

VSY - Integrovační voltmetr - dokumentace

Vojtěch Michal

20. prosince 2021

1 Stanovení hodnot součástek

1.1 Parametry integrátoru

Pro invertující integrátor s operačním zesilovačem a prvky R , C platí závislost výstupního napětí $u_o(t)$ na vstupním $u_i(t)$ daná vztahem

$$u_o(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t \frac{u_i(\tau)}{R} d\tau = \frac{-1}{R \cdot C} \int_0^t u_i(t) dt. \quad (1)$$

Protože je integrátor po zakončení každé integrační periody vrácen do nuly (kondenzátor C je vybit), lze bez újmy na obecnosti předpokládat nulové počáteční podmínky. Operační zesilovače mají symetrické napájení ± 5 V a je silně nežádoucí, aby se jejich výstup dostal blízko oblasti saturace. Proto je potřeba volit parametry R , C tak, aby zvolená doba integrace při připojení maximálního vstupního napětí nedosáhla saturace integrátoru.

Pro zvolenou integrační dobu $T_1 = 40$ ms volím maximální žádanou napětí $U_{o_{\max}} = 3,3$ V, neboť poté bude možné pro případné ladění obvodu použít ADC na dalším nucleu. Dále volíme $C = 220$ nF. Pro vstupní rozsah $u_i \in \langle -2, 0 \rangle$ V platí

$$3,3 \text{ V} \geq U_{o_{\max}} = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^{T_1} u_{i_{\min}}(\tau) d\tau = \frac{1}{R \cdot C} \cdot T_1 \cdot |u_{i_{\min}}|, \quad (2)$$

což je rovnice pro jednu neznámou R . Po úpravě

$$R \geq \frac{T_1 \cdot |u_{i_{\min}}|}{U_{o_{\max}} \cdot C}. \quad (3)$$

Pro výše uvedené parametry je to například

$$R \geq \frac{0,04 \text{ s} \cdot 2 \text{ V}}{3,3 \text{ V} \cdot 220 \cdot 10^{-9} \text{ F}} \approx 110 \text{ k}\Omega. \quad (4)$$

S použitím $R = 200 \text{ k}\Omega$ budeme mít dvojnásobnou jistotu, že bude bezpečné na výstup integrátoru připojit ADC.

1.2 Parametry regulátoru

K napětové referenci TL431 je potřeba doplnit kondenzátor (doporučeno $C_b = 22 \mu\text{F}$) a rezistor R_R , kterým poteče cca 2 mA při napětovém úbytku 2,5 V. Použitelná hodnota je tedy $R_R = 470 \text{ }\Omega$.

2 Struktura aplikace

Mikrokontroler třemi logickými signály **S2**, **S1**, **S0** (souhrně **MUX_SEL**) nastavuje multiplexor na vstupu analogového front-endu. Mapování hodnot **MUX_SEL** na zvolené kanály a jejich význam jsou v tabulce 1. Pro detailnější porozumění významu jednotlivých kanálů konzultujte schéma zapojení. Očekávané mapování signálů na piny Nucleo desky je uvedeno v tabulce 2.

Vstupní signál **MCU_IN** je přes ochranný rezistor připojen na výstup komparátoru. Detekováním hran na signálu **MCU_IN** lze identifikovat průchody napětí na integrátoru U_{int} nulou. Na mikrokontroleru je signál připojen na timer, jenž zajišťuje přesné odměřování času mezi hranami. Pro více informací viz 6

S2	S1	S0	jméno kanálu	význam
0	0	0	U_{in}	neznámé vstupní napětí
0	0	1	GND	hladina nulového potenciálu
0	1	x	U_{ref}	referenční napětí cca 2,51 V, generované obvodem TL431
1	x	x	U_{FB}	feedback z výstupu komparátoru

Tabulka 1: Mapování hodnot **MUX_SEL** na vstupní kanály multiplexoru

signál	periferie	pin STM32	pin Arduino konektoru
MCU_IN	TIM2_CH1, timer trigger	PA0	A0
MCU_IN	TIM2_CH3, input compare	PA9	D8
S1	TIM2_CH2, output compare	PA1	A1
S2	GPIO	PC1	A4
S0	GPIO	PC0	A5
USART2_TX	USART2	PA2	N/A (přes ST-Link do PC)
USART2_RX	USART2	PA3	N/A (přes ST-Link do PC)

Tabulka 2: Pinout mikrokontroleru

3 Komunikační rozhraní

Zařízení komunikuje po technologii UART, nastavení 115200 baud, 8 datových bitů, jeden stop bit, bez parity. V rámci ST-Linku je přítomen UART<->USB převodník, který zajišťuje překlad komunikace pro PC. Všechny příkazy přijímané zařízením nerozlišují velká a malá písmena a jsou dlouhé jeden znak s výjimkou výzvy ke konfiguraci, která je detailně dokumentována v sekci 4 V tabulce 3 jsou uvedeny všechny příkazy použitelné pro řízení aplikace, v její spodní polovině jsou konkrétní příkazy použitelné pro ladění kompenzací chyby měření.

