

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektronický model ventilu

Originál (kopie) zadání/DP

Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím elektronického modelu jako náhrady elektromagnetického ventilu v testovacím procesu. Navazuje na předchozí práci, která již byla zpracována ve firmě ZF Engineering. Je zde popsáno testovací prostředí, druhy ventilů používaných ve firmě ZF Engineering a jejich parametry. Jsou zde uvedeny požadavky, které musí elektronický model splňovat. Dále práce popisuje dva rozdílné analogové elektronické modely. První model je upravený analogový obvod převzatý z předchozí práce. Druhý model je analogový obvod vlastního návrhu. U obou modelů je zpracován návrh, simulace, realizace a výsledky testování na HILu. V poslední části práce je zpracován návrh funkčního vzorku, který umožňuje vzdálenou konfiguraci parametrů.

Klíčová slova

Elektronický model, elektromagnetický ventil, testování HIL, digitální potenciometr, simulace, LT spice, PWM

Abstract

This thesis shows the utilisation of electronic model as a replacement of the solenoid valve in the test process. It follows up on the previous thesis which has already been developed in ZF Engineering. Testing environment, valve types used in ZF Engineering and their parameters are described here. Requirements which the electronic model must fulfil are described here. Further, this thesis describes two different analogue electronic models. The first model is a modified analogue circuit taken over from the previous work. The second model is the analogue circuit of my own design. Design, simulation, implementation, and test results on HIL are composed for both models. Last part of this thesis describes the design of a functional model, which allows remote configuration of the parameters.

Key words

Electronic model, electromagnetic valve, testing HIL, digital potentiometr, simulation, LT spice, PWM

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 21.5.2018

Bc. Tomáš Šelmek

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM SYMBOLŮ	3
ÚVOD.....	4
1 PROCES TESTOVÁNÍ.....	5
1.1 Cíl testování	5
1.2 Testovací prostředí.....	6
1.2.1 TCU	7
1.2.2 dSPACE.....	8
1.2.3 Relaybox (FIU).....	8
1.2.4 Loadbox	8
2 ELEKTROMAGNETICKÝ VENTIL	9
2.1 Typy ventilů	10
2.1.1 On/off ventily.....	10
2.1.2 Proporcionální ventily	10
2.2 Parametry reálných ventilů	11
3 REALIZACE ELEKTRONICKÉHO MODELU VENTILU	15
3.1 Požadované vlastnosti elektronického obvodu.....	15
3.2 Očekávané výhody elektronického obvodu	16
3.3 Původní elektronický model [1]	16
3.4 Úprava původního elektronického modelu	18
3.4.1 Filtr pro snímač signálu PWM uC_IN_U_AIM	19
3.4.2 Filtr pro snímač střední hodnoty AN_U_AIM.....	19
3.4.3 Snímač proudu (AN_I_AIM).....	20
3.4.4 Výsledek simulace upraveného obvodu.....	20
3.4.5 Realizace obvodu.....	21
3.4.6 Výsledky testování na HILu	24
3.5 Zpracování signálu AN_I_AIM mikrokontrolerem TCU.....	28
4 VLASTNÍ PROVEDENÍ ELEKTRONICKÉHO MODELU	30
4.1.1 Návrh obvodu	30
4.1.2 Realizace.....	31
4.1.3 Simulace obvodu	32
4.1.4 Výsledky testování na HILu	35
4.1.4.1 Měření přechodného děje	37
4.1.5 Vyhodnocení naměřených hodnot	39

5	NÁVRH FINÁLNÍHO FUNKČNÍHO VZORKU	41
5.1	Koncept finálního funkčního vzorku	42
5.2	Sběrnice SPI.....	43
5.3	Specifikace jednotlivých částí.....	44
5.3.1	Digitální potenciometr MAX5483 a MAX5481	44
5.3.2	MCU STM8AF52A9TDY	45
5.3.3	Komunikace digitálních potenciometrů s MCU	45
5.3.4	8-bitový posuvný registr HCT595A	46
5.3.5	Vysokorychlostní CAN vysílač TJA1042T	47
5.3.6	Napěťový regulátor LM2940CT-5.0.....	48
5.3.7	Optočlen s fototranzistorem FOD817	48
6	ZÁVĚR	50
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51
	PŘÍLOHY	52

Seznam symbolů

I ² C	(International-Integrated Circuit) Sériová sběrnice
CAN	(Controller Area Network) Sběrnice pro průmyslové komunikační sítě
CAN FD	(CAN Flexible Data-Rate) Nová verze protokolu pro CAN sběrnici
CLK, SCLK(INC)	Hodinový signál
CS	(Chip Select) Signál pro adresaci slave obvodu
DIN	(Data In) Přenos dat
FIU	(Fail Insert Unit) Jednotka pro vkládání chyb
HIL	(Hardware In the Loop) Testování hardwaru ve smyčce
HSS	(High Side Switch) Spínač, který ventil odpojuje od VPS.
ISO	(International Organization for Standardization) Mezinárodní organizace pro normalizaci
kB	Jednotka velikosti paměti
kHz	Jednotka frekvence
LSS	(Low side switch) Spínač, který ventil uzemňuje
Mbit/s	Megabit za sekundu, jednotka přenosové rychlosti
MCU	Mikrokontroler
MHz	Jednotka frekvence
MISO	(Master In, slave Out) Přenos dat
MOSI	(Master Out, slave In) Přenos dat
OCG	(Output Current Ground) Připojení LSS k ventilu.
PID	Regulátor složený z proporcionalní, integrační a derivační části
PWM	(Pulse Width Modulation) Pulzně šířková modulace
RAM	(Random Acces Memory) Typ paměti
SAE	(Society of Automotive Engineers) Organizace pro standardizaci
SPI	(Serial Peripheral Interface) Sběrnice pro sériovou komunikaci
SPI/UD	Signál pro výběr rozhraní (SPI nebo UD)
TCU	(Transmission Control Unit) Řídící jednotka převodovky
Up/down	Rozhraní
USART	Sériové rozhraní
VPS	(Voltage Power Supply) Napájecí napětí pro ventily

Úvod

Tato diplomová práce vychází z požadavků firmy ZF Engineering Plzeň s.r.o., která se zabývá vývojem a testováním automatických převodovek. Konkrétně je požadována elektronická náhrada elektromagnetického ventilu pro proces testování řídicích jednotek automatických převodovek.

Tímto tématem se již zabývala diplomová práce *Electrical Load Simulation for test Environment*, kterou vypracoval Ömer Mumcu [1]. Tato původní práce byla zaměřena spíše na možnosti simulace ventilu za pomoci mikrokontroleru. Vzhledem k dosaženým výsledkům je ze strany ZF požadováno prozkoumání možnosti nahrazení ventilu za pomoci elektronického modelu.

Tato práce tedy navazuje na práci původní, ale klade si za cíl dosáhnout elektronické náhrady zpětné vazby od elektromagnetického ventilu využitím analogového obvodu, který byl v původní práci uveden stručně, pouze jako jedna z možností.

Práce je rozdělena do 5 částí. V první části je vysvětlen proces testování na zařízeních HIL a jsou zde uvedeny a zdůvodněny požadavky, které musí elektronický model splňovat. Dále jsou zde vysvětleny používané zkratky a výrazy.

Druhá část práce se zabývá popisem samotných reálných elektromagnetických ventilů, jejich vlastnostmi, parametry, funkcemi a druhy.

Na začátku třetí kapitoly jsou uvedeny požadavky a očekávané výhody elektronického modelu. Dále se tato kapitola zabývá původním elektronickým modelem, jeho simulacemi, realizací a ověření funkčnosti měřením na HILu. Na závěr kapitoly je podrobněji vysvětleno zpracovávání signálu AN_I_AIM mikrokontrolerem TCU.

Čtvrtá kapitola popisuje důvody a výhody vlastního řešení elektronického modelu. Je zde opět popsána realizace, simulace tohoto modelu. Na závěr kapitoly je zhodnoceno měření na HILu.

Pátá kapitola se zabývá návrhem funkčního modelu, který se skládá z elektronického modelu vlastního návrhu a obvodů umožňující vzdálenou konfiguraci parametrů obvodu.

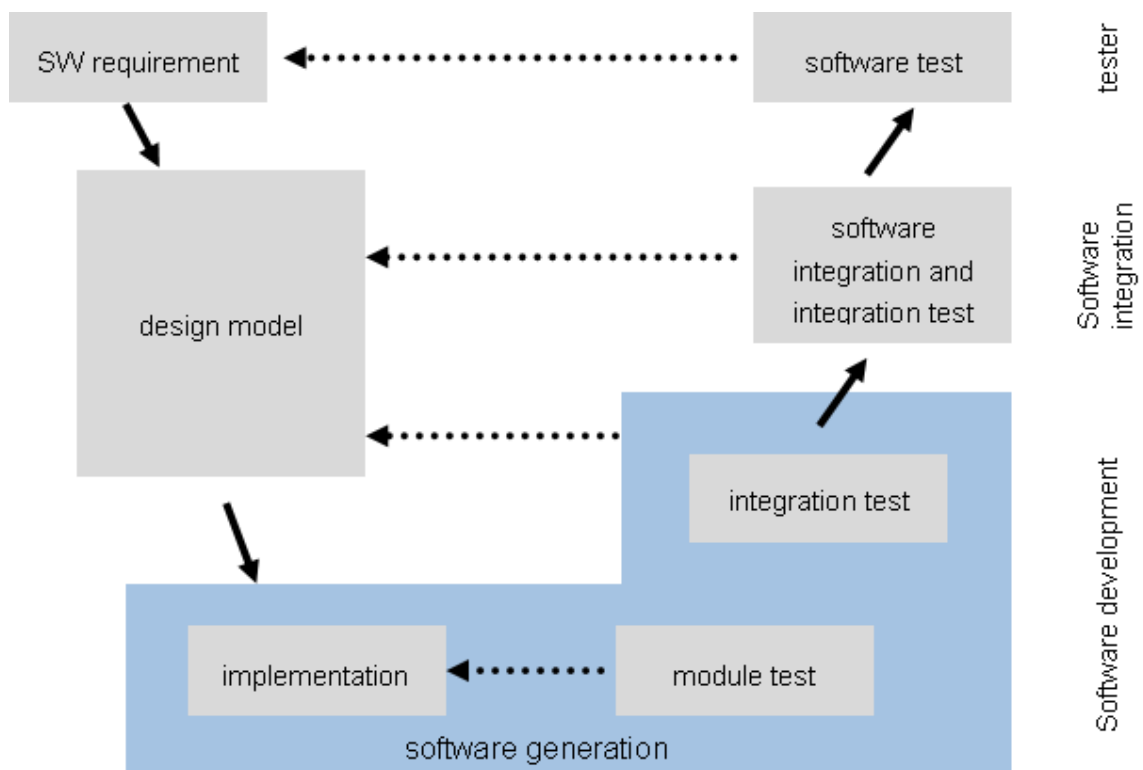
1 Proces testování

1.1 Cíl testování

Software pro automatické převodovky musí být otestován, aby byly ověřeny požadované funkce a provozuschopnost. Proces testování může být rozdělen na následující kroky:

- Modulové testy – testována implementace
- Integrační testy – testováno rozhraní mezi jednotlivými moduly
- Softwarové testy – testován kompletní software, včetně daného nastavení, oproti konkrétním požadavkům.

Proces vývoje a testování lze znázornit tzv. „V“ diagramem na obrázku 1.



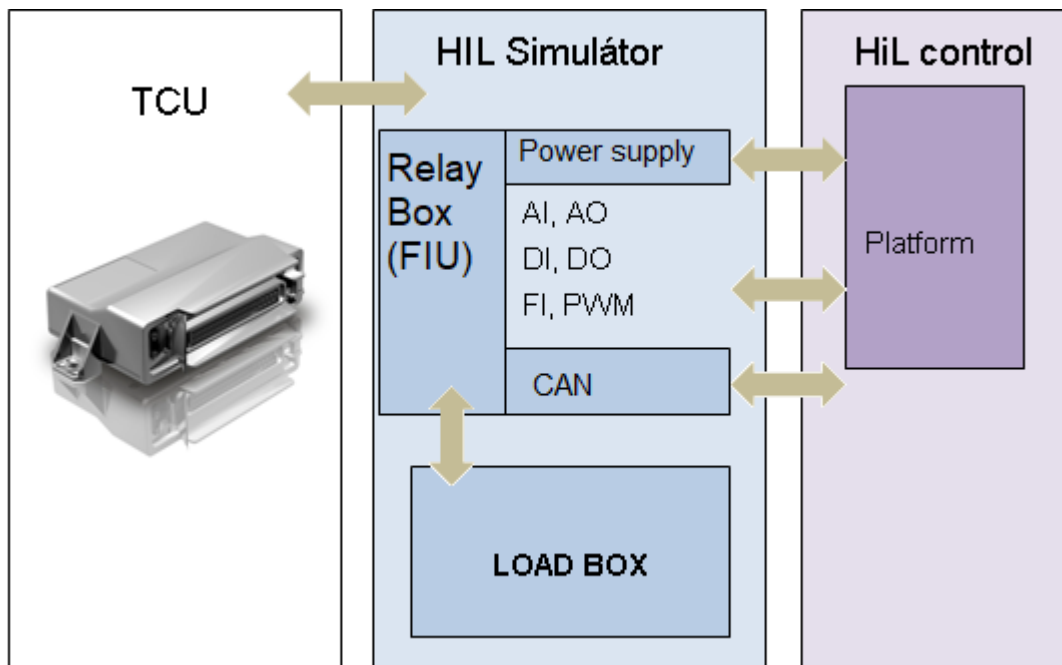
Obrázek 1: V diagram

Vývojový proces začíná specifikací softwarových požadavků „SW requirement“. Na základě těchto požadavků je vytvořen návrh budoucího softwaru „design model“. Softwarový vývojář implementuje jednotlivé části (moduly) tohoto návrhu „implementation“. Funkčnost každého modulu bez závislostí na ostatních vývojář otestuje na tzv. modulových testech „module test“. Integračními testy „integration test“ pak otestuje závislost na ostatních modulech. Takto implementovaný a ověřený software je integrován do systému softwarovým integrátorem. Softwarový integrátor zároveň pro tento

system vytvoří integrační testy „software integration and integration test. Softwarový tester vytvoří na základě požadavků zákazníka „SW requirement“ softwarové testy „software test“.

1.2 Testovací prostředí

Softwarové testy jsou realizovány na systému HIL (zkratka Hardware in the loop). Cílem těchto systémů je simulovat reálný stroj v provozu. To znamená nastavovat hodnoty na simulovaných čidlech (například napětí, proud, frekvence apod.) tak, aby bylo možné dosahovat všech jízdních stavů daného stroje. O generování těchto hodnot se stará matematický model v realtime core simulátoru. Blokové schéma testovacího prostředí je zobrazeno na obrázku 2.

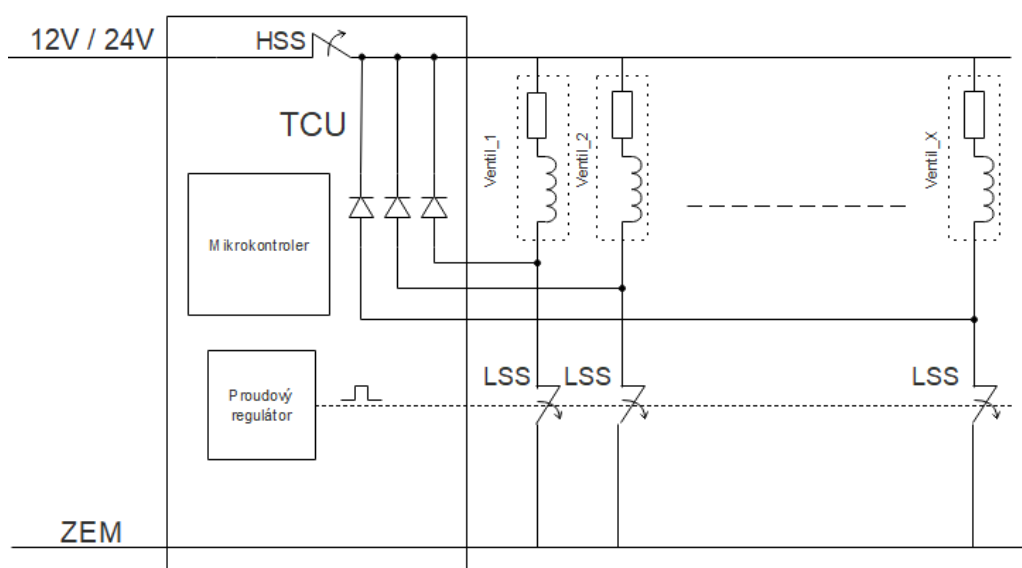


Obrázek 2: Testovací prostředí

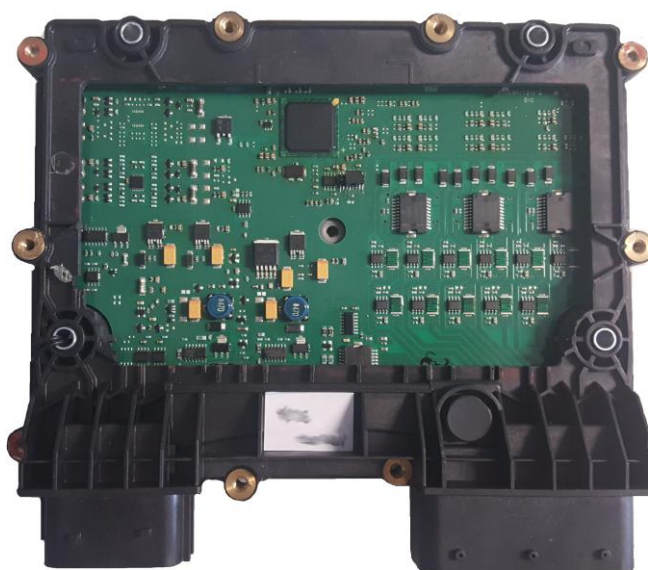
Testovací prostředí slouží k ověření funkčnosti řídicí jednotky. Řídicí jednotka musí vykonávat správnou funkci i během poruchového stavu. Uživatel sleduje a ovládá simulace prostřednictvím diagnostického programu Canape. Tento program umožňuje nastavovat a sledovat proměnné řídicí jednotky TCU. Uživatel tak například může zadat požadovaný proud ventilem, může vypnout napájení ventilu, může simulovat zkrat na baterii či na zem. Je tedy nezbytné, aby se elektronický model choval jako reálný ventil i v poruchových stavech. Poruchovými stavy se rozumí zkrat na baterii či na zem nebo odpojení napájení (VPS). Poruchové stavy se do obvodu vkládají a simulují prostřednictvím Relay Boxu.

1.2.1 TCU

TCU je zkratka Transmission Control Unit (řídící jednotka automatické převodovky). TCU obsahuje obvody pro řízení ventilů. Tento obvod tvoří proudový regulátor, snímač proudu, snímač střední hodnoty proudu a snímač signálu PWM. Na základě rozhodovacích algoritmů proudový regulátor řídí střidu PWM. Tento signál ovládá tzv. low side switch, jedná se o mosfet, který spíná ventil k zemi. Toto zapojení je zobrazeno blokově na obrázku 3. Konkrétní funkce jednotlivých snímačů jsou popsány v kapitole 3.2.



Obrázek 3: Obecné schéma snímačů řídicí jednotky pro řízení ventilu



Obrázek 4: TCU, řídicí jednotka

1.2.2 dSPACE

Je univerzální hardwarový simulátor, který nabízí komplexní možnosti přizpůsobení a konfigurace generovaných signálů. Jedná se o real time simulátor. To znamená, že v dané real-time periodě (typicky 1ms), jsou přečteny všechny výstupní signály z TCU, na základě matematického modelu jsou z těchto hodnot vypočítány simulační hodnoty a ty jsou nastaveny jako vstupní signály pro TCU. Tyto simulační hodnoty je možné ovlivňovat pomocí „HIL control – platform“. Lze vkládat uživatelské hodnoty a tím simulovat konkrétní jízdní stavy.



Obrázek 5: dSPACE simulátor

HIL simulátor se skládá z řídicího počítače, modulů umožňujících komunikaci s TCU po dané sběrnici (typicky CAN) a vstupně výstupních karet. Tyto karty mohou být dle požadovaného typu signálu analogové, digitální nebo frekvenční. dSPACE simulátor je na obrázku 5.

1.2.3 Relaybox (FIU)

Anglicky označováno jako Fail insertion unit. Všechny signály řídicí jednotky, včetně signálů ovládající ventily, jsou vedeny přes relé box. Tato část HIL simulátoru slouží k vkládání elektrických chyb (zkrat na zem, zkrat na napájení, zkrat mezi signály, rozpojení) na jakýkoliv signál řídicí jednotky. Simulace reálného ventilu musí být proti těmto chybám odolná a odezva na tuto chybu musí být stejná jako u reálného ventilu.

1.2.4 Loadbox

Účelem loadboxu je poskytovat reálnou nebo simulovanou zátěž pro TCU. Zátěží jsou myšleny obvody či akční členy, které jsou TCU řízeny. Pro účely testování řídicích jednotek automatických převodovek jsou tyto boxy složeny z jednotlivých elektromagnetických ventilů. Každý loadbox zpravidla vychází z konkrétního projektu. K otestování různých projektů je tak nutné konstruovat různé loadboxy s různými ventily. To vede k zvýšeným nárokům na prostor pro jeden HIL simulátor a znesnadňuje automatickou rekonfiguraci mezi jednotlivými projekty. Z těchto důvodů je snaha nahradit reálný ventil elektronickým modelem. Bylo by tak umožněno celý proces testování řídit vzdáleně. Dosud je nutná fyzická přítomnost z důvodu přepojování konektorů. Cílem této práce je tak navrhnout univerzální elektronický model, jehož parametry lze vzdáleně

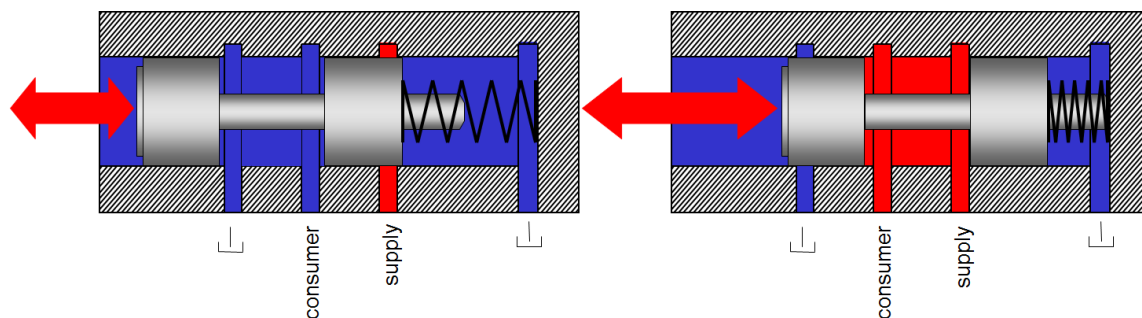
nastavovat. Předložený loadbox EP20 je na obrázku 6.



Obrázek 6: Loadbox EP20

2 Elektromagnetický ventil

Elektromagnetický ventil, někdy označovaný jako solenoidový, má řadu využití. Jedním z nich je například uzavírání a otevírání průtoku kapalin či plynů. Skládá se ze solenoidu s pohyblivým jádrem. Je-li na svorky cívky přivedeno napětí, protéká cívkou proud, který vytváří ve svém okolí magnetické pole. Jádro je působením tohoto pole vytlačováno silou, která je úměrná poloze jádra a velikosti proudu procházejícího cívkou. Některé ventily obsahují navíc pružinu, která působí proti jádru. V okamžiku, kdy cívkou neprochází proud je jádro zatlačeno pružinou zpět dovnitř. Tento typ ventilu je na obrázku 7.



Obrázek 7: Princip uzavírání a otevírání průtoku

2.1 Typy ventilů

V automatických převodkách se používají především on/off ventily a proporcionální typy ventilů. Ventily liší zejména jmenovitým napětím, nejčastěji se setkáváme se jmenovitým napětím 12V a 24V. Dále se mohou lišit jmenovitým proudem, který je dán odporem vinutí ventilu.

