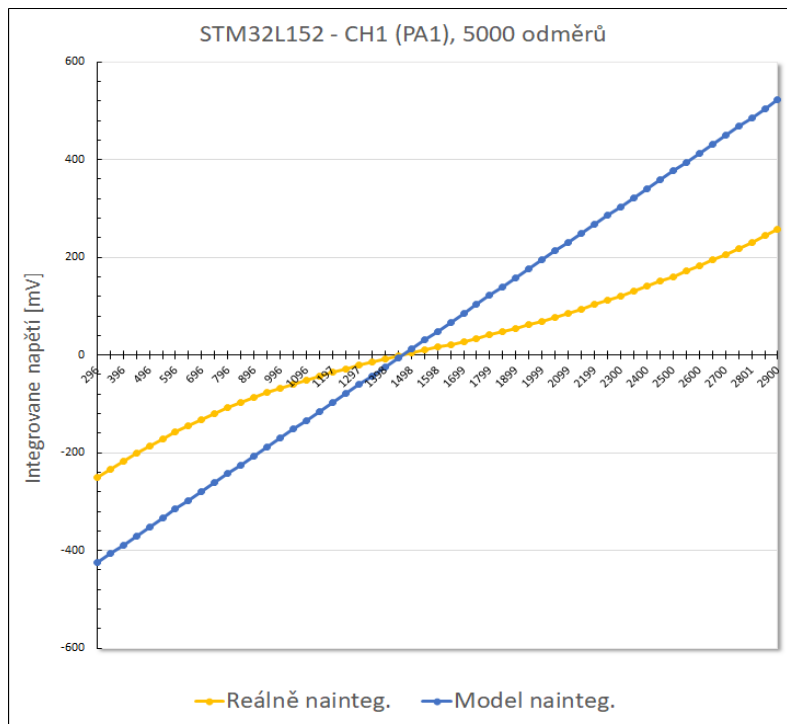
Měřeny byly kanály 1 (PA1), 8 (PB0) a 11 (PC1). Zbytkové napětí bylo přibližně v polovině napájecího napětí a na všech kanálech bylo stabilní.

Tabulka 21 Zbytkové napětí na kanálech 1,8,11 - STM32L152

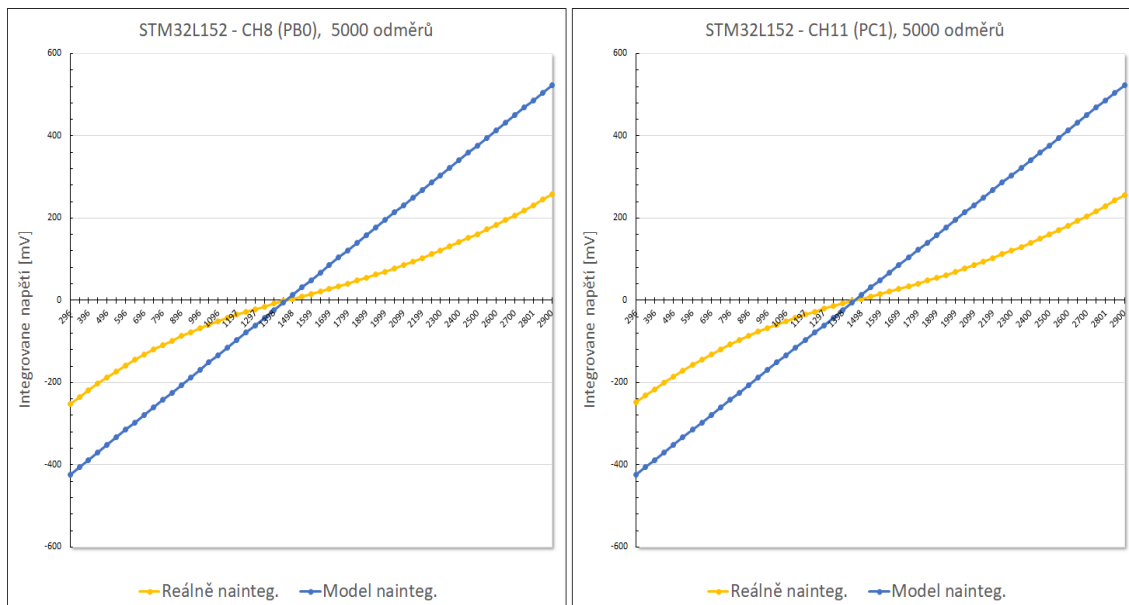
STM32L152	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PA1)	1464 mV
Kanál 8 (pin PB0)	1463 mV
Kanál 11 (pin PC1)	1463 mV

Charakteristiky naintegrovaného napětí napříč kanály jsou stejné. Charakteristiky u STM32L100 a STM32L152 na první pohled stejné nejsou, i když tvar křivky podobný je.

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

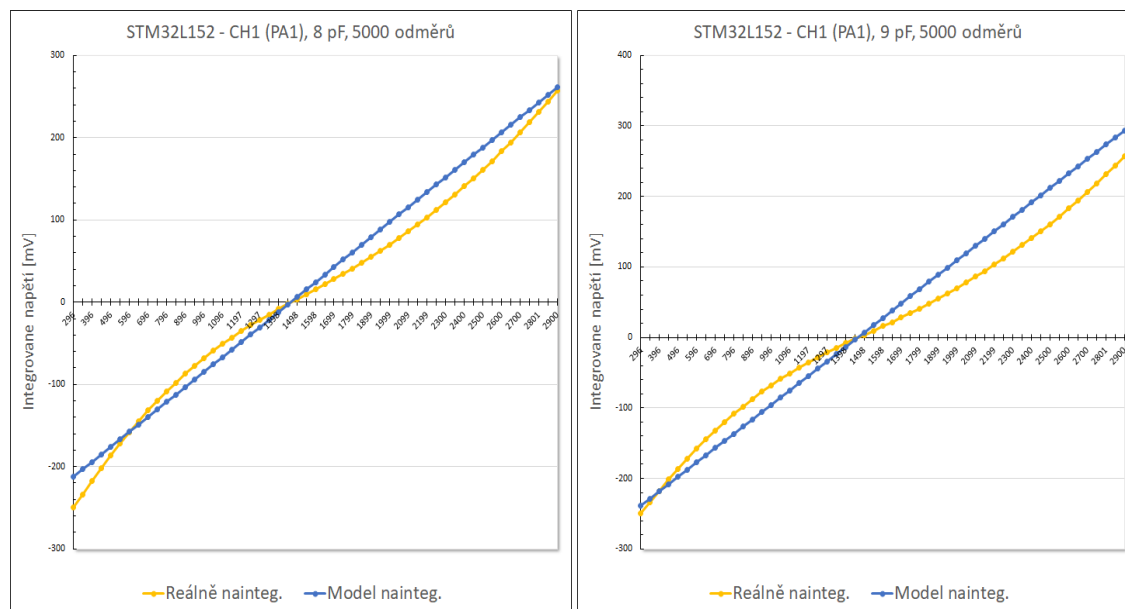


Obrázek 53 Křivka intergrace napětí, kanál 1 (PA1) - STM32L152



Obrázek 54 Křivka intergrace napětí, kanál 8 (PB0) a 11 (PC1) - STM32L152

Dle naměřených charakteristik je naintegrované napětí na většině napětových úrovní zhruba poloviční než by vycházelo podle modelu. Do rovnice pro modelovou křivku byla zanesena kapacita smplovacího kondenzátoru 16 pF (dle datasheetu). Pokud bychom modelovali křivku s 8 pF, již by se obě charakteristiky k sobě více přiblížily (sklon modelové křivky se zmenší). Poté jsou charakteristiky velmi podobné jako u STM32L100 (při modelování s kapacitou 9 pF jsou téměř shodné).



Obrázek 55 Křivka integrace napětí s modelovou křivkou s 8 a 9 pF, kanál 1 (PA1) - STM32L152

Shrnutí

Díky podobným vlastnostem (např. stejné maximální hodnotě sampling time a podobnému zbytkovému napětí) a podobným charakteristikám naintegrovaného napětí u AD převodníků obou mikrokontrolérů soudím na použití stejného AD převodníku. Velikost smplovacího kondenzátoru u převodníku v STM32L152 by měla být dvojnásobná než u STM32L100 (16 pF oproti 8 pF). Průběh naintegrovaného napětí (včetně jeho velikosti pro stejnou napětovou úroveň a počet odměřů) je ale velmi podobný jako u STM32L100. Podle charakteristiky (a pokud charakteristika u STM32L100 odpovídá) by to v STM32L152 spíše vypadalo na použití stejně velikého smplovacího kondenzátoru (nebo jen o málo většího, 8-10 pF).

6.6.6 STM32L432, STM32L476

Posledními z měřených mikrokontrolérů byly mikrokontroléry řady STM32L4.

STM32L432 má 1 AD převodník a je podporován v Mbedu, proto byl kód pro něj napsán v něm.

STM32L476 má 3 AD převodníky. V Mbedu je také podporován, je zde ale podporován jen 1. AD převodník ADC1. Jelikož cílem bylo opět otestovat všechny AD převodníky, byl kód pro tento mikrokontrolér napsán v Keilu s využitím HAL knihoven.

Převodníky v obou dvou mikrokontrolérech podporují vnitřní kalibraci, proto byla na začátku měření provedena. Hodnota smplovacího kondenzátoru je dle datasheetů

shodná pro AD převodníky obou mikrokontrolérů, 5 pF. Tato hodnota byla použita pro modelovou křivku.

Napájecí napětí AD převodníků bylo u obou mikrokontrolérů stejné, 3,29 V.

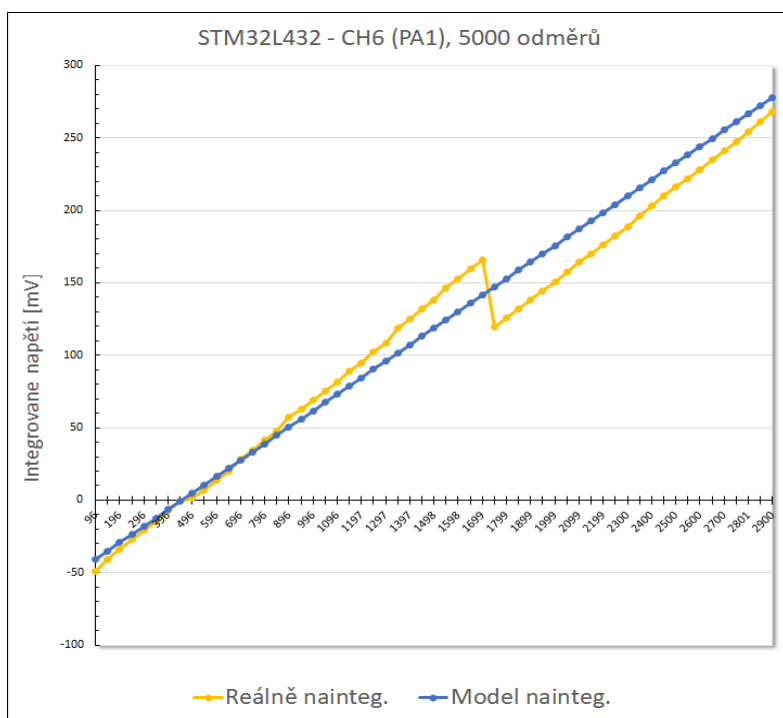
STM32L432

Zbytkové napětí u kitu s STM32L432 bylo opět proměnné. Měření bylo provedeno na kanálu 6 (PA1), 10 (PA5) a 15 (PB0). Testováno bylo jen na dvou branách, jelikož na více neměl AD převodník vyvedeny kanály. Zbytkové napětí na některých kanálech opět nebylo konstantní. Na kanálu 10 kolísalo napětí mezi 510-515 mV, na kanálu 15 mezi 515-524 mV.

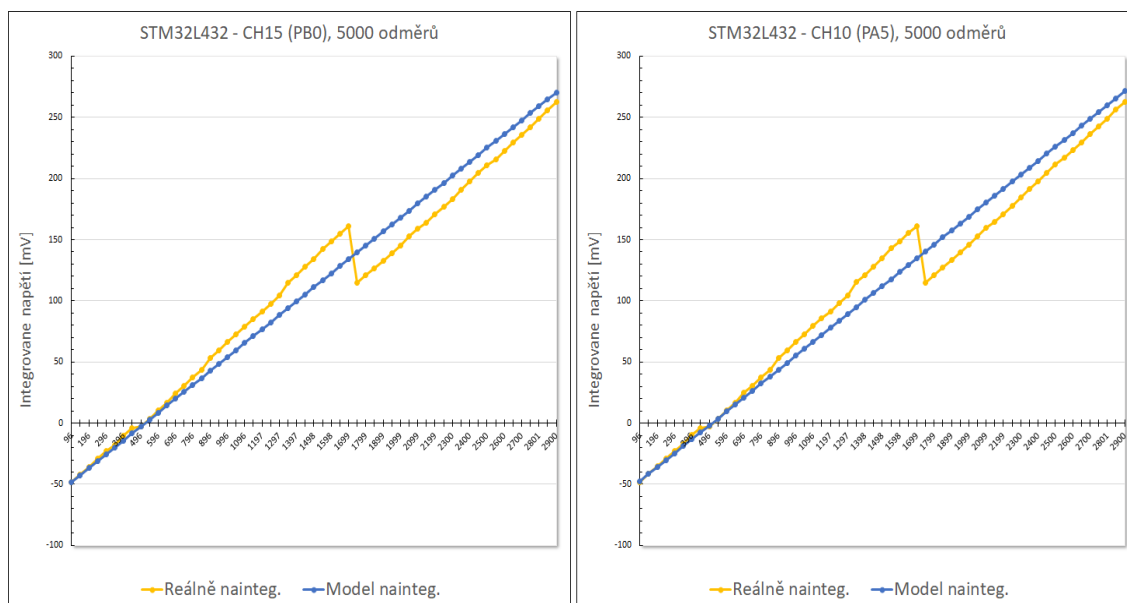
Tabulka 22 Zbytkové napětí na kanálech 6,10,15 - STM32L432

STM32L432	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 6 (pin PA1)	453 mV
Kanál 10 (pin PA5)	512 mV
Kanál 15 (pin PB0)	520 mV

Charakteristiky pak byly na všech kanálech podobné, jen s nepatrným posunutím způsobeným jiným zbytkovým napětím.