Pro navázání spojení s aplikací je doporučeno připojení pomocí standardního linuxového terminálu.

- Zjistěte číslo COM portu přiřazeného voltmetru (na Windows pomocí správce zařízení). Nechť je zařízení připojeno např. na *COM12*.
- Nastavte COM port na parametry komunikace `stty -F /dev/ttyS12 115200 raw -parenb`
- Spusťte čtení z COM portu `cat /dev/ttyS12`.
- Spusťte zápis do COM portu `stty raw; cat > /dev/ttyS12` ve vedlejší instanci terminálu.
- Resetujte zařízení stiskem tlačítka. Ze zařízení by se měl objevit výpis *"VoMi's dual slope integration ADC initialized and ready."*

příkaz	funkce	popis
Q	Reset	Resetuje mikrokontroler. Ekvivalentní stisku resetovacího tlačítka.
S	Single	Spustí či zastaví one-shot měření s aktuálním nastavením
R	Run	Spustí kontinuální měření s aktuálním nastavením
E	Exit	Ukončí probíhající kontinuální měření
H	Help	Vypíše seznam rozpoznávaných příkazů
C	Configure	Vstoupí do konfiguračního módu (viz 4)
I	Info	Vypíše aktuální hodnoty konfiguračních parametrů (viz 4)
D	Derivative	Přepne zařízení do režimu ladění sklonu charakteristiky
O	Offset	Přepne zařízení do režimu ladění konstantního posunutí charakteristiky
+	Inc Param	Zvýší hodnotu parameteru zvoleného příkazy D či O
-	Dec Param	Sníží hodnotu parameteru zvoleného příkazy D či O
*	Reset Param	Obnoví základní hodnotu parameteru zvoleného příkazy D či O

Tabulka 3: Přehled příkazů rozeznávaných aplikací

4 Konfigurace

Aplikace podporuje konfiguraci mnoha proměnných v reálném čase, všechny jsou uvedené v tabulce 4. Všechny parametry jsou škálované celočíselné hodnoty, nebo pravdivostní. U pravdivostních hodnot je nula interpretována

jako *false* a jakékoli nenulové číslo interpretováno jako *true*.

Konfiguraci je standardně možno měnit výhradně při deaktivovaném měření (zařízení v režimu *idle*). Výjimkou je ladění error correction koeficientů *MEAS_OFFSET* a *MEAS_SCALE*, které je možné provádět průběžně i během měření. Stiskem kláves **Derivative** či **Offset** lze přepínat mezi laděním sklonu a offsetu charakteristiky. Po vybrání parametru k ladění je možné použitím kláves **+** a **-** měnit plynule hodnotu. Aktuální hodnotu error correction parametrů lze získat spolu se všemi ostatními parametry pomocí příkazu **Info**. Obnovení továrního nastavení parametru lze provést stiskem klávesy *****.

jméno parametru	význam	reset value	jednotka
AVG_LEN	Počet vzorků použitých k průměrování	16	–
OVERWRITE	Aktivuje přepisování předchozích měření novými vzorky	1	bool
MEAS_SCALE	Korekční faktor sklonu charakteristiky	9967	10^{-4}
MEAS_OFFSET	Korekční faktor konstantního posunutí charakteristiky	-155	0.1 mV
V_REF	Hodnota napěťové reference zařízení	2517	mV
SOFT_START_LEN	Délka fáze soft-start integračního cyklu	800	μ s
T1_DUR	Délka fixní fáze integračního cyklu	40	ms
PRINT_SAMPLES	Nastavuje formát vypisovaných dat	0	bool

Tabulka 4: Přehled konfigurovatelných parametrů

5 Nastavení periférií

Všechny vnitřní sběrnice v mikrokontroleru (AHB, APBx) běží na frekvenci 8 MHz.