2.1.1 On/off ventily

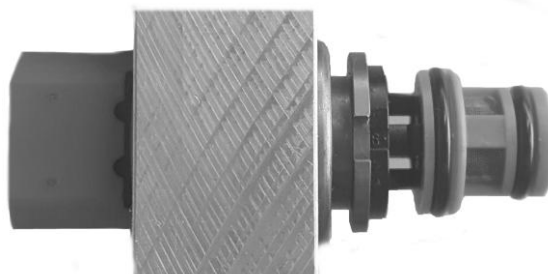
Jsou to ventily, které mají definovány zejména dva stavy – sepnuto a rozepnuto. Najdeme je například v robotizovaných manuálních převodkách, tam kde se nevyplatí planetová převodovka, například traktory, autobusy. U planetových převodovek je najdeme také. Mají zde například funkci zablokování kol. Ovládají se pouze připnutím jmenovitého napětí. Na obrázku 8 je zobrazen ventil typu on/off.



Obrázek 8: on/off ventil

2.1.2 Proporcionální ventily

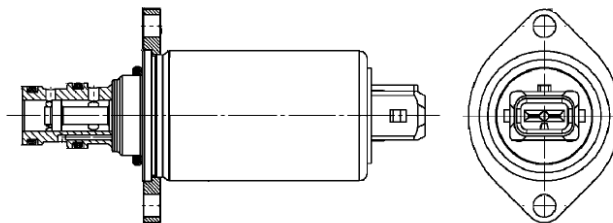
Tento typ ventilu má za úkol spínání spojek či přidávání převodu. Jde tedy o ventil, se kterým se pracuje spojitě. Podle střídavy pulzně šířkové modulace se definuje poloha jádra. Tato poloha určuje rychlost otevření či zavření odpovídající spojky. Na obrázku 9 je zobrazen proporcionální typ ventilu.



Obrázek 9: proporcionální ventil

2.2 Parametry reálných ventilů

K dispozici jsem dostal ventil pod označením 0501327426, na obrázku 10 a loadbox EP20. Nejdříve jsem změřil parametry samostatného ventilu. Tento ventil je proporcionální a jeho jmenovité napětí je 12V.



Obrázek 10: Ventil 0501327426

Pro další část práce jsou nezbytné tyto parametry:

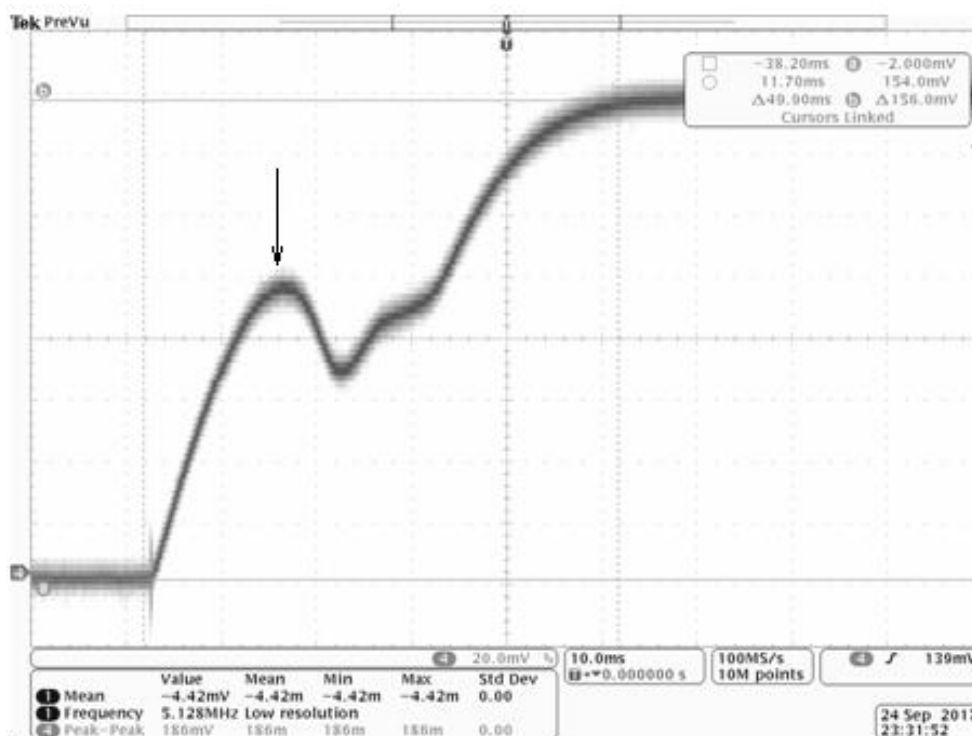
- Jmenovité napětí
- Jmenovitý odpor
- Frekvence PWM
- Indukčnost

K ventilu byly dodány některé technické údaje, indukčnost zde uvedena nebyla. Odpor byl změřen multimetrem. Indukčnost se dá měřit několika způsoby. Nejprve byla změřena pomocí RLC metru. Druhým způsobem je připojit ventil trvale na 12V a změřit dobu přechodného děje a z časové konstanty dopočítat indukčnost. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 1. Problémem však může být poloha jádra a pružina, která působí na jádro ve směru do ventilu a brání tak jeho vysunutí. Jak se tyto vlastnosti projevují, je vysvětleno na následujícím obrázku 11. Šipka ukazuje na část křivky, kdy se začne projevovat pohyb jádra směrem ven z ventilu. Tím se mění hodnota indukčnosti, jelikož je závislá na permeabilitě jádra. Křivka tedy nemá tvar exponenciály jako je tomu u obyčejného sériového RL členu. Pro účely simulace nebude nutné simulovat i tento typ nelinearity. Z této křivky lze stanovit časovou konstantu τ .

$$5\tau = 50\text{ms} \quad (2.2.1)$$

$$\tau = 10\text{ms} \quad (2.2.2)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \rightarrow L = \tau * R = 0.01 * 5.2 = 52\text{mH} \quad (2.2.3)$$



Obrázek 11: Křivka proudu po připojení ventilu k 12V

Tabulka 1: Parametry ventilu 0501327426

	Udávané hodnoty	Naměřené hodnoty
Jmenovité napětí	12V	-
Jmenovitý odpor	5,2 Ω	5,25
Indukčnost	Neuvedena	52mH
Frekvence PWM	200Hz	-

Použité přístroje:

Multimetr Keysight U125B TRUE RMS

Agilent U1732A Handheld LCR Meter

Oscilloscope MDO4054-6

K dispozici pro měření byl dále loadbox EP20, který obsahuje 5 různých ventilů. Každý z nich má variantu pro jmenovité napětí 12V i 24V. V tomto loadboxu jsou ventily označovány jako OCG (Output Current Ground). Výsledné hodnoty z měření těchto ventilů jsou k dispozici v tabulce 2 a 3. Hodnoty označené jako $L_{\text{naměřené}}$ jsou hodnoty změřené pomocí RLC metru, tyto hodnoty byly odčítány při frekvenci 100Hz, 1kHz a 10kHz. Hodnoty označené jako $L_{\text{vypočtené}}$ jsou hodnoty dopočítané z přechodového děje ventilu při připojení k 12V nebo 24V. Všechny tyto ventily jsou proporcionální.

Tabulka 2: Parametry 12V ventilů loadboxu EP20

Napětí	Označení	Typ ventilu	fPWM[Hz]	R _{vedené} [Ω]	R _{naměřené} [Ω]	
12V	AIM1	Ovládání tlaku	200	2,4	2,53	
	AIM4	Odpojení hydromotorů	200	3,7	4,15	
	AIM7	Ovládání dopředného směru	200	5,5	5,76	
	AIM8	Ovládání zpětného směru	200	5,5	5,76	
	AIM9	Regulace hydromotoru B	200	2,64	2,71	
	AIM10	Regulace hydromotoru A	200	2,64	2,71	
Napětí	Označení	L _{naměřené} 100Hz[mH]	L _{naměřené} 1kHz[mH]	L _{naměřené} 10kHz[mH]	τ[s]	L _{vypočtené} [mH]
12V	AIM1	12,8	5	1,557	4,336E-03	10,9701
	AIM4	56,64	24,31	9,21	3,180E-02	131,9700
	AIM7	35,04	15,37	5,853	7,200E-03	41,4720
	AIM8	35,09	15,35	5,84	7,200E-03	41,4720
	AIM9	19,32	8,08	3	1,108E-02	30,0268
	AIM10	19,4	8	3,01	1,108E-02	30,0268

Tabulka 3: Parametry 24V ventilů loadboxu EP20

24V	AIM1	Ovládání tlaku	200	12	12,3	
	AIM4	Odpojení hydromotorů	200	14,8	16,3	
	AIM7	Ovládání dopředného směru	200	21,7	22,34	
	AIM8	Ovládání zpětného směru	200	21,7	22,32	
	AIM9	Regulace hydromotoru B	200	10,3	10,43	
	AIM10	Regulace hydromotoru A	200	10,3	40,41	
24V	AIM1	60,95	24,23	8,045	3,500E-03	43,0500
	AIM4	21,81	79,78	38,62	2,848E-02	464,2240
	AIM7	131,61	56,13	21,29	8,760E-03	195,6984
	AIM8	13,86	55,82	21,27	8,760E-03	195,5232
	AIM9	76,53	31,44	11,806	7,560E-03	78,8508
	AIM10	75,05	31,67	11,94	7,560E-03	305,4996

Z naměřených hodnot bylo usouzeno, že metoda měření indukčnosti pomocí RLC metru není vyhovující, jelikož hodnoty se výrazně mění se změnou frekvence. Vychází se tedy z indukčnosti, která byla dpočítána z proudové křivky při připojení ventilu na 12V. Prozatím není důležité znát přesnou hodnotu indukčnosti. Tyto hodnoty byly změřeny pro představu, abychom věděli, s jakým rozsahem hodnot budeme přibližně pracovat. Je nezbytné, aby byl navrhovaný obvod univerzální a umožnil změny u jednotlivých prvků obvodu a tím dokázal napodobit široké spektrum reálných ventilů. Dalším využitím je modelování simulací v LTspice, kde je reálný ventil nahrazen sériovým RL obvodem a je porovnáván s navrhovaným elektronickým obvodem. Důležité je, aby byla stejná doba náběhu proudu při změnách střídání PWM a také ustálená hodnota. Po dosažení dostatečné shody mezi průběhy budou použity nastavené hodnoty prvků a budou ověřeny na reálném

obvodu.

Porovnání probíhá na HILu a konkrétní TCU. Nejdříve je připojen k VPS a OCG reálný ventil. Jednotce je prostřednictvím diagnostického softwaru sdělena hodnota proudu, kterou má na výstupu pro konkrétní ventil nastavit. Na osciloskopu je sledován průběh proudu reálným ventilem. Konkrétně ustálená hodnota, doba ustálení a tvar proudové křivky. Zároveň jsou prostřednictvím diagnostického softwaru sledovány hodnoty, které zpracovala TCU. Tento postup je opakován a namísto reálného ventilu je k VPS a OCG připojen elektronický model.

Výstupy z tohoto měření jsou průběhy proudu elektronickým modelem a reálným ventilem po zadání požadované hodnoty proudu. Proudů jsou v ustáleném stavu. Důležité je také ověřit, při jaké střídě PWM proudový regulátor dosáhl požadované hodnoty proudu. Cílem proudového regulátoru je dosáhnout požadovaného proudu. Cílem elektronického modelu je, aby jej dosáhl při stejné střídě PWM a stejné době náběhu jako reálný ventil.

Pro měření osciloskopem jsou z TCU vyvedeny signály ze snímačů. Celkem má jednotka tři snímače, pomocí kterých diagnostikuje stav ventilu. Konkrétně jsou to snímače uC_IN_U_AIM, AN_U_AIM a AN_AIM. Se třetím pracuje zejména proudový regulátor. Na tomto snímači je měřen průběh proudu reálným ventilem. Přesněji řečeno je měřeno na výstupu integrovaného obvodu INA271. Tento rozdílový zesilovač zpracovává napětí ze snímacího odporu jednotky, kterým protéká měřený proud. INA271 se obvykle používá ke sledování proudu. Pracuje se zesílením 20V/V. Na výstupu generuje napěťový signál v rozsahu 0 – 5V, který odpovídá snímanému proudu. Měřený proud je takto připraven pro zpracování A/D převodníkem na vstupu mikrokontroleru TCU. Před vstupem do A/D převodníku signál prochází ještě RC filtrem typu dolní propust. Sondu osciloskopu umísťuji až za tento filtr. Společně s tímto signálem měřím na osciloskopu průběh napětí na snímači uC_IN_U_AIM. Zde si jednotka měří a ověřuje střidu PWM. TCU tak získá informaci, zda byl proud správně nastaven. TCU ověří, zda proud dosáhl požadovaných hodnot a při jaké střídě jej dosáhl. Na základě těchto informací provádí diagnostiku funkčnosti.

3 Realizace elektronického modelu ventilu

3.1 Požadované vlastnosti elektronického obvodu

Průběhy signálů zpětné vazby (měřené přímo jednotkou TCU) musí být co nejvíce shodné s průběhy signálů při zapojení s reálným ventilem:

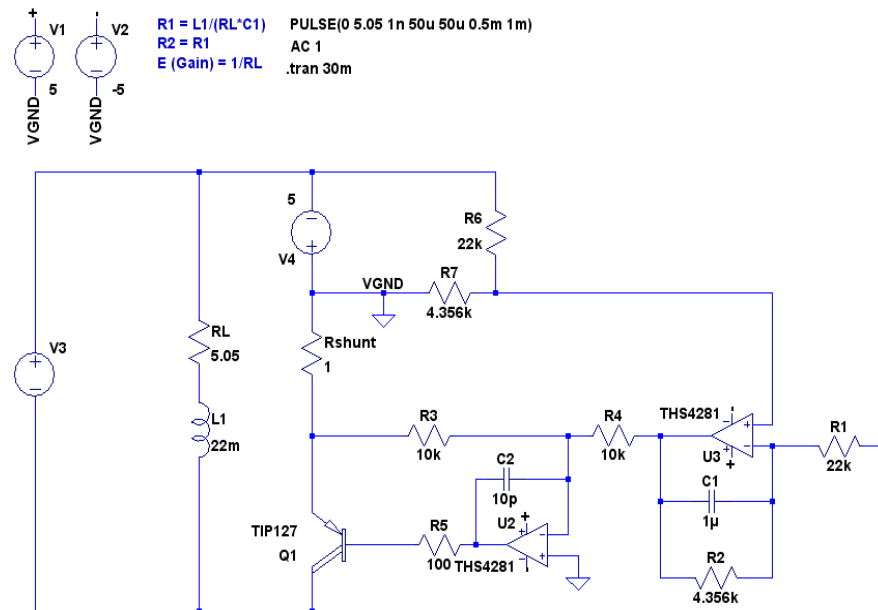
- AN_I_AIM – střední hodnota proudu ventilem
 - Ustálená hodnota
 - Doba ustálení
- AN_U_AIM – střední hodnota napětí na LSS (mezi ventilem a GND)
 - Ustálená hodnota
 - Doba ustálení
- Proudová zatížitelnost 0 – 2A
- Provozní napětí 0 – 32V (Typicky 12V nebo 24V)
- Odolnost proti zkratům (na zem nebo na napájecí napětí VPS)
- Stejná reakce na zkraty (na zem nebo na napájecí napětí VPS)
 - Zkrat může nastat v místě připojení ventilu – tzn. mezi ventilem a LSS
 - Zkrat na napájecí napětí VPS
 - AN_I_AIM = téměř 0mA
 - AN_U_AIM = VPS
 - uC_IN_U_AIM = Přes LSS začne protékat I_{max} – zasáhne interní ochrana LSS a odpojí VPS.
 - Zkrat na zem
 - AN_I_AIM = jmenovitý proud ventilem, odpovídající 100% duty.
 - AN_U_AIM = 0
 - uC_IN_U_AIM = 0
- Možnost simulovat běžně používané ventily v automobilovém průmyslu
- Možnost vzdálené rekonfigurace modelu (nejlépe přes CAN sběrnici)

3.2 Očekávané výhody elektronického obvodu

- Zjednodušení a urychlení procesu testování.
- Zjednodušení zavedení nového projektu, či projektové varianty (sada elektromagnetických ventilů). Nebude nutné stavět nový loadbox, bude pouze vytvořena nová konfigurace pro modely ventilů.
- Jednoduchá vzdálená rekonfigurace mezi projekty, či jejich varianty. Aktuálně na jeden HIL simulátor připadá cca deset různých loadboxů. Při rekonfiguraci HIL simulátoru je nyní nutný jediný manuální zásah – fyzické přepojení odpovídajícího loadboxu. Všechny ostatní parametry je možné změnit v modelu HIL platformy.
- Odpadne nutnost provádění testů v klimakomoře (-40°C , $+120^{\circ}\text{C}$) pro posouzení vlivu změny odporu vinutí elektromagnetického ventilu na chování softwaru. Změna odporu vinutí ventilu může být na modelu ventilu simulována – pro účely testů je dostačující ustálený stav, tzn. konkrétní hodnota odporu pro konkrétní teplotu.
- Úspora místa. Zhruba deset stávajících loadboxů by mohlo být nahrazeno jednou sadou modelů ventilů. Stávající loadboxy obsahují maximálně 16 proporcionálních a 8 on/off ventilů.

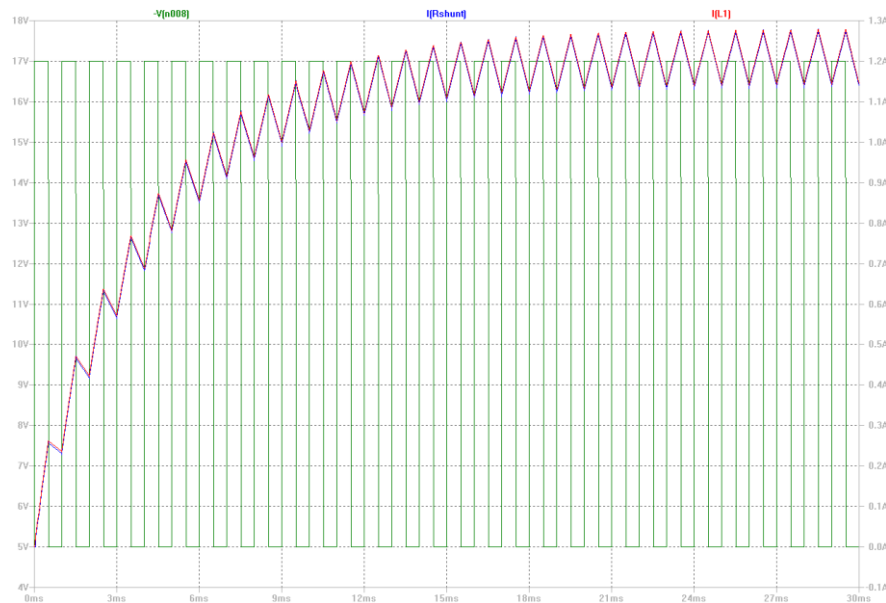
3.3 Původní elektronický model [1]

Obvod navržený v předchozí práci se skládal z PNP tranzistoru zapojeného se společným kolektorem a dvou integrátorů. Na obrázku 12 vidíme zapojení ze simulačního programu LTspice. Obvod je napájen pulzním zdrojem, který nám zde vytváří řídicí PWM signál. Dále je zde připojena náhrada reálného ventilu, která je reprezentována sériovým spojením R_L a L_1 , následuje zdroj V_4 pro napájení operačních zesilovačů. V sérii s elektronickým modelem je Rshunt. Ten slouží ke snímání procházejícího proudu, který je dále zpracován integrátorem a operačním zesilovačem. Integrátor má funkci napodobení akumulování energie, operační zesilovač slouží pro ovládání PNP tranzistoru a tím k řízení procházejícího proudu. Modrý text slouží pouze jako komentář, černý text je zápis funkce pulzního zdroje a nastavení analýzy. Zdroj V_3 je tedy pulzní, v závorce následují parametry, počáteční hodnota napětí je 0V, konečná hodnota je 5,05V, zpoždění spuštění je 1ns, doba náběžné hrany je 50 μs , doba sestupné hrany je stejná 50 μs , předposlední hodnota udává čas, kdy je hodnota napětí rovna 5,05V a poslední hodnota udává dobu periody. Simulace je transientní, nastavený čas je 30ms.



Obrázek 12: Schéma analogového obvodu [1]

Po zadání tohoto schématu do simulačního programu a po spuštění simulace, vše působilo, že se elektronický model chová stejně jako sériové spojení odporu R_L a cívky L_1 . Na dalším obrázku 13 vidíme průběh proudu na odporu $I(R_{shunt})$ a $I(L_1)$ v závislosti na řídicím PWM signálu. Průběhy proudu sériového spojení odporu R_L a cívky L_1 a elektronického modelu jsou totožné.



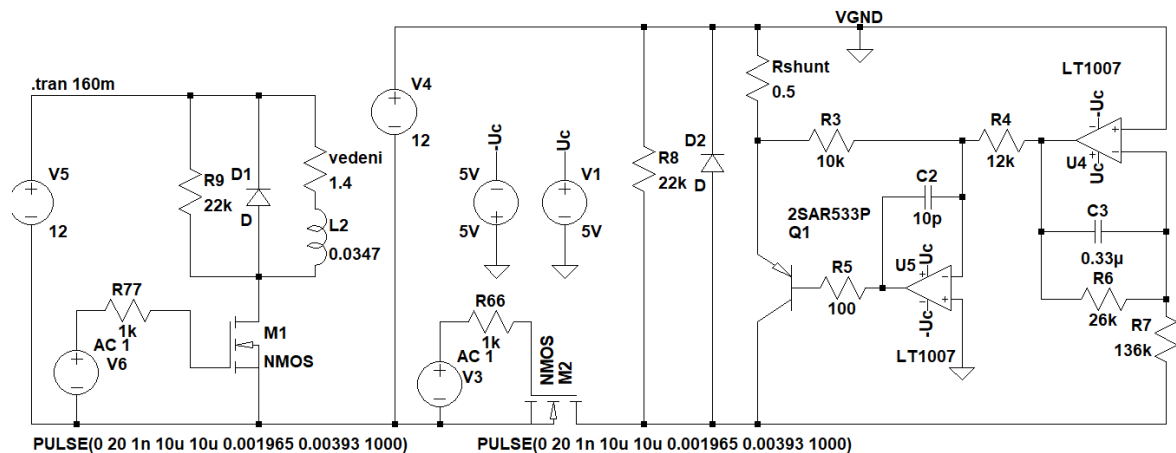
Obrázek 13: Průběhy proudů [1]

Průběhy proudu se dobře definovaly pomocí změn hodnot prvků C_1 , R_1 a R_4 . Kondenzátor s odpory definoval dobu ustálení a konečnou ustálenou hodnotu. Tento obvod tak představuje uspokojivé řešení. Po úvaze nad tímto zapojením, se postupně objevovaly

jeho velké nedostatky. Obvod funguje správně jen v rámci nastavené simulace. Prvním problémem je, že v reálném zapojení je obvod připojen k napětí +12V trvale a je spínán k zemi. Odpořem R_{shunt} by tak neměl téct žádný proud v čase, kdy LSS obvod rozpojí. Křivka proudu indukčnosti L_1 je správná, proud cívky se nemůže měnit skokově. Na řídicí jednotce se proud cívky v okamžiku rozepnutí obvodu uzavírá přes zpětnou diodu. Ta v této simulaci není obsažená. A tak může cívka L_1 ovlivňovat obvod modelu. Výsledky ovlivňuje i nesprávně umístěný zdroj V_4 v sérii s pulzním zdrojem. PWM signál zůstane sice zachován, je ale posunut o 5V. Je možné, že snímač PWM by mohl detekovat chybu a zapojení by se takto nedalo realizovat. Bylo nezbytné obvod přepracovat tak, aby odpovídal reálnému zapojení.

3.4 Úprava původního elektronického modelu

Aby bylo předejito chybám a simulace byla co nejvěrnější realitě, byl prostudován znovu proces testování a schéma řídicí jednotky. Vycházelo se z již navrženého obvodu a jeho následné úpravy. Výsledný obvod je na následujícím obrázku 14.



Obrázek 14: Schéma po úpravě původního obvodu včetně náhrady reálného ventilu

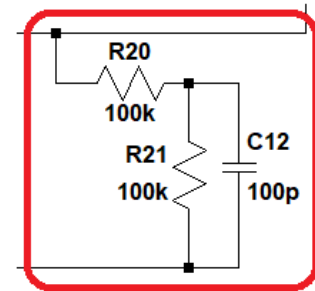
Zapojení na obrázku 14 neobsahuje filtry osazené na TCU, které byly pro úplnost doplněny do schématu v simulačním programu. Schéma obvodu s filtry je přiloženo v příloze na obrázku 49. Přítomnost filtrů v obvodu nemá na výsledek simulace znatelný vliv. Pro vysvětlení funkce obvodu plně postačuje schéma bez filtrů.

Do obvodu byly doplněny chybějící zpětné diody, které jsou na TCU osazené. Aby se simulace co nejvíce blížila realitě, je obvod trvale připojen k +12V (VPS). Spínán je proti zemi (OCG) přes MOSFET. Ten je ovládán pulzním zdrojem. V levé části je schéma se zjednodušenou náhradou reálného ventilu, která slouží pro porovnání simulovaných průběhů. V pravé části je obvod elektronického modelu. Operační zesilovače jsou napájené

symetricky $-5V$ a $+5V$. Toto napětí je vztaženo proti $+12V$ (VPS), které slouží jako referenční napětí pro elektronický model. Jelikož se v automobilech používá spínání proti zemi a v případě TCU tomu není jinak, je nemožné použít zemní potenciál jako referenční napětí. V následujících podkapitolách jsou popsány snímače TCU. Jejich umístění v obvodu je zobrazeno v příloze na obrázku 49.

3.4.1 Filtr pro snímač signálu PWM uC_IN_U_AIM

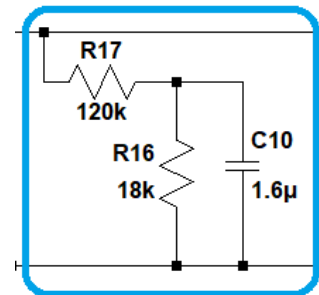
Na obrázku 49 je označen červeně. Signál z tohoto filtru slouží řídicí jednotce k ověření funkčnosti a k měření střídý PWM signálu, kterou nastavil proudový regulátor. Dále slouží k vyhodnocování případných chybových stavů signálu, například zkratu na jiný ventil.



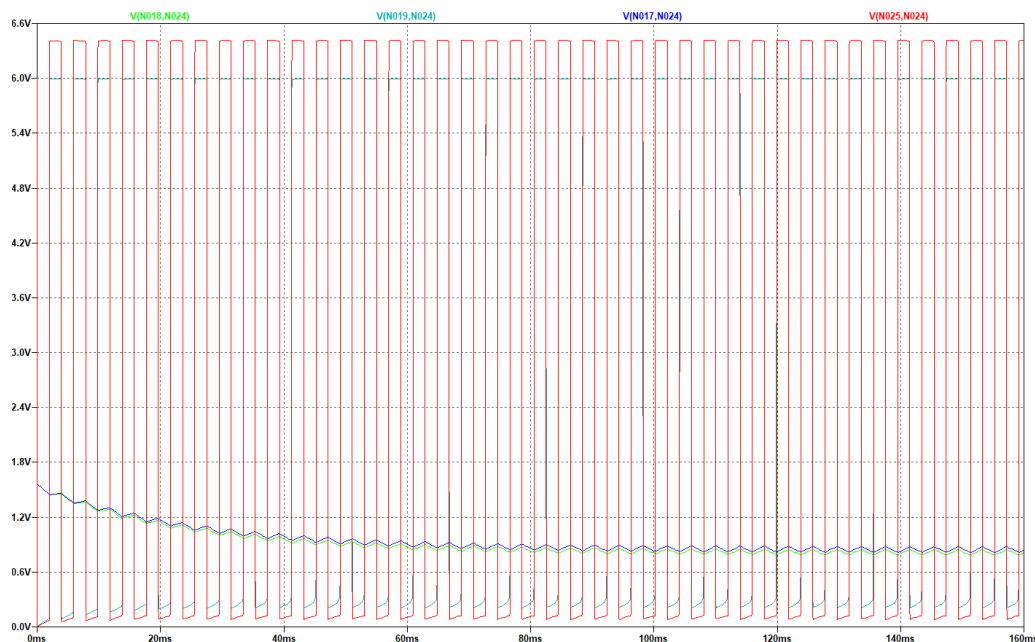
Obrázek 15: Filtr snímače PWM

3.4.2 Filtr pro snímač střední hodnoty AN_U_AIM

Na obrázku 49 je zobrazen modře. Signál z tohoto filtru slouží řídicí jednotce k elektrické diagnostice, to znamená vyhodnocování případných chybových stavů signálu (zkrat na zem, zkrat na napětí baterie).



Obrázek 16: Filtr snímače střední hodnoty



Obrázek 17: Porovnání výstupu ze snímačů 3.2.1 a 3.2.2 mezi náhradou reálného ventilu a elektronickým modelem

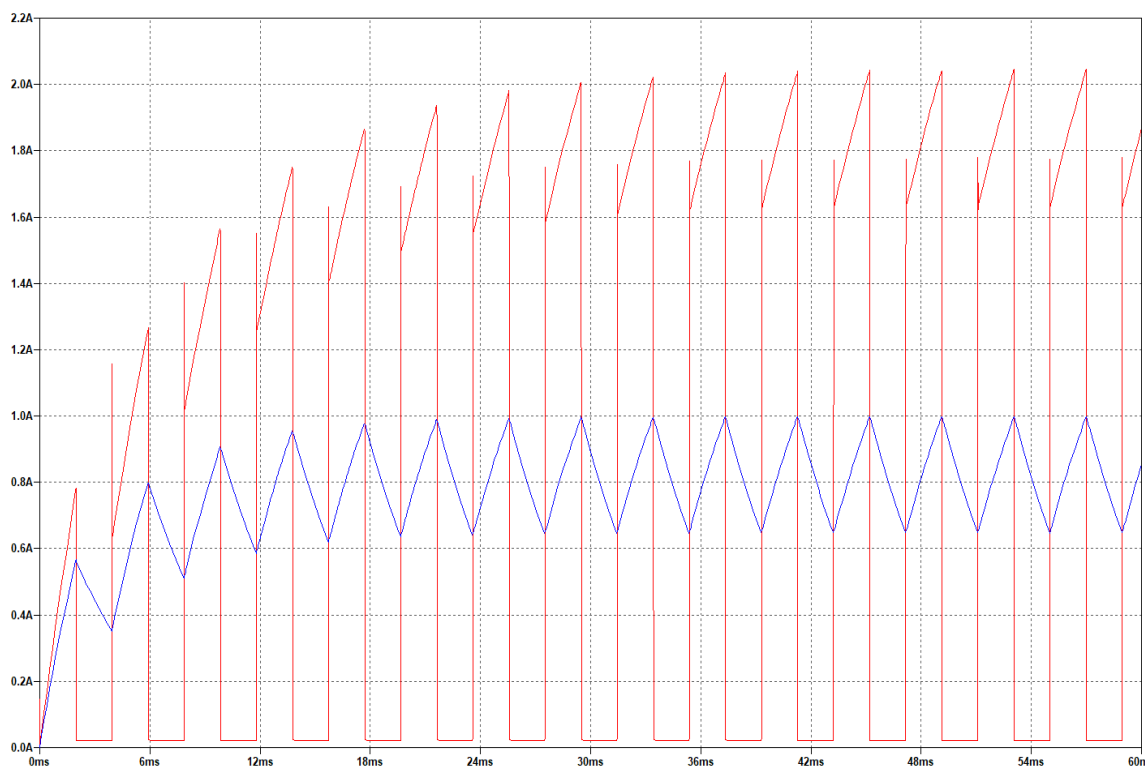
Červený a modrý průběh jsou signály ze snímačů PWM uC_IN_U_AIM a AN_U_AIM pro elektronický model. Tmavě zelený a světle zelený průběh signálu pak odpovídá stejným snímačům pro sériové spojení R_L a L_2 . Z obrázku 17 lze usuzovat, že elektronický model neovlivňuje signál PWM uC_IN_U_AIM a hodnoty na snímači střední hodnoty AN_U_AIM jsou také téměř identické. Zde tedy elektronický model působí jako dokonalá náhrada. Otázkou tedy zůstává, jak se elektronický model projeví na snímači proudu.

3.4.3 Snímač proudu (AN_I_AIM)

Na obrázku 49 je zobrazen zeleně. Hodnota proudu způsobí na rezistoru $R_{shuntTCU}$ úbytek napětí. Toto napětí je zpracováno a přivedeno na A/D převodník mikrokontroleru TCU. Tato hodnota je důležitá zejména pro proudový regulátor, jelikož je to jeho zpětná vazba. Proudový regulátor má tak informaci o aktuálním proudu ventilu a pomocí změn střídý PWM signálu může proud měnit a tím ovládat ventil.

3.4.4 Výsledek simulace upraveného obvodu

Výsledný průběh křivek vidíme na následujícím obrázku 18. Červeně znázorněný průběh je proud rezistorem R_{shunt} , tedy elektronickým modelem. Zde je už fyzikálně správný průběh proudu. Když je obvod rozpojen, nemůže rezistorem procházet proud. Modrý průběh pak reprezentuje sériový obvod odporu a cívky. Nastala otázka, zda je obvod vlastně realizovatelný, jelikož vzhledem ke střídě PWM, vždy nějaký čas nebude elektronickým modelem procházet proud. Je třeba tedy otestovat toto zapojení na HILu. Nebude spuštěna přímo simulace jízdy, ale bude pouze nastavena hodnota požadovaného proudu, nejdříve na reálném ventilu a poté na elektronickém modelu. A budou se odečítat hodnoty z osciloskopu a kalibračního softwaru, například z programu Canape. Vzhledem k tomu, že rozpojeným obvodem neprochází proud, je potřeba, aby proud po dobu sepnutí byl u elektronického modelu vyšší než u reálného ventilu. Tímto bude střední hodnota proudu shodná se střední hodnotou proudu reálným ventilem. K tomuto testu byl využit předložený ventil s označením 0501327426.

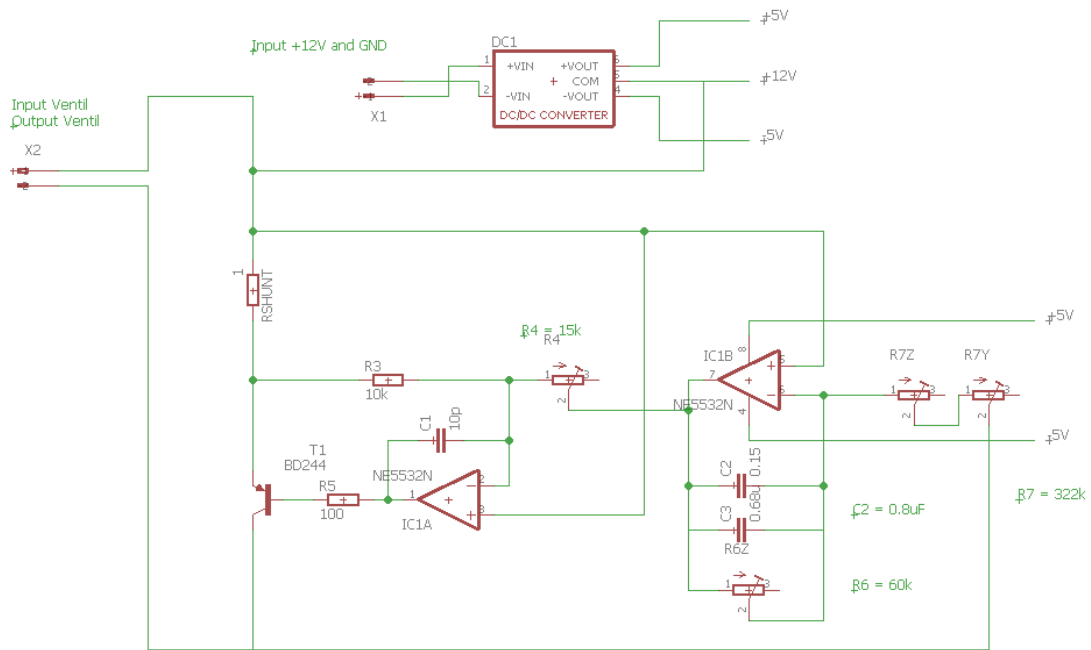


Obrázek 18: Průběh křivek proudu po úpravě zapojení

Na obrázku 18 jsou zobrazeny průběhy simulace právě zmíněného ventilu a nastaveného elektronického obvodu. Jak je vidět, proud elektronickým modelem dosahuje přibližně dvojnásobných hodnot, než jak je tomu u proudu sériovým RL obvodem.

3.4.5 Realizace obvodu

Návrh plošného spoje byl proveden v programu Eagle. Nejdříve bylo překresleno schéma a byly vybrány vhodné součástky, následně byla navržena deska plošného spoje. Schéma je na obrázku 19. Výsledný plošný spoj je na obrázku 20.



Obrázek 19: Schéma DPS elektronického modelu

- **Pasivní součástky**

Namísto odporů byly použity více otáčkové trimry, aby mohly být v případě potřeby změněny parametry elektronického modelu. V případě nutnosti změnit kapacitu kondenzátoru C_2 a C_3 budou muset být kondenzátory vyměněny. Pro R_{shunt} byl použit klasický výkonový odpor.

- **Operační zesilovač**

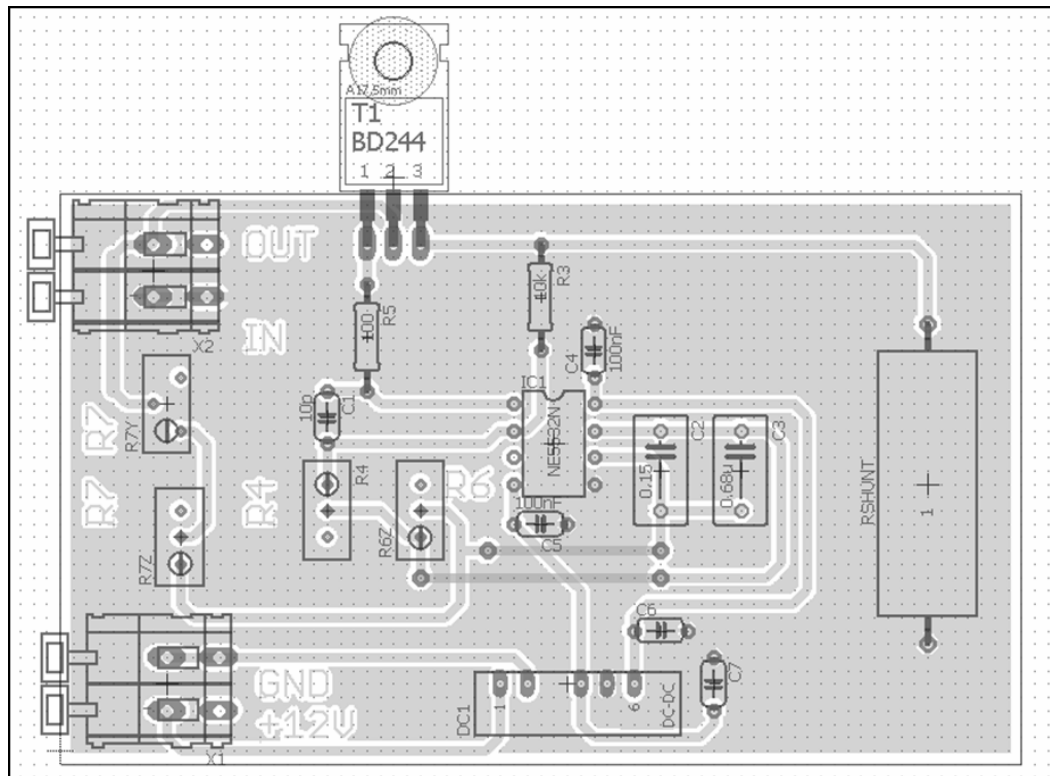
Byl zvolen operační zesilovač NE5532N, v porovnání s AD8032, který byl použit v předchozí práci má větší šířku pásma, ale není typu „rail to rail“. Dle simulací není potřeba mít nutně takový typ operačního zesilovače. V případě limitace, se zvýší napájecí napětí operačních zesilovačů. U NE5532N je napájecí napětí až $\pm 15V$.

- **Tranzistor PNP**

Byl vybrán tranzistor BD244. Jeho kolektorový proud může maximálně dosahovat 6A. To je dostačující proud, jelikož snímač proudu TCU pracuje v rozsahu do 2A.

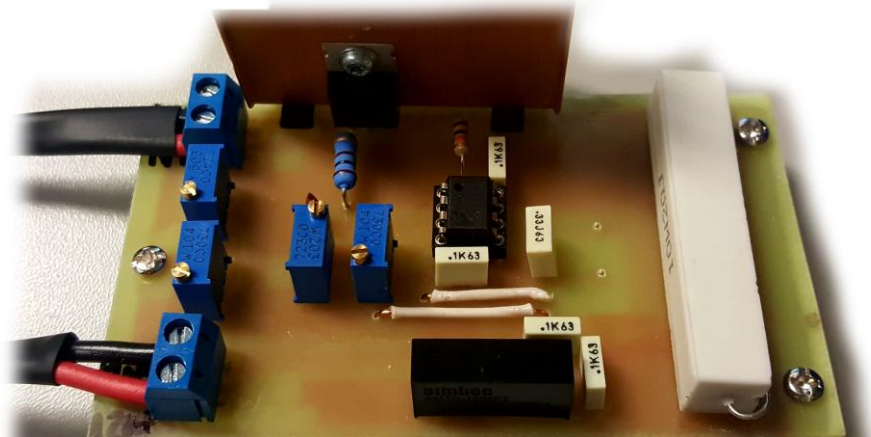
- **Zdroj pro napájení operačních zesilovačů**

Zdroj $\pm 5V$ pro symetrické napájení operačních zesilovačů je DC/DC měnič AM1D-1205DZ, který má vstupní napětí 12V a 3 výstupy, +5V, -5V a zem. Tato zem byla propojena s +12V, které napájí ventil. Tento měnič je napájen 12V z externího zdroje stejnosměrného napětí. Na výstupu měnič poskytuje dostatečný proud pro správnou funkci obvodu.



Obrázek 20: Výsledný plošný spoj elektronického obvodu

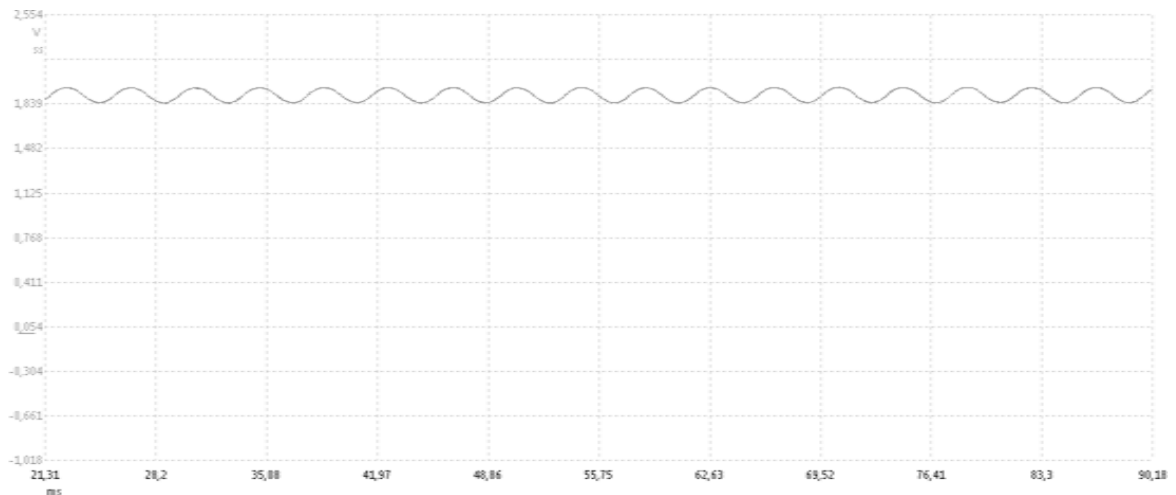
V průběhu hledání optimálních hodnot prvků elektronického modelu byla snaha dosáhnout pouze malých změn na co nejméně prvcích. Nejjednodušší by bylo měnit pouze hodnoty nevykonových odporů, například pomocí mikroprocesorem řízených digitálních potenciometrů. Ukázalo se, že to u tohoto modelu je hledání správných hodnot obtížné a tento model je nevhodný. Dosáhnout požadovaných vlastností je časově náročné. Hledání hodnot probíhalo tak, že byla změněna hodnota jednoho pasivního prvku a poté byla spuštěna simulace obvodu. Průběhy byly kontrolovány na všech třech snímačích. Simulace dosud zabraly nejvíce času, obvod byl simulován při parametrech střídavy 1:1 za pomoci transientní analýzy. Pokud nechceme přepínat odpor R_{shunt} , musíme měnit hodnoty odporu R_7 ve velkém rozsahu hodnot. Proto jsou zde umístěny dva trimry do série, jedním bude nastavována hodnota hrubě a druhým jemně. Tento obvod má nevýhodu, že dobu ustálení silně ovlivňují především kondenzátory C_2 a C_3 . Přepínání kondenzátorů je možné, ale určitě to není vhodné a jednoduché řešení. Pro otestování funkčnosti tohoto modelu vzhledem k jednomu konkrétnímu reálnému ventilu, není třeba kondenzátor měnit. Mimo kondenzátor elektronického modelu jsou na desce umístěny další 4 kondenzátory C_1 , C_4 , C_5 a C_6 pro vyhlazení napájecího napětí operačních zesilovačů. Realizace elektronického modelu je na obrázku 21. Desku plošného spoje jsem realizoval fotocestou.



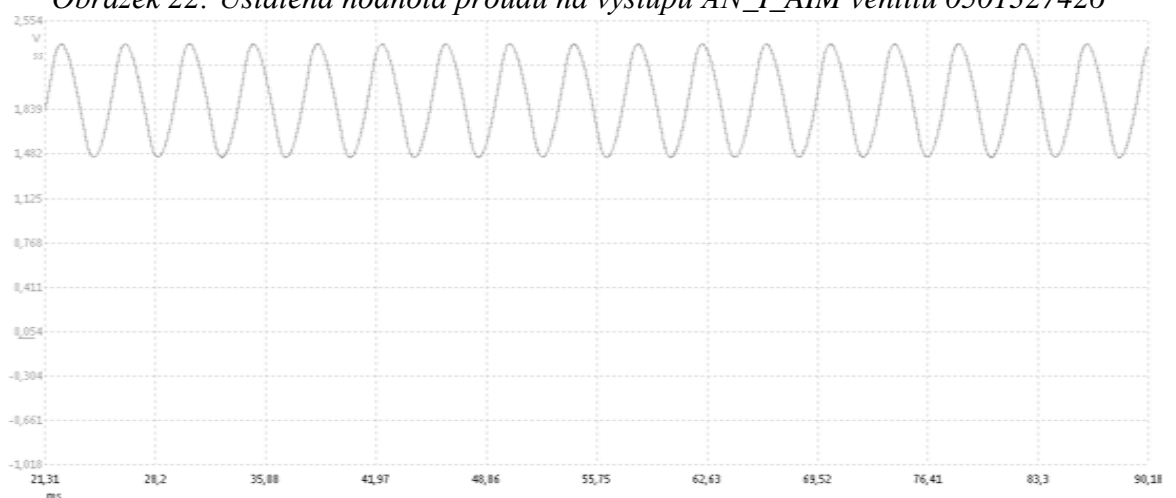
Obrázek 21: Realizace

3.4.6 Výsledky testování na HILu

Při nastavení hodnoty proudu 800mA byly porovnávány průběhy proudů v ustáleném stavu a při sepnutí. Důležitým poznatkem je, že napětí se na výstupu AN_I_AIM nevracelo u elektronického modelu do nuly, jak je tomu u proudu, ale kmitá okolo určité hodnoty. To znamená, že problém s nulovým proudem v čase, kdy je obvod rozpojen, nebude tak nepřekonatelný, jak bylo předpokládáno. Napětí na R_{shunt} je snímáno integrovaným obvodem INA271. V případě TCU je napájení tohoto obvodu nesymetrické +5V. Na výstupu z toho obvodu je tedy hodnota v rozmezí 0 – 5V. To je nastaveno s ohledem na rozsah vstupního A/D převodníku mikrokontroleru TCU. Tento obvod v kombinaci s RC filtrem na jeho výstupu pak vyhlazuje napětí. Výstupní napětí za RC filtrem snímače kmitá v obou případech. Vlivem většího kolísání proudu je rozkmit u elektronického modelu několikanásobně větší. TCU ale během testu chybu nedetekovala a proud se ustálil na přibližně stejné hodnotě. Nyní je třeba se zaměřit na zpracovávání dat řídicí jednotky z tohoto snímače.



Obrázek 22: Ustálená hodnota proudu na výstupu AN_I_AIM ventilu 0501327426



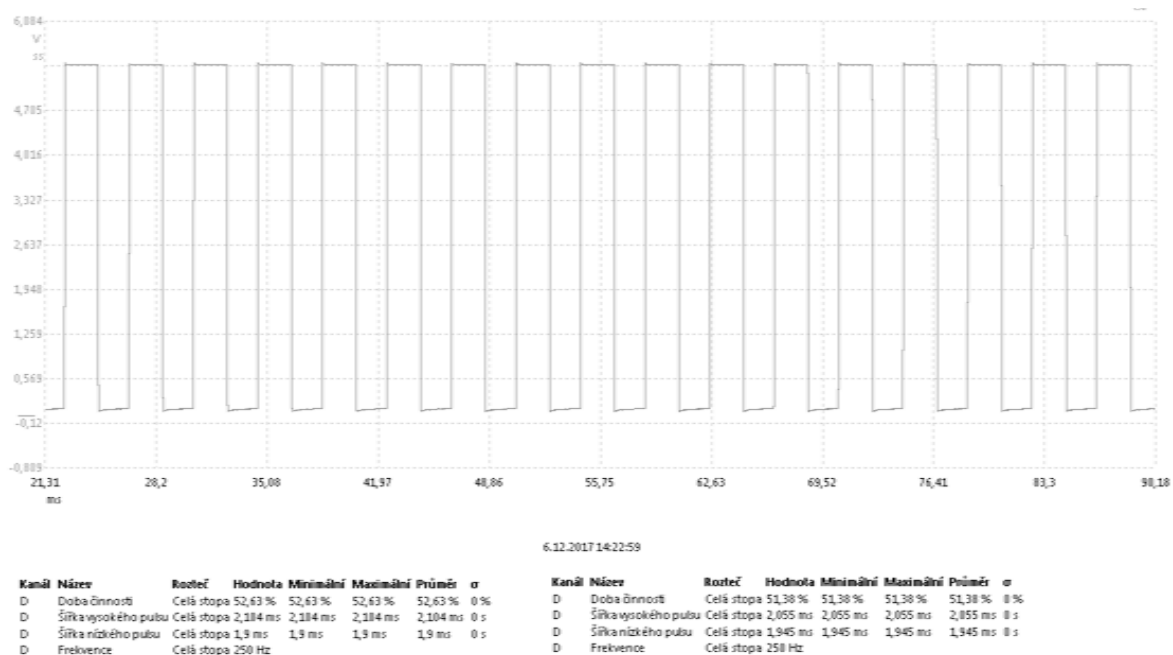
Obrázek 23: Ustálená hodnota proudu na výstupu AN_I_AIM elektronického modelu

Hodnota ustáleného proudu neznamená správnou funkci modelu, to že je tento proud správný jednotka vyhodnocuje snímačem PWM uC_IN_U_AIM. Ustáleného proudu, totiž mohl proudový regulátor dosáhnout za pomoci jiné střídý PWM. Jednotka proto zpracovává právě zpětnou vazbu v podobě informace o nastavené střídě PWM.

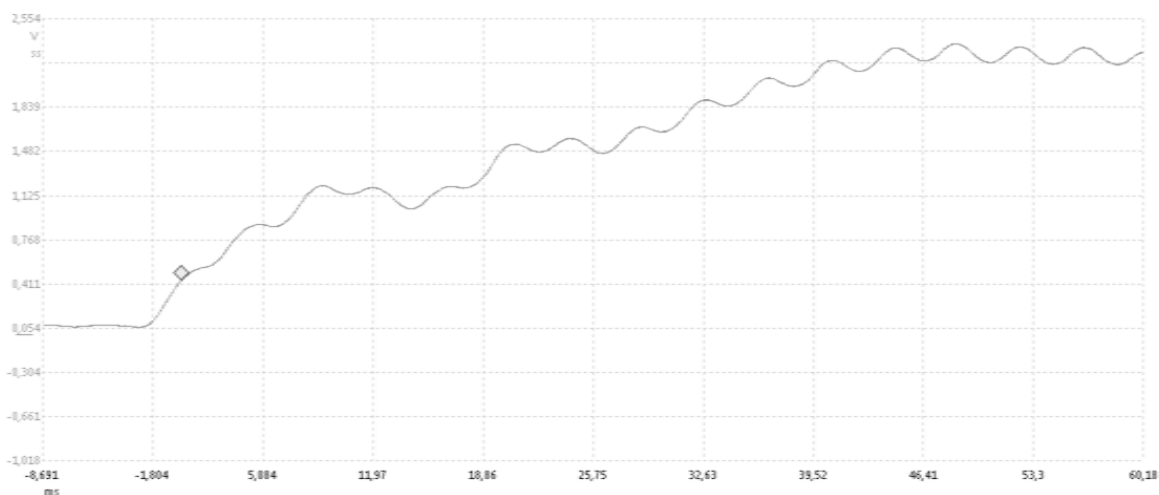
Na obrázku 24 jsou průběhy PWM signálů na snímači uC_IN_U_AIM. Střída signálu elektronického modelu byla téměř identická se střídou u reálného ventilu. To znamená, že je elektronický obvod správně nastaven. Hodnoty ventilu jsou uvedeny v levé části, hodnoty elektronického modelu pak v pravé části. Střída se liší pouze o 1,25. To znamená, že v ustálené hodnotě je vše v pořádku, tato hodnota plně vyhovuje tolerancím testeru.

V simulacích byl ventil nahrazen sériovým spojením odporu a cívky. Tento obvod slouží pro porovnání s elektronickým modelem. Cílem je dosáhnout stejné doby náběhu a ustálených hodnot proudu. Ustálená hodnota v rámci nastavení proudu 800mA byla

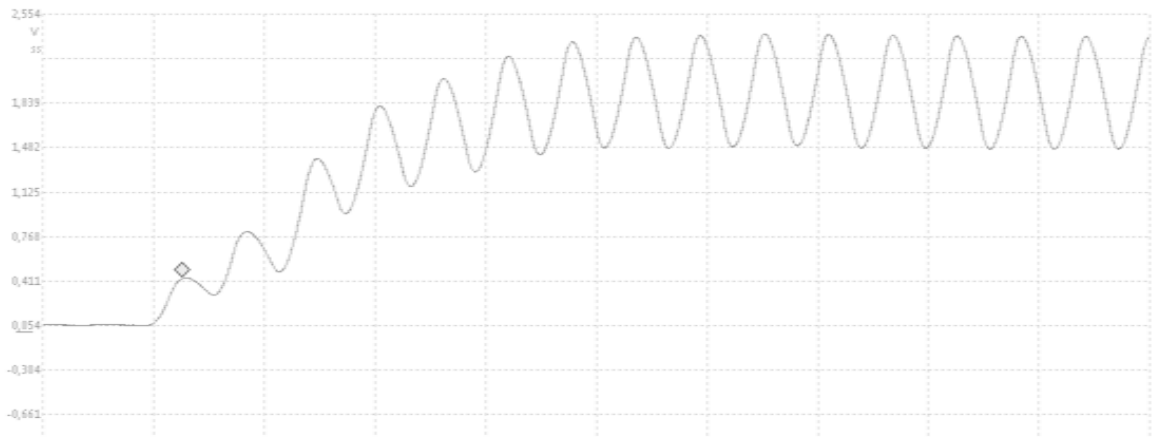
splněna. Doba náběhu reálného ventilu se ale liší a bude třeba tuto dobu změnit. Jednotka testuje především dobu, za kterou dosáhne požadovaného proudu.



Obrázek 24: Porovnání poměru střidy ventilu a elektronického modelu



Obrázek 25: Křivka proudu ventilu při sepnutí na 50% střidu PWM

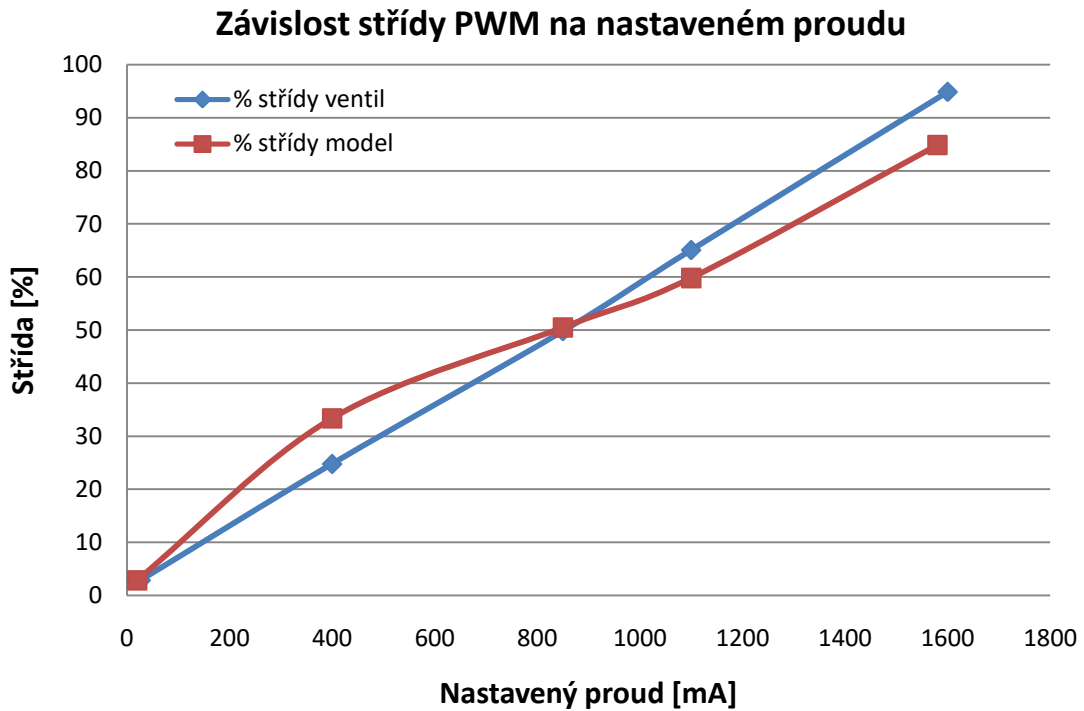


Obrázek 26: Křivka proudu elektronického modelu při sepnutí na 50% střidu PWM

Měření bylo opakováno i pro další proudy. Konkrétně byly nastaveny tyto proudy 27mA, 400mA, 850mA, 1100mA a 1600mA. Výsledné průběhy jsou k dispozici v příloze na obrázcích 49 až 58. Z těchto průběhů byly zaznamenány dosažené hodnoty proudů a při jakých střídách PWM jich bylo dosaženo. Z těchto údajů je vytvořena následující tabulka 4 a graf 1. Bylo dosaženo téměř ideálního stavu. Jednotka nerozpoznala, že výstupní napětí z integrovaného obvodu INA271 kmitá s větší amplitudou, než u reálného ventilu. Nedostatkem je nelineárnost tohoto elektronického obvodu. U ventilu střída narůstala lineárně v závislosti na požadovaném proudu. U elektronického modelu tato závislost není lineární. Pro dosažení proudu 400mA potřeboval model dobu sepnutí o 8,59% delší než reálný ventil. Naopak pro dosažení proudu 1600mA potřeboval model o 10% kratší dobu sepnutí než reálný ventil. Nedostatkem tohoto elektronického modelu je tedy nelineárnost střídavy v závislosti na požadovaném proudu. Druhým nedostatkem je obtížná a složitá definice parametrů. Výsledné hodnoty se hledají složitě při opakovaných simulacích obvodů, obvod je závislý zejména na snímacím odporu a velikosti kondenzátoru C_2 a C_3 . Ostatní pasivní prvky obvodu nemají na funkci obvodu zásadní vliv.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty měření, dosažený proud a poměr střídavy

Dosažený proud [mA]		% střídavy		
ventil	model	ventil	model	Rozdíl %
27	20	2,88	2,88	0
400	400	24,78	33,37	-8,59
850	850	49,81	50,5	-0,69
1100	1100	65,08	59,82	5,26
1600	1580	94,869	84,86	10,009



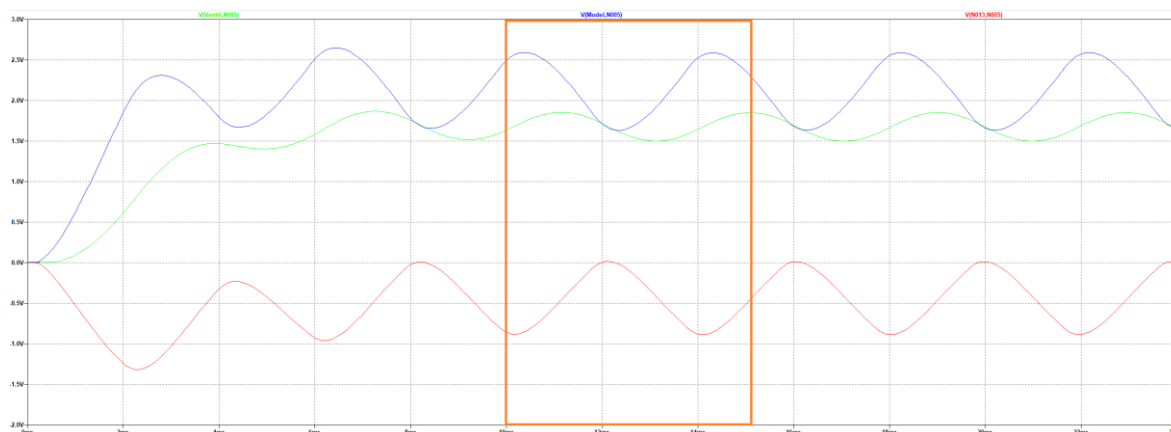
Graf 1: Závislost % střídání PWM na nastaveném proudu

3.5 Zpracování signálu AN_I_AIM mikrokontrolerem TCU

Vzhledem k výsledkům testů na HILu bylo nutné zjistit informace o průběhu a způsobu zpracovávání signálu AN_I_AIM mikrokontrolerem TCU. Především je důležité vědět, zda jednotka detekuje větší rozkmit napětí na tomto snímači.

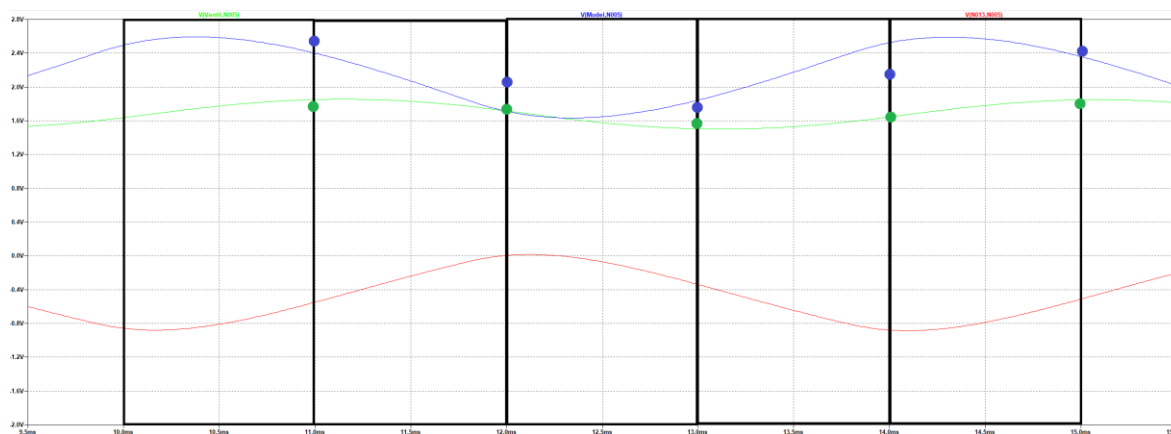
Mikrokontroler TCU je naprogramován tak, že každých 100 μ s je odečtena hodnota A/D převodníku. Tento výstup je ukládán do vyrovnávací paměti. Za 1ms je uloženo 10 vzorků do paměti. Z každých 10 vzorků, tedy každou 1ms, je vypočten průměr a ten je následně dále zpracováván proudovým regulátorem. Proudový regulátor porovnává aktuální hodnotu proudu s požadovanou. Pomocí PID regulátoru vypočte a nastaví odpovídající střídání PWM na výstupu pro LSS. Tyto hodnoty jsou také využívány pro elektronickou diagnostiku, která vyhodnocuje naměřené hodnoty každou 1ms.

Na obrázku 27 vidíme výsledek simulace ventilu AIM1. Modrá křivka odpovídá průběhu napětí na výstupu AIN_I_AIM při použití elektronického modelu, zelená křivka na stejném výstupu odpovídá pak napětí na výstupu AIN_I_AIM modelu ventilu, který je v simulaci nahrazen sériovým spojením odporu a cívky. Červený průběh poté znázorňuje rozdíl průběhů proudů. V ustáleném stavu jsem zvýraznil část 10ms – 15ms obdélníkem. Během tohoto úseku je odebráno 50 vzorků a z každých 10 vzorků je průměrována výsledná hodnota pro časový úsek 1ms. Celkem tedy 5 hodnot pro proudový regulátor.



Obrázek 27: AIN_I_AIM(1)

Na obrázku 28 je zvýrazněna každá 1ms odděleně různými barvami. V každém časovém okně je spočten průměr. Tento průměr je zobrazen jako bod. Na základě této hodnoty nastavuje proudový regulátor střihu na svém výstupu. Jak lze vidět na obrázku 28, průměry elektronického modelu se liší od průměrů reálného elektromagnetického ventilu. Hodnota průměru u elektronického modelu se mezi časovými okny mění výrazněji. Je tedy otázka, jak na tyto rozdíly zareaguje proudový regulátor.

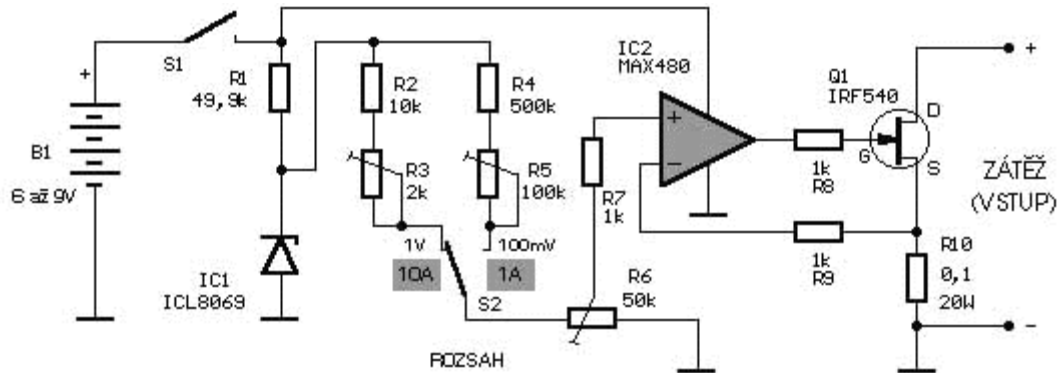


Obrázek 28: Detailnější pohled na úsek 10 - 15ms

4 Vlastní provedení elektronického modelu

4.1.1 Návrh obvodu

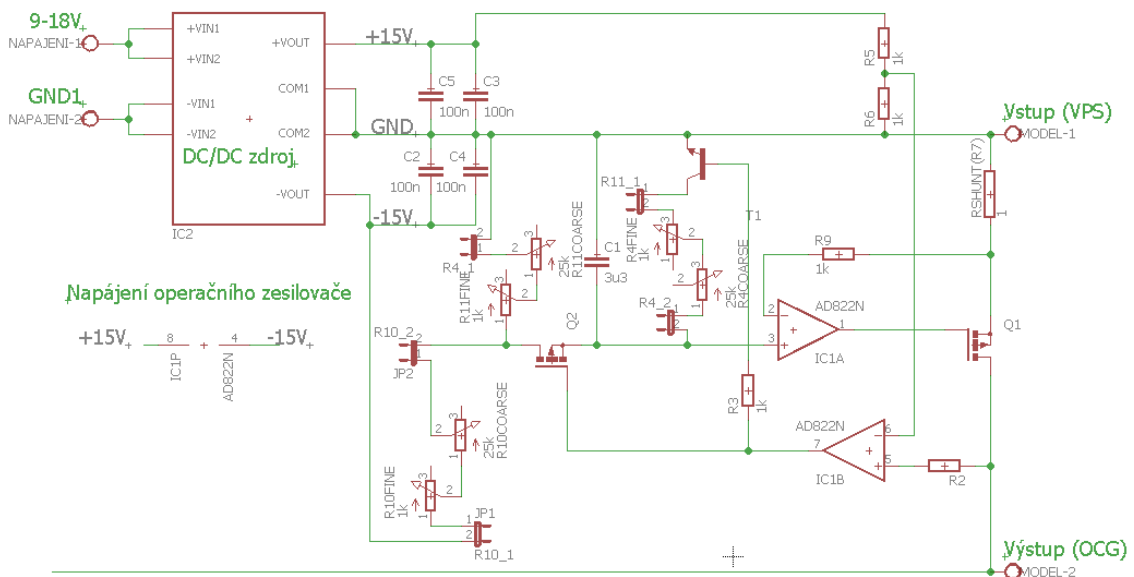
Vzhledem k problémům předchozího modelu bylo nezbytné najít nové a lepší řešení. Následující kapitola vychází z obvodu elektronické zátěže. Tato zátěž se používá pro testy, kdy je potřeba zatížit testovaný obvod konstantním proudem.



Obrázek 29: Schéma umělé zátěže [2]

Tento obvod je ve své podstatě napětím řízený zdroj proudu. Na neinvertující vstup operačního zesilovače je přivedeno řídicí napětí. Obvod konkrétně umožňuje přepínat mezi proudy 10A a 1A, což odpovídá zvolenému řídicímu napětí a zvolenému snímacímu odporu. Na invertující vstup operačního zesilovače je přivedeno napětí ze snímacího odporu R_{10} . Tímto jsme vytvořili zápornou zpětnou vazbu. Operační zesilovač bude nastavovat svůj výstup tak, aby byl úbytek na snímacím odporu R_{10} roven řídicímu napětí. Snímací odpor R_{10} má hodnotu $0,1\Omega$. Aby na tomto odporu byl úbytek 1V, musí tímto odporem procházet 10A. Řídicí napětí a odpovídající proudy uvedené na obrázku 29 jsou tedy správné. Na základě znalostí o elektronické zátěži byl sestaven nový elektronický model ventilu. Navržený obvod je v následující kapitole.

4.1.2 Realizace



Obrázek 30: Modifikovaný obvod elektronické zátěže, vlastní model ventilu

Na obrázku 30 je zobrazeno schéma navrženého obvodu. Jumpery jsou zde umístěny pouze pro účel nastavení odporu potenciometru. Odstraněním jumperů z pinů odpojím potenciometry od zbytku obvodu a jsem schopen správně změřit či nastavit jejich odpor. Po nastavení odporu potenciometrů jsou jumpery umístěny zpět a potenciometry jsou tak opět připojeny k obvodu.

Pro napájení operačních zesilovačů je zde umístěn DC/DC měnič DCW03-15. Tento měnič je zároveň zdrojem referenčních napětí. Měnič má galvanicky oddělen vstup a výstup. Na jeho vstup přivádíme nesymetrické napětí 9-18V. Na výstupu měniče je symetrické napětí 15V, -15V a referenční zem. Tato zem je trvale spojena s VPS. Tímto spojením je +15V a -15V vztaženo vůči VPS. Mezi výstupní napětí a zem jsou vloženy vyhlazovací kondenzátory. Jsou zde umístěny dvakrát. Na desce plošného spoje je umístěn první z dvojice ke zdroji a druhý co nejbližší k napájecímu pinu operačního zesilovače.

Operační zesilovač IC_{1A} má stejnou funkci jako operační zesilovač IC_2 v původní elektronické zátěži. Svým výstupem řídí tranzistor Q_1 tak, aby tímto tranzistorem a odporem R_{shunt} procházel požadovaný proud. Rozdílné je nastavování řídicího napětí. Řídicí napětí nastavujeme pomocí napěťového děliče vloženého mezi -15V a zem. Skládá se ze dvou dvojic potenciometrů $R_{10COARSE}$, R_{10FINE} , $R_{11COARSE}$ a R_{11FINE} . Odpor R_{10} a R_{11} tak lze nastavovat hrubě a jemně. Potenciometry mají hodnoty $25k\Omega$ a $2k\Omega$. Proud reálným ventilem se ale nemění skokově. Aby se řídicí napětí neměnilo skokově, je nezbytné umístit kondenzátor mezi řídicí napětí a zem. Takto je simulována akumulace energie reálného ventilu. Při použití elektrolytického kondenzátoru je nezbytné respektovat

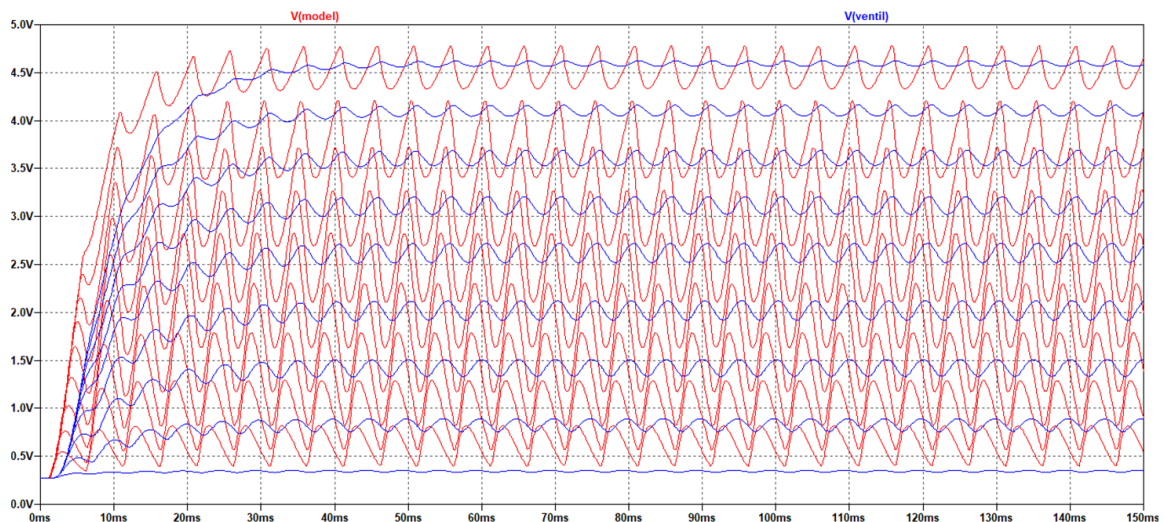
polaritu napětí. Kladný pól je v tomto případě na zemi.

Aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího napodobení reálné akumulace, jsou zde umístěny tranzistory T_1 a Q_2 . V čase, kdy je obvod uzavřený, je kondenzátor C_1 nabíjen přes tranzistor Q_2 . Tranzistor T_1 je zavřený. V čase, kdy je obvod rozpojen, kondenzátor vybíjíme přes tranzistor T_1 a tranzistor Q_2 je zavřený.

Spínání těchto tranzistorů je řízeno komparátorem IC_{1B} . Na jeho invertující vstup přivádíme napětí $+7,5V$ vytvořených napěťovým děličem R_5 a R_6 . Na neinvertujícím vstupu je snímán spínací signál PWM z TCU. Je-li na neinvertujícím vstupu $+12V$, výstup komparátoru je $+U_{sat}$. Je-li na neinvertujícím vstupu $0V$, výstup komparátoru je $-U_{sat}$. Operační zesilovač není typu rail to rail a saturační napětí je $\pm 13,6V$.

4.1.3 Simulace obvodu

Obvod pro simulace byl doplněn snímačem a filtry, které obsahuje TCU. Do programu LTspice byla importována knihovna integrovaného obvodu INA271. Obvod mohl být nyní přesněji analyzován. Například, jak se bude elektronický model chovat na výstupu z integrovaného obvodu INA271 a jaké hodnoty jsou přiváděny na vstup A/D převodníku mikrokontroleru TCU. Elektronický model se tedy nastavuje odpory R_{10} , R_{11} a R_4 a kondenzátorem C_1 . Schéma obvodu a nastavení simulace je k dispozici na obrázku 49. Po nalezení hodnoty pro konkrétní ventil vypadá výsledek transientní analýzy následovně.



Obrázek 31: Výsledek transientní analýzy elektronického modelu vlastního návrhu

Obvod se chová přibližně stejně jako předchozí elektronický model s tím rozdílem, že jeho chování a funkci lze snadno ovlivňovat změnou hodnoty čtyř součástek. Tento funkční vzorek elektronického modelu bude sestaven a otestován na reálném zapojení.

Simulovány byly všechny ventily z Loadboxu EP20. Jak 12V, tak i 24V verze ventilů se dala nahradit tímto modelem. Pouze změnami tří odporů a případnou změnou kondenzátoru je možné nahradit všechny ventily z tohoto Loadboxu. Tento Loadbox obsahuje ventily s velmi rozdílnými parametry. U většiny projektů se parametry ventilů příliš neliší. Můžeme tak nyní říci, že tento model je schopný napodobit široké spektrum reálných ventilů používaných v ZF. Během simulací byla i snaha dosáhnout stavu, kdy by nemusel být měněn kondenzátor. Tento problém se týká především ventilů s velmi rozdílnými indukčnostmi, kde je doba náběhu znatelně rozdílná. V simulacích se tohoto stavu dalo dosáhnout změnou hodnot odporu R_{10} , který pak omezoval nabíjecí proud kondenzátoru. Nyní je potřeba ověřit tento model v reálném zapojení na HILu. K návrhu DPS byl opět použit program EAGLE. Schéma pro návrh DPS je na obrázku 30.

Tento model se může připojit k TCU pouze tak, jak je uvedeno na schématu. Ovšem není to oproti reálnému ventilu žádné omezení. Reálný ventil sice funguje nezávisle na polaritě zapojení, avšak jeho rozhraní tvoří konektor, který se dá zapojit pouze v jedné poloze a je tak určena i polarita pinů. Stejně tak tomu bylo i u předchozího modelu.

- Pasivní součástky

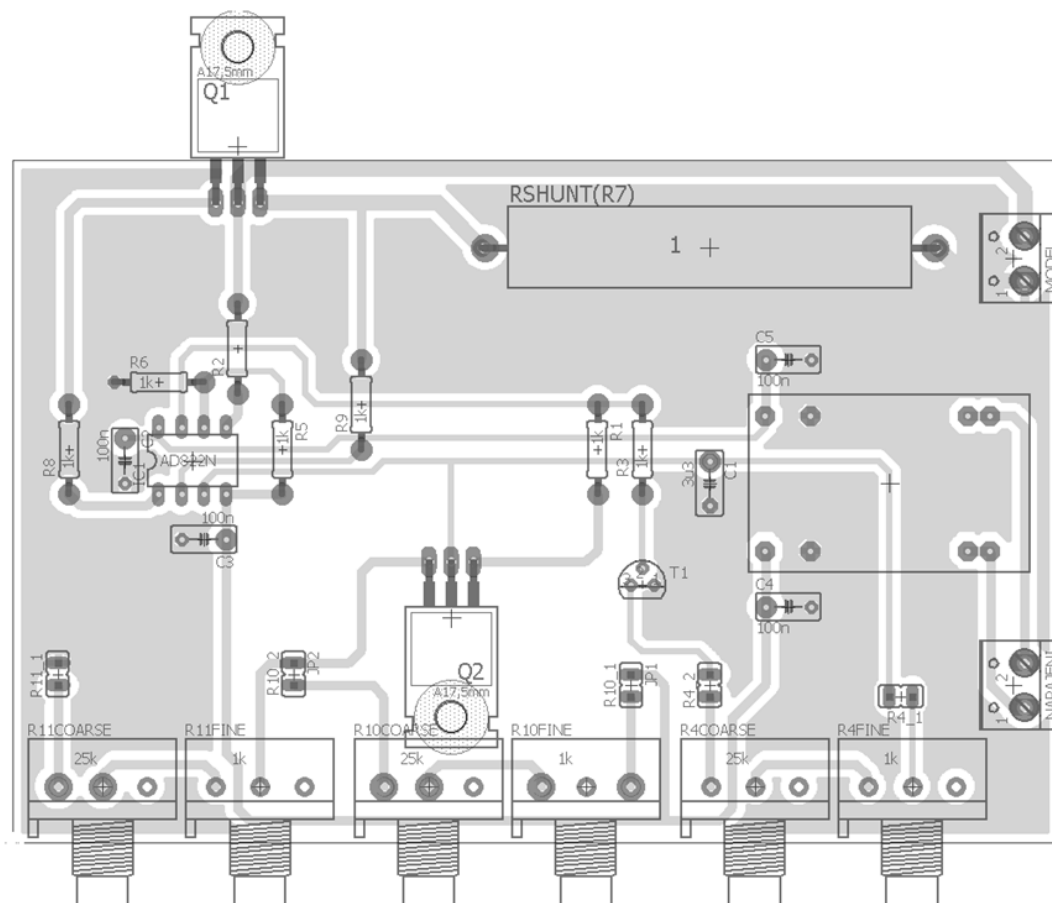
Oproti předchozímu modelu se ustoupilo od použití trimrů. Tři odpory, kterými se parametry modelu nastavují, jsou realizovány potenciometry. Odpory R_{10} , R_{11} a R_4 jsou tvořeny dvojicí potenciometrů. Jeden $25k\Omega$ pro hrubé nastavení a druhý $2k\Omega$ pro jemné nastavení. Kondenzátor je elektrolytický s kapacitou $3,3\mu F$ pro napětí do 35V. Dále jsou doplněny čtyři kondenzátory pro vyhlazení napětí.

- Tranzistory

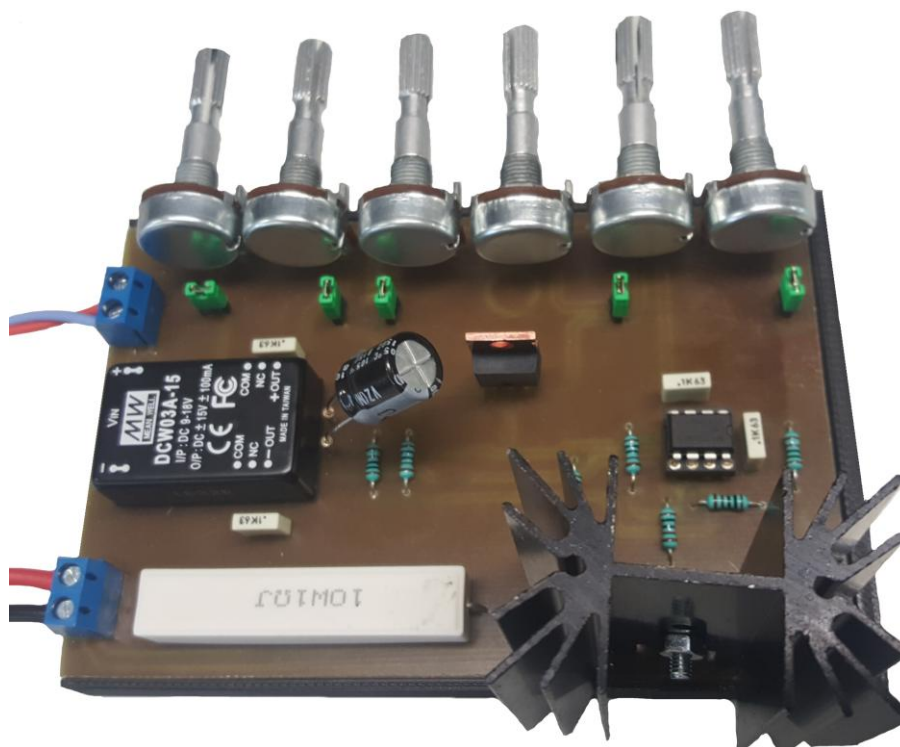
Unipolární tranzistory jsou typu MOS s kanálem P s označení IRF9640. Bipolární tranzistor je typu NPN pod označením BC547.

- Zdroj pro napájení operačních zesilovačů a pro napěťovou referenci.

Zdroj musí mít galvanicky oddělen vstup a výstup. Zdroj musí mít výstup +15V a -15V a zem. Zem je opět spojena s VPS. Pro tento účel byl vybrán DC/DC měnič pod označením DCW03A-15. Tento měnič je schopen dodat 100mA do obou výstupů.



Obrázek 32: Výsledný plošný spoj vlastního elektronického modelu



Obrázek 33: Realizace vlastního modelu

Nejdříve byl tento model otestován v laboratoři. Na vstup modelu bylo připojeno napětí +12V. Výstup modelu byl připojen ke spínacímu prvku, který obvod uzemňoval. Jako spínací prvek byl použit tranzistor typu NMOS, který byl ovládaný generátorem. Na generátoru bylo nastaveno spínací napětí v rozsahu 0 – 5V, frekvence 200Hz a střída 50%. Osciloskopem bylo měřeno napětí na R_{shunt}. Bylo nezbytné použít osciloskop s oddělenými zeměmi, aby nebylo napětí VPS osciloskopem uzemněno. Střední hodnota ustáleného proudu odpovídala požadovanému proudu. Požadovaný proud byl nastaven řídicím napětím. Proud bohužel kmital a s ním i zpětná vazba. Namísto modelu byl připojen pouze R_{shunt} a bylo ověřeno, že jeho parazitní vlastnosti nejsou příčinou tohoto kmitání. Kmitání je pravděpodobně způsobeno operačním zesilovačem. V čase, kdy je obvod rozpojen, otevře na svém výstupu tranzistor Q₁. V čase, kdy je obvod sepnut, dojde k proudové špičce a operační zesilovač tranzistor zavře. Obvod takto začne kmitat a operační zesilovač toto nedokáže uregulovat. Řešením bylo zpomalení regulační smyčky umístěním kondenzátoru C₆ s kapacitou 100nF mezi gate tranzistoru Q₁ a zem. Obvod se tak stal stabilním.

4.1.4 Výsledky testování na HILu

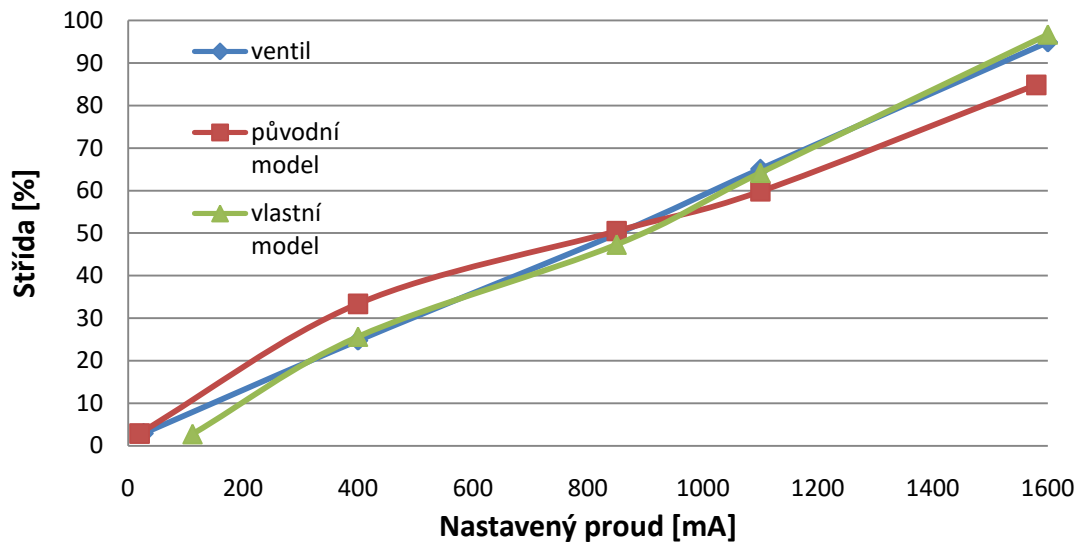
Nejdříve bylo nutné model nastavit na konkrétní ventil, pro otestování byl zvolen stejný ventil jako u předchozího měření. Hodnoty modelu jsem nastavil následovně: R₁₀ = 1360Ω, R₁₁ = 6000Ω, R₄ = 1360Ω a C₁ = 3,3μF.

Po nastavení potenciometrů se obvod připojil k HILu. Nejdříve se ověřovalo, zda obvod dosahuje stejných ustálených hodnot jako ventil OCG₇ a zda těchto hodnot dosahuje při stejném poměru střídy. Postup je stejný jako v kapitole 3.2.6. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce 2 a grafu 2. Jsou zde pro porovnání uvedeny i hodnoty původního modelu.

Tabulka 2: Porovnání ustálených hodnot ventilu, původního modelu a vlastního modelu

Nastavený proud [mA]			% střídy		
ventil	původní model	vlastní model	ventil	původní model	vlastní model
27	20	112	2,88	2,88	2,75
400	400	400	24,78	33,37	25,66
850	850	850	49,81	50,5	47,31
1100	1100	1100	65,08	59,82	64,2
1600	1580	1600	94,869	84,86	96,71

Závislost střídy PWM na požadovaném proudu



Graf 2: Závislost střídy PWM na požadovaném proudu

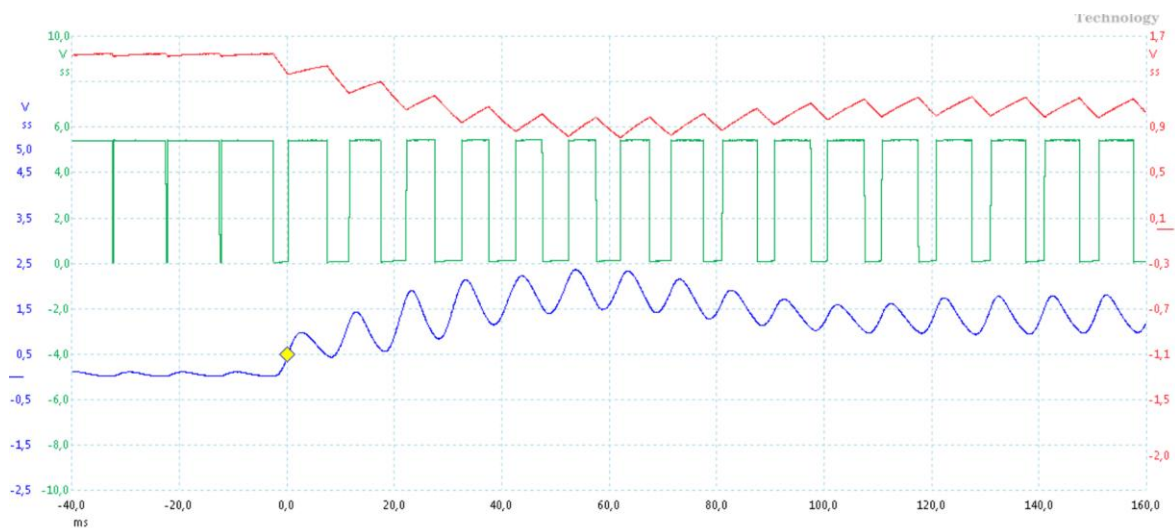
Elektronický model vlastního návrhu se téměř shoduje s reálným ventilem. Na dosažení požadovaného proudu potřeboval přibližně stejnou střídu PWM. Odstranil tak problém s nelinearitou u předchozího modelu. Elektronický model vlastního návrhu odstranil i druhý nedostatek předchozího modelu. Parametry obvodu se nyní nastavují jednoduše. Není nutné dělat nespočet simulací k nalezení správných hodnot. Je přesně dané co a jak ovlivňují odpory R_{10} , R_{11} , R_4 a kondenzátor C_1 . Jediným problémem byl proud 112mA, který by měl při střídě 3% dosahovat maximálně 50mA. Elektronický obvod tak musel být kalibrován a počáteční proud se zmenšil na požadovanou úroveň. Kalibrace byla provedena změnou odporu potenciometrů R_{10} , R_{11} a R_4 .

Tímto postupem byly otestovány vlastnosti elektronického modelu v ustálených hodnotách. Dalším měřením byly ověřeny dynamické vlastnosti. Je nezbytné, aby se shodovala doba náběhu proudu elektronického modelu s reálným ventilem. Měření probíhalo opět na HILu. Účelem měření bylo zachycení přechodného jevu při změně požadovaného proudu. Přechodný děj byl pozorován na osciloskopu a zároveň v diagnostickém programu Canape. Obvod byl před změnou v ustáleném stavu. Byly zvoleny následující hodnoty:

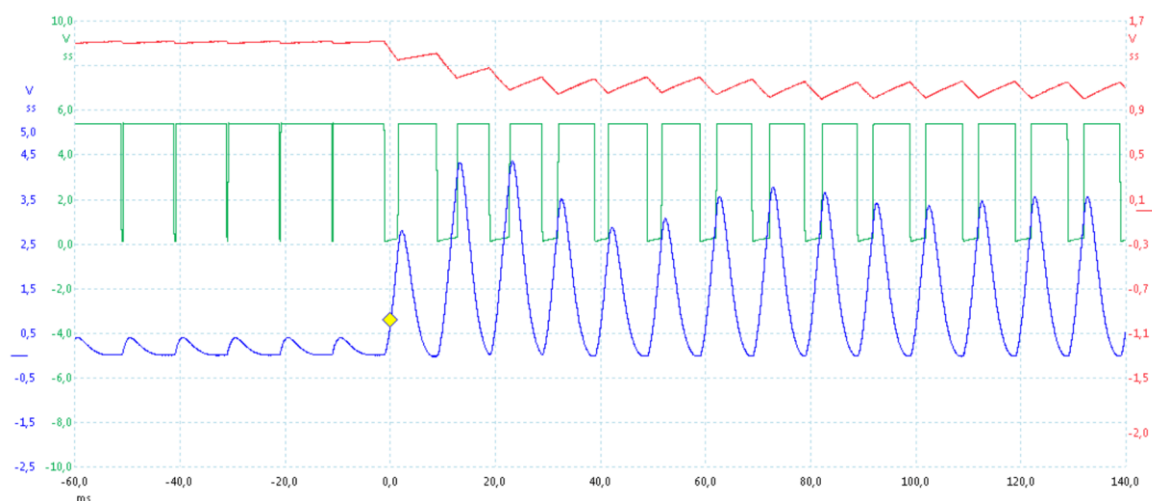
- Změna proudu z 33mA na 600mA
- Změna proudu z 33mA na 1600mA
- Změna proudu z 1600mA na 600mA
- Změna proudu z 1600mA na 33mA

4.1.4.1 Měření přechodného děje

- změna 33mA – 600mA



Obrázek 34: Měření osciloskopem, změna 33mA - 600mA, ventil



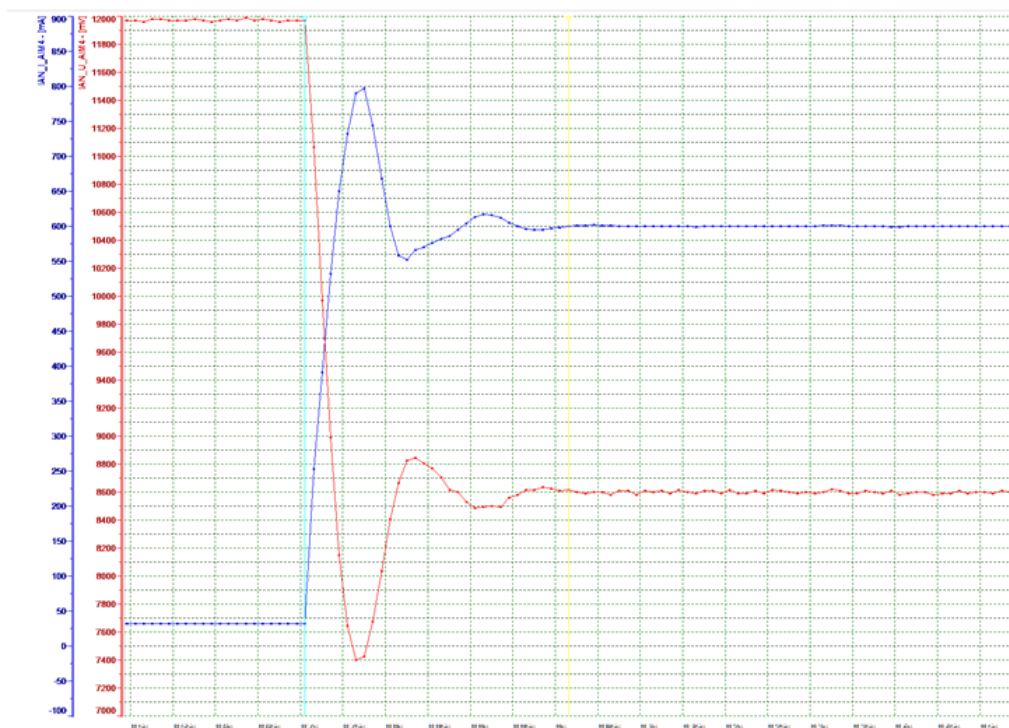
Obrázek 35: Měření osciloskopem, změna 33mA - 600mA, vlastní model

Na obrázcích 34 a 35 jsou zobrazeny průběhy proudu naměřené osciloskopem. Osciloskopem bylo měřeno výstupu INA271 (modrá), na filtru uC_IN_U_AIM (zelená) a na filtru AN_U_AIM (červená). Doba ustálení proudu byla přibližně stejná jak u ventilu, tak u elektronického obvodu. Střední hodnota proudu u modelu přibližně odpovídala střední hodnotě proudu u ventilu. Jednotka nerozpoznala, že na jejím výstupu je umístěn na místo reálného ventilu elektronický model. Měření bylo opakováno, tentokrát byly sledovány průběhy proudů v diagnostickém programu Canape. Pomocí diagnostického programu Canape bylo umožněno sledovat hodnoty, které si vzorkovala řídicí jednotka.

