

ČVUT v Praze

Prototyp

**Prototyp příložného PID generátoru zpětného rázu pro osobní
palné zbraně**

TJ04000176-V1

Autor:

Ing. Hourová Michaela

Ing. Hejda Jan Ph.D.

Ing. Karavaev Aleksei

Ing. Král Pavel

Ing. Leová Lýdie

Ing. Strunina Svitlana, Ph.D.

doc.Ing. Kutílek Patrik, Ph.D.

Ing. Čubanová Slávka

Mgr. Urzová Jana, Ph.D.

Ing. Příhoda Aleš

Ing. Staněk Martin

Ing. Čuprová Yulia, Ph.D.

Číslo projektu TJ04000176

Identifikační číslo výsledku: TJ04000176-V1

Typ výsledku: Gprot - Prototyp

**Projekt „Simulace reálných silových účinků na střeleckém trenažéru
a vliv na přesnost střelby“ č. TJ04000176 je spolufinancován se státní
podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu ZÉTA 4.“**

Odpovědný pracovník: Ing. Michaela Hourová, (ČVUT v Praze)

PRAHA 04/2022

Jazyk výsledku: CZE

Hlavní obor: JB - Senzory, čidla, měření a regulace

Uplatněn: ANO

Název výsledku česky:

Prototyp příložného PID generátoru zpětného rázu pro osobní palné zbraně

Název výsledku anglicky:

Prototype of attached PID recoil generator for personal firearms

Popis výstupu/výsledku z návrhu projektu TJ04000176 TAČR ZÉTA 2:

Prototyp příložného generátoru zpětného rázu pro osobní palné zbraně je elektromechanický přístroj je složen tří celků, které umožňují měřit charakteristiky palné zbraně, střelce při střelbě a simulovat pohyb makety zbraně během výstřelu, která může být součástí trenažérů střelby, kterým dodá reálný zpětný ráz při výstřelu z makety zbraně. Zařízení umožňuje záznam zpětného rázu a generování zpětného rázu. Zařízení nabízí on-line a off-line datové vstupy a výstupy umožňující hodnocení vlivu zpětného rázu na střelbu v reálném čase i retrospektivně ze záznamu.

Abstrakt k výsledku česky:

Prototyp, který je elektromechanický přístroj složený ze tří celků, které umožňují měřit charakteristiky palné zbraně, střelce při střelbě a simulovat pohyb makety zbraně během výstřelu, která může být součástí trenažérů střelby, kterým dodá reálný zpětný ráz při výstřelu z makety zbraně. Zařízení umožňuje záznam zpětného rázu a generování zpětného rázu. Zařízení nabízí on-line a off-line datové vstupy a výstupy umožňující hodnocení vlivu zpětného rázu na střelbu v reálném čase i retrospektivně ze záznamu.

Abstrakt k výsledku anglicky:

The prototype is an electromechanical device consisting of three parts which allows measuring the charastics of the firearm, the shooter during firing and simulates the movement of the model of the weapon during the shot, which can be part of the shooting simulators to give a real recoil. The device allows the recording of recoil and the generation of recoil. The device offers on-line and off-line data inputs and outputs enabling the evaluation of the effect of recoil on shooting in real time and retrospectively from the recording.

Klíčová slova česky:

střelba, zpětný ráz, pohyb, ruční zbraň

Klíčová slova anglicky:

fire, recoil, movement, firearm

Vlastník výsledku:

České vysoké učení technické v Praze (IČO 68407700) - 100%,

Lokalizace: České vysoké učení technické v Praze

Licence: Ano

Licenční poplatek: Ne

Ekonomické parametry:

Trh obsahuje pouze monitory záznamu základních charakteristik pohybu zbraně a střela během střelby, ale neumožňují souběžný monitoring pohybových a silových dat a jejich zpracování a využití k simulaci střelby ze skutečné zbraně. Realizace se zaměřuje na strukturu zařízení optimalizované pro měření charakteristik skutečné střelby a simulaci střelby z makety zbraně. Tímto umožňuje začátečníkům výcviku střelby získat povědomí o střelbě ze skutečných zbraní a hodnotit chování střelce během střelby. Zařízení nabízí záznam chování zbraně/makety zbraně a střelce v reálném čase a datové vstupy a výstupy umožňuje určit a hodnotit charakteristiky střelby. Obdobné zařízení není jako celek na trhu dostupné. Ekonomické přínosy vyplývají z možnosti nejen simulace střelby, ale především měření chování zbraně a střelce, což vede zkrácení či optimalizaci výcviku střelby, a tímto zvýšení bezpečnosti střelby.

Kategorie nákladů: výše nákladů \leq 4 mil. Kč.

OBSAH

1. OBECNÉ INFORMACE K HARDWARE	8
1.1. POPIS STRUKTURY SYSTÉMU	8
1.2. KOMUNIKACE MEZI KOMPONENTAMI HW	9
1.3. CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO PC	11
1.4. GYROAKCELEROMETRYCKÝ PODSYSTÉM	12
1.5. TENZOMETRYCKÝ PODSYSTÉM	13
1.6. ZBRAŇ TRENAŽÉRU	14
2. PODSYSTÉM PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU	16
2.1. CHARAKTERISTIKY PODSYSTÉMU MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU	16
2.2. UKOTVENÍ ZBRANĚ V PODSYSTÉMU PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU	19
2.3. REALIZOVANÉ ŘEŠENÍ	20
2.3.1. KONSTRUKCE PODSYSTÉMU ZPĚTNÉHO RÁZU	20
2.3.2. UKOTVENÍ ZBRANĚ V APARATUŘE PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU	21
2.3.3. STRUKTURA REALIZOVANÉHO PODSYSTÉMU	22
3. PODSYSTÉM PRO REGULACI ZPĚTNÉHO RÁZU	23
3.1. ZÁKLADNÍ PRINCIP GENEROVÁNÍ ZPĚTNÉHO RÁZU	23
3.1.1. TRANZISTORY	24
3.1.2. CÍVKY	25
3.1.3. POUŽITÉ AKUMULÁTORY	28
3.1.4. PŘÍLOŽNÉ ZAŘÍZENÍ NA ZBRANI	35
3.2. REALIZACE ŘEŠENÍ	36
3.2.1. PODSYSTÉM GENERÁTORU ZPĚTNÉHO RÁZU	36
3.2.2. PŘÍLOŽNÉ ZAŘÍZENÍ NA ZBRANI	38
3.2.3. APLIKACE HW V PRAXI	39
4. PODSYSTÉM PRO MĚŘENÍ POSTURÁLNÍ STABILITY	40
4.1. CHARAKTERISTIKA ZAŘÍZENÍ	40
4.2. DOPORUČENÁ APLIKACE PRO MĚŘENÍ	42
ZDROJE	46
PŘÍLOHY	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. V praxi otestovaný model systému popisuje využití 3 snímačů zrychlení (AKCELEROMETR) a 3 snímačů síly (TENZOMETR). Senzor 7 je kombinací snímačů a ovladačů, viz kap. PID generátor zpětného rázu

Obr. 2. Velikostně optimalizované plošné spoje datasběrné platformy senzorů pro USB rozhraní kompatibilních s mikroBUS sběrnici (MikroElektronika, 2015)

Obr. 3. Architektura senzorů ASM330LHH využitých ve struktuře navrženého systému (STMicroelectronics, 2020)

Obr. 4. Moduly osazených čipů od výrobce (MikroElektronika, 2022)

Obr. 5. Použitý tenzometr OKY3480-1 a schéma zapojení vodičů.

Obr. 6. Schéma zbraně SA vz. 58 se sklopnou pažbou.

Obr. 7. Schéma bočního pohledu zbraně SA vz. 58 se sklopnou pažbou.

Obr. 8. Ukázka použité airsoftové zbraně SA vz. 58 (vlevo) (ARES) a reálné SA vz. 58 s pevnou i sklopnou pažbou (CZ 858 TACTICAL) (vpravo)

Obr. 9. Schéma zařízení pro měření zpětného rázu.

Obr. 10. Navržené a použité pouzdro pro ukotvení pažby

Obr. 11. Navržené a použité pouzdro pro ukotvení hlavně

Obr. 12. Podsystem měření zpětného rázu s ukotvenou zbraní a příložným zařízením

Obr. 13. Horní pohled na realizaci podsystemu měření zpětného rázu s ukotvenou zbraní a příložným zařízením

Obr. 14. Realizace úchyty hlavně testovací zbraně s příložným zařízením v aparatuře pro měření zpětného rázu.

Obr. 15. Vytvořené úchyty pažby testovací zbraně v aparatuře pro měření zpětného rázu.

Obr. 16. Realizace hardware pro testování generátoru zpětného rázu.

Obr. 17. Diagram realizace zpětného rázu pomocí 2 cívek.

Obr. 18. Schéma zapojení ovladače cívek s tranzistorem DAMI500N60.

Obr. 19. Schéma zapojení řídicího MCU STM32F446RET6 senzoru 7, který přijímá parametry pro řízení cívek, ovládá ovladač cívek, čte data na AIN

Obr. 20. Zapojení jednotlivých vrstev vinutí cívky 52,19 mΩ pro max. proud 480 A.

Obr. 21. Zapojení jednotlivých vrstev vinutí cívky 33,16 mΩ pro max. proud 760 A

Obr. 22. Schéma rozměrových parametrů cívky, kde R je poloměr cívky, l je délka cívky a š je vinutí cívky.

Obr. 23. Víko přístrojové skříně ovladače cívek.

Obr. 24. Schéma zapojení komunikačního modulu ESP32 senzoru 7, který komunikuje s PC skrze Wi-Fi 2,4 GHz.

- Obr. 25. Schéma finálního příložného zařízení.
- Obr. 26. Generátor zpětného rázu uzavřený
- Obr. 27. Generátor zpětného rázu otevřený.
- Obr. 28. Propojení nabíjecích obvodů.
- Obr. 29. Příložné zařízení na zbraní.
- Obr. 30. Ukázka použití generátoru zpětného rázu v aparatuře pro měření zpětného rázu.
- Obr. 31. Ukázka použití generátoru zpětného rázu v aparatuře při střelbě uživatelem
- Obr. 32. Zkonstruované gyroakcelerometrické senzory: Senzor pro měření posturální stability A a Senzor pro měření posturální stability B.
- Obr. 33. Komponenty pro měření posturální stability a pohybových aktivit střelce umístěné v přepravním kufru
- Obr. 34. Umístění Senzoru pro měření pohybových aktivit střelce v bederní oblasti
- Obr. 35. Umístění USB HUB v bederní oblasti na pásku
- Obr. 36. Umístění Senzoru měření posturální stability B na zbraní.
- Obr. 37. Ukázka zapojení celé soustavy pro měření posturální soustavy a chování střelce a zbraně během střelby.
- Obr. 38. Ukázka zapojení celé soustavy pro měření posturální soustavy a chování střelce a zbraně při střelbě na střelnici reálnou zbraní.

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1. Přehled rychlostí a kontroly dat testovaných komunikačních rozhraní.
- Tab. 2. Náklady pro realizaci jednotlivých rozhraní na straně senzorů.
- Tab. 3. Náklady pro realizaci jednotlivých rozhraní PC - senzor.
- Tab. 4. Minimální požadavky na PC pro tvorbu požadovaného lokálního datového serveru.
- Tab.5. Parametry použitých tenzometrů (Shenzhen Okystar Technology, 2017)
- Tab. 6. Porovnání základních rozměrů použité airsoftové zbraně a skutečné zbraně (dle armyweb.cz)
- Tab. 7. Rozměry komponent konstrukce pro měření zpětného rázu.
- Tab. 8. Parametry tranzistoru DAMI500N60 (DACO SEMICONDUCTOR, 2017)
- Tab. 9. Přehled připojených pinů MCU STM32F446RET6 a funkcí jednotlivých pinů MCU.
- Tab. 10 Parametry použitých akumulátorů.
- Tab. 11. Délky a odpory jednotlivých vinutí.
- Tab. 12 Parametry drátu 1032112047 SYNFLEX pro výrobu cívek.

Tab. 13. Parametry použité cívky.

Tab. 14: Přehled měřených ocelových válců.

Tab. 15. Přehled parametrů kabelových přívodů.

Tab. 16 Popisy komponent pro Obr. 26 a 27.

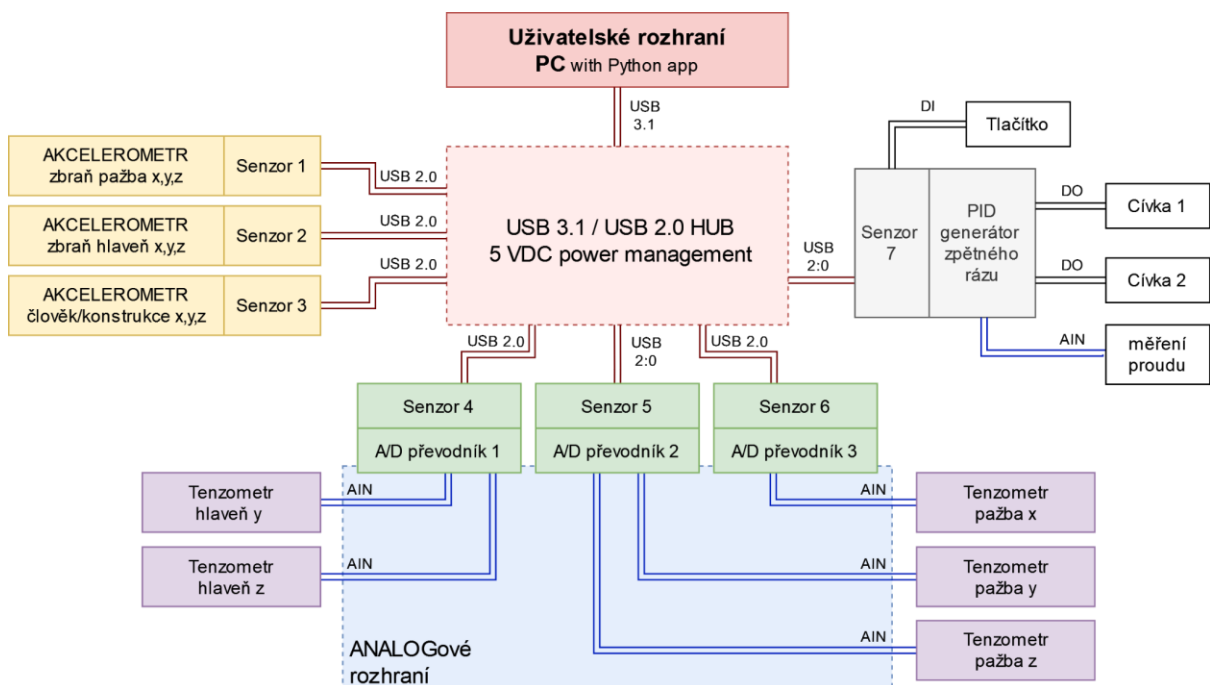
1. OBECNÉ INFORMACE K HARDWARE

1.1. POPIS STRUKTURY SYSTÉMU

Systém pro záznam chování zbraně, střelce a modelování zpětného rázu využívá kombinaci senzorů vyvinutých v projektu Simulace reálných silových účinků na střeleckém trenážeru a vliv na přesnost střelby.