Pro časování fáze *soft start* je použita periferie TIM7, konfigurována na one pulse mode; update request source je pouze přetečení vnitřního counteru, aby nebyla vyvolávána planá přerušení. Použitý prescaler je 8 (čítání s mikrosekundovým rozlišením). V auto-reload registru ARR je vždy uložena hodnota délky fáze *soft start* v mikrosekundách (v základu 800). V periférii i NVIC je povoleno přerušení.

Pro časování integrace je použita periferie TIM2. Jako interní trigger je zvolen neinvertovaný filtrovaný vstup z kanálu 1 (TI1FP1), timer je provozován v *gated mode*, kdy inkrementování registru CNT je podmíněno vysokou úrovní na interním triggeru (kanál 1 je připojen na signál **MCU_IN**). V periférii i jádře je povolen požadavek na přerušení od třetí capture/compare jednotky. Capture/compare unit 3 má jako vstup TIM2_CH3, bez použití prescaleru nebo filtrování, vstup je invertován (jednotka citlivá na sestupnou hranu). Capture/compare jednotka 2 je v režimu output compare. V základu vynucuje nízkou úroveň, v době měřicího cyklu je přepnuta na mód PWM2, kdy je výstup v logické nule pro $CNT \leq CCR2$. V CCR2 je zapsána délka doby t1 v mikrosekundách (v základu 40 000).

Komunikace s řídicím počítačem je realizována periférií USART2, baudrate prescaler $69 \frac{7}{16} = 69.4375$. Skutečný baudrate proto je $\frac{8 \cdot 10^6}{69.4375} = 115211.52$ bps, relativní chyba 0.01 %. Je povolen vysílač i přijímač, aktivováno přerušení při příjmu znaku. Nastavení 8 datových bitů, 1 stop bit a bez parity je pro použitou periférii základní a není tak potřeba měnit reset value registrů.

Pro určování času běhu aplikace je použita periferie SysTick, jako zdroj hodin je sběrnice AHB bez předděliček; je povoleno přerušení, perioda nastavena na 1 ms.

6 Detailní popis chování aplikace

Pro snazší vysvětlení chování zařízení jsou připojeny obrázky z osciloskopu připojeného na obvod během testování. Na všech následujících obrázcích je použité stejné mapování kanálů osciloskopu uvedené v tabulce 5. Mezi obrázky se však liší časová základna i měřítko na vertikální ose. Velikost časové základny je na každém obrázku vidět na horním okraji uprostřed. Měřítka na svislé ose je zobrazeno v levém dolním rohu obrázků. Časové průběhy signálů během dvou po sobě jdoucích měřicích cyklů jsou vykresleny na obrázku 1, do kterého byly doplněny i názvy jednotlivých fází měřicího cyklu. Dílčí fáze převodu jsou popsány dále.

V režimu *idle* je aktivován feedback z komparátoru zpět na vstup integrátoru a výstup integrátoru U_{int} osciluje poblíž nuly s malou amplitudou (pod 1 mV). Oscilují rovněž výstup komparátoru a ve fázi s ním výstup sledovače. Toto chování je vidět na levé straně obrázku 2. Režim *idle* je zvolen při inicializaci zařízení, mezi měřicími cykly a po skončení měření.

Na základě příkazu ze seriové linky odstartuje převodník proces měření napětí:

- Ze stavu *idle* přejde software do stavu *soft start*.

kanál	barva	signál
1	žlutá	napětí na integrátoru U_{int}
2	zelená	výstup komparátoru
3	oranžová	výstup multiplexoru (aktuálně integrované napětí)

Tabulka 5: Mapování kanálů osciloskopu na signály obvodu pro obrázky 1 a další

- Vynucením aktivní (vysoké) úrovně na TIM2_CH2 připojené na **S1** se připraví mux na připojení referenčního napětí U_{ref} .
- Uvedením **S2** do logické nuly se deaktivuje feedback. Tím se připojí na výstup muxu referenční napětí U_{ref} .
- Spustí se TIM7 odpočítávající dobu specifikovanou parametrem **soft_start_delay** (v základu $800 \mu\text{s}$).

