

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh a realizace vstupní multiplexerové karty pro měřicí ústřednu
MX2400**

Josef Krieglstein

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef KRIEGLSTEIN**
Osobní číslo: **E14N0013K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh a realizace vstupní multiplexerové karty pro měřicí ústřednu MX2400**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

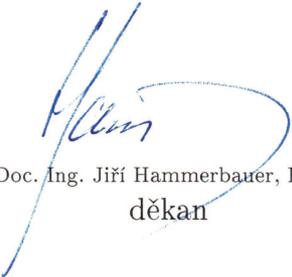
1. Proveďte analýzu požadavků trhu a rozbor komponent (porovnání spínačů, relé, integrovaný obvod z diskrétních součástek) a dostupných zařízení, stanovte parametry odpovídajícího zařízení.
2. Navrhněte a realizujte vzorek vstupní části multiplexerové karty s vybranými typy spínačů, ověřte v provozu a porovnejte výsledky.
3. Navrhněte a realizujte vstupní multiplexerovou kartu dle výsledku analýzy v bodu 2.
4. Vytvořte vzorový testovací program v prostředí funTEST.

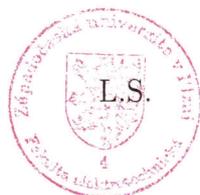
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Pinker, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem vstupní multiplexerové karty pro měřicí ústřednu MX2400. První kapitola obsahuje rozbor požadavků ICT, FT a WH testů, porovnání testerů a multiplexerových karet dostupných na trhu. Druhá kapitola provádí rozbor spínačů pro vstupní multiplexerové karty a dále uvádí rozdíly, výhody a nevýhody elektromechanických a polovodičových spínačů. Ve třetí kapitole je provedena analýza a výběr nejvhodnějších spínačů s ohledem na požadavky. Ve čtvrté kapitole je popsán návrh zapojení spínače a jeho řízení. V páté kapitole jsou popsány všechny části obvodového zapojení, přičemž tato kapitola je rozdělena na jednotlivé části multiplexerové karty. Návrh plošného spoje, rozmístění součástek se nachází v kapitole šesté. V sedmé kapitole je vzorový testovací program v prostředí funTEST. V osmé kapitole je měření stávající a nově navržené multiplexerové karty a jejich porovnání. V deváté kapitole je ekonomické zhodnocení nově navržené karty.

Klíčová slova

Multiplexer, polovodičový spínač, relé, měřicí ústředna.

Abstract

This master thesis deals with the multiplexer input card for measuring chassis MX2400. The first chapter provides an analysis of the requirements of ICT, FT and WH tests, comparison testers and multiplexer cards available on the market. The second chapter performs the analysis of switches for multiplexer input cards and presents the differences, advantages and disadvantages of electromechanical and semiconductor switches. The third chapter includes analysis and selection of the most appropriate switches chosen according to the requirements. In the fourth chapter is described the design of the switch and its driving. Fifth chapter describes the design of all parts of input card, this chapter is divided into parts according to the parts of multiplexer card. PCB proposal and component placement are in the sixth chapter. In the seventh chapter is an example of testing program in funTEST environment. The eighth chapter explains and presents measuring and comparison of the existing and newly designed card. The economic evaluation of newly designed card is described in the ninth chapter.

Key words

Multiplexer, solid state switch, relay, measurement chassis.

Prohlášení

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 9.5.2016

Josef Krieglstein

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 VSTUPNÍ MULTIPLEXEROVÉ KARTY	11
1.1 SPECIFIKA VSTUPNÍCH MULTIPLEXEROVÝCH KARET FT.....	12
1.2 SPECIFIKA VSTUPNÍCH MULTIPLEXEROVÝCH KARET ICT.....	14
1.3 SPECIFIKA VSTUPNÍCH MULTIPLEXEROVÝCH KARET WH TESTERŮ.....	14
1.4 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ MULTIPLEXEROVÝCH KARET.....	18
2 ROZBOR SPÍNAČŮ	19
2.1 ELEKTROMECHANICKÉ.....	19
2.2 POLOVODIČOVÉ.....	21
3 VOLBA SOUČÁSTEK SPÍNAČE	24
4 NÁVRH SPÍNAČE	26
4.1 ČTYŘVÝVODOVÝ TRANZISTOR A JEHO ŘÍZENÍ.....	26
4.2 ŘÍZENÍ SPÍNAČŮ NA SPOLEČNÉM VODIČÍ SBĚRNICE.....	27
4.3 DIGITÁLNÍ OBVODY ŘÍZENÍ SPÍNAČŮ.....	28
5 NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ	29
5.1 ROZHRANÍ MĚŘÍCÍ ÚSTŘEDNY.....	29
5.2 ROZHRANÍ SBĚRNICE MĚŘÍCÍ ÚSTŘEDNY.....	30
5.3 ROZHRANÍ TESTOVACÍCH BODŮ.....	31
5.4 ŘÍZENÍ POSUVNÝCH REGISTRŮ.....	31
5.5 ŘÍZENÍ POLOVODIČOVÝCH SPÍNAČŮ.....	33
5.6 POLOVODIČOVÉ SPÍNAČE.....	34
5.7 NAPÁJECÍ OBVODY.....	34
5.8 POMOCNÉ OBVODY.....	35
6 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE	40
6.1 ROZMĚROVÉ POŽADAVKY.....	40
6.2 ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK.....	40
7 VZOROVÝ TESTOVACÍ PROGRAM V PROSTŘEDÍ FUNTEST	43
8 MĚŘENÍ	44
8.1 MĚŘENÍ S MXC2.LCMX.32.....	46
8.2 MĚŘENÍ S MXC2.SSMX.32.....	48
8.3 MĚŘENÍ ODPORU SPÍNAČE A CEST NA PLOŠNÉM SPOJI.....	50
8.4 POROVNÁNÍ RELÉOVÉHO A POLOVODIČOVÉHO SPÍNAČE.....	51
9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU	53
ZÁVĚR	55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	57
PŘÍLOHY	59

<u>PŘÍLOHA A – SCHEMA PCB-0202-01-A.PDF.....</u>	<u>59</u>
<u>PŘÍLOHA B – BOARD PCB-0202-01-A.PDF.....</u>	<u>59</u>
<u>PŘÍLOHA C – FIRMWARE PCB-0202-01-A.PDF.....</u>	<u>59</u>
<u>PŘÍLOHA D – TESTOVACÍ PROGRAMY.ZIP.....</u>	<u>59</u>
<u>PŘÍLOHA E – FOTOGRAFIE OSAZENÉ PCB-0202-01-A.PDF.....</u>	<u>59</u>

Seznam symbolů a zkratk

FT.....	Funkční test
ICT.....	In-circuit Test, statické měření obvodů, nebo součástek v obvodu
TP.....	Test point, Testovací bod
RLC-metr.....	Přístroj pro měření odporu, indukčnosti a kapacity
WH.....	Wire harness, kabelové svazky
LV.....	Low voltage, nízko napěťový, nízké napětí
HV.....	High voltage, vysoko napěťový, vysoké napětí
DUT.....	Device Under Test, zkoušený díl
PC.....	Personal Computer, osobní počítač
DC.....	Direct Current, Stejnoseměrný proud
AC.....	Alternating Current, Střídavý proud
PCB.....	Printed Circuit Board, Deska plošných spojů
USB.....	Universal serial bus, univerzální sériová sběrnice
ETH.....	Ethernet, síťové rozhraní, lokální počítačová síť
LED.....	Light Emitting Diode, dioda emitující světlo
FET.....	Field Effect Transistor, Unipolární tranzistor
MOS.....	Metal Oxide Semiconductor
MOSFET.....	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
EMS.....	Poskytování výrobních služeb v oblasti elektroniky
PXI.....	PCI eXtensions for Instrumentation, PCI rozšíření pro měřící techniku
SCPI.....	Standardní příkazy pro programovatelné přístroje
LCMX.....	Multiplexerová karta s elektromechanickými spínači pro malý proud
SSMX.....	Multiplexerová karta s polovodičovými výkonovými spínači

Úvod

Sériová výroba elektroniky a kabelových svazků vyžaduje velmi důkladné testování, a to hlavně z důvodu předejití nutnosti oprav u hotových finálních výrobků. Pokud by se například na chybu kabelového svazku přišlo až po dokončení automobilu, náklady na opravu zdaleka převyšují náklady na samotné testovací pracoviště, které takovou chybu dokáže odhalit před vlastní montáží. Každý z těchto oborů výroby má svá specifika.

Ve výrobě kabelových svazků primárně měříme elektrickou vodivost daného propoje a elektrickou izolaci mezi propoji. Při měření odporu propoje se standardně využívají dvoudrátové i čtyřdrátové metody. Měření izolace se provádí nízkým i vysokým napětím, přičemž záleží jaké jsou specifikace daného výrobku.

Ve výrobě elektroniky se využívá dvou hlavních kroků. Po kompletním osazení plošného spoje se provede ICT test. Jedná se o změření co největšího množství komponent a spojů daného výrobku. Když ICT test dopadne dobře, výrobek se testuje funkčním testem, při kterém je výrobek napájen, programován, stimulován a měřen.

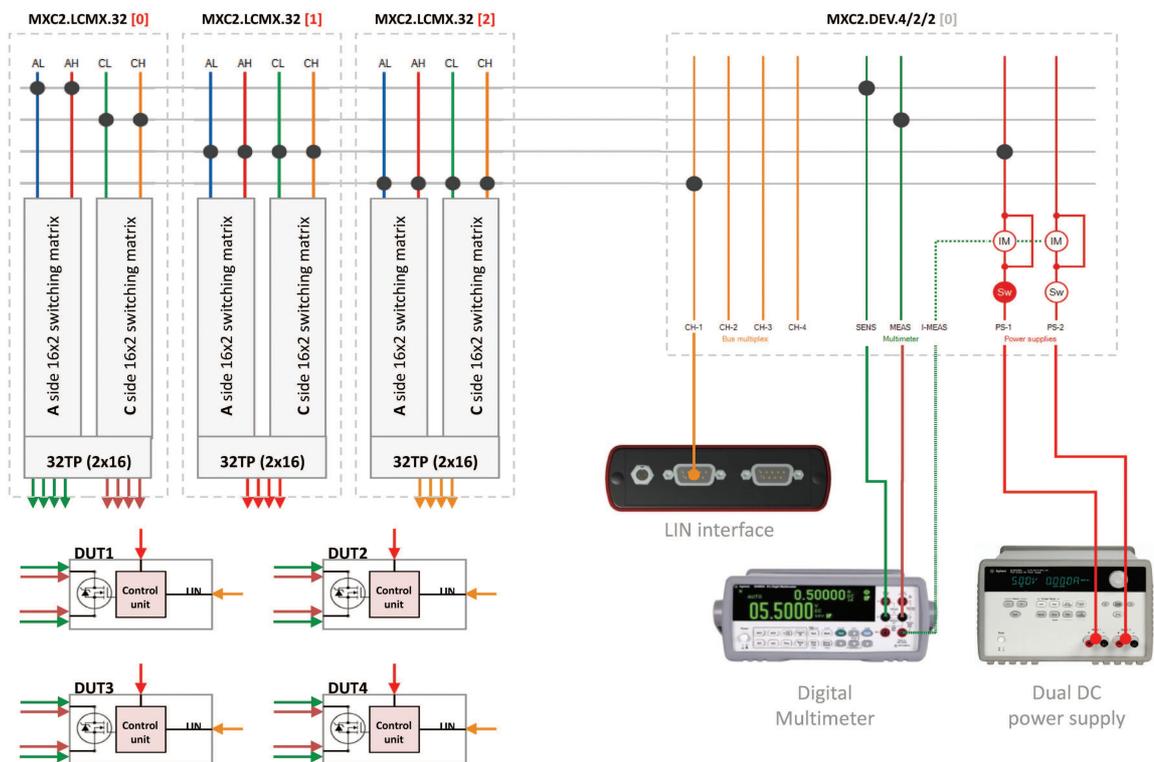
Všechny testovací procesy jsou založeny na propojení velkého množství kontaktovacích míst k nějakému přístroji. Takovéto propojení si žádá využití multiplexeru. Provedení multiplexerů může být různé. Tato diplomová práce obsahuje konkrétní návrh polovodičové multiplexerové karty pro potřeby měřicí ústředny firmy FPC s.r.o.. Na trhu je možné zakoupit hotové multiplexery i hotové testery. V konkrétní situaci je třeba posoudit mnoho výhod a nevýhod různých řešení a z nich vybrat to, které nejvíce vyhovuje.

V následujících kapitolách budou porovnány jak hotové testery, tak i komponenty multiplexerů. Mezi komponenty pro multiplexery složené z karet se na západoevropském trhu hojně využívají komponenty firem National Instruments, Pickering a Keysight, a to především z důvodu více automatizovaných procesů, kdy si velcí výrobci elektroniky udržují na všech pobočkách standardizované komponenty a procesy. Tito velcí výrobci měřicí a přepínací techniky mají celosvětová zastoupení, která jsou pro mezinárodní výrobce elektroniky velmi důležitá. Oproti tomu výroba ve střední a východní Evropě je celkově méně automatizovaná a více se využívá lidské práce. Nachází se zde větší množství malých EMS výrobců, kteří mají menší počet poboček nebo mají pobočku jedinou. Tito malí výrobci kladou větší důraz na pořizovací náklady než velké společnosti.

Společnost FPC s.r.o. zadala požadavek na návrh a realizaci vstupní polovodičové multiplexerové karty včetně tvorby vzorového testovacího programu v prostředí funTest. Dle nákladové specifikace nesmí být navrženo pracoviště s polovodičovou multiplexerovou kartou dražší, než řešení na bázi PXI. Společnost FPC s.r.o. mi zpřístupnila zdrojové soubory měřicí ústředny MX2400, tak aby nově navržená polovodičová karta ve všech ohledech zapadala do portfolia MX2400 a příslušenství. Jako název karty byla zvolena zkratka SSMX, společnost FPC s.r.o. ve svém katalogu přidělila pro plošný spoj karty katalogové jméno PCB-0202-01-A, pro seznam použitého materiálu označení BOM-0202-01-A, identifikaci karty pak MXC2.SSMX.32.12.

1 Vstupní multiplexerové karty

Testovací zařízení se skládá ze zdroje napětí nebo proudu, vstupních obvodů a měřicího přístroje. Vstupní obvody jsou tvořeny připojovacími vodiči a multiplexery. Multiplexer má na starosti připojení zdrojů a měřicích přístrojů ke zkušebnímu obvodu. Sestava může být řešena například dvěma multiplexery propojenými sběrnici, jako na Obr. 1. Tím je možné připojovat více různých měřicích přístrojů.



Obr. 1: Vnitřní zapojení MX2400 [1]

Na Obr. 1 je vnitřní propojení jednotlivých multiplexerů. V levé části se nachází multiplexerové karty, které připojují testovací body na vnitřní 8 vodičovou sběrnici, v pravé části jsou multiplexerové karty pro připojení přístrojů k vnitřní sběrnici. Obrázek plně osazené měřicí ústředny MX2400 je na Obr. 2. V levé části jsou zobrazeny nízkonapěťové multiplexerové karty s elektromechanickými spínači, v pravé části jsou další karty, jako například: řídicí karta, karta stejnosměrného zdroje a karta pro připojení externích přístrojů.



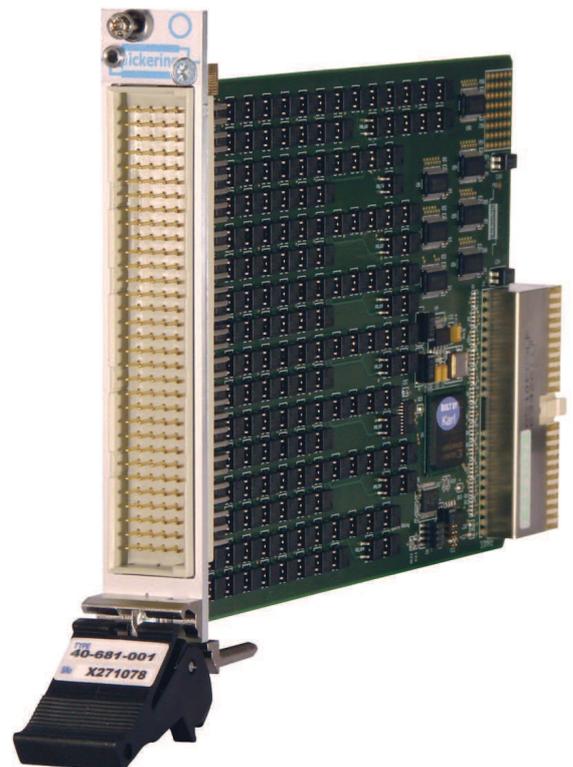
Obr. 2: MX2400 [1]

1.1 Specifika vstupních multiplexerových karet FT

Funkční testery musí testovaný objekt napájet, zatěžovat, stimulovat a měřit reakce zkoušeného objektu. Příkladem zkoušeného objektu může být základní deska autorádia. Pro napájení je v takovém případě potřeba přenést ze zdroje do DUT typicky 12V a 1A. Na DUT je potřeba osciloskopem změřit napětí výstupních zesilovačů zakončených odporovými zátěžemi, multimetrem je potřeba změřit napětí jednotlivých zdrojů DUT, případně další signály. Na multiplexery to klade velké nároky z hlediska rozsahu signálů. Je potřeba přenést proud typicky až 1 A a současně nezatížit a nezkreslit měřené signály velikosti desítek mV. S ohledem na takovéto požadavky se nejčastěji volí multiplexery, které jako spínače využívají elektromechanická relé, příklad matrix karty do 2 A od firmy Pickering je na Obr. 3. Multiplexerové karty nejsou do funkčních testů vybírány podle rychlosti, protože mezi jednotlivými měřicími a přepínacími kroky se velice často se zkoušeným zařízením komunikuje nebo stimuluje, a proto nejsou rychlosti přepínání těchto karet klíčové.



Obr. 3: PXI 32x4 2-Pole 2A Matrix with BIRST [2]



Obr. 4: Versatile PXI Solid State Multiplexer [3]

1.2 Specifika vstupních multiplexerových karet ICT

Vstupní multiplexerové karty pro ICT testování není potřeba dimenzovat na proud větší než typicky stovky mA, protože jsou využívány pro připojení multimetrů, RLC-metrů a dalších měřících přístrojů k DUT. Důležitějším parametrem je rychlost spínání a rozpínání a tzv. „Bounce time“. Měřicí přístroj Keysight 34450A je schopen měřit až 190 měření za sekundu [4] a multiplexerová karta by měla být rychlejší. Jazyčková relé díky časům sepnutí a rozepnutí kratším než 1 ms [5] toto umožňují.