Obrázek 56 Křivka intergrace napětí, kanál 6 (PA1) - STM32L432



Obrázek 57 Křivka intergrace napětí, kanál 15 (PB0) a 10 (PA5) - STM32L432

Přibližně kolem napěťové úrovně 1700 mV docházelo k prudkému poklesu integrovaného napětí. Tento jev se opakoval na všech kanálech. Je zde trochu podobnost jako u mikrokontrolérů série STM32F0 a STM32F1, až na to, že zde dochází k poklesu naintegrovaného napětí (u STM32F0 a STM32F1 docházelo k prudkému nárůstu). Znamená to, že při měření na dané napěťové úrovni by došlo k prudkému poklesu vstupního náboje (a tedy i proudu odebíraného z vnějšího zdroje napětí). Dále se v jinak lineární charakteristice objevují další 4 menší napěťové skoky, na úrovních přibližně zbytkového napětí (450 mV), 850 mV, 1250 mV a 2500 mV. Tyto jevy byly blíže prozkoumány na mikrokontroléru STM32L476, kde byly také měřeny. Jinak mají ale křivky lineární průběh a vstupní/výstupní proud lze celkem dobře odhadovat dle modelu.

STM32L476

Program pro STM32L476 byl psán v Keilu s využitím HAL knihoven a počáteční konfigurací z CubeMX. Hodiny AD převodníku byly nastaveny na 16 MHz, sampling time pak na 640,5 tiků hodin (nejvyšší možná hodnota). Jak bylo zmíněno, AD převodníky podporují vnitřní kalibraci, proto byl na začátku programu každý z nich zkalibrován. Samplovací kondenzátor má 5 pF, tato velikost byla použita do modelové křivky.

Jak již také bylo zmíněno, napájecí napětí AD převodníků bylo 3,29 V.

Měřené kanály byly: kanál 1 (PC0), 6 (PA1) a 15 (PB0) na ADC1 a ADC2. 3. AD převodník, ADC3, měl kanály vyvedeny jen na bránu C, měřeny tak byly kanály 1 (PC0), 3 (PC1) a 3 (PC2).

Zbytkové napětí bylo na všech kanálech i všech AD převodnících konstantní, neměnné.

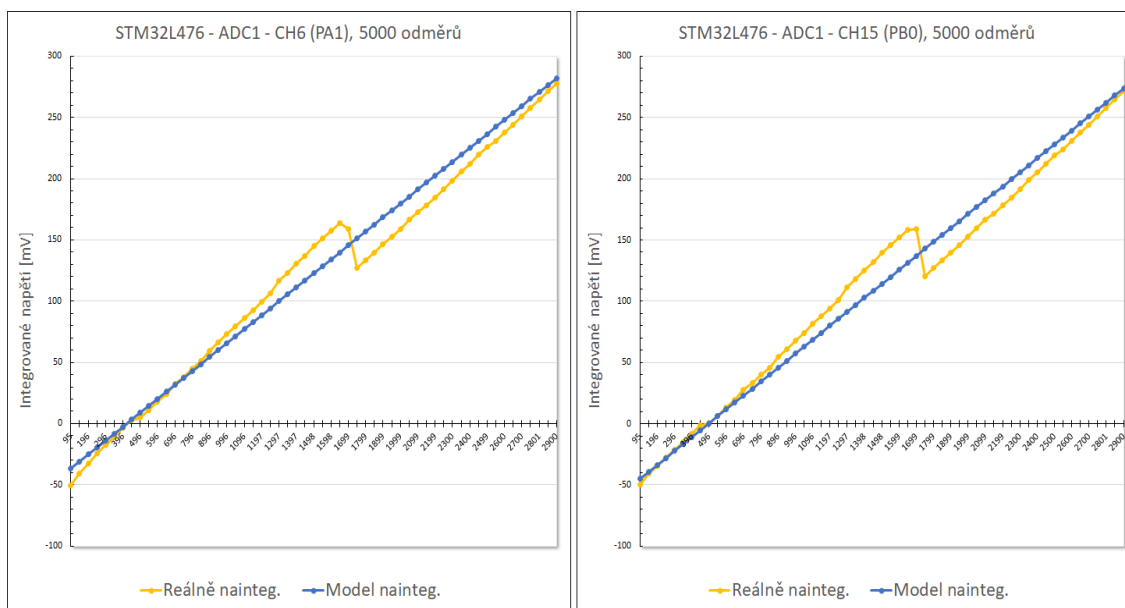
Tabulka 23 Zbytkové napětí na kanálech 6,10,15 - ADC1 a ADC2, STM32L476

STM32L476 - ADC1		STM32L476 - ADC2	
Měřený kanál	Zbytkové napětí	Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 6 (pin PA1)	418 mV	Kanál 6 (pin PA1)	386 mV
Kanál 15 (pin PB0)	493 mV	Kanál 15 (pin PB0)	462 mV
Kanál 1 (pin PC0)	389 mV	Kanál 1 (pin PC0)	362 mV

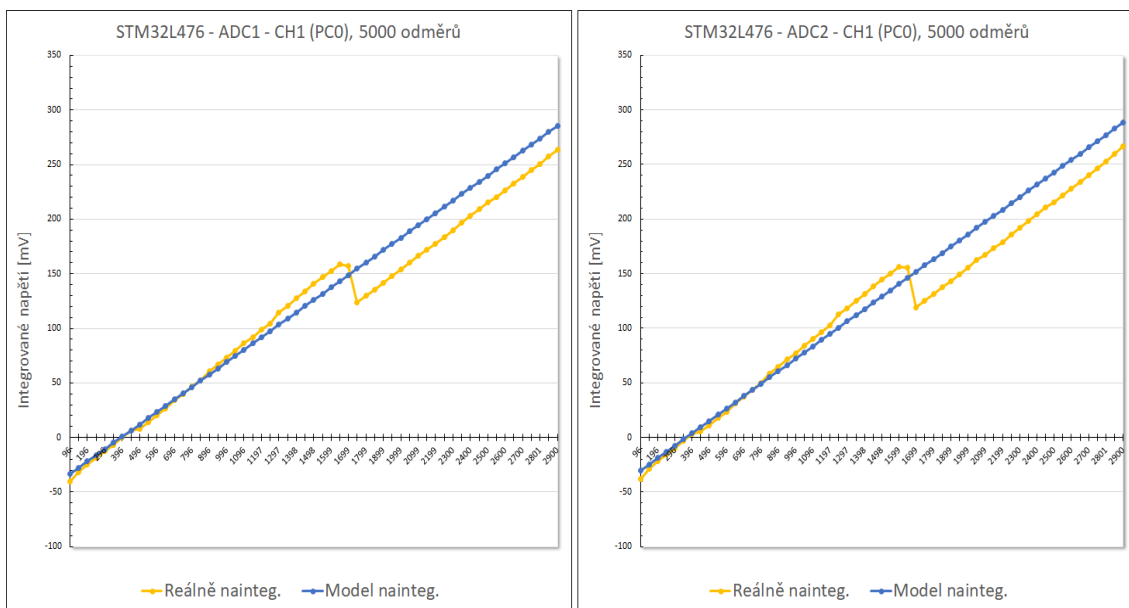
Tabulka 24 Zbytkové napětí na kanálech 1,2,3 - ADC3, STM32L476

STM32L476 - ADC3	
Měřený kanál	Zbytkové napětí
Kanál 1 (pin PC0)	350 mV
Kanál 2 (pin PC1)	347 mV
Kanál 3 (pin PC2)	345 mV

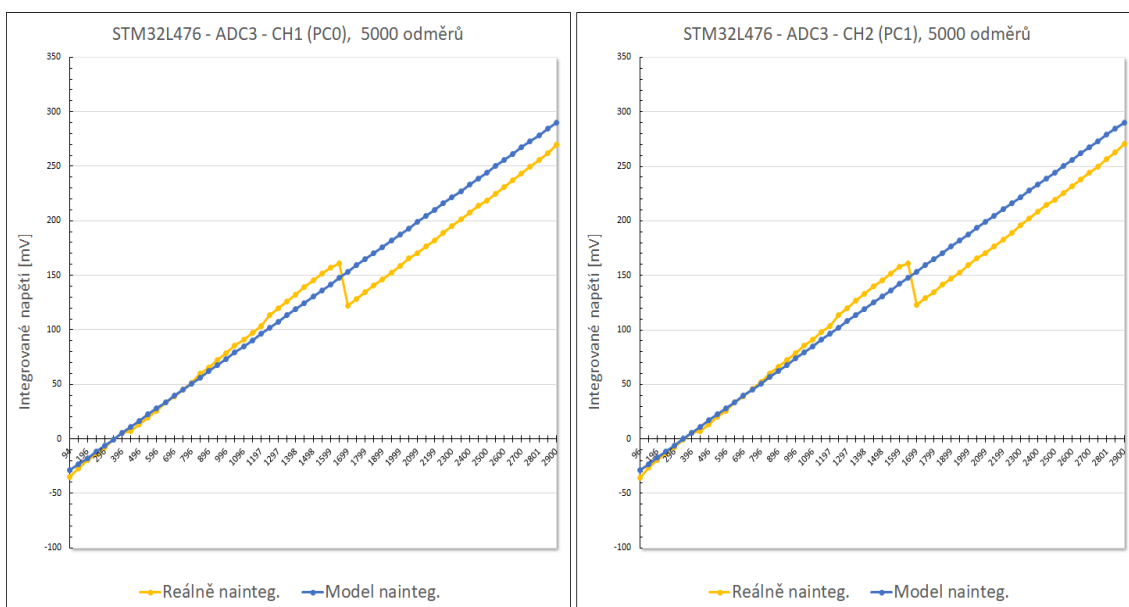
Zbytkové napětí na všech kanálech ADC1 bylo přibližně o 30 mV menší než na stejných kanálech u ADC2. Mezi kanály 3. AD převodníku, ADC3, které jsou všechny na bráně C, bylo naměřeno o pár mV rozdílné napětí. Zbytkové napětí ale bylo na podobné úrovni, jako u STM32L432. Stejně tak byly podobné i charakteristiky integrovaného napětí.



Obrázek 58 Křivka intergrace napětí, kanál 6 (PA1) a 15 (PB0) - ADC1, STM32L476



Obrázek 59 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PC0) na ADC1 a ADC2 - STM32L476

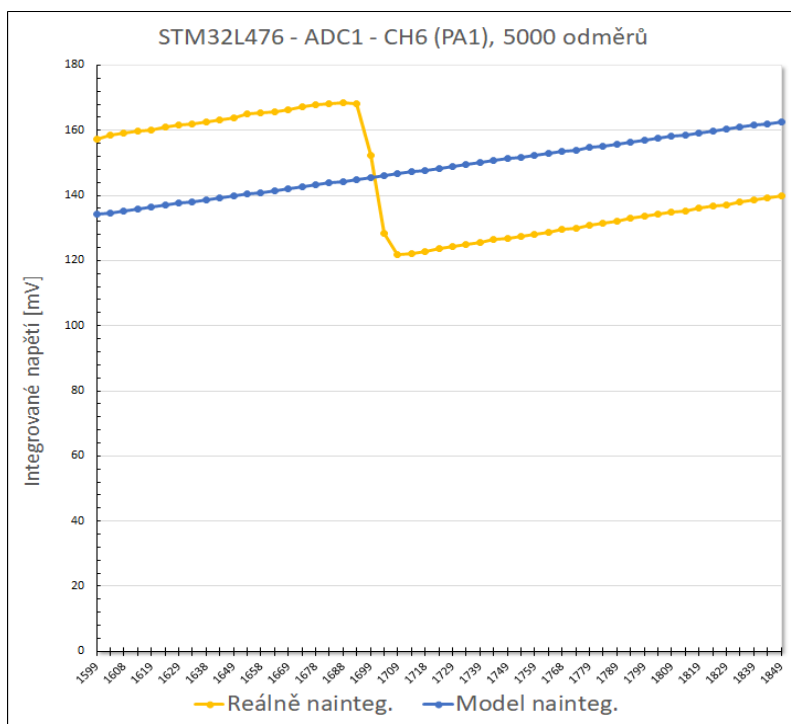


Obrázek 60 Křivka integrace napětí, kanál 1 (PC0) a 2 (PC1) - ADC3, STM32L476

U všech kanálů na bráně C byla křivka trochu posunuta na vodorovné ose, díky nižšímu zbytkovému napětí.

