

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Firmware pro měřicí přístroj s mikrořadičem STM32G431

Bc. Petr David

Vedoucí: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **David**

Jméno: **Petr**

Osobní číslo: **420110**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**

Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Firmware pro měřicí přístroj s mikrořadičem STM32G431

Název diplomové práce anglicky:

Firmware for measuring instrument based on microcontroller STM32G431

Pokyny pro vypracování:

V návaznosti na přístroj vyvinutý v rámci DP [1] vytvořte firmware pro mikrořadič STM32G431 tak, aby jej ve spolupráci s PC aplikací Zero eLab Viewer bylo možno využít jako jednoduchý, avšak komplexní měřicí přístroj pro výukové účely. V případě potřeby proveďte nutné úpravy PC aplikace. Přístroj bude zahrnovat funkce osciloskopu i se zobrazením průběhů logických kanálů, dále funkce impulsního a signálového generátoru, čítače a voltmetru se záznamem. Při návrhu firmware můžete též využít vhodné bloky vytvořené v rámci prací [2] a [3]. Výsledný přístroj otestujte a ověřte jeho parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Berlinger, A.: „Implementace přístrojových funkcí mikrořadiči STM32“, diplomová práce ČVUT – FEL, 2016
- [2] Cejp M.: „Virtuální přístroj s mikrořadičem pro analýzu signálu v modulační doméně“, bakalářská práce, ČVUT – FEL, 2017
- [3] Dujava J.: „Softwarově definované osciloskopy s terminálovým rozhraním“, diplomová práce ČVUT – FEL, 2022
- [4] Cejp M.: „Virtuální přístroj s mikrořadičem pro analýzu signálu v modulační doméně“, bakalářská práce, ČVUT – FEL, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **06.09.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2023/2024

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Poděkování

Děkuji ČVUT, že mi je tak dobrou *alma mater*.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 10. května 2023



Abstrakt

Abstrakt v češtině

Klíčová slova: slovo, klíč

Vedoucí: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.



Abstract

Abstract in English

Keywords: word, key

Title translation: Firmware for measuring instrument based on microcontroller STM32G431



Obsah

1 Úvod	1
2 Realizace FW	3
2.1 Rozpoznání frekvence externího krystalu HSE	3
2.2 Využití LL driverů	7
2.3 Core coupled memory CCM SRAM	7
2.4 Realizace funkce Voltmetru	7
2.5 Realizace funkce generátoru	7
2.6 Realizace měření frekvence	7
2.7 Realizace osciloskopu	7
2.8 Logický analyzátor	7
3 Ověření funkčnosti	9

4 Výsledky	11
4.1 wow.....	11
A Rejstřík	13
B Literatura	15
C Zadání práce	17



Obrázky

2.1 Zkreslení průběhu měřeného signálu v důsledku nestability HSI převzato z [2]	3
2.2 Vstupy čítače TIM16	4
2.3 Vyobrazení interního PLL bloku. Převzato z.....	5
2.4 Postup změny zdroje hodinového signálu.....	6