1.3 Specifika vstupních multiplexerových karet WH testerů

Testery kabelových svazků mají často pouze jeden zdroj napětí, jeden měřicí přístroj a pouze vstupní multiplexery. Při měření kabelových svazků je nejdůležitějším parametrem rychlost měření zkratů. Protože se musí měřit každý TP s každým, klade to na spínače velké nároky. Během testu jediného svazku se musí změřit i nevyužité kanály multiplexeru. Počet všech sepnutí n je možné vypočítat vztahem (1.3.1), pro 32 TP to je 496 přepínacích cyklů, výpočet (1.3.2) pro 512 TP dává 130816 přepínacích cyklů.

$$n = a * (a - 1) \div 2 = 32 * 31 \div 2 = 496 \quad 1.3.1$$

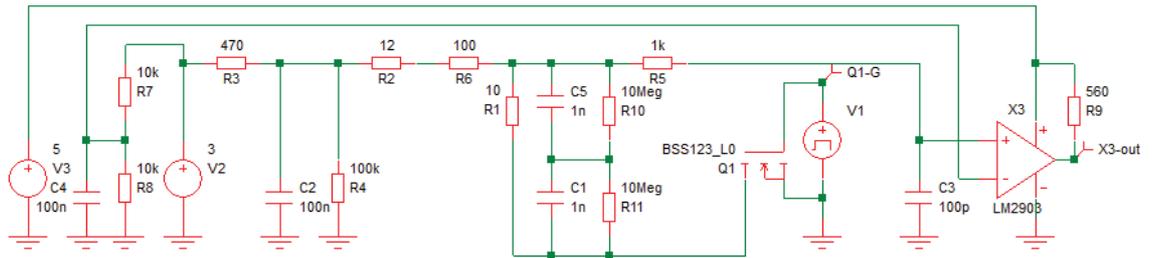
$$n = 512 * 511 \div 2 = 130816 \quad 1.3.2$$

Pro vzorový výpočet měřicího času ústředny s 512 TP (16 multiplexerových karet, každá po 32 TP, například MX2400 + 16x MXC2.LCMX.32) budeme uvažovat použití relé RELSIA05D500. Zpoždění řídicích obvodů zanedbáme, protože měřicí ústředna umožňuje dávkový režim, který minimalizuje zpoždění řídicích obvodů. Dále budeme uvažovat nikoliv měření skutečné hodnoty odporu, ale porovnávání komparátorem. Schéma zapojení ze simulačního programu a výsledky jsou na obrázcích Obr. 5-8. Celkový čas sepnutí a rozepnutí je vypočítán vztahem (1.3.3), celkový měřicí čas pro 512 TP je vypočítán vztahem (1.3.4).

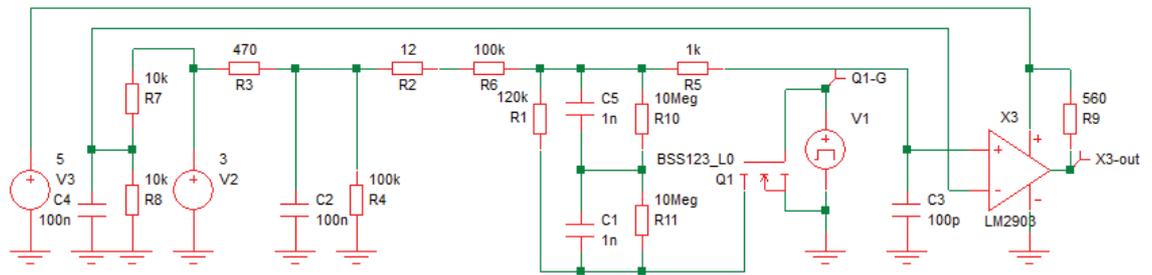
Operate time [5]	$t_{OT}=0,5 \text{ ms}$	
Bounce time [5]	$t_{BT}=0,5 \text{ ms}$	
Release time [5], [6]	$t_{RT}=0,2 \text{ ms}$	
Comparator delay 1	$t_{K1}=0,6 \text{ } \mu\text{s}$	
Comparator time 2	$t_{K2}=74 \text{ } \mu\text{s}$	
Total time	$t_T=t_{OT}+t_{BT}+t_{RT}+t_{K1}+t_{K1}+t_{K2}=1,27 \text{ ms}$	1.3.3
Measuring time	$t_p=t_T*n=0,00127*130816=166 \text{ s}$	1.3.4

Na Obr. 5 je principiální zapojení komparátoru pro simulaci doby ustálení měření propojů na typickém kabelovém svazku. Za propoj je považován odpor vodičů menší než 500 Ω . Čas potřebný k ustálení měření propoje je dán zpožděním komparátoru, ostatní součástky a kabelový svazek mají zanedbatelný vliv. Na Obr. 8 je graf zpoždění celého obvodu při měření propojů. Na Obr. 6 je principiální schéma zapojení komparátoru pro simulaci doby ustálení měření zkratů na typickém kabelovém svazku. Za zkrat je považován odpor menší než 100 k Ω . Na Obr. 7 je graf výstupního napětí za komparátorem, při připojení kabelového svazku k měřicí kartě dojde k falešnému sepnutí a až po odeznění přechodového děje je stav komparátoru správný.

Typická kapacita kabelového svazku je 100 pF/m, Kapacitu průměrného kabelového svazku budeme pro simulace a výpočty uvažovat 500 pF. Na Obr. 5 a 6 je zapojení komparátorů měřicí karty MXC2.CO. R3, R5, R7-9, C2-4 jsou skutečné součástky měřicí karty, R2 reprezentuje odpor v sepnutém stavu, multiplexeru MAX4052 [7], který je součástí skutečné měřicí karty. R1, C5, C1, R10, R11 tvoří náhradní schéma kabelového svazku. R1 je pro simulovaný propoj uvažován 10 Ω . Pro rozpojené vodiče je jako reprezentace nežádoucího svodu uvažována hodnota R1 120 k Ω . Rezistor R6 je náhrada rezistorové dekády pro přepínání rozsahů.

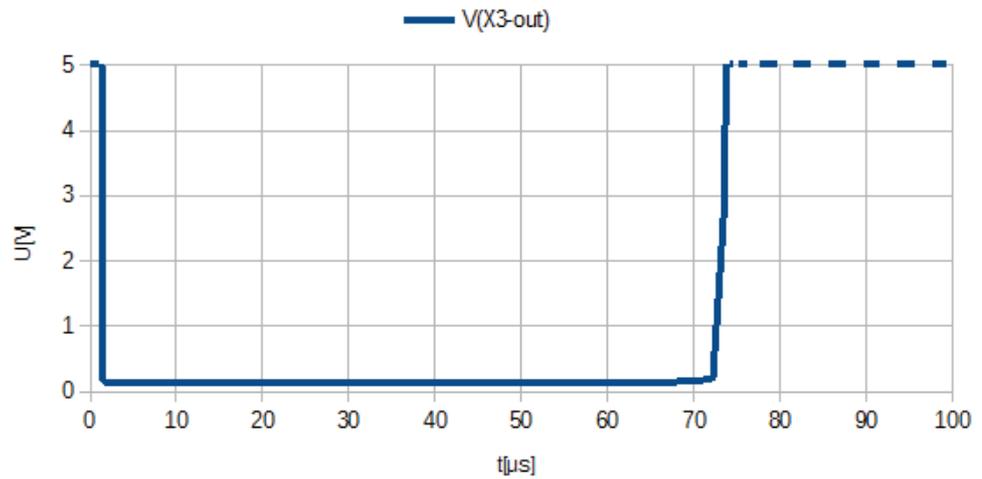


Obr. 5: Schéma zapojení komparátoru pro simulaci měření propojů

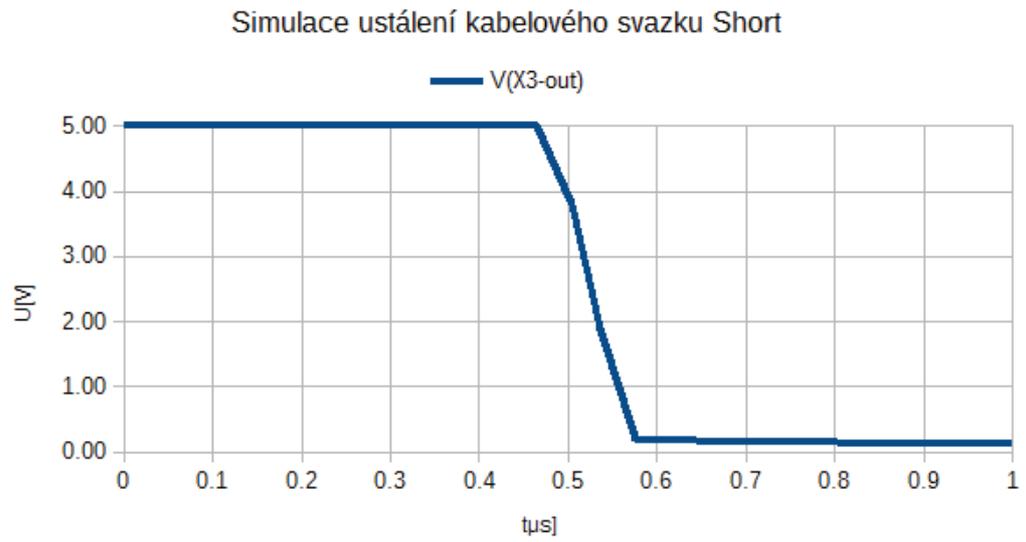


Obr. 6: Schéma zapojení komparátoru pro simulaci měření zkratů

Simulace ustálení kabelového svazku Open



Obr. 7: Simulované výstupní napětí za komparátorem při měření zkratů



Obr. 8: Simulované výstupní napětí za komparátorem při měření propojů

1.4 Porovnání parametrů multiplexerových karet

Pro porovnání multiplexerových karet jsem využil část sortimentu výrobců adaptronic Prüftechnik GmbH, TSK Prüfsysteme GmbH, WEETECH GmbH, Pickering Interfaces Ltd., SPEA Spa, Teradyne Inc., Keysight Technologies Inc., FPC s.r.o.. Seznam porovnávaných testerů a multiplexerů je v tabulce Tab. 1. Pro nízkonapěťový test kabelových svazků se využívá napětí do 12 V DC a proudy do 20 mA. Pro funkční testy se nejčastěji využívají elektromechanické relé jako spínače ve vstupních multiplexerech do napětí 100 V a do proudu 1 A. Vyšší proudy a napětí potřebné pro FT je nutno realizovat externím zařízením. Příklad takového požadavku je test budiče motoru, ke kterému je nutné připojit zdroj a zátěže a toto dimenzovat na větší proud než 1 A.

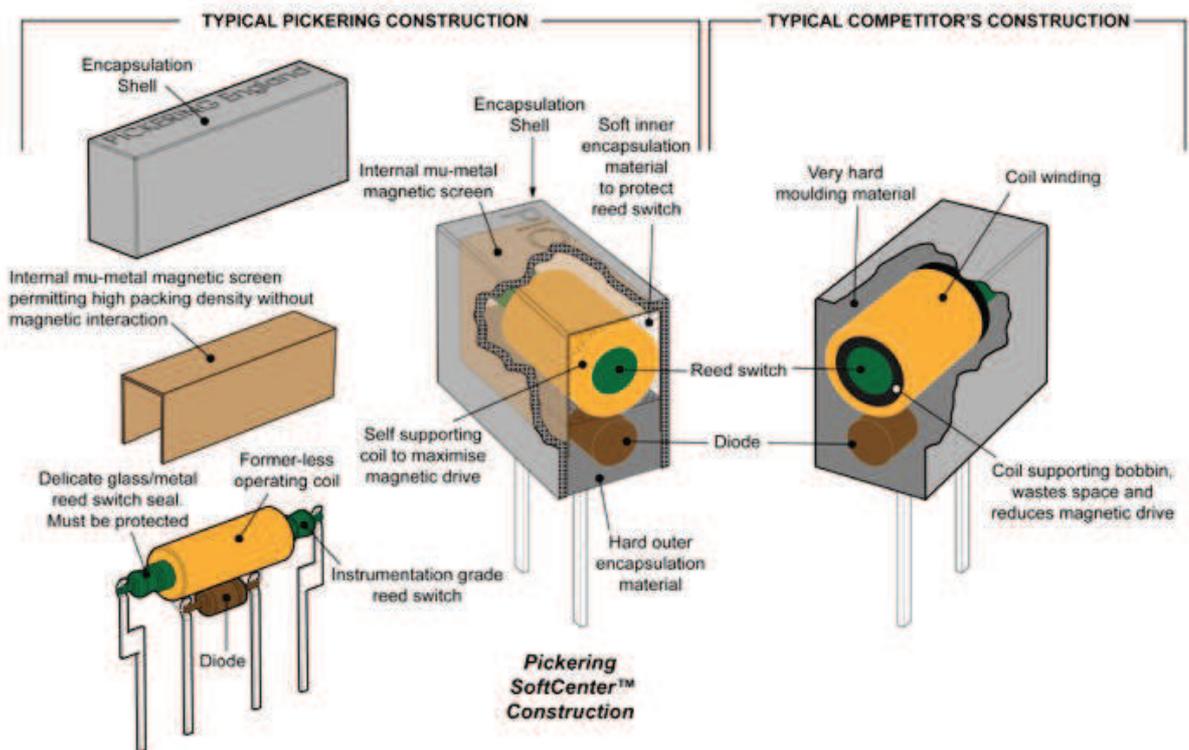
Tab. 1: Seznam porovnávaných testerů a parametry jejich multiplexerů

Označení testeru/karty	Určení	Max počet TP	U_{\max} [V]	I_{\max} [A]	Rozhraní
KT 210 [8]	WH	512	12 DC	0,01	USB
KT 230 [9]	WH	256	12 DC (1000)	0,4	USB
NT 210 [10]	WH	512	12 DC	0,01	ETH
KT 630 [12]	WH	1024	1500 DC, 1050 AC	2	Standalone
KT 638 [13]	WH	512	1500 DC	2	Standalone
NT 410 [14]	WH	2048	25 DC	0,025	ETH
NT 600 [15]	WH	1024	1500 DC, 1050 AC	2	ETH
NT 637 [16]	WH	512	1500 DC, 1050 AC	2	ETH
NT 730 [17]	WH	5056	40 / 22 / 1500 DC, 1050 AC	0,1 / 0,2 / 2	PC inside
NT 830 [18]	WH	12288	1500 DC, 1050 AC	2	USB/ETH
CT30ix [19]	WH	2048	15 DC	0,02	Standalone
CT35 [20]	WH	8192	15 DC	0,02	ETH
WK 260 [21]	WH	1536	20 DC (50 DC)	0,1 (1,5)	ETH
WK 240 [22]	WH	1024	12,5 DC	0,005	Standalone
40-681 [3]	FT	160	60	0,35	PXI
40-519A-002 [2]	FT	32	300 DC, 250 AC	2	PXI
SPEA 3030 Compact [23]	ICT/FT	2048	100	1	PC inside
TestStation LH [24]	ICT/FT	4096	200	-	PC inside
3070 ICT [25]	ICT/FT	5184	100	0,75	PC inside
MXC2.LCMX.32	ICT/FT	512	100	1	ETH

2 Rozbor spínačů

2.1 Elektromechanické

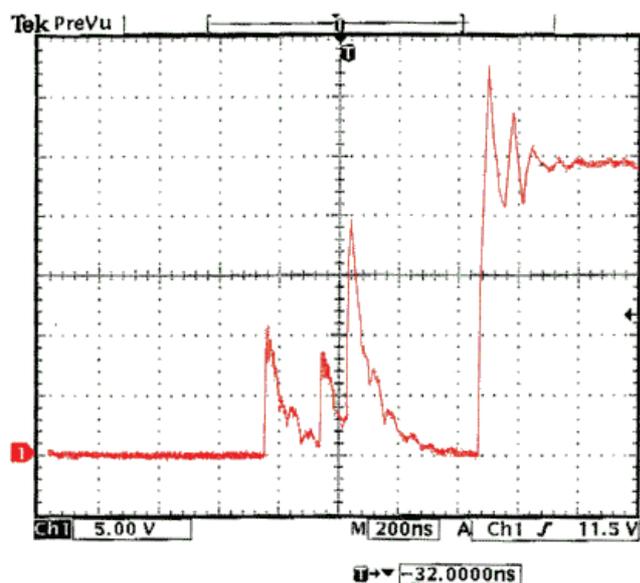
Elektromechanické relé je elektrotechnická součástka, která obsahuje elektromagneticky ovládané kontakty. Elektromechanické relé obsahuje jednu nebo více cívek a jeden nebo více kontaktů [27]. Pro účely vstupní multiplexerové karty se nejčastěji používají jazýčková relé, která neobsahují jádro cívky. Místo něj je do cívky vložen kontakt, čímž je umožněno vyšších rychlostí spínání, snížení hmotnosti a zmenšení velikosti. Jazýčková relé se obvykle vyrábějí s jediným spínacím kontaktem, jsou tedy čtyř vývodová. Důležité základní parametry relé jsou: napětí a proud cívky, izolace rozepnutého kontaktu a izolace mezi kontaktem a cívkou.



Obr. 9: Vnitřní uspořádání jazýčkového relé [27]

Ne všichni výrobci uvádějí všechny parametry svých relé. Další důležité parametry jazýčkových relé jsou:

- Whetting current (wetting current), minimum switching load (minimum permissible load) [5],[6]. Proud nutný k čištění kontaktů, aby kontakt mohl dosáhnout předpokládané životnosti.
- Bounce Time. Na Obr. 10 je snímek z osciloskopu pro vysvětlení parametru Bounce time, výraz bounce time je možno přeložit jako zakmitání při sepnutí.
- Operate Time. Zpoždění mezi vstupním napětím cívky a prvním dotykem kontaktů.
- Release Time. Zpoždění mezi vstupním napětím cívky a rozpojením kontaktů.
- Switching Current.
- Carry Current.



Obr. 10: Typický průběh sepnutí mechanického kontaktu [28]

2.2 Polovodičové

Polovodičové spínače se začínají prosazovat na úkor elektromechanických spínačů v různých oborech. Polovodičových spínačů je velké množství typů. V této práci se budu zabývat pouze těmi, které se hodí jako vstupní multiplexerové spínače.

Polovodičové spínače se dělí dle řízení na:

- Galvanicky oddělené, nejčastěji pro spínání větších výkonů, tzv. SSD relé.
- Galvanicky propojené.

Galvanicky oddělené spínače se vyrábějí v mnoha provedeních. Ty nejmenší přesto nejsou vhodné pro vstupní multiplexerové obvody, protože mají dlouhé časy sepnutí i rozepnutí a vyžadují relativně velký proud řídicí LED diodou, typicky 7,5 mA [29], což je stejně jako jazýčková elektromechanická relé [26][5], která mají ovšem mnohem lepší parametry spínacího výstupního kontaktu, oproti dvojici unipolárních tranzistorů v takovýchto galvanicky oddělených spínačích. Odpor v sepnutém stavu je typicky lepší než 2Ω [29], elektromechanické spínače mají typicky $0,1 \Omega$ [5].

Dále se budu zabývat pouze galvanicky propojenými spínači. V aplikaci, kde je potřeba galvanické oddělení řídicích obvodů multiplexerů od měřených objektů (měřených signálů) se musí vyřešit galvanické oddělení v řídicích obvodech.