Na následujících obrázcích 36 a 37 jsou zobrazeny průběhy z programu Canape. Červený průběh byl snímán na filtru AN_U_AIM a modrý průběh byl snímán na výstupu INA271. Průběhy proudů jsou zde uvedeny pro srovnání mezi elektronickým modelem a ventilem. Také lze tyto průběhy proudů porovnat s těmi z osciloskopu.



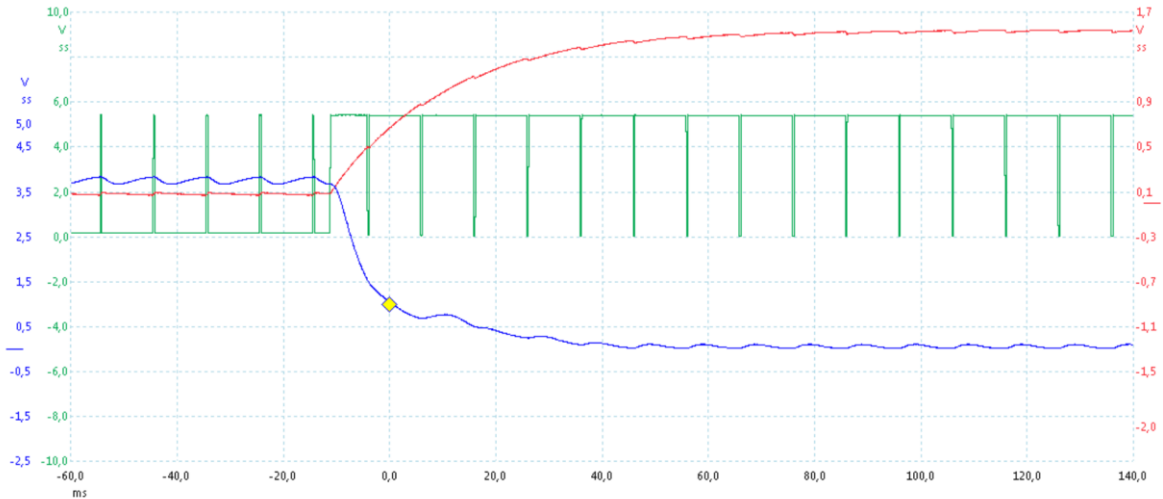
Obrázek 36: Náběh proudu, změna 33 - 600mA, výstup z programu Canape, vlastní model



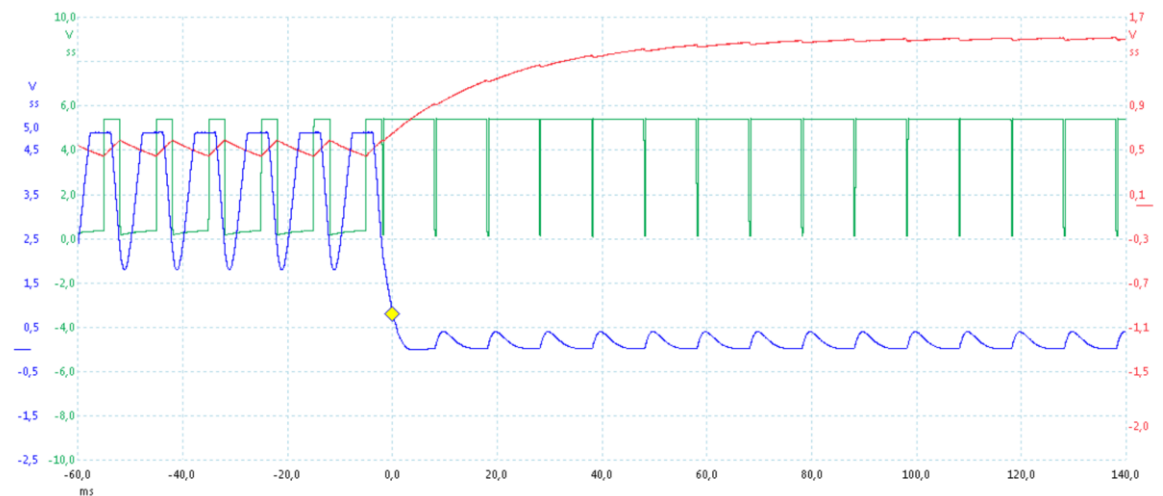
Obrázek 37: Náběh proudu, změna 33 - 600mA, výstup z programu Canape, ventil

- změna 1600mA – 33mA

Na obrázcích 38 a 39 jsou výsledné průběhy proudu měření při změně z 1600mA na 33mA. Osciloskopem bylo měřeno opět na výstupu INA271 (modrá), na filtru uC_IN_U_AIM (zelená) a na filtru AN_U_AIM (červená).



Obrázek 38: Měření osciloskopem, změna 1600mA - 33mA, ventil



Obrázek 39: Měření osciloskopem, změna 1600mA - 33mA, vlastní model

4.1.5 Vyhodnocení naměřených hodnot

Jednotka během testování nerozpoznala rozdíl mezi reálným ventilem a elektronickým modelem. V diagnostickém programu Canape se neobjevila žádná chybová hlášení. Proudový regulátor dosáhl všech požadovaných hodnot proudů. Pro dosažení klidového proudu 33mA bylo nutné obvod kalibrovat pomocí potenciometrů R_4 , R_{10} , R_{11} . Požadovaných proudů dosáhl proudový regulátor téměř se stejnou střídou PWM. Maximální odchylka střídy byla 2,5%. Vzhledem k parametrům reálných ventilů je tato

chyba zanedbatelná. Například i jmenovitý odpor ventilu je dán výrobcem s tolerancí $\pm 5\%$. Doba přechodného jevu byla u elektronického modelu o něco kratší než u ventilu. Doba ustálení je snadno konfigurovatelná změnami kapacity kondenzátoru C_1 , nebo změnami odporu potenciometru R_{10} , který omezuje nabíjecí proud, který teče do kondenzátoru C_1 .

Vlivem toho, že elektronický model nedokáže akumulovat energii, jako je tomu u reálného ventilu, je na obrázku 34 větší rozkmit průběhu proudu. Rozkmit průběhu proudu je důsledkem řešení elektronického modelu a vlastností TCU. Jediným možným řešením bylo zdvojnásobení hodnoty procházejícího proudu. V čase rozepnutí obvodu neprocházel modelem žádný proud. V čase uzavření obvodu je hodnota proudu dvojnásobná. Tuto problematiku podrobně rozebírá kapitola 3.3.

Pro vyšší proudy, například u proudu 1600mA dochází k saturaci na snímači proudu. A/D převodník na vstupu mikrokontroleru TCU pracuje v rozsahu 0 – 5V. Tomu odpovídá napájení integrovaného obvodu INA271 v rozsahu 0 – 5V. Pro tento rozsah je maximální měřitelný proud 2A. V případě proudu 1600mA se dostane překmit nad proud 2A, tedy výstupní napětí nad 5V. Řídící jednotka by mohla v extrémním případě skončit v chybovém stavu. Saturaci na proudovém snímači může jednotka vyhodnotit jako zkrat na ventilu. Tento jev při měření nenastal. U většiny ventilů tento problém nehrozí, neboť jejich maximální proudy jsou menší, než je polovina rozsahu snímače.

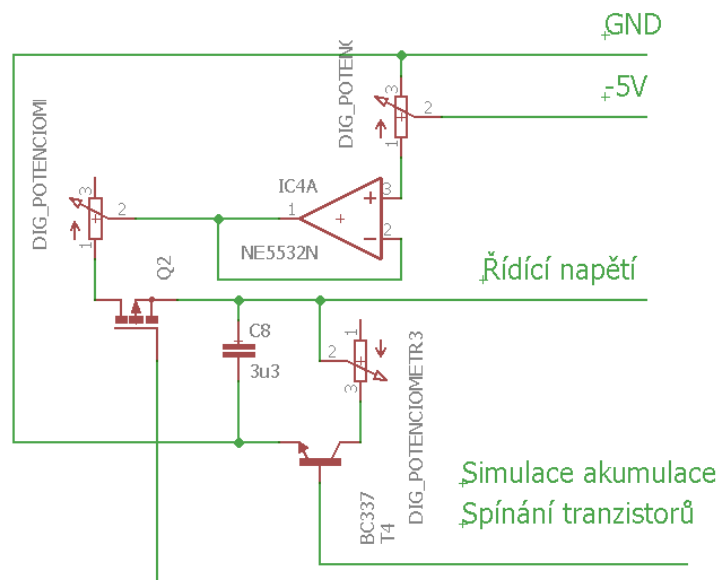
U elektronického modelu je procházející proud přerušovaný, model neobsahuje žádný akumulací prvek, který by v době rozepnutí dodával do obvodu proud, jako je tomu u reálného ventilu. Bylo tak nutné zdvojnásobit procházející proud v době, kdy je obvod uzavřen. Napětí na snímači AN_I_AIM tak kmitá s několikanásobnou amplitudou, než jak je tomu u reálného ventilu. Při parametrech ventilu, který dosahuje větších proudů, dochází navíc k saturaci na snímači AN_I_AIM. Toto jsou omezení či nedostatky elektronického modelu. Elektronický model vlastního provedení splnil všechny požadavky na elektronický model. Tento model je základem pro finální funkční vzorek, kde bude umožněna vzdálená rekonfigurace parametrů modelu.

5 Návrh finálního funkčního vzorku

V předchozí kapitole bylo dosaženo funkčního elektronického modelu. Parametry tohoto modelu se nastavovaly pomocí potenciometrů R_4 , R_{10} a R_{11} nebo změnou kapacity C_1 . Pro splnění posledního požadavku bylo nezbytné, aby se tyto parametry daly ovládat vzdáleně. Pro tento účel byl vlastní elektronický model přepracován pro použití s digitálními potenciometry. V tomto finálním funkčním vzorku bylo nezbytné použít mikroprocesor, jelikož se digitální potenciometry nastavují pomocí externí sběrnice SPI. Pro snadné integrování k ostatnímu hardwaru v ZF byl použit integrovaný obvod TJA1042T. Tento integrovaný obvod umožňuje MCU komunikaci v rámci sběrnice CAN. Přes sběrnici CAN je umožněná vzdálená komunikace s mikroprocesorem.

Jako proměnný odpor byl vybrán digitální potenciometr MAX5481 a MAX5483. Digitální potenciometry nejsou koncipovány na velký proud. Zpravidla jsou to řádově jednotky mA. Zároveň jsou napájeny nesymetricky +5V. Z těchto důvodů musel být vlastní elektronický model přepracován. Konkrétně část obvodu, kde se nastavuje řídicí napětí.

Tato část obvodu je na následujícím obrázku 40. Řídicí napětí může nyní dosáhnout maximálně -5V oproti původním -15V. R_{shunt} byl zvolen $0,5\Omega$. 1V na vstupu nyní odpovídá proudu 2A.

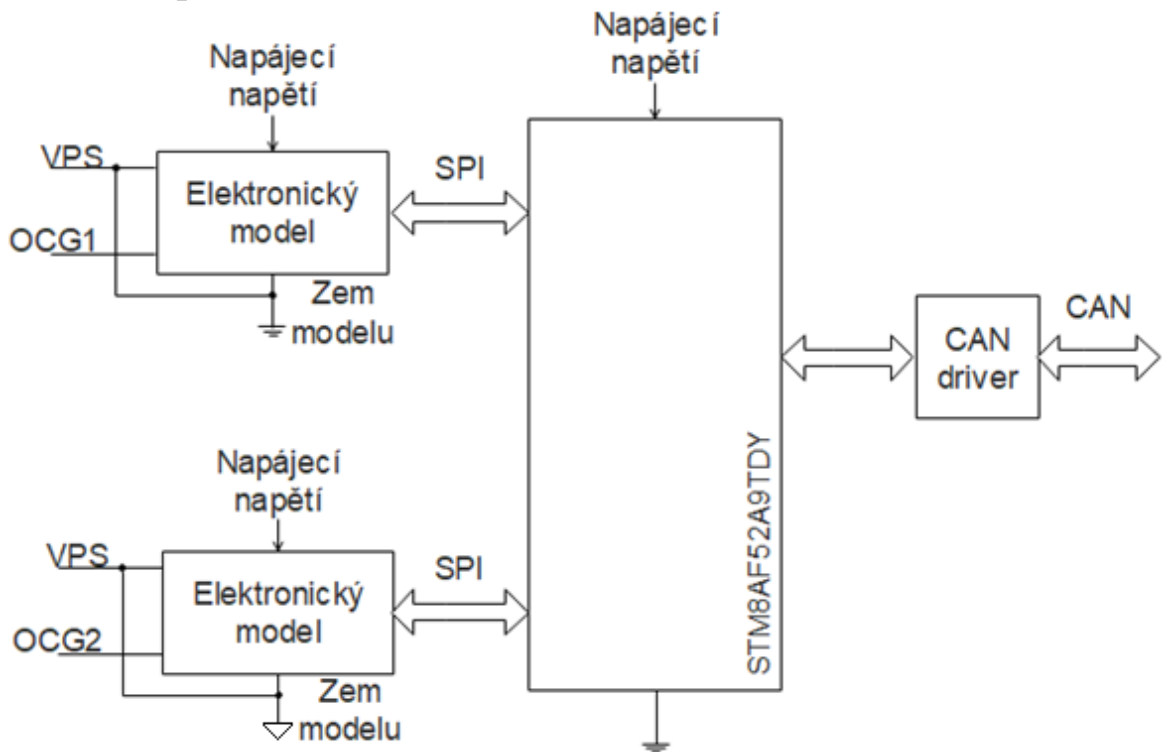


Obrázek 40: Přepracovaná část obvodu, nastavování řídicího napětí.

První digitální potenciometr slouží k nastavování hodnoty napětí respektive proudu v ustáleném stavu. Polohou jezdce určujeme napětí v rozsahu 0V až -5V. Aby

potenciometrem procházel minimální proud, byl na výstup jezdce umístěn napěťový sledovač. Zbylé dva potenciometry plní funkci reostatu, tedy omezování procházejícího proudu. V případě druhého digitálního potenciometru je omezován nabíjecí proud. U třetího digitálního potenciometru je omezován proud vybíjecí. Obvod bylo nutné navrhnout s ohledem na maximální proud, který může potenciometry procházet.

5.1 Koncept finálního funkčního vzorku

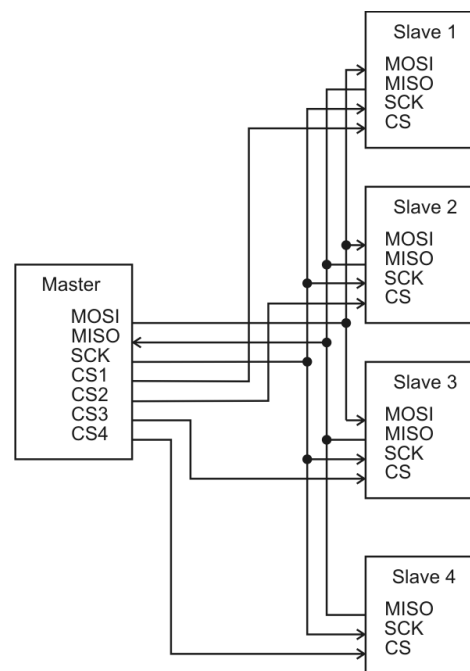


Obrázek 41: Blokové schéma finálního funkčního vzorku

Na obrázku 41 je blokové schéma finálního funkčního vzorku. Toto schéma slouží pouze pro jednoduché zobrazení konceptu. Jsou zde pouze dva elektronické modely, ze strany ZF je požadováno ve funkčním vzorku 8 elektronických modelů. Všechny elektronické modely mají společný vstup VPS. Každý elektronický model má svůj očíslovaný výstup OCG. Zároveň je vstup VPS využit jako referenční zem elektronického modelu. Každý elektronický model obsahuje 3 digitální potenciometry. Komunikace MCU s digitálními potenciometry je realizována pomocí sběrnice SPI a je to komunikace simplexní. Pro každý elektronický model je nezbytné vyvést z MCU 3 signály CS. Signály MOSI a CLK jsou pro všechny digitální potenciometry společné. Pro SPI komunikaci musí být na vstup SPI/UD digitálního potenciometru přiváděna logická 1. Vnější komunikace s MCU je realizována prostřednictvím CAN sběrnice.

5.2 Sběrnice SPI

SPI, anglicky Serial Peripheral Interface, umožňuje sériovou komunikaci mikroprocesorů s periferními obvody (A/D, D/A převodníky, displeje, čidla, apod.) nebo s ostatními MCU. Výhodou tohoto rozhraní je především jednoduchá implementace. Přenos dat je synchronní a rychlost komunikace odpovídá frekvenci hodinového signálu CLK. Na sběrnici je pouze jeden master a určité množství slave obvodů. Počet slave obvodů bývá omezen možnostmi masteru. Na obrázku 42 jsou konkrétně 4 slave obvody. Každý slave má svůj chip select, tento signál slouží jako adresovací. Master musí mít ke každému slave obvodu zvlášť veden signál CS neboli chip select. Dalšími signály jsou MOSI a MISO. První signál MOSI, anglicky master out, slave in, označuje přenos dat z obvodu master do obvodu slave. Naopak signál MISO, anglicky master in, slave out znamená přenos dat směrem z obvodu slave do obvodu master. Master musí zaručit, že k datům bude přistupovat pouze jeden z obvodů slave.



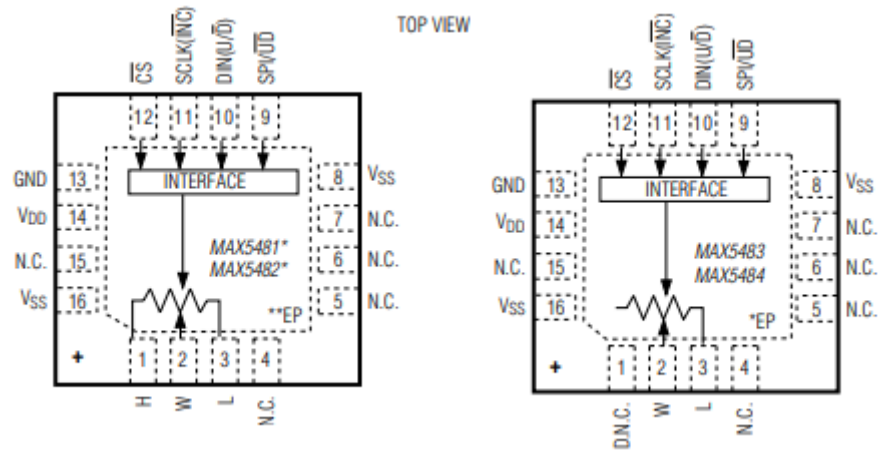
Obrázek 42: Zapojení se sběrnici SPI [3]

To zajistí signálem CS, kdy vybere pouze jeden ze slave obvodů. Souběžně jsou generovány hodiny CLK (SCK). S každou periodou je přenášen jeden bit po lince MISO a zároveň po lince MOSI. Signál CLK určuje dobu, ve které má přijímač přečíst linku s daty. Přijímač reaguje na vzestupnou i sestupnou hranu. Parametry přenosu definují spíše možnosti slave obvodů.

5.3 Specifikace jednotlivých částí

5.3.1 Digitální potenciometr MAX5483 a MAX5481

S ohledem na nezbytné vlastnosti, kterými musí digitální potenciometr disponovat, byl vybrán konkrétně MAX5483 a MAX5481. Základní rozdíl mezi těmito digitálními potenciometry je v možnostech zapojení a maximálními procházejícími proudy. MAX5481 lze zapojit i jako potenciometr i jako reostat. Je tedy vhodný pro nastavování napětí pro napěťový sledovač. MAX5483 se dá zapojit pouze jako reostat, ale maximální proud je 5 krát vyšší než u MAX5481, konkrétně 5mA. V obvodu tak bude potřeba jeden MAX5481 a dvakrát MAX5483. Na obrázku 43 jsou zobrazeny pouzdra včetně vývodů obou digitálních potenciometrů MAX5481 a MAX5483.



Obrázek 43: MAX5481 (vlevo) a MAX5483 (vpravo), převzato z [5]

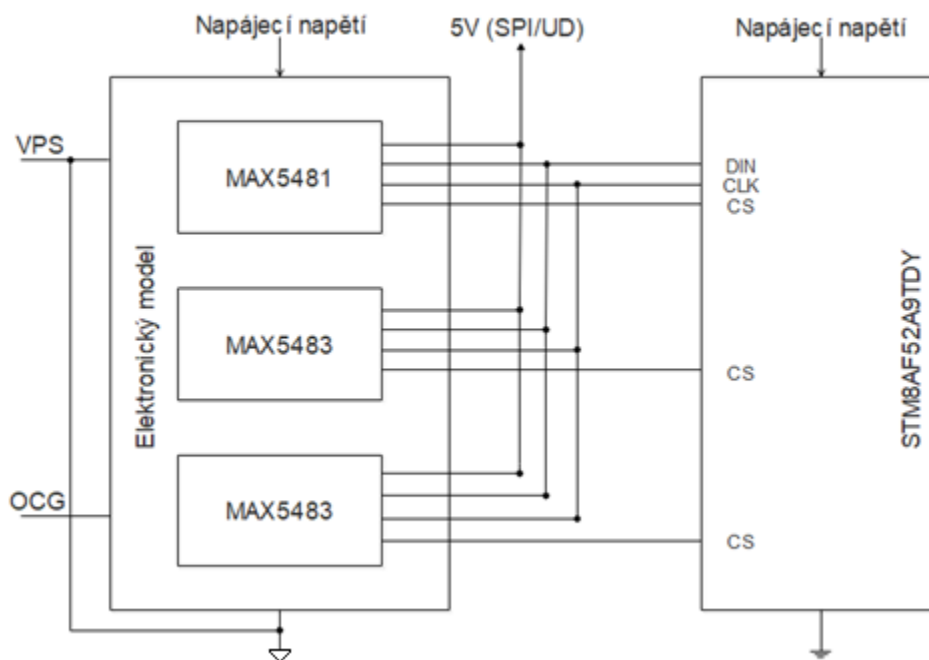
Oba tyto digitální potenciometry mají jinak shodné vlastnosti. Řada MAX5481 a MAX5483 obsahuje nevolatilní paměti. Nevolatilní znamená, že si uchovávají obsah i po odpojení napájení. Maximální hodnota odporu je 10kΩ. Tento digitální potenciometr je 10 bitový. To znamená, že hodnota odporu se dá nastavit s krokem přibližně 10Ω. To je postačující přesnost pro účel elektronického modelu. Napájecí napětí je nesymetrické +5V. Na piny H, W nebo L lze přivést maximálně napětí v rozsahu napájecího napětí. Digitální potenciometr se nastavuje pomocí externí sběrnici SPI.

5.3.2 MCU STM8AF52A9TDY

Tento MCU byl již použit v ZF v projektu [4]. Tento projekt obsahoval i komunikaci pomocí sběrnice CAN s ostatním hardwarem používaným v ZF. Konkrétně byl použit CAN vysílač TJA1042T. Je tak možné již vyjít z funkčního projektu a pouze jej doplnit o komunikaci s digitálními potenciometry. Tento procesor umožňuje i komunikaci pomocí sběrnice SPI, je tedy ideální volbou pro finální funkční vzorek.