Tabulky

2.1	4
-----------	---



Kapitola 1

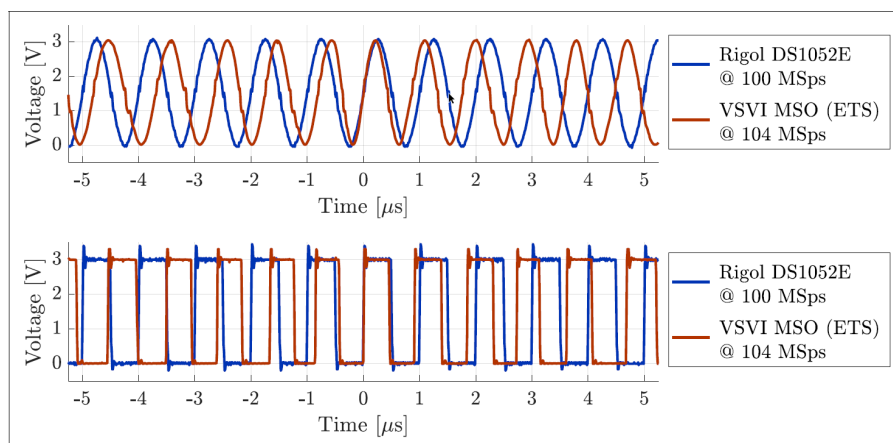
Úvod

Kapitola 2

Realizace FW

2.1 Rozpoznání frekvence externího krystalu HSE

Pro chod mikrokontroléru je zapotřebí zdroj hodinového signálu pro generování systémových hodin (System Core clock) dále jen SYSCLK. Jako základní varianta zdroje hodinového signálu se používá interní vysoko-rychlostní oscilátor (HSI), jehož výstupní frekvence ve srovnání s externími zdroji hodinového signálu vykazuje řádově vyšší nepřesnost a vyšší závislost na změnách teplot viz srovnávací tabulka 2.1. Tento rozdíl je pak obzvláště podstatný při realizaci funkce osciloskopu v režimu vzorkování v ekvivalentním čase (ETS), kde dochází k výraznému zkreslení měřeného signálu viz obrázek 2.1. Na tomto obrázku je zobrazen zkreslený záznam signálu s G431 využívajícím HSI jako zdroj hodinového signálu a druhá stopa je měřena osciloskopem Rigol DS1052E jehož přesnost vzorkovací frekvence je $\pm 0.005\%$ [3]. Z obrázku je zřejmá vhodnost použití zdroje hodinového signálu s vyšší přesností než vykazuje HSI.



Obrázek 2.1: Zkreslení průběhu měřeného signálu v důsledku nestability HSI převzato z [2]

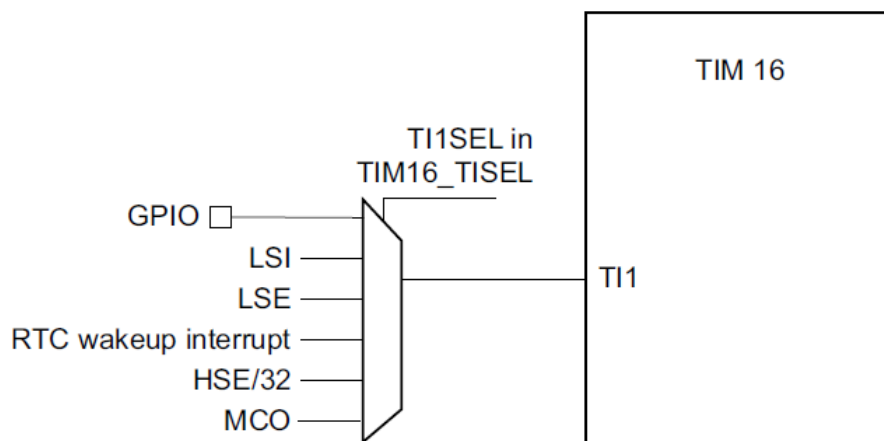
Jako zdroj vysokorychlostního externě získaného hodinového signálu(HSE) lze buď využít krystalu buzeného pomocí MCU(HSE crystal) nebo jiného externího zdroje signálu(HSE bypass). Případný externí signál musí pak splňovat nějaké podmínky a to například pro STM32G431 musí být v rozsahu 4-48MHz a mít střihu 40-60%. Ve výuce laboratorních měření na katedře měření jsou k dispozici krystaly různých výstupních frekvencí převážně pak 8 MHz, 12MHz a 16MHz. Pro účely co nejflexibilnějšího laboratorního přístroje se zdálo účelné naprogramovat firmware pro použití s různými takovými oscilátory. Tedy aby funkce FW nebyla závislá na přítomnosti krystalu ani jeho výstupní frekvenci. Toho bylo docíleno změřením výstupní frekvence oscilátoru a nastavení výsledné frekvence systémových hodin pomocí interního obvodu fázového závěsu(PLL), tak aby výsledná frekvence SYSCCLK nebyla na použitém krystalu závislá.

	Δf	Δ
STM32G431 HSI 16 MHz	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
Adafruit krystal 16 MHz	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.005\%$

Tabulka 2.1:

2.1.1 Měření frekvence HSE

Existují různé způsoby měření frekvence externího hodinového signálu, ale jako nejúčelnější se v tomto případě zdálo použití čítače v režimu "Input capture"(IC) a měřit délku periody externího signálu. Na rodině mikrokontrolérů STM32G4 mají čítače TIM16 a TIM17 možnost interně přivést HSE již se sníženou frekvencí. Frekvence HSE je totiž ještě před přivedením na vstup čítače zpracovaná obvodem, který frekvenci 32krát sníží. Pro tento vstup čítače se sníženou frekvencí se pak používá označení HSE32 jako je vidět na obrázku 2.2 z dokumentace.