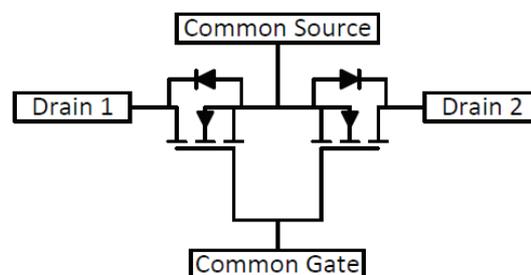
Dělení dle typu pouzdra:

- Integrované spínače, které jsou dostupné v jednou pouzdře i s budícími obvody. Příklad takových spínačů jsou obvody 4051, 4052, 4053, 4054 [7].
- Z diskretních součástek. Zapojení multiplexerů z diskretních součástek je mnohem náročnější na návrh multiplexeru. Dává ovšem mnohem více možností využít takového návrhu, protože změnou tranzistorů ve stejném pouzdře získáme multiplexer úplně odlišných parametrů.

Díky velkému rozšíření automatických osazovacích automatů vyjde stejně draze nebo často dokonce levněji osadit velké množství diskretních součástek stejného typu, než malé množství speciálních integrovaných obvodů polovodičových spínačů.

Polovodičové spínače se nejčastěji navrhují spojením PMOS a NMOS tranzistorů paralelně. Řídící obvody takového zapojení velmi omezují možné provozní napětí výsledného multiplexeru. Je tedy vhodné pro napětí do 20 V, výjimečně se objevují integrované obvody spínačů do 60 V [37]. Toto zapojení je většinou využíváno právě v integrovaných spínačích [7].

Pro vyšší provozní napětí je vhodné využít tzv. čtyřvývodových FET tranzistorů. Jedná se o dvojité tranzistory se společným emitorem a společnou řídicí elektrodou. Čtyřvývodových tranzistorů je na trhu velmi málo, vyrábějí se jak v integrovaném tak diskretním provedení, nicméně jejich sortiment je velmi omezený. Dále na trhu existuje stále se rozrůstající kategorie pětivývodových tranzistorů se společným emitorem, které nalézají uplatnění v ochranných obvodech akumulátorů přenosné elektroniky, digitálních komunikačních rozhraní a v obvodech připojování a odpojování programátorů. V poslední době se dvojité tranzistory ve společném pouzdru prosazují jako usměrňovací prvky v synchronních usměrňovacích spínaných zdrojů, což je možné díky velkému pokroku ve snížení odporu v sepnutém stavu. Příkladem pětivývodových tranzistorů jsou FDMD84100 [30], CSD75208W1015 [33]. Příkladem čtyřvývodových tranzistorů jsou CSD87312Q3E [31] a CSD85312Q3E [32]. Jako ochranné obvody akumulátorů jsou to nejčastěji dvojité PMOS tranzistory. Pro ostatní aplikace převažují dvojité NMOS tranzistory. Vnitřní zapojení čtyřvývodového tranzistoru je na Obr. 11.



Obr. 11: Vnitřní zapojení čtyřvývodového tranzistoru CSD85312Q3E [32]

Tab. 2: Seznam vhodných součástek na polovodičový multiplexer

Název	U_{DS} [V]	I_D [A]	$R_{DS(on)}$ [Ω]	I_{DSS} [μ A]	Kanálu	Cena [Kč]
MAX4052A [7]	17	0,03	100	0,1	4	70
MAX14757 [35]	70	0,1	10	0,003	4	100
HV2631 [36]	220	0,2	32	10	16	390
ASSR-1510 [37]	60	1	0,35	1	1	95
ASSR-1530 [37]	60	1	0,35	1	2	150
2N7002BKS [38]	60	0,3	1	1	2	3
FDMD84100 [30]	100	8	0,1 ($U_{GS}=5$ V)	1	1	45
CSD87312Q3E [31]	30	27	0,033	1	1	16
CSD85312Q3E [32]	20	12	0,012	1	1	24
Si4090DY [34]	100	20	0,02	1	1	22

V tabulce Tab. 2 jsou uvedeni vybraní zástupci z kategorií součástek vhodných na multiplexerové karty. Cenou vyčnívá 16-ti kanálový spínač HV2631. Cenu je však nutno porovnávat s odpovídajícím počtem ostatních spínačů. Naopak nejlevnější tranzistor v tabulce je 2N7002BKS. Tranzistor 2N7002BKS je použit jako spínač v kombinaci s P-MOSFET tranzistorem BSS84AKS v multiplexerové kartě kabelového testeru WK260.

3 Volba součástek spínače

Pro předpokládané nasazení jako tester FT/ICT a současně WH tester vychází jako optimální následující parametry:

- Architektura spínače složená ze dvou samostatných N-MOSFET tranzistorů.
- Napětí spínačů v rozepnutém stavu alespoň 100 V.
- Proud spínačem v sepnutém stavu alespoň 1 A.
- Proud spínačem v rozepnutém stavu maximálně 10 μ A.
- Vhodnost osazování v osazovacím automatu i ručně.
- Možnost oprav v „terénu“.

S ohledem na poslední dva body vychází nejlépe součástky v SO-8 pouzdře, dle informací z kapitoly 1. a 2. volím jako nejvýhodnější tranzistor Si4090DY. U současných multiplexerových karet dochází často k poškozování spínačů, což je převážně díky lidskému faktoru při oživování testeru, proto poslední bod ohledně opravitelnosti je velice důležitý. V budoucnu je možná změna důležitosti oprav, pokud se podaří produkt uvést na trh a získat tak více zkušeností.

Existuje velká pravděpodobnost, že vlastnosti vybraných tranzistorů výrazně sníží riziko poškozování spínačů. Zvolený tranzistor zvládne mnohonásobně větší spínací proud než elektromechanické relé používané v ICT/FT testerech. K poškozování kontaktů relé dochází při zkratování nabitých kondenzátorů DUT nebo připojených zdrojů. Toto zkratování se děje zásadně při oživování testu, nikoli při následném běžném provozu testeru. Při omezení potřeb opravovat multiplexerovou kartu by se jako vhodný kandidát jevil spíše FDMD84100, který má menší vnitřní kapacity a menší pouzdro.

Při přehodnocení požadovaného parametru multiplexeru proudu z 1 A na 300 mA a napětí ze 100 V na 20 V, například zaměřením multiplexerové karty pouze na WH testery, by byl velice vhodný tranzistor 2N7002BKS. Další jeho výhodou jsou dva tranzistory ve společném velmi malém pouzdře SOT363.

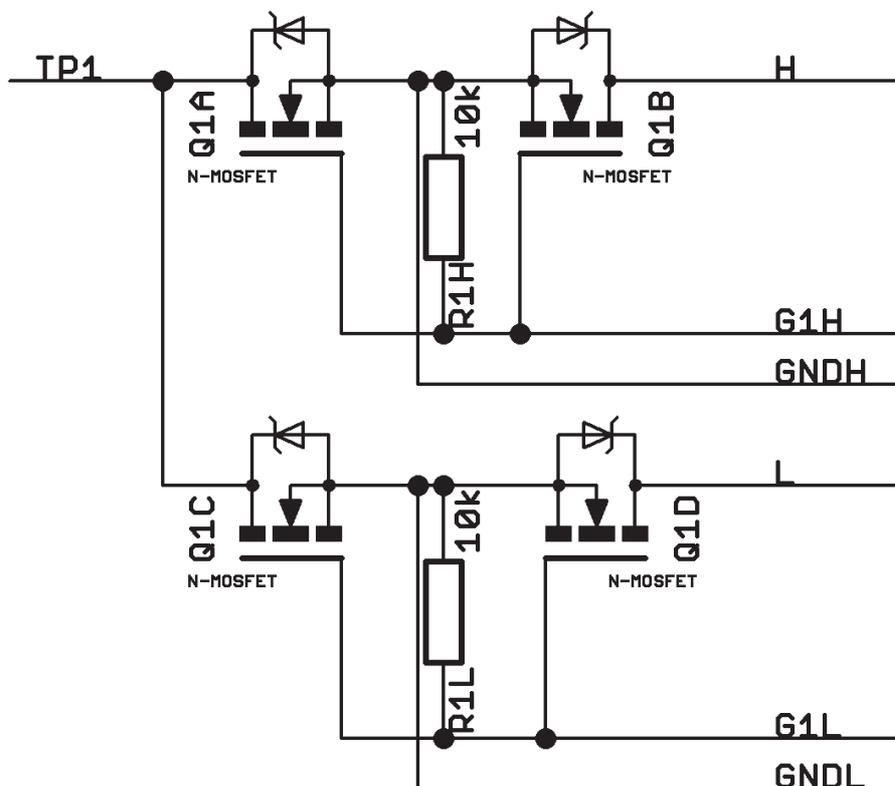
4 Návrh spínače

4.1 Čtyřvývodový tranzistor a jeho řízení

Jeden vstup multiplexeru je potřeba spínat na dvou vodičovou sběrnici s vodiči označenými L a H. Pro jeden TP tedy potřebujeme dva spínače. Principiální schéma spínače pro jeden TP je na Obr. 12. Vodič označený TP1 je vstup multiplexeru, vodiče L a H představují společnou sběrnici, ke které jsou připojeny další přístroje. Čtyřvývodový tranzistor vznikne propojením vývodů G a S dvou tranzistorů. Mezi tyto vývody se následně přivádí řídicí napětí. Po přivedení napětí vyššího než je U_{GSTH} oba tranzistory sepnou a obvod se chová jako odpor o hodnotě $2x R_{DS(on)}$. Rezistory R_{1H} a R_{1L} zajišťují vybití $2x C_{GS}$. Rychlost sepnutí je tedy dána řídicími obvody a použitým typem tranzistoru. Rychlost rozeznutí je dána řídicími obvody, rychlostí rozeznutí tranzistoru a časovou konstantou uvedenou ve vztahu (4.1.1). Časová konstanta je vypočítána pro zapojení na Obr. 12 a dvojici tranzistorů Si4090DY.

$$\tau_{GSOFF} = R_{1H} * 2 * C_{GS} = 10 * 10^3 * 2 * 2410 * 10^{-12} = 48,2 \mu s$$

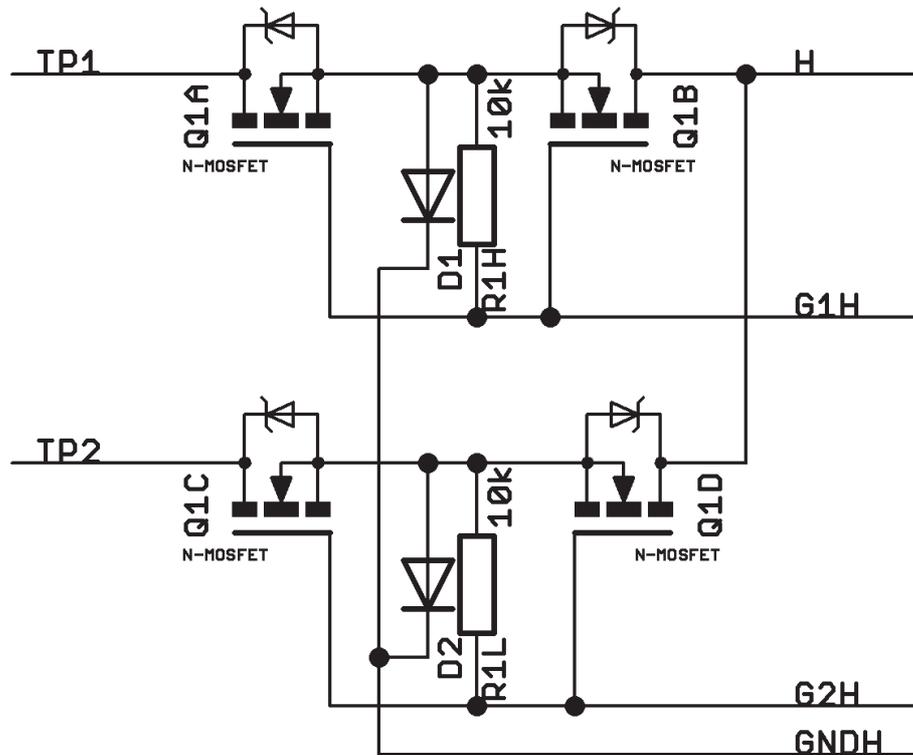
4.1.1



Obr. 12: Schéma tranzistorových spínačů pro 1 TP

4.2 Řízení spínačů na společném vodiči sběrnice

Na Obr. 13 je princip zapojení tranzistorů tvořících polovinu z potřebné čtveřice a jejich napojení k ostatním TP a na společný záporný pól řídicího signálu.



Obr. 13: Princip zapojení poloviny TP na společnou sběrnici

Diody D1 a D2 jsou potřeba pro přerušení cesty proudu ze sběrnice H u sepnuté dvojice tranzistorů mezi ostatní dvojice tranzistorů. Vypuštění těchto diod je teoreticky možné u tranzistorů, které neobsahují zpětnou diodu mezi emitorem a kolektorem, tranzistory vhodné pro multiplexerovou kartu bez zpětných diod však nejsou na trhu dostupné.

4.3 Digitální obvody řízení spínačů

Všechny multiplexerové a vstupně výstupní karty ústředn MX2400 a výběhové MX400 firmy FPC s.r.o. jsou řízeny za pomoci posuvných registrů. Požadavek byl zachovat co nejpodobnější způsob řízení. Řídící elektrody tranzistorů jsou řízeny přímo 3 stavovými výstupy integrovaných obvodů 74HC595D, galvanické oddělení je řešeno před nebo mezi posuvnými registry. Výstupy posuvných registrů jsou galvanicky spojené s tranzistory. Toto zapojení je patrné na schéma navržené karty na Obr. 16, 17, 27, 28.

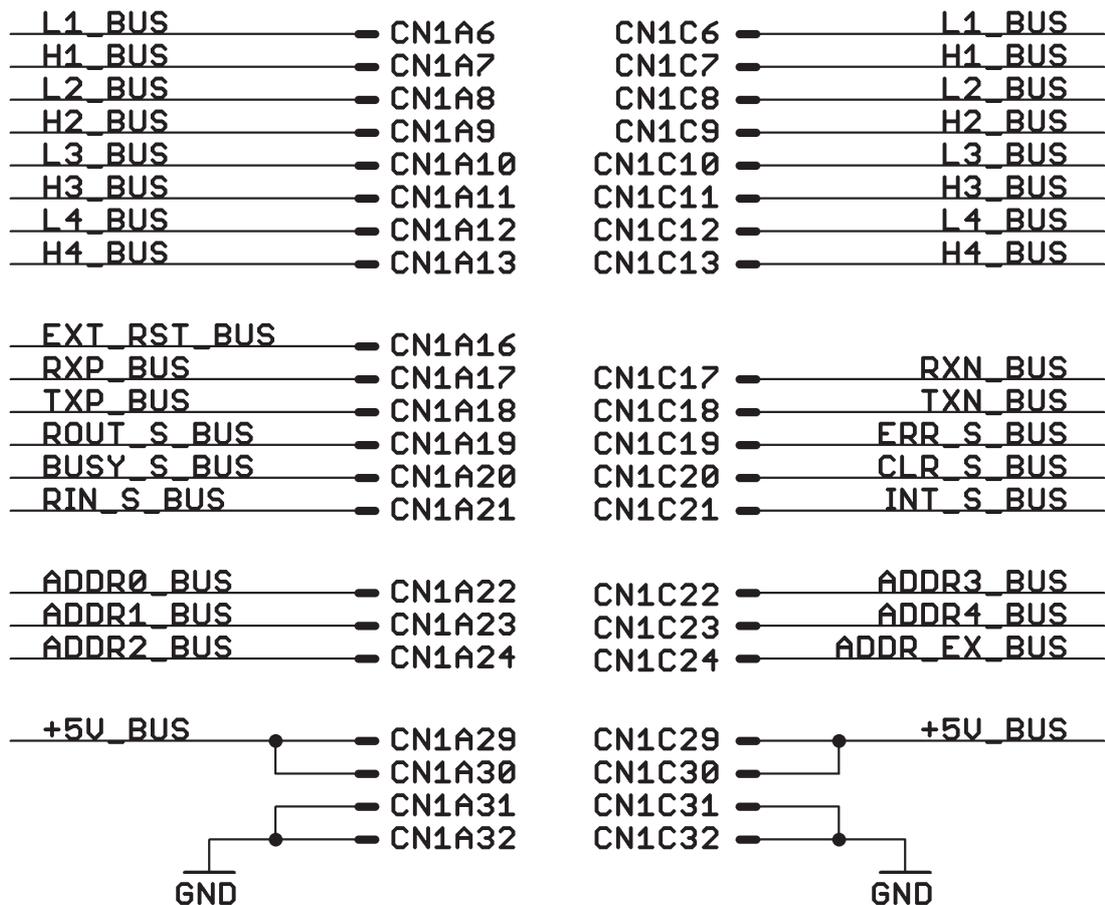
5 Návrh obvodového zapojení

Kompletní schéma zapojení multiplexerové karty je v příloze A - Schema PCB-0202-01-A.pdf

5.1 Rozhraní měřicí ústředny

Multiplexerová karta se bude vkládat do měřicí ústředny, přičemž při návrhu zapojení jsem musel vycházet ze zapojení sběrnice konektoru na základní desce. Konektor je třířadý s prostřední řadou nevyužitou, obsahuje 64 pinů, jeho zapojení je na Obr. 14. Na vodičích CN1A1 - CN1A5 a CN1C1 - CN1C5 se nachází 48 V, které multiplexerová karta nevyužívá, tyto vodiče tedy nejsou ani zapojeny ani zobrazeny.

Bus Connector

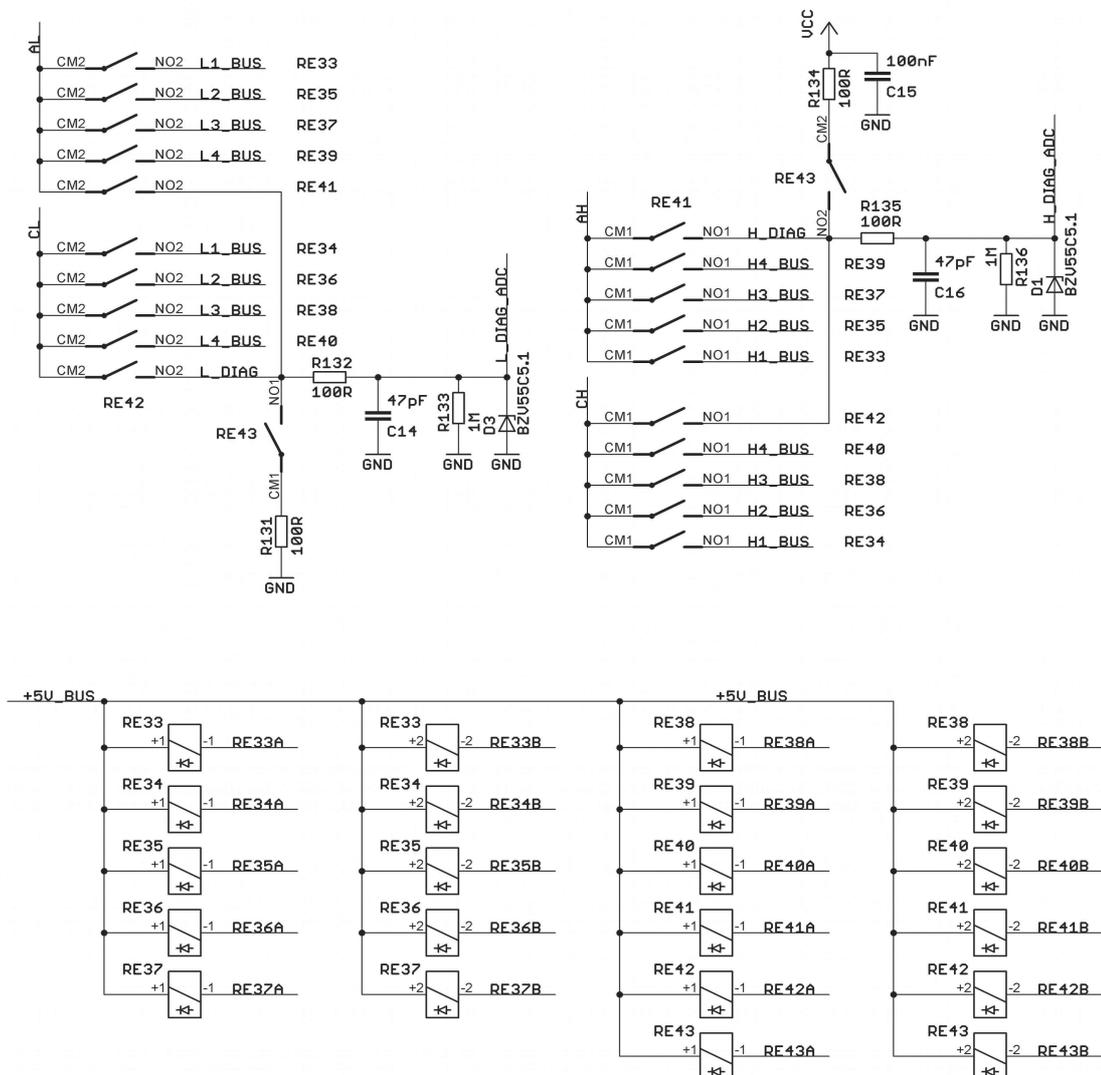


Obr. 14: Zapojení systémového konektoru rozhraní přídatných karet ústředny MX2400

5.2 Rozhraní sběrnice měřicí ústředny

Vzhledem k možnosti kartu v budoucnu postavit s jinými spínači a napětím, na které je systémová sběrnice navržena, musí být multiplexer oddělen od sběrnice elektromechanickými relé. Na Obr. 15 je schéma zapojení reléového spínače propojující multiplexerovou sběrnici se systémovou sběrnici. Na obrázku jsou také pomocné obvody diagnostiky. Zachování principu diagnostiky a principu využívání sběrnic byl požadavek zadávající firmy FPC s.r.o..

Bus Interconnection & Self-diag



Obr. 15: Zapojení diagnostických obvodů a reléového spínače, který propojuje sběrnici multiplexeru se sběrnici měřicí ústředny MX2400

5.3 Rozhraní testovacích bodů

Testovací body jsou z multiplexerové karty vyvedeny sestavou konektorů a příslušenství stejně jako na reléové multiplexerové kartě MXC2.LCMX.32.

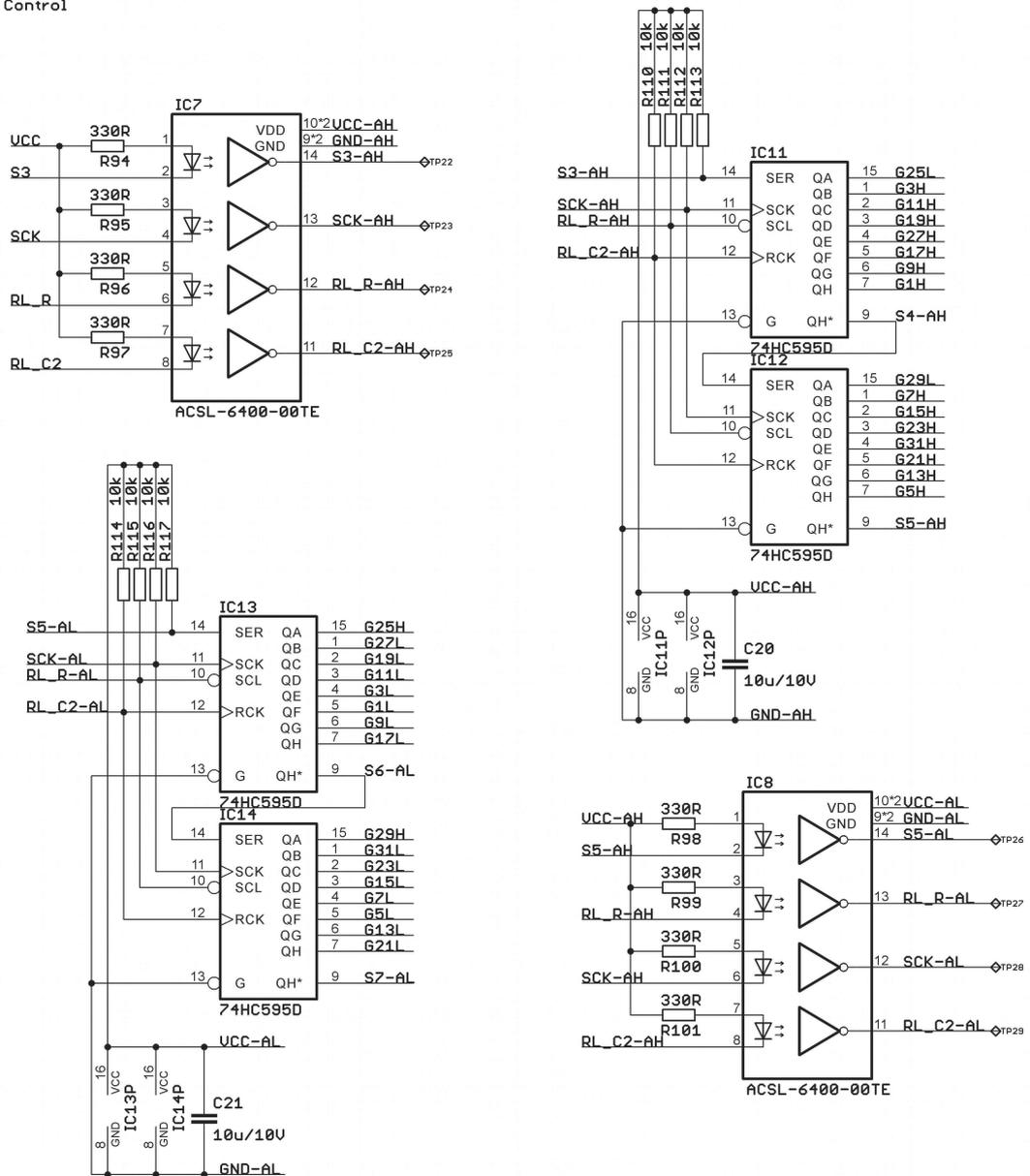
- EPT 116-90054, úhlový konektor nepřečnívající obrys PCB, Označení CN2.
- Harting 09 28 132 6903, přímý konektor zasunutý do konektoru CN2.
- Harting - 09 02 000 9953, Harting - 09 02 000 9954, Harting - 09 06 001 9974, příslušenství konektoru na panel,

Počet TP je 32, konektor je 48 pinový, 3 řady, prostřední řada je nevyužitá, to dává 32 využitelných pinů. Výškově je konektor umístěn na střed karty. Nad konektorem jsou signalizační LED, jejich umístění je převzato z karty MXC2.LCMX.32. Liché TP 1, 3, .. 31 jsou na konektoru na pozicích A1, A2, .. A16, sudé TP2, 4, .. 16 jsou na pozicích C1, C2, .. C16. Rozdělení skupin spínačů na 4 sběrnice vodiče odpovídá rozdělení na sudé a liché piny konektoru na předním panelu, jeden pár sběrnice vodičů je označený A a odpovídá řadě A konektoru nebo také lichým TP. Druhý sběrnice vodičů je označený C a odpovídá C řadě konektoru nebo sudým vodičům. Při správném zapojení zkoušeného DUT k multiplexerové kartě je tak umožněno 4 drátové měření malých odporů.

5.4 Řízení posuvných registrů

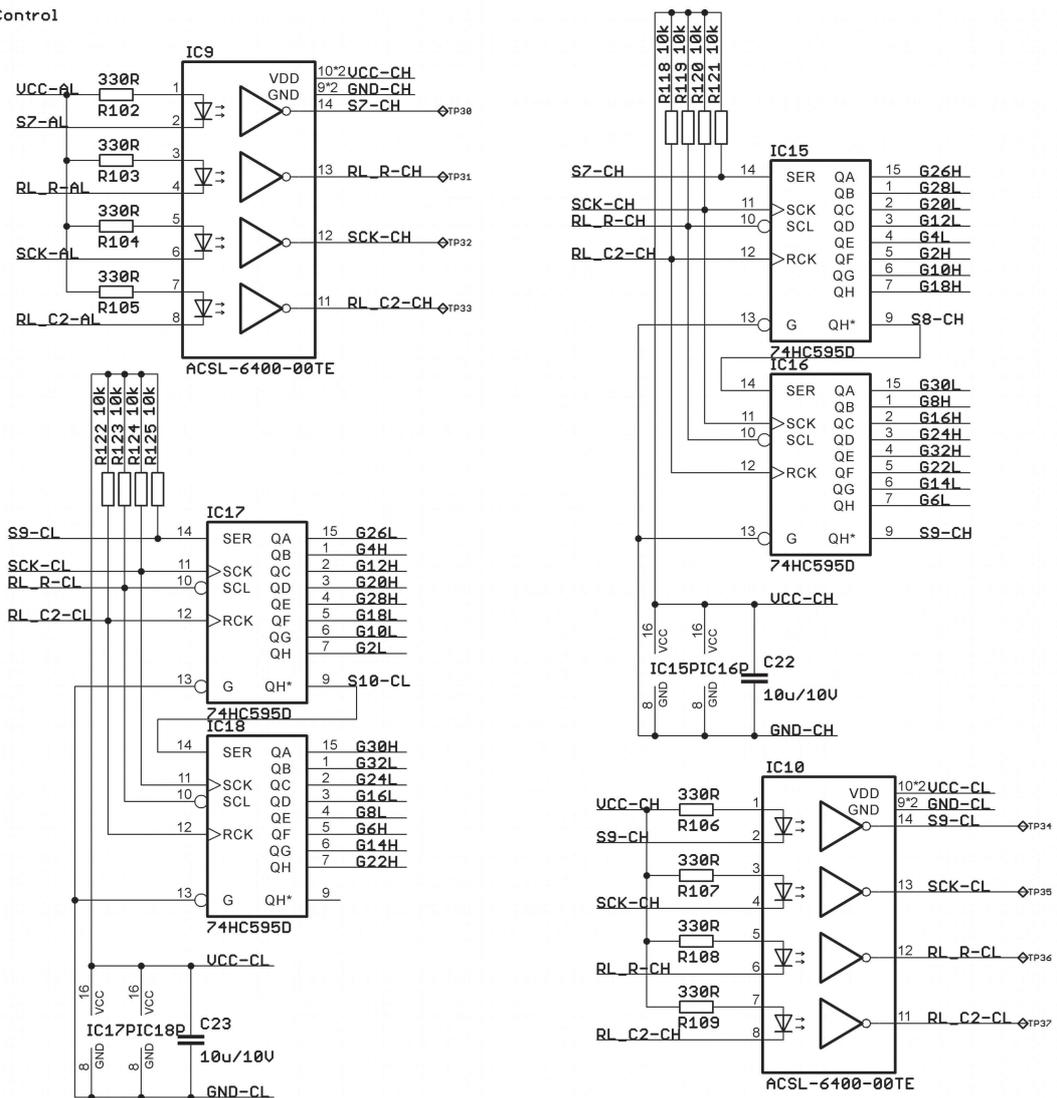
Na Obr. 16 a 17 je zapojení posuvných registrů, signály VCC, SCK, RL_R, RL_C2 jsou spojené s procesorem, signál S3 s předchozím registrem na řízení elektromechanických relé, signály jsou galvanicky odděleny pomocí rychlého čtyřkanálového optočlenu ACSL-6400-00TE, ve schématu označeným jako IC7. Tímto typem optočlenu jsou následně galvanicky odděleny všechny 4 skupiny spínačů. Jednotlivé sběrnice vodiče z každé této skupiny jsou pojmenovány AH, AL, CH, CL. Toto označení je na konci názvů signálů pro rozlišení, které signály patří ke které skupině spínačů. Například S5-AH se po galvanickém oddělení stane signálem S5-AL, ostatní vstupní signály posuvných registrů jsou pojmenovány stejně.

Switch Control



Obr. 16: Zapojení posuvných registrů, jejich galvanické oddělení 1. část

Switch Control



Obr. 17: Zapojení posuvných registrů, jejich galvanické oddělení 2. část

5.5 Řízení polovodičových spínačů

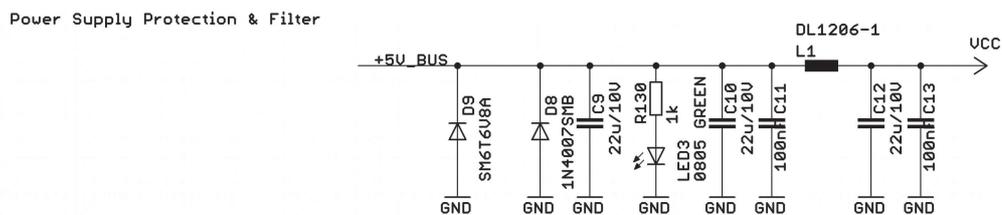
Výstupy posuvných registrů na Obr. 16 a 17 pojmenované GXXL nebo GXXH, jsou přímo napojeny na řídicí elektrody tranzistorů. Každé dva posuvné registry a optočlen vyžadují vlastní galvanicky oddělené napájení, které je řešeno v kapitole 5.7.

5.6 Polovodičové spínače

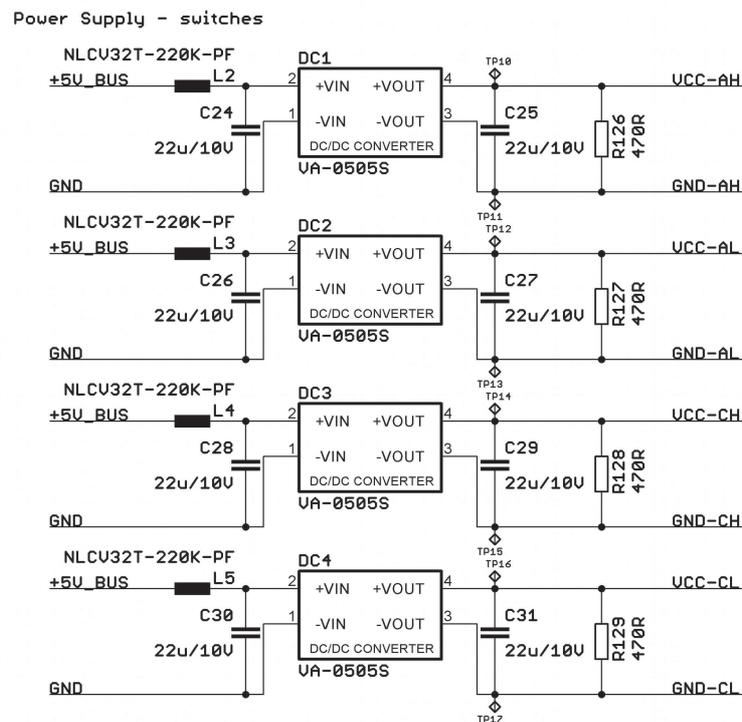
Zapojení polovodičových spínačů je na Obr. 27 a 28, zapojení je popsáno v kapitolách 4.1, 4.2, 4.3. Skupinové rozdělení je názorné dle sběrnicových vodičů AH, AL, CH a CL.

5.7 Napájecí obvody

Na Obr. 18 je zapojení filtrace napájecího napětí ze sběrnicového konektoru, na Obr. 19 jsou DC/DC měniče, ze kterých jsou napájené polovodičové spínače. Vstupní a výstupní filtrační kondenzátory a induktory jsou doporučeny výrobcem. Minimální zátěž těchto DC/DC konvertorů je také doporučena výrobcem. Minimální zátěž je realizována rezistory R126-129.



Obr. 18: Zapojení filtračního obvodu napájecího napětí 5 V

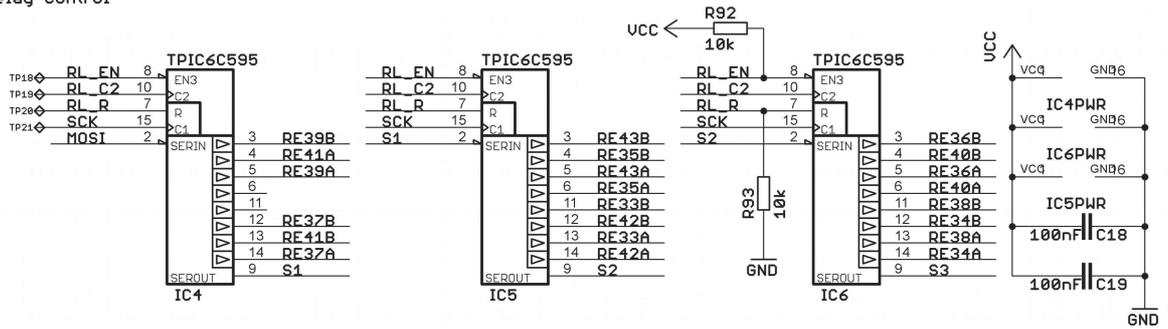


Obr. 19: Zapojení DC/DC konvertorů pro napájení polovodičových spínačů

5.8 Pomocné obvody

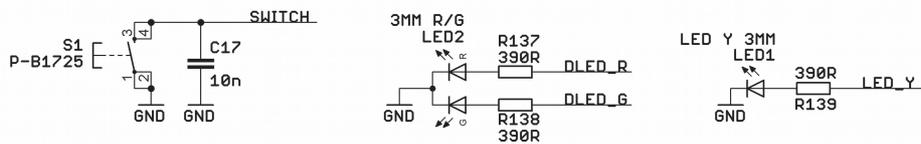
Zapojení pomocných obvodů je převzato z multiplexerové karty MXC2.LCMX.32. Pomocné obvody a zapojení procesoru je na Obr. 20-26.