Po uplynutí specifikované doby vyvolá TIM7 přerušení. Protože bylo integrováno kladné napětí, výstup integrátoru je nyní pod nulou a tedy ořezaný signál z komparátoru **MCU_IN** je v logické nule. V obsluze přerušení:

- Software přejde ze stavu *soft start* do stavu *measuring*. Ten není dále dělen, protože toto je poslední zásah ze strany jádra; dále bude zbytek měřicího procesu řídit kompletně hardware periferie TIM2.
- Software vygeneruje update TIM2 (vynulování registru CNT, případně aktualizace preloaded CCRx registrů).
- Aktivují se capture/compare jednotky periferie TIM2.
- TIM2_CH2 se přepne z vynucené aktivní úrovně na PWM2 mód ($\text{TIM2_CH2} = 0$ pro $\text{TIM2_CNT} \leq \text{TIM2_CCR2}$). Tím je signál **S1** v nule a multiplexer se přepne z referenčního napětí na neznámé napětí U_{in} .

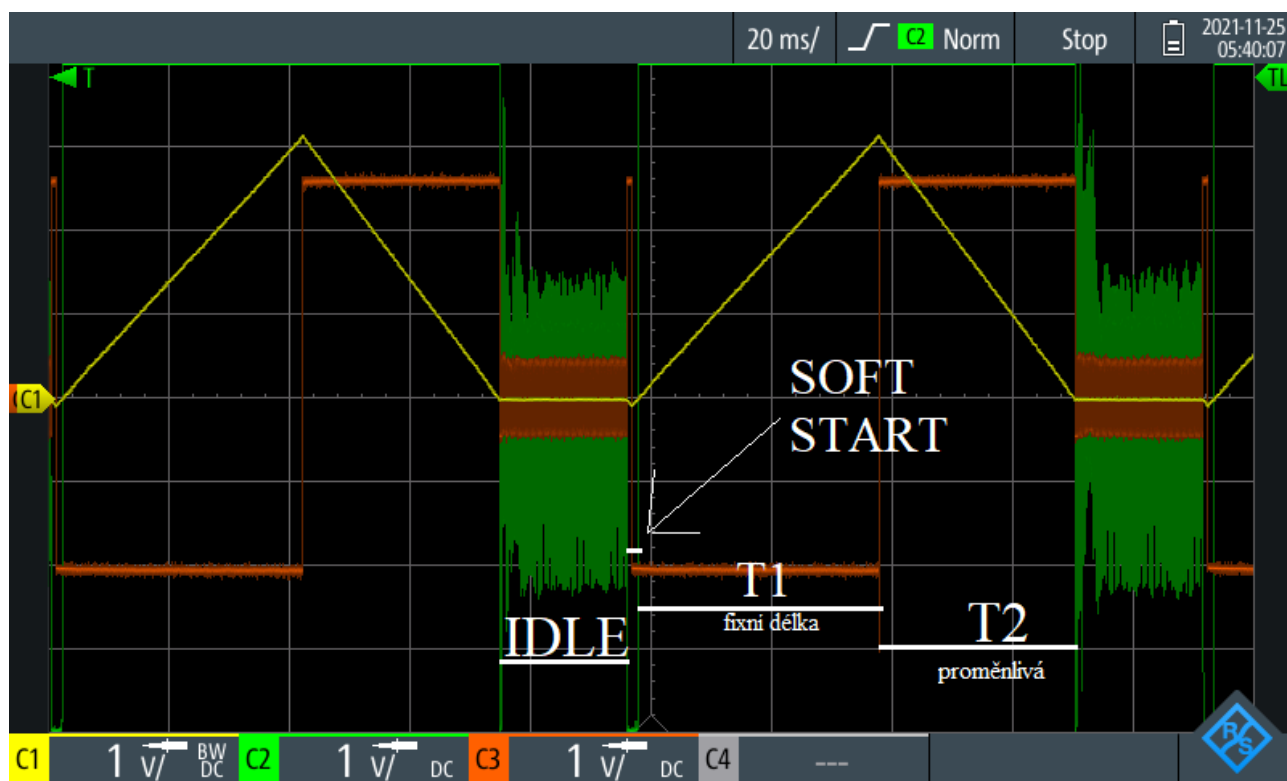
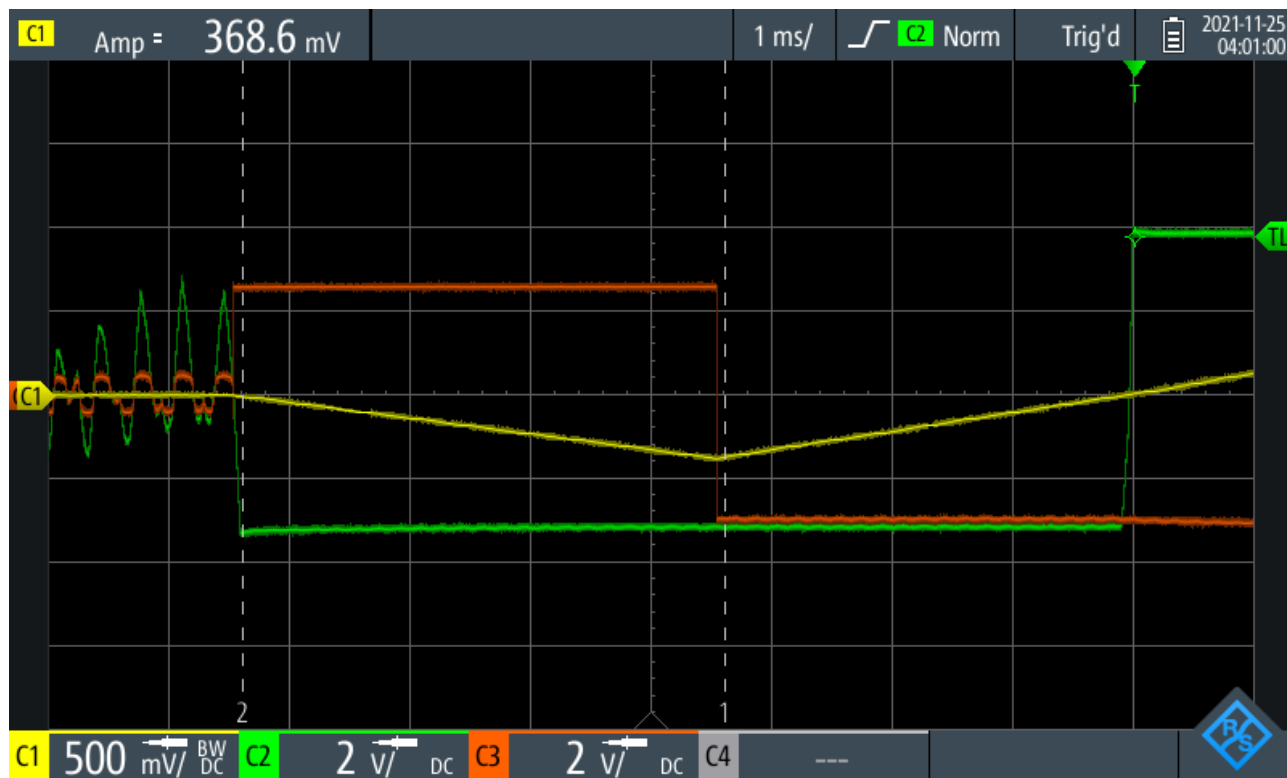
Přepnutím na neznámé záporné napětí začíná výstupní napětí integrátoru růst. V okamžiku průchodu U_{int} hladinou nulového potenciálu přeběhne signál **MCU_IN** do logické jedničky, což spustí čítač uvnitř TIM2. Timer čeká na uběhnutí předem nastavené doby $T_1 = 40 \text{ ms}$ v TIM2_CCR2. Po jejich uplynutí nastane compare event, výstup TIM2_CH2 (**S1**) jde do logické jedničky, čímž se místo neznámého napětí připojí na výstup multiplexoru kladné referenční napětí U_{ref} . Začíná se odměřovat doba T_2 proměnlivé délky. Integrovaním kladného napětí začne poklesat napětí U_{int} , až opět dosáhne hladiny nulového potenciálu. Tehdy nastane sestupná hrana na signálu **MCU_IN**, která je detekována input capture jednotkou TIM2_CH3. Nastává capture event, aktuální hodnota TIM2_CNT je uložena to TIM2_CCR3 a jádro dostane požadavek na přerušení. Protože **MCU_IN** je po sestupné hraně v logické nule, TIM2 se v též okamžik sám deaktivuje.

