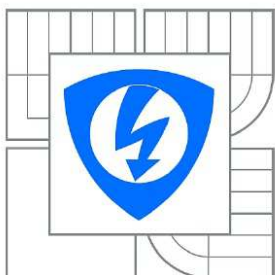


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MULTI-MASTER KOMUNIKACE NA DLOUHÝCH VZDÁLENOSTECH

MULTIMASTER COMMUNICATION OVER LONG DISTANCES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

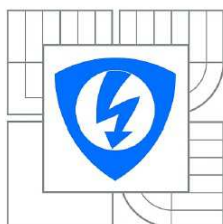
MICHAL HEDVÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV UHER

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Michal Hedvíček
Ročník: 3

ID: 147428
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Multi-master komunikace na dlouhých vzdálenostech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte literární rešerši v oblasti multi-master sériové komunikace. Uvedte vhodné sběrnice a jejich parametry, zvláště se zaměřte na sběrnici I2C. Provedte rozbor problému komunikace po středně dlouhých vzdálenostech (řádově stovky metrů až 1 km) a diskutujte používaná řešení fyzické vrstvy.
2. Provedte průzkum trhu dostupných obvodů rozšiřujících komunikaci po sběrnici I2C na větší vzdálenosti, srovnejte jejich parametry. Navrhněte řešení komunikace na delší vzdálenosti s těmito obvody (předpokládá se nízká přenosová rychlost oproti standardu), diskutujte vhodnost jednotlivých řešení.
3. Na přípravku s extenderem P82B96 provedte zkušební komunikaci, navrhněte metodiku pro měření významných parametrů signálů ovlivňujících kvalitu přenosu, změřte tyto parametry a proveďte dlouhodobý test stability za různých podmínek. Provedená měření vyhodnoťte a diskutujte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

GANSSE, J. et al.: Embedded Hardware: Know It All. Elsevier, 2008. 520 s.
PHILIPS SEMICONDUCTORS: The I2C-Bus Specification. NXP Semiconductors, 2000. 46 p.
Další literatura dle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 25.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Uher

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá teoretickým rozbohem používaných sériových sběrnic a porovnáním jejich vlastností, zejména pak pro použití na středních vzdálenostech. Dále pak uvažuje možnost rozšíření sběrnice I²C o speciální obvody, které zajistí komunikaci na větší vzdálenosti.

V další části je uveden návrh měřicího programu pro sběr a vyhodnocení naměřených dat. Následuje samotné měření a vyhodnocení parametrů signálu na sběrnici za různých podmínek.

ABSTRACT

This bachelor project deals with a theoretical analysis of employed serial buses and a comparison of their qualities especially with regards to a medium-range distance. Also, it considers the possibility to extend I²C-bus by special circuits, which guarantee communication for longer distance.

Next deals with measuring draft program for the collection and evaluation of measurement data. Following measurement itself and evaluation parameters of signal on the bus under different conditions.

KLÍČOVÁ SLOVA

I²C, CAN, RS485, kapacita sběrnice, sériová komunikace, multi-master, master, slave, mikrokontrolér, pull-up rezistor, P82B96, P82B715, transmitter, receiver, LM75A

KEY WORDS

I²C, CAN, RS485, capacity bus, serial communication, multi-master, master, slave, microcontroller, pull-up resistor, P82B96, P82B715, transmitter, receiver, LM75A

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE

HEDVÍČEK, M. *Multi-master komunikace na dlouhých vzdálenostech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Uher.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma "Multi-master komunikace na dlouhých vzdálenostech" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářského projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Uhrovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

Podpis:

OBSAH

1	Úvod	10
2	Sériová komunikace.....	11
2.1	Rozdělení sériového komunikačního rozhraní.....	11
2.2	Důvody pro použití sériové sběrnice	12
2.3	Multi-master komunikace.....	12
3	Komunikační rozhraní RS485.....	13
4	Komunikační rozhraní CAN.....	14
5	Komunikační rozhraní I ² C.....	16
5.1	Programová realizace sběrnice I ² C.....	19
6	obvody pro rozšíření I ² C sběrnice	20
6.1	Obvod P82B96	20
6.2	Obvod P82B715	23
7	Popis extenderu a zapojení	26
8	Metodika a podpůrné prostředky měření.....	28
8.1	Metodika měření.....	28
8.1.1	Strmost hran.....	28
8.1.2	Šum logické úrovně	29
8.1.3	Překmit a podkmit hrany	29
8.1.4	Požadavky na měřicí hardware	30
8.1.5	Dělič.....	30
9	Popis programů	32
9.1	Program pro sběr dat.....	32
9.2	Program pro vyhodnocení dat	34
10	Měření parametrů na sběrnici I ² C.....	39
10.1	Měření s proměnlivou délkou sběrnice	39
10.2	Měření s proměnlivým počtem extenderů.....	42
10.3	Dynamická měření na extenderech.....	44
10.4	Komunikace s kalendářovou pamětí RAM PCF8535.....	47
10.5	Komunikace mezi procesory.....	50
10.6	Multi-master komunikace.....	55
10.7	Komunikace s dlouhými pakety – displej.....	59
11	Závěr.....	60
12	Seznam použité literatury	61
13	Přílohy	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Blokové schéma komunikace na velkou vzdálenost.....	11
Obrázek 2. Blokové schéma komunikace na malou vzdálenost	11
Obrázek 3. Přenos jednoho signálu po lince RS485	13
Obrázek 4. Provedení nevětvené linky RS485 [6]	14
Obrázek 5. Blokové schéma sběrnice CAN	15
Obrázek 6. Vložení synchronizačního bitu.....	15
Obrázek 7. Blokové schéma sběrnice I2C s pull-up rezistory	16
Obrázek 8. Zobrazení START a STOP podmínky na SDA a SCL vodiči [7]	17
Obrázek 9. Časové parametry hodinového signálu SCL [7]	17
Obrázek 10. Zápis do zařízení.....	18
Obrázek 11. Čtení ze zařízení.....	18
Obrázek 12. Ukázka potvrzení/nepotvrzení přijetí rámce bitem ACK [7].....	19
Obrázek 13. Zapojení sběrnice s obvodem P82B96 [3].....	20
Obrázek 14. Galvanické oddělení sběrnice pomocí optočlenů [3]	21
Obrázek 15. Popis pinů obvodu P82B96 [3]	21
Obrázek 16. Zapojení sběrnice s obvodem P82B715 [4]	23
Obrázek 17. Blokové schéma obvodu P82B715 [4].....	24
Obrázek 18. Příklad výpočtu pull-up rezistorů [4]	24
Obrázek 19. Popis pinů obvodu P82B715 v rámci pouzdra DIP8.....	25
Obrázek 20. Schéma zapojení modulu extenderu	26
Obrázek 21. Schéma zapojení extenderu s pull-up odpory na straně rozšířené sběrnice.....	27
Obrázek 22. Schéma zapojení extenderu s pull-up odpory na straně původních logických úrovní	27
Obrázek 23. Logická hrana.....	28
Obrázek 24. Princip měření překmitu a podkmitu náběžné hrany	29
Obrázek 25. Schéma zapojení napěťového děliče	30
Obrázek 26. Blok vytvoření binárního souboru	32
Obrázek 27. Algoritmus ukládání dat	33
Obrázek 29. Blok výběrového signálu	34
Obrázek 28. Blok načtení TDMS	34
Obrázek 30. 1. Podmínka pro uložení načtených dat.....	34
Obrázek 31. 2. podmínka pro uložení načtených dat.....	35
Obrázek 32. Blok měření parametrů signálu	35
Obrázek 33. Informační popis měřeného signálu.....	36
Obrázek 34. Blok výpočtu statistických parametrů.....	36
Obrázek 35. Front Panel.....	37
Obrázek 36. Blokové schéma pro měření s proměnlivou délkou sběrnice	39
Obrázek 37. Průběh hodinového signálu SCL na straně 15 V při konstantní frekvenci $f = 10,5$ kHz v závislosti na vzdálenosti l [m].....	40
Obrázek 38. Průběh hodinového signálu SCL na straně 15 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v závislosti na vzdálenosti l [m].....	40
Obrázek 41. Graf závislosti strmosti s [V/ μ s] hodinového signálu SCL rozšířené strany sběrnice na vzdálenosti l [m]	41
Obrázek 39. Průběh hodinového signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v závislosti na vzdálenosti l [m]	41

Obrázek 40. Průběh hodinového signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10,5$ kHz v závislosti na vzdálenosti l [m]	41
Obrázek 42. Blokové schéma pro měření s proměnlivým počtem extenderů	42
Obrázek 43. Průběh hodinového signálu SCL při frekvenci $f = 10$ kHz na straně 15 V pro $n = 2$ extendery	43
Obrázek 44. Průběh hodinového signálu SCL při frekvenci $f = 100$ kHz na straně 15 V pro $n = 2$ extendery	43
Obrázek 45. Blokové schéma pro měření dynamických parametrů na sběrnici	44
Obrázek 48. Graf progresu signálu τ [s] v závislosti na frekvenci f [kHz] hodinového SCL signálu na 5 V úrovni	45
Obrázek 46. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m paměti RAM	45
Obrázek 47. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m paměti RAM	45
Obrázek 49. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m paměti RAM	46
Obrázek 50. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m čidla LM75A	46
Obrázek 51. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 10,5 kHz na straně 5V	47
Obrázek 52. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 100 kHz na straně 5V	48
Obrázek 53. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 10 kHz na straně 15V	49
Obrázek 54. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 100 kHz na straně 15V	49
Obrázek 55. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-T, S-R	51
Obrázek 56. Průběh komunikace na straně vysílače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-T, S-R	51
Obrázek 57. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v režimu M-T, S-R	52
Obrázek 58. Průběh komunikace na straně vysílače při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v režimu M-T, S-R	52
Obrázek 59. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-R, S-T	53
Obrázek 60. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v režimu M-R, S-T	54
Obrázek 61. Blokové schéma pro měření multi-master komunikace	55
Obrázek 62. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/100kHz/5V)	56
Obrázek 63. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/10kHz/5V)	56
Obrázek 64. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/10kHz/15V)	57
Obrázek 65. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/100kHz/15V)	58
Obrázek 66. Průběh komunikace s displejem BO9864BFPPHH	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Maximální rychlost sběrnice CAN v závislosti na délce vedení.....	16
Tabulka 2. Popis pinů obvodu P82B96.....	22
Tabulka 3. Katalogové parametry obvodu P82B96.....	22
Tabulka 4. Popis pinů obvodu P82B715.....	24
Tabulka 5. Katalogové parametry obvodu P82B715.....	25
Tabulka 6. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s], napětí LOG 1 [V] a vypočtených statistických údajů pro hodinový signál 15 V při konstantní délce vedení $l = 85$ m.....	43
Tabulka 7. Naměřené hodnoty časových zpoždění τ_n a τ_d a vypočítaná hodnota progresu τ signálu SCL na 5 V úrovni paměti RAM.....	44
Tabulka 8. Naměřené hodnoty progresu pro snímač LM75A.....	45
Tabulka 9. Tabulka naměřených s [V/ μ s] a vypočtených hodnot statistických parametrů signálu SCL na 5 V a 13,8 V úrovni pro paměť RAM v závislosti na frekvenci f [kHz] a konstantní vzdálenosti $l = 30,1$ m.....	47
Tabulka 10. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-T, S-R.....	50
Tabulka 11. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-T, S-R.....	50
Tabulka 12. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-R, S-T.....	53
Tabulka 13. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-R, S-T.....	53
Tabulka 14. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 13,8V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu multi-master.....	55
Tabulka 15. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 13,8V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu multi-master.....	56

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 5 V SCL v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m].....	62
Příloha 2. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 5 V SDA v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m].....	63
Příloha 3. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 15 V SCL v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m].....	63
Příloha 4. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 15 V SDA v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m].....	63

1 ÚVOD

Cílem bakalářské práce je provést srovnání vlastností běžně používaných sériových sběrnic, které mají možnost multi-master komunikace, zejména I²C sběrnice. V druhé části pak provést průzkum trhu dostupných obvodů rozšiřujících komunikaci po sběrnici I²C na větší vzdálenosti a srovnat jejich parametry. V poslední části pak změřit vlastnosti sběrnice za různých podmínek.

V první části bakalářské práce jsou definovány základní používané termíny a sběrnice. Možnost multi-master komunikace v praxi nemají všechny používané komunikační linky. Například stále používaná proudová smyčka a rozhraní RS232 nemají možnost připojení více zařízení typu master na sběrnici. Proto jsou uvedena jen rozhraní, které tuto možnost podporují.

V druhé části práce jsou definovány dva obvody, které dovolují komunikaci prostřednictvím I²C sběrnice na větší vzdálenost. Jsou zde popsány jejich vlastnosti a možné způsoby zapojení.

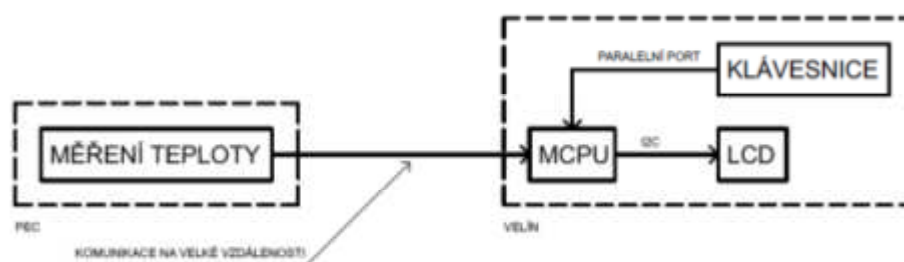
V poslední části práce se zabýváme měřením parametrů signálu na sběrnici. Signifikantním parametrem, který při komunikaci na sběrnici zkoumáme je strmost hrany s odpovídajícími statistickými údaji jako směrodatná odchylka a rozptyl hodnot. Dále nás zajímá morfologie signálu a případné abnormality, jako podkmity a překmity. Z těchto naměřených parametrů pak uvažujeme o vhodnosti použití sběrnice I²C na dlouhých vzdálenostech.

2 SÉRIOVÁ KOMUNIKACE

Sériová komunikace je proces přenosu dat postupně po jednotlivých bitech za sebou pomocí komunikačního kanálu nebo sběrnice. Používá se na dlouhých i krátkých vzdálenostech, kde je použití paralelního přenosu dat nevhodné z hlediska nákladů a parazitních vlastností (parazitní kapacity, přeslechy apod.).

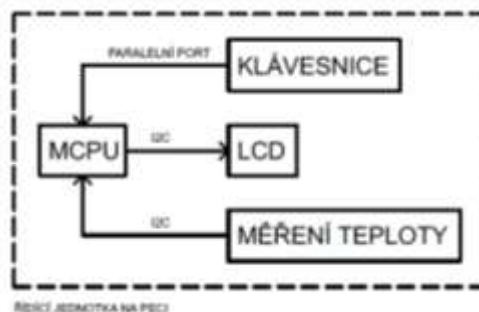
2.1 Rozdělení sériového komunikačního rozhraní

Ke komunikaci mezi jednotlivými integrovanými/mikročítačovými moduly, kde vzdálenost mezi moduly může být v řádu jednotek až stovek metrů. Z toho plyne, že fyzická konstrukce rozhraní je vytvořena tak, aby odolávala běžnému rušení. Typickými představiteli sériového rozhraní mohou být *RS232*, *RS485* nebo *proudová smyčka*. Mezi specializovaná rozhraní řadíme sběrnici *CAN*. Při rostoucích nárocích na přenosovou kapacitu a jednoduchost zapojení se používá i sběrnice *Ethernet*.



Obrázek 1. Blokové schéma komunikace na velkou vzdálenost

Ke komunikaci mezi integrovanými/mikročítačovými moduly v rámci jedné obvodové desky, případně mezi jednotlivými moduly v rámci jednoho zařízení. Typická vzdálenost mezi moduly nepřesahuje řád jednotek metrů. Známými představiteli těchto rozhraní mohou být sběrnice *I²C*, *Microwire*, *SPI*



Obrázek 2. Blokové schéma komunikace na malou vzdálenost

2.2 Důvody pro použití sériové sběrnice

- Snížení počtu datových vodičů (1,2,3 nebo 4)
- Snížení počtu vývodů příslušných integrovaných obvodů a tím i jejich velikosti
- Větší odolnost proti rušení
- Možnost propojení zařízení na větší vzdálenost

2.3 Multi-master komunikace

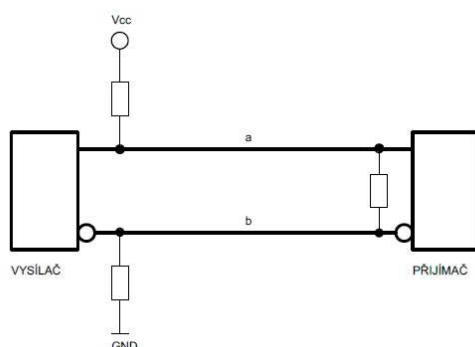
Z angličtiny „*master*“ znamená pán a „*slave*“ znamená sluha. Zařízení označované jako *master* je tedy řídicí zařízení na sběrnici. *Master* vysílá požadavky, kdy on sám potřebuje (respektuje podmínky, např. klid na sběrnici apod.), *slave* čeká, až bude adresně osloven a pak odpoví.

Komunikace typu *multi-master* znamená, že více jak jedno zařízení může převzít řízení sběrnice a zároveň k ní může být připojeno. Každé zařízení sběrnice může být *master* a řídit tak chování jiných zařízení. Není tedy nutné řídit celou sběrnici z jednoho nadřazeného místa, což přináší zjednodušení řízení a zvyšuje spolehlivost (při poruše jednoho zařízení může zbytek sběrnice pracovat dál). Jako *master* se běžně používají mikrokontroléry, které si mezi sebou mohou předávat data.

3 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ RS485

Jedno z nejrozšířenějších komunikačních rozhraní v průmyslu. Rozhraní *RS485* vzniklo úpravou rozhraní *RS422*. Z důvodu přítomnosti pouze jednoho komunikačního vedení vyžaduje sběrnice řízení směru toku dat. To klade větší nároky na obslužný software jednotlivých zařízení. Přestože sběrnice umožňuje propojení uzlů typu *multi-master*, častěji se používá propojení typu *master/slave*.

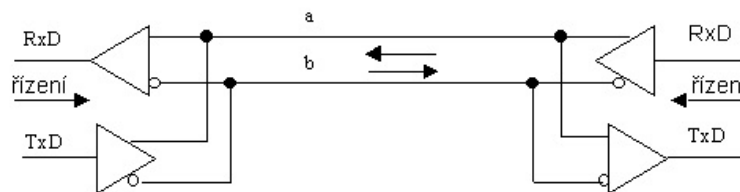
Linky *RS485* mohou být vedeny až na vzdálenost 1600m (vodiče s kapacitou do 65pF/m) a lze je větvit. Každý ze signálů linky je přenášen po dvojici vodičů, nejlépe v provedení kroucený pár. Vodiče označované a a b jsou vysílačem buzeny v protifázi a přijímač vyhodnocuje jejich napěťový rozdíl. Tímto principem se odstraní součtové rušení. Z toho vyplývá i základní doporučení pro provedení linky *RS485*. Není-li k dispozici zkroucený pár vodičů, je třeba použít alespoň tak vedené vodiče, aby se do obou indukovaly poruchy shodně. Mnohem důležitější než impedanční zakončení je definování klidového stavu linky. V době kdy není stav linky definován a linka je extrémně citlivá na indukovaná napětí (poruchy), které se jeví jako přicházející data, je třeba definovat klidový stav linky připojením *pull-up rezistorů* podle obr. 3.



Obrázek 3. Přenos jednoho signálu po lince RS485

RS485 používá jeden pár vodičů pro oba směry toku dat. Je tedy třeba přepínat směr komunikace a to může být problém zvláště v případech, kdy s touto možností software nepočítá. Přepínání směru komunikace jistě bude vyřešeno u zařízení, které interně obsahuje linku *RS485*. Pokud však používáme zařízení s vyvedenou linkou *RS232* (například osobní počítač) a následným převodníkem *RS232/RS485*, je třeba přepínání směru zajistit. Nejvhodnější způsob je použít pro přepnutí některý volný řídicí signál linky *RS232* (například DTR nebo RTS), jeho ovládání však musí umožnit použitý program. [1] Jestliže není signál pro přepnutí k dispozici, je jedinou možností použít převodník linky *RS232* na *RS485* s automatickým přepínáním. I to má však úskalí. Takový převodník je stále přepnut na příjem z linky *RS485* a při detekci dat vysílaných ze strany linky *RS232* se přepne na vysílání.

V režimu vysílání však převodník zůstane ještě po nějakou dobu (nemůže přesně identifikovat konec dat). Jestli během této doby začne na linku vysílat někdo jiný, dojde ke kolizi a data nejsou přijata.



Obrázek 4. Provedení nevětvené linky RS485 [6]

Výhody:

- Komunikační rychlost až 12 Mbps
- Komunikační vzdálenost až 1600 m
- Silná podpora ze strany výrobců průmyslových přístrojů a elektronických součástek
- Velká odolnost proti rušení.
- Počet připojených uzlů na jedné sběrnici
- Počet komunikačních vodičů (dvouvodičové)
- Možnost zapojení jako *multi-master*

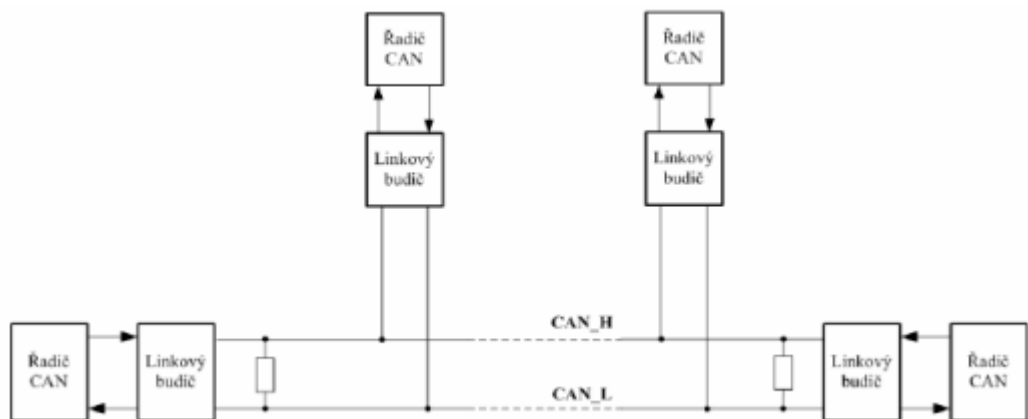
Nevýhody:

- Složitější ovládání sběrnice vyžadující obvodově řešit řízení směru toku dat.

4 KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ CAN

CAN (Controller Area Network) je sběrnice typu *multi-master*, která je určena k propojování mikropočítačů, inteligentních čidel a akčních členů nejen v průmyslu, ale i v automobilech. Jednotlivé stanice připojené na sběrnici vysílají svá data bez ohledu na to, je-li v systému nějaký „zájemce“ nebo nikoliv. Datové rámce proto neobsahují adresu příjemce, ale identifikaci, která určuje, jaká data rámeček obsahuje. Rámeček je přijat všemi přijímači na sběrnici. Každý z přijímačů nezávisle použije identifikaci rámce k rozhodnutí, má-li být právě přijatý rámeček přijat k dalšímu zpracování nebo má-li být vymazán. Každý z přijímačů tak akceptuje pouze datové rámce, které jsou pro něj významné.

Norma *CAN* přímo nedefinuje fyzickou vrstvu přenosového vedení a v praxi se používá několik standardů (např. linkové budiče). Linkové budiče bývají většinou řešeny jako speciální obvody, které oddělují *CAN* řadiče od sběrnice (PCA82C251).

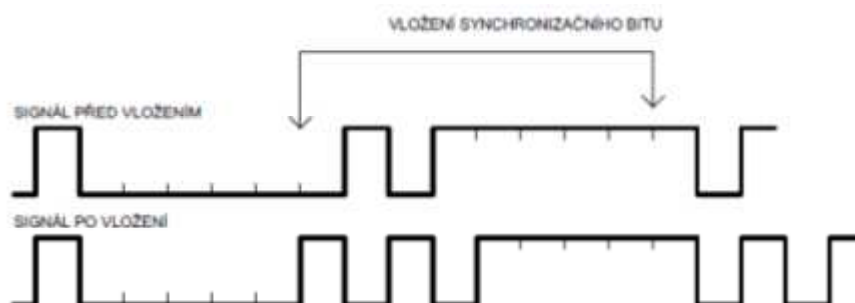


Obrázek 5. Blokové schéma sběrnice CAN

Sběrnice CAN je realizována jedinou datovou linkou, na které se rozlišují dvě logické hodnoty (obr. 5). Tzv. dominantní úroveň a recesivní úroveň. Je-li na sběrnici připojeno několik stanic a alespoň jedna z nich vysílá dominantní úroveň, zatímco ostatní vysílají recesivní úroveň, je na sběrnici dominantní úroveň. Vysílají-li všechny stanice recesivní úroveň, je na sběrnici recesivní úroveň.

Jednotlivé stanice na sběrnici CAN jsou propojeny pouze datovými vodiči. K přenosu se používá NRZ kód. Na rozdíl od sběrnice I^2C a SPI , není použit samostatný vodič pro hodinový signál. Každá stanice si generuje interní hodinový signál, který je synchronizován s vysílající stanicí pomocí datového signálu [5]. Protože modulace NRZ sama nezaručuje spolehlivou synchronizaci hodin přijímače, je použita technika vkládaných bitů.

Obsahují-li vysílaná data 5 po sobě následujících bitů stejné logické hodnoty, je za ně vložen jeden bit opačné hodnoty. Ten je na straně přijímače z přijatých dat automaticky odstraněn. Tímto způsobem je zaručeno, že v datovém signálu bude alespoň jedna synchronizační hrana po 5 bitových intervalech. Viz obr. 6.



Obrázek 6. Vložení synchronizačního bitu

Tabulka 1. Maximální rychlost sběrnice CAN v závislosti na délce vedení

délka vedení	odpor na 1 m délky	max. přenosová rychlost
<40m	<70mΩ/m	1Mbit/sec
<300m	<60mΩ/m	500kbitů/sec
<600m	<40mΩ/m	100kbitů/sec
<1000m	<25mΩ/m	50kbitů/sec

Výhody:

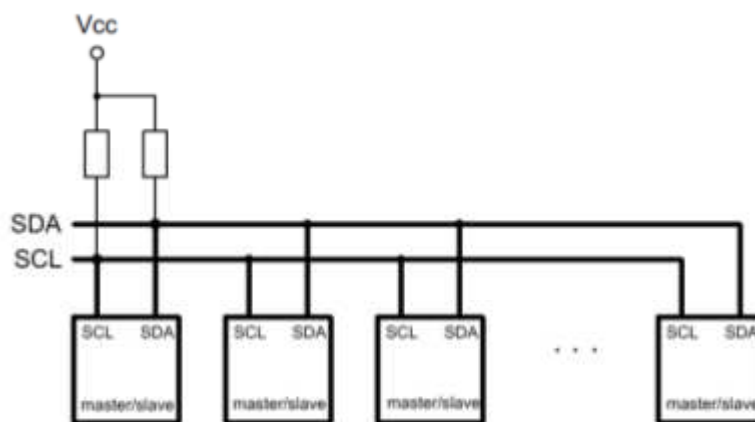
- Fyzické rozhraní podobného typu jako *RS485*
- Oproti *RS485* je výhodnější pro *multi-master* komunikaci
- Přenosová vzdálenost až 1000 metrů při rychlosti 50 kbps
- Možnost připojení 64 účastníků
- Obvodově není třeba řešit přepínání směru komunikace

Nevýhody:

- Málo podporovaných mikrokontrolérů. Tvorba řadiče na úrovni softwaru zatěžuje významně výkon procesoru (požadavek rychlého vzorkování, ošetření chyb atd.)

5 KOMUNIKAČNÍ ROZHRAŇÍ I²C

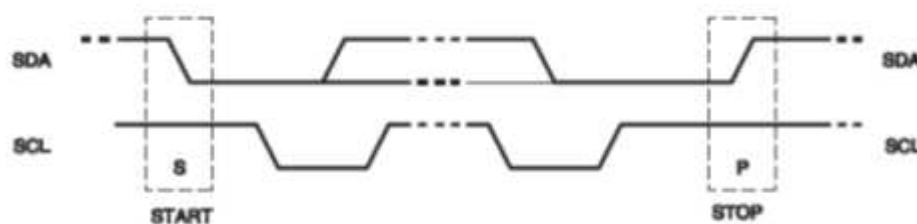
I²C je *multi-master* sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips. Řeší arbitraci pro přístup na sběrnici a má zabudovaný mechanismus adresování jednotlivých připojených stanic nebo integrovaných obvodů. Základní koncepce sběrnice I²C je na obr. 7.



Obrázek 7. Blokové schéma sběrnice I²C s pull-up rezistory

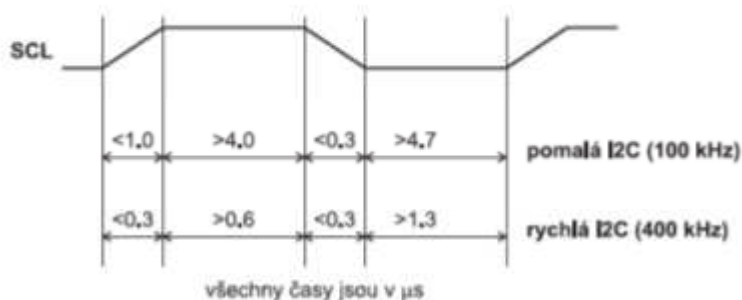
Každá stanice má určenou svou vlastní adresu o délce 7 nebo 10 bitů, která slouží k jejímu výběru i k arbitraci. Jednotlivé stanice rozhraní I²C jsou propojeny jedním datovým vodičem SDA a jedním hodinovým vodičem SCL. Jejich maximální délka je dána jejich nejvyšší přípustnou kapacitou 400 pF. Počet zařízení připojitelných na sběrnici je tedy omezen maximální kapacitou sběrnice a počtem využitelných adres. Každé zařízení připojené na tuto sběrnici je softwarově adresovatelné jednou unikátní adresou pro celý systém a v každém okamžiku existuje jednoduchý vztah *master-slave*.

V klidovém stavu (volná sběrnice) jsou oba vodiče v úrovni H (logickou úroveň H na vodičích SDA a SCL zajišťují *pull-up rezistory* připojené na napájecí napětí). Při probíhajícím přenosu jsou na SDA vysílány jednotlivé datové bity, přičemž platí pravidlo, že logická úroveň na SDA se smí měnit pouze v případě, je-li SCL v úrovni L. Toto pravidlo je porušeno ve dvou speciálních případech – vysílání podmínek START a STOP, které se používají k zahájení a ukončení přenosu. Obr. 8.



Obrázek 8. Zobrazení START a STOP podmínky na SDA a SCL vodiči [7]

Maximální přípustná frekvence signálu SCL je podle verze I²C 100 kHz nebo 400 kHz. Pro obě frekvence je dána povolená doba setrvání SCL v úrovni L i H. Obr. 9

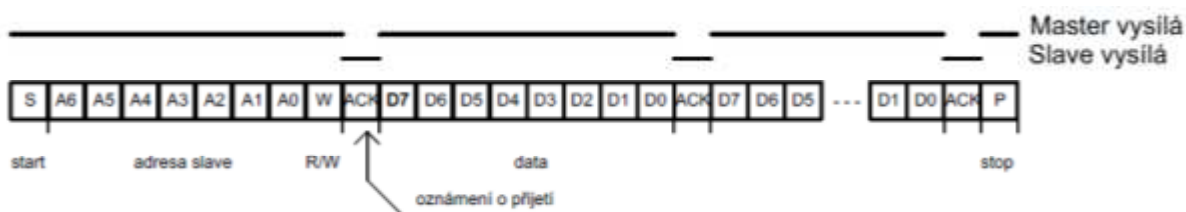


Obrázek 9. Časové parametry hodinového signálu SCL [7]

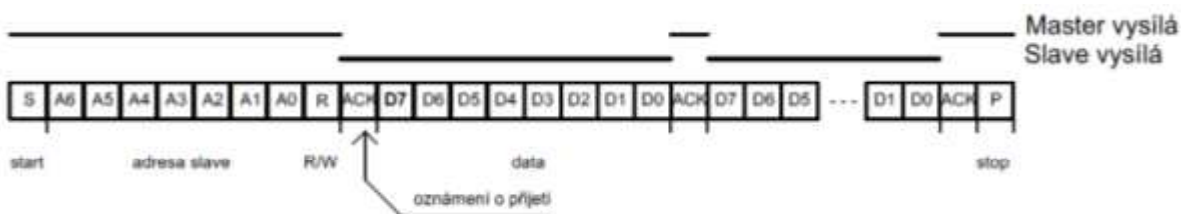
Při přenosu dat si jednotlivé stanice synchronizují generátory hodin tak, že trvání úrovně H na SCL je odměřováno vnitřním časovačem každé stanice až do okamžiku, kdy SCL skutečně úrovně H dosáhne (protože je SCL typu otevřený kolektor, může být v úrovni L držen i v situaci kdy se daná stanice snaží nastavit logickou úroveň H). Tento mechanismus umožňuje některé ze stanic zpomalit přenos. Pomalá stanice může podržet

po určitou dobu signál SCL v úrovni L a tím zabránit vysílající stanici ve vyslání dalšího bitu.

Formát rámce se sedmibitovou adresou při přenosu je na obr. 10 a obr. 11. Každému přenosu předchází vyslání podmínky START. Potom je vysílána 7bitová adresa příjemce a jeden bit R/W, který indikuje požadovanou operaci (čtení/zápis). Další bit ACK je vyslán s úrovní H a je určen k potvrzení přijímací stanicí. Dále jsou přenášena data ve směru určeném předchozím bitem R/W. Každý byte je následován jedním bitem ACK. Po ukončení přenosu je vyslána podmínka STOP.



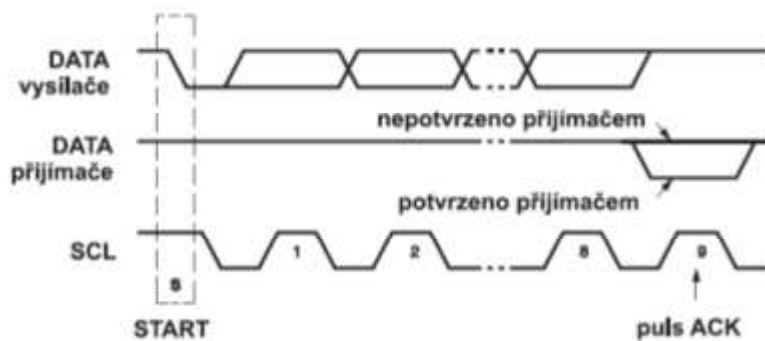
Obrázek 10. Zápis do zařízení



Obrázek 11. Čtení ze zařízení

V praxi je většinou několik adresních bitů jednotlivých obvodů určeno už při výrobě. Zbývající bity se volí pomocí příslušných vývodů daného obvodu, které se podle potřeby připojí na úroveň L nebo H. Několik adres je na I²C vyhrazeno pro speciální účely. Např. adresa 0000000 je určena pro vysílání „broadcast“, adresy 0000011, 00001XX a 11111XX jsou rezervovány pro další účely. Adresa 11110AA indikuje 10bitové adresování: AA zde označuje dva nejvyšší bity adresy stanice, zbývajících 8 bitů je vysíláno v následujícím bytu. Popisované adresování se týká adresy jednotlivých stanic na I²C. Je-li stanicí např. paměťový obvod, jedná se o adresu celého obvodu. Adresa jednotlivých buněk v paměti a požadovaná operace se do paměti přenáší v datové části rámce I²C.

Každý vysílaný byte (včetně adresy) je následován vysláním jednoho bitu ACK. Vysílající stanice jej nastaví do úrovně H. Přijímající stanice signalizuje přijetí tím, že v době vysílání ACK připojí SDA na úroveň L (viz obr. 12). Pokud vysílající stanice nedostane potvrzení příjmu, ukončí vysílání podmínkou STOP.



Obrázek 12. Ukázka potvrzení/nepotvrzení přijetí rámce bitem ACK [7]

5.1 Programová realizace sběrnice I²C

Rozhraní I²C uvedla firma Philips pro účely propojování různých obvodů ve výrobcích spotřební elektroniky. Jak je zřejmé, vyrábí tato firma celou řadu obvodů s tímto rozhraním. Obvody se většinou připojují k mikrokontrolérům, které jsou vybavené příslušným řadičem. Čistě programová realizace I²C přichází v úvahu pouze ve zjednodušené situaci, kdy je zapotřebí k určitému mikrokontroléru připojit jeden nebo více obvodů s tímto rozhraním. Programové řešení všech vlastností I²C včetně kontroly bitů ACK, synchronizace SCL atd. by vyžadovalo rychlé vzorkování signálů SCL a SDA. K tomu by byl zapotřebí dostatečně výkonný mikrokontrolér, který by byl realizací I²C značně zatížen.

Výhody:

- Většina mikrokontrolérů AVR podporuje I²C komunikační protokol
- Relativně vysoká komunikační rychlost 100kHz (400kHz)
- Možnost *multi-master* komunikace
- Možnost rozšíření komunikační vzdálenosti pomocí specializovaných obvodů

Nevýhody:

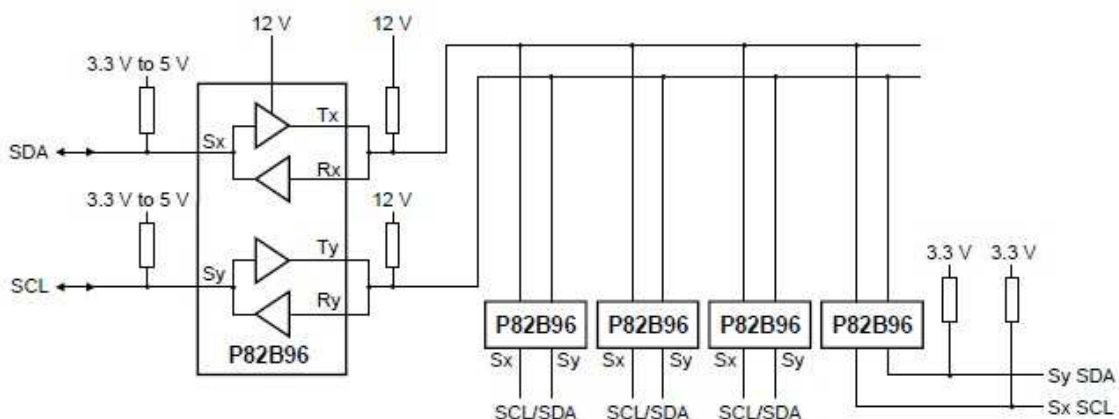
- sběrnice I²C neumožňuje ve své fyzické podstatě odolávat běžnému rušení na lince.
- Krátká komunikační vzdálenost (omezena kapacitou vedení 400pF)
- Nutnost společného potenciálu 0V pro všechny obvody na sběrnici.

6 OBVODY PRO ROZŠÍŘENÍ I²C SBĚRNICE

Sběrnice I²C má stanovenou maximální kapacitu mezi vodiči 400pF. Je to limitující faktor pro maximální počet naráz připojitelných slave zařízení nebo délky vodičů. Tato hodnota je podle specifikace buď kolem 20-30 kusů blízkých slave zařízení, nebo několik málo metrů kabelu. Pro větší vzdálenosti je možné použít zařízení, které se doporučují v popisu I²C firmy Philips, které jsou P82B715 I²C-sběrnice rozšiřovač [4], nebo P82B96 Dual bidirectional bus buffer [3]. Zařízení P82B715 zvětší maximální hodnotu připojitelné kapacity pro I²C linku na 3000pF, čímž umožní použití délky vodičů až kolem 50m i více. Tento čip se dá použít i pro sběrnice s více slave jednotkami a to až do dosažení celkové kapacity linky 3000pF, přičemž kapacita na výstupech musí zůstat pod hranicí 400pF. Obousměrný sběrnice buffer P82B96 má obdobné vlastnosti, jako P82B715, ale zvětší hodnotu maximální kapacity sběrnice až na 4000pF na přenosové lince.

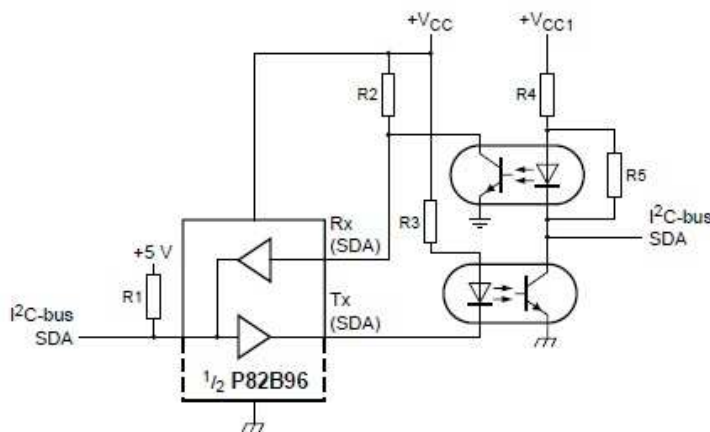
6.1 Obvod P82B96

Je to bipolární integrovaný obvod, který podporuje obousměrnou komunikaci na sběrnici I²C. Umožňuje komunikovat dokonce i s konfiguracemi, které pracují na různých úrovních napětí a proudů (logické úrovně od 2V - 15V). Dovoluje maximální kapacitu prvků připojených na primární vysílací straně (Sx, Sy) standardních 400pF a až 4000pF na sekundární přenosové lince (Tx, Ty). Vlastní hodnota kapacity na jeho vstupu je maximálně 7pF. Výstupy na sekundární straně mají dobré schopnosti pro řízení sběrnice s malou impedancí, i s velkou kapacitou. Může se používat i Fast I²C mód, a to maximálně do 20 metrů.



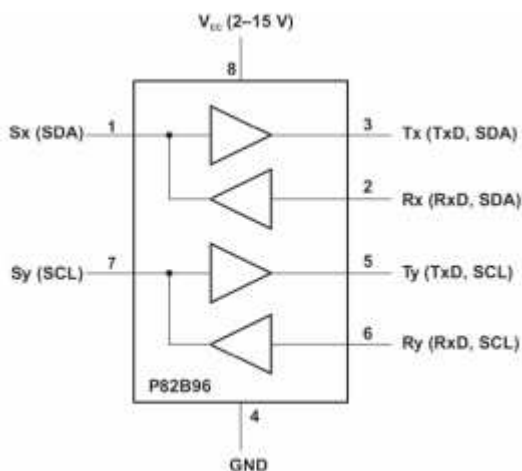
Obrázek 13. Zapojení sběrnice s obvodem P82B96 [3]

Jedna z předností *P82B96* je, že kapacitně odizoluje sběrnice, které jsou zapojeny na jeho vstup a výstup. Jednotka *P82B96* umí signály SDA a SCL přenášet pomocí krouceného páru drátů, nebo taky předat do galvanicky oddělené sítě (optická vazba). Vstupy a výstupy dvou různých zařízení *P82B96* Rx a Tx mohou být přímo propojeny. V takovém případě se vyhneme zablokování linky, a vytvoříme vlastně alternativní I^2C linku, kde je ovšem rozdělena komunikace pro jeden a druhý směr. Toto platí rovněž pro piny Ty a Ry. Je to nevyhnutelné v případě, že se požaduje galvanické oddělení pomocí optonů (obr. 14).



Obrázek 14. Galvanické oddělení sběrnice pomocí optočtenů [3]

Na pin S_x se připojuje SDA a na pin S_y SCL. Není to však jediný způsob zapojení. Oba piny mají totiž stejnou funkci a totéž platí i pro Tx/Rx a Ty/Ry. Takže když se např. na pin S_y připojí signál SDA, tak jeho výstup/vstup bude Ty/Ry. Pro signál SCL zůstane pin S_x a výstup/vstup pak bude Tx/Rx. Totéž platí i obráceně. Obvod provádí proudové zesilování signálů ze strany I^2C na jeho nízkoimpedanční bufferovanou sběrnici. Jakmile proud teče z pinu S_x do bufferu, zesílí se 10x.



Obrázek 15. Popis pinů obvodu *P82B96* [3]

Tabulka 2. Popis pinů obvodu P82B96

Pin	Název	Funkce
1	Sx	I2C, SDA/SCL
2	Rx	příjem signálu
3	Tx	vysílání signálu
4	GND	zem
5	Ty	vysílání signálu
6	Ry	příjem signálu
7	Sy	I2C, SDA/SCL
8	Vcc	napájecí napětí

Tabulka 3. Katalogové parametry obvodu P82B96

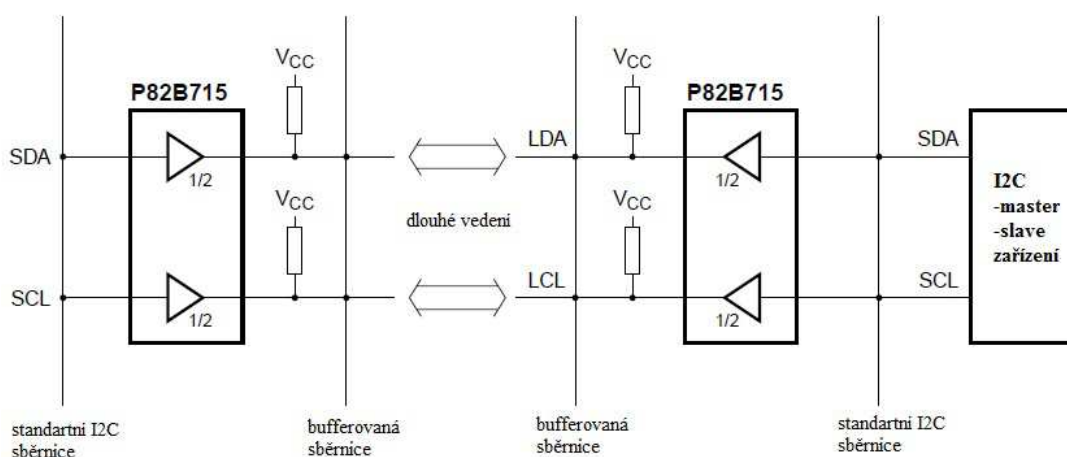
Název	Funkce	Min	Max	Jednotka
V _{cc}	napájecí napětí	-0,3	+18	V
V _{Sx}	napětí na Sx	-0,3	+18	V
V _{Tx}	napětí na Tx	-0,3	+18	V
V _{Rx}	napětí na Rx	-0,3	+18	V
I _n	proud pinem	-	250	mA
P _{max}	maximální ztrátový výkon		300	mW
T _j	pracovní teplota	-40	+125	°C

Shrnutí:

- Kapacitní oddělení sběrnice
- Rozšíření povolené kapacity až na 4000pF
- Možnost funkce na různých logických úrovních
- Do vzdálenosti 20m dovoluje použití *fast I²C* módu
- Cena přibližně 60Kč
- V rámci ČR malá dostupnost

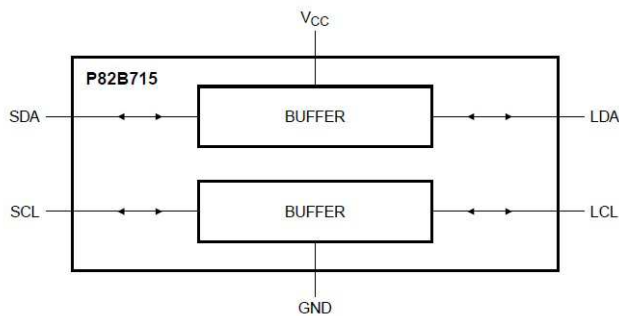
6.2 Obvod P82B715

P82B715 je bipolární integrovaný obvod, který podporuje všechny provozní režimy a rysy I^2C sběrnice a dovoluje rozšíření praktické vzdálenosti mezi zařízeními připojenými na sběrnici. Do své vyrovnávací paměti ukládá jak datový signál SDA, tak hodinový signál CLK. Sběrnice I^2C je kapacitně omezena 400pF a dovoluje tak komunikaci jen na malé vzdálenosti maximálně v řádu jednotek metrů. Použitím jednoho obvodu P82B715 na každém konci dlouhého kabelu, který se připojuje na svorky Lx, Ly se zvyšuje proudové zesílení signálů ze strany I^2C na nízkoimpedanční bufferovanou sběrnici [2]. Proudové zesílení je desetinásobné, z povolených 3mA se tedy můžeme dostat až na hodnotu 30mA. Celková kapacita vedení (všechny připojené zařízení, kabely a konektory) může dosáhnout až 3000pF na bufferované sběrnici. Vstupní vedení, ale musí stále splňovat kapacitní podmínku a být menší než 400pF. P82B715 plně podporuje *multi-master* komunikaci a nepotřebuje žádný externí obvod pro řízení směru toku dat.

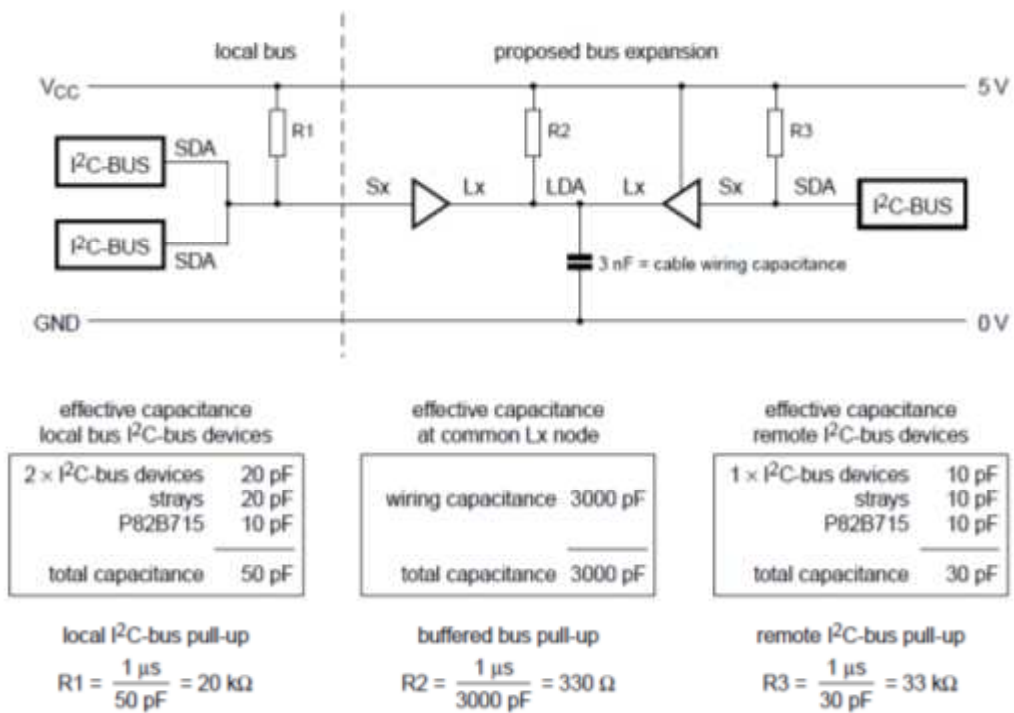


Obrázek 16. Zapojení sběrnice s obvodem P82B715 [4]

Obvod pracuje s napětím od 3V do 12,5V. Připojené *pull-up rezistory* zajišťují na sběrnici vysokou logickou úroveň H v době, kdy neprobíhá žádná komunikace. Hodnota rezistoru se vypočítá na základě empirické časové konstanty 1 μ s pro frekvenci hodinového signálu 100kHz. Každá část sběrnice musí mít svůj vlastní rezistor připojený na napájecí napětí. Konkrétní hodnotu rezistoru získáme tak, že empirickou časovou konstantu podělíme součtem kapacity vedení a kapacity připojených zařízení. Příklad výpočtu jednotlivých rezistorů je na obr. 18.



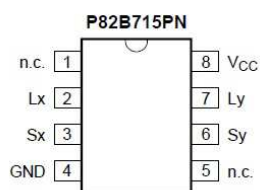
Obrázek 17. Blokové schéma obvodu P82B715 [4]



Obrázek 18. Příklad výpočtu pull-up rezistorů [4]

Tabulka 4. Popis pinů obvodu P82B715

Pin	Název	Funkce
1	n.c.	nepřipojeno
2	Lx	Bufferovaná sběrnice LDA nebo LCL
3	Sx	I ² C, SDA/SCL
4	GND	zem
5	n.c.	nepřipojeno
6	Sy	I ² C, SDA/SCL
7	Ly	Bufferovaná sběrnice LDA nebo LCL
8	Vcc	napájecí napětí



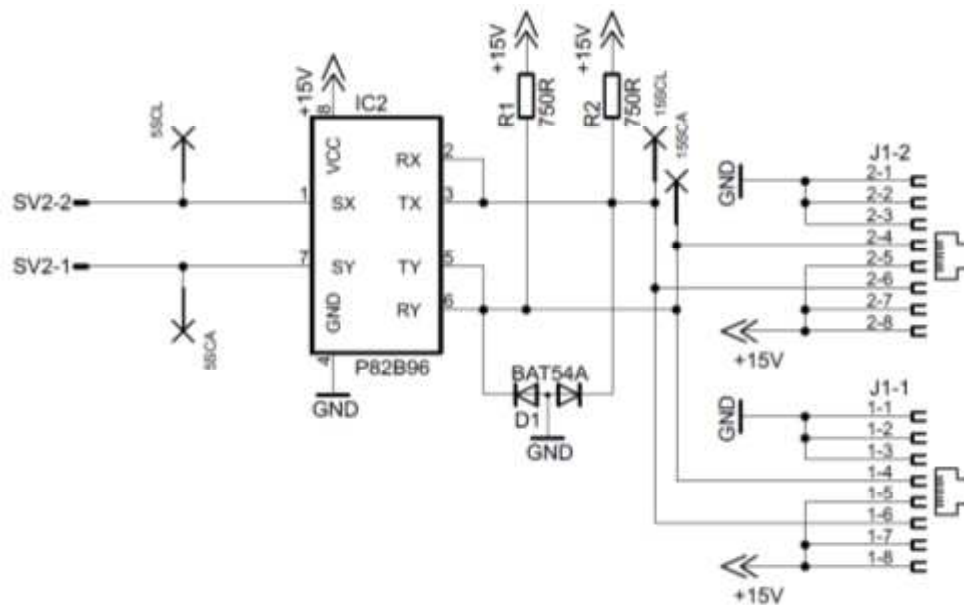
Obrázek 19. Popis pinů obvodu P82B715 v rámci pouzdra DIP8

Tabulka 5. Katalogové parametry obvodu P82B715

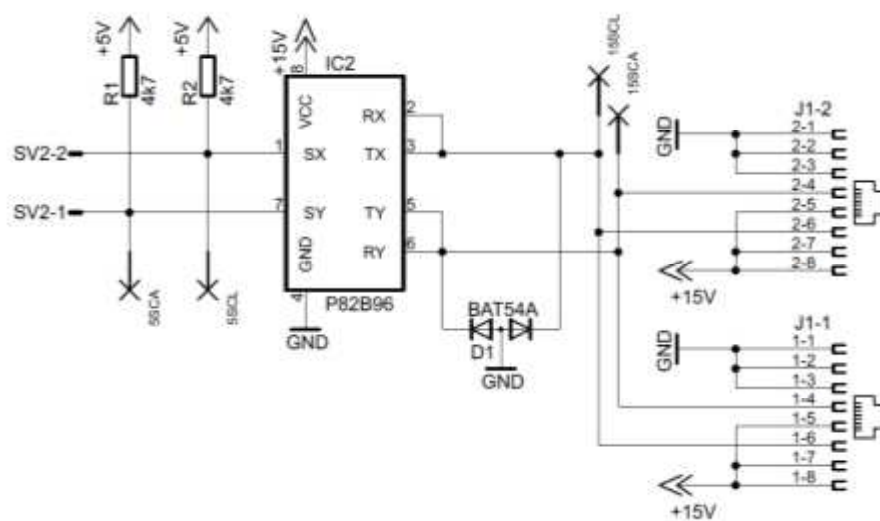
Název	Funkce	Min	Max	Jednotka
V_{cc}	napájecí napětí	-0,3	+12,5	V
V_{bus}	napětí na SDA nebo SCL	0	V_{cc}	V
V_{buff}	napětí na bufferované sběrnici	0	V_{cc}	V
I_n	proud pinem	-	60	mA
P_{max}	maximální ztrátový výkon		300	mW
T_{amb}	okolní teplota	-40	+85	°C

Shrnutí:

- Rošíření povolené kapacity až na 3000pF
- Plná kompatibilita se sběrnici *SMbus*, *PMbus*, *DDC*, které jsou odvozené od I^2C
- Impedanční přizpůsobení bufferované sběrnice pro lepší odolnost vůči rušení
- Cena přibližně 100Kč
- V rámci ČR malá dostupnost



Obrázek 21. Schéma zapojení extenderu s pull-up odpory na straně rozšířené sběrnice



Obrázek 22. Schéma zapojení extenderu s pull-up odpory na straně původních logických úrovní

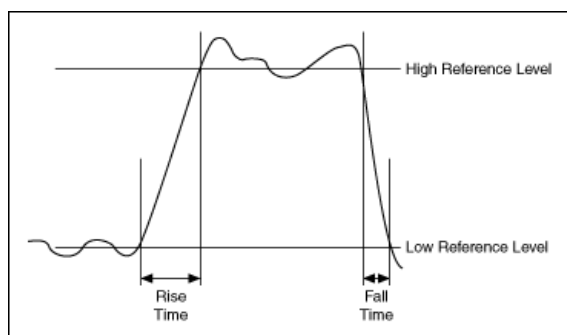
8 METODIKA A PODPŮRNÉ PROSTŘEDKY MĚŘENÍ

Cílem je určit parametry měřeného signálu a popsat tak jeho vlastnosti za určitých podmínek. Každé měření musí být provedeno vhodným hardwarovým vybavením a musí být zpracováno vhodnými softwarovými prostředky. Tato kapitola se tedy zabývá rozbořem měřených parametrů a výběrem vhodných měřících zařízení.

8.1 Metodika měření

Na sběrnici I²C se vyskytují logické úrovně, jde tedy o digitální přenos dat. Tento digitální signál bude však nutné podrobit detailní analýze, proto bylo od začátku uvažováno měření analogovou měřící kartou. Díky tomu bude možné určit strmost signálu, hodnotu logické úrovně, šum a případné abnormality signálu jako překmit a podkmit.

8.1.1 Strmost hran



Obrázek 23. Logická hran a [8]

Měření strmosti hran logické úrovně provádí algoritmus bloku Transition Measurements.

Samotná strmost se vypočítá jako rozdíl horní napěťové úrovně (High Reference Level) a dolní napěťové úrovně (low Reference level) podělený časovým intervalem. V případě náběžné hrany (Rise Time) a v případě sestupné hrany

(Fall Time) jak je naznačeno v Obrázku 23. Strmost hrany je zásadním parametrem, který určuje, zda je možná komunikace na sběrnici. S rostoucí frekvencí hodinového SCL a datového SDA signálu na sběrnici strmost hran klesá. To se projevuje na tvaru signálu, který se s klesající hodnotou strmosti mění obdélníkového průběhu na pilovitý průběh. V ideálním případě uvažujeme nekonečnou strmost hrany, tedy přesné pravouhlé impulzy, tento stav však není možné fyzicky realizovat. Zda bude komunikace možná, záleží také na použitých obvodech, které mají na svém vstupu detektor hran. Důležité je tedy provedení a dokonalost tohoto detektoru, tj. s jak moc deformovaným signálem dokáže pracovat.

8.1.2 Šum logické úrovně

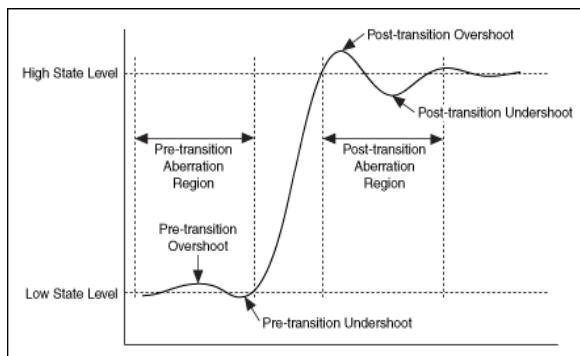
Pro vyjádření šumu je použit algoritmus, který vypočítá průměrnou hodnotu napětí ze všech naměřených vzorků vysoké logické úrovně, v tabulkách označované jako LOG.1. K této hodnotě následně blok Deviation and Variance vypočítá směrodatnou odchylku a rozptyl hodnot podle rovnic 8.1 – 8.3. Obdobně jsou počítané statistické parametry strmostí.

$$\overline{U_{SCL}} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{U_{SCLi}}{n} [V] \quad (8.1)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(U_{SCLi} - \overline{U_{SCL}})^2}{n-1} [V] \quad (8.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} [V] \quad (8.3)$$

8.1.3 Překmit a podkmit hrany



Obrázek 24. Princip měření překmitu a podkmitu náběžné hrany [8]

Měření podkmitu a překmitu hrany opět provádí program a konkrétně blok Transition Measurement. Obrázek 24 vysvětluje, jaké parametry algoritmus potřebuje pro vypočítání podkmitu a překmitu hrany. Konečná hodnota se pak vypočítá podle rovnic 8.4 a 8.5 a je v procentech.

$$\text{podkmit} = 100 \cdot \frac{(\text{low state level} - \text{local minimum})}{\text{amplitude}} [\%] \quad (8.4)$$

$$\text{překmit} = 100 \cdot \frac{(\text{local maximum} - \text{low state level})}{\text{amplitude}} [\%] \quad (8.5)$$

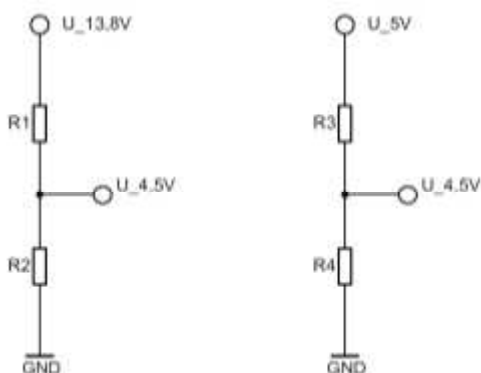
8.1.4 Požadavky na měřící hardware

Z důvodu impulsního charakteru signálu a předběžně změřených strmostí bylo zjištěno, že požadavky na měřící hardware budou relativně náročné. O tom svědčila již uvažovaná nejnižší přenosová rychlost cca. 10 kHz. Pro takovou úlohu je důležité použít měřící hardware, který umožňuje vzorkování rychlostmi začínajícími na 1 MS/s. Vhodné rozlišení pro kvantování v napěťových úrovních začíná na 12 bitech, z důvodů náročného (a důležitějšího požadavku na rychlost vzorkování) lze akceptovat i rozlišení 8 bitů. Díky dostupnosti širokého spektra měřícího hardware firmy National Instruments na pracovišti UAMT FEKT VUT v Brně bylo voleno především z portfolia tohoto výrobce. Vyzkoušeny byly měřící karty řady 9201 (NI DAQ C moduly) s nedostatečnou vzorkovací rychlostí, u těch se však projevily přeslechy a zkreslení způsobené přítomností ochranných obvodů. Dalším požadavkem bylo proto použití karty bez ochranných obvodů. Všem výše uvedeným požadavkům nejlépe vyhověla karta NI PXI 5922, což je rychlý digitizér s variabilním rozlišením. Na používané vzorkovací rychlosti 10 MS/s dosahuje rozlišení 18 bitů.

Jelikož má karta omezený měřící rozsah napětí, musíme použít dělič napětí a amplitudu vhodně upravit. Jak stranu vstupní, tedy 5 V, tak stranu rozšířené sběrnice 13,8V.

Pro všechna dále uvedená měřená zapojení (kapitola 10) platí, že pro napájení jednotlivých bloků je použit regulovatelný laboratorní zdroj, který je nastaven na napětí 13,8 V. Maximální napětí, které můžeme připojit k extenderu je 15 V. Napětí 13,8 V je voleno záměrně, protože je to zároveň nabíjecí napětí pro standartní olověný akumulátor. Z toho vyplývá použití komunikace na dlouhých vzdálenostech v místech, kde nejsme trvale připojeni k síťovému napětí 230V.

8.1.5 Dělič



Obrázek 25. Schéma zapojení napěťového děliče

Vzhledem k tomu, že měřící karta má povolený rozsah napětí 5 V je potřeba měřený signál napěťově upravit. Jak 5 V část vstupní část, tak strana rozšířené sběrnice 13,8 V. Na výstupu z procesoru je 5 V logika, ovšem tato hodnota není konstantní a na signálu se objevovaly přemity a napětí dosahovalo až 5,4 V, v tomto případě karta měřila jen šum na vstupu. Z tohoto důvodu je nutné upravit i vstupní napěťový signál. Oba vstupní signály upravujeme přibližně na hodnotu 4,5 V, musíme však brát v potaz toleranci použitých rezistorů. V našem případě není nutno

tuto hodnotu přesně dodržet, protože představuje vysokou logickou úroveň, tedy logickou jedničku. Původní měřenou hodnotu napětí získáme vynásobením naměřené hodnoty za děličem s převráceným dělicím poměrem.

Výpočet odporů pro dělič z obrázku 25:

Volím $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

$$U_{4,5V} = U_{13,8V} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow R_2 = R_1 \cdot \frac{-U_{4,5V}}{U_{4,5V} - U_{13,8V}} = 4839 \Omega \quad (8.6)$$

$$U_{4,5V} = U_{5V} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \rightarrow R_4 = R_3 \cdot \frac{-U_{4,5V}}{U_{4,5V} - U_{5V}} = 90 \text{ k}\Omega \quad (8.7)$$

S ohledem na odporovou řadu E96 a dostupné odpory volím $R_2 = 4,2 \text{ k}\Omega$ a $R_4 = 91 \text{ k}\Omega$.

$$U_{4,5V} = U_{13,8V} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 13,8 \cdot \frac{4,2 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 4,2 \cdot 10^3} = 4,08 \text{ V} \quad (8.8)$$

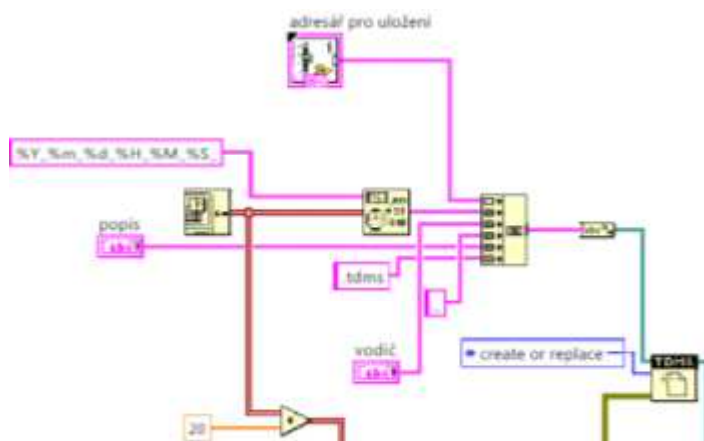
$$U_{4,5V} = U_{5V} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 5 \cdot \frac{91 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 91 \cdot 10^3} = 4,50 \text{ V} \quad (8.9)$$

9 POPIS PROGRAMŮ

Vzhledem k tomu, že měříme signál při velké vzorkovací rychlosti 10 MS/s je potřeba vhodným způsobem ukládat data a zpracování signálu provádět až dodatečně (post-processing). První program, který sbírá data prostřednictvím měřicí karty, by tato data měl ukládat pouze tehdy, pokud na sběrnici probíhá komunikace. Jinak by výsledný měřicí soubor zabíral daleko více místa na disku a zvětšovaly by se doby výpočtů ve vyhodnocovacím programu.

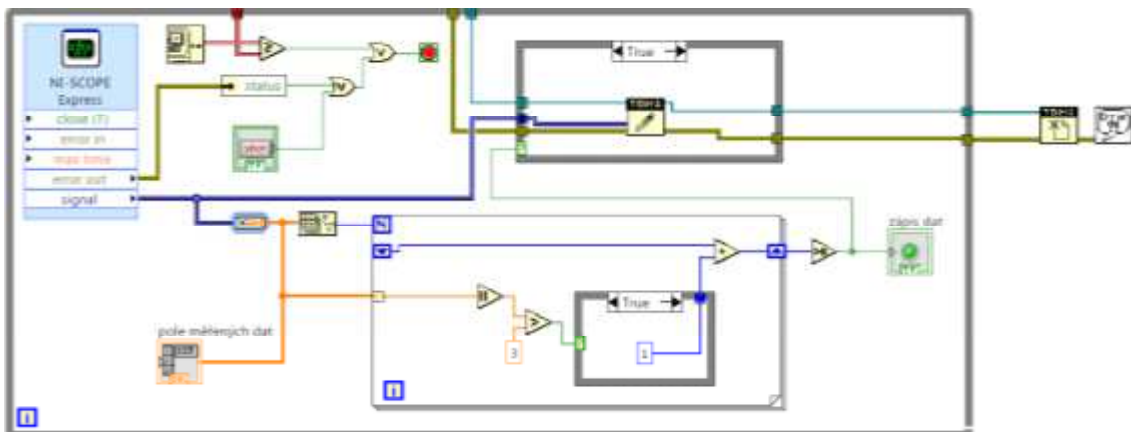
9.1 Program pro sběr dat

Obrázek 26 ukazuje vytvoření TDMS souboru pomocí bloku Create TDMS a jako jediný vstupní parametr je požadovaná cílová lokace na disku k uložení. V našem případě je zde ještě blok, který zjistí uje aktuální datum a čas, který je následně převeden na datový typ řetězec a s dalšími řetězci sloučen do datového typu path.



Obrázek 26. Blok vytvoření binárního souboru

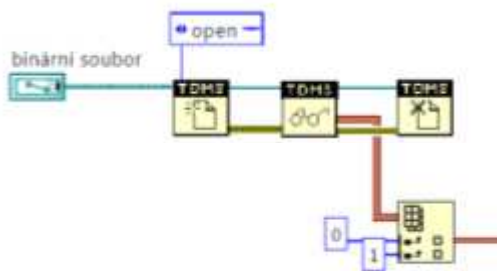
Při spuštění programu tedy vznikne TDMS soubor, který bude mít unikátní jméno složené z data, času a textového popisu a bude uložen do předem definovaného adresáře. Aktuální čas při startu měření využíváme ještě pro omezení doby měření, tedy jak dlouho samotný program poběží. V našem případě 20 s, tato hodnota se nastavuje změnou konstanty u sumačního bloku. Výstupní soubor TDMS jednokanálového měření při komunikaci na sběrnici má přibližně 250 MB při vzorkovací rychlosti 10 MS/s. Celkové chování programu pro sběr dat popisuje jednoduchý vývojový diagram v Příloze 5.



Obrázek 27. Algoritmus ukládání dat

Kód na obrázku 27 zobrazuje samotný algoritmus měření. Základem je blok NI-SCOPE Express, tedy jednoduché rozhraní mezi fyzickou měřicí kartou PXI 5922 a samotným programem. V tomto bloku se nastavují amplitudové rozsahy, offset, způsob měření a hlavně vzorkovací rychlost. Pokud by nastal v tomto bloku nějaký problém, automaticky se spuštěný program ukončí. Výstupem je signál typu waveform při jednokanálovém měření a vícerozměrný waveform při dvoukanálovém měření. Tento datový typ převedeme na pole, které ve Front Panelu zobrazujeme a současně z tohoto pole změřených hodnot vyhodnocujeme, zda se pole těchto hodnot má uložit. Citlivost vyhodnocení se nastavuje konstantou v cyklu for. V našem případě jestli je naměřená hodnota větší než tři volty tak ji prohlásíme za logickou jedničku a do posuvného registru inkrementujeme jedničku. Pokud je na konci cyklu for inkrementovaná hodnota nenulová, uložíme data. Tato jednoduchá konstrukce má tu nevýhodu, že neumožňuje kontinuální měření od spuštění do ukončení programu ale „vybírá“ bloky. Blok dat vyčítaný z karty totiž musí mít konečnou délku, aby jej bylo možné následně přenést po sběrnici PCI-Express do PC. Šířka bloku je nastavena na hodnotu 100k vzorků. Jiná konfigurace není možná, protože v případě požadavku aplikace na kontinuální přístup k datům docházelo ke kolizím – aplikace požadovala data, která se již v paměti karty nenacházela. Tato situace byla způsobena tím, že propustnost sběrnice PCI-Express v kombinaci s hardwarem počítače nebyla dostatečná.

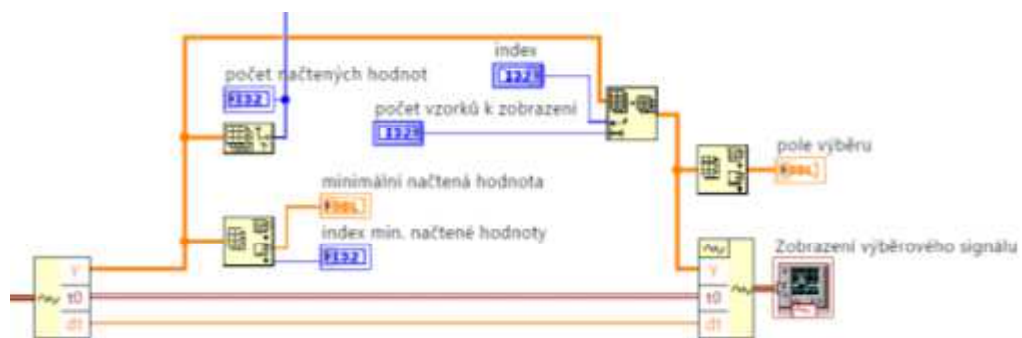
9.2 Program pro vyhodnocení dat



Obrázek 28. Blok načtení TDMS

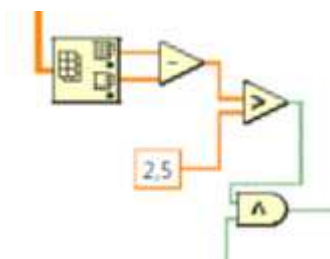
ukončení běhu programu se blok TDMS Close postará o řádné uzavření binárního souboru.

Obrázek 28 slouží k načtení TDMS (binárního souboru). Jako vstup tedy musíme zadat zdrojovou cestu binárního souboru a jako další parametr volíme, zda chceme binární soubor vytvořit, otevřít nebo změnit. Výstupem je datový typ waveform. Tento signál obsahuje naměřené hodnoty a časovou značku. Při vícekanálovém měření je to vícerozměrný waveform. Proto následuje blok, kterým přidělíme každému kanálu vlastní index.



Obrázek 29. Blok výběrového signálu

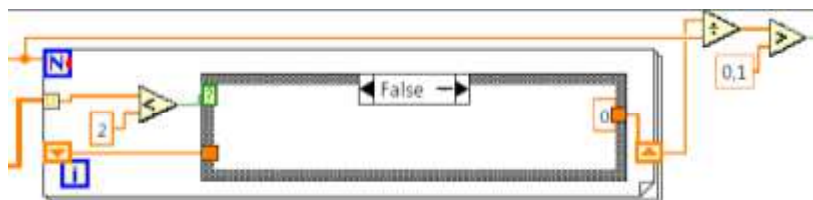
Na začátku tohoto bloku, jak ukazuje Obrázek 29 rozdělíme signál typu waveform, na jednotlivé složky. Tedy na pole naměřených hodnot Y , počáteční čas t_0 a diferenci, o kterou se v čase posouváme. Z pole načtených hodnot získáváme informativní údaje o naměřeném signálu. A to počet načtených hodnot, minimální načtenou hodnotu a její index. Dále pomocí bloku Array Subset můžeme vybrat oblast signálu, která nás blíže zajímá. Zvolíme index a počet vzorků, které chceme zobrazit. Tato vybraná data se nám ve Front Panelu zobrazí v indikátoru typu pole a v grafu zobrazení výběrového signálu.



Obrázek 30. 1. Podmínka pro uložení načtených dat

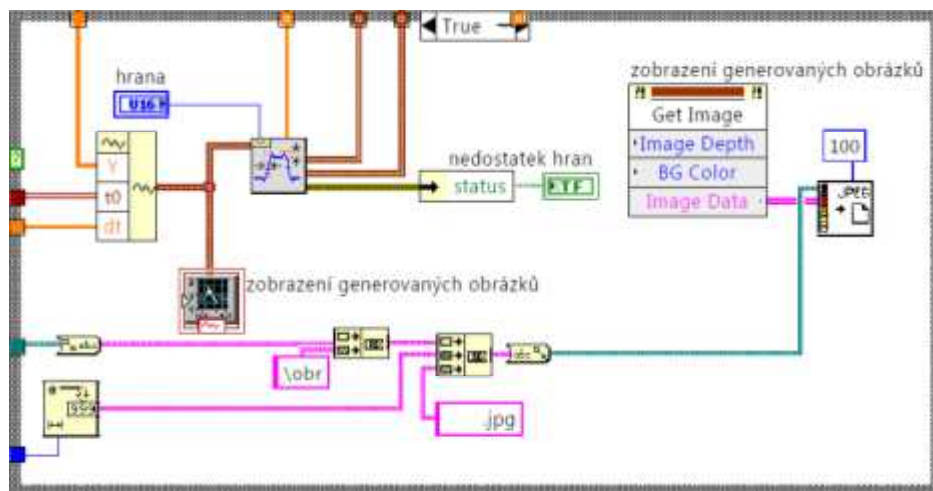
Obrázek 30 zobrazuje jednu ze dvou podmínek potřebných ke spuštění měření statistických údajů ze vstupního binárního souboru, tedy naměřených dat. Měření probíhá po definovaných intervalech a to v závislosti na frekvenci měřeného signálu. Šířka intervalu byla empiricky

určena, tak aby automaticky generované obrázky byly tvarově přibližně stejné. Z načteného intervalu si pomocí bloku Array Max & Min určím maximální a minimální hodnotu, která je zde obsažena. Pokud je rozdíl maximální a minimální hodnoty větší než zvolená mez, lze říct, že se v tomto intervalu nachází změna logické úrovně.



Obrázek 31. 2. podmínka pro uložení načtených dat

Druhá podmínka zobrazená na Obrázku 31 opět pracuje s daty z načteného intervalu. Cyklus for počítá počet logických nul, v našem případě hodnotu vzorků menších než dva volty. Následně je tato hodnota podělena počtem vzorků z celého intervalu. Dostáváme tedy procentuální zastoupení logických nul v načteném intervalu, a pokud je tato hodnota větší než zvolená mez (10%) pak je výstupní logická hodnota nastavena na true. Pokud mají obě podmínky pravdivou hodnotu true, pak se z načteného intervalu měří parametry signálu.

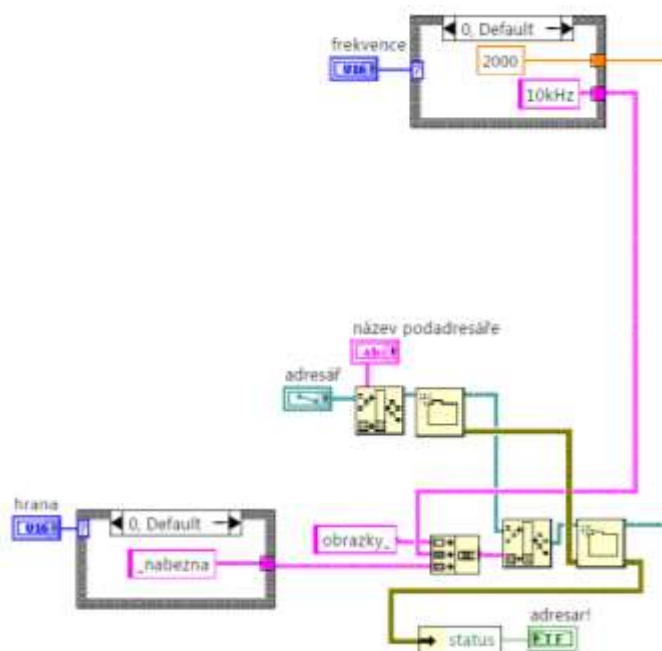


Obrázek 32. Blok měření parametrů signálu

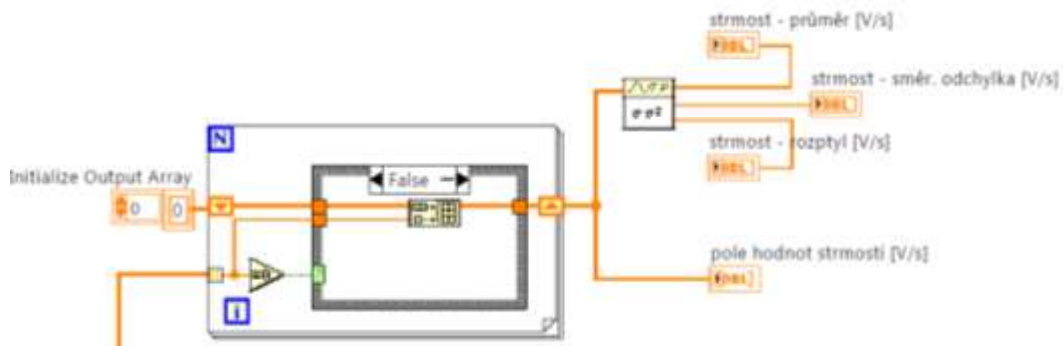
Jak ukazuje Obrázek 32 tento blok obsahuje samotné měření strmosti signálu načteného prostřednictvím binárního TDMS souboru. Vstupem je pole naměřených vzorků, které má svou definovanou šířku v závislosti na frekvenci. Dále přivádíme časovou značku a časovou diferenci, abychom mohli pomocí bloku Build waveform vytvořit opět datový typ waveform, který potřebujeme k měření. Tímto způsobem se sice vyřazuje část průběhu a časová značka pak neodpovídá skutečnému časovému průběhu signálů, díky délce vyčítaného bloku a typu informací, které se jeho následném

zpracováním získávají to však na výsledky nemá vliv. Samotné měření strmosti, překmitů a podkmitů hrany signálu provádí blok Transition Measurements. Vstupním signálem tohoto bloku je náš vytvořený waveform, ze kterého se také automaticky generují obrázky měřených hran zobrazované v grafu zobrazení generovaných obrázků ve Front Panelu a ukládané do předdefinovaného adresáře na disku. Výstupem je tedy strmost ve V/s, podkmit a překmit náběžné a sestupné hrany v procentech. Program také pomocí LED diody ve Front Panelu indikuje, že blok Transition Measurements nemá dostatek hran pro změření parametrů. V tomto případě následuje další blok dat, který splňuje vstupní podmínky.

Pomocí horní case struktury z Obrázku 33 se volí frekvence měřeného signálu. Každé frekvenci pak odpovídá empiricky zjištěná hodnota šířky načítaného intervalu. Spodní case struktura, slouží jen k přidělení popisu k automaticky generovaným obrázkům a to náběžná nebo sestupná hrana. Dále jsou zde bloky, které slouží k vytvoření adresáře na disku, do kterého se budou obrázky ukládat. Pokud spustíme program a už existuje na disku v našem vytvořeném adresáři podadresář se stejnými parametry rozsvítí se indikační LED dioda adresář!

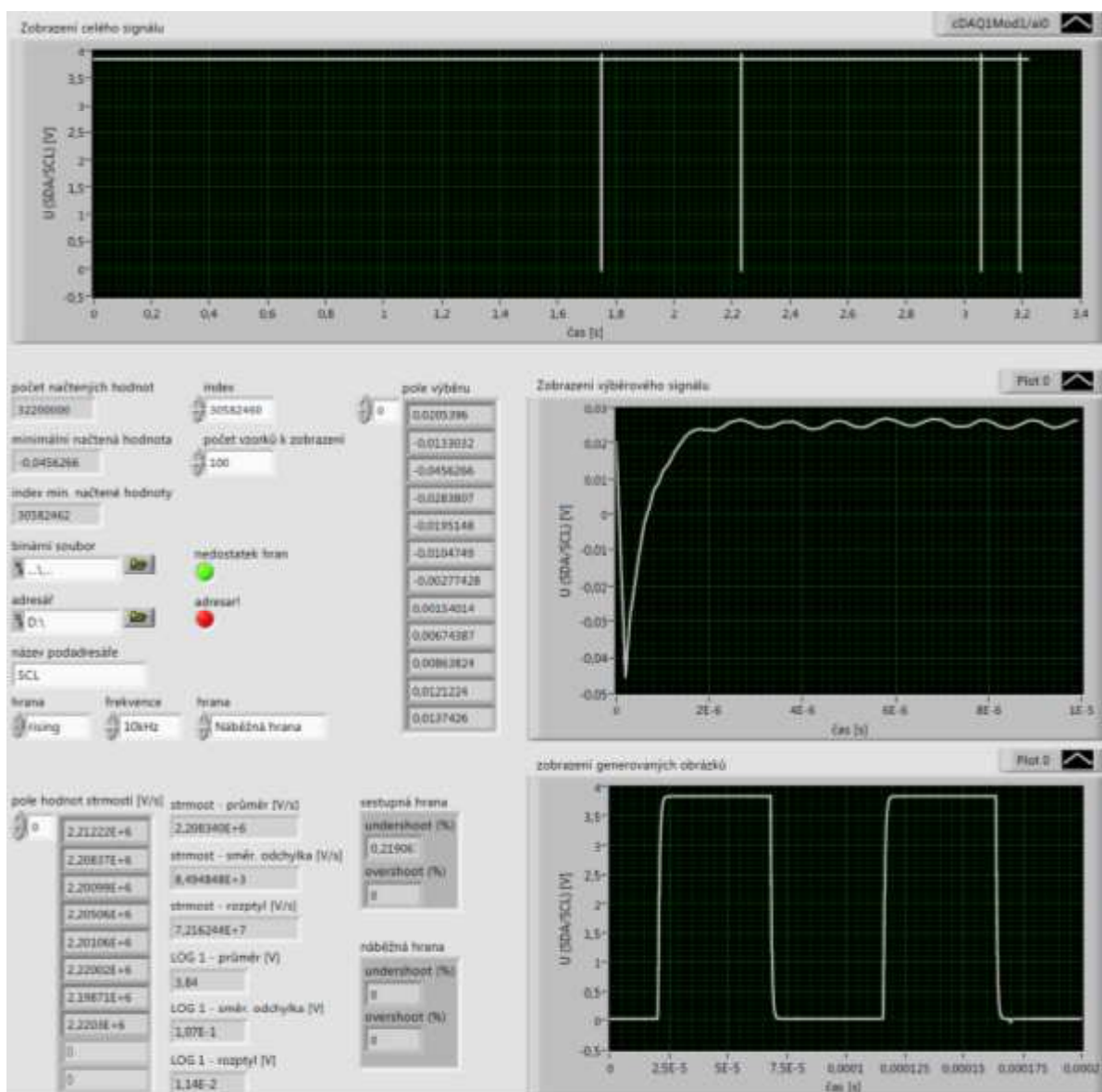


Obrázek 33. Informační popis měřeného signálu



Obrázek 34. Blok výpočtu statistických parametrů

Blok podle Obrázku 34 je třídícího charakteru. Jeho vstupem je pole strmostí, pokud však nejsou splněné podmínky pro měření na pozici v poli se uloží hodnota 0. Tento blok z pole odstraňuje nulové hodnoty, výsledkem je tedy pole hodnot naměřených strmostí z celého vstupního binárního TDMS souboru. Dále pak blok Deviation and Variance počítá průměrnou hodnotu, směrodatnou odchylku a rozptyl strmostí.



Obrázek 35. Front Panel

Obrázek 35 zachycuje program viditelný pro uživatele ve Front panelu. V horní části graf zobrazení celého načteného signálu, ze kterého můžeme vidět, že se v signálu vyskytují dotazy na sběrnici a případná komunikace. Ve středové části jsou hodnoty informačního charakteru jako počet načtených hodnot, minimální načtená hodnota a její

index, pomocí které si vybranou část signálu můžeme zobrazit v grafu Zobrazení vybraného signálu.

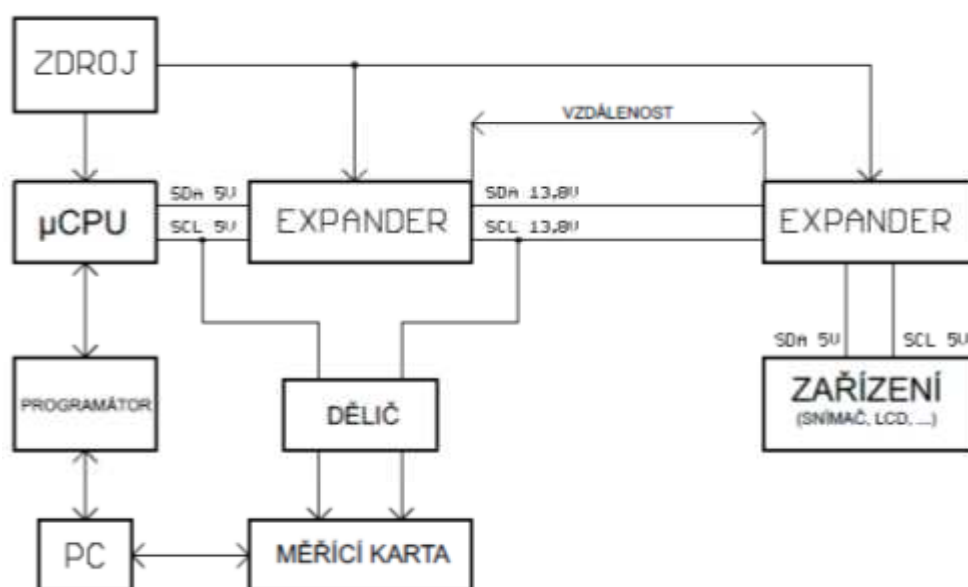
Dále pak kolonka pro načtení binárního souboru, volba adresáře pro ukládání automaticky generovaných obrázků a jméno podadresáře, do kterého se obrázky ukládají. Jsou zde dvě indikační LED diody. Za normálního stavu je jejich barva zelená, pokud však nastane problém, změní barvu na červenou. V našem případě svítí červeně indikační LED dioda adresář, což znamená, že již existuje podadresář SCL pro frekvenci 10 kHz. Druhá LED dioda indukuje, že měřící algoritmus nemá dostatek hran pro změření strmosti a dalších parametrů. Následuje prvek Ring Control, tedy kolonka, ve které vybíráme, zda chceme parametry měřit na náběžné nebo sestupné hraně.

Kolonka frekvence udává velikost intervalu hodnot, se kterými měřící algoritmus pracuje a opět hrana, tato struktura case je pouze informačního charakteru a přidává textový řetězec do automaticky generovaného jména obrázku spolu s dalšími parametry. Ve spodní části obrázku je pole hodnot naměřených strmostí, ze kterého další algoritmus počítá statistické údaje, tedy průměrnou hodnotu, směrodatnou odchylku a rozptyl. Následují statistické údaje o vysoké úrovni na sběrnici, tedy logické jedničky. Vlevo od grafu zobrazení generovaných obrázků jsou indikátory pro podkmit a překmit měřeného signálu. Vývojový diagram programu je uveden v Příloze 6.

10 MĚŘENÍ PARAMETRŮ NA SBĚRNICI I²C

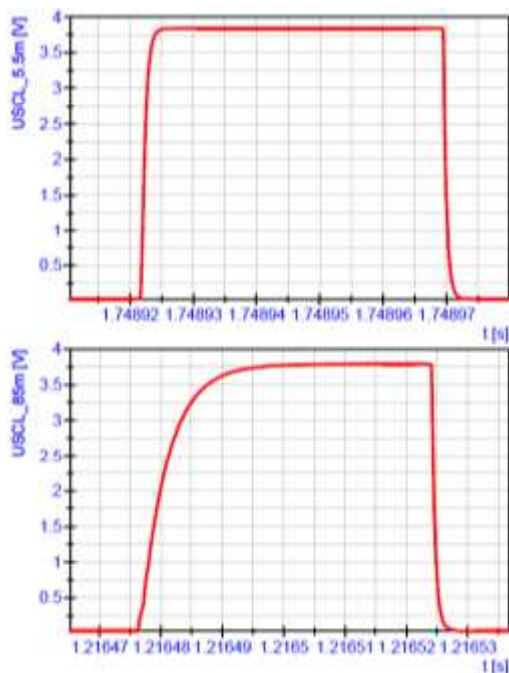
10.1 Měření s proměnnou délkou sběrnice

Cílem měření je ověřit vliv délky spojovacích vodičů mezi jednotlivými extendery P82B96 (potažmo mezi celými moduly). Víme, že funkčnost sběrnice je limitována celkovou kapacitou, extender ji dokáže posílit dle katalogových listů až na 4000 pF. Kabel by měl mít kapacitu do 1500 pF/km. Předpokládáme tedy mírné zhoršení hran signálů, tedy strmosti.

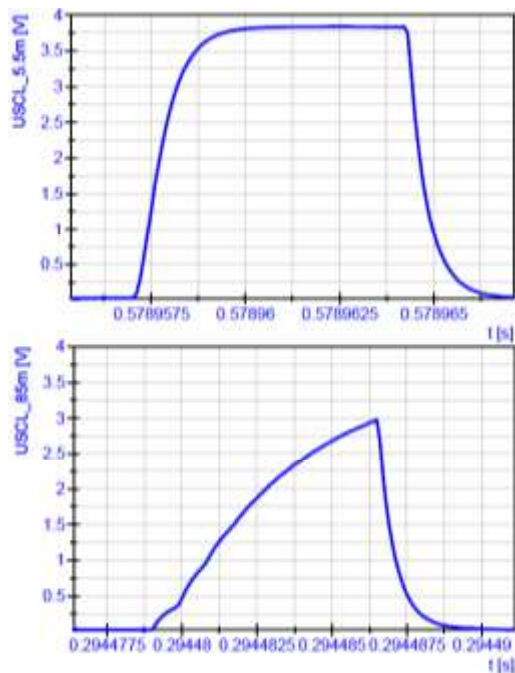


Obrázek 36. Blokové schéma pro měření s proměnlivou délkou sběrnice

V blokovém schématu je naznačeno zapojení obvodů pro měření strmosti a dalších parametrů na sběrnici I²C. Základem celého zapojení je mikroprocesor Atmega8, který řídí komunikaci na sběrnici. Procesor dává dotazy na jednotlivé připojené zařízení (snímače LM75A) a sbírá z nich data. Extender rozšiřuje dovolenou kapacitu sběrnice a mění amplitudu vodičů sběrnice z 5 V na 13,8 V.



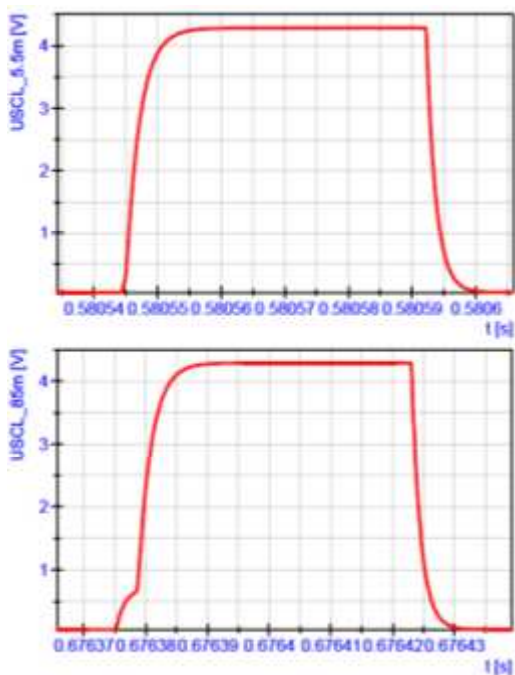
Obrázek 37. Naměřený průběh hodinového signálu SCL na straně 15 V při konstantní frekvenci $f = 10,5$ kHz. Horní průběh při $l=5,5$ m a dolní průběh při $l=85$ m



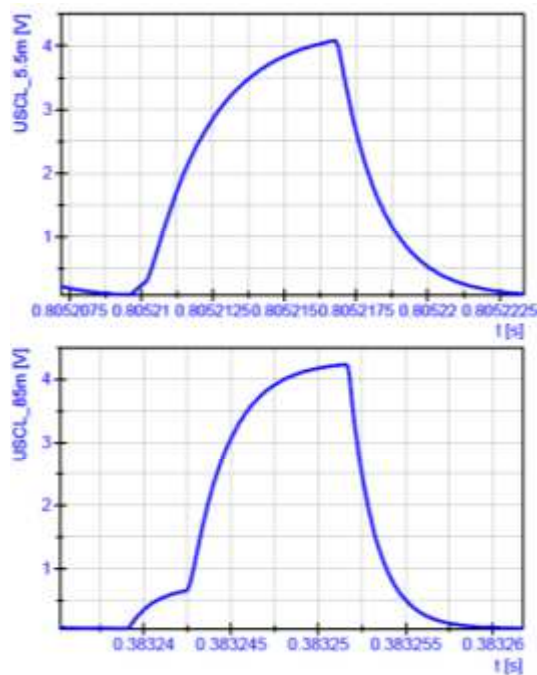
Obrázek 38. Průběh hodinového signálu SCL na straně 15 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz. Horní průběh při $l=5,5$ m a dolní průběh při $l=85$ m

Obrázek 37 ukazuje hodinový signál 15 V SCL při vzdálenostech 5,5 m a 85 m s konstantní frekvencí 10,5 kHz. Z grafu je patrné (morfologie impulsu), že s rostoucí délkou vedení se projevují parazitní veličiny na vedení. Při délce vedení 5,5 m je strmost náběžné hrany $2,208 \pm 8,495E-3$ V/ μ s s podkmitem sestupné hrany 0,19 %. Při délce 85 m je strmost vzestupné hrany $0,323 \pm 2,500E-3$ V/ μ s. Hodnota strmosti při větší vzdálenosti tedy klesla přibližně o jeden řád. Obrázek 38 ukazuje opět hodinový signál 15 V SCL při vzdálenostech 5,5 m a 85 m s konstantní frekvencí 100 kHz. Opět je patrná výrazná změna morfologie signálu, kdy při vzdálenosti 5,5 m je jeho strmost $2,213 \pm 5,705E-3$ V/ μ s s podkmitem sestupné hrany 0,2 %. Při délce vedení 85 m je strmost $0,442 \pm 2,170E-3$ V/ μ s s podkmitem na náběžné hraně 0,28 % a 3,25 % na sestupné hraně. I při tomto pilovitém tvaru signálu komunikace na sběrnici stále funguje a mikroprocesor sbírá data ze snímače LM75A [11].

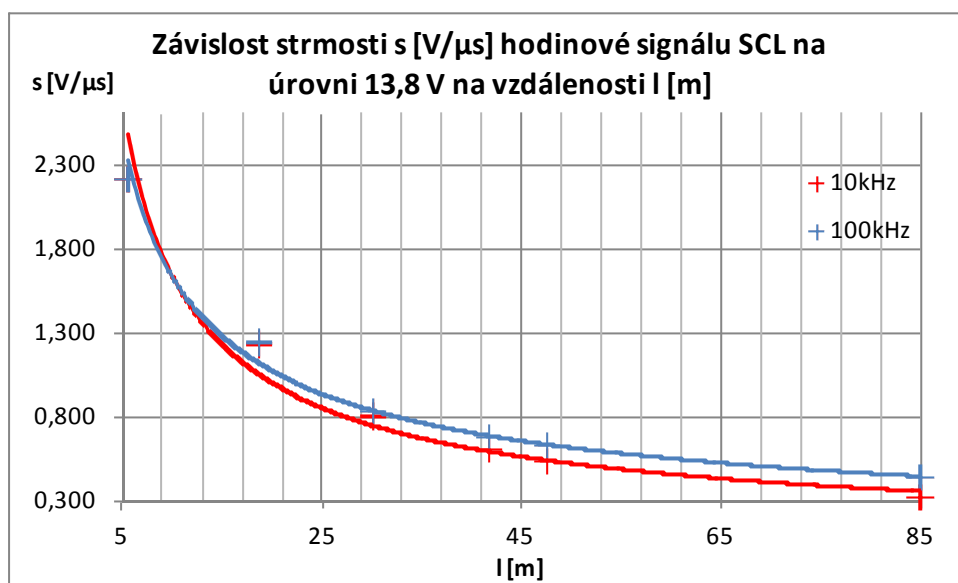
Obrázek 39 ukazuje hodinový signál 5 V SCL při vzdálenosti 5,5 m a 85 m s konstantní frekvencí 10,5 kHz. Při vzdálenosti 5,5 m jsme naměřili strmost náběžné hrany $0,710 \pm 7,715E-4$ V/ μ s a při vzdálenosti 85 m je strmost náběžné hrany $0,515 \pm 1,259E-3$ V/ μ s. Na Obrázku 40 je signál 5 V SCL měřený při konstantní frekvenci 100 kHz. Při vzdálenosti 5,5 m je strmost náběžné hrany $0,788 \pm 3,028E-2$ V/ μ s s podkmitem náběžné hrany 0,2 %, překmitem 0,48 % a podkmitem sestupné hrany 6,29 %. Na vzdálenosti 85 m je strmost náběžné hrany $0,525 \pm 3,379E-3$ V/ μ s s podkmitem náběžné hrany 0,19 % a podkmitem sestupné hrany 88,81 %.



Obrázek 40. Průběh hodinového signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10,5$ kHz. Horní průběh při $l=5,5$ m a dolní průběh při $l=85$ m



Obrázek 39. Průběh hodinového signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz. Horní průběh při $l=5,5$ m a dolní průběh při $l=85$ m

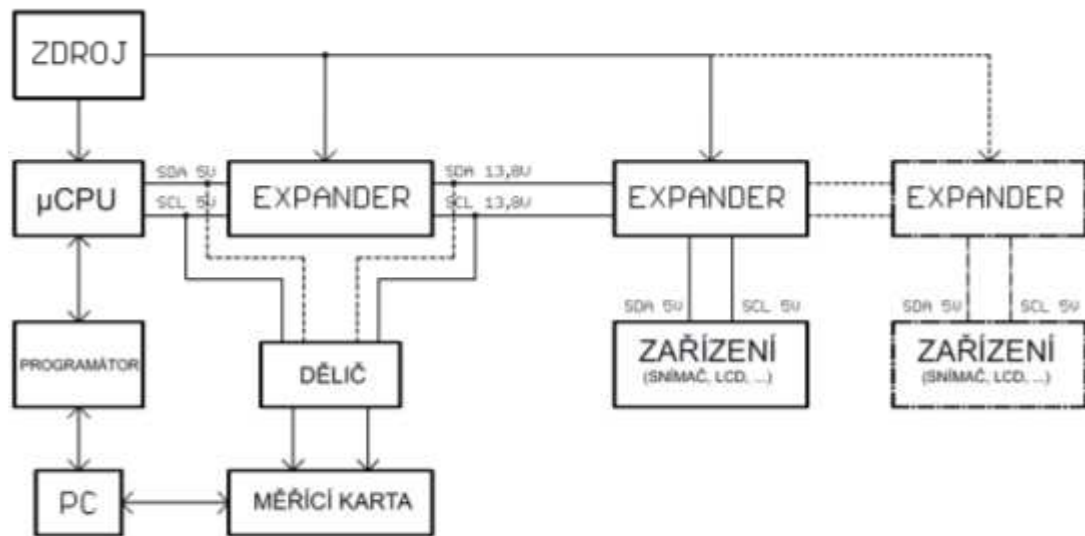


Obrázek 41. Graf závislosti strmosti s [$V/\mu s$] hodinového signálu SCL rozšířené strany sběrnice na vzdálenosti l [m]

Obrázek 41 ukazuje závislost naměřené strmosti s [$V/\mu s$] hodinového signálu SCL na rozšířené straně sběrnice v závislosti na vzdálenosti l [m]. Na první pohled je patrné, že s rostoucí délkou kabeláže klesá strmost logických hran, dochází tedy k zhoršení morfologie signálu, což je patrné i z Obrázků 37 - 40. Všechna data jsou zaznamenána v tabulkách v sekci Přílohy.

10.2 Měření s proměnlivým počtem extenderů

Podle katalogové hodnoty obvodu P86B96 víme, že každý extender má vlastní kapacitu 8 pF. Přidáváním modulů do obvodu by mělo docházet opět ke zhoršení morfologie signálu a poklesu strmosti hran.



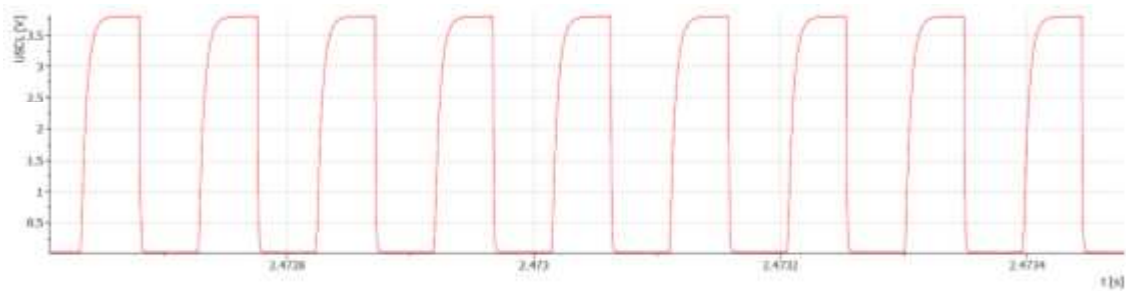
Obrázek 42. Blokové schéma pro měření s proměnlivým počtem extenderů

Tabulka 6 zobrazuje naměřené a vypočtené hodnoty parametrů měřeného hodinového signálu SCL na úrovni 13,8 V v závislosti na frekvenci hodinového signálu f [kHz] a počtu extenderů n . Toto měření bylo provedeno při konstantní délce vedení 85 m. Je vidět, že při konstantní frekvenci 10 kHz se hodnota strmosti řádově nemění, její hodnota vykazuje jen setinnou změnu. Pro dva extendery je její hodnota $0,322 \pm 6,164E-4$ V/ μ s s překmitem 0,23 % na náběžné hraně a pro sedm extenderů připojených na sběrnici je její hodnota $0,318 \pm 1,032E-3$ V/ μ s s překmitem 0,23 % na náběžné hraně. Přidávání extenderů na sběrnici tedy při 10 kHz nemění výrazně vlastnosti vedení. Při konstantní frekvenci 100 kHz je pro dva extendery strmost $0,373 \pm 8,822E-4$ V/ μ s s překmitem 2,89 % na náběžné hraně a pro sedm extenderů je strmost $0,445 \pm 3,267E-2$ V/ μ s s překmitem 3,31 % a podkmitem 81,59 % na náběžné hraně. V případě sedmi extenderů na 100 kHz se strmost přibližně o desetinu zvýšila. Při této frekvenci už se více uplatňují parazitní veličiny na vedení a mění se impedance vedení. Ovšem může se jednat i o chybu měřícího algoritmu, kdy blok, který obstarává měření, nemá k dispozici dostatečně velkou napětovou úroveň hrany.

Tabulka 6. Naměřené hodnoty strmostí s [V/ μ s], napětí LOG 1 [V] a vypočtených statistických údajů pro hodinový signál 15 V při konstantní délce vedení $l = 85$ m

n	f	strmost			LOG 1			vzestupná	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]
2	10	0,322	6,164E-04	3,799E-07	3,79	1,20E-01	1,44E-02		0,23
	100	0,373	8,822E-04	7,782E-07	3,80	4,00E-02	1,60E-03		2,89
3	10	0,322	1,101E-03	1,211E-06	3,79	1,40E-01	1,96E-02		0,31
	100	0,457	1,970E-03	3,882E-06	3,80	6,00E-02	3,60E-03	12	2,99
4	10	0,320	9,901E-04	9,803E-07	3,79	1,30E-01	1,69E-02		0,28
	100	0,456	1,706E-03	2,911E-06	3,79	8,00E-02	6,40E-03		3,11
5	10	0,319	1,362E-03	1,854E-06	3,79	1,00E-01	1,00E-02		0,29
	100	0,456	2,165E-03	4,689E-06	3,79	6,00E-02	3,60E-03	2,97	3,02
6	10	0,319	8,876E-04	7,878E-07	3,79	1,60E-01	2,56E-02		0,23
	100	0,370	1,348E-03	1,818E-06	3,79	1,00E-01	1,00E-02		3,25
7	10	0,318	1,032E-03	1,065E-06	3,78	1,80E-01	3,24E-02		0,30
	100	0,445	3,267E-02	1,067E-03	3,79	9,00E-02	8,10E-03	81,59	3,31

Na Obrázku 43 můžeme vidět průběh hodinového signálu pro dva extendery při frekvenci 10 kHz. Obrázek 44 ukazuje průběh stejného signálu při frekvenci 100 kHz.



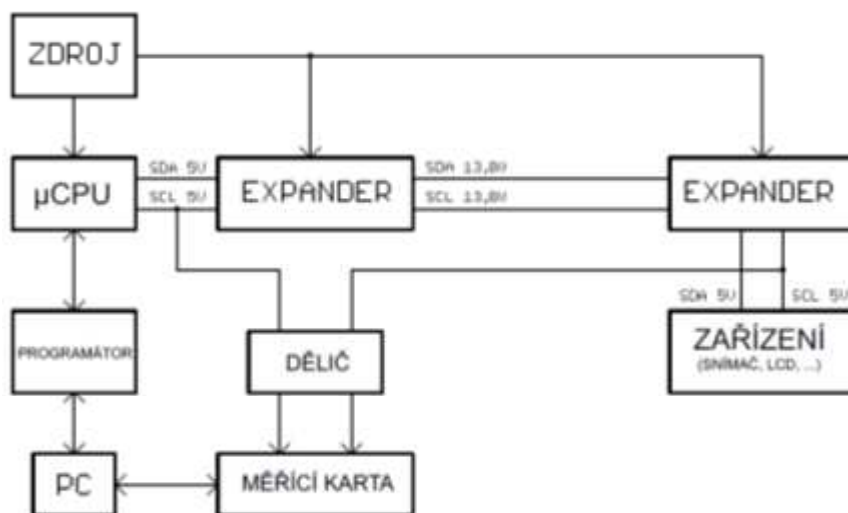
Obrázek 43. Průběh hodinového signálu SCL při frekvenci $f = 10$ kHz na straně 15 V pro $n = 2$ extendery



Obrázek 44. Průběh hodinového signálu SCL při frekvenci $f = 100$ kHz na straně 15 V pro $n = 2$ extendery

10.3 Dynamická měření na extenderech

V tomto měření nám jde o stanovení času progrese z původní TTL úrovně (CPU) přes dva extendery při konstantní délce kabeláže pro obvod paměti RAM a LM75A. Jediným parametrem, který měníme je frekvence hodinového signálu SCL.



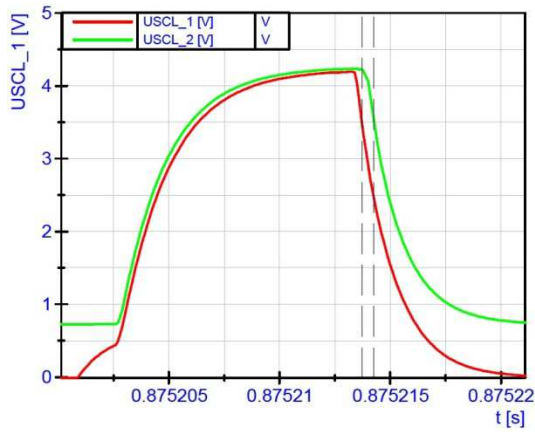
Obrázek 45. Blokové schéma pro měření dynamických parametrů na sběrnici

Obrázek 45 ukazuje zapojení měřicí karty pro měření progrese signálu na vstupní 5 V straně hodinového signálu SCL a výstupní 5 V straně hodinového signálu SCL a parametrů tohoto signálu.

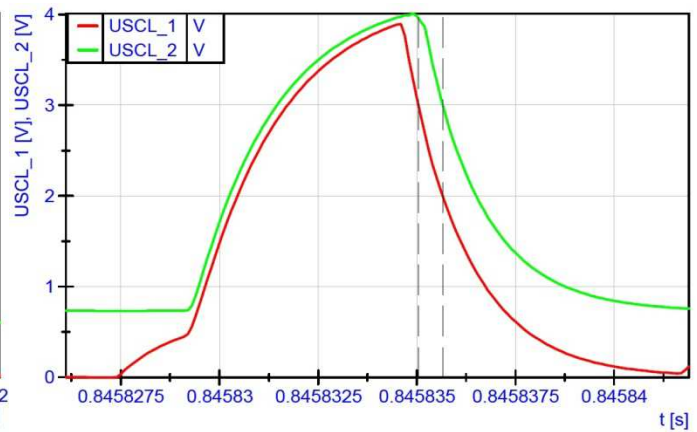
Tabulka 7. Naměřené hodnoty časových zpoždění τ_h a τ_d a vypočítaná hodnota progrese τ signálu SCL na 5 V úrovni paměti RAM

f	[kHz]	10	31	40	51	100
τ_h	[s]	8,752142E-01	6,430764E-01	4,073823E-01	1,641874E+00	8,458357E-01
τ_d	[s]	8,752137E-01	6,430759E-01	4,073817E-01	1,641873E+00	8,458350E-01
τ	[s]	5,337E-07	5,470E-07	5,977E-07	6,059E-07	6,199E-07

Tabulka 7 obsahuje naměřené časy 5 V vstupujícího hodinového signálu SCL τ_d a 5 V výstupního hodinového signálu SCL τ_h paměti RAM. Prostým rozdílem $\tau_h - \tau_d$ získáme časovou konstantu τ , tedy dobu zpoždění mezi vstupním a výstupním hodinovým signálem 5 V úrovně v závislosti na frekvenci f [kHz] při konstantní vzdálenosti 30,1 m. Počet desetinných míst byl zvolen záměrně pro viditelnost časové změny.

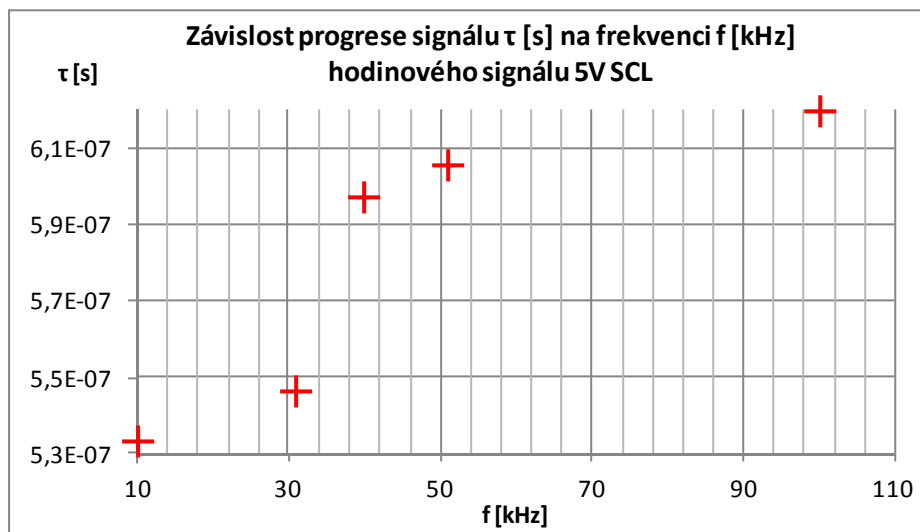


Obrázek 47. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m paměti RAM



Obrázek 46. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz a vzdálenosti $l = 30,1$ m paměti RAM

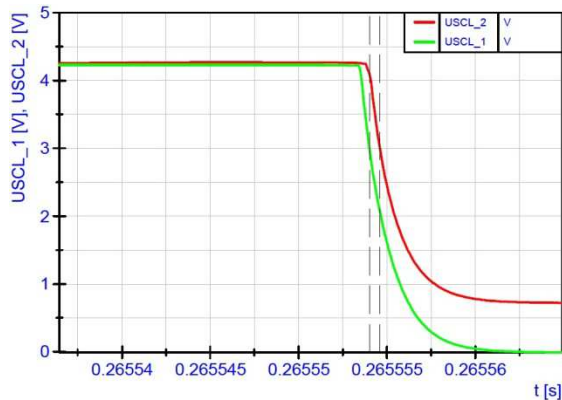
Hodnota zpoždění signálu na 10 kHz je $0,53 \mu\text{s}$, při 100 kHz je to $0,62 \mu\text{s}$. Je vidět, že s rostoucí frekvencí hodinového signálu roste i zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem. Tuto závislost ukazuje Obrázek 48. Tato závislost není proložená křivkou, protože není znám přesný teoretický průběh, ale jak můžeme vidět, jedná se o rostoucí trend.



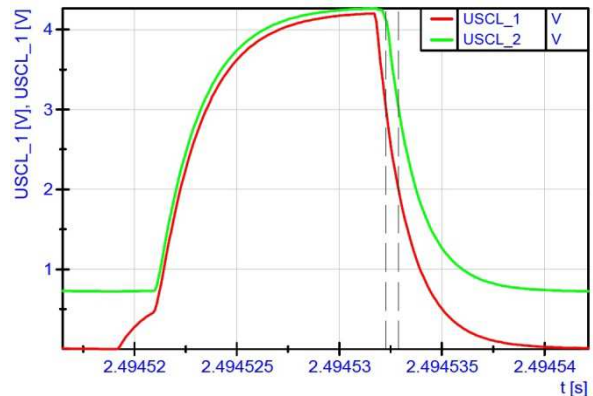
Obrázek 48. Graf progrese signálu τ [s] v závislosti na frekvenci f [kHz] hodinového SCL signálu na 5 V úrovni

Tabulka 8. Naměřené hodnoty progrese pro snímač LM75A

f	[kHz]	10	100
τ_h	[s]	$2,655546 \cdot 10^{-1}$	$2,494533 \cdot 10^0$
τ_d	[s]	$2,655540 \cdot 10^{-1}$	$2,494532 \cdot 10^0$
τ	[s]	$5,939 \cdot 10^{-7}$	$6,120 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 50. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 10 \text{ kHz}$ a vzdálenosti $l = 30,1 \text{ m}$ čidla LM75A



Obrázek 49. Zpoždění signálu SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci $f = 100 \text{ kHz}$ a vzdálenosti $l = 30,1 \text{ m}$ paměti RAM

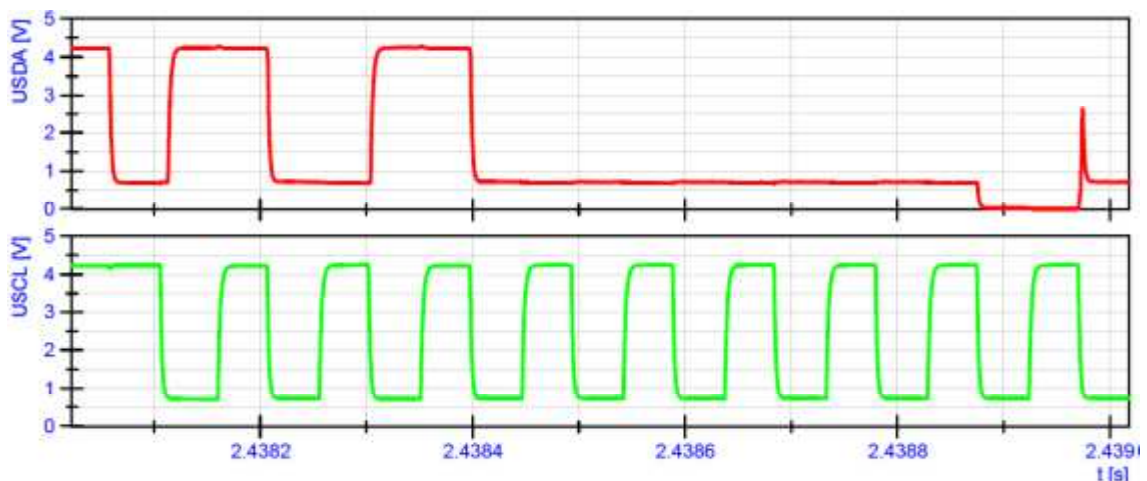
Hodnota regrese mezi vstupním a výstupním hodinovým signálem jak ukazují Tabulky 7 a 8 je mezi obvodem LM75A a kalendářovou pamětí RAM PCF 8583 řádově stejná. Z Obrázku 48 můžeme jednoznačně určit, že s rostoucím kmitočtem roste progresa při komunikaci na sběrnici. Detailní pohled na zpoždění ukazují Obrázky 46 a 47 pro obvod paměti RAM a Obrázky 49 a 50 pro snímač LM75A.

10.4 Komunikace s kalendářovou pamětí RAM PCF8535

Tabulka 9. Tabulka naměřených s [$V/\mu s$] a vypočtených hodnot statistických parametrů signálu SCL na 5 V a 13,8 V úrovni pro paměť RAM v závislosti na frekvenci f [kHz] a konstantní vzdálenosti $l = 30,1$ m.

f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana		
	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit	
	[V/ μs]	[V/ μs]	[V/ μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]	
30,1	10	0,627	2,417E-03	5,844E-06	3,76	2,12E-01	4,50E-02	0,2		0,28	
	31	0,634	8,653E-04	7,488E-07	3,78	6,32E-02	4,00E-03	0,65		0,2	
	40	0,640	5,393E-03	2,908E-05	3,78	9,83E-02	9,67E-03	1,95		0,20	
	51	0,650	2,335E-03	5,454E-06	3,78	1,01E-01	1,01E-02	0,20		1,75	
	100	0,698	1,182E-02	1,396E-04	3,78	9,09E-02	8,26E-03	0,20		3,06	
f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana		
	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit	
	[V/ μs]	[V/ μs]	[V/ μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]	
30,1	10	0,651	3,944E-02	1,555E-03	4,28	1,70E-01	2,89E-02	19,29		0,25	
	31	0,639	3,380E-02	1,143E-03	4,27	2,49E-01	6,18E-02	0,62		2,21	
	40	0,618	1,721E-02	2,963E-04	4,29	1,01E-01	1,03E-02	19,19		0,25	1,65
	51	0,626	3,822E-02	1,461E-03	4,29	1,27E-01	1,62E-02	17,86			
	100	0,665	3,245E-02	1,053E-03	4,29	8,66E-02	7,51E-03	0,99			

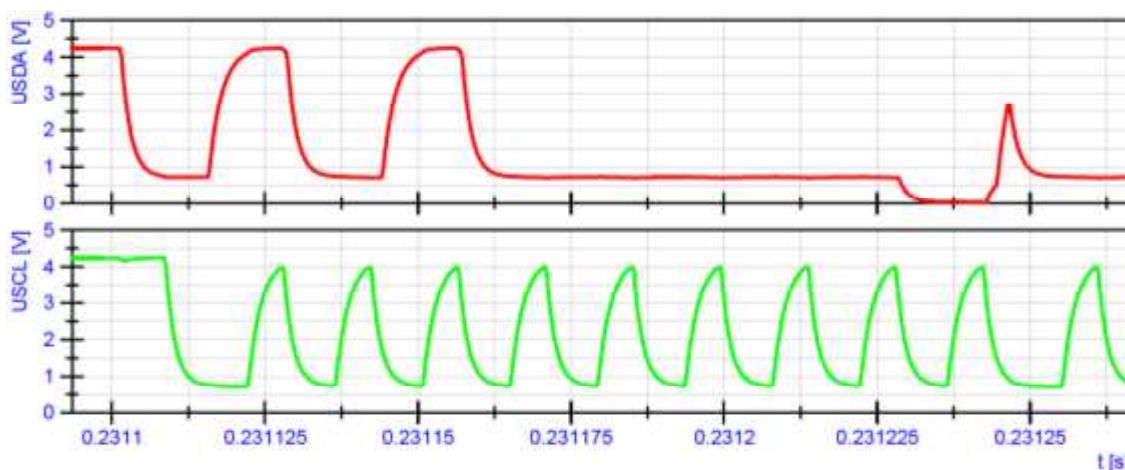
Obrázek 51 ukazuje příklad komunikace procesoru s kalendářovou pamětí RAM PCF 8583. Červená barva představuje datový vodič SDA, zelená barva pak představuje hodinový signál SCL na straně 5 V při konstantní frekvenci 10,5 kHz. Strmost hodinového signálu SCL je $0,651 \pm 3,944E-2$ V/ μs , dále se v tomto signálu objevuje maximální podkmit náběžné hrany 19,29 % a podkmit sestupné hrany 0,25 %.



Obrázek 51. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 10,5 kHz na straně 5V

Obrázek 52 opět představuje ukázkou komunikace s pamětí RAM, při 5 V ovšem na frekvenci 100 kHz. Hodnota strmosti hodinového signálu SCL při této frekvenci je

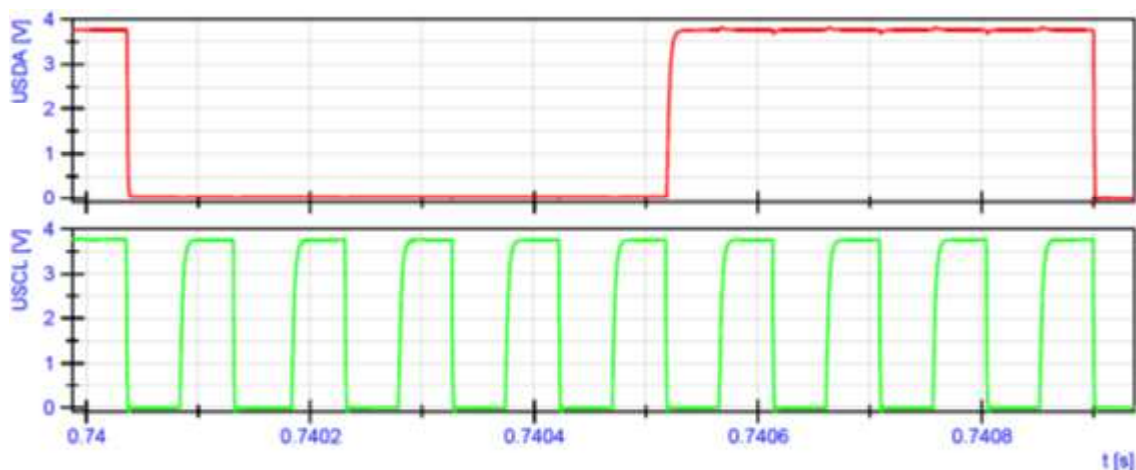
$0,665 \pm 3,245E-2 \text{ V}/\mu\text{s}$ s podkmitem náběžné hrany 0,99 %. Zde se také vyskytují další anomálie signálu, tenké peaky, průběh USDA, které na rozšířené 15 V straně sběrnice nejsou.



Obrázek 52. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 100 kHz na straně 5V

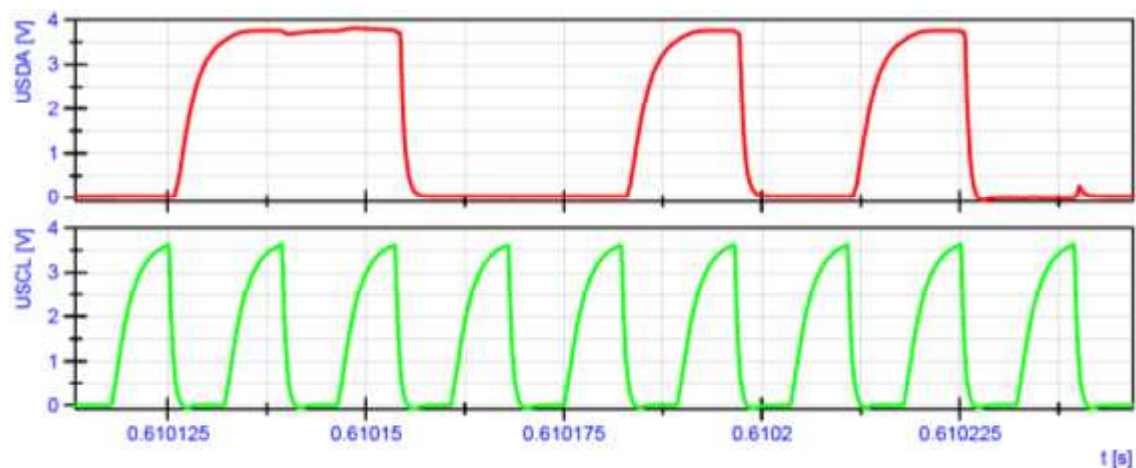
Na Obrázku 51 a 52 je vidět vlastnost obvodu P82B96. Jak na frekvenci 10,5 kHz, tak na frekvenci 100 kHz na hodinovém signálu SCL, že nízká logická úroveň, tedy logická nula má offset. Jeho hodnota je průměrně 0,76 V. Pull-down rezistor obvodu P82B96, který vytváří hodnotu přibližně 0,76 V má zjevně vyšší odpor a na sběrnici pak vytváří tento offset pro tuto nízkou logickou úroveň (L). Na datovém vodiči je vidět, že každý ACK bit vytvořený připojeným obvodem (každý devátý bit) přizemní až k hodnotě 0 V. Tento offset se vyskytuje pouze na výstupní 5 V straně, protože na vstupní straně generuje jak hodinový tak datový signál mikroprocesor, který má také „silnější“ nulu (menší pull-down odpor).

Tato hodnota ovšem koresponduje s dokumentací k extenderu. Úroveň L na vstupu extenderu Rx(Ry) způsobí také úroveň L na pinu Sx(Sy) při napětí přibližně 0,73 V, což ale není dostatečná úroveň pro překlopení výstupu Tx(Ty). Tento výstup potřebuje pro překlopení na úroveň L napětí na pinu Sx(Sy) nižší než 0,6 V, tak je zajištěno, že nedojde k nežádoucí zpětné vazbě.



Obrázek 53. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 10 kHz na straně 15V

Obrázek 53 ukazuje komunikaci na rozšířené straně sběrnice 15 V při frekvenci 10 kHz. Červená barva představuje datový vodič SDA, zelená barva představuje hodinový signál rozšířené strany sběrnice SCL. Strmost hodinového signálu je $0,627 \pm 2,417E-3$ V/ μ s s podkmitem náběžné hrany 0,2 % a sestupné hrany 0,28 %. Ten samý signál při frekvenci 100 kHz můžeme vidět na Obrázku 54. Opět je zde výrazná změna morfologie signálu oproti 10 kHz závislosti. Také si můžeme všimnout, že amplituda hodinového signálu s rostoucí frekvencí klesá. Strmost při 100 kHz má hodnotu $0,698 \pm 1,182E-2$ V/ μ s s podkmitem náběžné hrany 0,2 % a sestupné hrany 3,06 %.



Obrázek 54. Průběh jednoho bytu komunikace s pamětí RAM hodinového SCL a datového SDA signálu při frekvenci 100 kHz na straně 15V

10.5 Komunikace mezi procesory

Režim master-transmitter, slave-receiver

V tomto režimu jsou opět připojeny dva extendery, proti sobě však nyní komunikují dva mikroprocesory ATmega8A [9]. Jeden v režimu master-transmitter, druhý v režimu slave-receiver. Nadřazený mikroprocesor periodicky posílá podřízenému mikroprocesoru binární data.

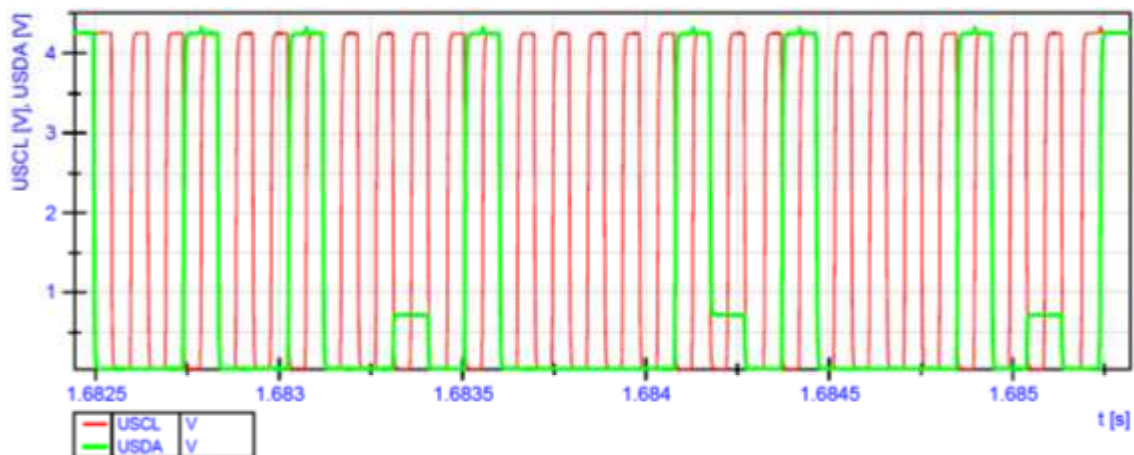
Tabulka 11. Naměřené hodnoty strmosti s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-T, S-R

5V SCL vysílač										
f	strmost			LOG 1			vzestupná		sestupná	
	ξ	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
kHz	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,668	5,812E-04	3,378E-07	4,26	9,00E-02	8,10E-03	0,20			
31	0,672	6,647E-04	4,418E-07	4,26	6,00E-02	3,60E-03			0,74	
40	0,672	5,481E-04	3,004E-07	4,26	6,00E-02	3,60E-03	0,20		1,60	
51	0,694	1,974E-03	3,895E-06	4,26	5,00E-02	2,50E-03	0,20	13,53	2,38	
100	0,756	7,994E-03	6,390E-05	4,26	5,00E-02	2,50E-03		42,48	3,03	

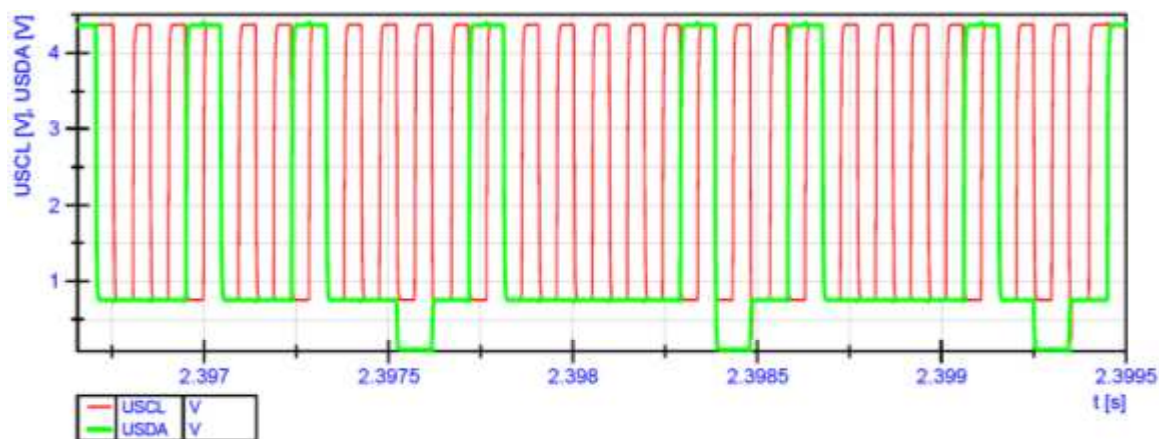
Tabulka 10. Naměřené hodnoty strmosti s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-T, S-R

5V SCL přijímač										
f	strmost			LOG 1			vzestupná		sestupná	
	ξ	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
kHz	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,743	1,894E-03	3,588E-06	4,37	1,20E-01	1,44E-02		0,25		
31	0,748	1,005E-03	1,009E-06	4,37	6,00E-02	3,60E-03	0,29		0,32	
40	0,750	3,246E-03	1,054E-05	4,37	5,00E-02	2,50E-03		0,26	1,00	
51	0,761	1,226E-03	1,503E-06	4,37	5,00E-02	2,50E-03		65,51	1,76	
100	0,828	4,817E-03	2,321E-05	4,37	4,00E-02	1,60E-03		22,93	2,25	

Tabulka 10 a 11 ukazují rozdíly parametrů mezi hodinovým signálem, na 5 V úrovni na straně nadřazeného procesoru (vysílač), tak na straně podřízeného procesoru (přijímač). Při konstantní frekvenci hodin 10,5 kHz je na straně vysílače naměřená strmost $0,668 \pm 5,812E-4$ V/ μ s s podkmitem na náběžné hraně 0,2 %. Na přijímací straně je hodnota strmosti $0,743 \pm 1,894E-3$ V/ μ s s překmitem náběžné hrany 0,25 %. Jedná se tedy o desetinný rozdíl hodnot mezi vstupní a výstupní stranou. Obrázek 55 ukazuje průběh komunikace při frekvenci 10 kHz na straně nadřazeného procesoru (vysílače) a Obrázek 56 na straně podřízeného procesoru (přijímače). Jedná se o 3 byty, kde první byte je adresový, a další dva byty jsou datové.

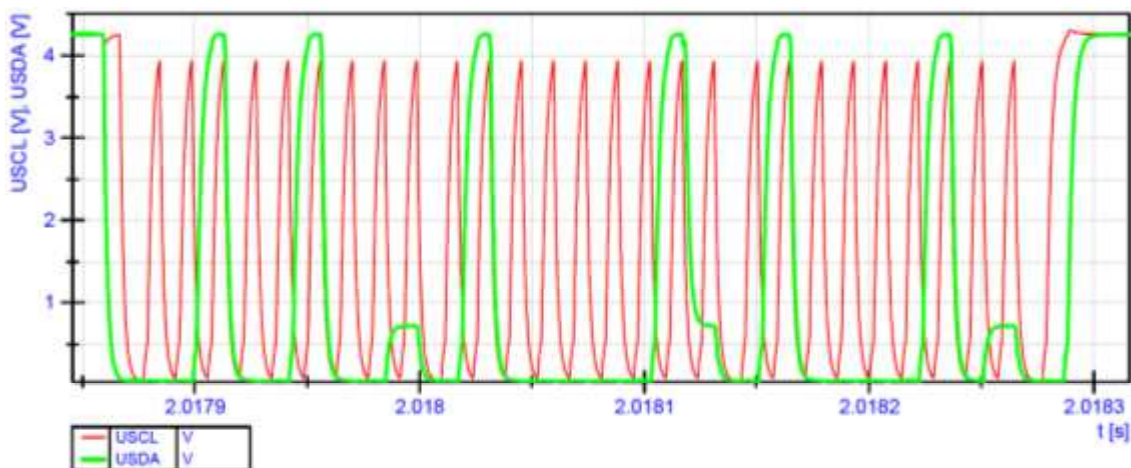


Obrázek 56. Průběh komunikace na straně vysílače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-T, S-R

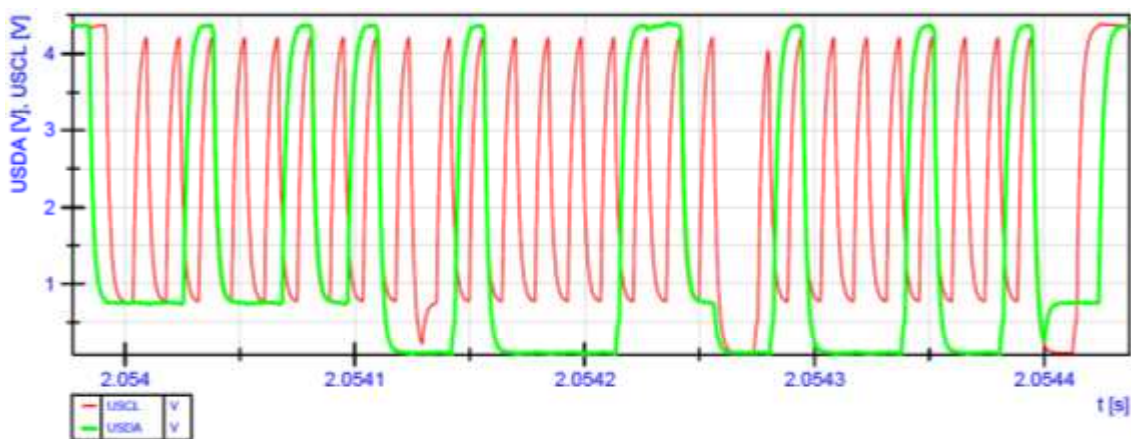


Obrázek 55. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-T, S-R

Při konstantní frekvenci 100 kHz je strmost hodin na vysílací straně $0,756 \pm 7,994E-3$ V/ μ s s překmitem náběžné hrany 42,48 % a podkmitem 3,03 % sestupné hrany. Na straně podřízeného procesoru je tato hodnota $0,828 \pm 4,817E-3$ V/ μ s s překmitem 22,93 % náběžné hrany a podkmitem 2,25 % sestupné hrany. Opět se jedná o desetinnou změnu hodnot strmosti, ale při kmitočtu 100 kHz se zvětšuje velikost překmitů a podkmitů na hranách. Obrázek 57 ukazuje průběh komunikace při frekvenci 100 kHz na straně nadřízeného procesoru (vysílače) a Obrázek 58 na straně podřízeného procesoru (přijímače). Opět se jedná o 3 byty, kde první byte je adresový, a další dva byty jsou datové.



Obrázek 58. Průběh komunikace na straně vysílače při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v režimu M-T, S-R



Obrázek 57. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 100$ kHz v režimu M-T, S-R

Zde na straně podřízeného procesoru (přijímače), tedy výstupu z extenderu můžeme opět vidět projevující se vlastnost nízké logické úrovně, která má průměrnou hodnotu 0,76 V. Je také vidět, že amplituda hodinového SCL signálu nedosahuje na hodnotu amplitudy SDA datového signálu sběrnice. Dále je také vidět patrný rozdíl ve tvaru signálu při frekvenci 10 kHz Obrázek 55, 56 a při hodinové signálu 100 kHz obrázek 57, 58.

Rěžim master-receiver, slave-transmitter

V tomto režimu jsou opět připojeny extendery, ale nyní dva mikroprocesory ATmega8A. Jeden v režimu master-receiver, druhý v režimu slave-transmitter. Tedy hlavní nadřízený mikroprocesor generuje hodinový signál a adresuje podřízený mikroprocesor (SLA+R) a pak následně přijímá data, která vystavuje slave obvod.

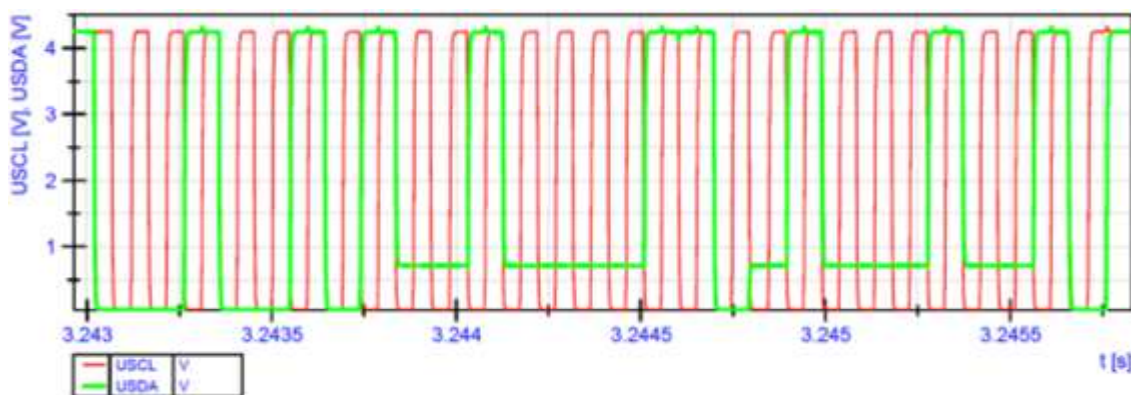
Tabulka 13. Naměřené hodnoty strmosti s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-R, S-T

5V SCL přijímač										
f	strmost			LOG 1			vzestupná		sestupná	
kHz	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,737	2,613E-03	6,827E-06	4,37	8,00E-02	6,40E-03				
31	0,739	2,667E-03	7,112E-06	4,37	4,00E-02	1,60E-03			0,44	
40	0,742	2,689E-03	7,231E-06	4,37	4,00E-02	1,60E-03				
51	0,759	2,871E-03	8,243E-06	4,37	4,00E-02	1,60E-03		0,44	1,66	
100	0,773	1,581E-01	2,500E-02	4,37	4,00E-02	1,60E-03	16,67	36,95	100,02	

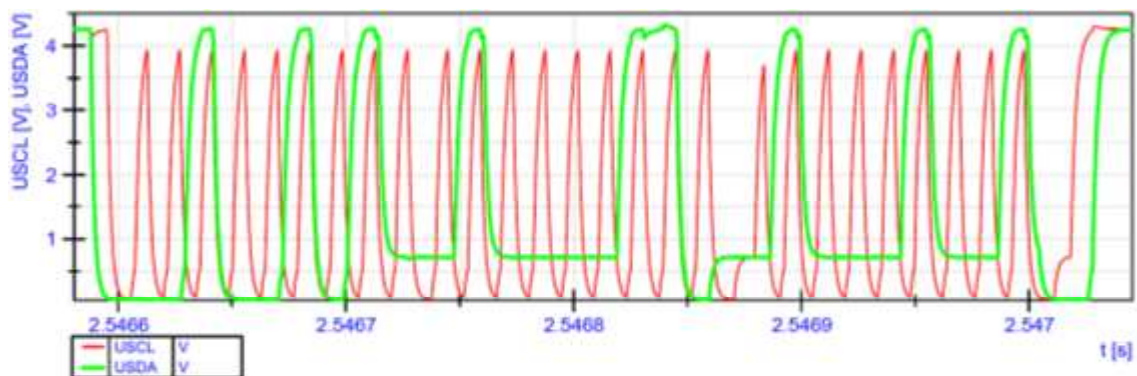
Tabulka 12. Naměřené hodnoty strmosti s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 5V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu M-R, S-T

5V SCL vysílač										
f	strmost			LOG 1			vzestupná		sestupná	
kHz	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,666	7,650E-04	5,852E-07	4,26	8,00E-02	6,40E-03				
31	0,666	7,672E-04	5,885E-07	4,26	7,00E-02	4,90E-03				
40	0,671	9,547E-04	9,115E-07	4,26	4,00E-02	1,60E-03				
51	0,694	2,432E-03	5,913E-06	4,26	4,00E-02	1,60E-03		68,36	2,41	
100	0,749	2,570E-02	6,606E-04	4,26	5,00E-02	2,50E-03	0,20	0,37	8,00	

Tabulka 11 a 12 ukazuje rozdíly parametrů mezi hodinovým signálem, na 5 V úrovni na straně podřízeného mikroprocesoru (vysílač), tak na straně nadřízeného mikroprocesoru (přijímač). Při konstantní frekvenci hodin 10,5 kHz je na straně vysílače naměřená strmost $0,666 \pm 7,650E-4$ V/ μ s. Na přijímací straně je hodnota strmosti $0,737 \pm 2,613E-3$ V/ μ s. Jedná se tedy přibližně o desetinný rozdíl hodnot mezi vstupní a výstupní stranou. Obrázek 59 ukazuje průběh komunikace vysílače při frekvenci 10 kHz a Obrázek 60 při frekvenci 100 kHz. Z grafu je patrné, že první adresový byte komunikace je přizemněný k hodnotě 0V a další dva datové byty jsou přizemněné k hodnotě 0,76 V.



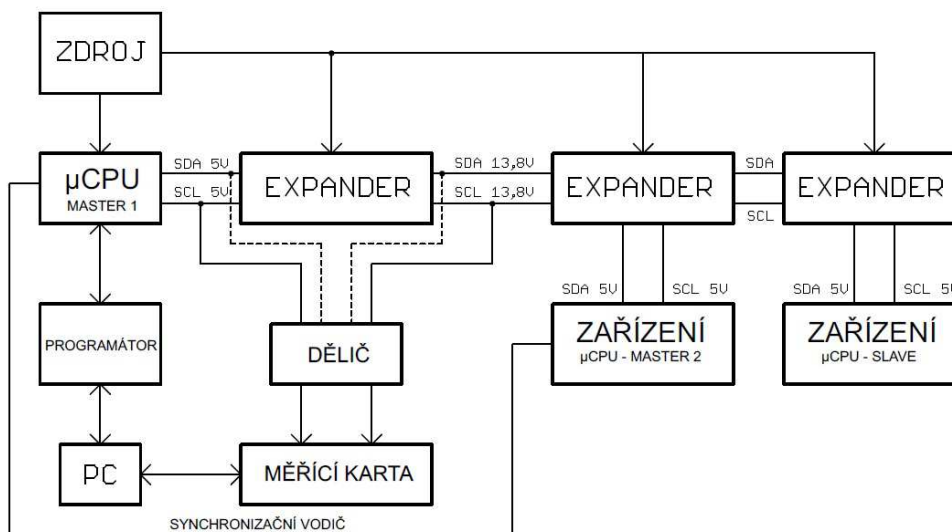
Obrázek 59. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 10$ kHz v režimu M-R, S-T



Obrázek 60. Průběh komunikace na straně přijímače při konstantní frekvenci $f = 100 \text{ kHz}$ v režimu M-R, S-T

Komunikace mezi dvěma procesory funguje v obou režimech (M-T/S-R, M-R/S-T), jak na frekvenci hodinového signálu SCL 10 kHz, tak na frekvenci 100 kHz. Úroveň logické nuly se blíží buď k nulové hodnotě napětí, nebo hodnotě 0,76 V jak bylo vysvětleno v kapitole 10.4.

10.6 Multi-master komunikace



Obrázek 61. Blokové schéma pro měření multi-master komunikace

Blokové schéma na Obrázku 61 ukazuje zapojení mikroprocesorů ATmega8A v režimu multi-master komunikace. Při ověření multi-master komunikace na sběrnici jsme spojili procesory v režimu master jednou digitální synchronizační linkou tak, aby docházelo k vysílání ve stejném okamžiku. Cílem sestavených firmwarů pro procesory bylo také zajistit, aby první procesor vysílající data (znaky ANSI 'A', 'B') získal arbitráž na sběrnici před druhým procesorem vysílající data (znaky ANSI 'C', 'B'). Poslední mikroprocesor pracuje v režimu slave receiver. Hodinový SCL signál generuje vždy mikroprocesor v režimu master. Datová komunikace na sběrnici vždy obsahuje sekvenci tří bytů, první je 7 bitová adresa slave zařízení, následuje bit read/write a poslední ACK bit.

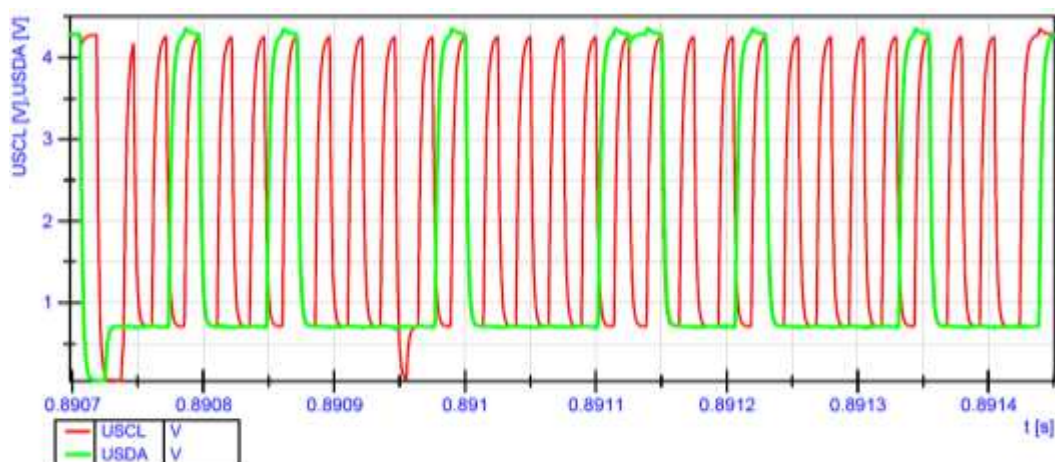
Tabulka 14. Naměřené hodnoty strmosti s [$V/\mu s$] a vypočítané statistické parametry signálu 13,8V na straně vysílače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu multi-master

l	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
[m]	[kHz]	[V/ μs]	[V/ μs]	[V/ μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
9,1	10	0,641	4,359E-04	1,900E-07	3,81	5,85E-02	3,42E-03				1,00
	100	0,642	9,753E-04	9,513E-07	3,81	5,06E-02	2,56E-03		0,2		
	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μs]	[V/ μs]	[V/ μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,810	6,738E-04	4,540E-07	4,36	6,74E-02	4,54E-03		0,32		1,39
	100	0,726	1,176E-03	1,382E-06	4,36	4,97E-02	2,47E-03	0,59			

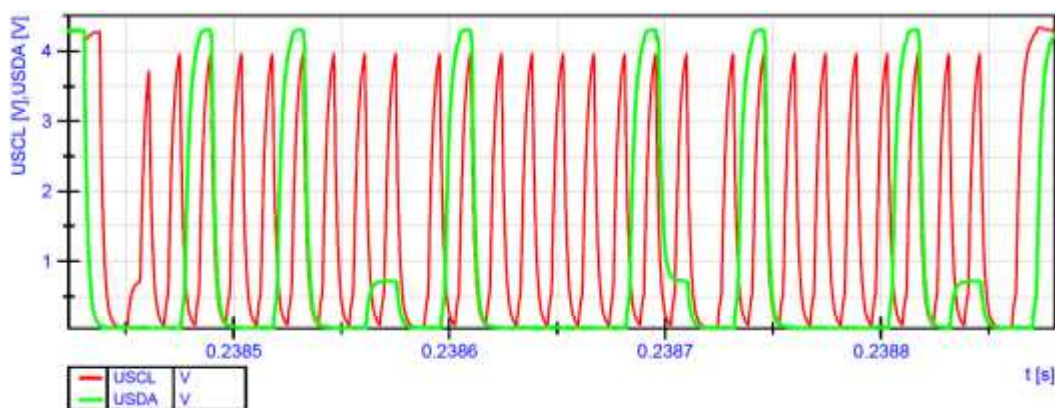
Tabulka 15. Naměřené hodnoty strmosti s [V/ μ s] a vypočítané statistické parametry signálu 13,8V na straně přijímače v závislosti na frekvenci f [kHz] v režimu multi-master

l	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
[m]	[kHz]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,628	2,736E-03	7,487E-06	3,64	5,57E-02	3,10E-03	0,25	0,5	1,00	1,21
	100	0,639	2,980E-03	8,883E-06	3,82	4,89E-02	2,39E-03	0,99			
9,1	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
		10	0,580	5,273E-03	2,780E-05	4,28	6,13E-02	3,75E-03	0,58		1,92
	100	0,687	5,821E-03	3,388E-05	4,29	5,28E-02	2,79E-03	0,59			

V tabulce 15 můžeme vidět naměřené a vypočtené hodnoty parametrů signálu na straně přijímače a tabulka 14 ukazuje údaje ze strany vysílače. Strmost hran 5 V úrovně na straně přijímače je $0,810 \pm 6,738E-4$ V/ μ s s překmitem náběžné hrany 0,32 % při konstantní frekvenci 10 kHz. Při frekvenci 100 kHz vykazuje hodnota strmosti snížení o jednu desetinu, tedy $0,726 \pm 1,176E-1$ V/ μ s s podkmitem náběžné hrany 0,59 %.



Obrázek 63. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/10kHz/5V)

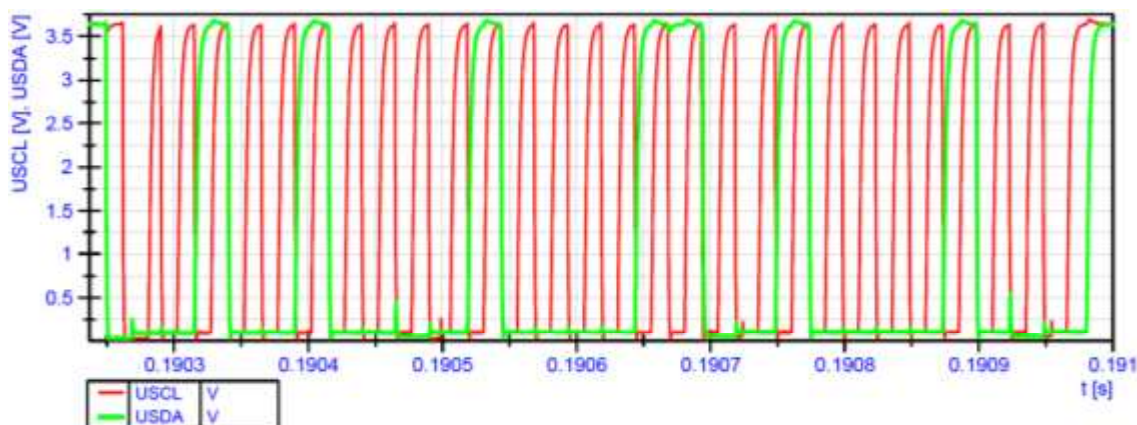


Obrázek 62. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/100kHz/5V)

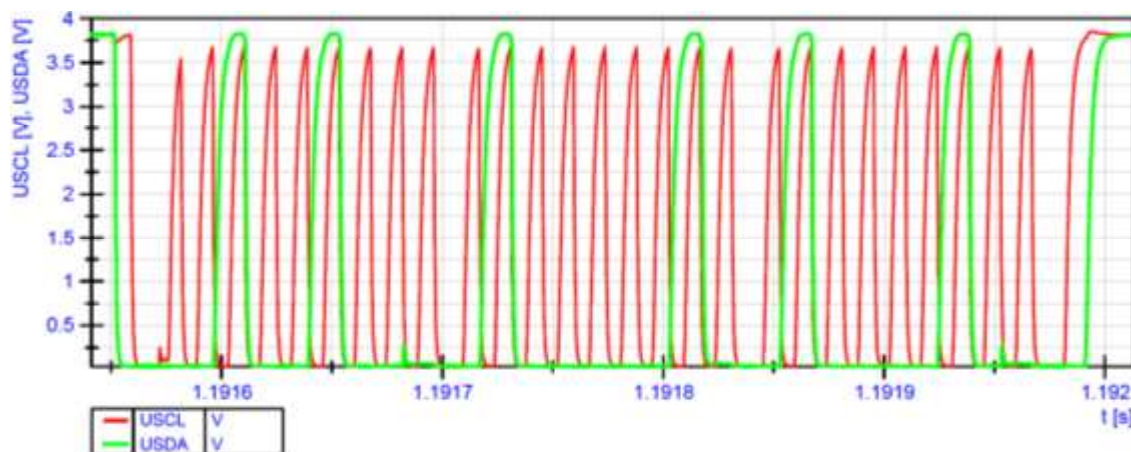
Průběhy Obrázku 62 a Obrázku 63 ukazují komunikaci na sběrnici, kdy dva mikroprocesory spojené synchronizační linkou jsou v režimu master transmitter a poslední mikroprocesor je v režimu slave receiver. Zamýšlená komunikace, kdy měl vždy vyhrát mikroprocesor M1, zasílající znaky ('A', 'B') však bohužel spolehlivě nefungovala. Arbitráž na sběrnici získávaly z prozatím nezjištěných důvodů náhodně oba masters, přičemž chyba ve firmwaru se zdá být vyloučená.

Situaci přiblíží záznamy průběhů: na Obrázku 62 můžeme vidět výsledný průběh na sběrnici měřený u M1 v případě, že ztratil arbitráž. Z průběhů a dosavadního poznání (úroveň pull-down generovaná obvodem P82B96) lze dedukovat, že ke ztrátě arbitráže došlo z prozatím neznámého důvodu ještě před vystavením prvního bitu adresy slave obvodu (arbitráž ztracena nikoli v plánovaných datech, ale již ve SLA+W). Tato informace je podpořena sledem stavů status registru TWSR (řídící stavový automat přerušování TWI architektury procesorů Atmel AVR), stavy byly totiž monitorovány a zasílány prostřednictvím rozhraní UART do PC. Ztráta arbitráže obvodu M1 je pak čitelná i z průběhu na lince SDA, kdy druhý datový byte komunikace měl obsahovat znak 'A' (0B01000001) namísto 'C' (0B01000011), tj. arbitráž obvodu M2 měla být ztracena stažením linky SDA vysílanou log. 0 předposledního bitu v prvním zasílaném znaku 'A' z obvodu M1. Poslední datový byte v obou případech obsahuje znak 'B' (0B01000010). Na Obrázku 63 je pak zachycena situace v případě, že M1 arbitráž získal (rovněž měřeno u M1).

Z grafů je na první pohled jasné, že v Obrázku 62 kromě stavu START generuje signály M2 (vzdálenější, za extendery), kdežto v Obrázku 63 generuje signály M1. V Obrázku 63 jsou patrné také stavy ACK generované adresovaným slavem. Zvláštností u průběhu se ztracenou arbitráží v Obrázku 62 je pak pokus obvodu M1 o vystavení log. 0 na lince SCL po devátém hodinovém cyklu.



Obrázek 64. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/10kHz/15V)



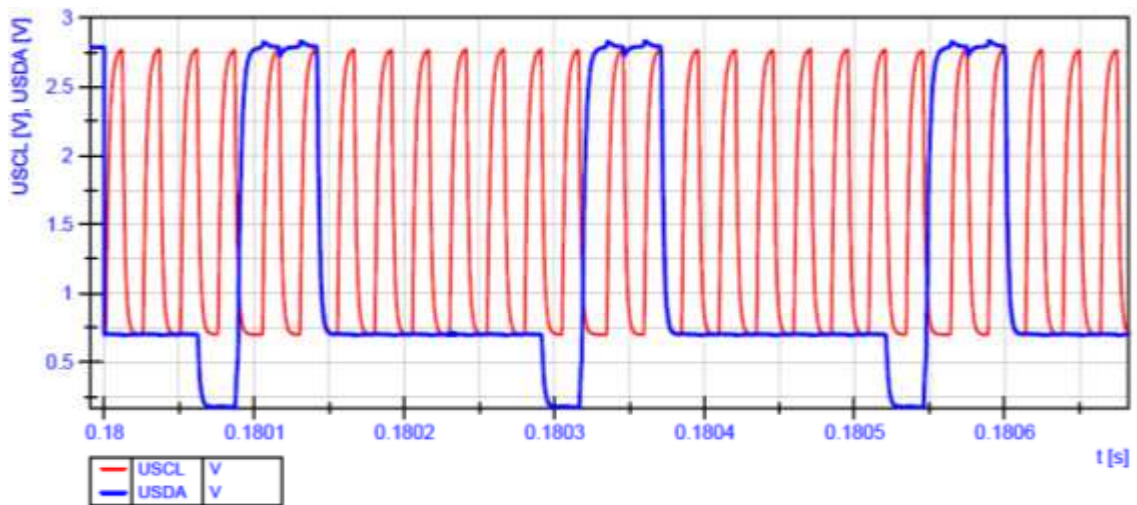
Obrázek 65. Průběhy linek SDA a SCL při multi-master komunikaci (měřeno u M1/100kHz/15V)

Na Obrázku 64 a 65 můžeme vidět ten samý problém ztráty arbitráže tentokrát na straně 15V. Na straně vysílače je strmota hodinového signálu $0,628 \pm 2,736E-3 \text{ V}/\mu\text{s}$ s překmitem 0,5 % při frekvenci 10 kHz. Při frekvenci 100 kHz je strmota SCL rozšířené strany sběrnice $0,639 \pm 2,980E-3 \text{ V}/\mu\text{s}$ s podkmitem náběžné hrany 1%. Tyto hodnoty jsou měřeny při konstantní vzdálenosti 9,1 m.

Závěrem lze říci, že možnost multi-master komunikace ve spojení s extenderem P82B96 byla potvrzena, protože nalezený problém s nečekanou ztrátou arbitráže se opakoval i při vyřazení extenderů ze zapojení. Pro úspěšné vyřešení této situace bude zapotřebí další studium, které však přesahuje rozsah této práce a z časových důvodů po dohodě s vedoucím práce již nebude realizováno.

10.7 Komunikace s dlouhými pakety – displej

Pro komunikaci s dlouhými pakety byl zvolen grafický LCD displej BO9864BFPPHH [10] od firmy Bolymin. Tento displej má integrovanou podporu sběrnice I²C, ale pracuje s 3,3 V logikou. Je tedy nutné upravit výstupní napěťovou úroveň extenderu z 5 V na 3,3 V. Při měření statistických parametrů signálu s displejem bylo naměřeno přibližně 3000 hodnot strmostí, ve srovnání s komunikací s teplotními čidli LM75A za stejný časový úsek bylo naměřeno přibližně 15 hodnot strmostí.



Obrázek 66. Průběh komunikace s displejem BO9864BFPPHH

Obrázek 66 ukazuje průběh komunikace s displejem BO9864BFPPHH, hodinový signál SCL (červená) a datový signál SDA (modrá) na straně 5 V při konstantní frekvenci 10 kHz a vzdálenosti 7,5 m. Strmost hrany hodinového signálu SCL při vzdálenosti 1 m je $0,549 \pm 2,119E-3$ V/ μ s s úrovní logické jedničky $2,72 \pm 5,74E-1$ V. Při vzdálenosti 7,5 m je strmost hodinového signálu SCL $0,366 \pm 2,338E-3$ V/ μ s s úrovní logické jedničky $2,69V \pm 4,12E-1$ V. Je vidět, že proti předchozím měřením, se tvar signálu již při 10 kHz a malé vzdálenosti deformuje.

11 ZÁVĚR

V první části jsou vysvětleny vlastnosti a principy sběrnic RS485, CAN a I²C. Z hlediska propojení na větší vzdálenost řádu stovek metrů je nejlépe koncipována sběrnice RS485 a CAN. Na takových vzdálenostech bohužel nemůžeme použít I²C sběrnici, kterou limituje celková kapacita vedení 400 pF. S pomocným obvodem, můžeme celkovou kapacitu zvětšit až na 4000 pF.

V druhé části práce se zabýváme měřením parametrů hodinového a datového signálu sběrnice I²C. Signifikantním parametrem pro popis těchto signálů je strmost hran. Dále měříme hodnotu vysoké logické úrovně, překmit a podkmit na hranách signálu. Měření probíhalo v několika konfiguracích. Kapitola 10.1 ukazuje, jak se mění parametry signálů s proměnnou délkou kabeláže v závislosti na frekvenci. Byl potvrzen předpoklad, že s rostoucí délkou kabeláže se horší kvalita signálů sběrnice I²C. S rostoucím počtem extenderů, jak ukazuje kapitola 10.2 se výrazně nemění kvalita signálu. Ovšem s rostoucí frekvencí se opět projevuje pokles strmosti. Při dynamickém měření s extendery jsme zjistili, že progrese mezi vstupním a výstupním signálem je řádově stovky nanosekund (kapitola 10.3). Kapitola 10.5 se zabývá komunikací na sběrnici mezi dvěma procesory Atmega8A a potvrzuje, že je tato komunikace možná i při větších vzdálenostech. Ověření možnosti multi-master komunikace na dlouhých vzdálenostech ukazuje kapitola 10.6. Tento režim je s použitím extenderů P82B96 možný, ale nastává zde problém s arbitrací mezi procesory. Pro úspěšné vyřešení této situace bude zapotřebí další studium, které však přesahuje rozsah této práce a z časových důvodů po dohodě s vedoucím práce již nebude realizováno. Poslední kapitola 10.7 ověřuje funkčnost komunikace na sběrnici I²C se zařízením, které posílá dlouhé pakety dat. V našem případě se jedná o grafický LCD displej BO9864BFPPHH od firmy Bolymin. Dále byl proveden sedmidenní nepřetržitý test stability se sedmi připojenými čidly LM75A při frekvenci hodinového signálu 10,5 kHz. Během tohoto testu nebyly zjištěny žádné problémy. Budou provedeny další dlouhodobé testy stability, ale ty již nejsou součástí této bakalářské práce.

12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PATA, Jaroslav. *Senzorický systém mobilního robotu* [online]. 2008 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4714. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [2] KOLLÁR, Tomáš. *Programovatelný termostat* [online]. 2010 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27060. Diplomová práce. VUT Brno.
- [3] NXP B.V. *P82B96: datasheet* [online]. 2009 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/P82B96.pdf
- [4] NXP B.V. *P82B715: datasheet* [online]. 2009. vyd. [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/P82B715.pdf
- [5] DUDÁČEK, K. *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN* [online]. 2005 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~dudacek/NMS/NMS_hlavni.htm.
- [6] POUCHA, Pavel. *Přenos dat po linkách RS485 a RS422* [online]. 1999 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/prenos-dat-po-linkach-rs485-a-rs422.html>.
- [7] PRAX, Jakub. *Využití I2C sběrnice s externím zařízením* [online]. 2007 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/BMPT/media/projekty/prax.pdf>. Diplomová práce. VUT Brno.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS. *Transition Measurements* [online]. [cit. 22.5.2015]. Dostupný pod licencí © 2015 National Instruments Corporation na WWW: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvwave/transition_measurements/
- [9] ATMEL. ATmega8A [online]. [cit. 22.5.2015] Dostupný pod licencí © Atmel Corporation na WWW: <http://www.atmel.com/devices/atmega8a.aspx>
- [10] BOLYMIN. BO9864B [online]. [cit. 22.5.2015] Dostupný na WWW: http://www.soselectronic.cz/a_info/resource/d/bolymin/BO9864B_series_VER01.pdf
- [11] NXP SEMICONDUCTORS. LM75A [online]. [cit. 22.5.2015] Dostupný pod licencí ©2006-2015 NXP Semiconductors na WWW: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LM75A.pdf

13 PŘÍLOHY

Příloha 1. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 5 V SCL v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m]

l	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
5,5	10	0,710	7,715E-04	5,951E-07	4,29	1,00E-01	1,00E-02				
	31	0,713	2,789E-03	7,778E-06	4,29	8,00E-02	6,40E-03	0,20		0,73	
	40	0,721	8,507E-04	7,236E-07	4,29	7,00E-02	4,90E-03		1,23	1,40	
	51	0,730	1,641E-02	2,691E-04	4,29	7,00E-02	4,90E-03		5,80	3,56	
	100	0,788	3,028E-02	9,169E-04	4,29	5,00E-02	2,50E-03	0,20	0,48	6,29	
18,6	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,702	1,077E-03	1,159E-06	4,28	9,00E-02	8,10E-03				
	31	0,707	2,296E-03	5,271E-06	4,29	8,00E-02	6,40E-03		0,34	0,74	
	40	0,701	6,534E-03	4,269E-05	4,29	5,00E-02	2,50E-03			2,07	
30,1	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,704	1,273E-03	1,621E-06	4,29	6,00E-02	3,60E-03				
	31	0,707	3,092E-03	9,559E-06	4,29	5,00E-02	2,50E-03			0,88	
41,7	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,663	3,405E-04	1,159E-07	4,28	1,00E-01	1,00E-02	0,19			
	31	0,664	9,680E-04	9,371E-07	4,29	8,00E-02	6,40E-03			0,87	
47,5	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,637	3,413E-04	1,165E-07	4,29	1,00E-01	1,00E-02				
	31	0,639	1,471E-03	2,164E-06	4,29	6,00E-02	3,60E-03			0,97	
85	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,515	1,259E-03	1,584E-06	4,29	1,10E-01	1,21E-02				
	31	0,519	8,642E-04	7,469E-07	4,29	5,00E-02	2,50E-03	0,19		1,02	
100	f	strmost 5V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,522	3,967E-03	1,574E-05	4,29	5,00E-02	2,50E-03		0,22	1,75	
	31	0,537	6,038E-03	3,646E-05	4,29	9,00E-02	8,10E-03	0,20		2,95	
100	0,525	3,379E-03	1,142E-05	4,29	7,00E-02	4,90E-03	0,19		88,81		

Příloha 2. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 5 V SDA v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m]

f [kHz]	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,713	6,815E-04	4,644E-07	4,28	1,10E-01	1,21E-02	0,60			
31	0,693	5,008E-02	2,508E-03	4,28	1,00E-01	1,00E-02	0,92			3,09
40	0,711	2,105E-02	4,433E-04	4,28	4,00E-02	1,60E-03	0,53	0,52		2,21
51	0,709	9,280E-04	8,612E-07	4,28	5,00E-02	2,50E-03	0,59	0,46		1,39
100	0,720	8,951E-04	8,011E-07	4,28	6,00E-02	3,60E-03	0,98			
f	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,713	1,392E-03	1,937E-06	4,27	1,40E-01	1,96E-02	1,02			0,26
31	0,710	4,190E-03	1,755E-05	4,28	9,00E-02	8,10E-03	0,60			2,62
40	0,710	1,997E-03	3,990E-06	4,28	8,00E-02	6,40E-03	0,60			2,33
51	0,719	8,966E-03	8,038E-05	4,28	8,00E-02	6,40E-03				
100	0,733	4,388E-02	1,925E-03	4,28	7,00E-02	4,90E-03	0,19	0,78		2,99
f	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,713	1,540E-03	2,371E-06	4,27	9,00E-02	8,10E-03	1,01			
31	0,693	4,100E-02	1,681E-03	4,27	1,30E-01	1,69E-02	1,28		0,87	
40	0,608	2,351E-01	5,528E-02	4,27	9,00E-02	8,10E-03	1,54	8,06	2,18	
51	0,706	2,828E-03	7,998E-06	4,27	3,00E-02	9,00E-04	1,00	0,30		1,40
100	0,711	5,818E-03	3,384E-05	4,27	5,00E-02	2,50E-03	1,79			
f	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,671	6,503E-03	4,229E-05	4,27	1,70E-01	2,89E-02	0,60			
31	0,670	6,571E-03	4,318E-05	4,27	4,00E-02	1,60E-03	0,60			2,20
40	0,658	2,633E-02	6,933E-04	4,27	9,00E-02	8,10E-03	0,95			2,25
51	0,649	1,718E-02	2,953E-04	4,27	4,00E-02	1,60E-03	0,59			1,39
100	0,673	1,917E-02	3,676E-04	4,27	7,00E-02	4,90E-03	0,98			
f	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,646	7,479E-03	5,594E-05	4,27	1,00E-01	1,00E-02	0,60	0,24		
31	0,646	6,343E-03	4,024E-05	4,27	1,10E-01	1,21E-02	0,60	0,27	0,58	
40	0,645	8,103E-03	6,566E-05	4,27	5,00E-02	2,50E-03	0,60			1,80
51	0,649	9,865E-03	9,732E-05	4,28	6,10E-01	3,72E-01				
100	0,661	1,542E-02	2,378E-04	4,28	3,00E-02	9,00E-04				
f	strmost 5V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
[kHz]	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	0,520	2,615E-03	6,839E-06	4,28	9,00E-02	8,10E-03	0,60			0,20
31	0,520	1,302E-03	1,695E-06	4,28	7,00E-02	4,90E-03	0,60			1,80
40	0,516	1,071E-02	1,148E-04	4,28	1,00E-01	1,00E-02	0,60		2,87	
51	0,503	6,599E-04	4,354E-07	4,28	4,00E-02	1,60E-03	0,59			0,99
100	0,533	3,811E-03	1,453E-05	4,28	4,00E-02	1,60E-03	0,59		0,23	

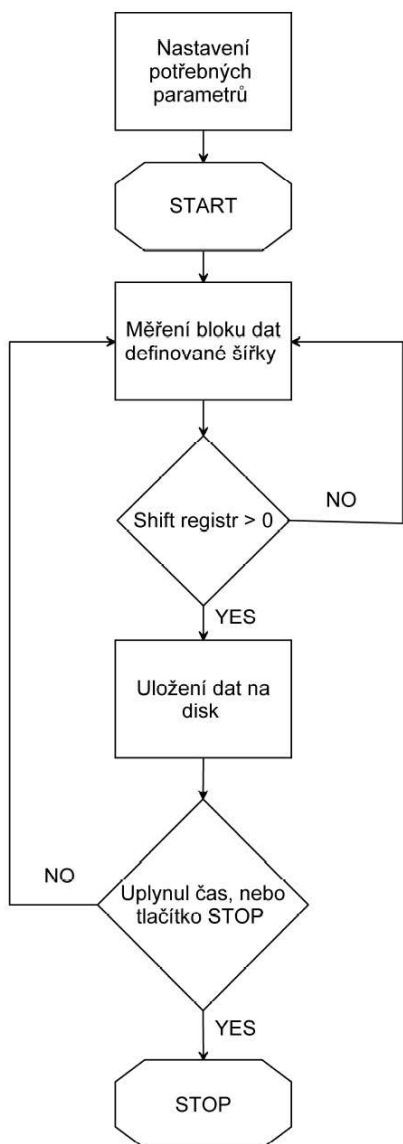
Příloha 3. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/μs] a vypočtených statistických parametrů signálu 15 V SCL v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m]

l	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
5,5	10	2,208	8,495E-03	7,216E-05	3,84	1,10E-01	1,21E-02			0,19	
	31	2,211	1,031E-02	1,064E-04	3,84	5,00E-02	2,50E-03	0,20			
	40	2,206	1,405E-02	1,974E-04	3,84	4,00E-02	1,60E-03				
	51	2,215	2,762E-03	7,627E-06	3,84	4,00E-02	1,60E-03		0,21		
	100	2,213	5,705E-03	3,255E-05	3,84	5,00E-02	2,50E-03			0,20	
18,6	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	1,233	5,273E-03	2,781E-05	3,82	6,00E-02	3,60E-03				
	31	1,229	4,879E-03	2,380E-05	3,82	5,00E-02	2,50E-03				
	40	1,227	1,983E-03	3,933E-06	3,82	4,00E-02	1,60E-03	0,24		0,20	
30,1	51	1,235	6,290E-03	3,956E-05	3,82	5,00E-02	2,50E-03		0,28		
	100	1,244	4,077E-03	1,662E-05	3,81	3,00E-02	9,00E-04	0,85		7,33	
	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
41,7	10	0,808	1,483E-03	2,199E-06	3,81	8,00E-02	6,40E-03				
	31	0,811	2,732E-03	7,462E-06	3,81	7,00E-02	4,90E-03				
	40	0,812	2,698E-03	7,279E-06	3,81	6,00E-02	3,60E-03	0,62			1,84
	51	0,818	1,350E-02	1,821E-04	3,81	5,00E-02	2,50E-03	1,23		0,20	
	100	0,836	9,870E-03	9,741E-05	3,81	6,00E-02	3,60E-03	3,68		0,24	
47,5	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,610	1,682E-03	2,829E-06	3,80	7,00E-02	4,90E-03	0,22		0,59	
	31	0,614	9,555E-04	9,129E-07	3,81	4,00E-02	1,60E-03				
85	40	0,617	5,485E-03	3,008E-05	3,80	5,00E-02	2,50E-03	4,98		1,40	
	51	0,631	5,080E-03	2,580E-05	3,81	4,00E-02	1,60E-03		22,22	1,92	
	100	0,682	3,678E-03	1,353E-05	3,81	4,00E-02	1,60E-03	0,20		3,00	
	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
	[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]	
5,5	10	0,540	1,803E-03	3,250E-06	3,79	1,30E-01	1,69E-02	0,20			0,23
	31	0,543	1,969E-03	3,877E-06	3,80	4,00E-02	1,60E-03				
	40	0,548	2,890E-03	8,353E-06	3,80	6,00E-02	3,60E-03			1,58	
	51	0,571	1,019E-04	1,039E-08	3,80	2,00E-02	4,00E-04		22,45	2,11	
	100	0,634	5,562E-03	3,093E-05	3,80	3,00E-02	9,00E-04	0,20		3,13	
18,6	f	strmost 15V SCL			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SCL}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/μs]	[V/μs]	[V/μs]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,323	2,500E-04	6,249E-08	3,79	6,00E-02	3,60E-03				
	31	0,341	4,254E-02	1,810E-03	3,79	5,00E-02	2,50E-03				
30,1	40	0,355	2,651E-02	7,026E-04	3,79	4,00E-02	1,60E-03			7,16	
	51	0,405	1,192E-03	1,420E-06	3,74	4,00E-02	1,60E-03	0,20	12,31		
	100	0,442	2,170E-03	4,707E-06	3,68	4,00E-02	1,60E-03	0,28		3,25	

Příloha 4. Tabulka naměřených hodnot strmostí s [V/ μ s] a vypočtených statistických parametrů signálu 15 V SDA v závislosti na frekvenci f [kHz] a vzdálenosti l [m]

l	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
		\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
5,5	10	2,179	3,276E-03	1,073E-05	3,83	7,00E-02	4,90E-03				
	31	2,181	3,271E-03	1,070E-05	3,83	7,00E-02	4,90E-03	0,47			
	40	2,185	3,280E-03	1,076E-05	3,83	5,00E-02	2,50E-03	0,23			
	51	2,184	3,245E-03	1,053E-05	3,83	4,00E-02	1,60E-03	0,25			
	100	2,185	3,272E-03	1,071E-05	3,83	4,00E-02	1,60E-03	0,20			
18,6	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	1,210	6,701E-04	4,491E-07	3,81	5,00E-02	2,50E-03	0,60			
	31	1,212	3,203E-03	1,026E-05	3,81	1,10E-01	1,21E-02	1,41		6,61	
	40	1,213	9,375E-04	8,790E-07	3,81	5,00E-02	2,50E-03	0,60			
51	1,214	9,898E-03	9,797E-05	3,81	4,00E-02	1,60E-03	0,60			1,80	
100	1,273	9,671E-02	9,353E-03	3,81	6,00E-02	3,60E-03					
30,1	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,785	1,068E-03	1,140E-06	3,79	6,00E-02	3,60E-03	0,60		0,29	
	31	0,787	2,707E-04	7,329E-08	3,79	4,00E-02	1,60E-03	0,60			
	40	0,788	6,890E-04	4,747E-07	3,79	3,00E-02	9,00E-04	0,59			1,30
51	0,782	9,474E-04	8,976E-07	3,79	3,00E-02	9,00E-04	0,60			0,99	
100	0,819	1,012E-01	1,024E-02	3,79	6,00E-02	3,60E-03	1,79			2,78	
41,7	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,604	1,400E-03	1,960E-06	3,79	1,00E-01	1,00E-02	0,60			
	31	0,605	2,574E-04	6,625E-08	3,80	4,00E-02	1,60E-03	0,57			1,39
	40	0,600	1,954E-03	3,818E-06	3,80	5,00E-02	2,50E-03	2,22			1
51	0,609	1,241E-02	1,541E-04	3,80	5,00E-02	2,50E-03					
100	0,903	2,115E-02	4,473E-04	3,80	5,00E-02	2,50E-03	2,6	0,2	3,65		
47,5	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,644	1,778E-01	3,161E-02	3,79	1,20E-01	1,44E-02	0,76	3,09	0,21	
	31	0,545	1,250E-02	1,562E-04	3,79	3,00E-02	9,00E-04				1,39
	40	0,539	8,266E-03	6,833E-05	3,79	4,00E-02	1,60E-03	0,37			0,99
51	0,542	3,467E-03	1,202E-05	3,79	3,00E-02	9,00E-04	0,59			0,53	
100	0,546	2,938E-04	8,632E-08	3,79	5,00E-02	2,50E-03			0,57		
85	f	strmost 15V SDA			LOG 1			vzestupná hrana		sestupná hrana	
	$[\text{kHz}]$	\bar{s}	σ	σ^2	\bar{U}_{SDA}	σ	σ^2	podkmit	překmit	podkmit	překmit
		[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V/ μ s]	[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[%]
	10	0,325	2,804E-04	7,861E-08	3,78	1,10E-01	1,21E-02		9,83		
	31	0,322	6,212E-04	3,858E-07	3,79	6,00E-02	3,60E-03		0,33		
	40	0,326	3,862E-03	1,492E-05	3,79	8,00E-02	6,40E-03	0,57		2,71	0,27
51	0,336	6,926E-03	4,798E-05	3,79	5,00E-02	2,50E-03	0,55		2,04		
100	0,345	4,598E-03	2,114E-05	3,79	2,00E-02	4,00E-04			4,87		

Příloha 5. Vývojový diagram programu pro sběr dat



Příloha 6. Vývojový diagram programu pro měření parametrů signálu