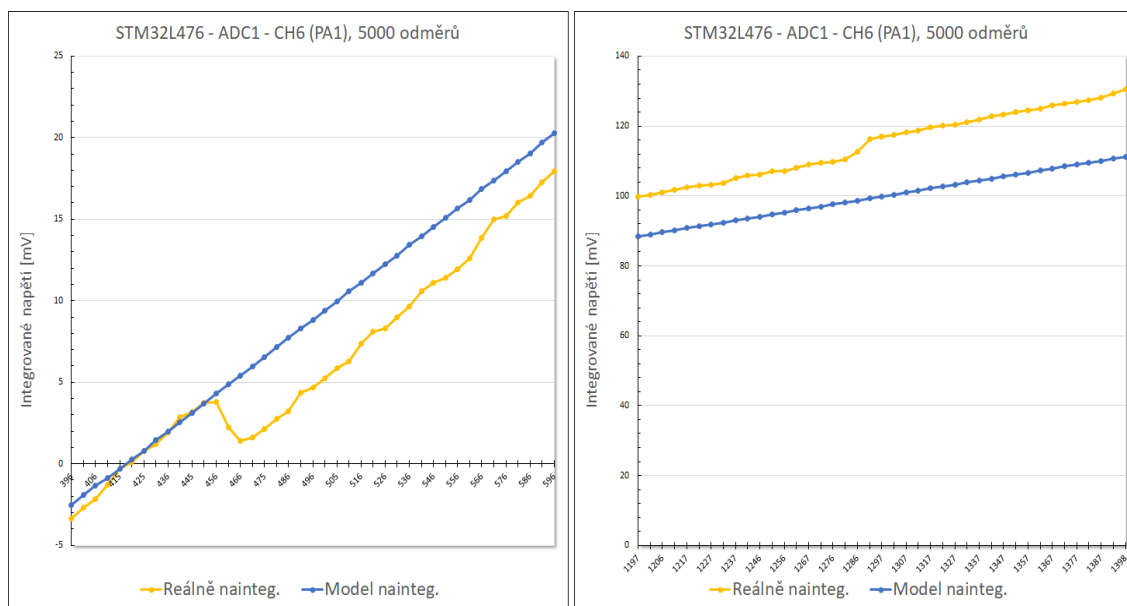
Charakteristiky naintegrovaného napětí jsou stejné jako u STM32L432, stejně tak se zde objevují napěťové skoky (největší zlom je tedy přibližně v polovině napájecího napětí (asi 1650 mV), další jsou méně výrazné). Tyto napravidelnosti v jinak celkem lineárním průběhu byly na mikrokontroléru STM32L476 měřeny blíže.

Kód pro STM32L476 zůstal stejný, psaný v Keil s využitím HAL knihoven. Nyní ale probíhalo měření na napěťových úrovních přibližně 400-600, 1200-1400 a 1600-1850 mV s velikostí napěťového kroku 5 mV. Měření byl kanál 6 (PA1) na ADC1.



Obrázek 61 Křivka integrace napětí, 1600-1850mV, kanál 6 (PA1) - STM32L476

Nejvíce patrný byl napěťový skok přibližně uprostřed charakteristiky (počátek skoku je na 1693 mV, konec pak na 1709 mV). Propad v naintegrovaném napětí byl asi 95 mV (při 5000 odměrech) z cca 336 na 244 mV. Křivka integrovaného napětí se v tomto místě dostala pod modelovou křivku, tudíž integrované napětí pak bylo menší než odhadované (skok byl v oblasti nad zbytkovým napětím. Proto i vstupní proud do AD převodníku by poté byl menší než dle modelové rovnice (2)).



Obrázek 62 Křivka intergrace napětí, kanál 15 (PB0) a 10 (PA5) - STM32L476

Další patrný skok byl v oblasti asi 456-466 mV, propad v naintegrovaném napětí byl asi 2,4 mV (při 5000 odměrech) z cca 3,8 na 1,4 mV .

Nepatrný skok byl zaznamenán i na napětí asi 1281 mV, kdy došlo k růstu o 6 mV (ze 110 na 116 mV při 5000 odměrech).

Shrnutí

Charakteristiky převodníků v STM32L476 a STM32L432 byly shodné, včetně nepravidelností v křivce naintegrovaného napětí. Stejně tak mají shodné i velikosti smplovacích kondenzátorů (5 pF). Usuzuji tedy, že oba mikrokontroléry využívají stejný AD převodník.

Charakteristiky naintegrovaného napětí velmi dobře odpovídají modelové křivce (především do oblasti 1700 mV), proto se vstupní/výstupní proud z AD převodníků těchto mikrokontrolérů dá dobře odhadovat dle modelové rovnice (2)).

6.6.7 BBC Micro:bit

Měření vstupních proudů metodou v zapojení s operačním zesilovačem proběhla i na kitu od BBC Micro:Bit s procesorem Nordic nRF51822. Tento kit je podporován v Mbedu, proto program pro něj byl psán v něm.

Procesor nRF51822 od firmy Nordic Semiconductors má jeden 10 bitový AD převodník. Bohužel jeho datasheet a reference manul k němu není tak podrobný, jako u mikrokontroléru od ST. Není v nich například uvedeno, zda se jedná o stejný typ převodníku, který využívá sample and hold obvod a metodu postupné aproximace (vysvětleno v (4)) pro převod analogové hodnoty do digitální (vzhledem k největšímu rozšíření těchto typů AD převodníků v mikrokontrolérech to lze předpokládat). Dále v nich není ani uvedena velikost smplovacího kondenzátoru. Ta by se poté mohla odhadnout z naměřených průběhů.

Dalším problémem při měření tohoto procesoru je i slabá dokumentace samotného kitu Micro:Bit. Lze naštěstí dohledat, že piny jsou zde označovány jako P0.00 až P0.30, popřípadě mají i svůj druhý název (např. COL4, PAD, MISO apod.) [6], popřípadě i

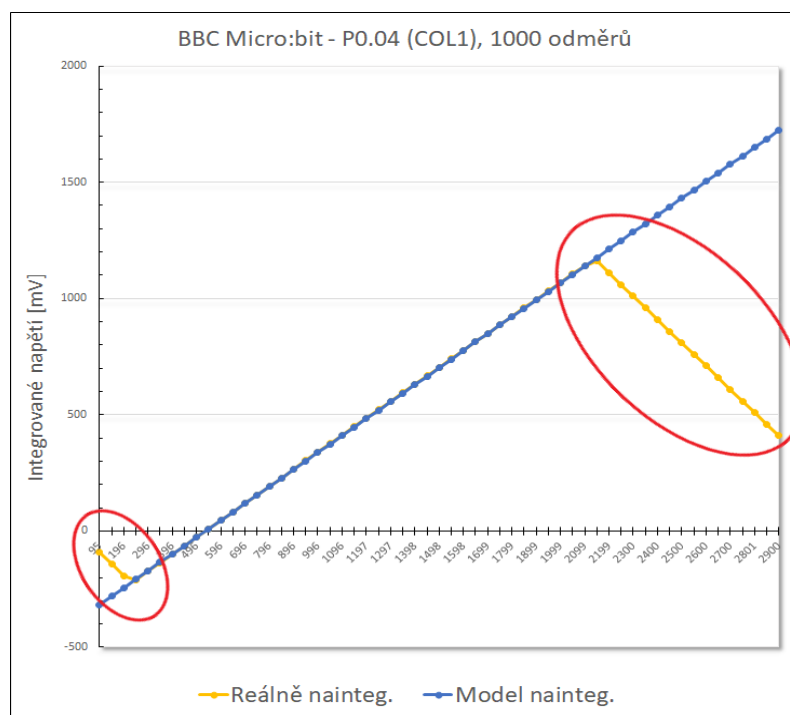
Jak již bylo zmíněno, program byl psán v Mbedu. Napájecí napětí AD převodníku (opět měřeno multimetrem M890G na 3V pinu) bylo 3,2 V. Měření byly kanály na pinech P0.04 (COL1), P0.05 (COL2), které jsou dle (78) připojené i jako katody LED a dále na P0.03 (PAD1) na kterém je připojen pull-up rezistor. Měření bylo opět na napěťových úrovních 100 - 2900 mV s 50 mV krokem.

Chování AD převodníku na pinech P0.04 (COL1) a P0.05 (COL2) bylo shodné. Jak zbytkové napětí (které bylo stabilní), tak charakteristiky naintegrovaného náboje.

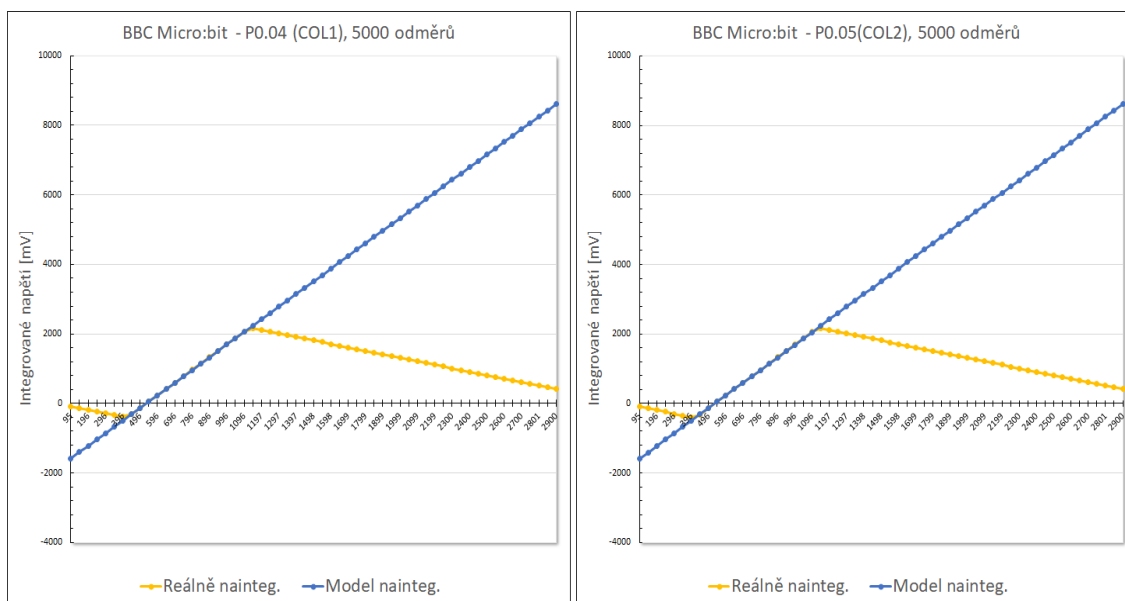
Tabulka 25 Zbytkové napětí na pinech COL1 a COL2 - BBC Micro:bit

BBC Micro:bit	
Měřený pin	Zbytkové napětí
P0.04 (COL1)	532 mV
P0.05 (COL2)	532 mV

Jelikož nebyla známa velikost smplovacího kondenzátoru, vybral jsem do modelové křivky hodnotu tak, aby byla nejvíce podobná se skutečně naměřenou křivkou (160 pF). Modelová křivka pak ale překrývala celý průběh reálně naměřené křivky. Jsou tedy tentokrát v grafu ponechány i naměřené hodnoty, kdy byl operační zesilovač (nebo AD převodník, kterým se hodnoty získávali) v saturaci (vysvětleno v 6.5 obrázek 11). Na prvním grafu jsou tyto hodnoty vyznačeny.



Obrázek 64 Křivka integrace napětí, pin P0.04 (COL1), 1000 odměřů - BBC Micro:bit



Obrázek 65 Křivka intergrace napětí, pin P0.04 (COL1) a pin P0.05 (COL2), 5000 odměřů - BBC Micro:bit

K saturaci dochází velmi brzo, při 5000 odměřech na jednu napěťovou úroveň je již většina naměřených hodnot tím ovlivněna a proto nevyhovující.

Jak je vidět, křivka reálně naměřených hodnot s modelovou při použití velikosti samplovacího kondenzátoru 160 pF si naprosto odpovídají, což je velmi neobvyklé. Stejně tak je neobvyklá i odhadovaná velikost samplovacího kondenzátoru, 160 pF, která je až absurdně velká.

Podobné charakteristiky byly i u P0.03 (PAD1), i když zde se ještě projevil na výsledcích pull-up rezistor. Připojeným pull-up rezistorem protékal při měření do měřícího kondenzátoru $C1$ (obr. 7) náboj, proud, který ovlivňoval výsledné naintegrované napětí.

Projevit se to mohlo i u zbytkového napětí. To bylo měřeno stejným způsobem, jako u předchozích mikrokontrolérů (obr. 9) .

Tabulka 26 Zbytkové napětí na pinu PAD1 - BBC Micro:bit

BBC Micro:bit	
Měřený pin	Zbytkové napětí
P0.03 (PAD1)	658 mV

Jak je vidět, zbytkové napětí je o něco větší, než v předchozích případech. Protékající proud přes pull-up rezistor tedy zvyšoval napětí na kondenzátoru Cb (obr. 9), které by jinak mělo velikost zbytkového napětí měřeného AD převodníku.

Vliv na samotné měření byl podobný. Pro danou nastavenou napěťovou úroveň protékal pull-up rezistorem do kondenzátoru $C1$ (obr. 7) konstantně proud, který způsoboval větší integraci napětí, než by byla samotnými odměry AD převodníku.

Tento jev byl částečně závislý na frekvenci vzorkování. Projevil se tím více, čím menší byla frekvence vzorkování převodníku, jelikož déle trvalo odebrat daný počet vzorků a proto i déle tento proud protékal (a ovlivňoval tak měření). Proto bylo vyzkoušeno měření při různých frekvencích vzorkování.

Jelikož je kód psán v Mbedu, nelze nastavit frekvenci vzorkování přímo přes

hardwarový timer. Změna frekvence byla řešena za pomoci "wait" funkce, která po každém odměru zastavila průběh programu na stanovenou dobu (doba byla nastavena jako převrácená hodnota frekvence (v sekundách)). Díky tomu do této doby nebyl započítán čas samotného odměru jednoho vzorku. Proto pro zpřesnění nastavené frekvence vzorkování jsem ji zpětně ještě změřil (měření probíhalo tak, že se počítal celkový počet odměrů provedený za 1 sekundu, při dané hodnotě nastavené ve "wait" funkci).