Maximální frekvence jádra je 24MHz. Programová paměť je 128kB, datová paměť je 2kB, paměť RAM je 6kB. V závislosti na vybraném pouzdře je k dispozici až 68 uživatelských pinů. Komunikační rozhraní je tvořeno vysokorychlostní CAN, USART s hodinovým výstupem pro synchronní provoz, LIN, I²C a SPI. Přenosová rychlost SPI je do 10Mbit/s. Řízení hodin je možné buďto externím krystalovým oscilátorem, nebo je možné použít vnitřní 16MHz RC oscilátor a nízko výkonový RC oscilátor s frekvencí 128kHz. MCU bude provozován s napájecím napětím 5V.

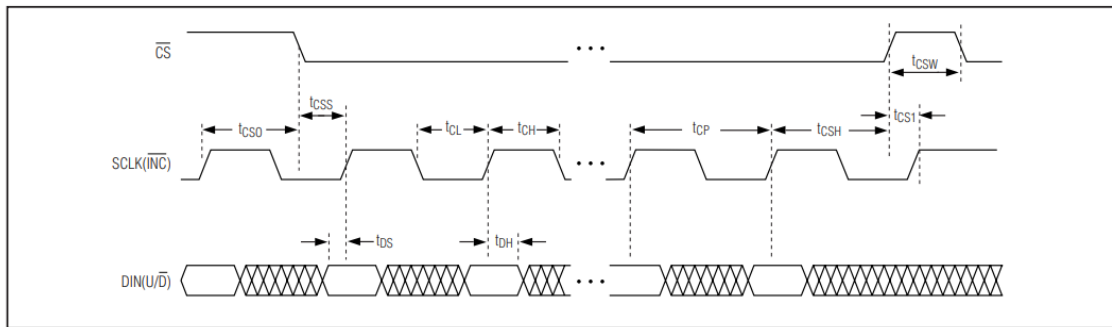
5.3.3 Komunikace digitálních potenciometrů s MCU



Obrázek 44: Komunikace MCU s digitálními potenciometry

Digitální potenciometr MAX5481 a MAX5483 umožňuje komunikaci v rámci rozhraní SPI nebo rozhraní tzv. up/down. Celkem se digitální potenciometr ovládá pomocí čtyř signálů. Na obrázku 44 je naznačená komunikace s MCU pro jeden elektronický model.

- SPI/UD – Přepínání mezi rozhraním SPI a up/down. Pro SPI musí být přiváděn signál v logické 1.
- DIN – Tento signál slouží pro přenos dat. Obdoba MOSI.
- SCLK – Hodinový signál z MCU.
- CS – Chip Select, Master si vybere pomocí CS slave obvod, se kterým chce komunikovat.



Obrázek 45: Zpracování dat digitálním potenciometrem MAX5481 a MAX 5483, převzato z [5]

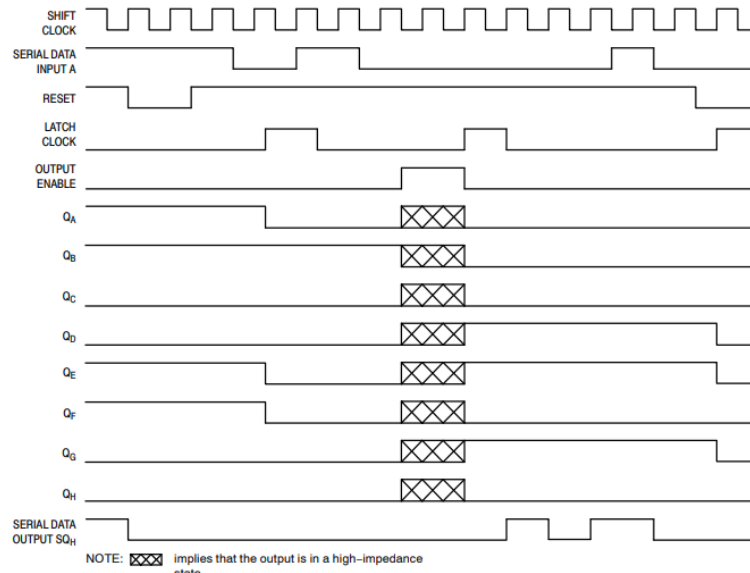
V případě digitálních potenciometrů postačuje komunikace simplexní. To znamená, že komunikace je pouze jednosměrná. Digitální potenciometr pouze zpracovává obdržená data, sám ale žádné data neodesílá. Signál MISO v tomto případě odpadá. Na obrázku 45 je ukáзка zpracovávání dat digitálním potenciometrem.

Při návrhu elektronického modelu reálného ventilu, je potřeba vzít v úvahu počet potřebných výstupů z MCU. Výsledný funkční vzorek má obsahovat osm elektronických modelů umístěných na jedné desce. Tato deska bude obsahovat pouze jeden MCU. V případě každého samostatného elektronického modelu jsou použity tři digitální potenciometry. Digitální potenciometr sdílí signály SPI/UD, DIN(U/D) a SCLK(INC). Pouze signál CS musí být z MCU vyveden pro každý digitální potenciometr zvlášť. Pro samostatný elektronický model je to tedy 5 vývodů z MCU. Pro výsledný funkční vzorek je to pak 26 potřebných vývodů z MCU. Maximální frekvence signálu SCLK pro digitální potenciometry je 7MHz. Z obrázku 44 je patrné, že MCU a elektronický model mají rozdílné zemní potenciály. Je nezbytné signály galvanicky oddělit.

5.3.4 8-bitový posuvný registr HCT595A

Pro snížení počtu potřebných výstupů z mikroprocesoru byl vybrán integrovaný obvod HCT595A. Tento integrovaný obvod má 8 bitový sériový vstup a paralelní výstup

z paměťových registrů. Skládá se z posuvných registrů a paměťových registrů typu D. Paměťový registr má tři stavový výstup. Výstupní rozhraní je kompatibilní s CMOS, NMOS a TTL. Provozní rozsah napětí je tak 4,5V až 5,5V. Integrovaný obvod HCT595A může být přímo propojen se sériovým datovým portem SPI MCU. Vstupy jsou kompatibilní s CMOS a TTL.



Obrázek 46: Nastavení výstupních dat u integrovaného obvodu HCT595A, převzato z [6]

Tento integrovaný obvod je ovládán 5 signály. Signál Serial Data Input je 8 - bitový vstupní signál. Signál Shift Register Clock Input je hodinovým signálem pro posuvné registry. S každou náběžnou hranou tohoto hodinového signálu jsou data posunuta o registr dále. Po naplnění všech posuvných registrů se očekává náběžná hrana signálu Storage Latch Clock Input. Data jsou takto zachyceny pro výstupní paměťové registry. Pro přečtení výstupních dat je nutné, aby byl signál Output Enable v logické 0. V případě, že by byl tento signál v logické 1, byl by výstup ve vysoko impedančním stavu. Tohoto stavu se využívá v okamžiku zachycování dat z posuvného registru do výstupního paměťového registru. Signálem Reset je umožněno vynulovat obsah posuvných registrů, obsah výstupních paměťových registrů je zachován. Na obrázku 46 je zobrazeno nastavení výstupních dat u integrovaného obvodu HCT595A.

5.3.5 Vysokorychlostní CAN vysílač TJA1042T

Jedním z požadavků bylo umožnit vzdálenou konfiguraci elektronického obvodu. Konkrétně bylo požadováno, aby byla komunikace s MCU umožněna skrze sběrnici CAN. Tento vysílač byl vybrán ze stejných důvodů jako MCU. Komunikace v rámci sběrnice

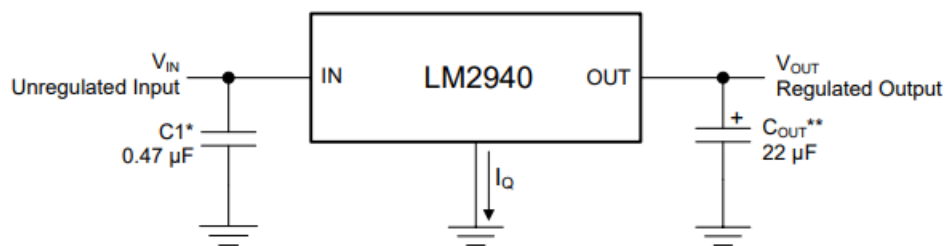
CAN a MCU STM8AF52A9TDY vychází z diplomové práce [4].

Napájecí napětí je v rozsahu 3 až 5V, vzhledem k zvolenému napájecímu napětí 5V u MCU, bude i zde 5V. TJA1042T disponuje implementací CAN fyzické vrstvy, která je definována v ISO 11898-2:2016 a SAE J2284-1 až SAEJ2284-5. Tato implementace umožňuje vysokorychlostní síť pomocí sběrnice CAN FD. Umožňuje i probouzení z nízko výkonového režimu prostřednictvím CAN sběrnice. Sběrnice CAN FD umožňuje datový přenos rychlostí až 5Mbit/s.

5.3.6 Napěťový regulátor LM2940CT-5.0

Napájecí napětí integrovaných obvodů STM8AF52A9TDY, HCT595A a TJA1042T je shodně 5V. Finální funkční vzorek bude napájen z externího zdroje 12V. V případě elektronického obvodu je zde umístěn DC/DC měnič s galvanicky oddělným vstupem a výstupem. To je důsledek připojení VPS k zemnímu potenciálu elektronického modelu. Pro STM8AF52A9TDY, HCT595A a TJA1042T může být napájecí napětí galvanicky spojeno s externím zdrojem. Je pak ale nezbytné galvanicky oddělit komunikační signály mezi MCU a elektronickým modelem.

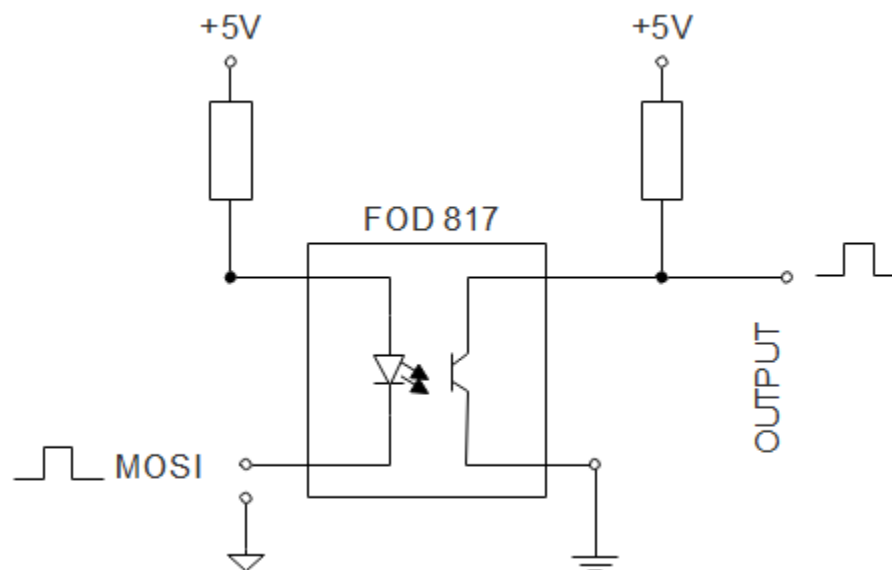
LM2940CT-5.0 je napěťový regulátor s nízkým úbytkem napětí. Pracuje se vstupním napětím od 6V do 26V. Výstupní napětí je 5V a výstupní proud dosahuje až 1A. To by měl být dostačující výkon pro všechny tři integrované obvody. Dále obvod obsahuje ochranu proti přepólování a zkratu na výstupu. Na obrázku 47 je typický příklad zapojení.



Obrázek 47: Typický příklad použití LM2940CZ-5.0

5.3.7 Optočlen s fototranzistorem FOD817

Komunikace musí být galvanicky oddělena vlivem rozdílných zemních potenciálů. Pro tento účel byl vybrán optočlen FOD817. Zapojení obvodu, který je potřeba oddělit galvanicky je na následujícím obrázku 48.



Obrázek 48: Zapojení optočlenu FOD817

6 Závěr

Tato práce navazovala na předchozí práci [1] a kladla si za cíl nalézt funkční model reálného elektromagnetického ventilu pro proces testování TCU. Ze strany ZF bylo požadováno zaměřit se na možnost využití analogového elektronického modelu.

Prvním úkolem této práce bylo proměřit elektrické parametry reálných elektromagnetických ventilů. V kapitole 2 je obecně popsán elektromagnetický ventil, jeho funkce a použití. V podkapitole 2.1 jsou specifikovány elektromagnetické ventily používané v ZF. V podkapitole 2.2 jsou zmíněny elektrické parametry reálného ventilu, kterým musí elektronický model odpovídat. Dále jsou v této kapitole proměřeny předložené vzorky ventilů.

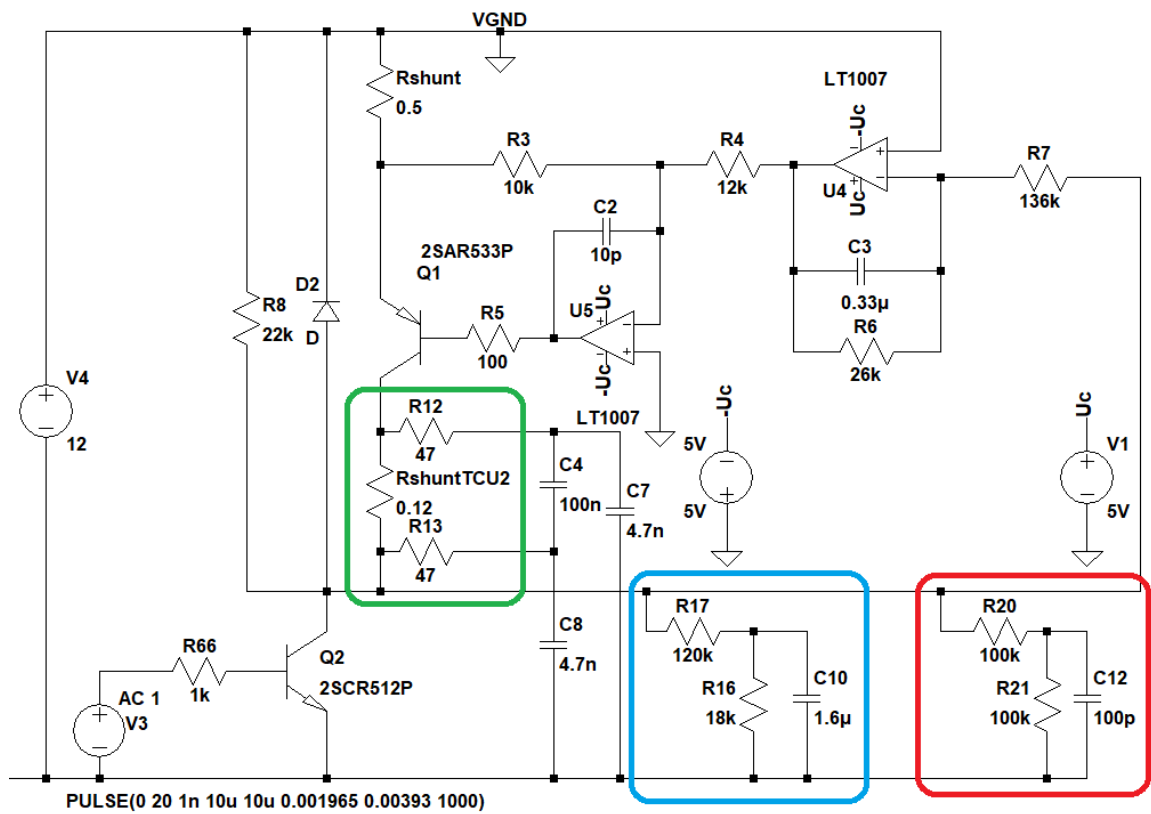
Druhým úkolem bylo navrhnout elektronickým model ventilu s ohledem na možnost elektronické modifikace jeho elektrických parametrů. Tímto úkolem se zabývá kapitola 3 a 4 této práce. V kapitole 3 je popsán analogový elektronický model převzatý z předchozí práce. Vzhledem k nedostatkům tohoto modelu byl navržen vlastní elektronický model. Ten je podrobně popsán v kapitole 4. Oba modely byly sestaveny a ověřeny měřením na HILu. Stejně měření bylo provedeno i s reálným ventilem. Výsledné průběhy a hodnoty byly porovnány v podkapitole 4.1.4. Tím byl splněn i třetí bod zadání, v tomto bodu bylo požadováno sestavit funkční vzorek modelu ventilu, proměřit jeho parametry a porovnat je s reálným ventilem. Elektronický model splňoval požadavky uvedené v podkapitole 3.1. Neumožňoval pouze vzdálenou elektrickou konfiguraci elektrických parametrů.

Čtvrtým a posledním úkolem bylo navrhnout způsob elektronické modifikace elektrických parametrů modelu ventilu. Poslední kapitola 5 se tak zabývá návrhem finálního funkčního vzorku, který umožní vzdálenou konfiguraci parametrů modelu. K tomu využívá digitálních potenciometrů řízených MCU. Digitální potenciometry se nastavují prostřednictvím SPI sběrnice. Vzdálená konfigurace je pak umožněna pomocí sběrnice CAN. Elektronický model ve zpětné vazbě napodobuje chování reálného elektromagnetického ventilu. Naměřené hodnoty elektronického modelu vyhovují tolerancím testeru. Výsledný funkční vzorek splňuje očekávání ze strany ZF engineering Plzeň a bude dále vyvíjen.

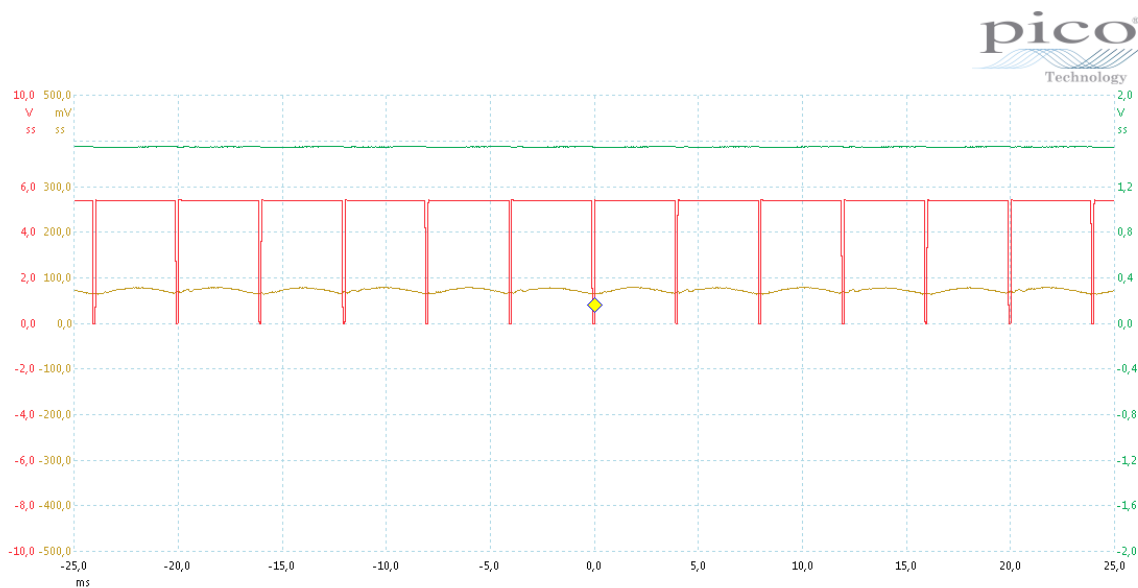
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MUMCU, Ömer. *Electrical Load Simulation for test Environment*. Bahnhofstraße 61, 87435 Kempten (Allgäu), Deutschland, 2018. Master Thesis. Hochschule Kempten University of Applied Sciences. Vedoucí práce Prof. Dr. -Ing Lothar Czarnecki.
- [2] Aktivní zátěž | Vývoj.HW.cz. *Vývoj.HW.cz | Vše o elektronice a programování* [online]. Copyright © 1997 [cit. 11.03.2018]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/aktivni-zatez.html>
- [3] SPI rozhraní : Tajned - .NET and Embedded Development. *Tajned - .NET and Embedded Development* [online]. Copyright © http [cit. 29.04.2018]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/12/spi-rozhrani/>
- [4] HÁŠ, Martin. *Systém pro měření pomocí protokolu XCP* [online]. Univerzitní 2732/8, 301 00 Plzeň 3, 2018 [cit. 2018-05-09]. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.
- [5] MAX5481–MAX5484 [online]. Copyright © [cit. 12.05.2018]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5481-MAX5484.pdf>
- [6] Semiconductor and Integrated Circuit Devices [online]. Copyright © [cit. 12.05.2018]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC74HCT595A-D.PDF>
- [7] Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com [online]. Copyright © [cit. 12.05.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2940c.pdf>

Přílohy



Obrázek 49: Kompletní schéma simulovaného původního elektronického obvodu po úpravě včetně snímačů TCU

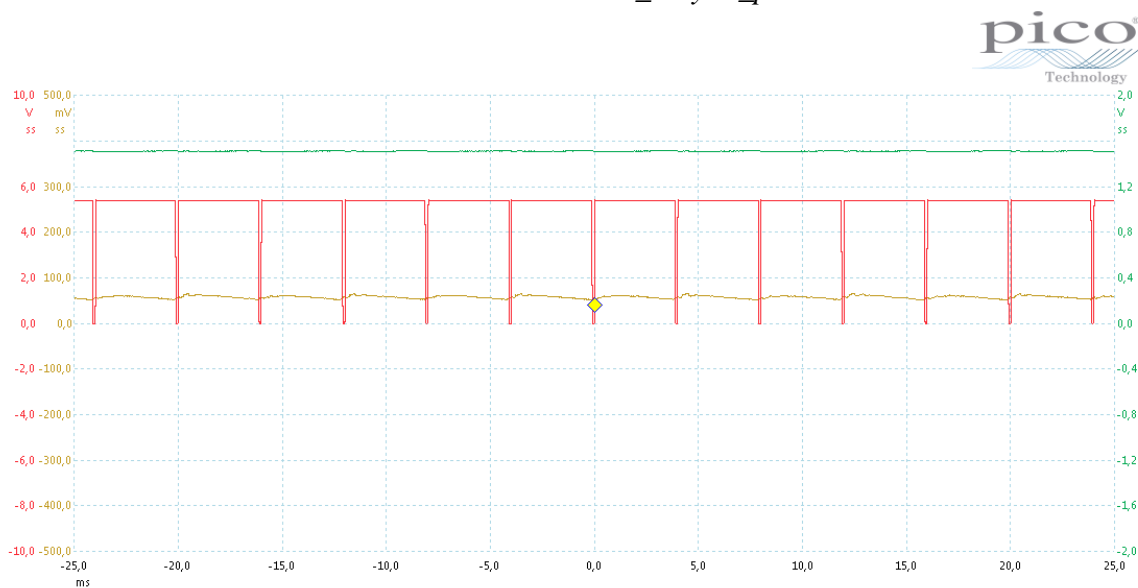


13.3.2018 16:22:14

Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	97,12 %	97,12 %	97,12 %	97,12 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	3,885 ms	3,885 ms	3,885 ms	3,885 ms	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	115 μ s	115 μ s	115 μ s	115 μ s	0 s
B	Čas ožklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	1,554 V	1,554 V	1,554 V	1,554 V	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	74,38 mV	74,38 mV	74,38 mV	74,38 mV	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