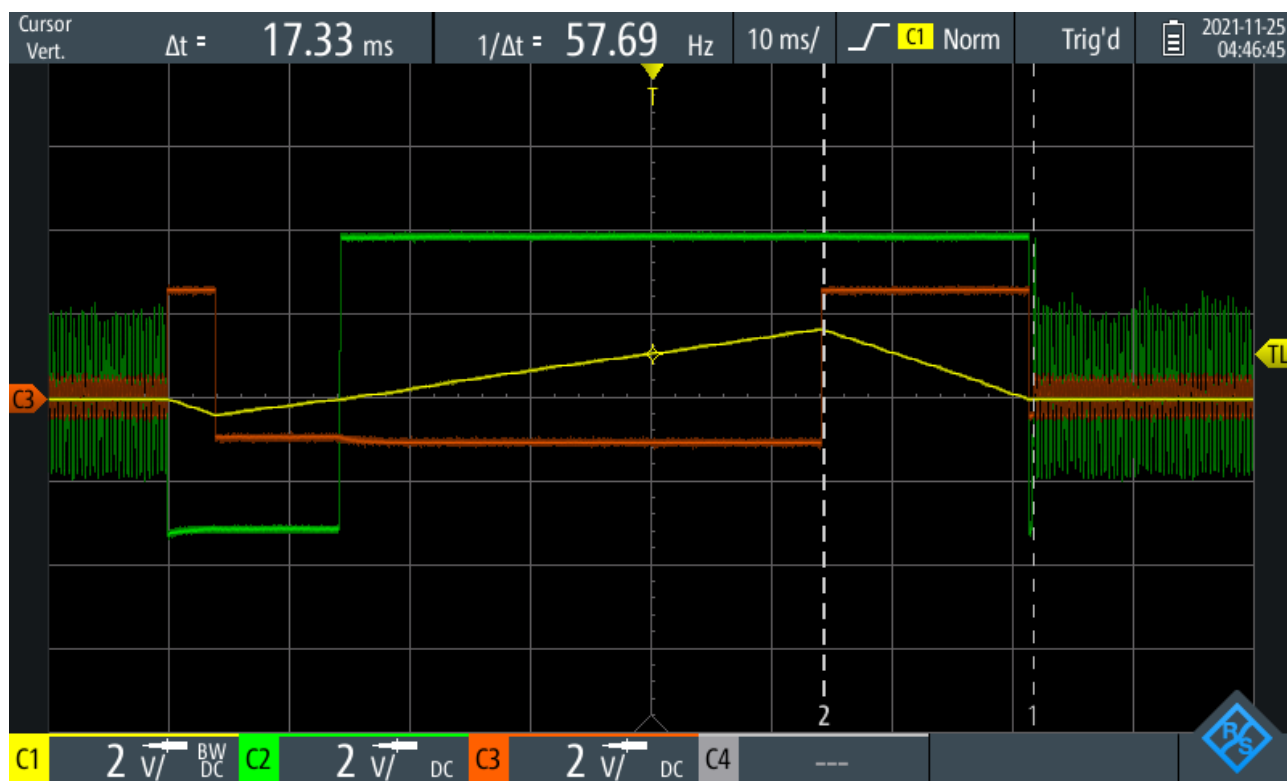
V obsluze přerušení od TIM2 jsou vyčteny hodnoty registrů TIM2_CCR3 a TIM2_CCR2. Díky nastavení slave mode controlleru tak, aby timer čítal jen a tehdy, když je logický signál **MCU_IN** v logické jedničce, tedy výstup komparátoru je na kladném napájení, tedy $U_{\text{int}} > 0 \text{ V}$, obsahuje registr TIM2_CCR3 přesně dobu mezi vzestupným a sestupným průchodem napětí U_{int} nulou, tedy platí

$$\text{TIM2_CCR3} = T_1 + T_2. \quad (5)$$

Neboť hodnota TIM2_CCR2 byla přesně použita pro vygenerování doby T_1 , jejich odečtením je získána délka doby T_2 v cyklech systémových hodin (8 cyklů na mikrosekundu, 125 ns na cyklus). Následně je nastavením signálu **S2** aktivován na multiplexoru feedback. Systém přechází do stavu *idle*.

Na obrázku 5 je příklad časových průběhů měřicích cyklů v případě, kdy je měřené napětí blízké referenčnímu napětí U_{ref} . Pomocí vertikálních kurzorů i časové základny je ukázáno, že doba odintegrovávání T_2 je přibližně rovno době $T_1 = 40 \text{ ms}$.

Obrázek 1: Časové průběhy signálů během měření $U_{in} \approx U_{FB}$ Obrázek 2: Detail časového průběhu signálů během fáze *soft start*

Obrázek 3: Detail časového průběhu signálů během fáze T_1 Obrázek 4: Detail časového průběhu signálů během fáze T_2

Obrázek 5: Měřicí cyklus pro $U_{\text{ref}} \approx U_{\text{in}}$