Vytvořený a otestovaný model v praxi (Obr. 1) popisuje aplikaci 3 senzorů měřící zrychlení v trojdimenzionálním systému (Obr. 1, Senzor 1,2,3), dále AKCELEROMETR, a 3 senzorů měřící síly, dále TENZOMETR, s A/D převodníky (Obr. 1, Senzor 4,5,6). Sensory typu AKCELEROMETR a A/D převodník, uvedené v diagramu (Obr. 1), jsou popsány ve zprávě z etapy 2020.

Všechny výše zmíněné senzory jsou připojeny pomocí USB 2.0 rozhraní. Uživatelské rozhraní pro reprezentaci naměřených dat v reálném čase je připojeno pomocí USB 3.1.



Obr. 1. V praxi otestovaný model systému popisuje využití 3 snímačů zrychlení (AKCELEROMETR) a 3 snímačů síly (TENZOMETR). Senzor 7 je kombinací snímačů a ovladačů, viz kap. PID generátor zpětného rázu

Datový server, realizovaný pro laptop PC zařízení, zajišťuje:

- komunikaci se senzory,
- sběr dat,
- konfiguraci senzorů a jejich synchronizaci,
- úpravu dat pro jejich dlouhodobé uložení v textové podobě.

Aplikace systému pro záznam chování zbraně, střelce a modelování zpětného rázu využívá více procesorových jader tak, aby počítač v reálném čase s latencí pod 100 ms umožňoval:

- stahovat data skrze USB3 rozhraní a ukládat,
- vizualizovat data,
- ukládat data na HDD,
- zpracovávat data.

1.2. KOMUNIKACE MEZI KOMPONENTAMI HW

Pro komunikaci mezi generátorem a senzory byla testována tato komunikační rozhraní: bezdrátová, ethernet, USB. Všechna rozhraní poskytovala data v dostačujícím čase a kvalitě (Tab. 1). Ze zmíněných rozhraní (Tab. 1) bylo pro komunikaci mezi senzory a generátorem zvoleno USB 2.0 rozhraní. Řídící jednotka generátoru zpětného rázu navíc umožňuje připojení skrze Wi-Fi rozhraní kvůli elektrotechnické bezpečnosti.

Tab. 1. Přehled rychlostí a kontroly dat testovaných komunikačních rozhraní.

Rozhraní	Doba poslání synchronizační zprávy [ms]	Rychlost přenosu [Mbit/s]	TCP
Wi-Fi 2.4 GHz	1 - 100	574	WPA, CRC, handshake
fast ETHERNET	řády desetin	100	16-bit CRC three-way handshake
giga ETHERNET	řády desetin	1000	
USB 2.0	řády desetin	480	5 to 32-bit CRC three-way handshake
USB 3.1	řády desetin	5000	

USB 2.0 rozhraní bylo zvoleno z důvodů:

- nižších nákladů (Tab. 2, Tab. 3 posilují min. cenové náklady k r.2022),

- menších plošných spojů (Obr. 2),
- krátkému komunikačnímu zpoždění (Tab. 1)
- dalšího ICT vybavení pro vytvoření sběrnic a propojení HW.

Tab. 2. Náklady pro realizaci jednotlivých rozhraní na straně senzorů.

Rozhraní	Dodatečný HW	Cena za kus HW	Cena celkem
Wi-Fi	ESP32 + anténa	200 CZK	1400 CZK
ETHERNET	ESP32 + RJ45 a POE	200 CZK	1400 CZK
USB	Micro USB B konektor	20 CZK	140 CZK

Tab. 3. Náklady pro realizaci jednotlivých rozhraní PC - senzor.

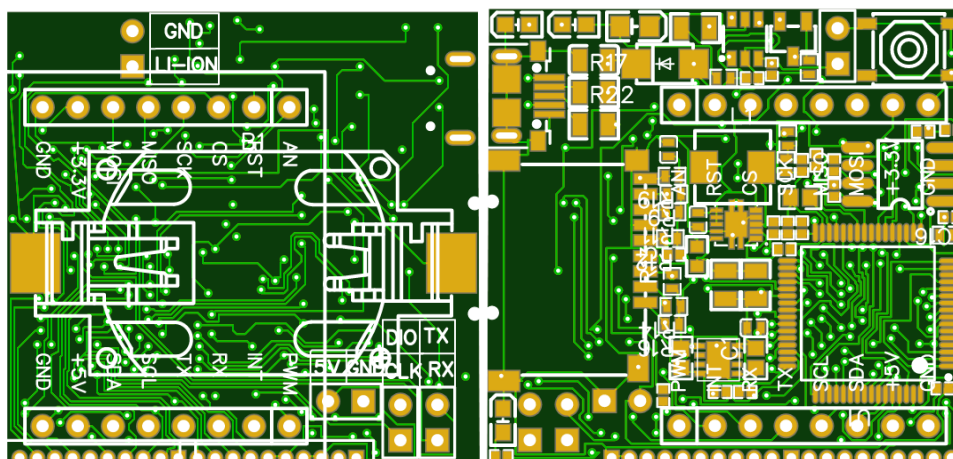
Rozhraní	Dodatečný HW	Cena ICT
Wi-Fi	router s Wi-Fi rozhraním	1000 CZK
ETHERNET	switch a kabely	200 CZK
USB	HUB a kabely	1000 CZK

Během testování rychlosti přenosu dat se významně projevil vliv karty bezdrátového Wi-Fi připojení. Při poklesu rychlosti vzrostla opakující se chybovost komunikace vedoucí k poklesu rychlosti přenosu dat a následné ztráty spojení. Celkem je v systému pro modelování zpětného rázu propojeno 7 zařízení (Obr. 1, Senzor 1-7) s celkovým datovým tokem (bit rate) BR = 2,56 Mbit/s, což představuje zápis HDD v podobě CSV souborů BR=29,4 Mbit/s.

Výhoda použití USB 3.0 je v převodu USB 2.0 High Speed na USB 3.0 Super Speed. Je tedy možné pomocí USB rozhraní připojit všech 7 senzorů skrze USB 2.0 na jedno USB 3.1 nebo novější.

V (Tab. 1) je u USB 2.0 dostatečná rychlost pro připojení všech 7 senzorů skrze rozhraní USB 2.0. Testování v praxi však narazilo na nedodržování kvality kabelů u USB 2.x rozhraní a na trhu je množství USB 2 rozbočovačů, které nestíhají data přenášet, např. testované USB 2.0 hub HAMA, PRIVILEG, UNITEK, ESPERANZA.

Finální použitý a testovaný HW je USB rozbočovač UA0295 LOGILINK, krátké Gembird USB A Male / Micro B Male kabely a jeden 5 m dlouhý USB 3.0 kabel se zesilovačem pro propojení rozbočovače a PC. V PŘÍLOZE 1 je optimalizované zapojení elektrických obvodů datasběrné platformy senzorů pro USB rozhraní.



Obr. 2. Velikostně optimalizované plošné spoje datasběrné platformy senzorů pro USB rozhraní kompatibilních s mikroBUS sběrnici (MikroElektronika, 2015)

1.3. CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO PC

Systém je připojen na lokální datový server, který je vytvořen pomocí přenosného PC typu laptop s procesorem i5 a 8GB RAM (ověřeno na Dell Latitude 3510). Počítač byl vybrán na základě testů výkonu, jako nejmenší možná konfigurace HW (Tab. 4) zajišťující získání dat v reálném čase.

Tab. 4. Minimální požadavky na PC pro tvorbu požadovaného lokálního datového serveru.

Komponenta	Název
CPU	Intel Core i5 10210U Comet Lake
Monitor	15.6" IPS 1920x1080
Operační paměť	8GB DDR4 (2,67 GHz)
GPU	Intel UHD Graphics
Pevný disk	SSD 256GB M.2 (R/W 1000 MB/s)
Rozhraní	USB 3.2 Gen 1, USB-C

Koncem roku 2021 byly na trhu nejlevnější dostupné kompatibilní notebooky splňující minimální požadavky (Tab. 4.):

- HP Pavilion Gaming 15-dk1900nc,
- HP Pavilion Gaming 16-a0902nc,
- Acer Nitro 5 Obsidian Black,
- HP 17-cn0008nc Natural silver,

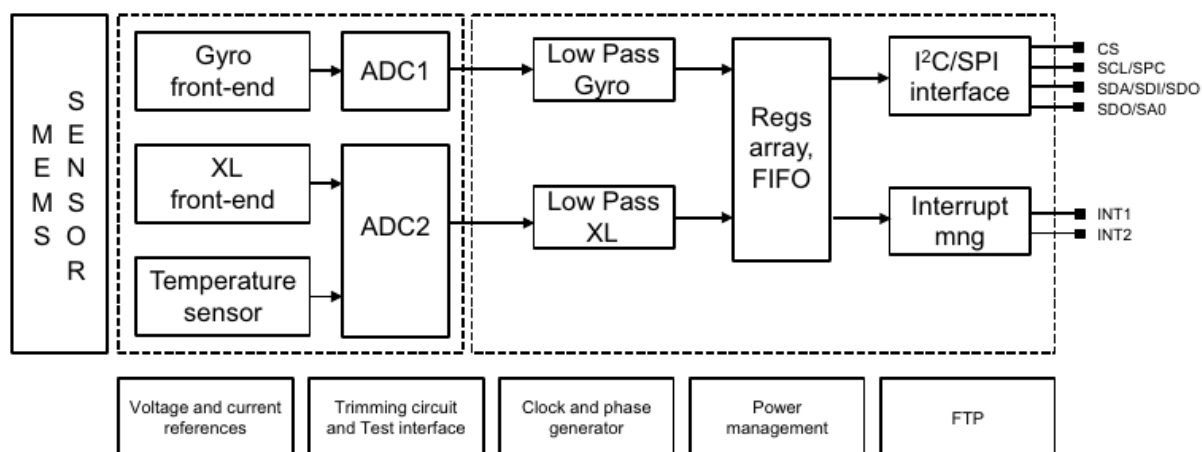
dostupné v průměrné ceně za 26 000 CZK s DPH (k roku 2021). Tato konfigurace se jeví jako vhodná a je doporučena.

1.4. GYROAKCELEROMETRYCKÝ PODSYSTÉM

Základem senzorů pro měření posturální stability a zpětného rázu je čip ASM330LHH, který integruje 3D digitální akcelerometr a gyroskop. Snímač je certifikován podle AEC-Q100, má rozšířený rozsah teplot od -40 do 105 °C a vestavěný kompenzátor vlivu teploty.

1. Akcelerometr s uživatelsky volitelným rozlišením do $\pm 16g$
2. Gyroskopický rozsah od ± 125 do ± 4000 dps
3. Rozhraní SPI a I2C
4. Programovatelné přerušení
5. 3K FIFO

Architektura senzoru je v (Obr. 3) a moduly osazených čipu a periferních obvodů jsou v (Obr. 4.) Moduly byly vybrány pro svoji velikost a dostupnost. Datasběrná platforma byla vyvinuta kompatibilní s mikroBUS sběrnici (MikroElektronika, 2015).



Obr. 3. Architektura senzorů ASM330LHH využitých ve struktuře navrženého systému (STMicroelectronics, 2020)



Obr. 4. Moduly osazených čipů od výrobce (MikroElektronika, 2022)

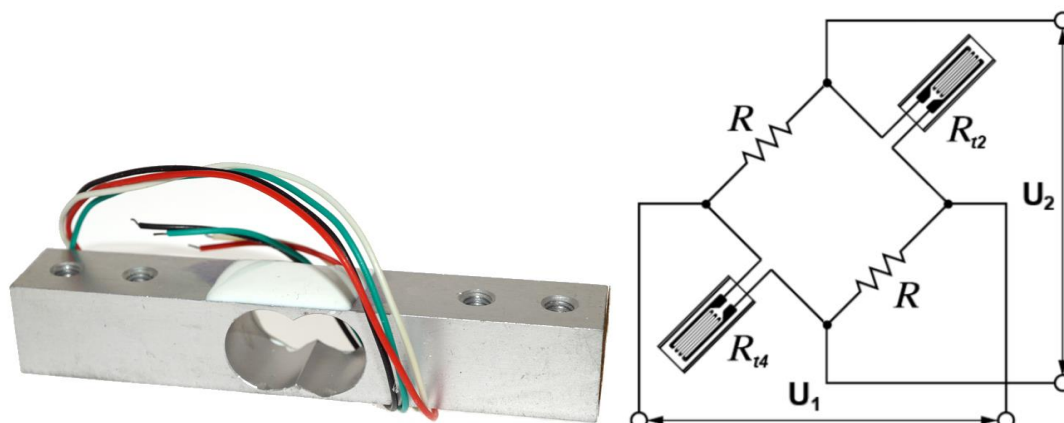
1.5. TENZOMETRYCKÝ PODSYSTÉM

Pro měření působení sil v rámci navrženého pod systému záznamu silových účinků byly vybrány kalibrované vážní snímače hmotnosti fungující na principu tenzometrických snímačů síly, které převádí mechanickou veličinu vektoru síly na elektrickou veličinu napětí. Převod se děje prostřednictvím tenzometrických známek (strain gauges), které jsou nalepeny na těle snímače. Známky mění odpor při změně svojí délky. Zapojení známek je ve schématu níže (Obr. 5).