Obrázek 50: Ventil 501327426_duty03_proud27mA

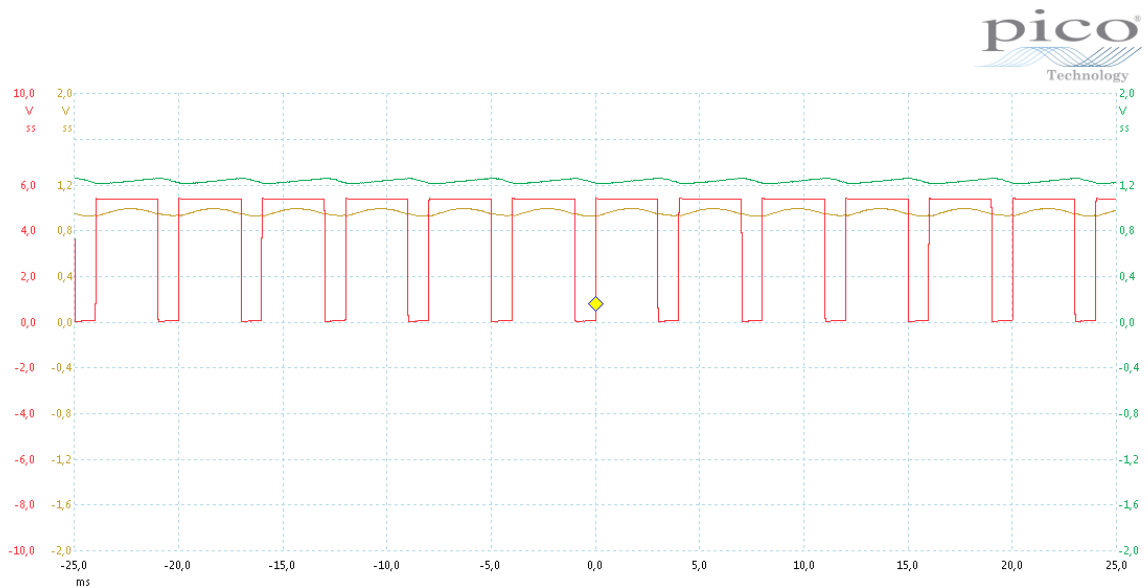


13.3.2018 16:47:23

Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	97,12 %	97,12 %	97,12 %	97,12 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	3,884 ms	3,884 ms	3,884 ms	3,884 ms	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	115 μ s	115 μ s	115 μ s	115 μ s	0 s
B	Čas ožklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	1,517 V	1,517 V	1,517 V	1,517 V	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	59,39 mV	59,39 mV	59,39 mV	59,39 mV	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

Obrázek 51: model_duty03_proud20mA

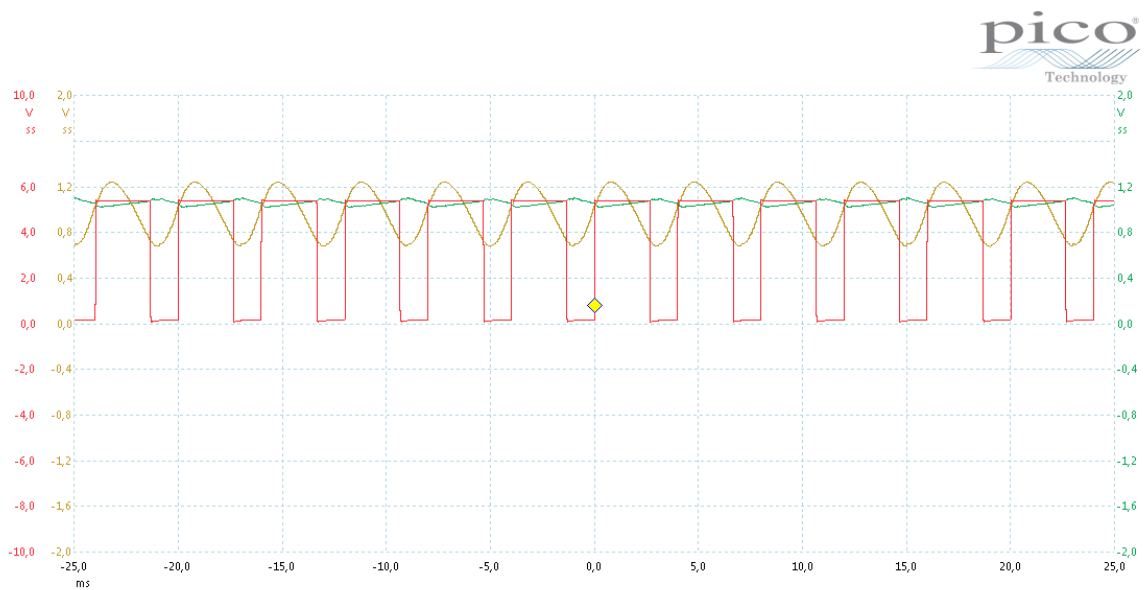


13.3.2018 16:33:37

Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	75,22 %	75,22 %	75,22 %	75,22 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	3,006 ms	3,006 ms	3,006 ms	3,006 ms	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	995 μ s	995 μ s	995 μ s	995 μ s	0 s
B	Čas cyklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	1,241 V	1,241 V	1,241 V	1,241 V	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	967,7 mV	967,7 mV	967,7 mV	967,7 mV	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

Obrázek 52: Ventil 501327426_duty25_proud400mA

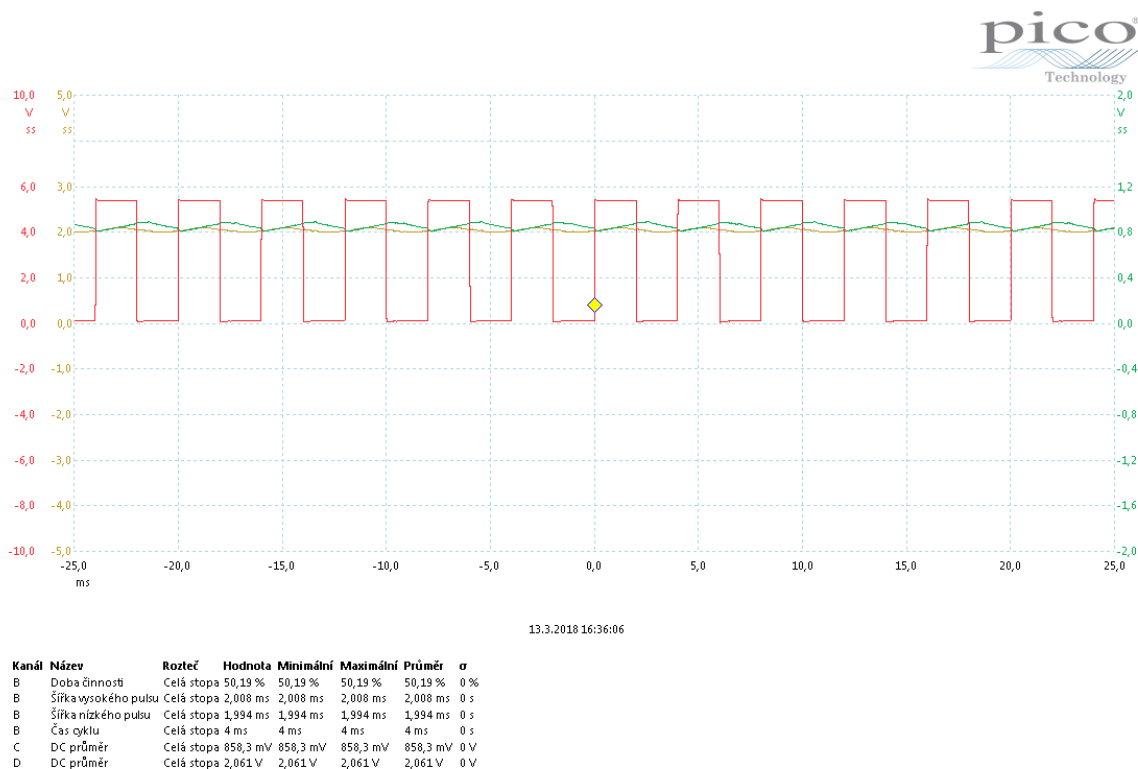


13.3.2018 16:55:52

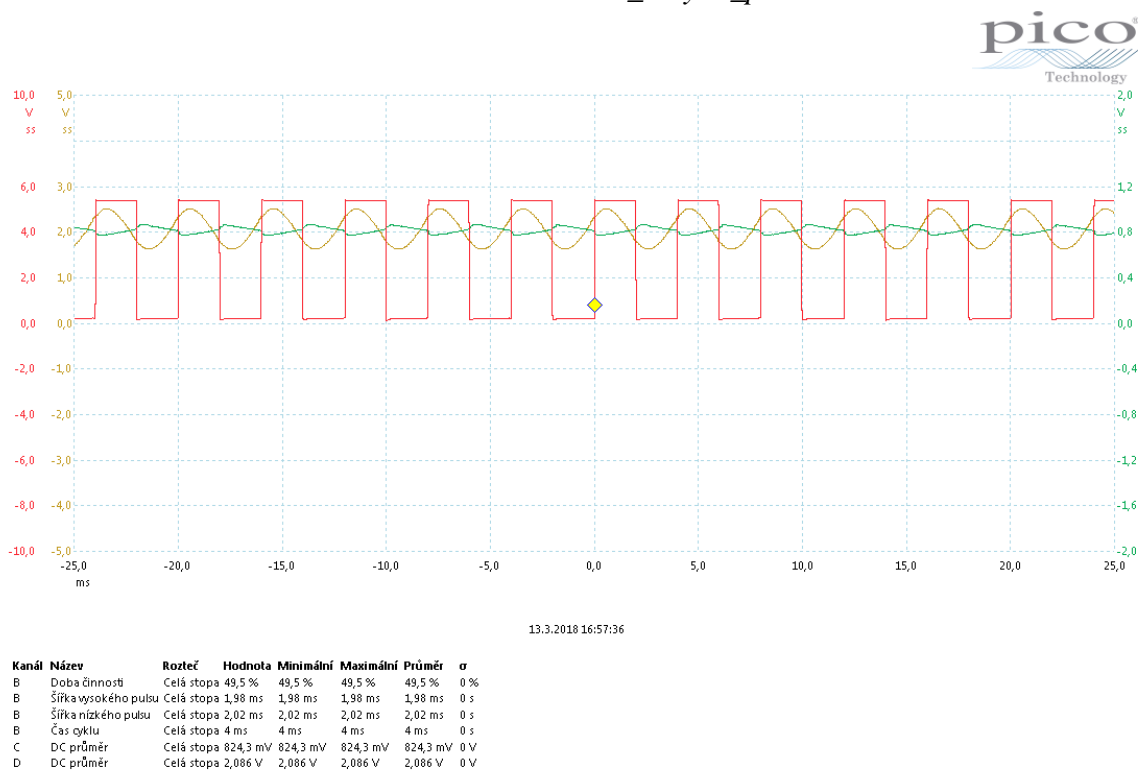
Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	66,63 %	66,63 %	66,63 %	66,63 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	2,665 ms	2,665 ms	2,665 ms	2,665 ms	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	1,335 ms	1,335 ms	1,335 ms	1,335 ms	0 s
B	Čas cyklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	1,065 V	1,065 V	1,065 V	1,065 V	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	980,1 mV	980,1 mV	980,1 mV	980,1 mV	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

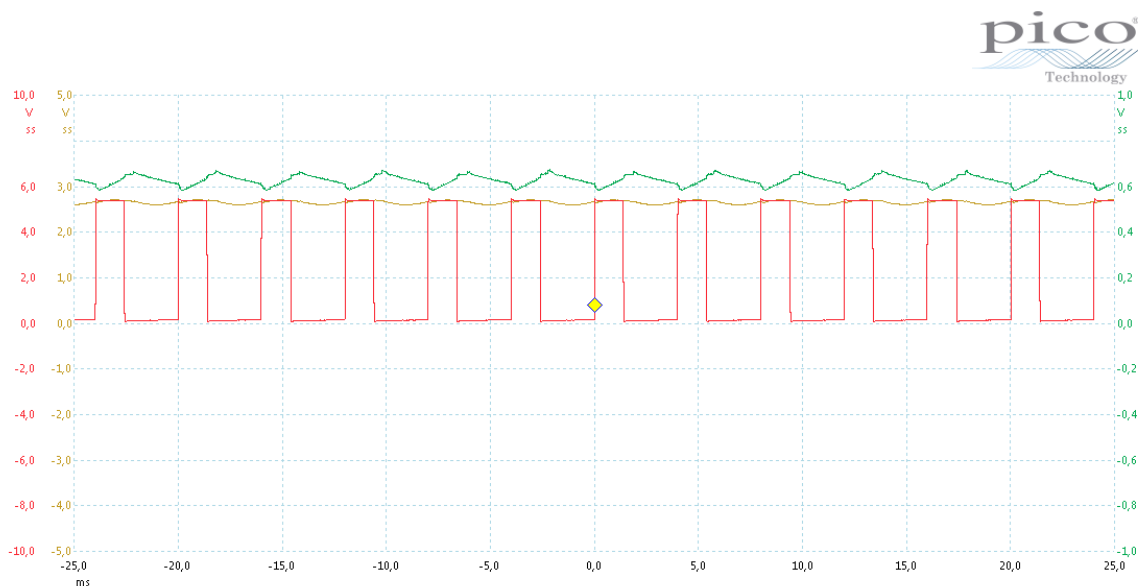
Obrázek 53: model_duty33_proud400mA



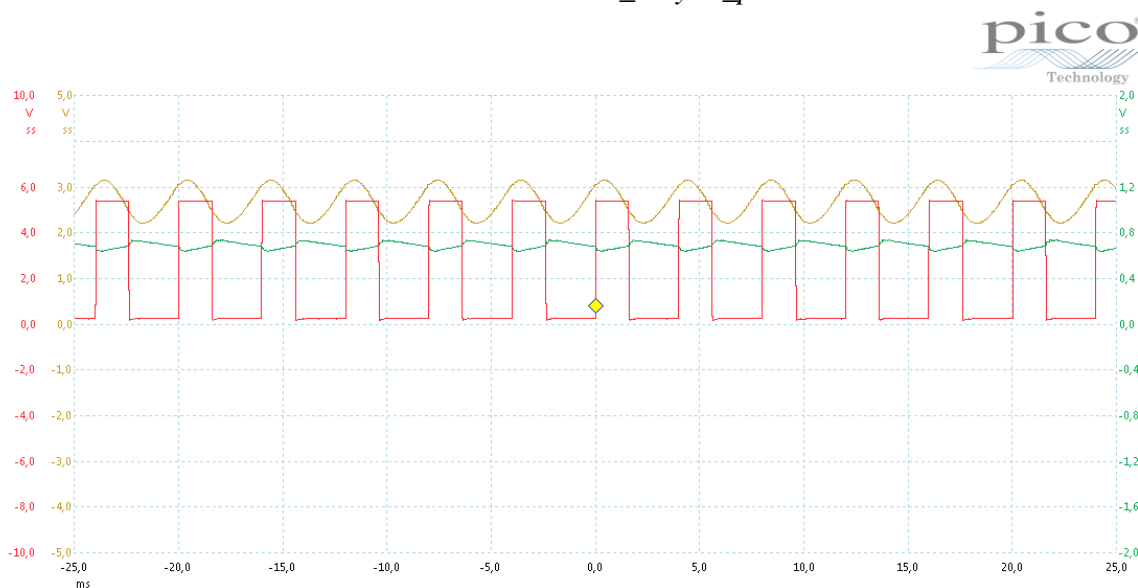
Obrázek 54: Ventil 501327426_duty50_proud850mA



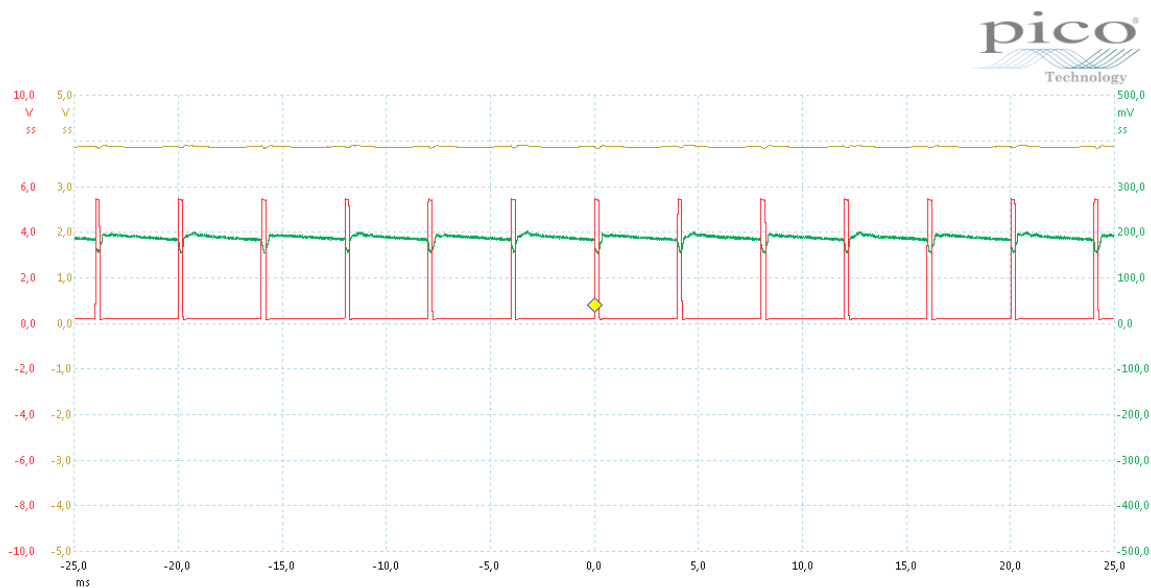
Obrázek 55: model_duty50_proud850mA



Obrázek 56: Ventil 501327426_duty65_proud1100mA



Obrázek 57: model_duty60_proud1100mA

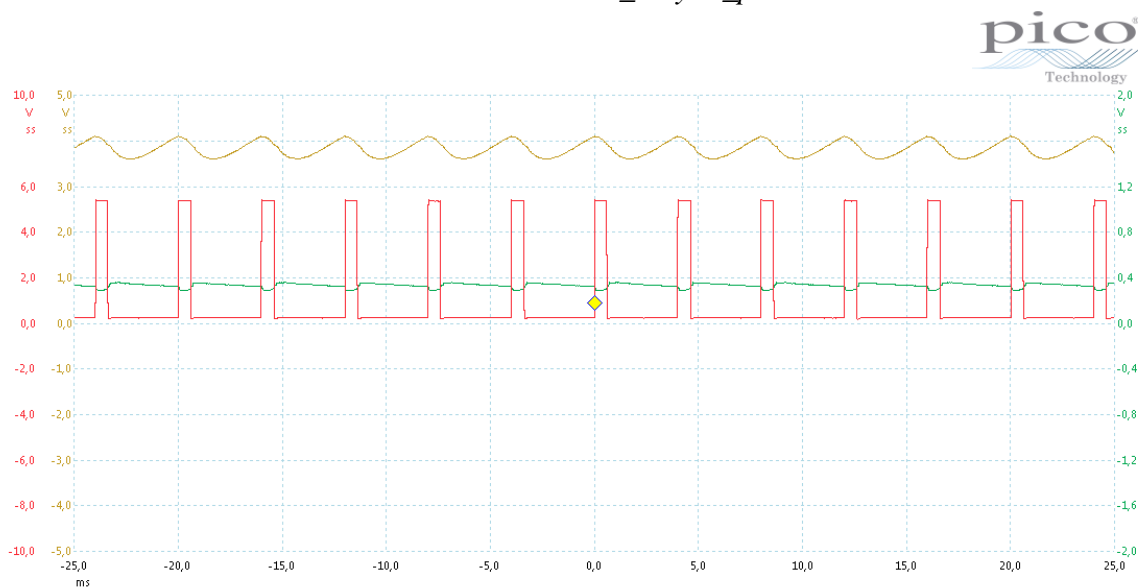


13.3.2018 16:39:42

Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	5,131 %	5,131 %	5,131 %	5,131 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	209,6 μ s	209,6 μ s	209,6 μ s	209,6 μ s	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	3,79 ms	3,79 ms	3,79 ms	3,79 ms	0 s
B	Čas ožklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	188,3 mV	188,3 mV	188,3 mV	188,3 mV	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	3,887 V	3,887 V	3,887 V	3,887 V	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

Obrázek 58: Ventil 501327426_duty95_proud1600mA

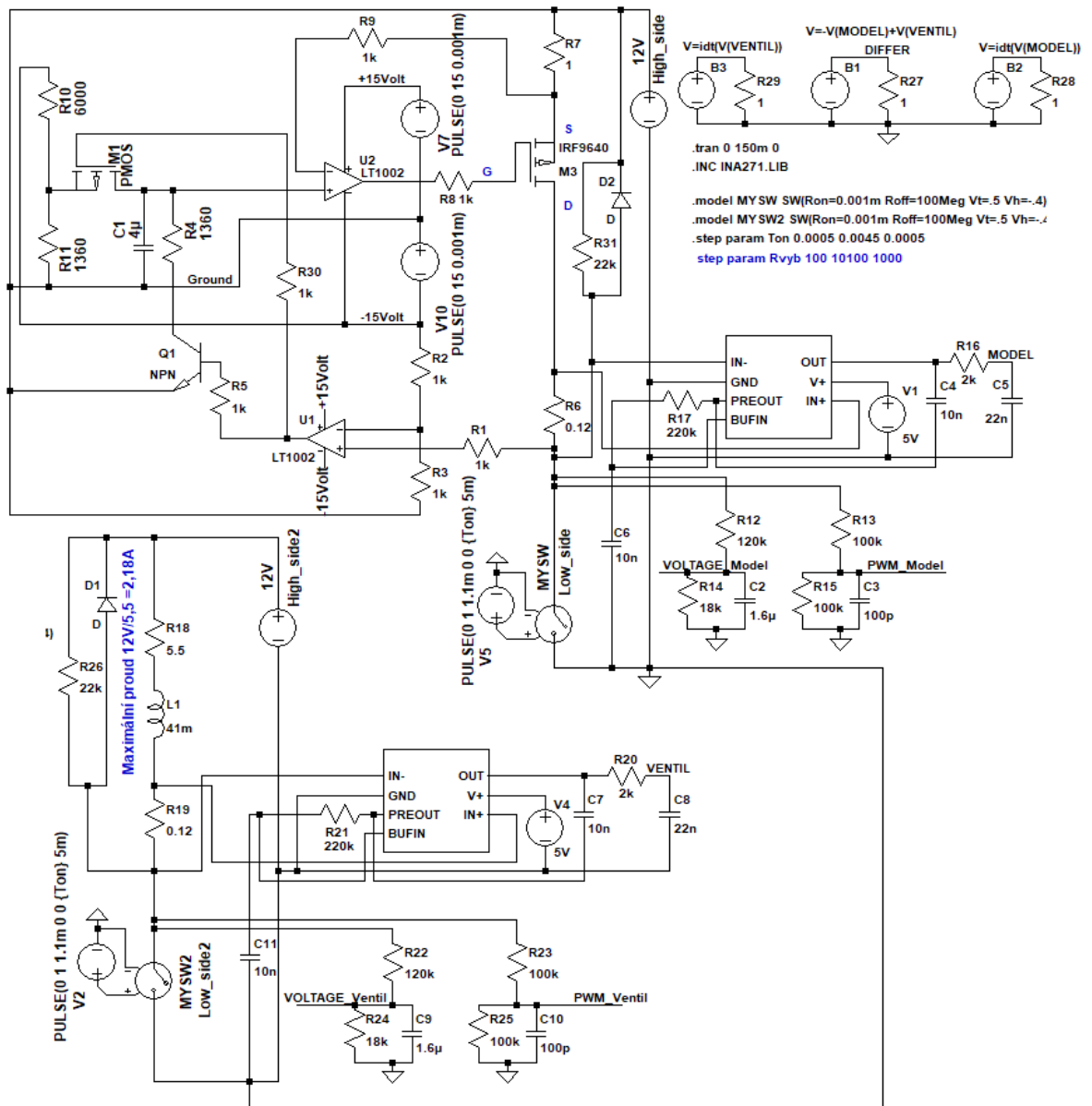


13.3.2018 17:13:27

Kanál	Název	Rozteč	Hodnota	Minimální	Maximální	Průměr	σ
B	Doba činnosti	Celá stopa	15,14 %	15,14 %	15,14 %	15,14 %	0 %
B	Šířka vysokého pulsu	Celá stopa	608,8 μ s	608,8 μ s	608,8 μ s	608,8 μ s	0 s
B	Šířka nízkého pulsu	Celá stopa	3,39 ms	3,39 ms	3,39 ms	3,39 ms	0 s
B	Čas ožklu	Celá stopa	4 ms	4 ms	4 ms	4 ms	0 s
C	DC průměr	Celá stopa	339 mV	339 mV	339 mV	339 mV	0 V
D	DC průměr	Celá stopa	3,847 V	3,847 V	3,847 V	3,847 V	0 V

Technologie společnosti Pico www.picotech.com PicoScope 6 Verze 6.11.12.1692 PicoScope 6404D

Obrázek 59: model_duty85_proud1580mA



Obrázek 60: Schéma vlastního modelu pro simulaci v LTspice