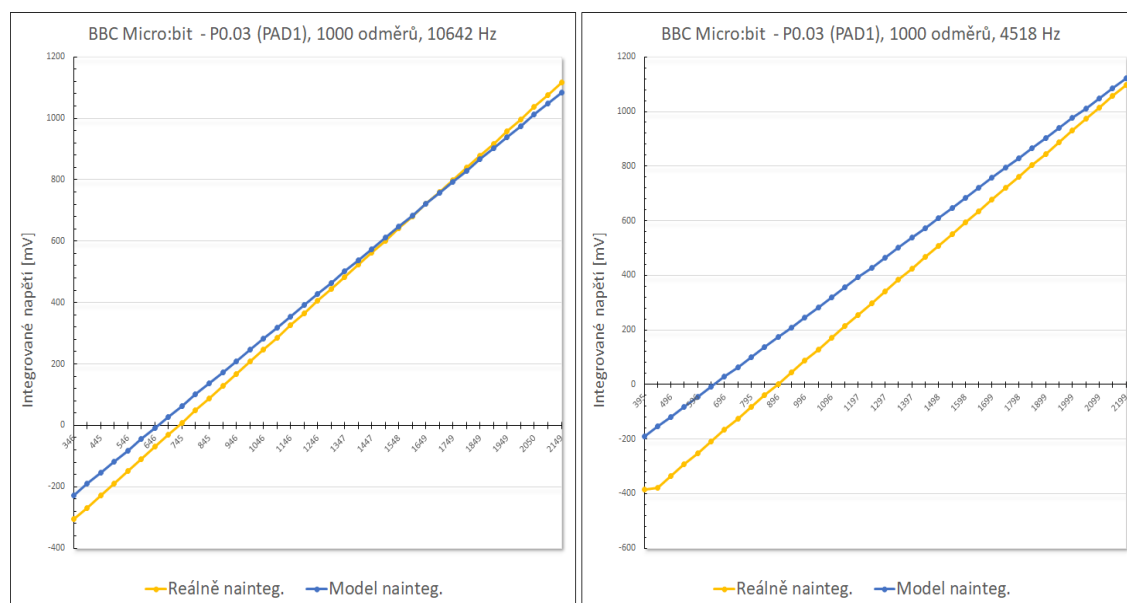
Níže výsledná převodní tabulka mezi nastavenou frekvencí a skutečnou frekvencí vzorkování:

Tabulka 27 Převodní tabulka mezi nastavenou a skutečnou frekvencí - BBC Micro:bit

Frekvence vzorkování BBC Micro:bit				
frekvence nastav.	1 kHz	5 kHz	10 kHz	maximum
frekvence skuteč.	880 Hz	3162 Hz	4518 Hz	10642 Hz

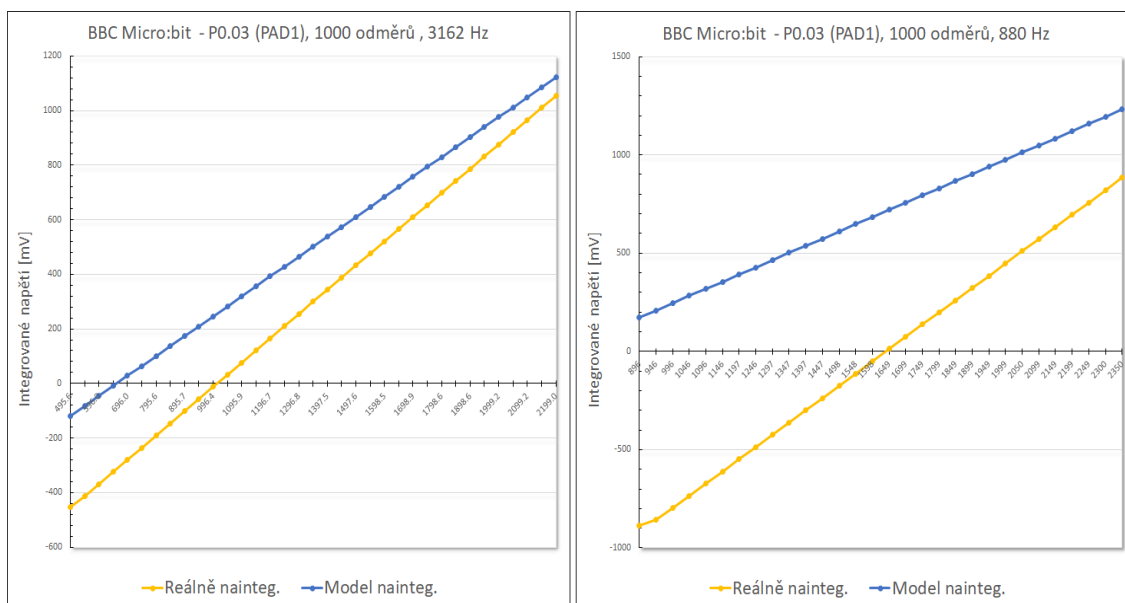
Nastavená frekvence "maximum" byla taková frekvence vzorkování, kdy se v programu vůbec nevolala funkce "wait". Tedy vzorkování probíhalo téměř bez zpoždění (nějaké způsobovala ještě režie for cyklu a switche v programu).

Protože se operační zesilovač nebo AD převodník opět velmi rychle dostávaly do saturace, jsou následující grafy měřené hodnoty při 1000 odměrech. Jsou z nich vynechány hodnoty, kdy byl již zesilovač (nebo AD převodník) v saturaci.



Obrázek 66 Křivka integrace napětí, pin P0.03 (PAD1), frekvence vzorkování: vlevo 10642 Hz, vpravo 4518 Hz - BBC Micro:bit

6 Měření napětí v zapojení s operačním zesilovačem

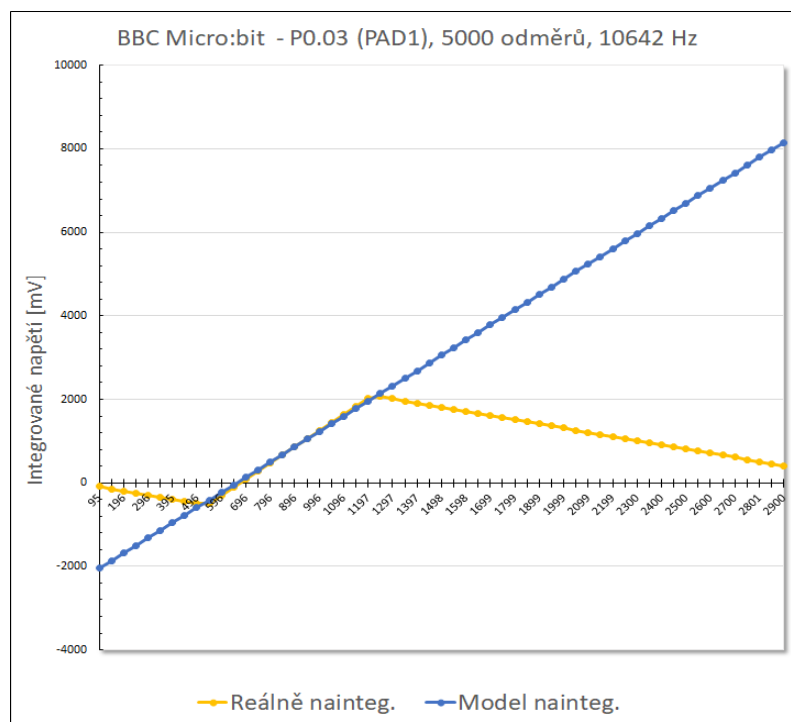


Obrázek 67 Křivka intergrace napětí, pin P0.03 (PAD1), frekvence vzorkování: vlevo 3162 Hz, vpravo 880 Hz - BBC Micro:bit

Je vidět, že pull-up rezistor zdánlivě posouvá zbytkové napětí (napětí, při kterém se naintegruje žádný náboj na měřícím kondenzátoru C_1). S rostoucí frekvencí vzorkování se křivka naměřených hodnot přibližuje té modelové. Při vzorkování frekvencí asi 10 kHz jsou průběhy obou křivek téměř shodné.

Proud protékající pull-up rezistorem způsobuje i jiný sklon křivky skutečně naměřených hodnot. Sklon je tím menší, čím menší je frekvence vzorkování. Při vyšší frekvenci, kdy se vzorkuje celkově kratší dobu a proud protékající rezistorem má na měření menší vliv, už sklon odpovídá sklonu modelové křivky.

Charakteristika naintegrovaného náboje je při frekvenci cca 10 kHz téměř stejná, jako u pinů P0.04 (COL1) a P0.05 (COL2). (Níže graf při 5000 odměrech s ponechanými hodnotami, kdy byl operační zesilovač/AD převodník v saturaci)



Obrázek 68 Křivka intergrace napětí, pin P0.03 (PAD1), 10642 Hz, 5000 odměřů - BBC Micro:bit

Shrnutí

Charakteristické průběhy na BBC Micro:bit měly podezřelé průběhy. Křivka naměřených hodnot naintegrovaného napětí měla téměř stejný průběh, jako modelová.

Neplatilo to tak u všech kanálů. Jelikož jsou piny, na které má mikrokontrolér v BBC Micro:bit vyvedeny kanály napojené na další hardware, bylo měření tímto ovlivněno. Díky pull-up rezistoru, připojeným na některých z nich, byl protékající náboj do měřicího kondenzátoru $C1$ (obr. 7) větší, než by byl způsoben samotným vzorkováním AD převodníku. To charakteristiku naintegrovaného náboje posouvalo na vodorovné ose a díky tomu se zbytkové napětí (nebo tedy úroveň, při kterém se naintegruje žádný náboj) zdálo větší, než ve skutečnosti. Přínosem je, že se díky tomuto projevu chování charakteristiky dá zjistit, zda je pin neznámého mikrokontrolérů připojen na pull-up nebo pull-down rezistor (při chudé dokumentaci k danému procesoru (nebo kitu, na kterém je) to nemusí být známo).

Pokud charakteristiky nebyli ničím jiným ovlivněny, pak by velikost samplovacího kondenzátoru, který není u Nordic nRF51822 znám, odpovídala asi 160 pF.

Vzhledem k až podezřele přesnému průběhu naintegrovaného náboje vzhledem k modelové křivce a také velkému odhadovanému samplovacímu kondenzátoru si myslím, že by samotné průběhy mohly být ještě něčím ovlivněny (nějakými jinými protékajícími proudy). Tak jako tak lze získané informace využít ke korekci hodnoty naměřeného napětí při používání samotného kitu BBC Micro:bit.

6.6.8 Shrnutí výsledků

Metodou v zapojení s operačním zesilovačem byly měřeny všechny mikrokontroléry zmíněné v (3.1).

Metoda se ukázala být pro měření vstupních proudů vhodná. Měřeno bylo vždy

více kanálů jednotlivých AD převodníků, na velkém rozsahu napěťových úrovní, čímž se získala celková charakteristika vstupního/výstupního náboje.

Jednotlivé mikrokontroléry byly seřazeny podle použití pravděpodobně stejných AD převodníků v nich. Bylo zjištěno, že AD převodníky jedné řady mikrokontroléru od ST jsou shodné (např. všechny mikrokontroléry řady STM32L0), v některých případech budou pravděpodobně shodné i napříč řadami (např. STM32F0 a STM32F1).

Metodou v zapojení s operačním zesilovačem lze charakterizovat proudy tekoucí do AD převodníků mikrokontrolérů i jiných firem, vyzkoušeno to bylo na BBC Micro:bit s procesorem Nordic. Zde bylo měřeno i působení pull-up rezistoru připojeného k jednomu pinu, na kterém byl i měřený kanál AD převodníku a které se na výsledné charakteristice projevilo. Touto metodou lze tedy detekovat i připojení jiného hardware k daným pinům (jako je např. pull-up a pull-down rezistor), které mají vliv na měřené vstupní/výstupní proudy.

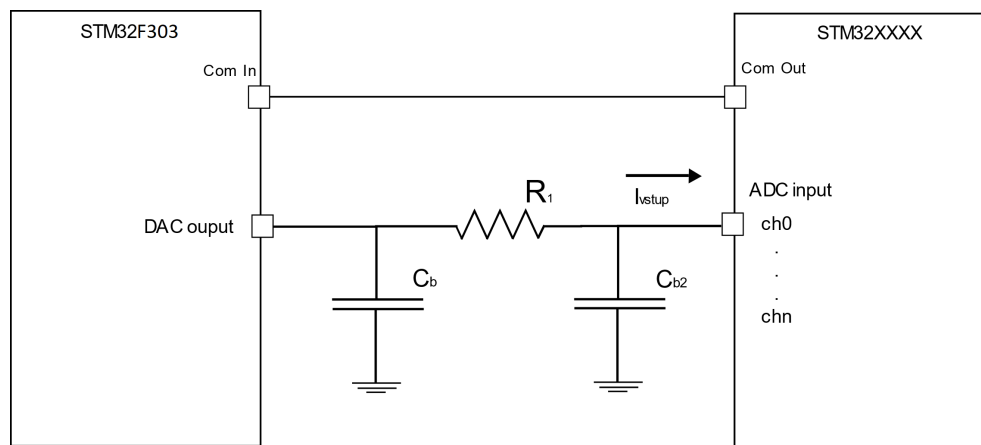
Z naměřených charakteristik lze odhadovat i velikost smplovacího kondenzátoru AD převodníku, pokud není znám (jako u Nordic nRF51822 v BBC Micro:bit), nebo upravit odhad jeho velikosti, pokud je známa, ale dle charakteristik vychází, že by mohla být jiná (jako u STM32L152). Popřípadě lze odhadovat, že se projevují ještě jiné parazitní kapacity.

Bylo zjištěno, že ve většině případů lze vstupní proudy charakterizovat modelovou rovnicí (1). A tedy i následně provést korekci chyby měření vstupního napětí.

Výsledky této metody budou použity při korekci měřeného napětí v kapitole (8).

7 Měření napětí v zapojení s rezistorem

Další z metod měření a charakterizace vstupních proudů je metoda měření s rezistorem v zapojení podle následujícího schéma:



Obrázek 69 Schéma zapojení při měření vstupního proudu v metodě s rezistorem

Vpravo je kit s mikrokontrolérem, jehož AD převodník testujeme. Vlevo druhý kit (v mém případě s STM32F303), na kterém se pomocí DA převodníku nastavují různé napěťové úrovně. Na nich se měří vstupní proud do AD převodníku. Princip této metody spočívá v tom, že se nejdříve DA převodníkem druhé desky nastaví určitá úroveň napětí. Na toto napětí se s menším časovým zpožděním nabijí oba blokovací kondenzátory C_{b1} a C_{b2} . Následně dochází rychlými odměry AD převodníku testované desky (vysoká frekvence odměrů) k úbytku náboje na blokovacím kondenzátoru C_{b2} , tudíž i k poklesu napětí. Tento úbytek náboje (resp. pokles napětí) je dorovnáván DA převodníkem druhé desky, ale velikost tekoucího náboje (tedy proudu) je omezena odporem R_1 . V závislosti na velikosti odporu R_1 a frekvenci odebírání náboje dochází k úbytku napětí na C_{b2} , který je následně změřen. Toto měření probíhá na několika napěťových úrovních nastavených DA převodníkem (příkaz pro změnu napětí posílá měřená deska přes pin Com Out do desky, která jej nastavuje) a na několika frekvencích odměru AD převodníku měřené desky.

7.1 Porovnání modelu se skutečnými hodnotami

Vstupní/výstupní proud je dle vzoce (1):

$$I = f * C_s * (U_{zmer} - U_{zbyt})$$

Tento proud porovnávám s reálným proudem vypočítaným dle Ohmova zákona:

$$I = U/R$$

V tomto případě v takovémto tvaru:

$$I = (U_{dac} - U_{zmer})/R1 \quad (6)$$

Kde:

U_{dac} - napětí nastavené DA převodníkem na druhé desce (STM32F303RE)

U_{zmer} - napětí změřené AD převodníkem

$R1$ - odpor způsobující úbytek napětí

Porovnáním proudů dle teoretického vzorce (1) a vzorce vycházejícího z Ohmova zákona (6) lze ověřit platnost tohoto vzorce (v případě, že se vstupní/výstupní proudy budou shodovat).

7.2 Použité součástky

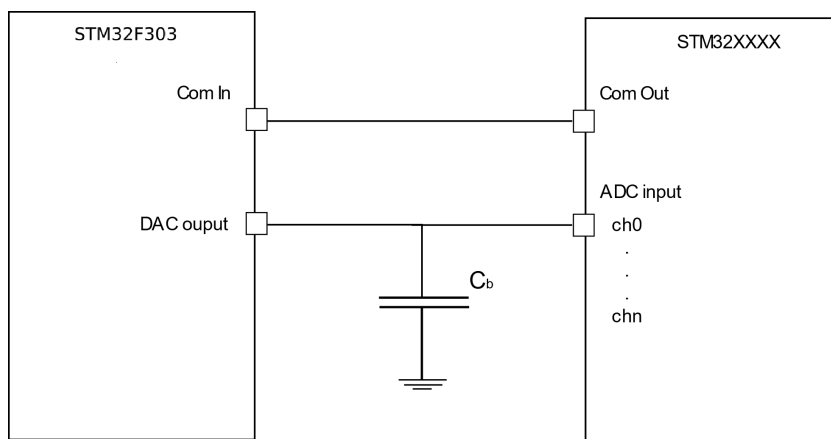
Součástek bylo použito relativně málo. Jako blokovací kondenzátor Cb se použil jeden keramický kondenzátor (100 nF) a jeden elektrolytický kondenzátor (22 μ F). Jako blokovací kondenzátor $Cb2$ byly použity 2 keramické kondenzátory (oba 100 nF). Měření probíhalo na dvou rezistorech s odpory 22 k Ω a 1 M Ω .

7.3 Postup měření

Nejdříve kit s STM32F303 nastaví první z napěťových úrovní. Na toto napětí se nabijí blokovací kondenzátory Cb a $Cb2$. Následně AD převodník testovaného mikrokontroléru začne vzorkovat na první z vybraných frekvencí. Díky tomuto vzorkování teče do AD převodníku proud, který způsobí úbytek napětí na kondenzátoru $Cb2$. Zároveň AD převodník napětí na $Cb2$ průběžně měří. V momentě, kdy je již napětí na $Cb2$ neměnné (vyrovnaají se proud tekoucí odporem a proud tekoucí do AD převodníku) je toto napětí posláno přes UART do PC. Potom AD převodník přestane vzorkovat (je zde časová prodleva, aby se kondenzátor $Cb2$ opět nabil na napětí DA výstupu kitu s STM32F303), nastaví se další z vybraných vzorkovacích frekvencí a opět započne test na této frekvenci. Tento proces se opakuje pro všechny vybrané frekvence (které jsou uloženy v paměti testovaného mikrokontroléru). Po otestování všech vybraných frekvencí pošle testovaný mikrokontrolér STM32XXXX příkaz (přes Com Out) pro změnu napětí na výstupu DA kitu s STM32F303 a opět se opakuje měření pro všechny vybrané frekvence. Takto se postupuje, dokud neproběhne měření na všech vybraných napěťových úrovních, které DA převodník kitu s STM32F303 nastavuje (a má je uložené v paměti).

7.4 Nastavení výstupu DA převodníku

Výstup DA převodníku lze vyvést dvěma způsoby. Buďto přímo nebo přes operační zesilovač.



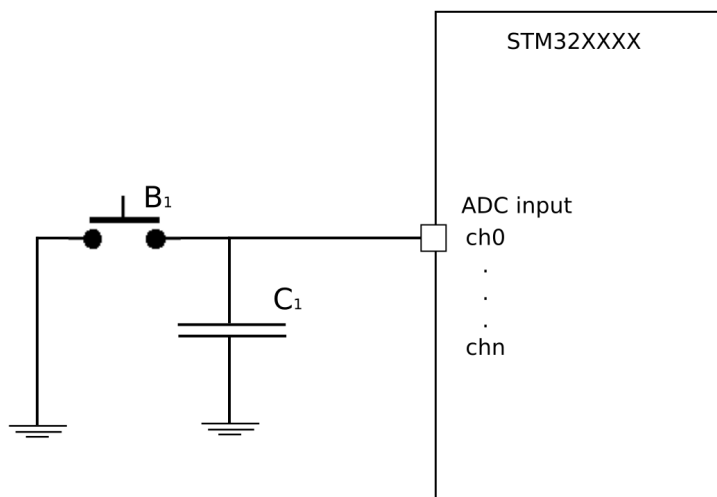
Obrázek 71 Schéma zapojení při měření vstupního proudu do AD převodníku

V paměti mikrokontroléru, který nastavuje napětí DA převodníkem, jsou uloženy hodnoty jednotlivých napěťových kroků, které se následně nastavují i při samotném měření vstupních proudů. Ve výpočtech vstupního proudu jsou použity hodnoty napětí změřené AD převodníkem testovaného mikrokontroléru (který byl použit pro měření všech hodnot).

Jako blokovací kondenzátor C_b byl použit jeden keramický kondenzátor (100 nF) a jeden elektrolytický kondenzátor (22 μ F).

7.6 Měření zbytkového napětí

Měření zbytkového napětí proběhlo trochu jinak než v případě metody s operačním zesilovačem. Jelikož nyní se vyhodnocuje napětí z AD převodníku samotného testovaného mikrokontroléru, i měření zbytkového napětí proběhlo jen s ním.



Obrázek 72 Měření zbytkového napětí AD převodníku vybraného mikrokontroléru

Nejříve byl kondenzátor C_1 , na kterém se zbytkové napětí měřilo, vybit spínačem B_1 na nulové napětí. Po rozepnutí tlačítka B_1 začal AD převodník testovaného mikrokontroléru vzorkovat zadanou frekvencí (řádově desítky kHz). Tímto vzorkováním postupně nabíjel kondenzátor C_1 na velikost svého zbytkového napětí. Hodnota napětí

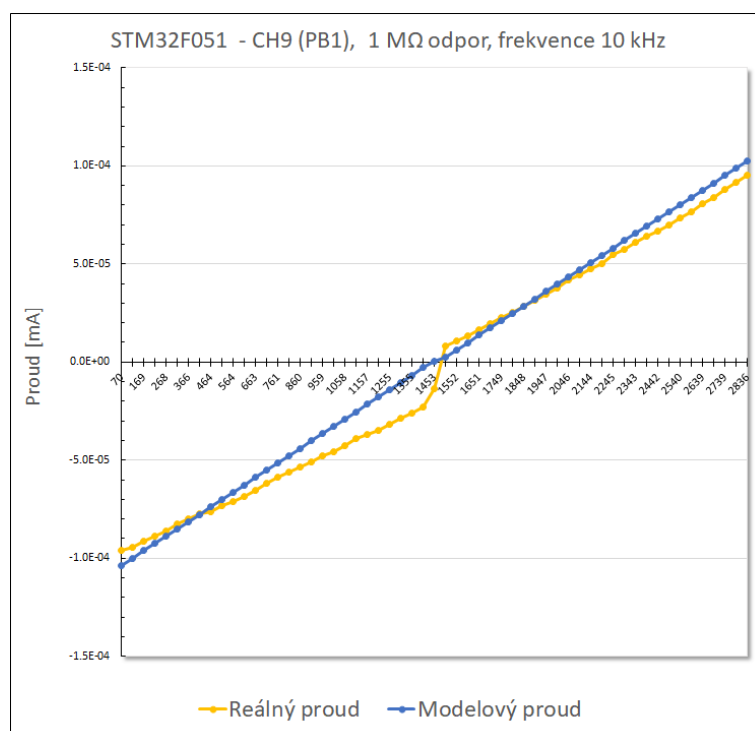
na kondenzátoru C1 byla stejným AD převodníkem zároveň měřena a posílána přes UART do PC. Po ustálení hodnoty napětí bylo toto napětí zaznamenáno (hodnota napětí byla průměrem 1000 naměřených hodnot).

7.7 Parametry měření a reprezentace naměřených dat

Měření probíhalo na rezistorech $R1$ o velikosti $22\text{ k}\Omega$ a $1\text{ M}\Omega$. Odpor těchto rezistorů byl ještě pro zpřesnění výsledků změřen multimetrem haoyue M890G. Rezistor s označením " $22\text{ k}\Omega$ " měl ve skutečnosti $21,7\text{ k}\Omega$ a rezistor s označením " $1\text{ M}\Omega$ " měl ve skutečnosti $1.002\text{ M}\Omega$. Měření probíhalo na napěťových úrovních cca $100\text{--}2900\text{ mV}$ s 50 mV krokem mezi úrovněmi a několika vybraných frekvencích (1 kHz , 5 kHz , 10 kHz , 20 kHz , 40 kHz , 80 kHz , 100 kHz , 150 kHz , 200 kHz , 300 kHz a 400 kHz).

Jak se při kontrole výsledků ukázalo, tato metoda nebyla pro měření vstupních proudů nejvhodnější. Z důvodu několika problémů, které se u této metody vyskytovaly a které následně vysvětlím, bylo provedeno měření jen na mikrokontrolérech STM32F100 a STM32F051.

Takto vypadá ukázkový graf naměřených výsledků:



Obrázek 73 Charakteristika vstupního proudu, kanál 9 (PB1), 10 kHz - STM32F051

V názvu grafu je opět nejdříve název mikrokontroléru a měřený kanál. Dále velikost rezistoru, na kterém probíhalo měření a frekvence vzorkování AD převodníku.

Na vodorovné ose jsou jednotlivé napěťové úrovně (v mV), na kterých bylo měření provedeno (přibližně $100\text{--}2900\text{ mV}$, s 50 mV krokem mezi úrovněmi)

Na svislé ose je velikost tekoucího proudu v mA.

Žlutá křivka (s označením "Reálný proud") znázorňuje skutečný proud protékající rezistorem a vypočítaný dle Ohmova zákona (6).

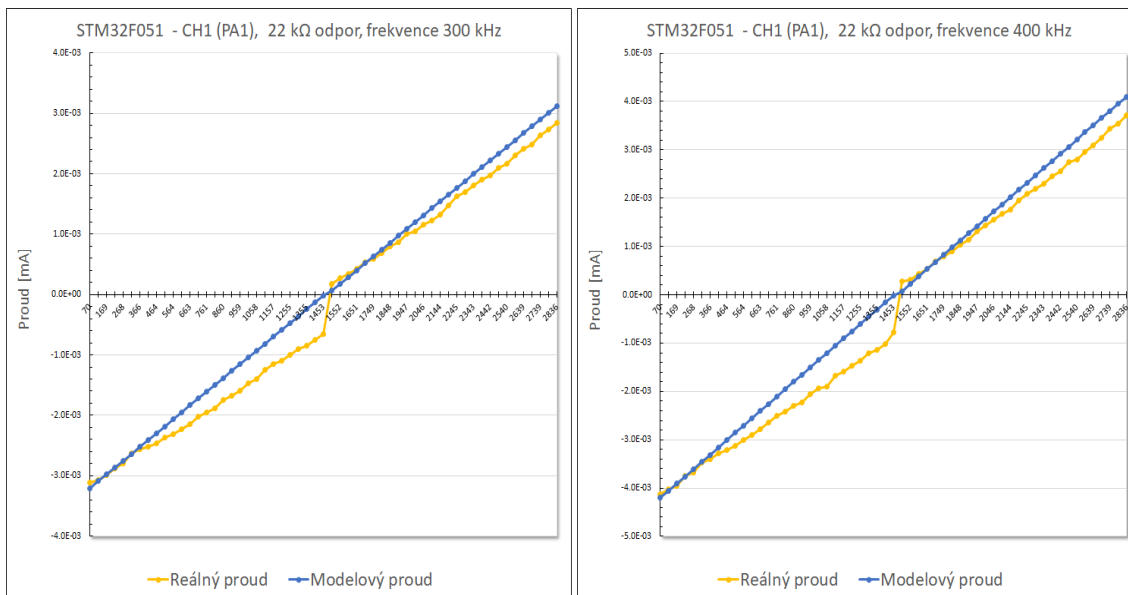
Modrá křivka (s označením "Modelový proud") znázorňuje proud, který by měl protékat odporem při dané napěťové úrovni a frekvenci vzorkování AD převodníku

7 Měření napětí v zapojení s rezistorem

(vypočítaný dle modelové rovnice (1)).

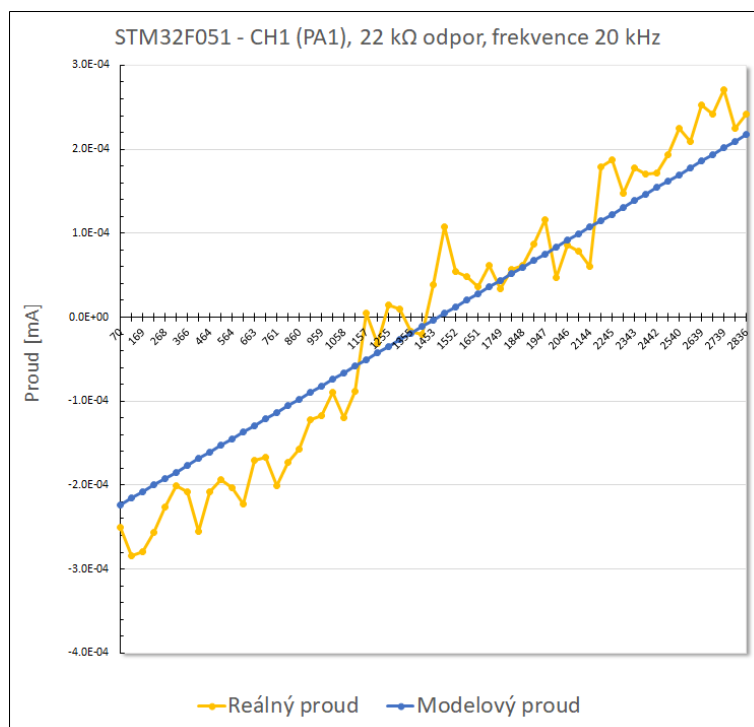
Z porovnání těchto dvou křivek vychází, jak měřené vstupní proudy do AD převodníku odpovídají teoretickým vstupním proudům vypočítaným dle modelu (1).

Měřeno bylo na více frekvencích pro porovnání, zda jsou charakteristiky vstupních proudů nezávislé na frekvenci vzorkování AD převodníku. Tato domněnka se potvrdila:



Obrázek 74 Charakteristiky vstupního proudu, vlevo frekvence vzorkování 300 kHz, vpravo frekvence vzorkování 400 kHz, kanál 1 (PA1) - STM32F051

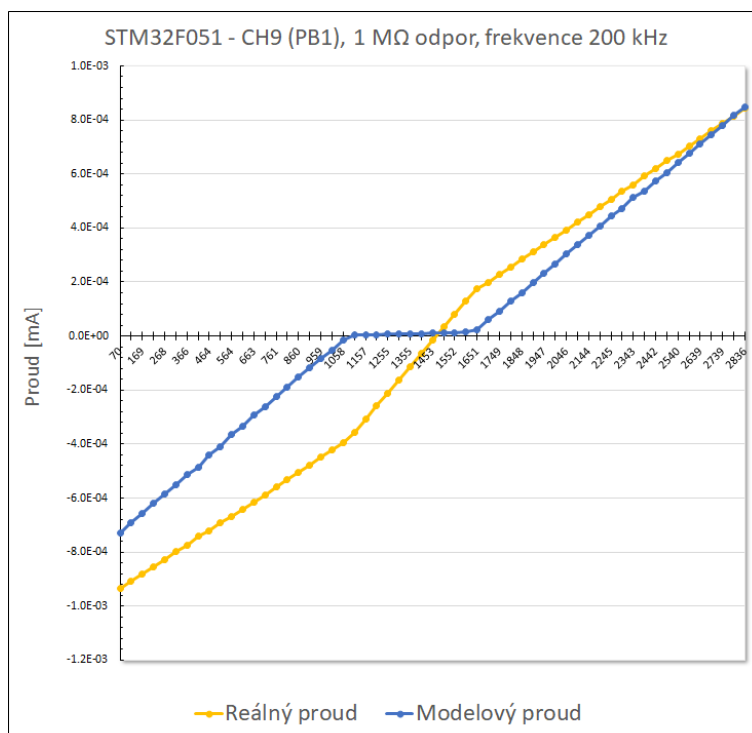
Nyní k problémům s touto metodou. První z nich byl, že při měření na malých frekvencích vzorkování a především na menším z obou rezistorů (22 kΩ) byly úbytky napětí na odporu tak malé, že výslednou hodnotu napětí výrazně ovlivňoval šum a nepřesnost měření. Vzniklé charakteristiky vstupního proudu tedy neodpovídaly skutečnosti, viz následující graf:



Obrázek 75 Nepřesná charakterizace vstupního proudu do AD převodníku, kanál 1 (PA1) - STM32F051

Při měření na větších frekvencích vzorkování AD převodníku (a především na větším z obou rezistorů ($1\text{ M}\Omega$)) se vyskytly dva problémy. Při větších frekvencích byl úbytek na rezistorech tak velký, že se již ve skutečnosti měřilo na jiné napěťové úrovni (úbytky byly řádově až stovky mV). Také docházelo k tomu, že díky vysoké frekvenci samplování AD převodníku byl blokovácí kondenzátor $Cb2$ neustále nabit na zbytkové napětí samplovacího kondenzátoru měřené desky (při několika měřených napěťových úrovních). Tedy, že samplovací kondenzátor odebíral náboj z blokovacího kondenzátoru $Cb2$ takovou rychlostí, že se mu nemohl vyrovnat náboj tekoucí přes odpor. Díky tomu byl blokovácí kondenzátor $Cb2$ stále nabit na zbytkové napětí samplovacího kondenzátoru. To zapříčinilo jiné tvary měřených křivek. Napěťový skok křivky reálného proudu byl více zploštělý a velká část křivky modelové byla souběžná s vodorovnou osou kolem nulového vstupního proudu (jelikož se nyní U_{zmer} rovnalo U_{zbyt} , byl proud dle modelové rovnice (1) nulový):

7 Měření napětí v zapojení s rezistorem



Obrázek 76 Nepřesná charakterizace vstupního proudu do AD převodníku, kanál 9 (PB1) - STM32F051

V neposlední řadě měla tato metoda měření velkou nevýhodu v délce samotného měření (měření jednoho mikrokontroléru trvalo několik hodin) a množství získaných dat, kdy jejich zpracování opět zabralo hodně času. Díky výše uvedeným důvodům jsem nakonec upustil od měření vstupních proudů touto metodou a všechny mikrokontroléry měřil metodou s operačním zesilovačem. Přesto bych rád zmínil pár naměřených výsledků, které lze porovnat s výsledky naměřenými metodou se zapojením s operačním zesilovačem.

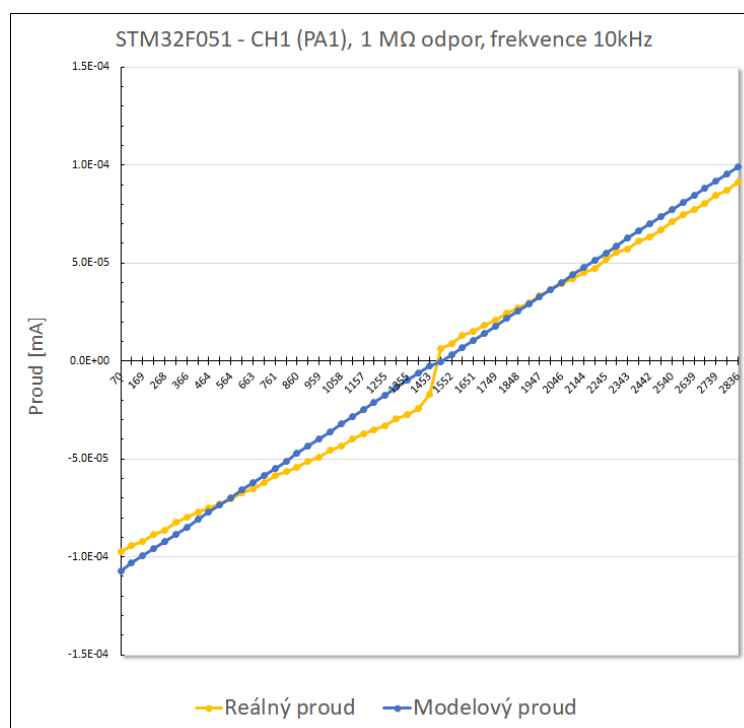
7.7.1 STM32F051, STM32F100

Kódy pro oba mikrokontroléry byly opět psané v Keilu. Kód pro STM32F100 byl psán bez použití externích knihoven, u STM32F051 již byly využity HAL knihovny. Hodiny obou AD převodníků obou mikrokontrolérů byly nastaveny na 8 Mhz, sampling time pak na 28,5 cyklu hodin. Jak již bylo zmíněno, kapacita sámplovacího kondenzátoru u obou mikrokontrolérů je 8 pF, proto byla tato hodnota použita i do modelové křivky. Měření byly u obou mikrokontrolérů kanály 1 (PA1), 9 (PB1) a 11 (PC1). Měřené zbytkové napětí bylo stabilní a je uvedeno níže.

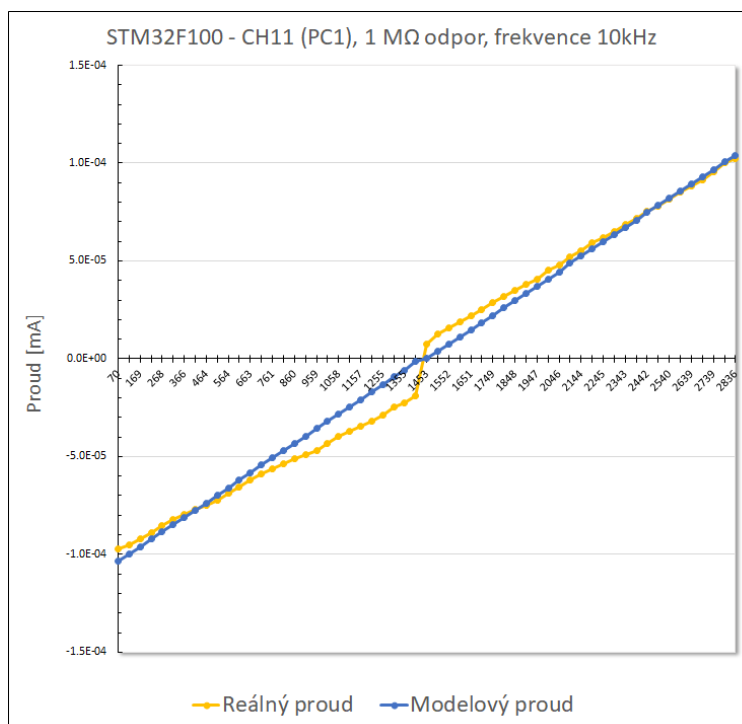
Tabulka 28 Zbytkové napětí na kanálech 1,9,11 - STM32F100, STM32F051

Hodnoty zbytkového napětí		
Měřený kanál	STM32F100	STM32F051
Kanál 1 (pin PA1)	1503 mV	1471 mV
Kanál 9 (pin PB1)	1501 mV	1473 mV
kanál 11 (pin PC1)	1501 mV	1471 mV

Zbytkové napětí bylo u obou mikrokontrolérů přibližně v polovině napájecího napětí AD převodníků (které, jak bylo již zmíněno dříve, bylo 2,95 V u STM32F051 a 2,94 V u STM32F100). Charakteristiky průběhu vstupních proudů byly u obou mikrokontrolérů na všech kanálech shodné (nebo velmi podobné), proto níže uvedu jen dvě z nich.



Obrázek 77 Charakteristika vstupního proudu, kanál 1 (PA1), 10 kHz - STM32F051



Obrázek 78 Charakteristika vstupního proudu, kanál 11 (PC1), 10 kHz - STM32F100

Charakteristické průběhy vstupních proudů jsou u těchto mikrokontrolérů velmi podobné, jako charakteristiky naintegrovaného napětí (kapitola 6.6.1). Je zde stejný i proudový skok (v metodě s operačním zesilovačem to byl napěťový skok) v oblasti zbytkového napětí. Reálné průběhy proudů přibližně odpovídají modelovým průběhům.

7.7.2 Shrnutí

Metoda se zapojením s odporem se neukázala jako úplně dostačující pro měření vstupních proudů, přesto lze některé výsledky porovnat s výsledky získanými metodou se zapojením operačního zesilovače. Charakteristiky odvozené z naměřených výsledků oběma metodami jsou shodné. Díky dříve zmíněným jevům, které ovlivňovali měření touto metodou (např. moc velký úbytek napětí na odporu který způsoboval změnu modelové i reálně naměřené křivky) a časové náročnosti měření a zpracovávání výsledků, bylo nakonec od této metody upuštěno.

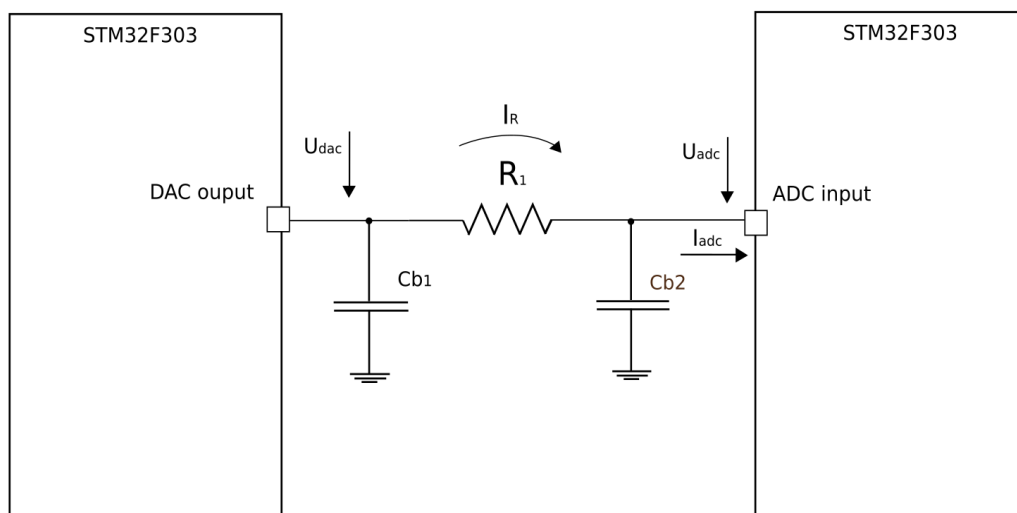
8 Využití zjištěných informací

Zjištěné informace o vstupních proudech do AD převodníků jednotlivých mikrokontrolů lze využít při korekci naměřené hodnoty napětí těmito AD převodníky a tím docílit přesnějšího výsledku měření.

Metoda pro vyzkoušení takové korekce je velmi podobná metodě měření v zapojení s rezistorem, kdy vstupní proud do AD převodníku způsobí úbytek napětí na odporu.

8.1 Měření v zapojení s rezistorem a korekce naměřených hodnot

Měření bylo provedeno s mikrokontrolérem STM32F303 v zapojení dle následujícího schéma:



Obrázek 79 Schéma zapojení při měření napětí s úbytkem na odporu s vyznačenými veličinami

Použity byly dva mikrokontroléry STM32F303. Jeden z nich (vlevo) sloužil jen k nastavení napěťové úrovně pro měření za použití DA převodníku. Druhým kitem (vpravo) bylo pak prováděno samotné vzorkování včetně měření napětí a odesílání výsledků UARTem do PC.

Vzorkováním AD převodníku na dané frekvenci vznikne úbytek napětí (díky vstupnímu proudu I_{adc}) na blokovacím kondenzátoru $Cb2$. Měřené napětí U_{adc} je menší, než nastavené U_{dac} . Tento úbytek způsobí, že odporem $R1$ teče proud, který zase nabíjí kondenzátor $Cb2$ zpátky na nastavené napětí U_{dac} . Při pevně nastavené napěťové úrovni U_{dac} a frekvenci vzorkování AD převodníku, se v určité chvíli oba proudy vyrovnají (tedy již nedochází ke změnám napětí na blokovacím kondenzátoru $Cb2$).

Z Ohmova zákona je obecně proud tekoucí rezistorem roven:

$$I = U/R$$

V tomto případě v takovémto tvaru:

$$I_r = (U_{dac} - U_{adc})/R_1$$

Kde:

U_{dac} - napětí nastavené DA převodníkem druhé desky (STM32F303RE)

U_{adc} - napětí měřené AD převodníkem

R_1 - rezistor způsobující úbytek napětí

I_r - proud protékající rezistorem

Ve chvíli, kdy se napětí na kondenzátoru C_{b2} ustálí je:

$$I_r = I_{adc}$$

Kde:

I_{adc} - proud tekoucí do AD převodníku

Modelový vzorec pro vstupní proud do AD převodníku je zde: (1), v tomto případě má takovýto tvar:

$$I_{adc} = C_s * (U_{adc} - U_{zbyt}) * f \quad (7)$$

Kde:

C_s - velikost samplovacího kondenzátoru mikrokontroléru STM32F303RE (5 pF)

U_{zbyt} - zbytkové napětí na samplovacím kondenzátoru

f - frekvence vzorkování AD převodníku

I_{adc} - proud tekoucí do AD převodníku

Díky odhadu vstupního proudu I_r dle modelové rovnice (7), znalosti odporu R_1 a změřého napětí U_{adc} , lze zpětně dopočítat (podle Ohmova zákona) velikost úbytku napětí na odporu a tedy i původní nastavené napětí. Úbytek napětí an odporu je roven:

$$U_r = I_{adc} * R_1 \quad (8)$$

Kde:

U_r - úbytek napětí na odporu R_1

Pro zpětně dopočítané původní napětí zdroje (tedy DA převodníku druhého kitu) tedy platí:

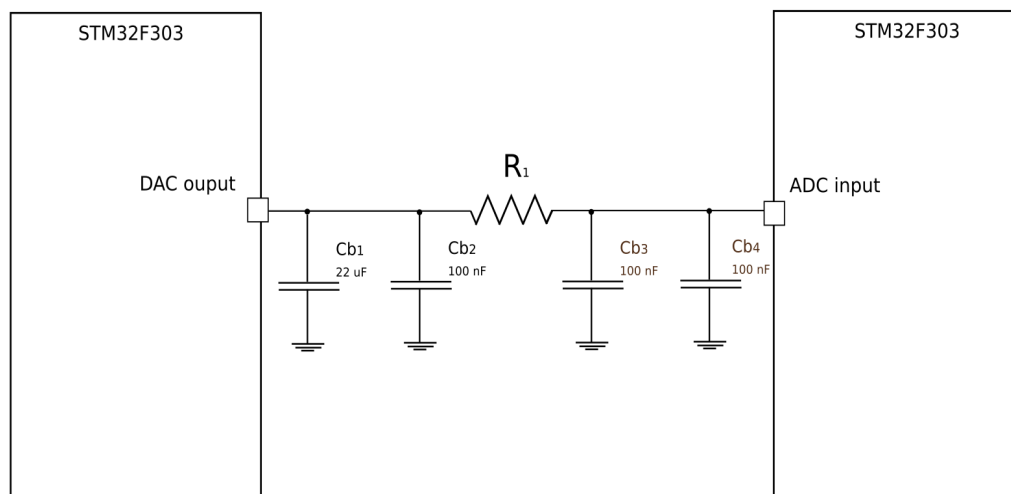
$$U_{dac2} = U_{adc} + U_r \quad (9)$$

Kde:

U_{dac2} - dopočítané napětí DA převodníku (v ideálním případě by se : $U_{dac2} = U_{dac}$)

Za pomoci korekce dle (9) lze zpřesnit výsledek měřeného napětí vnějšího obvodu, když je toto napětí ovlivněno vstupním proudem do AD převodníku.

8.2 Pužité součástky



Obrázek 80 Schéma zapojení součástek při měření napětí s úbytkem na odporu

Pužity byly 4 blokovací kondenzátory, 1 elektrolytický (Cb1, 22 μ F) a 3 keramické (Cb2, Cb3, Cb4 všechny 100 nF). Měření bylo provedeno dvakrát, s rezistorem (R1) o odporu 270 k Ω a 68 k Ω .

8.3 Postup měření

Na prvním kitu STM32F303 se zvolila úroveň napětí, která byla DA převodníkem nastavena a na které následně probíhalo měření. Na AD převodníku měřeného mikrokontroléru STM32F303 se nejdříve nastavila frekvence vzorkování. Při spuštění měření se nejdříve nabily blokovací kondenzátory na napětí nastavené DA převodníkem. Toto napětí bylo AD převodníkem změřeno a posláno přes UART do PC. Následně začal AD převodník vzorkovat nastavenou frekvencí. Tím docházelo k odběru proudu a úbytku napětí na kondenzátoru Cb3 a Cb4. Hodnota napětí, kterou AD převodník měřil, byla průběžně posílána přes UART do PC. Když se tato hodnota ustálila, byla zaznamenána pro další zpracování (hodnota byla průměrem 1000 naměřených hodnot). Následně byla zvolena jiná frekvence vzorkování AD převodníku, popřípadě jiná napěťová úroveň nastavená DA převodníkem a test se opakoval. Měření proběhlo na několika napěťových úrovních (0,5 V, 1 V, 1,5 V, 2 V, 2,5 V) a několika frekvencích (10 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz). Měřeno bylo postupně na dvou resitorech o odporech 270 k Ω a 68 k Ω .

8.4 Naměřená data a jejich korekce dle modelu

Měření proběhlo na mikrokontroléru STM32F303. Ten byl vybrán záměrně, jelikož velká část charakteristiky naintegrovaného (kapitola 6.6.2) byla velmi podobná jako charakteristika podle modelové rovnice. Tedy i vstupní proud do AD převodníku tohoto mikrokontroléru bude přibližně odpovídat modelu (2). Proto ke korekci naměřených hodnot napětí lze použít modelovou rovnici bez úprav.

K měření byl využit 1. AD převodník ADC1, konkrétně proběhlo měření na kanálu 2 (PA1). Kód pro mikrokontrolér byl opět psán v Keilu s počáteční konfigurací v CubeMX a využitím HAL knihoven. Na začátku programu proběhla kalibrace AD převodníku. Frekvence hodin AD převodníku byla nastavena na 16 Mhz, sampling time pak na 19,5 cyklu hodin.

Kód pro druhý mikrokontrolér STM32F303 (ze kterého se využíval DA převodník na nastavování napěťových úrovní) byl také psán v Keilu s počáteční konfigurací v CubeMX a využitím HAL knihoven. Aby výstup DA převodníku neovlivňoval svým odporem měření byl nastaven jako v (7.4).

Odpor rezistorů, na kterých probýhalo měření, byl zkontrolován multimetrem Haoyue M890G. Bylo zjištěno, že odpor rezistoru označeného jako "270 k Ω " byl ve skutečnosti 271 k Ω . Odpor rezistoru označeného jako "68 k Ω " byl ve skutečnosti 68,1 k Ω . Pro další výpočty byly použity skutečně naměřené hodnoty rezistorů.

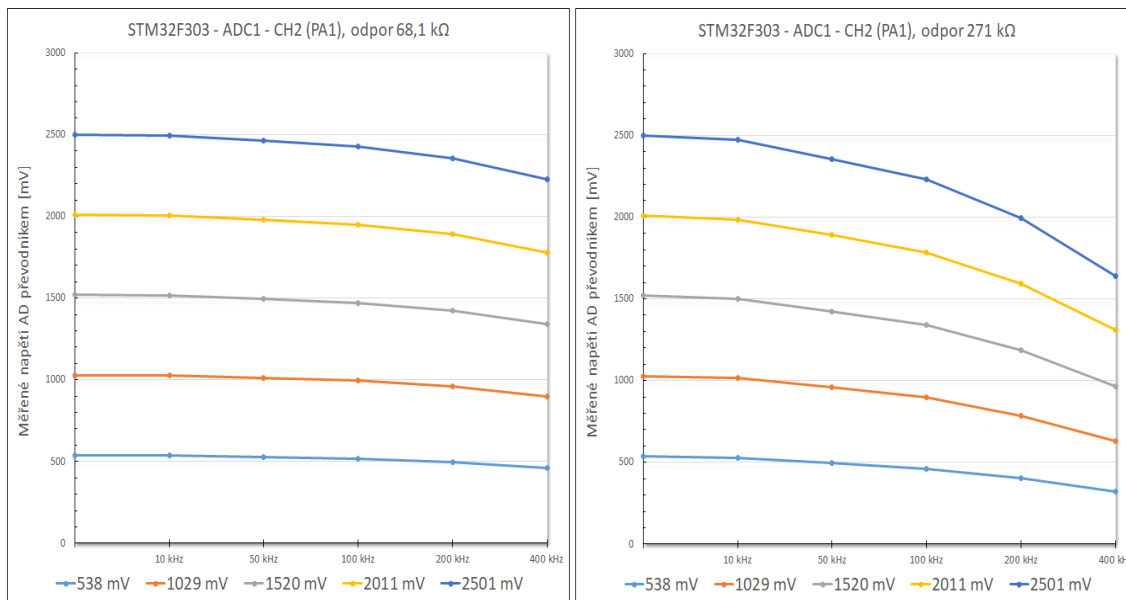
Před samotným měřením bylo potřeba znovu změřit zbytkové napětí, jelikož nyní se vyhodnocovalo jiným kitem (samotným měřením kitem, který sloužil i k vyhodnocení výsledků). Měření proběhlo stejně, jako v (7.6).

Tabulka 29 Zbytkové napětí na kanálu 2 - STM32F303

STM32F303 - ADC1	Zbytkové napětí
Kanál 2 (pin PA1)	5 mV

Zbytkové napětí opět nebylo stabilní, pohybovalo se přibližně mezi 3-8 mV.

Níže jsou uvedeny průběhy měřeného napětí v závislosti na frekvenci vzorkování. Na vodorovné ose je frekvence vzorkování, na svislé velikost měřeného napětí. Název jednotlivých křivek pak odpovídá velikosti napětí nastavené DA převodníkem před měřením.



Obrázek 81 Průběh měřeného napětí v závislosti na frekvenci vzorkování, vlevo s rezistorem 68,1 k Ω a vpravo s rezistorem 271 k Ω - STM32F303

Jak je vidět, při vyšších frekvencích již dochází k velké chybě v naměřených hodnotách napětí (oproti nastavenému napětí DA převodníkem). Tato chyba je logicky patrnější při zapojení s větším odporem.

Níže ještě uvádím tabulky s naměřenými hodnotami. V levém sloupci jsou hodnoty napětí nastavené DA převodníkem před spuštěním vzorkování. Ostatní sloupce jsou pak naměřené hodnoty napětí, při dané frekvenci vzorkování a na daných napěťových úrovních nastavené DA převodníkem.