Ke snímači vedou většinou čtyři vodiče, dva napájecí a dva signálové, viz. (Obr. 5) Signál ze snímačů je vyjádřen v milivoltech na Volt (mV/V). V (Tab. 5) jsou popsány parametry použitých tenzometrů.

Tab. 5. Parametry použitých tenzometrů (Shenzhen Okystar Technology, 2017)

1.	typové označení snímače	OKY3480-1
2.	rozsah měření	(0-10) kg
3.	rozsah výstupu	(1.0±0.15) mV/V
4.	chyba nuly	±0.1 mV/V
5.	napájecí vodiče (U ₂)	červená (+), černá (zem)
6.	impedance napájecí	1115 Ω ±10%
7.	napájení napětí	3-12 V DC
8.	měřicí vodiče (U ₁)	zelená, bílá
9.	impedance na výstupu	1000 Ω ±10%
10.	rozměry	(80x13x12) mm
11.	hmotnost	30 g

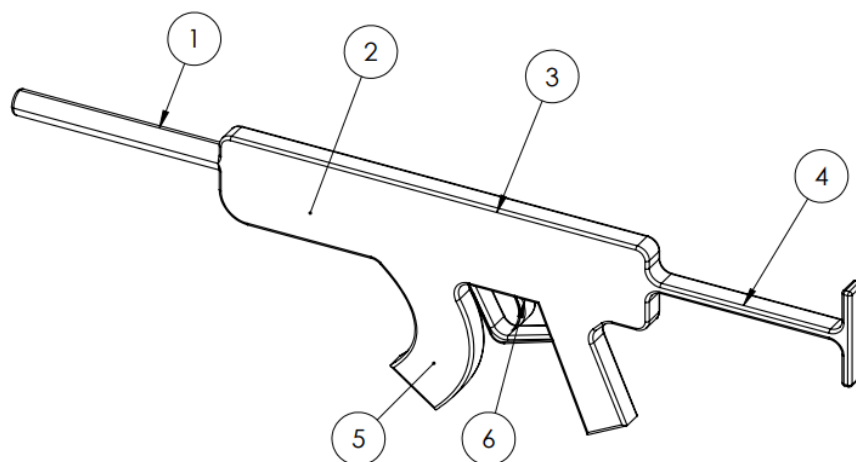


Obr. 5. Použitý tenzometr OKY3480-1 a schéma zapojení vodičů.

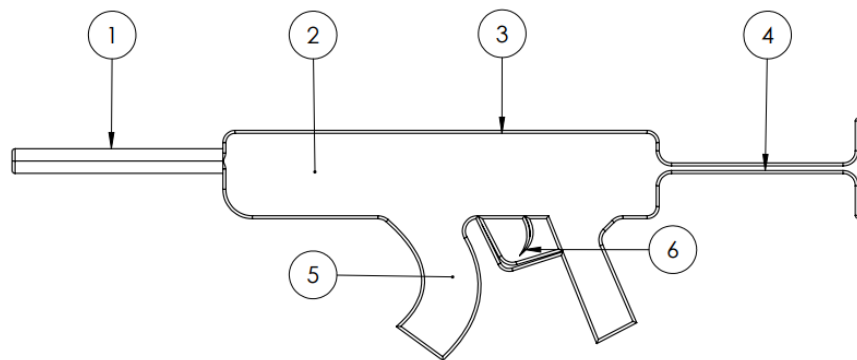
Tenzometrické snímače jsou připojeny k desce plošných spojů (DPS) s AFE čipem ADS1292. DPS je navržena v kompatibilitě s mikroBUS sběrnici (MikroElektronika, 2015) a připojena k datasběrné platformě senzorů pro USB rozhraní (Obr. 2).

1.6. ZBRAŇ TRENAŽÉRU

Na (Obr. 6, 7) je zobrazeno konstrukční schéma zbraně SA vz.58, která byla zvolena jako základ pro prototyp. Pro účely vývoje, testování a finalizaci zařízení byla použita airsoftová zbraň se sklopnou pažbou, u níž výrobce zaručoval zachování rozměrů originálu zbraně (Obr. 8). Rozměry byly pro kontrolu porovnány, aby bylo dosaženo základní věrohodnosti (Tab. 6) a bylo zjištěno, že v základních rozměrech důležitých pro naše měření docházelo pouze k odchylce v délce zbraně o velikosti 15 mm, jež bylo považováno za zanedbatelné. Na základě znalosti přesných rozměrů zbraně bylo možné navrhnout a sestavit aparaturu pro měření zpětného rázu a pouzder na předpažbí a pažbu. Originální zbraň váží $m_{original} = 3,1$ kg a námi použitá airsoftová zbraň $m_{airsoft} = 3,097$ kg. Tato airsoftová zbraň je použita ve vytvořeném prototypu.



Obr. 6. Schéma zbraně SA vz. 58 se sklopnou pažbou. Hlavní části jsou: 1 - hlaveň 2 - předpažbí 3 - tělo zbraně 4 - pažba 5 - spoušť 6 - zásobník.



Obr. 7. Schéma bočního pohledu zbraně SA vz. 58 se sklopnou pažbou. Hlavní části jsou: **1** - hlaveň **2** - předpažbí **3** - tělo zbraně **4** - pažba **5** - spoušť **6** - zásobník.



Obr. 8. Ukázka použité airsoftové zbraně SA vz. 58 (vlevo) (ARES) a reálné SA vz. 58 s pevnou i sklopnou pažbou (CZ 858 TACTICAL) (vpravo)

Tab. 6. Porovnání základních rozměrů použité airsoftové zbraně a skutečné zbraně (dle armyweb.cz)

Název komponenty	Airsoftová zbraň [mm]	Skutečná zbraň [mm]
délka zbraně	860	845
délka pažby	235	235
šířka zbraně	570	570
výška zbraně (se zásobníkem)	255	255

Pro všechna měření zpětného rázu prezentovaná je použita a navržena střelná zbraň SA vz. 58. ráže 7,62mm se sklopnou kovovou ramenní opěrou. Zbraň měla nenabitou hmotnost 3100g, po nabytí 10ti náboji zbraň vážila okolo 3250g (1 náboj 15g) (naboje.org). Celková délka zbrani byla 845 mm a výška zbraně se zásobníkem (5) na 30 nábojů byla 255 mm. Střelivo použité pro všechna měření byly náboje 7,62 x 39 vz.43 (dle mocr.army.cz).

Airsoftová zbraň SA vz. 58 byla upraven tak, aby byla zachována hmotnost reálné zbraně oproti hmotnosti airsoftové zbraně s příloženými částmi generátoru zpětného rázu.

2. PODSYSTÉM PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

2.1. CHARAKTERISTIKY PODSYSTÉMU MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

Hlavním cílem bylo vytvořit jednoduchou mobilní střeleckou stolicí (zařízení), kterou lze použít k měření zpětného rázu dlouhých palných ručních zbraních. Podsyntém splňuje tyto požadavky na zařízení pro měření zpětného rázu:

- **Pohyb zbraně ve všech směrech**

Toto zařízení umožňuje pohyb zbraně ve všech směrech (horizontální, vertikální), neboť se zbraň při výstřelu může pohybovat ve všech směrech v závislosti na technice střelce a jeho postoji. Z toho důvodu je zbraň pomocí pouzder připevněna na sadu pružin.

- **Odolná konstrukce**

Zařízení se skládá především z odolných materiálů, aby nedošlo během měření k poškození zařízení či ohrožení na životě a zdraví osob. Vhodné materiály pro výrobu konstrukce jsou takové, které jsou kombinací pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi.

- **Přenosnost zařízení**

Zařízení zajišťuje přesnou střelbu zafixováním zbraně pro účel střelby

- **Export dat do přenosného zařízení (např. přenosný počítač)**

Zařízení zajišťuje přenos dat o chování zbraně během střelby do přenosného PC

- **Bezpečnost**

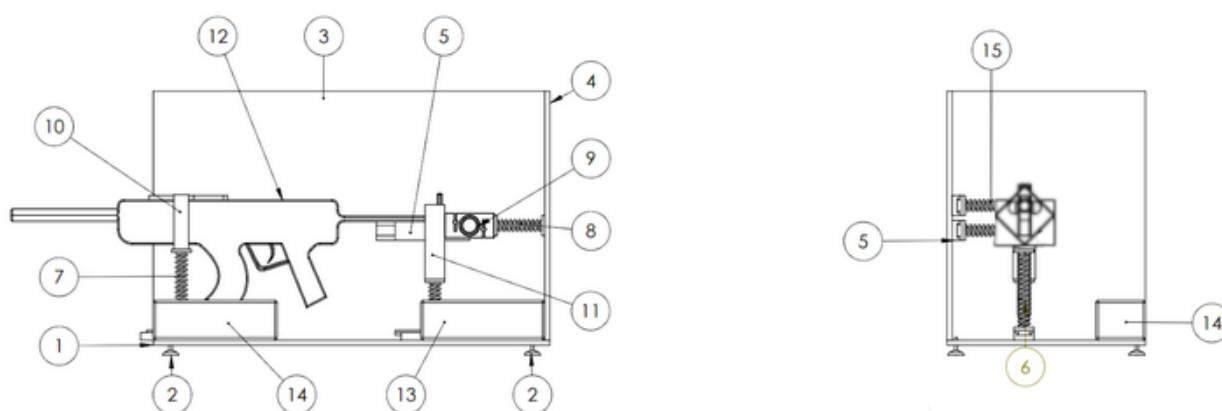
Bezpečnost je zajištěna tím, že zbraň je zajištěna vzadu a vepředu v pouzdře, které udržuje hlaveň namířenou před sebe.

Konstrukce zařízení pro měření zpětného rázu (Obr. 9) se skládá z podstavce a dvou stěn (dále boční a stěny), které tvoří základnu konstrukce. Základna je z pevnostní slitiny hliníku AW-6082 T6 - AlMgSi1 F28/F31/F32. Právě kvůli užitným vlastnostem, jako je kombinace pevnosti, hmotnosti a odolnosti proti korozi, byla zvolena tato slitina, jako nejvhodnější materiál pro konstrukci základny. Rozměry základny jsou (d x š x v) 82 x 43 x 30 cm. Součástí základny jsou čtyři lineární pojezdy, které umožňují zbrani volný pohyb v horizontálním směru.

Dalším konstrukčním prvkem zařízení jsou měřicí moduly zpětného rázu. V celé konstrukci se nachází celkem 5 modulů, které tvoří sady pružin a tenzometrů, kdy 1 je orientován v x-ové ose, 2 jsou orientovány v y-ové ose a 2 jsou orientovány z-ové ose (Obr. 9, bod 6,7,8). Moduly jsou ke konstrukci připevněny k lineárním pojezdům, které jsou součástí základny konstrukce.

Zbraň je ke konstrukci ukotvena prostřednictvím speciálních pouzder tvarovaných podle těla a pažby zbraně (Obr. 9, 10) tak, aby zbraň v pouzdrech držela pevně a nevznikaly mechanické rázy mezi pouzdrem a tělem zbraně, které by zkreslovaly výsledky měření. Vzhledem k složitému tvaru zbraně, jsou tato pouzdra vyrobena na míru pomocí 3D tisku. Pouzdro na předpažbí (Obr. 11) je tvořeno dvěma částmi, které se složí kolem předpažbí zbraně. Pouzdro na pažbu (Obr. 10) se skládá ze dvou samostatných kusů, které se do sebe zasouvají. Vnitřek pouzdra pažby je vytvářen podle sklopné pažby zbraně. Obě pouzdra jsou zasunuta do tzv. úchytů (Obr. 9, bod 10,11) vyrobených ze slitiny hliníku AW 6060 T66 se silou stěny 5 mm, které jsou připevněné k měřícím modulům zpětného rázu.

V Obr. 9 je zobrazen technický výkres zařízení pro měření zpětného rázu. Rozměry jednotlivých komponent zařízení jsou definovány v (Tab. 7).



Obr. 9. Schéma zařízení pro měření zpětného rázu. 1 - podstavec, 2 - nastavitelné nohy, 3 - boční stěna konstrukce, 4 - zadní stěna konstrukce, 5 - lineární pojezd v ose Z, 6 a 7 - pružiny v ose X, 8 - pružina v ose Z, 9 - tenzometr v ose Z, 10 - úchyt pouzdra předpažbí, 11 - úchyt pouzdra pažby, 12 - maketa zbraně vz. SA58, 13 - polypropylenový box s napájecími obvody a

akumulátory, **14** - polypropylenový box s elektronikou a USB rozbočovačem, **15** - pružina v ose y

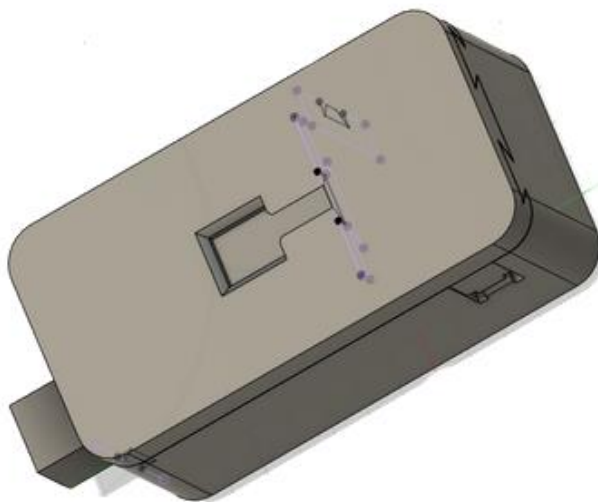
Tab. 7. Rozměry komponent konstrukce pro měření zpětného rázu.