Relay Control

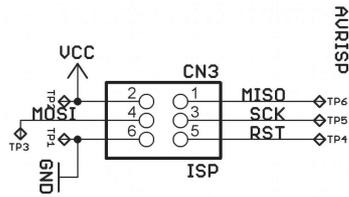


Obr. 20: Zapojení posuvných registrů s integrovanými budiči relé pro spínání elektromechanických relé

Switch & LEDs

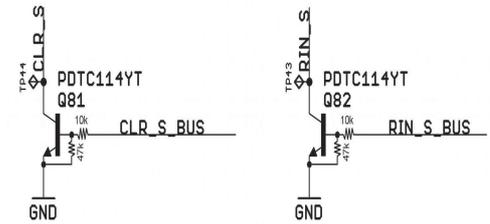


Obr. 21: Zapojení indikačních LED diod a servisního tlačítka

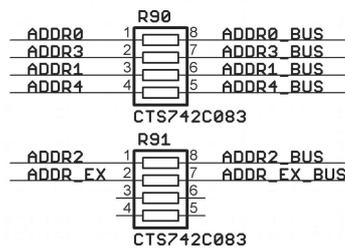


Obr. 22: Programovací konektor procesoru Atmega

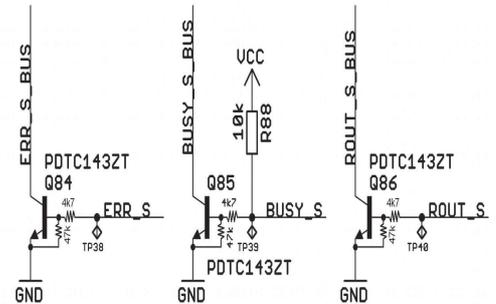
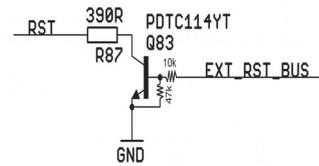
Bus Dedicated Signals



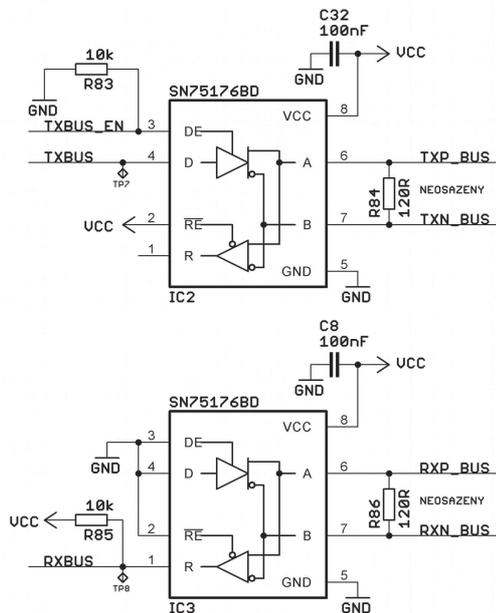
Card Address



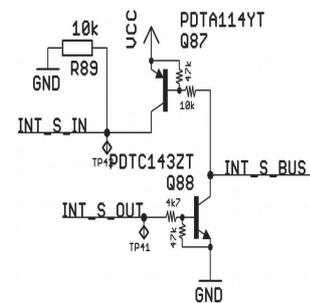
Obr. 24: Ochranné rezistory pro nastavení adresy v měřicí ústředně



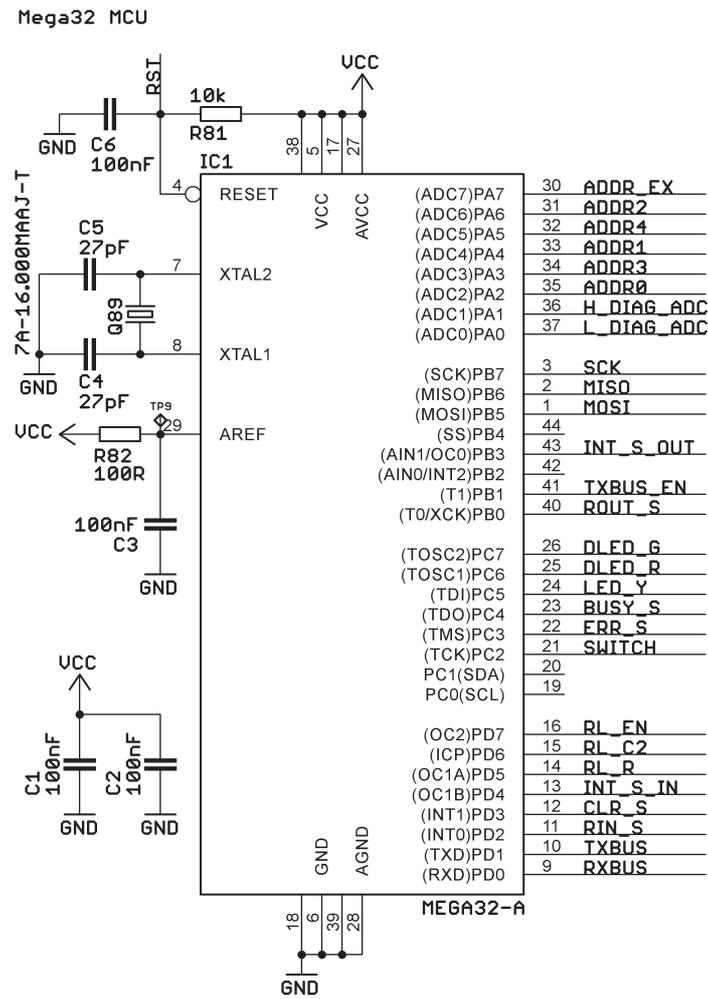
Bus Interface



Obr. 25: Budiče sériové komunikační sběrnice



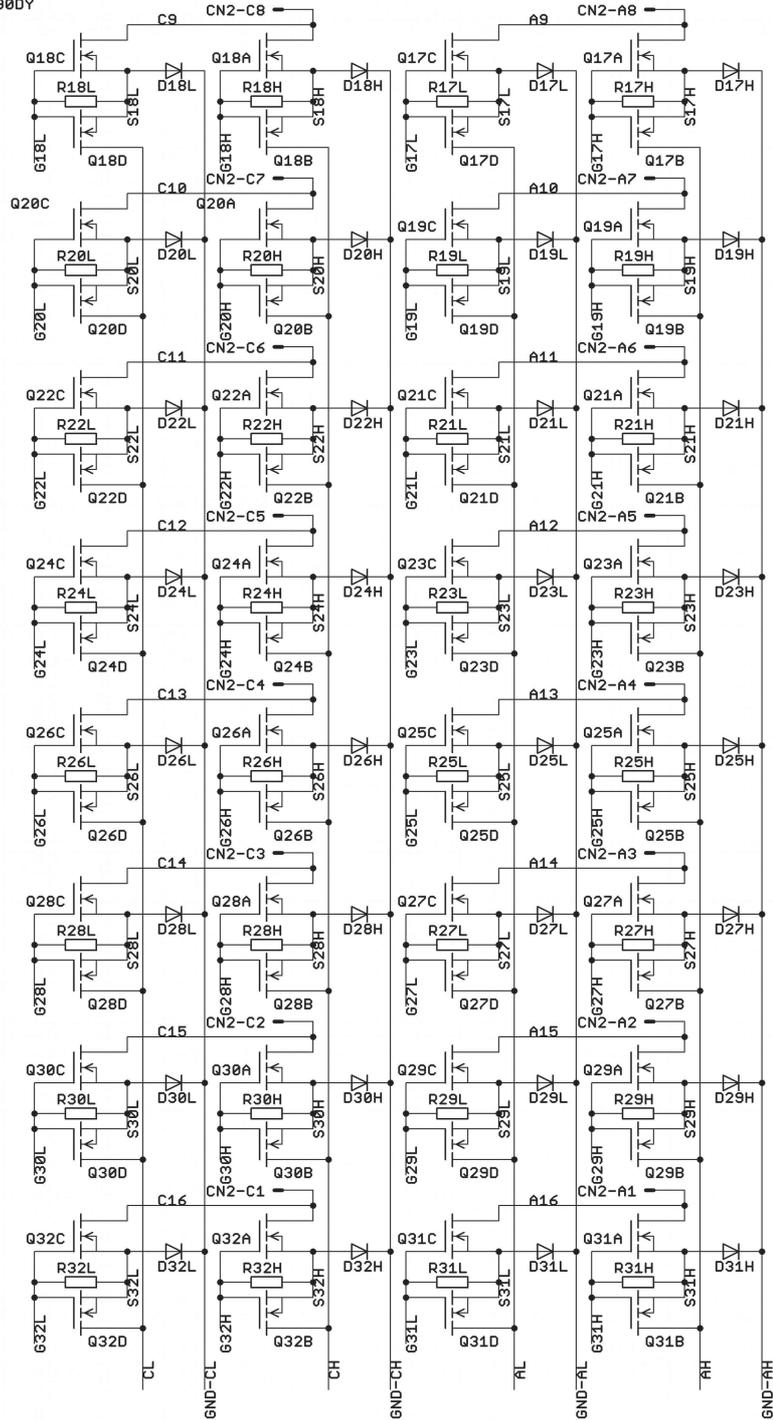
Obr. 23: Speciální signály řídicí komunikaci v měřicí ústředně



Obr. 26: Zapojení procesoru multiplexerové karty

TP switches 1..16

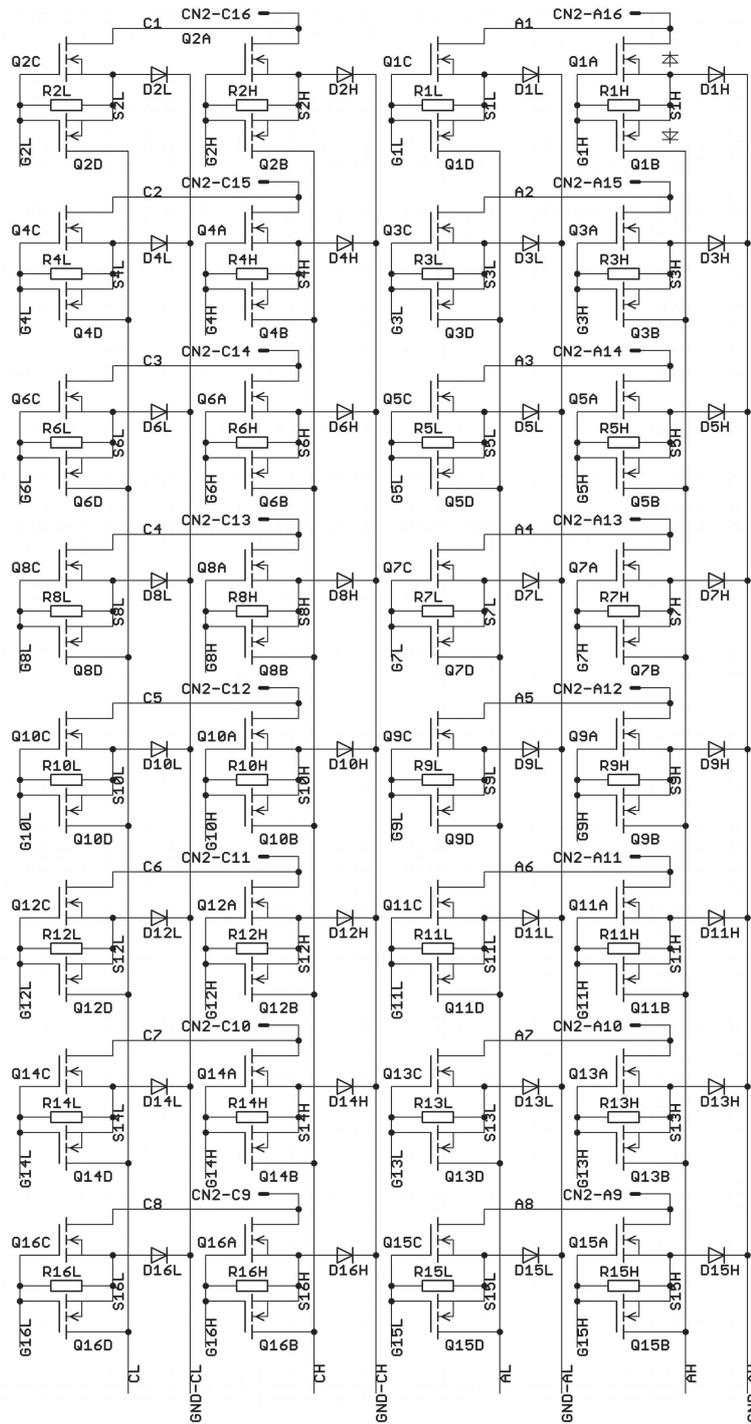
D1x-D16x: 1N4007
 Q1x-Q16x: Si4090DY
 R1x-R16x: 10k



Obr. 27: Zapojení 1. poloviny polovodičových spínačů

TP switches 17..32

D1x-D16x: 1N4007
 Q1x-Q16x: Si4090DY
 R1x-R16x: 10k



Obr. 28: Zapojení 2. poloviny polovodičových spínačů

6 Návrh plošného spoje

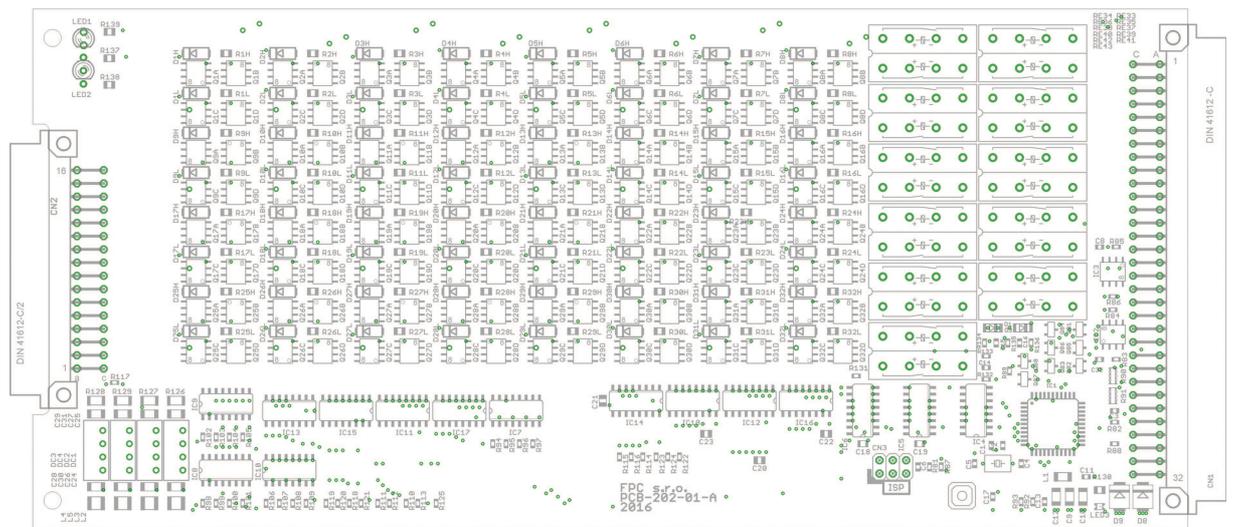
Plošný spoj stejně jako schéma je vytvořeno v programu CadSoft Eagle. Materiál plošného spoje byl zvolen IS400, plošný spoj je potřeba do formátu výměnné karty o rozměrech 220 x 100 mm vyrobit jako čtyřvrstvý. Tloušťka celého plošného spoje je 1,5 mm, je složen z vnitřního jádra o tloušťce 1,2 mm s mědí o tloušťce 35 μm . Vnější základní materiál je o tloušťce 140 μm s mědí o tloušťce 18 μm . Plošný spoj je navržen v konstrukční třídě VI. Na obr. 29 je rozmístění součástek. Na Obr. 30 - 33 následují obrazce spojů jednotlivých vrstev. Při rozmísťování součástek byl kladen důraz na možnost plošný spoj osazovat automaticky. Součástky jsou proto pouze z jedné strany a co nejvíce součástek je SMD. Elektrické otestování je umožněno rozmístěním testovacích bodů ze spodní strany PCB.

6.1 Rozměrové požadavky

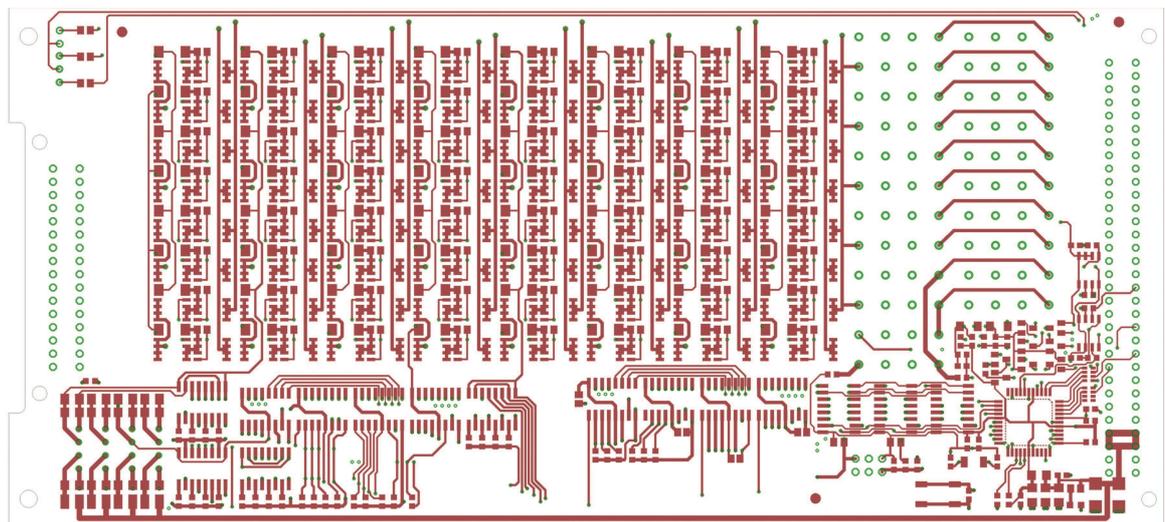
Měřicí ústředna MX2400 obsahuje 18 pozic na zásuvné karty, rozměr jedné karty je 220 mm délka, 100 mm výška. Na zadní straně PCB je konektor Harting 09 03 364 6921, na přední straně je uprostřed sestava konektorů: EPT 116-90054 a Harting 09 28 132 6903. Umístění těchto konektorů, LED diod na předním panelu a držáku předního panelu VS 1 bylo zadáno firmou FPC s.r.o.