Tabulka 30 Hodnoty napětí naměřené při různé frekvenci vzorkování - zapojení s 68,1 k Ω rezistorem

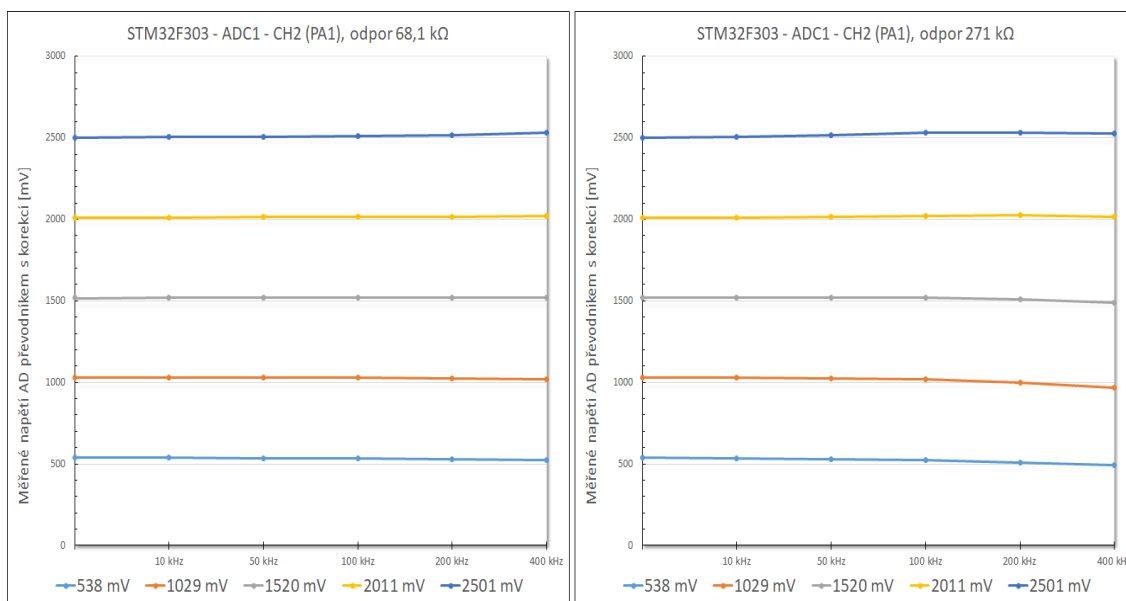
Rezistor: 68,1 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	536 mV	527 mV	517 mV	497 mV	461 mV
1029 mV	1026 mV	1011 mV	994 mV	960 mV	899 mV
1521 mV	1516 mV	1496 mV	1471 mV	1425 mV	1340 mV
2011 mV	2006 mV	1980 mV	1949 mV	1890 mV	1779 mV
2501 mV	2495 mV	2465 mV	2427 mV	2357 mV	2228 mV

Tabulka 31 Hodnoty napětí naměřené při různé frekvenci vzorkování - zapojení s 271 k Ω rezistorem

Rezistor: 271 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	529 mV	497 mV	462 mV	403 mV	322 mV
1029 mV	1014 mV	959 mV	899 mV	787 mV	630 mV
1520 mV	1500 mV	1425 mV	1340 mV	1188 mV	966 mV
2011 mV	1985 mV	1890 mV	1781 mV	1593 mV	1307 mV
2501 mV	2472 mV	2357 mV	2230 mV	1993 mV	1641 mV

Dle modelové rovnice (7) jsem dopočítal velikosti proudů vstupujících do AD převodníku při daných frekvencích vzorkování a měřených napětích. Dále jsem podle (8) vypočítal předpokládané úbytky napětí na odporu a následně jsem tyto předpokládané úbytky napětí přičetl k naměřeným hodnotám napětí (dle (9)) a tím dopočítal původní napětí nastavené DA převodníkem. Průběh výsledných měřených hodnot s touto korekcí je zde:

8 Využití zjištěných informací



Obrázek 82 Průběh měřeného napětí po korekci dle modelu (7), vlevo s rezistorem 68,1 k Ω a vpravo s rezistorem 271 k Ω - STM32F303

Je vidět, že s touto korekcí napětí je měření výrazně přesnější, v některých případech až bez chyby. Níže uvádím tabulky s dopočítanými hodnotami napětí.

Tabulka 32 Odhadované napětí po korekci úbytku napětí na odporu - zapojení s 68,1 k Ω rezistorem

Rezistor: 68,1 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	538 mV	536 mV	534 mV	530 mV	523 mV
1029 mV	1029 mV	1028 mV	1027 mV	1025 mV	1020 mV
1520 mV	1521 mV	1521 mV	1521 mV	1521 mV	1521 mV
2011 mV	2012 mV	2014 mV	2016 mV	2018 mV	2021 mV
2501 mV	2504 mV	2507 mV	2509 mV	2517 mV	2531 mV

Tabulka 33 Odhadované napětí po korekci úbytku napětí na odporu - zapojení s 271 k Ω rezistorem

Rezistor: 271 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	536 mV	530 mV	524 mV	510 mV	494 mV
1029 mV	1027 mV	1024 mV	1020 mV	999 mV	969 mV
1520 mV	1520 mV	1521 mV	1521 mV	1509 mV	1487 mV
2011 mV	2012 mV	2017 mV	2022 mV	2024 mV	2013 mV
2501 mV	2505 mV	2516 mV	2531 mV	2532 mV	2527 mV

Díky korekci napětí dle předchozích rovnic jsem dospěl k přesnějším výsledkům, které se již více blížily původně nastaveným hodnotám napětí DA převodníkem. Níže ještě uvádím procentuální odchylku měřeného napětí (při dané napěťové úrovni a dané frekvenci vzorkování) před a po korekci.

Tabulka 34 Procentuální odchylka naměřených hodnot od skutečné (před korekcí) - zapojení s 68,1 k Ω rezistorem

Rezistor: 68,1 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	0.3 %	2.0 %	3.9 %	7.7 %	14.4 %
1029 mV	0.3 %	1.7 %	3.4 %	6.7 %	12.7 %
1520 mV	0.3 %	1.6 %	3.2 %	6.3 %	11.9 %
2011 mV	0.3 %	1.5 %	3.1 %	6.0 %	11.5 %
2501 mV	0.2 %	1.4 %	3.0 %	5.8 %	10.9 %

Tabulka 35 Procentuální odchylka naměřených hodnot od skutečné (po korekci) - zapojení s 68,1 k Ω rezistorem

Rezistor: 271 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	0.0 %	0.4 %	0.7 %	1.5 %	2.9 %
1029 mV	0.0 %	0.1 %	0.2 %	0.4 %	0.8 %
1520 mV	-0.1 %	-0.1 %	-0.1 %	-0.1 %	-0.1 %
2011 mV	-0.1 %	-0.1 %	-0.2 %	-0.3 %	-0.5 %
2501 mV	-0.1 %	-0.2 %	-0.3 %	-0.6 %	-1.2 %

Tabulka 36 Procentuální odchylka naměřených hodnot od skutečné (před korekcí) - zapojení s 271 k Ω rezistorem

Rezistor: 68,1 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	1.7 %	7.7 %	14.1 %	25.2 %	40.1 %
1029 mV	1.5 %	6.8 %	12.6 %	23.5 %	38.7 %
1520 mV	1.3 %	6.3 %	11.8 %	21.8 %	36.4 %
2011 mV	1.3 %	6.0 %	11.4 %	20.8 %	35.0 %
2501 mV	1.2 %	5.8 %	10.8 %	20.3 %	34.4 %

Tabulka 37 Procentuální odchylka naměřených hodnot od skutečné (po korekci) - zapojení s 271 k Ω rezistorem

Rezistor: 271 k Ω	Frekvence vzorkování AD				
Nastavené napětí DA	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz
538 mV	0.4 %	1.5 %	2.6 %	5.1 %	8.1 %
1029 mV	0.2 %	0.5 %	0.8 %	2.9 %	5.8 %
1520 mV	0.0 %	-0.1 %	-0.1 %	0.7 %	2.2 %
2011 mV	-0.1 %	-0.3 %	-0.5 %	-0.6 %	-0.1 %
2501 mV	-0.2 %	-0.6 %	-1.2 %	-1.2 %	-1.0 %

8.4.1 Shrnutí

Jak již bylo zmíněno, mikrokontrolér pro tento test byl zvolen záměrně STM32F303, jelikož jeho charakteristika naintegrovaného napětí (kapitola 6.6.2) nejvíce odpovídala modelu. Díky tomu stačilo pro korekci naměřeného napětí použít modelovou rovnici pro vstupní proud (2) bez úprav a tím docílit značného zpřesnění měření. Při použití jiného mikrokontroléru s AD převodníkem s jinými charakteristickými vstupními proudy, které by již tak neodpovídali modelové rovnici (2), by byla výchylka dopočítaného napětí od skutečného napětí větší.

Bylo názorně ukázáno, že lze dopočítat napětí vnějšího zdroje napětí s vysokou impedancí jen ze znalosti této impedance, změřeného napětí při dané frekvenci a znalosti chování vstupních proudů do AD převodníku konkrétního mikrokontroléru (které byly charakterizovány v předchozích kapitolách).

9 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzování a charakterizace vstupních proudů do jednotlivých mikrořadičů rodiny STM32, což se povedlo splnit. Charakterizace vstupních proudů proběhla na těchto mikrořadičích: STM32F042, STM32F051, STM32F072, STM32F100, STM32F103, STM32F303, STM32F407, STM32F410, STM32F411, STM32F446, dále STM32L031, STM32L053, STM32L073, STM32L100, STM32L152, STM32L432 a STM32L476 a Nordic nRF51822 na kitu BBC Micro:Bit.

V této práci byl navrhnout model chování vstupních proudů do AD převodníků jednotlivých mikrořadičů a s tímto modelem byly porovnány skutečně naměřené hodnoty. Jak jsem zjistil, vstupní proudy se u většiny mikrořadičů zásadně nevyvíkají jejich teoretickému odhadu podle modelu.

Navrhnuty byly také dvě metody měření. Jedna se zapojením operačního zesilovače jako napětového integrátoru, kde se vstupní proud charakterizoval podle naintegrovaného napětí na kondenzátoru způsobeného jednotlivými odměry AD převodníku. Druhá, kde se měřil úbytek napětí na rezistoru způsobený vstupními proudy do AD převodníku při stálém vzorkování. Druhá z nich byla vyhodnocena jako nedostačující pro podrobná měření a proto byly nakonec vstupní proudy do AD převodníků všech mikrořadičů charakterizovány metodou první.

Z naměřených charakteristik byly vyvozeny závěry ohledně použití stejných AD převodníků v různých mikrořadičích. V některých případech bylo odhadnuto jiné vnitřní uspořádání převodníků, které tyto charakteristiky pravděpodobně ovlivňovalo (soudím, že by se v těchto případech nemuselo jednat o AD převodníky využívající k vyhodnocení napětí jen postupnou aproximaci, ale patrně by mohlo jít o tzv. hybridní AD převodníky se složitější vnitřní strukturou).

Měření bylo i jiný mikrořadič než od firmy ST, konkrétně Nordic nRF51822 na kitu BBC Micro:Bit. Na tomto kitu byl mimo jiné také ukázán projev pull-up rezistoru (napojeného na stejný pin jako měřený kanál AD převodníku) na charakteristiku vstupního proudu.

Získané informace o chování vstupních proudů lze využít pro korekci měření napětí zdroje s větší vnitřní impedancí. Obdobná korekce byla úspěšně provedena s mikrořadičem STM32F303.

Přenos dat mezi mikrořadiči a nadřazeným PC probíhal po UART. Pro komunikaci mezi mikrořadiči a PC nakonec nebyl vytvořen vlastní program pro nadřazené PC, ale byl využit veřejně dostupný terminálový program Putty.

Literatura

- [1] Nordic Semiconductor. *nRF51822 Multiprotocol Bluetooth® low energy/2.4 GHz RF System on Chip Product Specification v3.1*. 2014. URL: http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF51822_PS_v3.1.pdf (cit. 20.05.2017).
- [2] ST Microelectronics. *Understanding and minimising ADC conversion errors*. 2003. URL: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/9d/56/66/74/4e/97/48/93/CD00004444.pdf/files/CD00004444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00004444.pdf (cit. 10.08.2017).
- [3] ST Microelectronics. *AN2834 Application note, How to get the best ADC accuracy in STM32 microcontroller*. 2017. URL: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/3f/4c/a4/82/bd/63/4e/92/CD00211314/files/CD00211314.pdf/jcr:content/translations/en.CD00211314.pdf (cit. 10.08.2017).
- [4] ST Microelectronics. *STM32F051x4 STM32F051x6 STM32F051x8 ARM®-based 32-bit MCU, 16 to 64 KB Flash, 11 timers, ADC, DAC and communication interfaces, 2.0-3.6 V*. 2017. URL: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/55/53/3e/86/29/61/41/d9/DM00039193.pdf/files/DM00039193.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039193.pdf> (cit. 10.08.2017).
- [5] Alexander Scheeline. *Successive Approximations ADC*. URL: http://www.asdlib.org/onlineArticles/elabware/Scheeline_ADC/ADC_ADC_SucApprox.html (cit. 18.08.2017).
- [6] BBC. *SCH_BBC-Microbit_V1.3B*. 2016. URL: https://github.com/bbcmicrobit/hardware/blob/master/SCH_BBC-Microbit_V1.3B.pdf (cit. 11.08.2017).
- [7] ST Microelectronics. *Extending the DAC performance of STM32 microcontrollers*. 2015. URL: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/6f/35/61/e9/8a/28/48/8c/DM00129215.pdf/files/DM00129215.pdf/jcr:content/translations/en.DM00129215.pdf (cit. 10.08.2017).