Číslo	Název komponenty	Rozměry [cm]				počet závitů
		délka	šířka	výška	průměr	
1	podstavec	82	43	x	x	x
2	nastavitelné noha	3,7	x	x	x	x
3	boční stěna	82	x	30	x	x
4	zadní stěna konstrukce	41	30	x	x	x
5	lineární pojezd tenzometru v ose z senzoru	18	4,84	x	x	x
6	lineární pojezd tenzometru v ose y senzoru	18	4,84	x	x	x
7	pružina v ose y	x	x	x	2,5	10
8	pružina v ose x	x	x	x	2,5	10
9	tenzometr	7,5	1,92	5,3	x	x
10	úchyt pro tělo zbraně	4	4	9,5	x	x
11	úchyt pro pažbu zbraně	7	7	15	x	x
12	maketa zbraně vz.SA58	86	5,7	25,5	x	x
13	polypropylenový box s USB 3/USB 2.0 HUB	17	10,5	8,5	x	x
14	propylenový box s 5 VDC napájecími obvody a akumulátory	17	10,5	8,5	x	x
15	pružina v ose z	x	x	x	2,6	3

2.2. UKOTVENÍ ZBRANĚ V PODSYSTÉMU PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

V rámci použití podsystemu pro měření zpětného rázu jsou vytvořeny a použity speciální pouzdra pro fixaci testovací zbraně (Kap. 1.6 TESTOVACÍ ZBRANĚ). Tato pouzdra zajišťují neměnný pohyb zbraně během střelby.

Pro 3D tisk pouzder (Obr. 10, 11) byl použit bezbarvý/bílý a černý materiál - prusament PETG, glykolem obohacená varianta klasického PET, který se používá převážně pro tisk mechanicky namáhaných částí. Materiál se snadno tiskne, je dostupný a levný, ale odolný, pevný a flexibilní. (Prusa Polymers, 2022) PETG je vhodný pro výrobu pouzder kde je vystaven prudkým nárazům. Na výtisk byla zvolena výška vrstvy 0,3 mm a výplň tisku 5%. Dutiny vymodelované programem pro 3D tisk byly nastaveny tak, aby byl co největší. Dutiny výtisku byly naplněny elastickým plnidlem typu EVA (Ethylenvinylacetát), což vedlo ke zvýšení pevnosti pouzdra pro výdrž při opakovaných rázech během střelby. Tento technologický postup umožňuje volbu mezi různými typy výplní a spolu s tím související změnu vlastností pouzder.



Obr. 10. Navržené pouzdro pro ukotvení zbraně v úchyty pažby

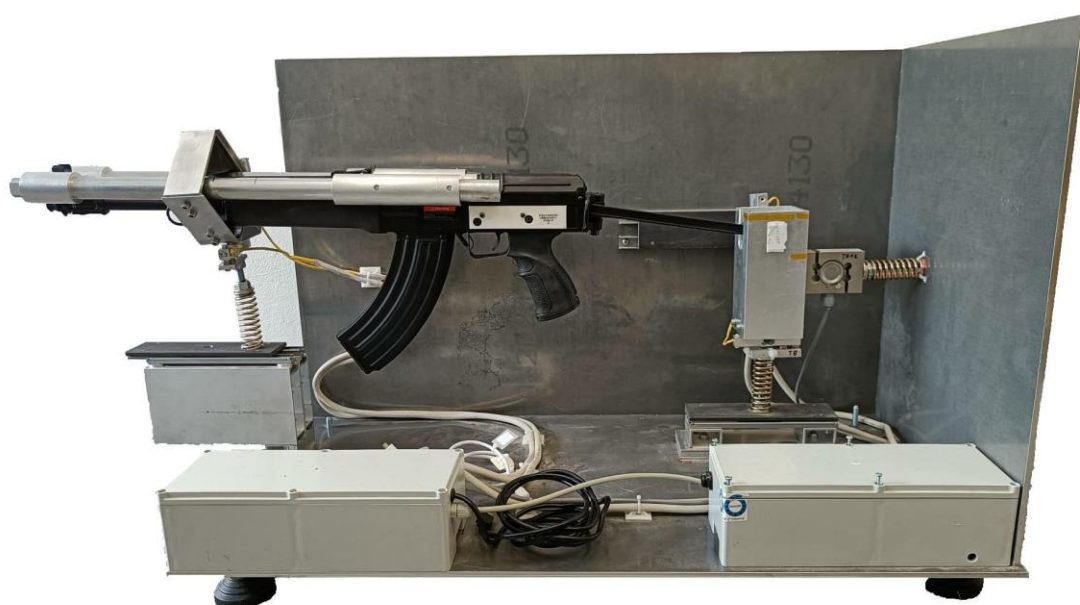


Obr. 11. Navržené pouzdro pro ukotvení zbraně v úchytu předpažbí

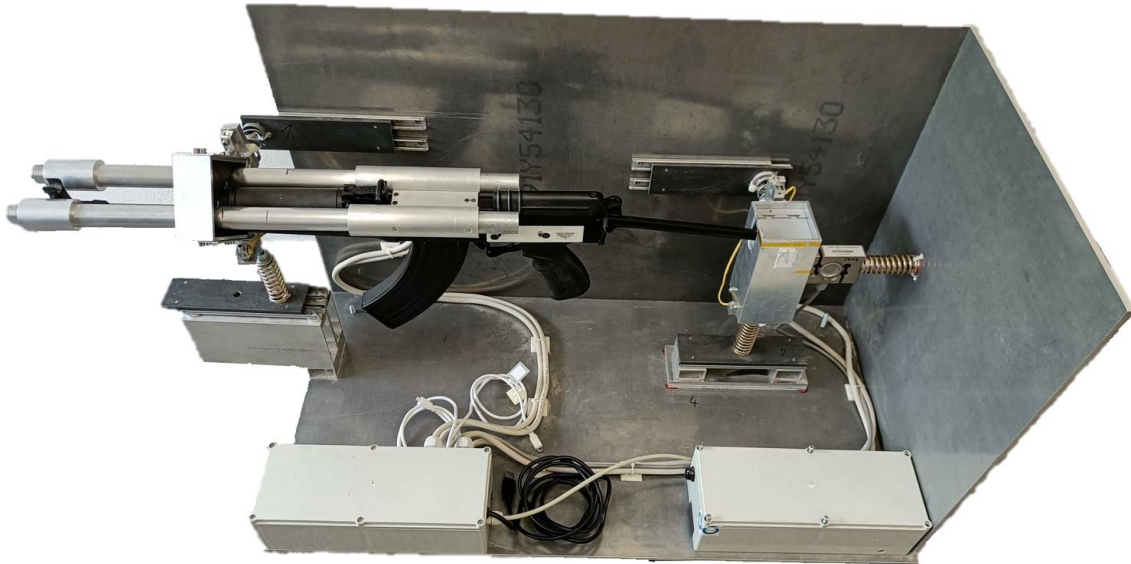
2.3. REALIZOVANÉ ŘEŠENÍ

2.3.1. KONSTRUKCE PODSYSTÉMU ZPĚTNÉHO RÁZU

Na (Obr. 12, 13) je zobrazena realizace podsyntému pro měření zpětného rázu s testovací zbraní a příložným zařízením podléhající parametrům z kapitoly (Kap. 2.1. KONSTRUKCE APARATURY ZPĚTNÉHO RÁZU) v souladu s technickým popisem výše.



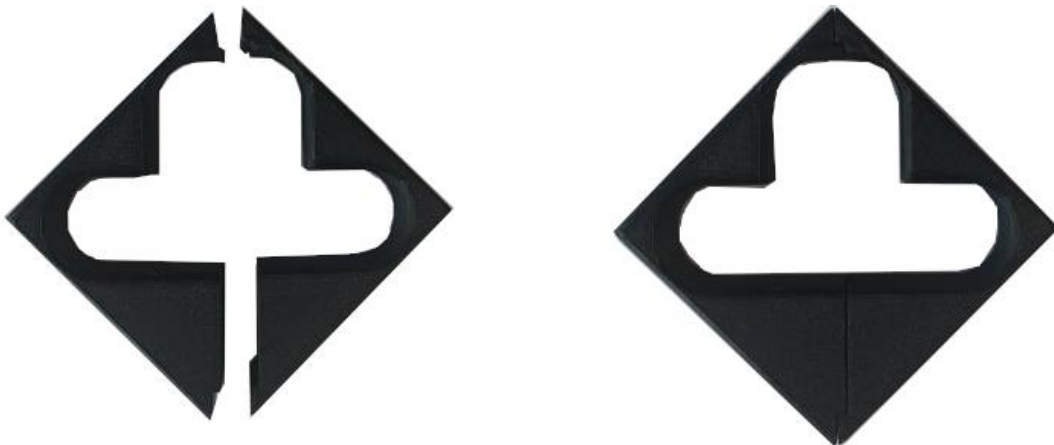
Obr. 12. Podsyntém měření zpětného rázu s ukotvenou zbraní a příložným zařízením



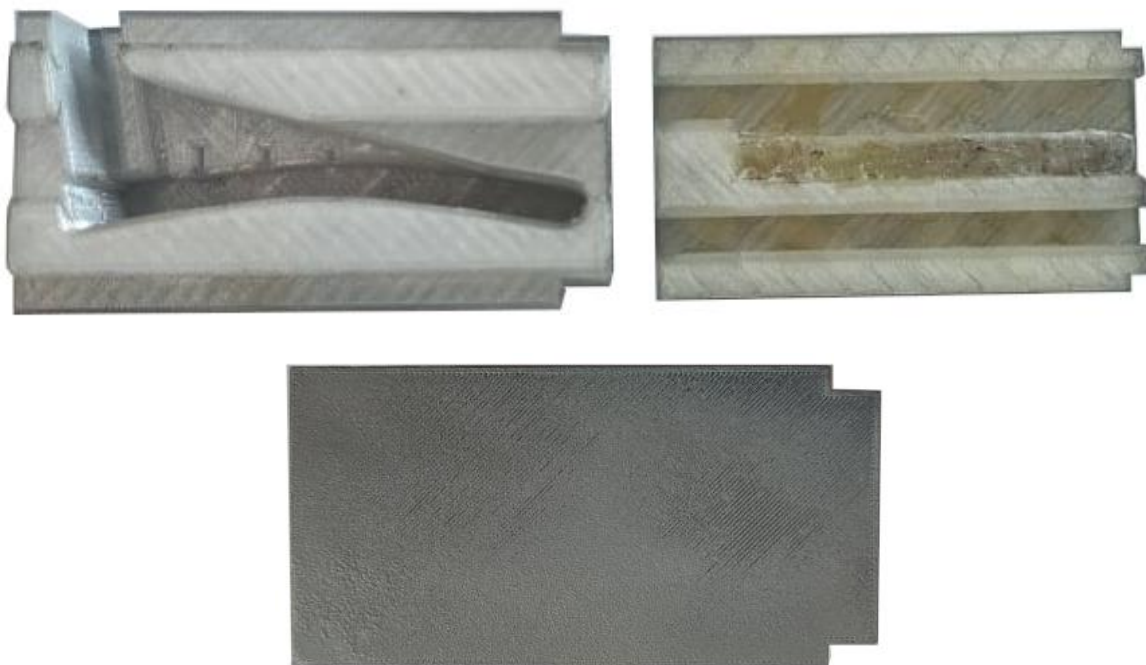
Obr. 13. Horní pohled na realizaci podsystému měření zpětného rázu s ukotvenou zbraní a příložným zařízením

2.3.2. UKOTVENÍ ZBRANĚ V APARATUŘE PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

Na (Obr. 14, 15) jsou zobrazeny úchyty pro zbraně podléhající parametrům z (Kap. 2.2. UKOTVENÍ ZBRANĚ V APARATUŘE PRO MĚŘENÍ ZPĚTNÉHO RÁZU). Tyto části jsou určeny vytvořeny pro fixaci zbraně do podsystému měření zpětného rázu.



Obr. 14. Realizace úchytu hlavně testovací zbraně s příložným zařízením v aparatuře pro měření zpětného rázu.

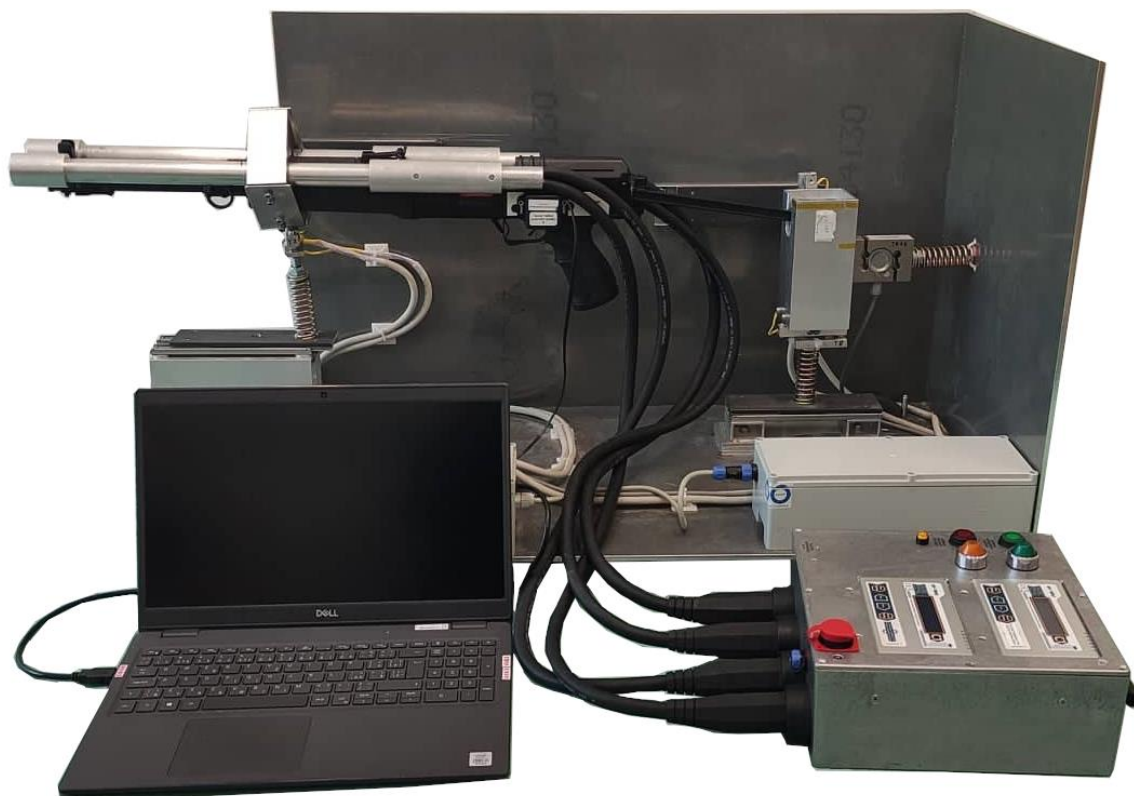


Obr. 15. Vytvořené úchyty pažby testovací zbraně v aparatuře pro měření zpětného rázu.

2.3.3. STRUKTURA REALIZOVANÉHO PODSYSTÉMU

Hardware pro testování generátoru zpětného (Obr. 16) je sestaven několika podsystémů:

- zařízení pro měření zpětného rázu,
- generátor zpětného rázu,
- příložné zařízení,
- testovací zbraň,
- počítač.



Obr. 16. Realizace hardware pro testování generátoru zpětného rázu. Hardware se skládá ze Zařízení pro měření zpětného rázu, ve kterém je umístěna testovací zbraň. Na testovací zbrani je upevněno Příložné zařízení. Příložné zařízení je pomocí napájecích kabelů pro cívku A a B připojeno ke Generátoru zpětného rázu. Aparatura pro měření zpětného rázu s Senzor pro měření posturální stability B, který je umístěn na zbrani, jsou připojeny pomocí rozhraní USB3 k počítači.

3. PODSYSTÉM PRO REGULACI ZPĚTNÉHO RÁZU

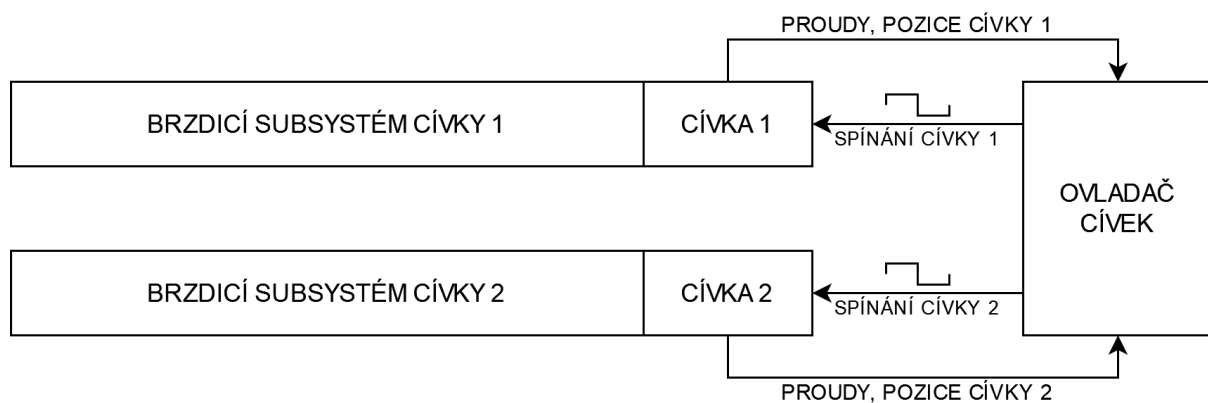
3.1. ZÁKLADNÍ PRINCIP GENEROVÁNÍ ZPĚTNÉHO RÁZU

Charakteristika zpětného rázu je regulovatelná pomocí Příložného zařízení generátoru zpětného rázu, které je složeno z 2 cívek a 2 brzdících subsystémů zapojených dle diagramu v Obr. 17. Každá z cívek má samostatně regulovatelný čas sepnutí a čas vypnutí, což jsou parametry řízené pomocí **Řídící jednotky generátoru zpětného rázu**.

Cívky urychlují projektily v podobě magnetickou silou vtahovaných jader, které společně simulují pohyb kulky v hlavni. Cívky fungují ve 3 základních režimech:

1. Samostatně cívka A a samostatně cívka B. Takto je možné simulovat dvouhlavňové zbraně díky umístění cívek, viz Obr 17.
2. Souběžně cívky A a B. Takto je možné simulovat silné rázy dlouhých jednohlavňových zbraní.
3. Fázově posunuté časy spuštění cívek A a B využívají interference mechanického pohybu vyvolaného zpožděnými starty pohybujících se jader obou cívek. Takto je možné přesněji simulovat konkrétní tvary pohybových křivek zpětných rázů různých zbraní.

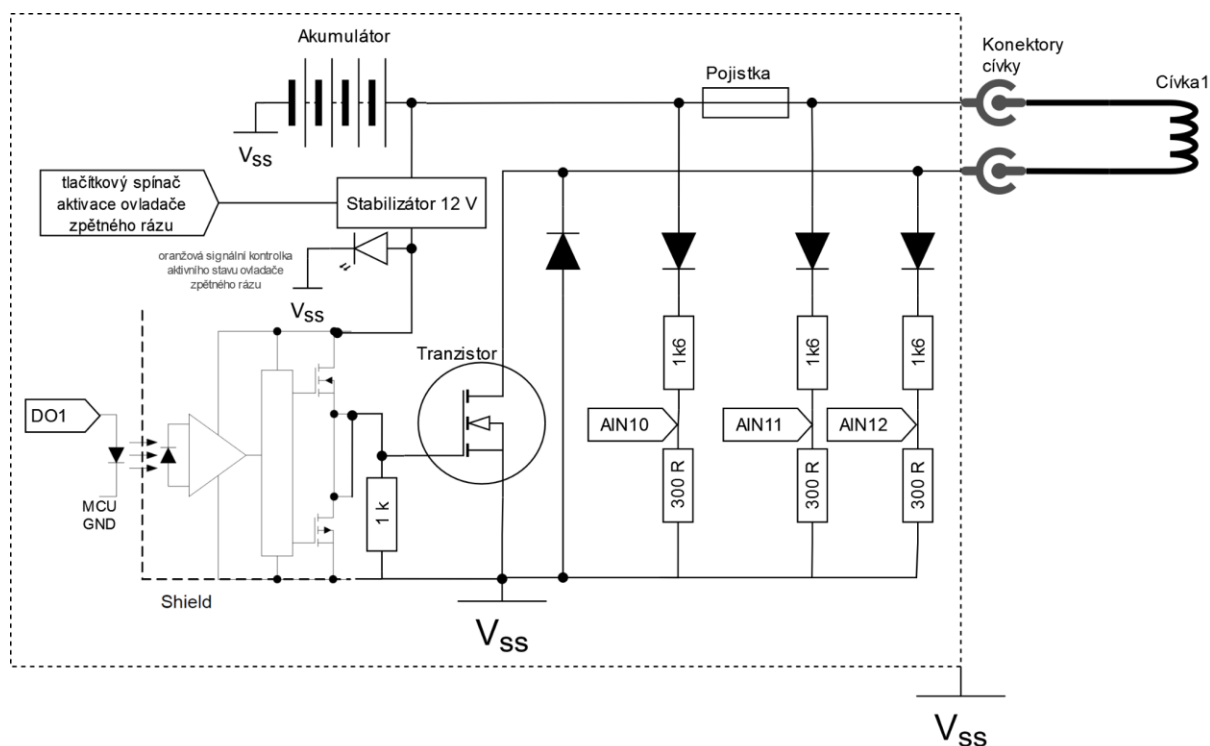
V diagramu (Obr. 17) je popsáno připojení cívek k ovladači cívek, který je součástí Řídící jednotky generátoru zpětného rázu. Ovladač řídí cívky pomocí spínání výkonových tranzistorů a cívky vrací informaci ovladači o průběhu proudů cívkami a pozici jádra.



Obr. 17. Diagram realizace zpětného rázu pomocí 2 cívek. Ovladač cívek popsán ve schématu dle Obr. 18.

3.1.1. TRANZISTORY

Pro řízení cívek byly vybrány tranzistory DAMI500N60. Tyto tranzistory byly vybrány na základě výpočtů parametrů cívek a maximálních výkonů zvolených akumulátorů. Zvolené tranzistory DAMI500N60 jsou typu N-Channel MOSFET. Tranzistory jsou řízeny v režimu ON-OFF pomocí budiče tranzistoru LTV3120 (Obr. 18) tvořeného 2 MOSFET tranzistory, přes které je na tranzistor DAMI500N60 přivedeno napětí 12 V DC nebo 0 V s minimálními ztrátami a proudovým výkonem na nabití kapacity brány DAMI500N60 a řízení tranzistoru ve spínacím režimu. Pulzní proud i (Tab. 8) je pro pulz kratší 300 ms s opakováním delší 15 ms (duty cycle > 2 %).



Obr. 18. Schéma zapojení ovladače cívek s tranzistorem DAMI500N60.

Tab. 8. Parametry tranzistoru DAMI500N60 (DACO SEMICONDUCTOR, 2017)

Parametr	Velikost
V_{DSS}	60 V
$R_{DS(ON)}$	< 1.1 m Ω při $V_{GS} = 10$ V
Drain Current-Continuous	500 A (25 °C), 400 A (100 °C)
Drain Current-Pulsed	1500 A
Operating Junction Temperature Range	-50 °C to +150 °C
Maximum Power Dissipation	1200 W

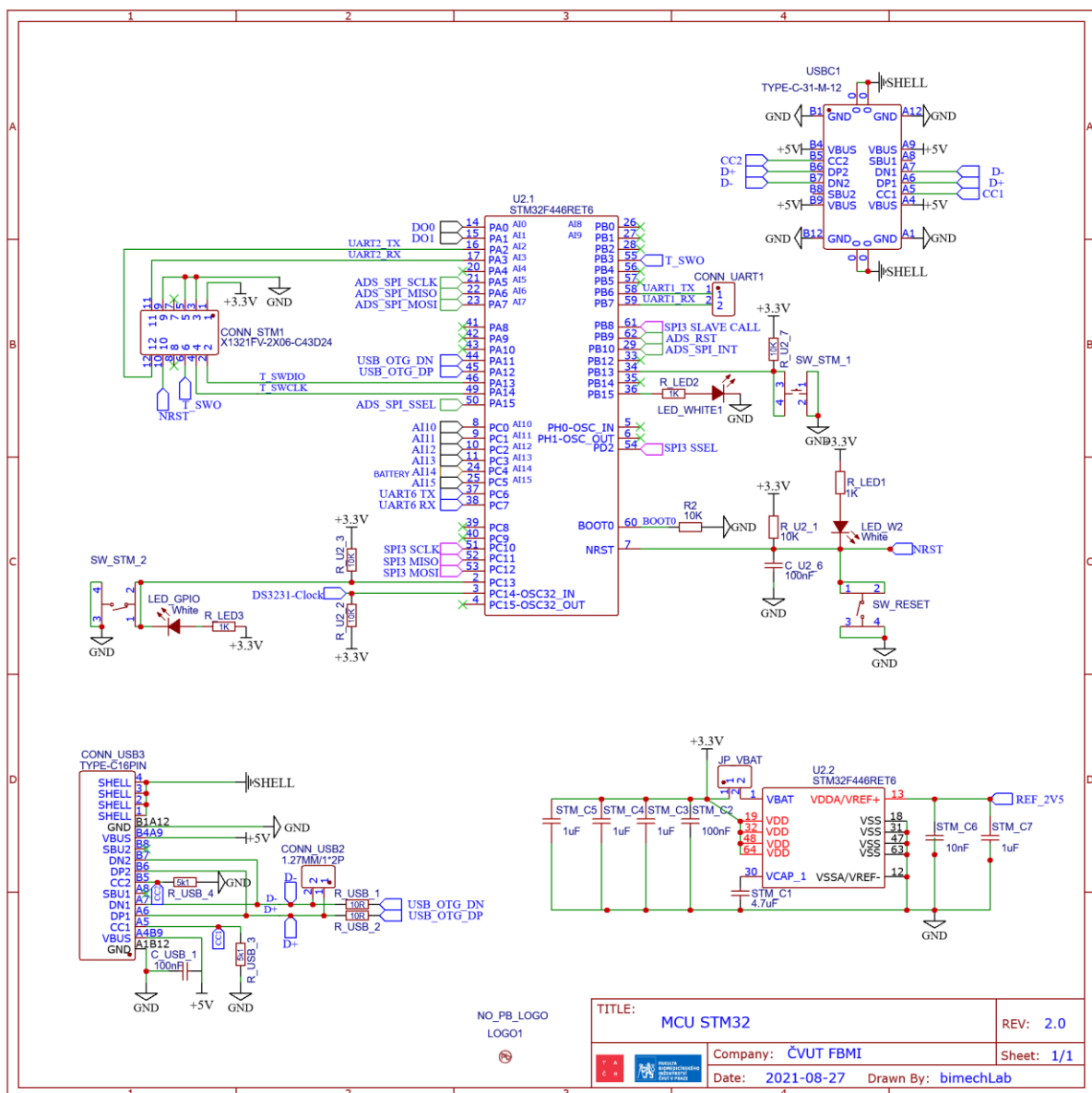
3.1.2. CÍVKY

Elektromagnetická budící cívka je navržena ve shodě s normou ČSN 33 2000-4-41 doplňkovou formou ochrany malým napětím PELV. Bezpečné napětí příložených částí, na kterých může dojít k náhodnému dotyku s živou částí, pro prostory nebezpečné, tedy prostory venkovní a vlhké, je 60 V stejnosměrného proudu. Cívka je buzena na toto bezpečné napětí a nikdy nemůže dojít k úrazu elektrickým proudem. Nominální hodnota napětí použitých Li-Pol akumulátorů je 22,2 V (Tab. 10) a maximální hodnota, která je na akumulátorech po odpojení napětí nabíjecího obvodu je 25,2 V (Tab. 10).