6.2 Rozmístění součástek

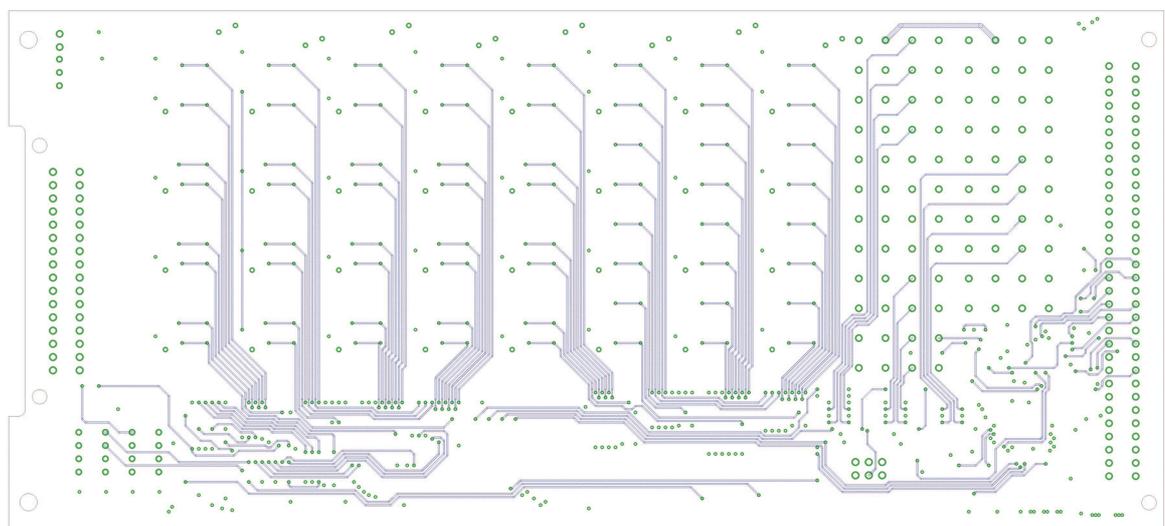
Součástky spínačů byly umístěny do tvaru matice rozměru 8 x 8 co nejblíže vstupnímu konektoru. Digitální řízení spínačů bylo umístěné pod touto maticí, elektromechanická relé připojující multiplexer ke vnitřní sběrnici měřicí ústředny jsou umístěny vpravo u sběrnice konektoru.



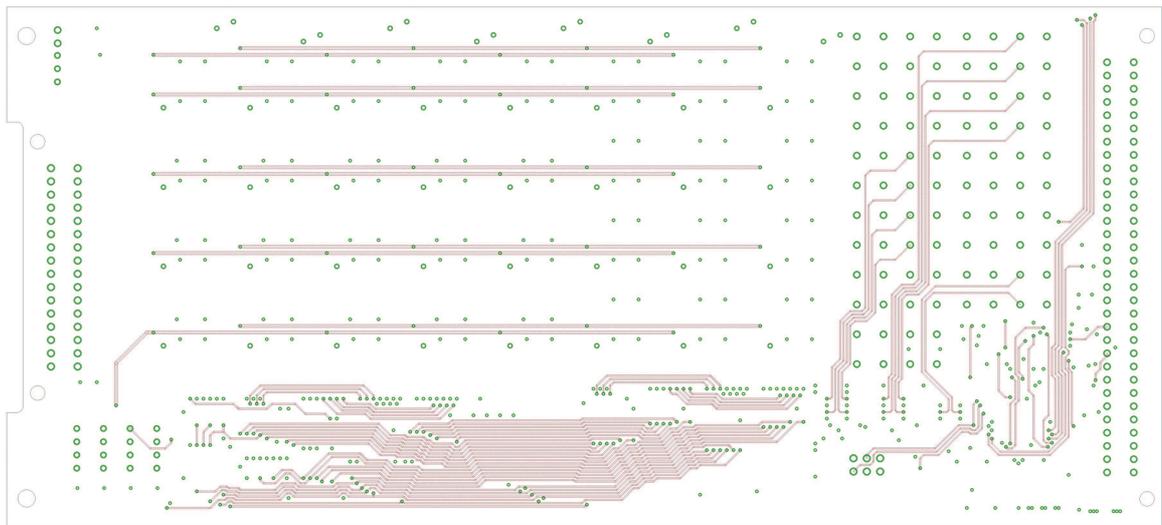
Obr. 29: Rozmístění součástek na PCB-0202-01-A



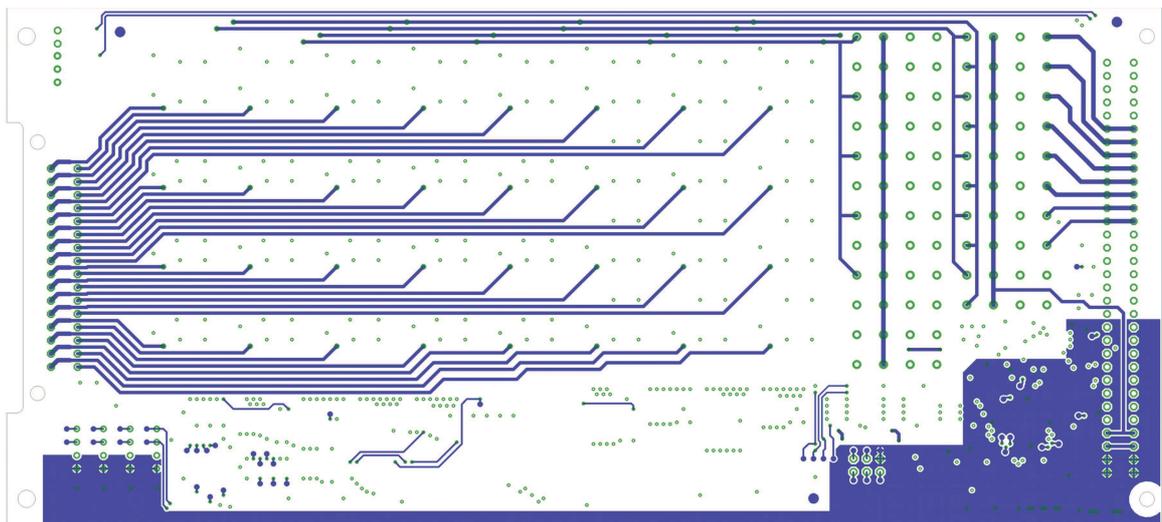
Obr. 30: Obrázek spojů horní vrstvy PCB-0202-01-A



Obr. 31: Obrázek spojů horní vnitřní vrstvy PCB-0202-01-A



Obr. 32: Obrazec spojů spodní vnitřní vrstvy PCB-0202-01-A



Obr. 33: Obrazec spojů spodní vrstvy PCB-0202-01-A

7 Vzorový testovací program v prostředí funTEST

Testovací program jsem vytvořil v programu funTEST verze 0.99.1603.2314_20160330. Naprogramoval jsem měření odporu propojů, izolace mezi vodiči, komparátorovou metodou ověření propojů a izolaci mezi vodiči. Rozhodovací hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 3. Obrázek programovacího rozhraní je na Obr. 34. Testovací program i nastavení testovacího pracoviště je v příloze D. Pro vzorový test jsem vytvořil kabelový svazek o pěti vodičích, TP1 až TP5 byl jeden konec vodičů, TP6 až TP10 byl druhý konec vodičů. Programovací rozhraní je zobrazeno na Obr. 34., pro přehlednost jsem skryl prázdné sloupce, ve kterých mohou být komentáře, ovládání dalších přístrojů, programovatelné zpoždění nebo komentáře. Ve sloupci T vzorového programu jsou vidět standardní SCPI příkazy používané v elektronických měřicích přístrojích.

	A	B	G	J	K	L	M	N	O	R	S	T
1	Label	Exec	Judge	Lo limit	Hi limit	Result	Show result	Return status	Return value	Matrix	Command (Device)	Parameters
2		1						0	OK		#msg	"SMX TEST"
3		0										
4		1						0	OK	SET:C	MULTIMETER	conf:res:1k
5		1						0	OK	croute:#0:b1	MULTIMETER	route:b1
6		1						0	OK		#msg	"SMX Průchodnost vodičů Resistivity"
7	MEAS RES OPEN	1	0	0.00	100	4.62		0	4.620000e+000	CSET:L:1:H:6	MULTIMETER	meas?
8		1	0	0.00	100	10.57		0	1.057000e+001	CSET:L:2:H:7	MULTIMETER	meas?
9		1	0	0.00	100	9.53		0	9.530000e+000	CSET:L:3:H:8	MULTIMETER	meas?
10		1	0	0.00	100	4.02		0	4.020000e+000	CSET:L:4:H:9	MULTIMETER	meas?
11		1	0	0.00	100	7.18		0	7.180000e+000	CSET:L:5:H:9	MULTIMETER	meas?
12		1						0	OK		#msg	"SMX Hledání zkratů Resistivity"
13	MEAS RES SHORT	1						0	OK		MULTIMETER	conf:res:100k
14		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:2	MULTIMETER	meas?
15		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:3	MULTIMETER	meas?
16		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:4	MULTIMETER	meas?
17		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:5	MULTIMETER	meas?
18		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:3	MULTIMETER	meas?
19		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:4	MULTIMETER	meas?
20		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:5	MULTIMETER	meas?
21		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:3:H:4	MULTIMETER	meas?
22		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:3:H:5	MULTIMETER	meas?
23		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:4:H:5	MULTIMETER	meas?
24		1						0	OK		#msg	"SMX Průchodnost vodičů Comparator"
25	COMP OPEN	1						0	OK		MULTIMETER	conf:cont
26		1	0	0.00	3	0.00		0	0.000000e+000	CSET:L:1:H:6	MULTIMETER	meas?
27		1	0	0.00	3	0.00		0	0.000000e+000	CSET:L:2:H:7	MULTIMETER	meas?
28		1	0	0.00	3	0.00		0	0.000000e+000	CSET:L:3:H:8	MULTIMETER	meas?
29		1	0	0.00	3	0.00		0	0.000000e+000	CSET:L:4:H:9	MULTIMETER	meas?
30		1	0	0.00	3	0.00		0	0.000000e+000	CSET:L:5:H:9	MULTIMETER	meas?
31		1						0	OK		#msg	"SMX Hledání zkratů Comparator"
32	COMP SHORT	1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:2	MULTIMETER	meas?
33		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:3	MULTIMETER	meas?
34		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:4	MULTIMETER	meas?
35		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:1:H:5	MULTIMETER	meas?
36		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:3	MULTIMETER	meas?
37		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:4	MULTIMETER	meas?
38		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:2:H:5	MULTIMETER	meas?
39		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:3:H:4	MULTIMETER	meas?
40		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:3:H:5	MULTIMETER	meas?
41		1	0	10000.00	1.00E+40	###		0	9.900000e+037	CSET:L:4:H:5	MULTIMETER	meas?
42		0										
43		#END										

Obr. 34: Programovací rozhraní programu funTEST

Tab. 3: Rozhodovací úrovně vzorového programu

Typ měření	Rozhodovací úroveň R_{TH} [Ω]
Odpor OPEN	100
Odpor SHORT	10000
Comp OPEN	500
Comp SHORT	500

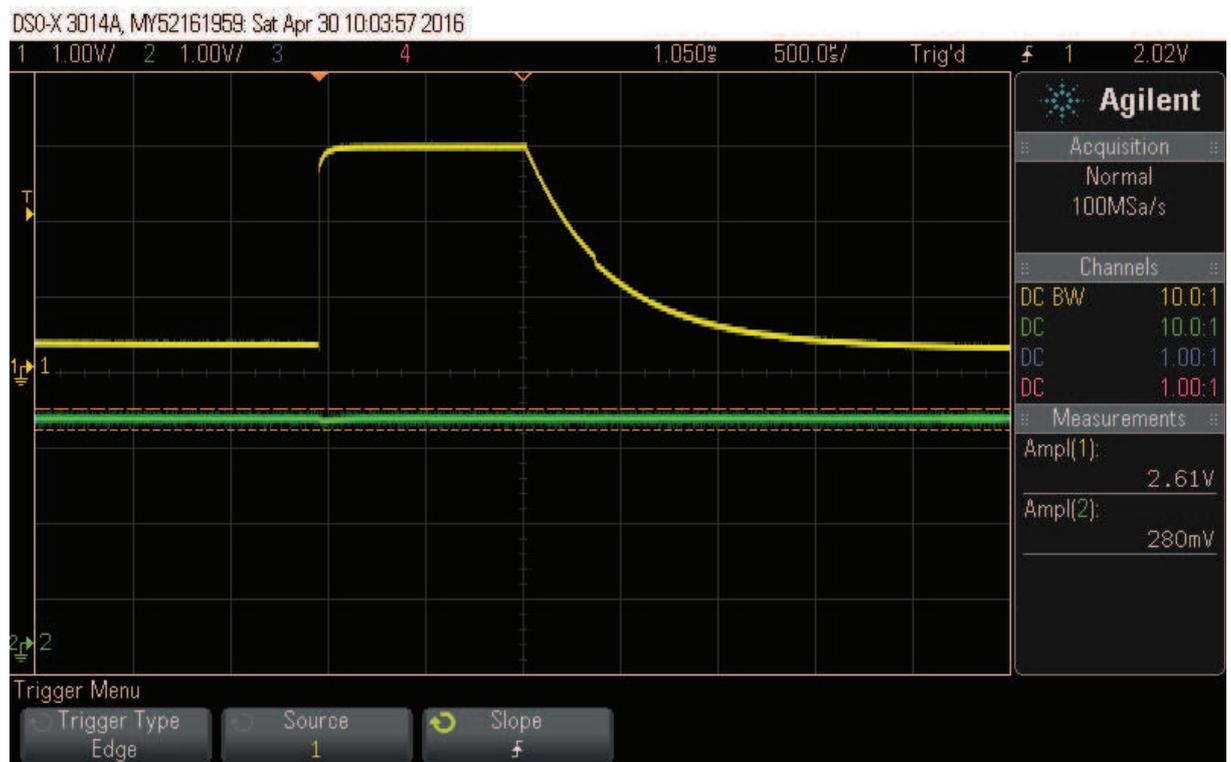
8 Měření

Statická měření byla provedena multimetrem Agilent 34411A s platnou kalibrací, dynamická měření byla měřena na osciloskopu Keysight DSO-X 3014A. Testovací program byl spouštěn bez dodatečných zpoždění maximální možnou rychlostí. Ruční spínání spínačů bylo prováděno z diagnostického obslužného software, který je součástí prostředí funTEST. Z obrázků Obr. 36 až 43 je patrné, že velké vnitřní kapacity zvolených tranzistorů ve spínačích nezpůsobují měřitelné omezení rychlosti standardního režimu příkaz - odpověď programu funTEST a měřicí ústředny MX2400.

Při dynamických měřeních osciloskopem je vždy první kanál CH1 připojen na vstup komparátoru, v náhradním schéma komparátoru obrázku Obr. 5 nebo Obr. 6 je toto místo reprezentováno mezi rezistory R6 a R5. Druhý kanál osciloskopu CH2 je ve všech dynamických měřeních připojen na referenční napětí v náhradním schéma komparátoru na Obr. 5 nebo Obr. 6 mezi rezistory R2 a R6.

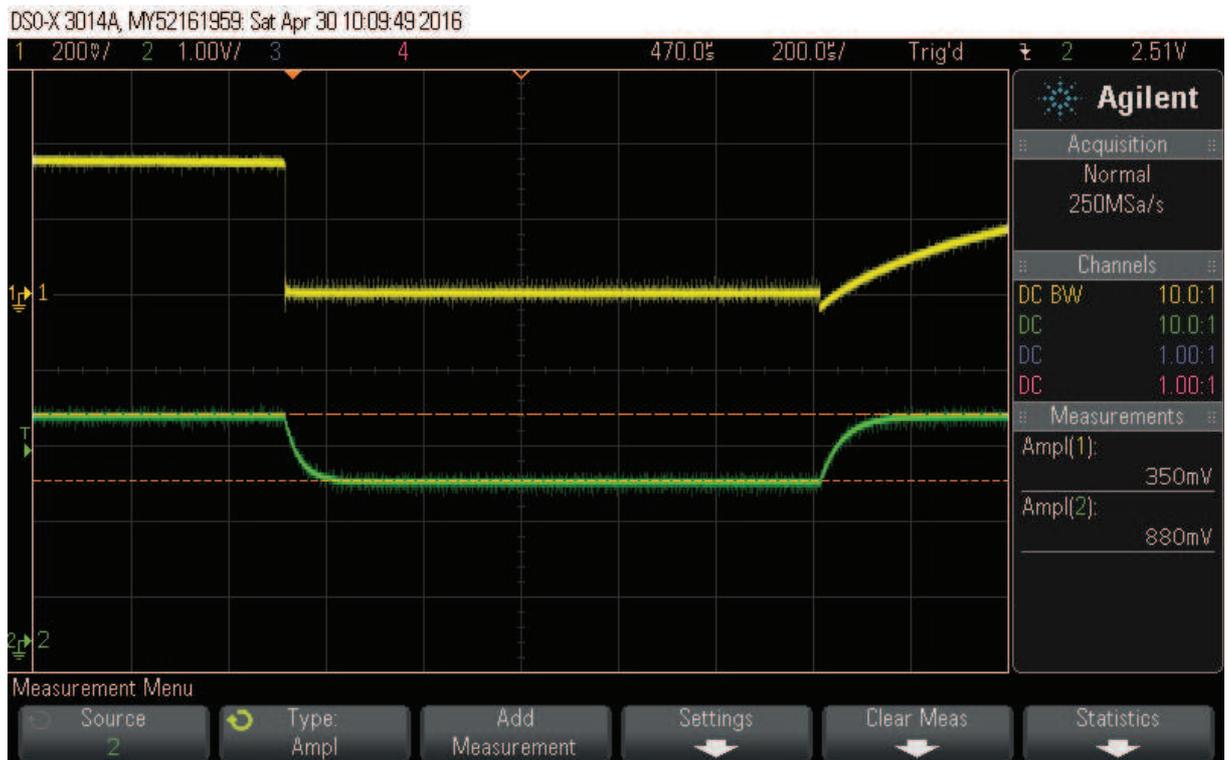
Na Obr. 35 je zobrazen vliv kapacit sběrnice měřicí ústředny, jedné karty LCMX a jedné SSMX. Tato kapacita způsobuje prodloužení přechodových dějů při připojování a odpojování měřicího obvodu k měřenému objektu. Doba prodloužení na Obr. 35 je 320 ns. Na Obr. 41 a 43 je zobrazeno zpoždění cca 35ms v sepnutí spínačů, které je způsobeno zkušebním snížením rychlosti nahrávání dat z mikroprocesoru do posuvných registrů. Frekvence hodinového signálu posuvných registrů byla snížena z 4 MHz na 1 MHz. Byla to metoda nejjednoduššího zobrazení momentu sepnutí polovodičového spínače.

Na Obr. 36 a 40 je zachycen moment sepnutí a rozepnutí spínače multiplexeru. Průběhy obou napětí LCMX i SSMX karty jsou stejné. Na Obr. 37 a 41 je zachycen kompletní test dle programu na Obr. 34. Na Obr. 39, 40, 42, 43 jsou časové úseky z Obr. 37 a 40 v čitelnějším časovém měřítku.