Obrázek 2.2: Vstupy dostupné na kanálu číslo 1 čítače TIM16. Převzato z[4]

Měření periody signálu HSE32 probíhá potom tak, že měříme počet cyklů čítače mezi jednotlivými náběžnými hranami nebo sestupnými hranami. Tento počet cyklů nám pak určuje poměr mezi frekvencí externího hodinového signálu na vstupu f_{IN} a hodinového signálu, který pro svůj chod využívá periferie čítače f_{TIM} . Pro správné měření je tedy podstatné, aby interní hodinový signál čítače byl výrazně

vyšší než frekvence na měřeném vstupu. Pro získání přesnějšího odhadu vstupní frekvence můžeme zaznamenat více hodnot po sobě a ty poté zprůměrovat. Frekvence vstupu je poté rovna:

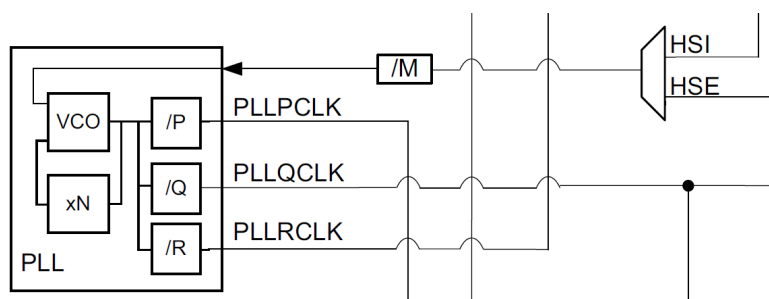
$$f_{IN} = \frac{f_{TIM}}{N_p} \quad (2.1)$$

Pro určení frekvence HSE pak ještě musíme získanou hodnotu vynásobit 32:

$$f_{HSE} = 32 \cdot f_{IN} \quad (2.2)$$

2.1.2 Využití PLL

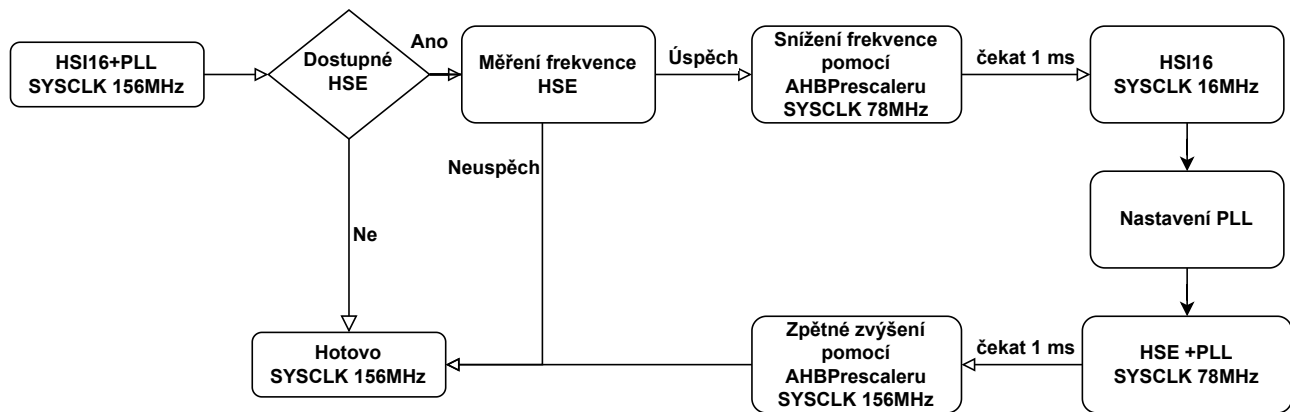
Obvod PLL je další z možných zdrojů hodinového signálu systémových hodin, který má navíc programovatelné dělení a násobení vstupní frekvence. Jako vstup pak lze použít HSI nebo HSE ve stanovené rozsahu. Například 2.66-16MHz pro stm32G431[5]. Dle obrázku 2.3 lze vidět jak vstupní hodinový signál vstupujícího do PLL bloku nejdříve prochází přes děličku signálu M, dále se hodinový signál násobí N a tento signál jde pak na 3 různé výstupy s vlastními děličkami. Dále v kapitole o ADC ukazují výhodu této možnosti více výstupů z obvodu PLL díky které vstupní hodiny ADC nemusí být závislé na frekvenci systémových hodin.