Měřicí děliče pro ADC MCU STM32F446RET6 jsou navrženy na napětí na vstupu max. 30 V. Děliče jsou chráněny usměrňovací diodou, která zamezuje vniku záporného napětí na ADC mikroprocesoru při prepólování cívky v případě rozepnutí tranzistoru cívky po nabití cívky. Dělič sestavený z rezistorů řady E24 s nominálními hodnotami 1600 Ω a 300 Ω rozdělí napětí 30 V tak, že na ADC je měřeno maximálně 3,16 V. ADC má digitální rozlišení 16 bit, rozlišení ADC při referenčním napětí $V_{cc} = 3,3$ V je rovno 50,35 μV. Rozlišení před děličem je 0,27 mV. Odpor přívodních kabelů cívek je 0,386 mΩ/m. Rozlišení proudu měřeného na 1 metru přívodních kabelů je 0,7 A. Napětí na cívce je měřeno jako rozdíl hodnot AIN11 - AIN12. Napětí na pojistce je rozdíl hodnot AIN10 - AIN11. Z těchto měřených napětí je dopočítáván výkon cívky. Z napětí na AIN10 je zároveň získávána informace o stavu akumulátorů. Z napětí AIN11 je získávána informace o přepálení pojistky. Z napětí na AIN12 je získávána informace o připojení přívodních vodičů a cívky. V případě paralelního zapojení cívek je kromě kanálu AIN12 ještě využit kanál AIN13 pro druhou cívku. Kanály AIN12 a AIN13 slouží také ke kontrole řídicích tranzistorů, kdy při sepnutém stavu je úbytek na tranzistoru blízký 0 díky nízkému $R_{DS(ON)}$, v (Tab. 8). Zapojení I/O procesoru je shrnuto v (Tab. 9). a zapojení elektrických obvodů je ve schématu MCU STM32 v (Obr. 19).

Tab. 9. Přehled připojených pinů MCU STM32F446RET6 a funkcí jednotlivých pinů MCU. Tabulka neobsahuje napájecí a nepoužité (nepřipojené) piny, nebo piny rezervované pro případné úpravy a komercializaci, např. ADS piny pro externí ADC převodníky.

Pin	Název	Schéma	Popis funkce
14	PA0	DO1	Ovládání tranzistoru 1
15	PA1	DO2	Ovládání tranzistoru 2
16	PA2	UART_TX	Ladící komunikace pro programátor
17	PA3	UART_RX	
44	PA11	USB_OTG_DN	Komunikace s PC skrze USB
45	PA12	USB_OTG_DP	Komunikace s PC skrze USB
46	PA13	T_SWDIO	Programovací pin - data
49	PA14	T_SWCLK	Programovací pin - hodiny
8	PC0	AI10	Dělič na akumulátor cívek
9	PC1	AI11	Dělič na pojistku
10	PC2	AI12	Dělič na tranzistor 1
11	PC3	AI13	Dělič na tranzistor 2
24	PC4	AI14	Dělič na akumulátor MCU
25	PC5	AI15	Teplota akumulátorů cívek



Obr. 19. Schéma zapojení řídicího MCU STM32F446RET6 senzoru 7, který přijímá parametry pro řízení cívky, ovládá ovladač cívky, čte data na AIN. Komunikace probíhá skrze USB konektor nebo SPI linky.

Cívka je dimenzována na maximální vybíjecí proud použitých akumulátorů, které jsou akumulátory schopné dodávat až 10 sec; tato doba se liší u různých výrobců. Tento čas je definován zahříváním akumulátorů vlivem ztrátového výkonu na vnitřním odporu, který je nominálně 1,8 mΩ na článek (Tab. 10). Odpor klesá s rostoucí teplotou akumulátoru. Při 760 A je ztrátový výkon konfigurace 6S1P 260 W na článek. Tento ztrátový výkon umožní využití špičkového vybíjecího proudu jenom stovky milisekund, aby nedošlo k přílišnému zahřívání akumulátorů. V obvodu dle schématu v Obr. 18 je pro ochranu akumulátorů umístěna pojistka 157.5701.6271 výrobce Littelfuse, která vybaví při proudu 760 A za méně jak 1200 ms. Nominální odpor pojistky je 454,5 μΩ. Cívka je elektronicky řízena pomocí MCU STM32F446RET6 zapojeného dle schématu v Obr. 19 tak, aby tento čas nebyl překročen a

softwarově je limitován na 1000 ms. Elektrický výkon, který je jedné cívce dodáván je max. 19,2 kW a minimálně 13,7 kW. Výkon se liší v závislosti na stavu nabití akumulátorů a rychlosti po sobě jdoucích výstřelů, vlivem obnovovacího času akumulátoru. PID regulátor má informaci o stavu akumulátorů v reálném čase, a to z ADC1.

3.1.3. POUŽITÉ AKUMULÁTORY

Jsou použity 2 typy akumulátorů od světového výrobce vysokoproudových baterií Gens Ace - Acepow Electronics Co. Ltd. Jedná se o Li-Pol grafenové akumulátory, které jsou specifické malým vnitřním odporem a vysokými výstupními proudy. Akumulátory B-60C-4000-6S1P jsou řady Gens a TA-RL-95C-4000-6S1P jsou novější řady R-Line, které mají nižší odpor a méně se zahřívají. Akumulátory jsou primárně určeny pro modelářský trh pro napájení motorů aviatických modelů a bezpilotních letadel. Dva zástupci z různých výrobních sérií akumulátorů byly vybrány z důvodu zajištění kompatibility a dlouhodobé podpory navrženého budiče cívek, jelikož zvolené typy akumulátorů byly vybrány tak, aby mohly být snadno nahrazeny akumulátory jiných výrobců. Použité akumulátory splňují standardy ISO9001, ISO14001 a certifikace CE, UL, FCC a RoHS. Parametry akumulátorů jsou shrnuté v (Tab. 10).

Použité akumulátory se významně liší pouze v maximálním proudu. Tento rozdíl měl za následek návrh cívky tak, aby bylo snadné změnit její parametry v závislosti na volbě akumulátorů. Jednotlivé vrstvy cívky byly navrženy tak, aby se daly zapojit buď paralelně nebo sériově, čímž cívka mění svůj vnitřní odpor a omezí stejnosměrný proud saturované cívky v ustáleném stavu. Akumulátory jsou používány v rozmezí napětí 3,7 V až 4,2 V na článek, aby nedošlo k poškození akumulátorů. Pro návrh cívky uvažujeme napětí plně nabitého akumulátoru tedy

$$UC1 = UC2 = 6 \times 4,2 \text{ V} = 25,2 \text{ V}.$$

Konstrukce budící cívky se vzduchovým jádrem je realizována tak, aby byl omezen maximální proud procházející nasycenou cívkou v ustáleném stavu na maximální vybíjecí proud akumulátorů, tedy na hodnoty

$$IC1 = 480 \text{ A a } IC2 = 760 \text{ A},$$

čehož je dosaženo při hodnotě odporu cívky

$$RC1 = UC1 / IC1 = 25,2 / 480 = 52,50 \text{ m}\Omega \text{ a } RC2 = UC2 / IC2 = 25,2 / 760 = 33,16 \text{ m}\Omega.$$

Tab. 10 Parametry použitých akumulátorů.

Parametr	B-60C-4000-6S1P	TA-RL-95C-4000-6S1P
Kapacita	4000 mAh	
Nominální napětí	22,2 V (3,7 V na článek)	
Provozní napětí	20,4 V - 25,2 V (3,6 V - 4,2 V na článek)	
Max. proudové zatížení	60C (240 A)	95C (380 A)
Max. vybíjecí proud	120C (480 A)	190C (760 A)
Max. teplota při vybíjení	70 °C	
Hmotnost	671 g	612 g
Rozměry	136 x 43 x 53 mm	141 x 43 x 48 mm
Typ servisního konektoru	JST-XH	JST-XHR
Připojovací konektor	AS150	
Nabíjecí proud	1–3C, 5C (max.)	
Max. napětí na článku	4,22 V na článek	
Max. skladovací napětí	3,8 V na článek	
Teplota akumulátoru při nabíjení	5 to 45 °C	
Cena (2021) s DPH	3000 CZK	2900 CZK

Cívka je realizována drátem 103212047 výrobce SynFlex v (Tab. 12). Délka cívky je 100 mm, počet závitů jedné vrstvy cívky je $N_n = 65$. Délka drátu první vrstvy na průměru 15 mm je

$$l_{C11} = N_n \cdot \pi \cdot d = 65 \cdot 3,1416 \cdot 15 \doteq 3,06 \text{ m}$$

s celkovým odporem $R_{C11} \doteq 55,14 \text{ m}\Omega$. Celkem je navinuto 5 vrstev, které jsou zapojeny dle schématu v (Obr. 20) pro cívku s celkovým odporem 52,19 mΩ a dle schématu v (Obr. 21) pro cívku s celkovým odporem 33,16 mΩ. Odpor obvodu připojeného na akumulátor je navýšen o odpor sepnutého tranzistoru 1.1 mΩ v a o odpor přívodních vodičů a konektorů. Délky a odpory jednotlivých vrstev vinutí jsou v (Tab. 11). Celková délka drátu vinutí je 17,78 m ve 325

závitů cívk. Vlastní indukce cívky pro vzduchové jádro je $L = 219 \mu\text{H}$. Magnetický indukční tok cívky bez jádra roste s proudem lineárně a dosahuje hodnoty

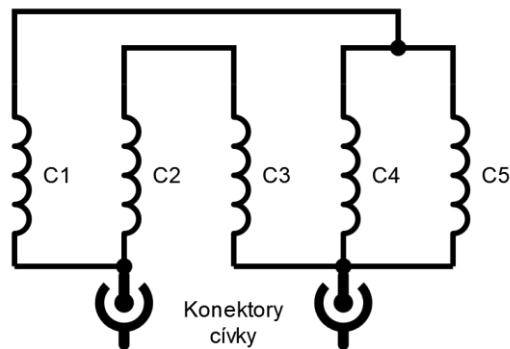
$$\phi_{46} = 0,219 \text{ mH} \cdot 460 = 100,74 \text{ mW a}$$

$$\phi_{78} = 0,219 \text{ mH} \cdot 780 = 170,82 \text{ mW.}$$

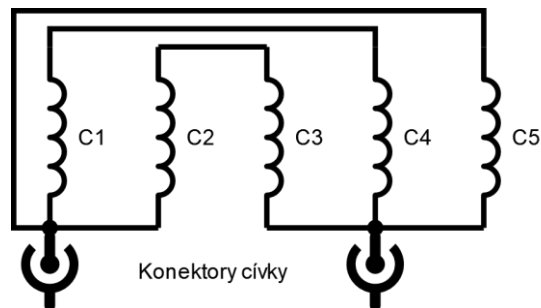
Energie magnetických polí cívky jsou

$$E_{46} = \frac{1}{2} \cdot \phi_{46} \cdot I_{46} = 0,10074 \cdot 460 = 23,17 \text{ J}$$

$$E_{78} = \frac{1}{2} \cdot \phi_{78} \cdot I_{78} = 0,17082 \cdot 780 = 66,62 \text{ J.}$$



Obr. 20. Zapojení jednotlivých vrstev vinutí cívky $52,19 \text{ m}\Omega$ pro max. proud 480 A .



Obr. 21. Zapojení jednotlivých vrstev vinutí cívky $33,16 \text{ m}\Omega$ pro max. proud 760 A

Tab. 11. Délky a odpory jednotlivých vinutí.

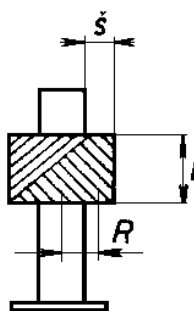
Vrstva vinutí	Délka vinutí	Odpor vinutí
C1	3,06	55,14
C2	3,31	59,55
C3	3,55	63,96
C4	3,80	68,37
C5	4,04	72,78

Tab. 12 Parametry drátu 1032112047 SYNFLEX pro výrobu cívek.

Parametr	1032112047 SYNFLEX
Vnější průměr	1.12 mm
Průřez jádra	0,95 mm ²
Odpor drátu na 1 m	18 mΩ
Pracovní teplota	max. 200 °C
Druh jádra	Cu
Materiál vnější izolace	polyamidoimidový lak
Standardy	IEC / DIN EN 60317-13 a 60317-0-1, NEMA MW 35-C, UL-approved
Cena (2021) s DPH	6 CZK za 1 m

Tab. 13. Parametry použité cívky.

Parametr	Cívka pro proud 480 A	Cívka pro proud 760 A
Rezistivita	52,19 mΩ	33,16 mΩ
Vlastní indukce	219 uH	
Délka	100 mm	
Výška vinutí	6 mm	
Poloměr	10,5 mm	
Průměr drátu s lakem	1,12 mm	
Počet závitů	325	
Jádro	Vzduchové	
Mezizávitová výplň a izolace	Epoxid	



Obr. 22. Schéma rozměrových parametrů cívky, kde R je poloměr cívky, l je délka cívky a $š$ je vinutí cívky.

Pro ověření silových účinků a vlastností různých materiálů jader navržené cívky bylo provedeno měření sil vytvořených cívkou pomocí siloměru s rozsahem do 100 mN a s rozsahem do 10 N. Ověření cívky je provedeno následovně:

1. Cívka byla umístěna do polohy vertikální a do oblasti začátku vinutí byly postupně zavěšené ocelové válce dle Tab. 14.
2. Cívka byla opakovaně buzena proudem 22 A po dobu 1 sec.
3. Pomocí videozáznamů byly měřeny výchylky siloměru.
4. Elektrický proud vyvolal silové působení o střední a změnu velikosti výchylky siloměru. Následně byla vypočtena průměrná změna síly.

Tab. 14: Přehled měřených ocelových válců.

5 g ocelový válec	30 mN
15 g ocelový válec	100 mN
15 g ocelový válec s magnetem	700 mN

Vlastnosti cívky jsou ověřeny a použity pro urychlení tělesa simulující ráz během výstřelu. Těleso urychlované cívkou bylo na základě měření vybráno v podobě silného feromagnetického materiálu v podobě NdFeB magnetu GN52.1-ND-10-1, průměru 10 mm a délky 20 mm o hmotnosti 12 g. Feromagnetický materiál zesiluje působení cívky dle tabulky 7x, tedy energie cívky

$$E_{78M} = E_{78} \cdot 7 = 66,62 \cdot 7 = 466,34 \text{ J.}$$

Přívodní kabely propojující přístrojovou skříň a elektromagnetickou budící cívku generátoru zpětného rázu a jsou vyrobeny z jemně laněného měděného jádra třídy 6 (ČSN EN 60228) o celkovém průřezu jádra 50 mm². Alternativně je možné využívat kabely průřezu jádra 70 mm². Jádro kabelu je opleteno separační páskou a izolováno pryžovou směsí typu EM5 s elektrickou izolací do 100 V a pro zkratovou teplotu jádra až 250 °C a provozní teplotu

-20 °C až +85 °C. Kabely standardu H01N2-D (EN 50525-2-81) jsou snadno ohebné a odolné vůči oděru a poškození. Kabel je na obou koncích opatřen rychlospojkami (kolík), které umožňují výměnu kabelu pro různé pracovní polohy (vzdálenosti) a snadnou demontáž zařízení pro přepravu.

Tab. 15. Přehled parametrů kabelových přívodů.

Jmeno- vitý průřez	Max. průměr drátů v jádře	Jmeno- vitá tloušťka izolace	Max. vnější průměr	Max. proud (zatížení 60 %)	Max. proud (zatížení 35 %)	Max. proud (zatížení 20 %)	Max. odpor vodiče (20 °C)	Max. ztrátový výkon	Hmot- nost kabelu
[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[A]	[A]	[A]	[mΩ/m]	[W/m]	[g/m]
50	0,21	2,2	14,2	365	480	710	0,386	39	450
70	0,21	2,4	16,4	460	600	850	0,272	39	630

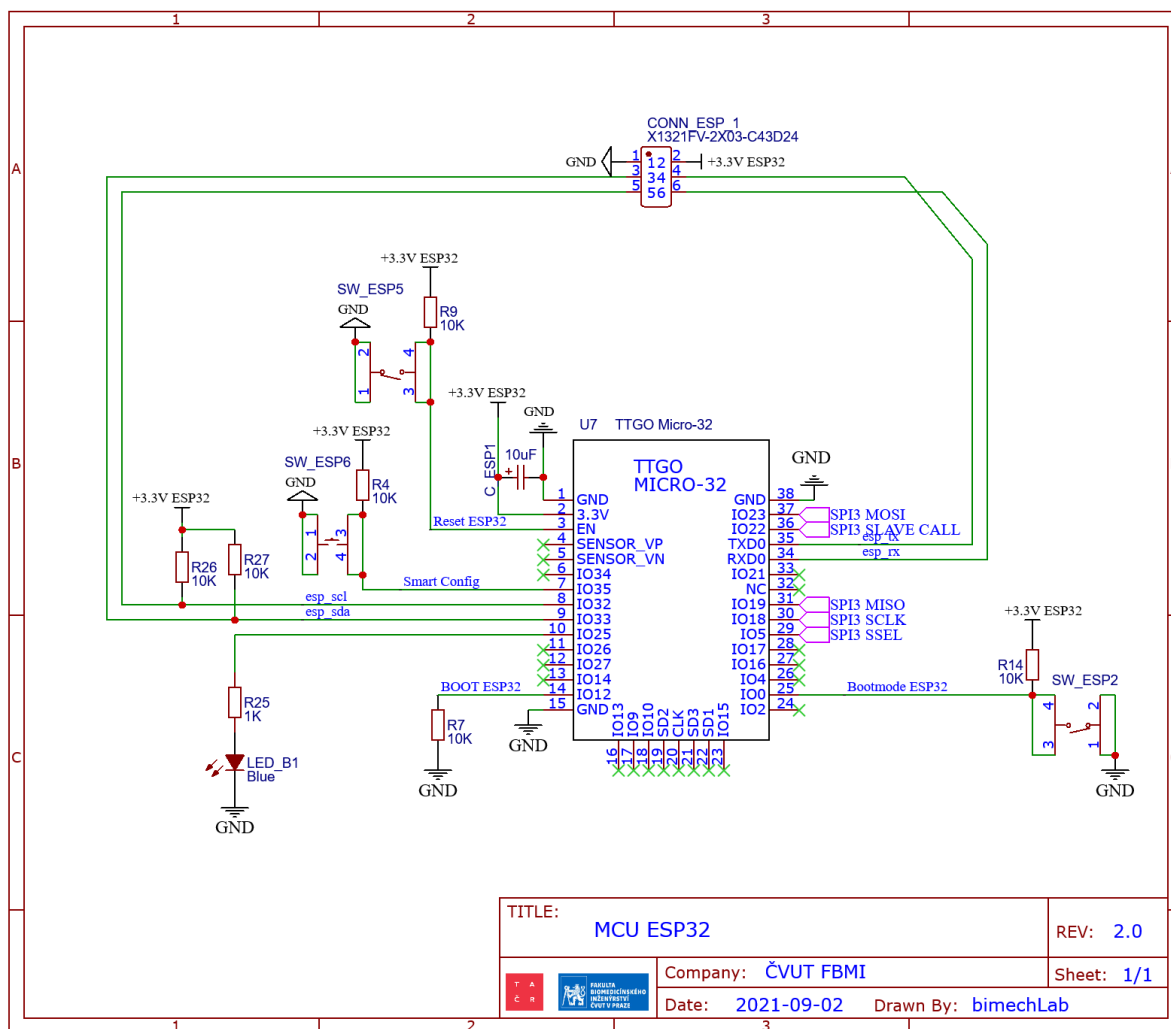
Celková délka přívodních kabelů je 2 m, tedy pár o délce 1 m. Kabel o průměru 95 mm² váží 1,7 kg a kabel o průměru 70 mm² váží 1,26 kg (při hustotě 8,94 g/cm³). Ztrátový výkon na kabelu s konektory je 40 W, celkem 80 W na 2m délky kabelu. Detaily hodnot pro různé průměry jsou uvedeny v (Tab. 15.)

Řídící a ovládací elektronika je umístěna v hliníkové přístrojové skříni HAMMOND (Obr. 23) o rozměrech 250 x 250 x 101 mm se stupněm krytí IP54. Skříňka je opatřena 4 zásuvkami rychloupínacích konektorů kabelů pro elektromagnetické budící cívky generátoru zpětného rázu. Otvory pro konektory jsou vrány na průměr 30 mm. Konektor je propojen s vnitřními obvody šroubem přes kabelové oko M12. Přístrojová skříň ovladače cívek byla vybrána tak, aby napájecí přívody cívek byly umístěny na jedné straně přístrojové skříňe a celá skříň tak mohla být umístěna na záda střelce, například do batohu.



Obr. 23. Víko přístrojové skříně ovladače cívek. Zelený přepínač slouží k zapnutí mikroprocesoru (MCU) a zelená kontrolka signalizuje správné nabootování MCU. Červený přepínač slouží k zapnutí výkonové části, tedy aktivování řízení cívek pomocí MCU. V krytu jsou umístěny 2 ovládací panely obvodů pro kontrolu aktuálního stavu akumulátorů, řízení jejich nabíjení a diagnostiku stavu akumulátorů. Červená krytka schovává konektor pro připojení napájecího napětí pro nabíjení akumulátorů. Hmotnost přístrojové skříně je 4,2 kg s akumulátory bez připojených přívodních vodičů k cívkám.

Řídící a ovládací elektronika je propojena s počítačem buď pomocí USB rozhraní, které je připojeno na konektor spolu s napájecím napětím pro akumulátory, nebo pomocí Wi-Fi rozhraní. Pokud je generátor zpětného rázu zapojen do aparatury pro měření zpětného rázu je možné využívat USB rozhraní. Pokud je generátor zpětného rázu využíván střelcem spolu s trenažérem střelby, je využíváno Wi-Fi rozhraní a celý systém předává informace bez použití kabelů. Tím je zajištěna možnost pohybu se zařízením a zároveň je zajištěna bezpečnost zařízení před úrazem elektrickým proudem, například při použití zařízení ve venkovních podmínkách. Komunikační modul ESP32 je k MCU STM32F446RET6 připojen dle schématu v (Obr. 24). Přístrojová skříň je vybavena anténou pro pásmo 2,4 GHz, která přenáší signál z čipu ESP32 umístěného ve stíněné krabici uvnitř přístrojové skříně.

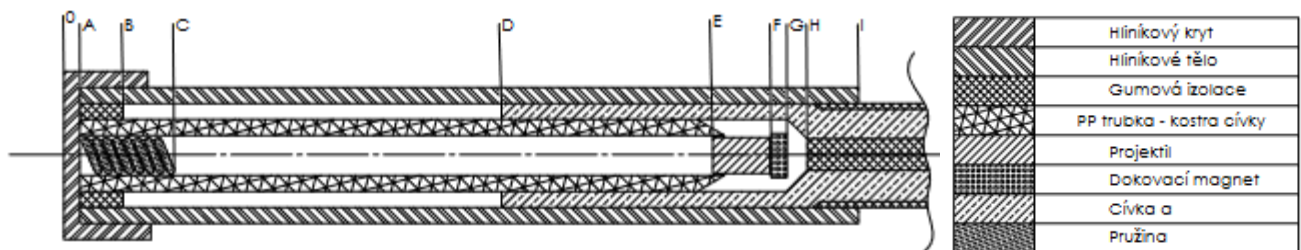


Obr. 24. Schéma zapojení komunikačního modulu ESP32 senzoru 7, který komunikuje s PC skrze Wi-Fi 2,4 GHz.

3.1.4. PŘÍLOŽNÉ ZAŘÍZENÍ NA ZBRANI

Příložné zařízení na zbrani se skládá ze dvou konstrukčně identických částí pro simulaci střelby krátkou dávkou nebo zvýšením silových poměrů zpětného rázu během výstřelu. V Obr. 25 je zobrazeno schéma jedné z částí příložného zařízení na zbrani skládajícího se z:

- hliníkový kryt
- hliníkové tělo
- gumová izolace
- PP (polypropylen) trubka
- projektil
- dokovací magner
- cívka
- pružina

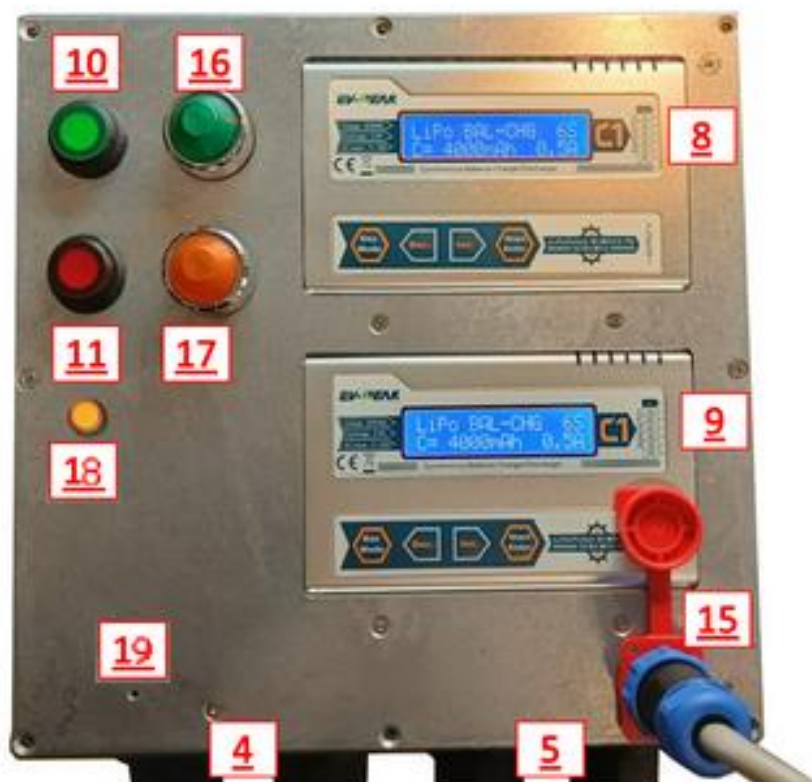


Obr. 25. Schéma finálního příložného zařízení.

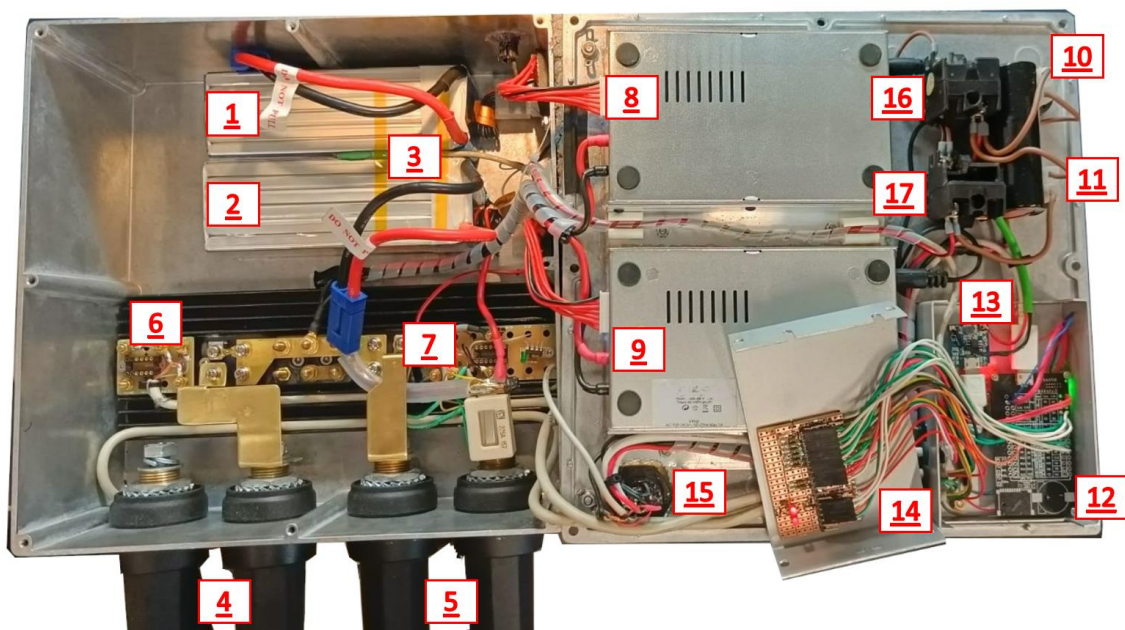
3.2. REALIZACE ŘEŠENÍ

3.2.1. PODSYSTÉM GENERÁTORU ZPĚTNÉHO RÁZU

Generátor zpětného rázu je zobrazen na (Obr. 25, 26). V (Tab. 16) jsou jednotlivé popisy komponent označený na (Obr. 25, 26).



Obr. 26. Generátor zpětného rázu uzavřený.



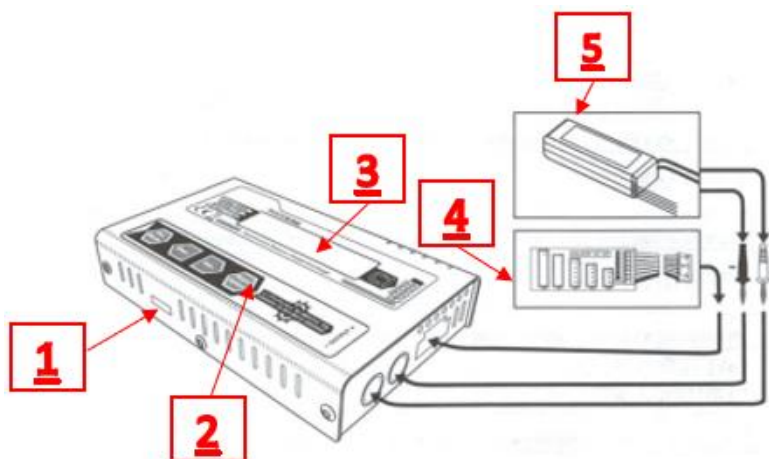
Obr. 27. Generátor zpětného rázu otevřený.

Tab. 16 Popisy komponent pro Obr. 26 a 27.

1.	akumulátor A
2.	akumulátor B
3.	teplotní senzor
4.	vývod pro cívku A
5.	vývod pro cívku B
6.	tranzistor 1
7.	tranzistor 2
8.	nabíjecí a udržovací obvod integrovaného akumulátoru cívky B
9.	nabíjecí a udržovací obvod integrovaného akumulátoru cívky A
10.	tlačítkový spínač ON/OFF vestavěného počítače
11.	tlačítkový spínač aktivace ovladače zpětného rázu

12.	vestavěný počítač s jádrem STM32 a EXP32 Wi-Fi 2,4 GHz
13.	obvod řízení napájení vestavěného počítače
14.	děliče DIO a AIN rozhraní
15.	konektor pro připojení napájecího zdroje a USB2 datového rozhraní
16.	zelená signální kontrolka zapnutého stavu vestavěného počítače
17.	oranžová signální kontrolka aktivního stavu ovladače zpětného rázu
18.	tlačítko pro povolení automatické střelby
19.	mikro tlačítko pro konfiguraci bezdrátové komunikace Wi-Fi

Nabíjecí a udržovací obvody integrovaných akumulátorů cívek A a B jsou k akumulátorům připojeny dle schématu v Obr. 28. Jedná se o demonstrační schéma, skutečné zapojení je zobrazeno v Obr. 27.



Obr. 28. Propojení nabíjecích obvodů. 1 komunikační port pro Expand-4, 2 panel s tlačítky, 3 LCD obrazovka, 4 bilanční port, 5 akumulátor v konfiguraci 6S1P. (EV-PEAK, 2015)

3.2.2. PŘÍLOŽNÉ ZAŘÍZENÍ NA ZBRANI

Příložné je umístěno na zbrani a slouží k vlastní simulaci rázů během střelby. Zařízení je uvedeno v Obr. 29.



Obr. 29. Příložné zařízení na zbrani.

3.2.3. APLIKACE HW V PRAXI

V Obr. 30 a 31 jsou ukázány případy použití příložného generátoru zpětného rázu při testování a střelbě uživatelem. V Obr. 30 je zobrazena konfigurace aparatury pro měření zpětného rázu, generátoru pro měření zpětného rázu a příložného zařízení pro testování zpětného rázu při hledání nastavení a konfiguraci PID regulátoru. Současně je zakázáno použití během střelby na trenažeru.



Obr. 30. Ukázka použití generátoru zpětného rázu v aparatuře pro měření zpětného rázu.



Obr. 31. Ukázka použití generátoru zpětného rázu v aparatuře při střelbě uživatelem

4. PODSYSTÉM PRO MĚŘENÍ POSTURÁLNÍ STABILITY

4.1. CHARAKTERISTIKA ZAŘÍZENÍ

Podsystém pro měření posturální stability střelce a hodnocení jeho pohybových aktivit se skládá ze soustavy dvou gyro-akcelerometrických systémů s označením Sensor měření pohybů a posturální stability střelce A, Sensor měření pohybu a stability zbraně B a osobního počítače. Sensor měření posturální stability měří zrychlení v $[ms^{-2}]$ a natočení v $[mdps]$ v X-, Y-, Z-ové ose res. odpovídající úhlové rychlosti. Sensory měření posturální stability a chování střelce během střelby jsou pomocí USB 2.0 rozhraní připojeny k počítači nebo k USB 3.1 rozbočovači.



Obr. 32. Zkonstruované gyroakcelerometrické senzory: Senzor pro měření posturální stability A a Senzor pro měření posturální stability B.

Celý systém pro měření posturální stability se skládá z těchto komponent :

- počítač
(popsán v kap 1.3. POŽADAVKY NA PC)
- Senzor měření posturální stability A (Obr. 33, bod 2)
(popsán v kap. 1.4 POUŽITÉ GYROAKCELEROMETRY)
- Senzor měření posturální stability B (Obr. 33, bod 1)
(popsán v kap. 1.4 POUŽITÉ GYROAKCELEROMETRY)
- USB HUB pro senzory posturální stability (Obr. 33, bod 3)
- x USB kabel USB-B micro (Obr. 33, bod 4)
- 1x USB-A kabel male-female (Obr. 33, bod 4)



Obr. 33. Komponenty pro měření posturální stability a pohybových aktivit střelce umístěné v přepravním kufříku

1 - senzor měření posturální stability A 2 - senzor měření posturální stability B 3 - USB HUB pro senzory posturální stability 4 - 2x USB kabel USB-B micro a 1x USB-A kabel female-female

4.2. DOPORUČENÁ APLIKACE PRO MĚŘENÍ

Senzor měření posturální stability A je umístěn v bederní oblasti v okolí obratle L5. Senzor je upevněn pomocí pásky (Obr. 34). Na tento pásek je pomocí suchého zipu následně upevněn **USB HUB pro senzory posturální stability** (Obr. 35).

Obr. 36. Umístění Senzoru měření posturální stability B na zbraní.

Senzor měření posturální stability a pohyb střelce A a Senzor měření pohybu a stability zbraně B jsou připojeny pomocí dvou USB-B micro kabelů ke **USB HUB pro senzory posturální stability a pohybů**. USB HUB pro senzory posturální stability a pohybů je připojen k počítači přes USB3 rozhraní.

Ukázka zapojení celé soustavy pro měření posturální soustavy a pohybů je zobrazena v Obr. 37.



Obr. 37. Ukázka zapojení celé soustavy pro měření posturální soustavy a chování střelce a zbraně během střelby.



Obr. 38. Ukázka zapojení celé soustavy pro měření posturální soustavy a chování střelce a zbraně při střelbě na střelnici reálnou zbraní.

Prototyp příložného PID generátoru zpětného rázu pro osobní palné zbraně pro individuální využití i ve výcvikových zařízeních umožňuje hodnotit chování zbraně, střelce a zkvalitnit výcvik střelby využitím simulace silových účinků během střelby na trenažeru. Prototyp je realizovaný původní výsledek výzkumu a vývoje, projektu LTJ04000176, který byl uskutečněn členy projektového týmu. Jedná se o funkční průmyslový výrobek, zhotovený k ověření vlastností konstrukce v praxi. Jde o takový výrobek, jehož vývoj byl cílem řešení projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje. Prototyp je charakteristický novostí a unikátností návrhu, která je doložitelná touto dokumentací výsledku.

ZDROJE

- [1] ASM330LHH Automotive 6-axis inertial module: 3D accelerometer and 3D gyroscope. STMicroelectronics. 06-May-2020. DocID031239 Rev 4. [ONLINE] Dostupné z: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/asm330lhh.pdf>>
- [2] 6DOF IMU 15 Click. MikroElektronika d.o.o. 2022. [ONLINE] Dostupné z: <<https://www.mikroe.com/6dof-imu-15-click>>
- [3] mikroBUS™ standard specifications. MikroElektronika d.o.o. 2015. [ONLINE] Dostupné z: <<https://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf>>
- [4] OKY3480-1 Electronic Scale Load Cell Weight Sensor Module 10KG. Shenzhen Okystar Technology Co. 2017. [ONLINE] Dostupné z: <<https://www.okystar.com/product-item/electronic-scale-load-cell-weight-sensor-module-10kg-oky3480-1/>>
- [5] Prusament PETG. Prusa Polymers a.s. 2022. [ONLINE] Dostupné z: <<https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>>
- [6] DAMI500N60 N-Channel Enhancement Mode MOSFET. DACO SEMICONDUCTOR CO., LTD. 2017. [ONLINE] Dostupné z: <<https://www.semic.cz/dami500n60-1/>>
- [7] C1 INSTRUCTION MANUAL. EV-PEAK Electronic Technology. 2015. B0901-SC1X1-01.
- [8] Samopal vzor 58 - československá legenda, která nestárne | ARMYWEB.cz. ARMYWEB.cz [online]. Copyright © ArmyWeb.cz [cit. 27.01.2022]. Dostupné z: <https://www.armyweb.cz/clanek/ceskoslovenska-legenda-samopal-vz-58>
- [9] Airsoft samopal Ares VZ 58 L AEG 6 mm BB - AFG-obrana.cz. AFG-obrana.cz - army shop. Prodej zbraně a střelivo. Military shop [online]. Copyright © 2013 [cit. 27.01.2022]. Dostupné z: <https://www.afg-obrana.cz/airsoft-samopal-ares-vz-58-l-aeg-6-mm-bb/>
- [10] Náboj 7,62 x 39 (Česko - Slovensko) a jeho varianty. CMSSN [online]. Copyright © 2004-2022. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://naboje.org/node/7585#>
- [11] 7,62 mm samopal vzor 58 | Armáda ČR. Armáda ČR [online]. Copyright © 2022 [cit. 28.01.2022]. Dostupné z: <https://acr.army.cz/technika-a-vyzbroj/pechotni/-7-62mm-samopal-vzor-58-89705/>
- [12] Přibližné výpočty vzduchových cívek: Jednovrstvá vzduchová cívka. Domovská stránka Ing. Petra Jeníčka [online]. Copyright ©, 8.12.2009 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <http://pjenicek.sweb.cz/radio/clanky/vypoctcivky1.html>

- [13] Návrh a analýza elektromagnetu [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-01-27].
Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39665.
Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [14] GENS ACE LIPO TATTU R-Line FPV serie - 6S 4000mAh 22,2V 6S1P (95C)
Version 1.0. Modely, makety - Pecka Modelář [online]. Copyright © [cit. 27.01.2022].
Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/ta-rl-95c-4000-6s1p-gens-ace-lipo-tattu-r-line-serie-6s-4000mah-95c-as150>
- [15] Battery review: Tattu R-Line 4S 1550 mAh 95 C (V 1.0) - Drone-Zone.de.
Drone-Zone.de - Drohnen News, Guides, Testberichte, FPV Racing & UAV [online].
Copyright © 2011 [cit. 08.01.2022]. Dostupné z: <https://www.drone-zone.de/battery-review-tattu-r-line-4s-1550-mah-95-c-v-1-0/>
- [16] Tattu R-Line 4000mAh 95C 6S1P Lipo Battery Pack with AS150+AS150 Plug for Xclass - GensTattu. Tattu & Gens ace - RC Hobby FPV Heli UAV Lipo Battery [online].
Copyright © [cit. 08.01.2022]. Dostupné z: <https://www.genstattu.com/ta-rl-95c-4000-6s1p.html>
- [17] Konvenční meze dovolených dotykových napětí - ElektroPrůmysl.cz.
informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz [online].
Copyright © 2011 [cit. 08.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.elektroprumysl.cz/legislativa/konvencni-meze-dovolenych-dotykovych-napeti>
- [18] Otázka prostorů z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem - 1. díl
- ElektroPrůmysl.cz. informace ze světa průmyslu a elektrotechniky -
ElektroPrůmysl.cz [online]. Copyright © 2011 [cit. 08.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.elektroprumysl.cz/legislativa/otazka-prostoru-z-hlediska-ochrany-pred-urazem-elektrickym-proudem-1-dil>
- [19] Otázka prostorů z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem - 2. díl
- ElektroPrůmysl.cz. informace ze světa průmyslu a elektrotechniky -
ElektroPrůmysl.cz [online]. Copyright © 2011 [cit. 08.01.2022]. Dostupné z:
<https://www.elektroprumysl.cz/legislativa/otazka-prostoru-z-hlediska-ochrany-pred-urazem-elektrickym-proudem-2-dil>
- [20] Svařovací kabel EPROFLEX - průřez 95 mm² | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ.
SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ - profesionální e-shop se svařovací technikou [online].
Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovaci-kabel-eproflex-prurez-95-mm/d-12524>

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 - Vyvinuté zapojení elektrických obvodů senzorů pro USB rozhraní