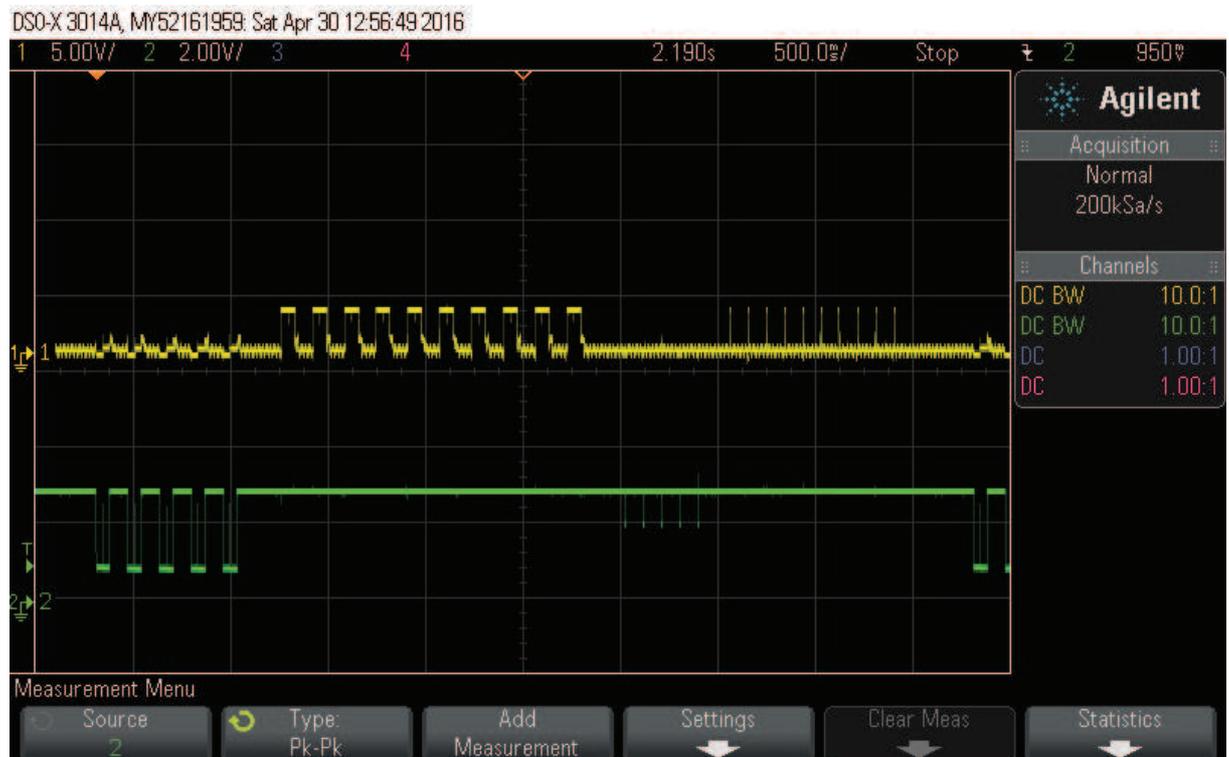


Obr. 35: Průběh napětí na komparátoru, vliv kapacit sběrnice a multiplexerů

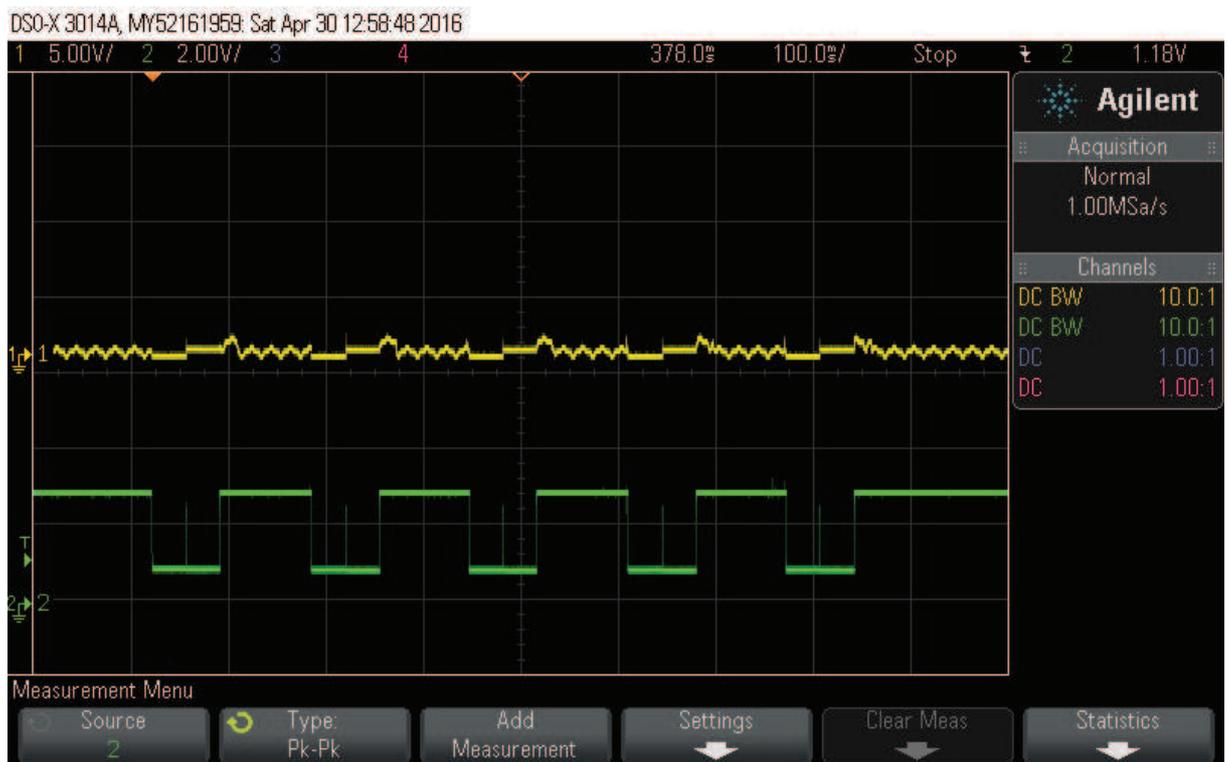
8.1 Měření s MXC2.LCMX.32



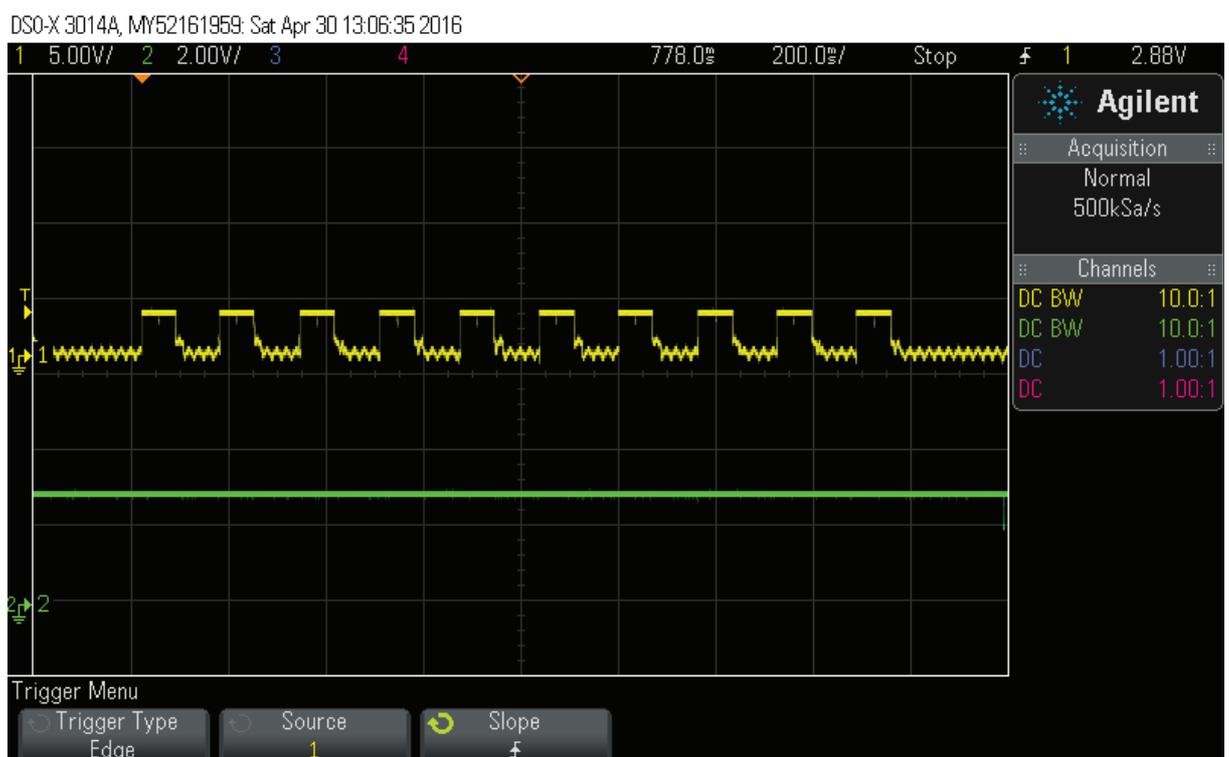
Obr. 36: Průběh napětí při měření propoje LCMX kartou



Obr. 37: Průběh sekvence celého testu kabelu LCMX kartou

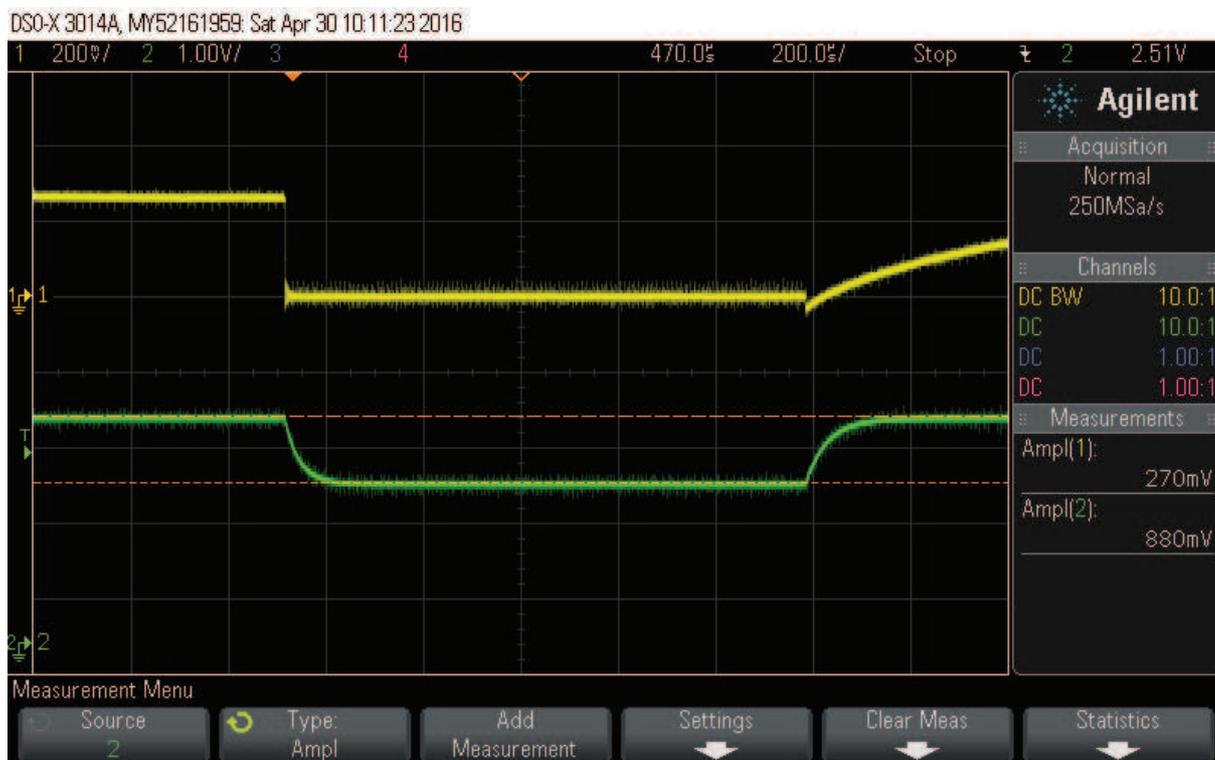


Obr. 38: Průběh sekvence propojů kabelu LCMX kartou

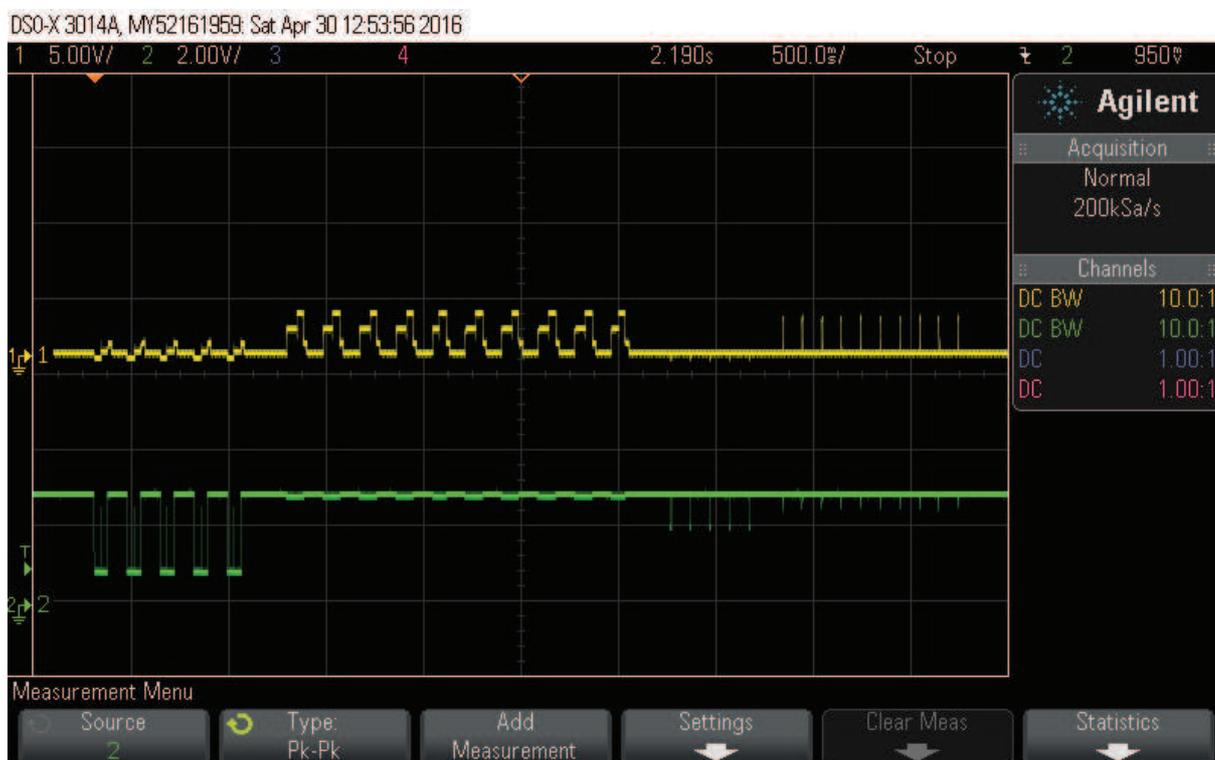


Obr. 39: Průběh sekvence měření zkratů kabelu LCMX kartou

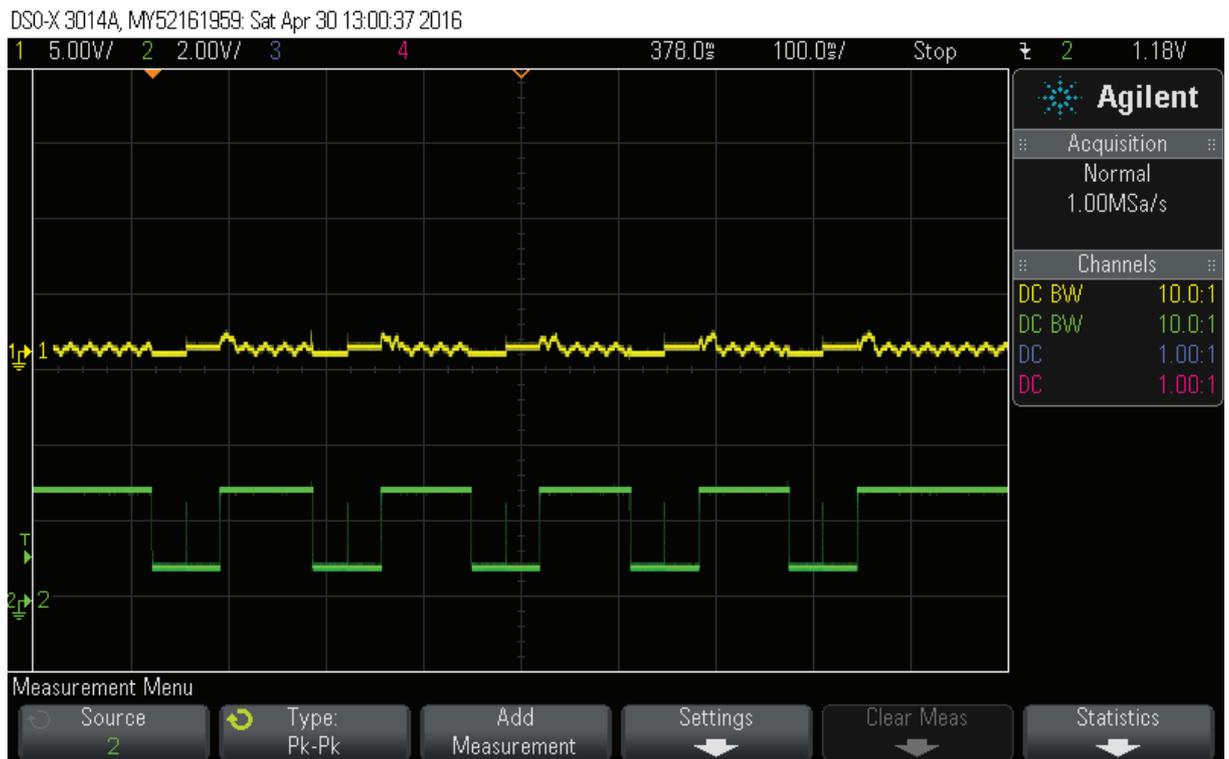
8.2 Měření s MXC2.SSMX.32



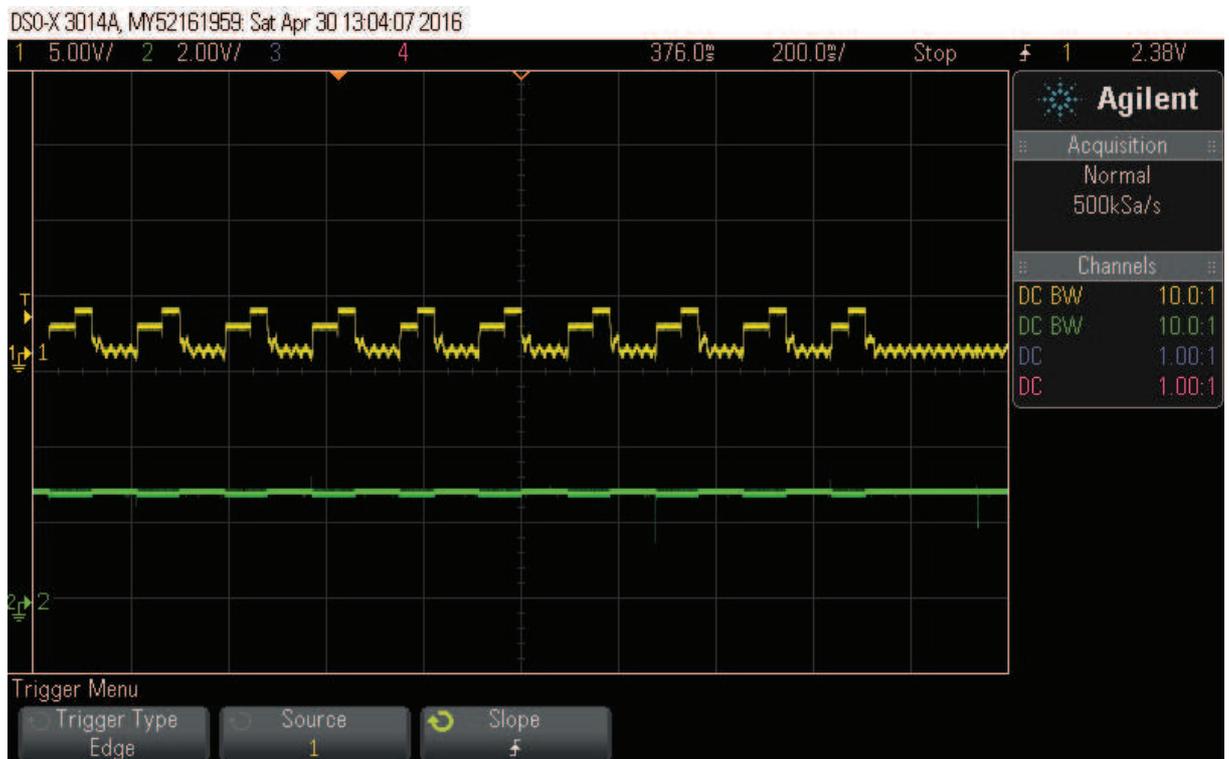
Obr. 40: Průběh napětí při měření propoje SSMX kartou



Obr. 41: Průběh sekvence celého testu kabelu SSMX kartou



Obr. 42: Průběh sekvence propojů kabelu LCMX kartou



Obr. 43: Průběh sekvence měření zkratů kabelu SSMX kartou

8.3 Měření odporu spínače a cest na plošném spoji

Elektrický odpor měřený mezi sběrníkovým vodičem L a H při všech spínačích rozepnutých jsem naměřil 200 M Ω . Jedná se vždy o 4 tranzistory v sérii, 32 krát paralelně. Spolu s nežádoucími průsakovými proudy diod a budičů se jedná o očekávanou hodnotu.