Obrázek 2.3: Vyobrazení interního PLL bloku. Převzato z

2.1.3 Změna zdroje hodinového signálu systémových hodin

Na obrázku 2.4 je popsán postup změny zdroje SYSCLK. Při změně vstupního signálu PLL nelze PLL používat, tedy je nejdříve zapotřebí přepnout systémové hodiny na interní oscilátor 16MHz. Dle doporučení v [4] je při velkých rozdílech frekvencí mezi výstupem PLL (SYSCLK > 80MHz) zapotřebí přidat mezikrok s využitím AHB předděličky hodinového signálu systémových hodin. hodnota předděličky se nastavuje RCC_CFGR registru. Díky tomu například ve svém programu zmenším frekvenci systémových na polovinu tedy 78 MHz a pak až nastavuji jako zdroj HSI146. Doporučená doba setrvání v tomto mezikroku je alespoň 1μs. V mém řešení program čeká 1ms s využitím připravených funkcí obsahujícím čekání v jednotkách ms.



Obrázek 2.4: Postup změny zdroje hodinového signálu

■ 2.2 Využití LL driverů

■ 2.3 Core coupled memory CCM SRAM

■ 2.4 Realizace funkce Voltmetru

■ 2.4.1 Nejistota měření

■ 2.5 Realizace funkce generátoru

■ 2.5.1 Generování signálu

■ Využití CORDIC

■ 2.5.2 Generování šumu

■ 2.6 Realizace měření frekvence

■ 2.6.1 Nejistota měření

■ 2.7 Realizace osciloskopu

■ 2.7.1 Mody měření

■ 2.8 Logický analyzátor



Kapitola 3

Ověření funkčnosti



Kapitola 4

Výsledky



4.1 wow



Příloha A

Rejstřík



A

affine, 7



C

Cardano, 9



E

extrinsic, 9



F

field, 18

free, 18

function, 6



G

Gaussian, 23

Germain, 17



H

holomorphic, 13



I

ideal, 6

isomorphism, 11

L

Leibniz–Poisson, 22

M

matrix, 6

modulus, 20

monoid, 10, 20

N

natural, 21

null, 16

O

open, 11

P

point, 17

positive, 16

prime, 16

S

subset, 13

T

triangle, 23

U

universal, 7

V

von Neumann, 10

Příloha B

Literatura

- [1] Co, I. E. S. Rohs/sony compliance quartz crystal unit specification. [online]. [cit. 2023-04-22].
- [2] DUJAVA, J. Softvérovo definované osciloscipy s terminálovým rozhraním, 2023. [cit. 2023-03-15].
- [3] RIGOL TECHNOLOGIES, I. Datasheetds1000e, ds1000d series digital oscilloscopes. [online], 12 2015. [cit. 2020-04-13].
- [4] STMICROELECTRONICS. Reference manual RM0440 stm32g4 series advanced arm®-based 32-bit mcus. [online], 1 2017. [cit. 2023-04-30].
- [5] STMICROELECTRONICS. *Datasheet DS12589 STM32G431x6 STM32G431x8 STM32G431xB*. Rev 6, 10 2021. [cit. 2023-05-06].

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **David**

Jméno: **Petr**

Osobní číslo: **420110**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**

Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Firmware pro měřicí přístroj s mikrořadičem STM32G431

Název diplomové práce anglicky:

Firmware for measuring instrument based on microcontroller STM32G431

Pokyny pro vypracování:

V návaznosti na přístroj vyvinutý v rámci DP [1] vytvořte firmware pro mikrořadič STM32G431 tak, aby jej ve spolupráci s PC aplikací Zero eLab Viewer bylo možno využít jako jednoduchý, avšak komplexní měřicí přístroj pro výukové účely. V případě potřeby proveďte nutné úpravy PC aplikace. Přístroj bude zahrnovat funkce osciloskopu i se zobrazením průběhů logických kanálů, dále funkce impulsního a signálového generátoru, čítače a voltmetru se záznamem. Při návrhu firmware můžete též využít vhodné bloky vytvořené v rámci prací [2] a [3]. Výsledný přístroj otestujte a ověřte jeho parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Berlinger, A.: „Implementace přístrojových funkcí mikrořadiči STM32“, diplomová práce ČVUT – FEL, 2016
- [2] Cejp M.: „Virtuální přístroj s mikrořadičem pro analýzu signálu v modulační doméně“, bakalářská práce, ČVUT – FEL, 2017
- [3] Dujava J.: „Softwarově definované osciloskopy s terminálovým rozhraním“, diplomová práce ČVUT – FEL, 2022
- [4] Cejp M.: „Virtuální přístroj s mikrořadičem pro analýzu signálu v modulační doméně“, bakalářská práce, ČVUT – FEL, 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **06.09.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2023/2024

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta