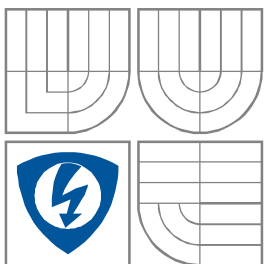


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## AUTOMATIZOVANÉ PRACOVIŠTĚ PRO STEJNOSMĚRNÁ A STRÍDAVÁ MĚŘENÍ

AUTOMATED STATION FOR DC AND AC MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Burian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Koton, PhD.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Josef Burian

**ID:** 119368

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Automatizované pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Využitím prostředí Agilent VEE realizujte automatizované pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření. Systém koncipujte tak, aby na počátku měření byly zadány proudové, napěťové či kmitočtové rozsahy, a po té pracoval zcela samostatně. Navrhněte vhodný způsob ukládání naměřených dat pro další zpracování v Matlabu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Agilent VEE Pro 9.2 & Agilent VEE Express 9.2 Quick Start Guide, Agilent Technologies, April 2010.
- [2] Doňar, B., Zaplatílek, K.: "MATLAB - tvorba uživatelských aplikací", BEN - technická literatura, 2004, ISBN: 80-7300-133-0.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, 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**

Cílem této bakalářské práce je návrh automatizovaného měřicího pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření. Návrh má obsahovat řídicí program celého pracoviště, který bude ukládat naměřená data ve formátu vhodném pro další zpracování. Práce je dělena do několika základních částí. V první části jsou detailně rozebrány možnosti realizace jednotlivých prvků měřicího pracoviště od výběru správných měřicích přístrojů přes výběr použité sběrnice až po potřebný software. V další části je přistoupeno již k samotnému návrhu pracoviště. Je zde popsáno fyzické zapojení celého pracoviště včetně různých variant. Tato část také obsahuje návrh obslužného programu, jednotlivé části programu jsou zde také zevrubně popsány. K tvorbě programu bylo použito prostředí pro virtuální instrumentaci VEE 9.2 od firmy Agilent. Posledním bodem v této části je návrh funkcí pro další zpracování v programu Matlab. Třetí a také poslední část práce je věnována několika provedeným zkušebním měřením, rozboru naměřených hodnot a zhodnocení funkčnosti celého měřicího pracoviště.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

GPIB, VEE, automatizované měření

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis is a design of automated station for DC and AC measurements. The design should contain directing program of the whole station that would save measured data in format suitable for further processing. This thesis is divided into several basic parts. In the first part are in detail described realization possibilities of measuring workplace individual elements beginning with selection of the appropriate measuring devices over choice of bus line to the selection of software. In the next part is explained the design of the workplace itself. There is described physical connection of the whole workplace including different options. This part also contains the design of service program. Each part of the service program is here described in full details. For the program development the environment for virtual instrumentation VEE 9.2 by Agilent company was used. The last issue in this part is a design of functions for other processing in program Matlab. The third and last part of this thesis concerns with some test measurements, analysis of measured values and valuation of the whole measuring workplace functionality.

## **KEYWORDS**

GPIB, VEE, automated measurement

Burian, J. *Automatizované pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011, 40s. Vedoucí semestrální práce: Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Automatizované pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce 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 bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Kotonovi Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

# OBSAH

## Seznam obrázků

Úvod	- 7 -
<b>1 Rozbor automatizovaných měřicích pracovišť</b>	<b>- 8 -</b>
1.1 Měřicí přístroje.....	- 8 -
1.2 Sběrnice GPIB .....	- 9 -
1.3 Agilent VEE 9.2 Pro.....	- 12 -
<b>2 Návrh automatizovaného měřicího pracoviště</b>	<b>- 17 -</b>
2.1 Hardware .....	- 17 -
2.1.1 Pracoviště pro měření stejnosměrných veličin.....	- 17 -
2.1.2 Pracoviště pro měření střídavých veličin.....	- 19 -
2.2 Software.....	- 21 -
2.2.1 Návrh obslužného programu v prostředí VEE.....	- 21 -
2.2.2 Funkce pro zpracování hodnot v Matlabu .....	- 29 -
<b>3 Měřené hodnoty</b>	<b>- 32 -</b>
3.1 Usměrňovač s OZ.....	- 32 -
3.2 Usměrňovač s proudovými konvejory .....	- 33 -
<b>4 Závěr</b>	<b>- 37 -</b>
<b>Literatura</b>	<b>- 38 -</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>- 40 -</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Konektor GPIB.....	- 9 -
Obr. 2: Uspořádání pinů konektoru GPIB (převzato z [12]) .....	- 11 -
Obr. 3: Hvězdicová konfigurace .....	- 11 -
Obr. 4: Lineární konfigurace .....	- 11 -
Obr. 5: Základní okno programu Agilent Connection Expert .....	- 12 -
Obr. 6: Výchozí okno programu Agilent VEE 9.2.....	- 13 -
Obr. 7: Ukázka offline programu .....	- 14 -
Obr. 8: Ukázka online programu.....	- 15 -
Obr. 9: Příklad uživatelského rozhraní (Převzato z modelových programů SW Agilent VEE 9.2).....	- 16 -
Obr. 10: Zapojení měřicího pracoviště pro měření stejnosměrných veličin.....	- 18 -
Obr. 11: Propojení svorek vstupního zdroje .....	- 18 -
Obr. 12: Možnost přepínání mezi zdroji +25 V a -25 V .....	- 19 -
Obr. 13: Zapojení měřicího pracoviště pro měření střídavých veličin.....	- 19 -
Obr. 14: Vývojový diagram vytvořeného programu.....	- 21 -
Obr. 15: První část programu - čekání na stisk některého z tlačítek.....	- 22 -
Obr. 16: Druhá část programu - nastavení pomocného napájecího napětí.....	- 23 -
Obr. 17: Třetí část programu - kontrola zapnutí napájení .....	- 24 -
Obr. 18: Čtvrtá část programu - cyklus stejnosměrného měření.....	- 24 -
Obr. 19: Pátá část programu - první polovina střídavého měření .....	- 26 -
Obr. 20: Šestá část programu - druhá polovina střídavého měření.....	- 27 -
Obr. 21: Sedmá část programu - řešení ukládání a reset přístrojů .....	- 28 -
Obr. 22: Grafické uživatelské rozhraní .....	- 29 -
Obr. 23: Zapojení dvoucestného usměrňovače s OZ (převzato z [19]).....	- 32 -
Obr. 24: Zapojení usměrňovače s proudovými konvejory (převzato z [14]) .....	- 33 -
Obr. 25: Porovnání výsledků stejnosměrných měření.....	- 33 -
Obr. 26: Porovnání průběhů $p_{AVR}$ .....	- 34 -
Obr. 27: Výsledky měření první harmonické .....	- 35 -
Obr. 28: Výsledky měření druhé harmonické vztahené k základní frekvenci.....	- 36 -

# ÚVOD

Měření elektrických veličin je v současné době, ačkoli si to neuvědomujeme, každodenní součástí našeho života. Proto byly v minulosti vyvinuty systémy pro automatizaci těchto měření. Zásadní výhodou automatizovaných měřicích systémů oproti měřením manuálním je mnohonásobně větší rychlost, ze které vyplývá vyšší efektivita. Ve srovnání pořizovacích nákladů je automatizované měřicí pracoviště sice dražší, ale z dlouhodobého hlediska ekonomicky výhodnější. V dnešní době se stále více pracuje na řešeních implementujících PC do těchto měřicích systémů a to hlavně kvůli možnostem, které takovéto spojení nabízejí od zpracování naměřených hodnot přes ukládání a možnosti editace až po možné výstupy.

Tato práce je věnována softwarovému návrhu takového měřicího pracoviště ve vývojovém prostředí VEE 9.2 a následnému zpracování a interpretaci získaných dat za pomoci softwaru Matlab 6.5.

# 1 ROZBOR AUTOMATIZOVANÝCH MĚŘICÍCH PRACOVÍŠŤ

V širším slova smyslu je automatizovaný měřicí systém úplný soubor měřicích přístrojů sloužících k vykonávání daného měření. Automatizované měřicí pracoviště se skládá vždy z několika základních částí. Základní dělení je na HW a SW.

Hardwarem se rozumí jednotlivé měřicí přístroje, zdroje, funkční generátory atd. Tyto přístroje jsou ovládány přes sběrnici z jednoho zdroje, kterým bývá PC. Mezi HW se také řadí samotná komunikační sběrnice, většinou se používá sběrnice GPIB. PC lze propojit k této sběrnici pomocí sériového portu RS-232 nebo moderněji pomocí USB portu, pro tyto možnosti připojení je nutné použít převodník. Další možností je použití tzv. měřicí karty, která se zasouvá do PCI slotu počítače, tyto karty mívají přímo výstupní rozhraní na sběrnici GPIB. Některé moderní přístroje mají v sobě již implementováno síťové rozhraní, je tudíž možno je ovládat pomocí LAN. Při využití tohoto rozhraní je možné ovládat zařízení na téměř neomezenou vzdálenost, stačí pouze mít přístup k síti.

Pod pojmem software si představme programové vybavení, které je zapotřebí mít v PC nainstalováno pro možnost komunikace s jednotlivými přístroji. Toto SW vybavení se v zásadě dělí na tři skupiny.

- a) Ovladače jednotlivých zařízení. Tyto ovladače musí být nainstalovány, aby byl vůbec přístroj rozeznán a bylo nám umožněno s ním pracovat.
- b) Vyšší SW vrstvou jsou už vlastní programy pro práci s přístroji. V dříve se používalo pouze textových programů, kde se zadávaly příkazy a ty byly přímo zpracovávány. V současné době se používají spíše grafická prostředí, tzv. prostředí pro virtuální instrumentaci. Jejich výhodou je hlavně uživatelsky příjemnější rozhraní a možnosti vkládání virtuálních funkčních bloků včetně bloků pro základní zpracování naměřených dat.
- c) Poslední SW vrstvou, která je spíše již nadstavbou a nemusí být použita, jsou programy pro práci, editaci a nadstavbové zpracování naměřených dat. Jsou to většinou matematické programy jako třeba Matlab atp.

## 1.1 Měřicí přístroje

Měřicí přístroje jsou základem, každého měřicího systému. Od jejich kvality a přesnosti se odvíjí přesnost celého systému. Kritérií, podle kterých se měřicí přístroje vybírají je celá řada, proto zde bude představeno pouze několik základních.

Prvním kritériem pro výběr přístrojů, které mohou být použity v automatizovaných měřicích systémech, je jejich rychlost měření. Některé přístroje jsou schopny odebrat až tisíce vzorků za vteřinu, čímž se zvyšuje celková rychlost měřicího systému a tím také efektivita. Rychlost měření jde ale na úkor přesnosti, proto při měření musíme volit přípustný kompromis.

Některé přístroje mohou být tzv. multifunkční, jsou schopny měřit několik různých

veličin. Příkladem takovéhoho přístroje je kupříkladu Agilent 34401A, jedná se o multimetr, který je schopen měřit stejnosměrné i střídavé hodnoty proudu i napětí, dále může měřit frekvenci, propustný směr diod či odpor. Je tedy zřejmé, že takovýto přístroj značně zvyšuje univerzálnost celého měřicího systému.

V neposlední řadě je třeba také myslet na způsob propojení jednotlivých přístrojů mezi sebou nebo s řidičem, kterým bývá v současnosti nejčastěji PC. Existuje celá řada sběrnic, které toto umožňují, tyto sběrnice se ale liší svými možnostmi. Je tedy nutné se zamyslet, k čemu bude měřicí systém sloužit a jaký typ sběrnice by byl tedy optimální.

Posledním, nikoli však nejméně důležitým kritériem, které je třeba při návrhu pracoviště vzít v potaz je cena přístrojů. Je samozřejmé, čím vyšší bude přesnost a univerzálnost měřicího přístroje tím vyšší bude také jeho cena. Proto je třeba si promyslet, k jakým měřením bude pracoviště sloužit a jaká je nutná přesnost.

## 1.2 Sběrnice GPIB

GPIB je univerzální sběrnice pro sběr dat mezi měřicími přístroji různých výrobců. Dále je zde možnost připojit k měřicímu systému PC, které celý přenos dat řídí a může data přímo zpracovávat. Je známá i pod dalšími názvy jako například HP-IB nebo u nás známější název IMS-2 [20]. Jako oficiální označení se používá IEEE-488 v současnosti se spíše používá verze HS488 [21].



Obr. 1: Konektor GPIB

Tato sběrnice byla vyvinuta ke konci šedesátých let minulého století firmou Hewlett-Packard proto také někdy používané označení HP-IB [20]. Vzhledem k vysoké rychlosti, která v první verzi dosahovala 1 MB/s si brzy získala popularitu a díky tomu byla v roce 1975 jednotně standardizována normou IEEE-488. V roce 1987 byla norma revidována (IEEE-488.2 [18]), kde byla přesně definována příkazová sada pro ovládání

přístrojů na této sběrnici, tzv. SCPI. Roku 2003 se tato sběrnice dočkala zatím poslední významné změny a to standardu HighSpeed488 [21]. Jak již samotný název napovídá, v tomto standardu jsou obsažena pravidla pro zvýšení rychlosti, díky kterým je možno na sběrnici GPIB dosáhnout nominální rychlosti až 8 MB/s.

Sběrnice je pasivní a tvoří ji 24 vodičů, z tohoto důvodu se používá konektorů CANON 25. Pouze 16 vodičů je aktivních, některé ze zbývajících vodičů, se používají jako zpětný zemnicí vodič. Jedná se o paralelní sběrnici. Maximální délka sběrnice je 20 m, přičemž dvě zařízení nesmějí být od sebe ve vzdálenosti větší než 4 metry. V případě nutnosti propojení zařízení na vzdálenosti větší než je 20 m, je použito extenderů (zesilovačů), které umožňují přenos na vzdálenosti až 1000 metrů. Sběrnice používá asynchronního přenosu, ten probíhá po bytech a je řízen hardwarově. Je možno připojit až 15 přístrojů, přičemž jejich adresy mohou být v rozsahu 0-30.

Sběrnice GPIB využívá negativní logiky:

- logická 0 > 2,1 V
- logická 1 < 0,8 V

Zařízení připojené na sběrnici může mít několik rolí. V základu si představíme tři nejdůležitější [12]:

a) Řidič (Controller)

- Jeho úkolem je řídit systém, většinou to bývá PC, pokud je na sběrnici připojeno více řidičů, musí být pouze jeden aktivní, všechny ostatní musí být v klidovém stavu. Ten, který je aktivní, se nazývá odpovědný řidič.

b) Mluvčí (Talker)

- Odesílá zprávy na jednoho či více posluchačů.

c) Posluchač (Listener)

- Přijímá data od mluvčích.

Jedno zařízení může zastávat i několik rolí například digitální multimetr může být v jednu chvíli řidič a v jiný okamžik se stává posluchačem. PC s dodatečným SW vybavením může dokonce zastávat v různé okamžiky všechny tři dané funkce.

Sběrnici můžeme rozdělit na 4 základní části:

a) Datové vodiče

- jsou tvořeny vodiči DIO 1 až DIO 8
- přenáší se po nich jednak adresy a povely od řidiče k přístrojům, ale také data od mluvčího k posluchačům

b) Sběrnice přenosu dat

- je tvořena třemi vodiči DAV, NRFD, NDAC  
DAV (data valid) – data platná  
NRFD (not ready for data) – nepřipraven na příjem dat  
NDAC (not data accepted) – data nepřijata
- tato část zajišťuje bezchybný přenos bytů po vodičích, mluvčí čeká na potvrzení od posluchačů, že jsou připraveni data přijmout, dokud se tak nestane, mluvčí data nevyšle

c) Sběrnice řízení styku

- se skládá z pěti vodičů IFC, ATN, SRQ, REN a EOI  
ICF (interface clear) – nulování stykových funkcí, může být ovládána pouze

řidičem, používá se tehdy, když chceme najednou zrušit všechna aktivní spojení mezi přístroji

ATN (attention) – pozor, ovládána řidičem, pokud je hodnota 1 přenášejí se stykové zprávy, při hodnotě 0 jsou přenášeny přístrojové zprávy

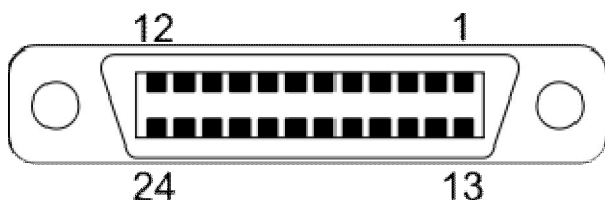
SRQ (service request) – vyžádání obsluhy, informuje řidič o tom, že některý z přístrojů žádá o přerušování a vyžaduje obsluhu

REN (remote enable) – dálkové ovládání povoleno, logické stavy na tomto vodiči ovládá opět řidič, v případě že je přístroj přepnut na dálkové ovládání, musí u něj být vyřazeno ruční ovládání

EOI (end or identify) – konec nebo identifikace, slouží zejména pro vyznačení konce přístrojové zprávy

d) Zemnicí vodiče

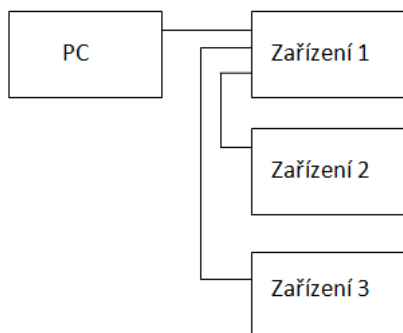
- posledních 8 vodičů, sloužících k uzavírání proudových smyček a stínění



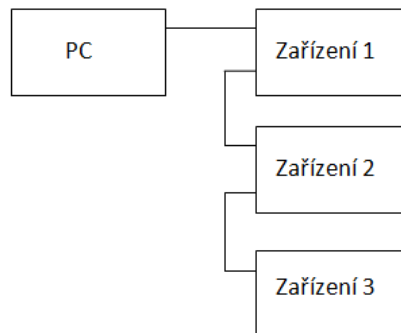
Obr. 2: Uspořádání pinů konektoru GPIB (převzato z [12])

PIN1-4	-> DIO1-4
PIN5	-> EOI
PIN6	-> DAV
PIN7	-> NRFD
PIN8	-> NDAC
PIN9	-> IFC
PIN10	-> SRQ
PIN11	-> ATN
PIN12	-> Stínění
PIN13-16	-> DIO5-8
PIN17	-> REN
PIN18-23	-> GND
PIN24	-> Logická zem

Pro propojování jednotlivých přístrojů je možno použít dvou základních typů topologie, hvězdicové a lineární, jak je uvedeno na Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3: Hvězdicová konfigurace



Obr. 4: Lineární konfigurace

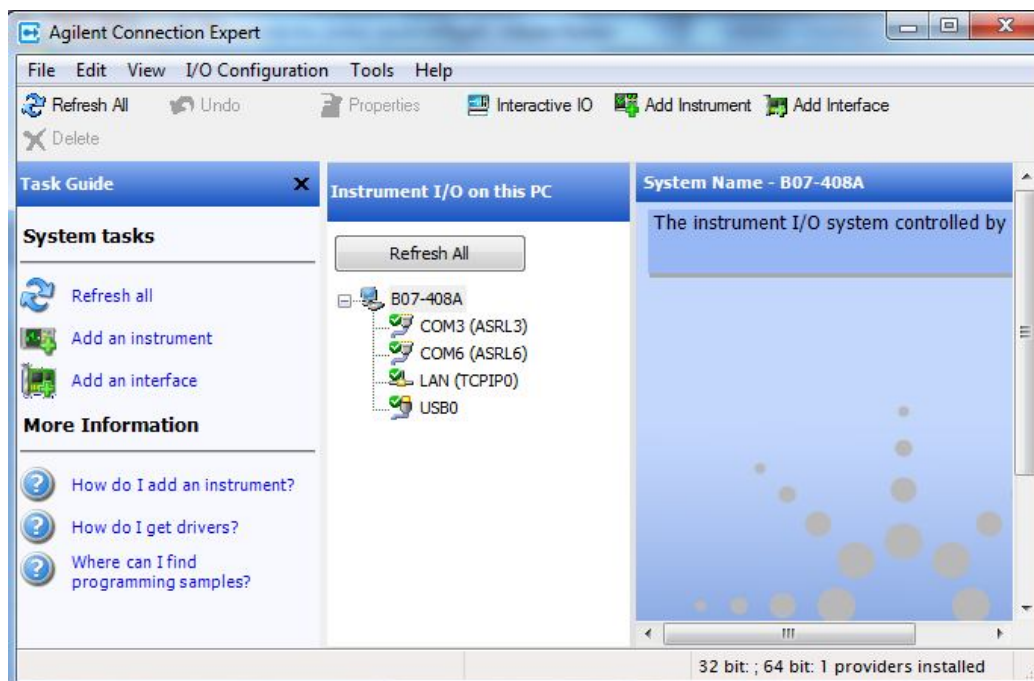
### 1.3 Agilent VEE 9.2 Pro

V současné době se již stává standardem, že měřicí zařízení dovolují možnost jejich ovládání přes GPIB rozhraní. Existuje tak řada vývojových prostředí pro virtuální instrumentaci, kdy snad každý výrobce nabízí vlastní softwarové řešení, podporující především měřicí zařízení ze svého portfolia. Asi nejznámějšími zástupci v této oblasti jsou LabVIEW [17] a Agilent VEE [7].

Proč se vlastně používá virtuální instrumentace? Hlavní výhodou je to, že díky ní je možno nahradit velké množství drahého HW zakoupením příslušného SW, kde je možné pomocí jednotlivých bloků vkládat funkční generátory a další virtuální přístroje.

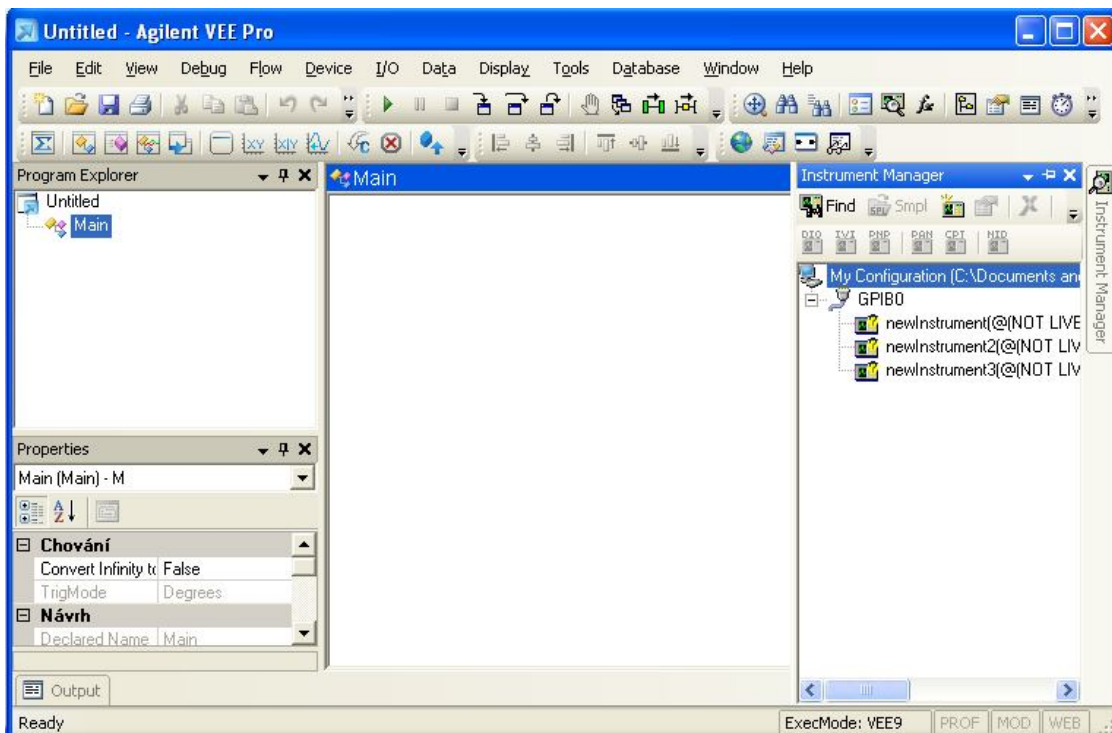
Pro výběr prostředí Agilent VEE 9.2 Pro jsem se rozhodl z několika důvodů. Toto prostředí slouží pro snadné vytváření měřicích systémů, za pomoci uživatelsky příjemného grafického rozhraní. Je vybaveno značným množstvím jednoduchých ale i složitějších modulů pro sběr a zpracování dat a je schopno komunikovat s různými přístroji od různých výrobců připojenými pomocí různých rozhraní, ať již GPIB, RS-232 nebo LAN ale i dalších [7].

Před instalací samotného programu je ještě nutno nainstalovat soubor knihoven IO libraries suite. Tyto knihovny zajišťují samotnou komunikaci mezi VEE a jednotlivými přístroji. Nejdůležitější z těchto knihoven je knihovna VISA. Součástí instalačního balíku je také Agilent Connection Expert Obr. 5. Tento program umožňuje spravovat zařízení připojená k PC. Sleduje jednotlivé sběrnice a vyhledává přístroje na nich připojené, instaluje ovladače a je také možné přímo pomocí něj posílat jednotlivé příkazy na přístroje.



Obr. 5: Základní okno programu Agilent Connection Expert

Po instalaci knihoven je možno přistoupit k instalaci samotného prostředí VEE. Instalace probíhá pomocí klasického průvodce instalací, tudíž je velmi snadná a zvládne ji i uživatel s nižšími počítačovými znalostmi. Po dokončení instalace je možno již začít pracovat. Při spuštění se nám objeví výchozí okno Obr. 6.



Obr. 6: Výchozí okno programu Agilent VEE 9.2

Jak je vidět z Obr. 6, je výchozí okno rozděleno na několik částí:

- a) Základní menu
  - je umístěno nahoře, jako u většiny ostatních aplikací pracujících pod systémy OS Windows a je v něm možno najít všechny dostupné funkce programu, které jsou členěny do jednotlivých skupin pro snazší orientaci
- b) Panely nástrojů
  - jsou umístěny pod základním menu, je možné jednotlivé panely přidávat či ubírat dle potřeby a slouží k rychlému vyhledávání jednotlivých funkcí místo složitějšího vyhledávání v menu
- c) Program explorer
  - jeho výchozí umístění je vlevo nahoře pod panely nástrojů, zobrazuje nám strukturu celého projektu
- d) Properties
  - toto okno je umístěno pod oknem program exploreru, zobrazuje nám jednotlivé vlastnosti vybraného objektu a je zde také možné snadno tyto vlastnosti editovat
- e) Main
  - jedná se o základní okno, je umístěno uprostřed obrazovky a probíhá v něm samotná práce v projektu, vkládají se do něho jednotlivé objekty cesty apod.

f) Instrument manager

- je posledním oknem, které se zobrazí po prvním spuštění programu, slouží k základním pracem s přístroji připojenými na sběrnici, jako je vyhledávání těchto přístrojů, vkládání nových přístrojů atd.

Samozřejmě je možné tato okna odebírat, či přidávat další, ale toto bylo pouze představení základních nejdůležitějších oken, která jsou potřeba při práci v programu.

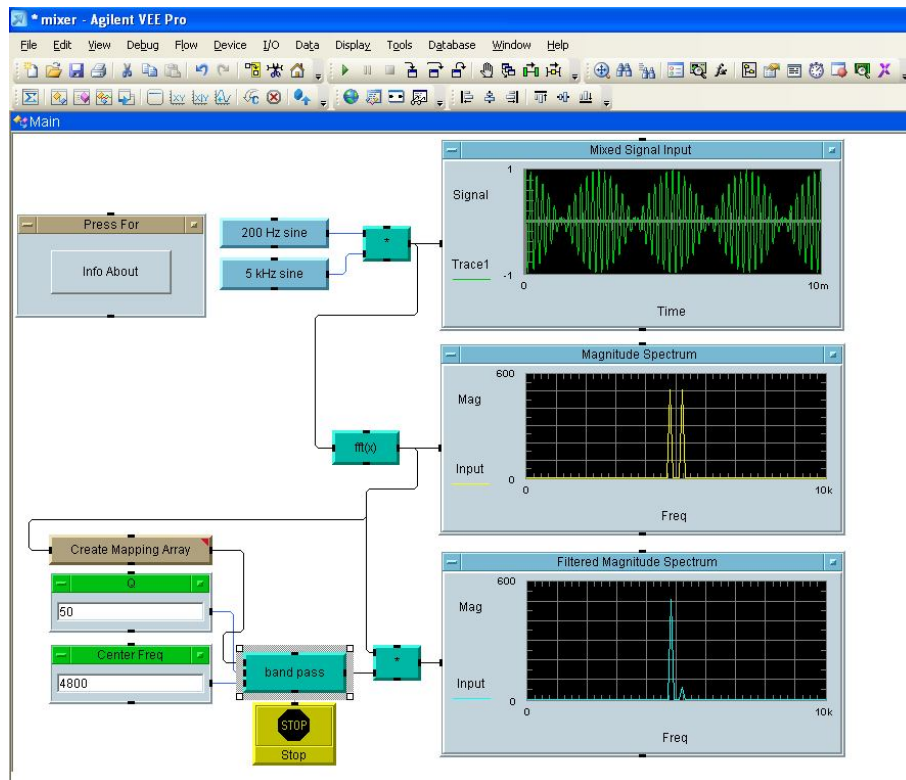
Programy vytvořené ve VEE lze rozdělit do dvou základních skupin a to online programy a offline programy podle toho zda je použito HW měřicích přístrojů či ne.

Offline programy pracují bez připojených měřicích přístrojů a skládají se pouze z SW bloků, jako jsou funkční generátory, matematické funkce pevně zadané vstupní proměnné apod. Dalo by se tedy říci, že offline programy jsou spíše zjednodušenou obdobou prostředí simulink v programu Matlab [16].

Na Obr. 7 je vidět struktura offline programu. Jako příklad byl použit jeden z modelových programů, které jsou k dispozici po instalaci prostředí VEE. V programu je použito dvou sinusových generátorů, několika matematických modulů, které slouží jako násobička, modul pro FFT a pásmová propust. Výsledky simulace jsou zobrazeny v příslušných grafech.

Hlavní silou programu VEE je ovšem tvorba tzv. online programů. To jsou programy, kde se již používá externích přístrojů připojených k PC pomocí různých sběrnic. Samozřejmě je i do těchto programů možno vkládat další funkční bloky.

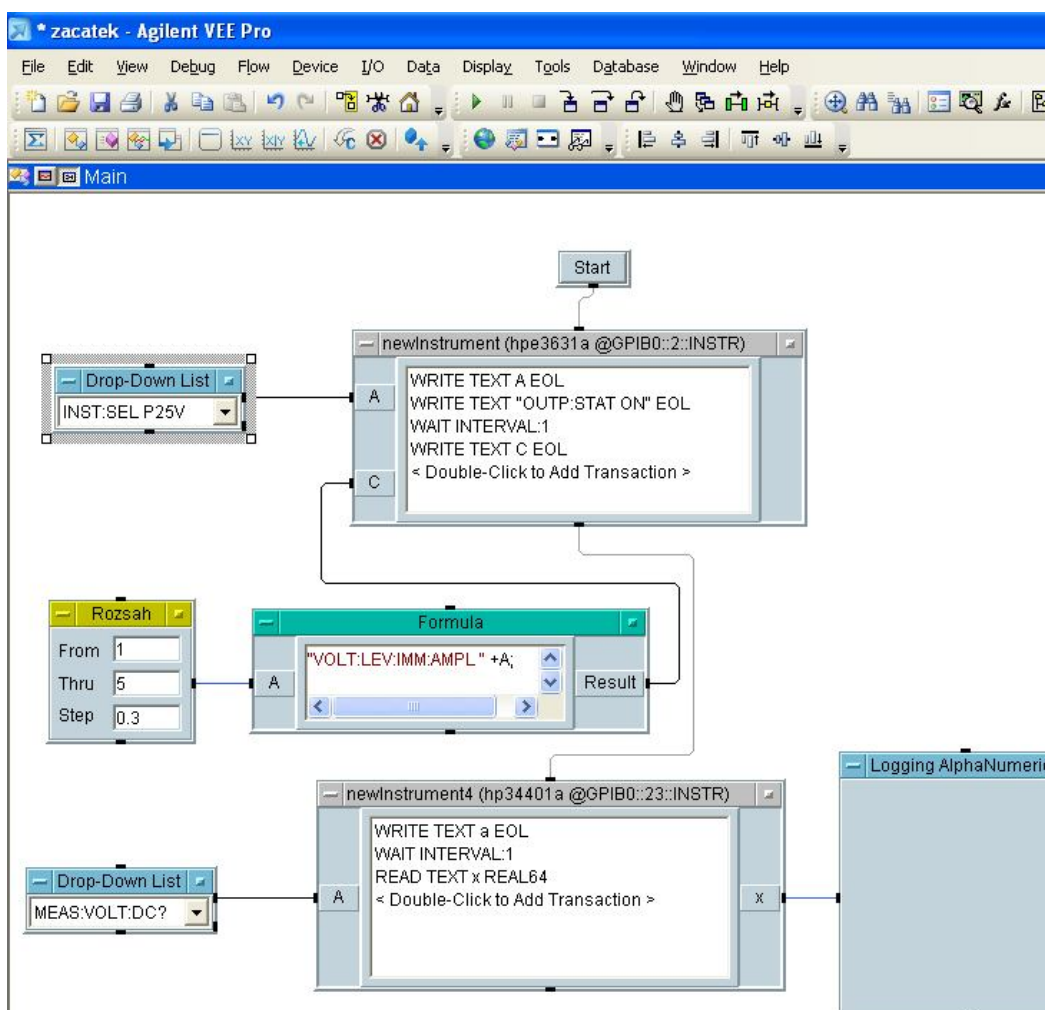
Před samotnou prací je nejprve nutno vyhledat si ke každému z přístrojů příslušnou příkazovou sadu. Většina výrobců používá v současné době normalizované příkazové sady tzv. SCPI.



Obr. 7: Ukázka offline programu

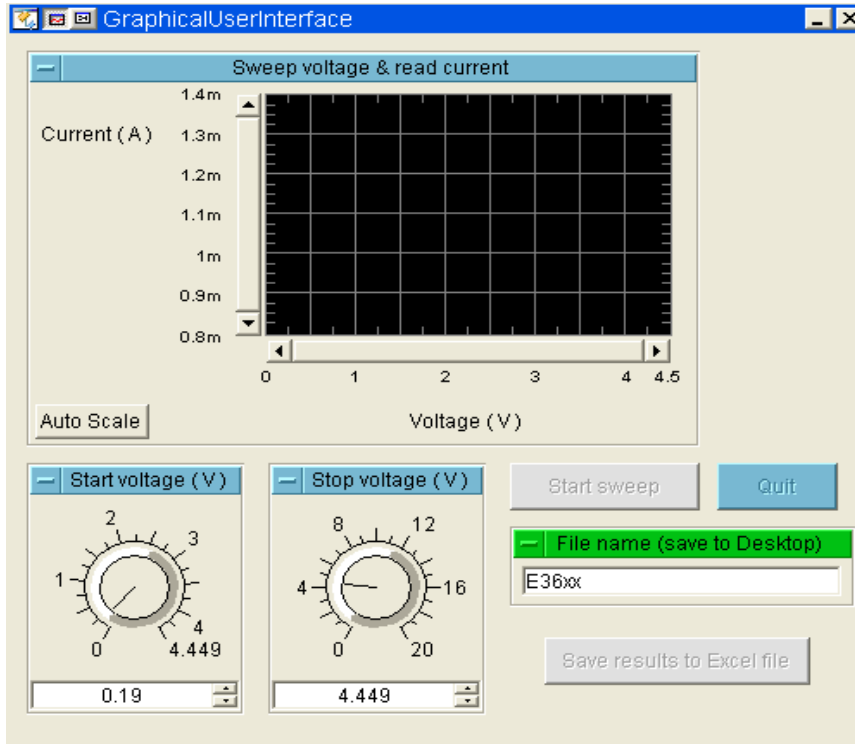
Obr. 8 představuje jednoduchý online program. Tento program pracuje se dvěma přístroji připojenými k PC. Ze záhlaví bloku přístroje je možno vyčíst základní informace o tomto přístroji. Lze tak určit název přístroje, typ, sběrnici ke které je přístroj připojen a také adresu tohoto přístroje na sběrnici. V tomto případě bylo použito dvou různých přístrojů, a to napájecího zdroje Agilent 3631A, který byl připojen na sběrnici GPIB0 jehož adresa byla 2 a multimetru Agilent 34401A, který byl připojen na tutéž sběrnici, a jehož adresa byla 23. dále bylo použito několik dalších funkčních bloků, cykly počínaje, alfanumerickým displejem konče.