Odpor celé vodivé cesty od konektoru CN1, přes sepnuté sběrníkové relé, spínač a měděné spoje na plošném spoji až na vstupní konektor CN2. Při sepnutém právě jednom kanálu jsem naměřil 0,23 Ω .

Odpor cesty ze vstupního konektoru CN2 přes sepnutý spínač až ke sběrníkovému relé jsem naměřil 0,158 Ω .

Odpor ze vstupního konektoru ke spínači jsem naměřil 50 m Ω . Je to odpor vodivé, měděné cesty a prokovu.

Odpor spínače v sepnutém stavu, měřený při různých teplotách je v tabulce Tab. 4. Odpor spínače v sepnutém stavu je i při vyšších teplotách zanedbatelný, vzhledem k odporu sběrníkového jazýčkového relé nebo odporu měděných spojů na plošném spoji.

Tab. 4: Měření odporu spínače v sepnutém stavu v závislosti na teplotě

Teplota spínače [$^{\circ}\text{C}$]	Měřicí proud [A]	Odpor v sepnutém stavu [m Ω]
25	1	24
25	2	24
25	5	25
37,5	5	25,4
50	5	25,8

8.4 Porovnání Reléového a polovodičového spínače

Na obrázcích Obr. 44 a 45 jsou průběhy napětí na spínači a proudu spínačem při spínání zvýšeného proudu. Tento test je zkouškou sváření kontaktů, kdy u LCMX karty nastává velmi nebezpečná situace při odladování testovacího programu funkčního testu, kdy programátor udělá chybu v programu, omylem si vyzkratuje sepnutím dvou testovacích bodů nabitý kondenzátor. Nabitý kondenzátor může být součástí DUT nebo to může být výstupní filtrační kondenzátor napájecího zdroje. Jazyčkové kontakty na LCMX kartách zkratování zdroje nevydrží, nebo pouze v počtu jednotek sepnutí, pak dojde ke sváření kontaktů jazyčkového relé. Na Obr. 44 je průběh zkratování zdroje SDP-2405. Do cesty proudu byl vřazen rezistor o hodnotě $0,33 \Omega$ pro omezení a měření proudu. První kanál osciloskopu CH1 zobrazuje napětí na spínači a napětí na zdroji. Zdroj byl nastaven na výstupní napětí 1 V a omezení výstupního proudu na 10 mA. Zákmity uváděné v kapitole 2.1 jsou velmi podobné naměřeným průběhům, nežádoucí děj trvá 110 μs .

Na Obr. 45 je průběh sepnutí polovodičového spínače multiplexerové karty SSMX. Nastaven byl mnohem nepříznivější stav než při měření LCMX karty. Napětí zdroje SDP-2405 bylo nastaveno na 14 V. Maximální napětí na rezistoru $0,33 \Omega$, jsem naměřil 3,37 V. Proud který spínačem tekla při sepnutí dosahoval hodnoty 10 A. Polovodičový spínač takové přetížení bez problému snáší opakovaně. Na polovodičovém spínači nevznikají žádné nežádoucí průběhy napětí nebo proudu. Sepnutí polovodičového spínače porovnáním Obr. 44 a 45 je více než dvojnásobně rychlé, nežádoucí teplo vznikající při sepnutí bude u polovodiče také nižší než u elektromechanického spínače.



Obr. 44: Průběh proudu a napětí sepnutí reléového spínače



Obr. 45: Průběh proudu a napětí sepnutí polovodičového spínače

9 Ekonomické zhodnocení projektu

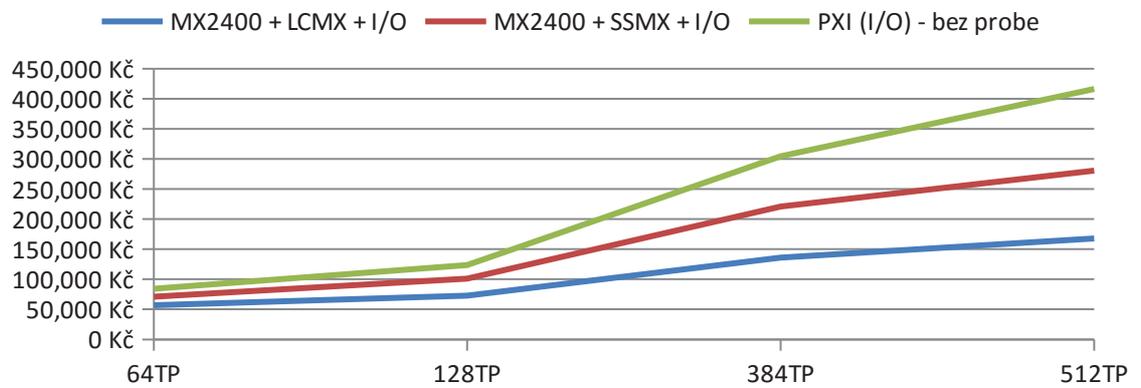
V tabulce Tab. 5 je porovnání tří různých řešení pro stavbu multiplexeru ICT testu. Varianta 1 je multiplexer složený ze stávajících produktů společnosti FPC s.r.o.. Ve variantě 2 jsou multiplexerové karty použity dle návrhu, které je obsahem této diplomové práce. Varianta 3 je složena z komponent PXI, byly vybrány tyto komponenty: PXI-1033, PXI-1042, PXI-1044, PXI-6528, PXI-2576. Zdrojem cen jsou interní dokumenty společnosti FPC s.r.o. Grafické zobrazení porovnání je na Obr. 46. Požadavek společnosti FPC s.r.o. byl, aby cena koncového řešení nově navržené multiplexerové karty byly nižší než varianta 3. Z tabulky je patrné, že tato podmínka byla splněna. Pro 512 testovacích bodů je cena varianty 2 o 32,5 % nižší než varianta 3.

Varianta 2 je pro 512 testovacích bodů dražší o 67,4 % než varianta 1, ale nabízí výhodu ve velké odolnosti proti poškození spínačů v ní použitých při odladování nového pracoviště. Varianta 1 nezohledňuje vícenásobky na opravu LCMX karet, které často vznikají právě při odladování nového pracoviště (zahrnující například odhalení poškozené karty, diagnostiku a opravu multiplexerové karty, oprava kroku programu, který problém způsobil). V konečném důsledku proto může být varianta 2 ekonomičtější. Další výhody varianty 2 oproti srovnávaným řešením jsou uvedeny v kapitole 8.

Tab. 5: Cenové porovnání různých řešení ICT testu - tabulka

	Varianta 1		Varianta 2		Varianta 3	
	MX2400 + LCMX + I/O		MX2400 + SSMX + I/O		PXI – bez zdroje	
Počet TP [-]	Cena [Kč]	Cena 1TP [Kč/TP]	Cena [Kč]	Cena 1TP [Kč/TP]	Cena [Kč]	Cena 1TP [Kč/TP]
64	56 822	888	70 956	1 109	84 310	1 317
128	72 654	568	100 922	788	123 710	966
384	135 982	354	220 786	575	304 510	793
512	167 646	327	280 718	548	416 410	813

Cenové porovnání různých řešení ICT testu



Obr. 46: Cenové porovnání různých řešení ICT testu - graf

Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh a výroba prototypu vstupní multiplexerové karty pro měřicí ústřednu MX2400 včetně ozkoušení v provozu. Všechny body zadání se podařilo splnit. Analýza požadavků trhu spolu s rozbořením spínačů a dostupných součástek pro spínače poskytly potřebné informace pro zvolení vhodných parametrů vstupní multiplexerové karty.

Při ožívání prototypu vstupní multiplexerové karty jsem zjistil několik chyb v návrhu, které se však podařilo eliminovat do takové míry, aby bylo možné změřit potřebné parametry pro porovnání se stávající multiplexerovou kartou LCMX a nemělo to vliv na měření a porovnání. Všechny zjištěné chyby v návrhu je možné odstranit následujícími dodatečnými úpravami.

Pro dosažení správného tvaru řídicích signálů z procesoru o frekvenci 4 MHz jsem optimalizoval hodnotu pull-up rezistorů z původní hodnoty 10 k Ω na hodnotu 390 Ω . Použité optočleny galvanického oddělení mezi budiči jednotlivých sběrnicových vodičů mají různé zpoždění sepnutí a rozepnutí a dále dlouhý vypínací čas. Tyto vlastnosti způsobily špatné fungování posuvných registrů. Zapojení jsem předělal tak, že signál SCK pro integrované obvody IC4, IC5 a IC6 jsem zpozdil o 22 μ s RC obvodem 1 k Ω + 22 Nf. Vstupy optočlenů signálu SCK jsem přepojil na prototypu tak, aby nebyly zapojeny v kaskádě spolu s ostatními signály RL_R, RL_C2 a S. Všechny SCK signály (SCK-AH, SCK-AL, SCK-CH, SCK-CL) jsou společně ovládány paralelně z procesoru. Při optimalizaci cest na plošném spoji došlo k připojení tranzistorových spínačů na špatné výstupy posuvných registrů a tím vzájemnému propojení čtyřvodičové sběrnice AH, AL, CH a CL. Na prototypu LCMX karty je polovina vstupů částečně nefunkční. Prvních 11 vstupů je plně funkčních, ze zbylých vstupů 12 až 32 na prototypu funguje pouze 5.

Při měření a porovnání multiplexerů z jazýčkových relé a polovodičových spínačů se potvrdily nežádoucí zákmity u relé stávající karty a potvrdila se odolnost polovodičových spínačů a další výhody nově navržené karty.

Na odpor celé cesty signálu má odpor sepnutého kanálu dvojice tranzistorů spínače minimální vliv. Podařilo se najít tranzistory vhodných parametrů, díky kterým vyniknou výhody polovodičových spínačů polovodičové multiplexerové karty. Krátkodobá přetížitelnost, bezjiskrové a bezzákmitové spínání jsou hlavní výhody pro rychlé a spolehlivé měření. Podařilo se navrhnout spínače, u kterých se ještě neprojevují nevýhody polovodičových spínačů jako například konečný, relativně malý odpor v rozepnutém stavu a galvanické spojení řídicí elektrody se spínacími elektrodami.

Měření dynamických průběhů poskytlo cenné informace k budoucímu vývoji multiplexerových a měřících karet. Opravený návrh multiplexerové karty poslouží v budoucnu jako výchozí odrazný bod pro vývoj dalších typů multiplexerových karet pro menší i větší napětí, menší i větší proud, zato ještě rychlejší bezzákmitové spínání.

Multiplexerová karta navržená touto diplomovou prací má 2,2 krát vyšší výrobní náklady. Z celkových nákladů připadá na spínače přibližně 40%, jak u stávající karty LCMX, tak u nově navržené SSMX. Tranzistorů v pouzdru SO8 je velké množství, záměnou typu dojde k vytvoření jiné karty. Jednoduchou změnou pouzdra spínacích tranzistorů například za SOT23, vznikne nový typ karet, cenově srovnatelných se stávající LCMX s jazýčkovými relé (varianta 1 viz kapitola 9).

Prototyp vyrobené karty bude dále sloužit interním potřebám rozvoje produktů kolem měřicí ústředny MX2400.

Seznam literatury a informačních zdrojů

Veškeré literární internetové prameny jsou přiloženy na CD, které je nedílnou součástí diplomové práce.

- [1] FPC S.R.O. *Datasheet MX2400*. Plzeň, 2015.
- [2] PXI 32x4 2-Pole 2A Matrix with BIRST. [online]. [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: <http://www.pickeringtest.com/cs-cz/product/32x4-2-pole-2a-matrix-with-birst>
- [3] Versatile PXI Solid State Multiplexer. [online]. [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: <http://www.pickeringtest.com/cs-cz/product/40-681-001-pxi-solid-state-versatile-multiplexer/>
- [4] 34450A Digital Multimeter, 5 ½ Digit. [online]. [cit. 2015-08-17]. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1133EN.pdf?id=2292748>
- [5] DATA SHEET RELSIA05D500. [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/634/072/relsia05d500-datasheet-1.pdf>
- [6] General-purpose Relay: Bounce Time. [online]. [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: http://www.omron-ap.co.in/service_support/FAQ/FAQ02767/index.asp
- [7] DATA SHEET MAX4052. [online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4051-MAX4053A.pdf>
- [8] KT 210 - Low Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/KT210-Low-Voltage-Wiring-Tester-PI04012.pdf>
- [9] KT 230 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/KT230-High-Voltage-Wiring-Tester-PI04013.pdf>
- [10] NT 210 - Low Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT210-Low-Voltage-Wiring-Tester-PI04024.pdf>
- [11] NT 230 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT230-High-Voltage-Wiring-Tester-PI04026.pdf>
- [12] KT 630 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/KT630-High-Voltage-Wiring-Tester-PI04022.pdf>
- [13] KT 638 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/KT638-PI04072.pdf>
- [14] NT 410 - Low Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT410-Low-Voltage-Wiring-Tester-PI04057.pdf>
- [15] NT 600 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT600-PI04066.pdf>
- [16] NT 637 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT637-PI04089.pdf>
- [17] NT 730 - High Voltage Wiring Tester. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT730-Modular-Wiring-Tester-PI04051.pdf>
- [18] NT 830 - High Voltage Distributed Test. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.adaptronic.com/fileadmin/pdf/Produkte/EN/NT830-Distributed-Test-System-PI04062.pdf>

- [19] Cable Tester CT30ix. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: http://www.t-s-k.de/fileadmin/user_upload/Flyer_2014_en/Kabeltester/Flyer_CT30ix_en_10_2014.pdf
- [20] Cable Tester CT35. [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: http://www.t-s-k.de/fileadmin/user_upload/Flyer_2013/Kabeltester/K_Flyer_CT35_en.pdf
- [21] WK 260 – Low Voltage Cable Test. [online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <http://www.weetech-usa.com/?page=products&catID=1&prodID=41>
- [22] WK 240 – Low Voltage Cable Test. [online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <http://www.weetech-usa.com/?page=products&catID=1&prodID=28>
- [23] Bed of Nails Board Testers 3030 COMPACT. [online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: <http://www.spea.com/BoardTestAutomation/ProductsbyFunction/BedofNailsBoardTestersS2/BedofNailsBoardTestersS2Models/3030CompactS2/tabid/404/language/en-US/Default.aspx>
- [24] TestStation LH. [online]. [cit. 2015-08-19]. Dostupné z: <http://www.teradyne.com/products/production-board-test/teststation/teststation-lh>
- [25] In-circuit Test Systems - 3070 ICT. [online]. [cit. 2015-08-19]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/en/pc-00002:atg:pgr/in-circuit-test-systems-3070-ict?&cc=CZ&lc=eng>
- [26] DATA SHEET Single-In-Line Reed Relays - PICKERING SERIES 113. [online]. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.pickeringrelays.com/pdfs/113-small-sil-reed-relays.pdf>
- [27] Instrument Grade Pickering Reed Relays [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.pickeringtest.com/cs-cz/products/reed-relays>
- [28] Interfacing Switches and Relays to the Real World in Real Time [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/764>
- [29] DATA SHEET G3VM-61G1 MOS FET Relays [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: https://www.omron.com/ecb/products/pdf/en-g3vm_61g1.pdf
- [30] DATA SHEET FDMD84100 [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDMD84100.pdf>
- [31] DATA SHEET CSD87312Q3E [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd87312q3e.pdf>
- [32] DATA SHEET CSD85312Q3E [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd85312q3e.pdf>
- [33] DATA SHEET CSD75208W1015 [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd75208w1015.pdf>
- [34] DATA SHEET SI4090DY [online]. 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/63917/si4090dy.pdf>
- [35] DATA SHEET MAX14756/MAX14757/MAX14758 [online]. 2016 [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX14756-MAX14758.pdf>
- [36] DATA SHEET HV2631 [online]. 2016 [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/HV2631.pdf>
- [37] DATA SHEET ASSR-1510, ASSR-1511, ASSR-1520, ASSR-1530 [online]. 2016 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0036EN>
- [38] DATA SHEET 2N7002BKS [online]. 2016 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/2N7002BKS.pdf

Přílohy

Příloha A – Schema PCB-0202-01-A.pdf

Příloha B – Board PCB-0202-01-A.pdf

Příloha C – Firmware PCB-0202-01-A.pdf

Příloha D – testovací programy.zip

Příloha E – Fotografie osazené PCB-0202-01-A.pdf