

# VSY - Integrovační voltmetr - dokumentace

Vojtěch Michal

28. listopadu 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  $\pm 5$  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  $U_{\text{int}}$  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
<b>MCU_IN</b>	TIM2_CH1, timer trigger	PA0	A0
<b>MCU_IN</b>	TIM2_CH3, input compare	PA9	D8
<b>S1</b>	TIM2_CH2, output compare	PA1	A1
<b>S2</b>	GPIO	PC1	A4
<b>S0</b>	GPIO	PC0	A5
<b>USART2_TX</b>	USART2	PA2	N/A (přes ST-Link do PC)
<b>USART2_RX</b>	USART2	PA3	N/A (přes ST-Link do PC)

Tabulka 2: Pinout mikrokontroleru

### 3 Komunikační rozhraní

Zařízení komunikuje po sběrnici USART, nastavení 115200 baud, 8 datových bitů, jeden stop bit, bez parity. V rámci ST-Linku je přítomen USART<->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 tabu

### 4 Konfigurace

### 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 (TIM2\_CH1), 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  $t_1$  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 předdělíček; je povoleno přerušení, perioda nastavena na 1 ms.

příkaz	funkce	popis
<b>S</b>	Start/Stop	Spustí či zastaví měření s aktuálním nastavením
<b>H</b>	Help	Vypíše seznam rozpoznávaných příkazů
<b>C</b>	Configure	Vstoupí do konfiguračního módu (viz 4)

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

Tabulka 3: Mapování kanálů osciloskopu na signály obvodu pro obrázky 1 a další

## 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 použito stejné mapování kanálů osciloskopu uvedené v tabulce 3. 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  $U_{\text{int}}$  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*.
- Vynucením aktivní (vysoké) úrovně na TIM2\_CH2 připojené na **S1** se připraví mux na připojení referenčního napětí  $U_{\text{ref}}$ .
- Uvedením **S2** do logické nuly se deaktivuje feedback. Tím se připojí na výstup muxu referenční napětí  $U_{\text{ref}}$ .
- Spustí se TIM7 odpočítávající dobu specifikovanou parametrem `soft_start_delay` (v základu 800  $\mu\text{s}$ ).

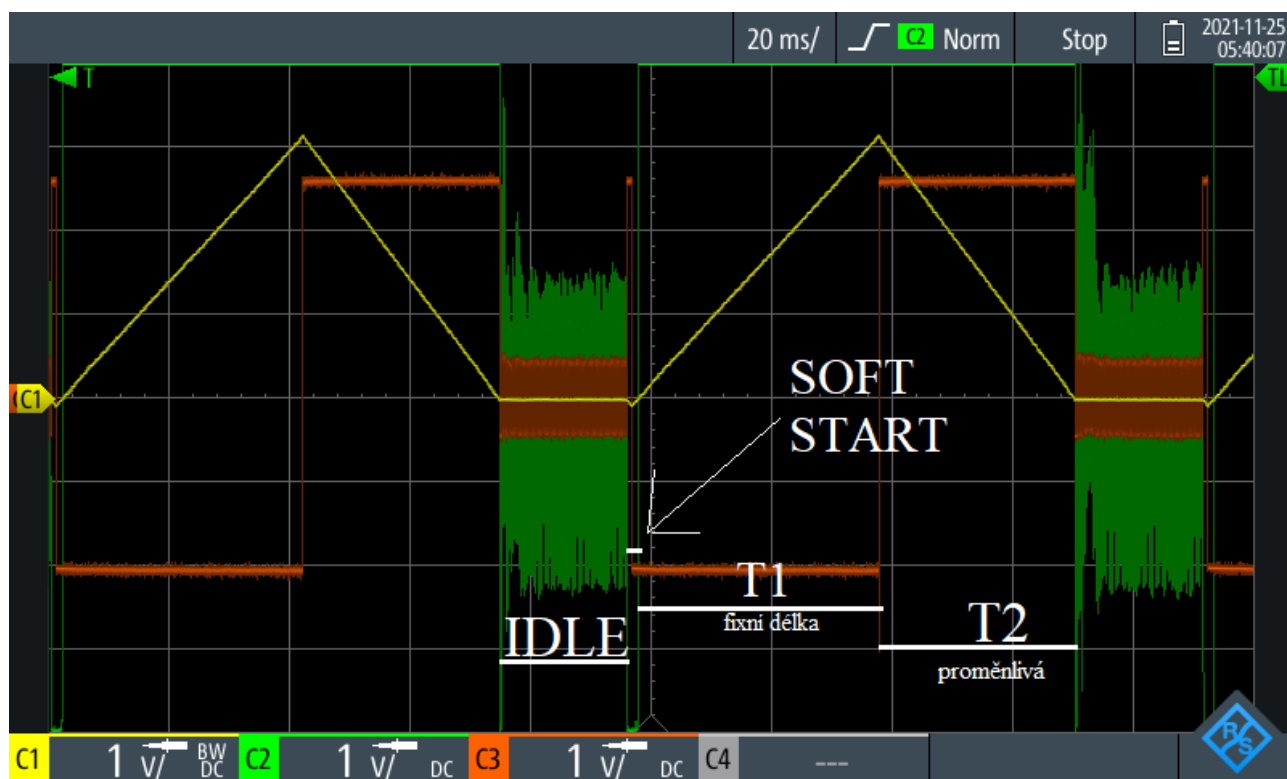
Po uplynutí specifikované doby vyvolá TIM7 přerušení. Protože bylo integrováno kladné napětí, výstup integrátoru je nyní pod nulou a tedy ořezaný signál z komparátoru **MCU\_IN** je v logické nule. V obsluze přerušení:

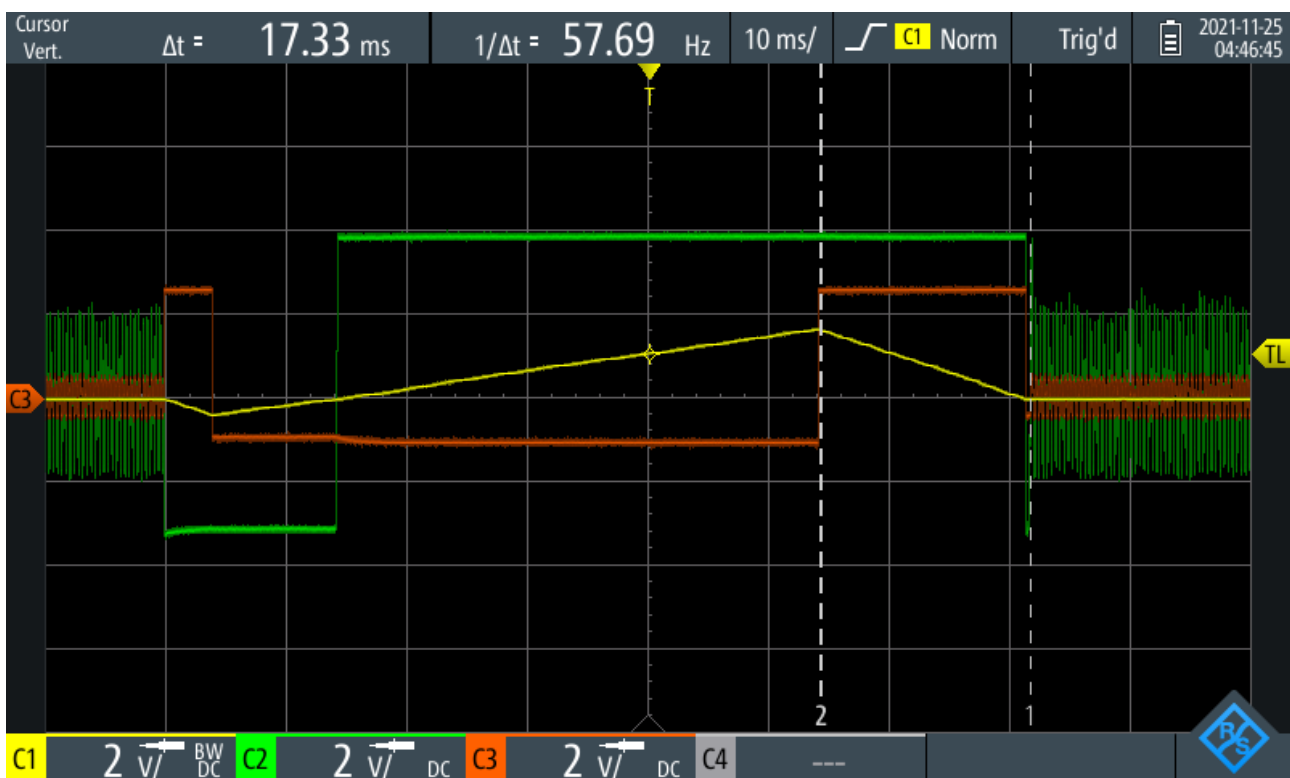
- Software přejde ze stavu *soft start* do stavu *measuring*. Ten není dále dělen, protože toto je poslední zásah ze strany jádra; dále bude zbytek měřicího procesu řídit kompletně hardware periferie TIM2.
- Software vygeneruje update TIM2 (vynulování registru CNT, případně aktualizace preloaded CCRx 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  $U_{\text{in}}$ .

Přepnutím na neznámé záporné napětí začíná výstupní napětí integrátoru růst. V okamžiku průchodu  $U_{\text{int}}$  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  $U_{\text{ref}}$ . Začíná se odměřovat doba  $T_2$  proměnlivé délky. Integrovaním kladného napětí začne poklesat napětí  $U_{\text{int}}$ , 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 do TIM2\_CCR3 a jádro dostane požadavek na přerušení. Protože **MCU\_IN** je po sestupné hraně v logické nule, TIM2 se v týž 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  $U_{\text{int}}$  nulou, tedy platí

$$\text{TIM2\_CCR3} = T_1 + T_2. \quad (5)$$

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  $T_2$

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  $T_1 = 40$  ms.



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