Jak je vidět programování za pomoci grafického rozhraní je uživatelsky přijatelnější, srozumitelnější a výrazně zkracuje délku psaného zdrojového kódu. Jednotlivé bloky mohou být spojovány vertikálně nebo horizontálně, může také dojít ke kombinaci těchto propojení. Vertikální spojení znamenají logickou posloupnost běhu programu, kdežto horizontální vedení vyjadřují linky pro přenos dat. Jednotlivá vedení se připojují k blokům na vyznačené body, tzv. piny. Pokud přijde signál na pin připojený k horní straně bloku je tento blok inicializován, po vykonání tohoto bloku se předává impuls výstupním pinem na spodní straně bloku, bloku následujícímu. Na pin nacházející se na levé straně bloku jsou přiváděna vstupní data, pin vpravo odvádí data výstupní.



Obr. 8: Ukázka online programu

Ačkoliv je práce v prostředí pro virtuální instrumentaci o mnoho snazší než v klasickém textovém editoru, byla by tato práce pro normální uživatele stále velmi složitá. Proto se pro každý program vytváří ještě tzv. grafický výstup. V principu jde o to, že programátor sestaví měřicí program, vytvoří k němu odpovídající grafický výstup a běžný uživatel již pracuje pouze s tímto výstupem, v něm nastaví potřebná vstupní data, požadované výstupy a program již provede veškerou práci sám. Veškeré programy vytvořené v programu Agilent VEE pracují s příponou \*.vee.



Obr. 9: Příklad uživatelského rozhraní (Převzato z modelových programů SW Agilent VEE 9.2)

## 2 NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO MĚŘICÍHO PRACOVIŠTĚ

### 2.1 Hardware

Při návrhu tohoto pracoviště byly k dispozici následující přístroje.

Laboratorní zdroj Agilent E3631A [3].

- 3 výstupní stejnosměrné zdroje napětí 6V, 25V a -25V
- možnost řízení pomocí rozhraní RS-232 nebo GPIB
- kompatibilita s SCPI

Multimetry Agilent 34401A [2].

- 6 ½ místný digitální display
- možnost použití matematických operací přímo v průběhu měření
- komunikace pomocí rozhraní RS-232 a GPIB
- kompatibilita s SCPI
- interní paměť pro 512 měření
- rychlost čtení přes 1000 čtení/s

Funkční generátor signálů do 20 MHz Agilent 33220A [1].

- sinusové a obdélníkové signály až do 20 MHz
- tvar signálu: sinus, rampa, obdélník, šum a stejnosměrné průběhy
- lineární i logaritmické rozmítání a burst mód
- rozhraní GPIB, USB a LAN
- kompatibilita s SCPI

Spektrální analyzátor Agilent 4395A [5].

- rozsah měření 10 Hz – 500 MHz
- možnost síťové, spektrální a impedanční analýzy
- rozhraní GPIB
- kompatibilita s SCPI

Aktivní sonda Agilent 41800A [4].

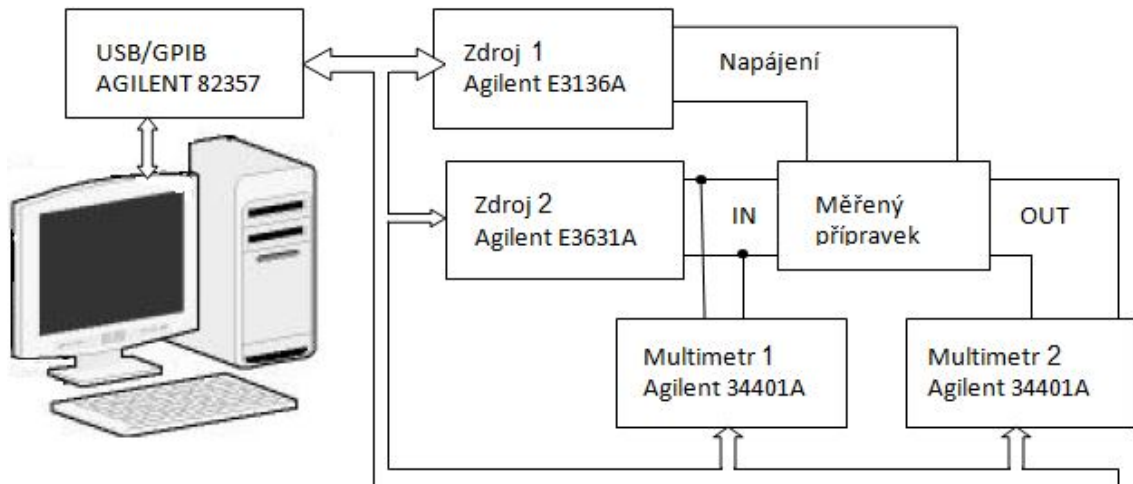
- šířka pásma 5 Hz – 500 MHz
- typické hodnoty  $R = 100 \text{ k}\Omega$  a  $C = 3 \text{ pF}$
- probe gain 0 dB

#### 2.1.1 Pracoviště pro měření stejnosměrných veličin

Smyslem stejnosměrných měření je u měřeného přípravku otestovat limitní hodnoty amplitud zpracovávaného signálu. Toho se dosáhne tím, že se vstup zařízení bude budit známým napětím, či proudem a na výstupu budeme dle potřeb snímat napětí či proud. Z výsledných hodnot, lze pak snadno určit, v jakém rozmezí vstupních hodnot se dá přípravek ještě použít a kde již dochází ke zkreslení, dále lze také určit dynamiku převodu signálu.

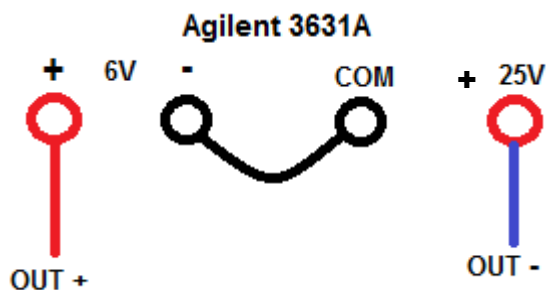
Pro pracoviště na měření stejnosměrných veličin bylo použito dvou zdrojů

Agilent E3631A a dvou multimetrů Agilent 34401A. Tyto měřicí přístroje byly spojeny s PC pomocí sběrnice GPIB. Zapojení pracoviště odpovídá Obr. 10. Každý z přístrojů na sběrnici musí mít svou adresu, která je na sběrnici jedinečná, aby bylo možno příkazy jednoznačně adresovat a naopak, aby data posílaná z přístroje byla správně přiřazena.



Obr. 10: Zapojení měřicího pracoviště pro měření stejnosměrných veličin

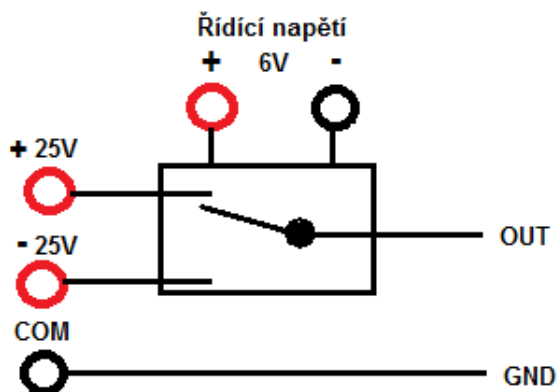
Zdroj 1 slouží pouze k napájení měřeného přípravku, pokud by nebylo přípravku potřeba napájet, byl by tento zdroj nadbytečný. Zdroj číslo 2 je již zdrojem samotného signálu, na jehož výstupu je definované napětí. Obecně je toto napětí známé, ale z důvodu přesného měření je na vstup měřeného přípravku ještě připojen multimetr 1. Z multimetru číslo 2 získáváme výstupní hodnoty měřeného přípravku.



Obr. 11: Propojení svorek vstupního zdroje

Aby bylo možno dosahovat při měření kladných i záporných hodnot napětí bez nutnosti jakéhokoliv přepojování kabelů bylo nutno propojit zdroj podle Obr. 11. Jak je patrné bylo použito dvou samostatných zdrojů napětí na přístroji Agilent 3631A a to zdroje P6V a zdroje P25V. Tyto zdroje byly propojeny svými zápornými póly, čímž došlo k jejich sériovému řazení. Jelikož jsou polarity zdrojů zapojeny proti sobě je možno dosáhnout napětí v rozsahu -19 V až 6 V což je pro většinu měření na tomto měřicím pracovišti dostatečné. Pokud by ale byl tento rozsah nedostatečný, bylo by nutné použít jiný napěťový zdroj, nebo v případě napěťového rozsahu - 25 V až 25 V lze použít externího přepínání zdrojů P25V a N25V jak je uvedeno na Obr. 12.

## Agilent E3631A

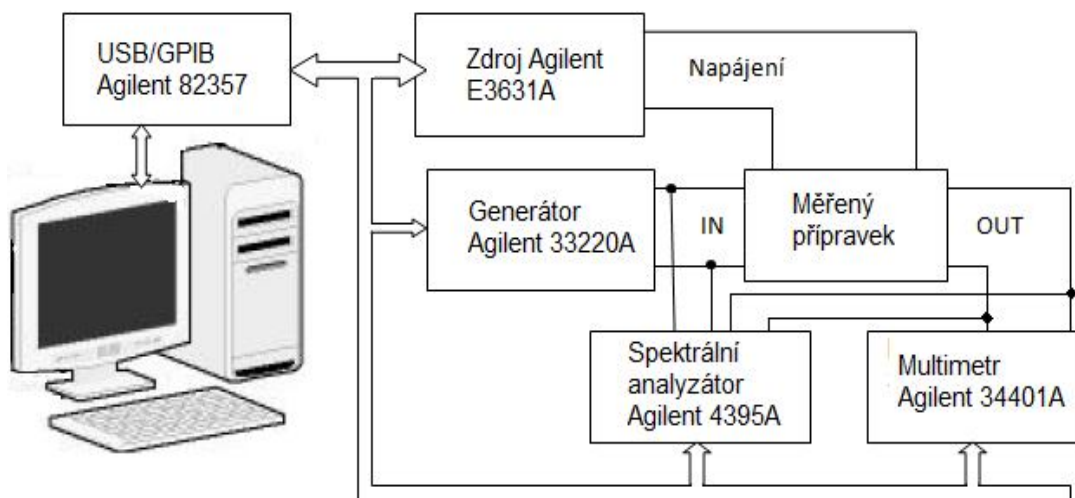


Obr. 12: Možnost přepínání mezi zdroji +25 V a -25 V

Jak je vidět z obrázku toto řešení používá všech tří samostatných zdrojů přístroje Agilent E3631A a dále externího dvoupolohového relé s ovládacím napětím 5 V. Při požadovaných záporných napětích by řídicí napětí relé bylo 5 V, relé by tedy bylo sepnuto v první poloze, výstup propojen se záporným napájecím zdrojem. V opačném případě by se nastavila hodnota řídicího napětí na 0 V, relé by se přepnulo a na výstup by bylo propojeno napětí z kladného zdroje. Ovládání řídicího napětí by bylo stejně jako ovládání jednotlivých zdrojů řešeno přímo v obslužném programu např. pomocí větvení programu příkazem IF.

### 2.1.2 Pracoviště pro měření střídavých veličin

Cílem střídavých měření je u daného přípravku změřit přenosové vlastnosti a mezní frekvenci, do které je možno přípravek používat aniž by docházelo ke zkreslení na výstupu. Vstup přípravku bude buzen sinusovým signálem s proměnnou frekvencí, námi zadanou amplitudou a případně i stejnosměrnou složkou. Na výstupu pak budeme měřit stejnosměrnou složku, a také první a druhou harmonickou složku výstupního signálu. Ze získaných hodnot a výsledných grafu pak budeme moci určit mezní frekvence použitelnosti přípravku.



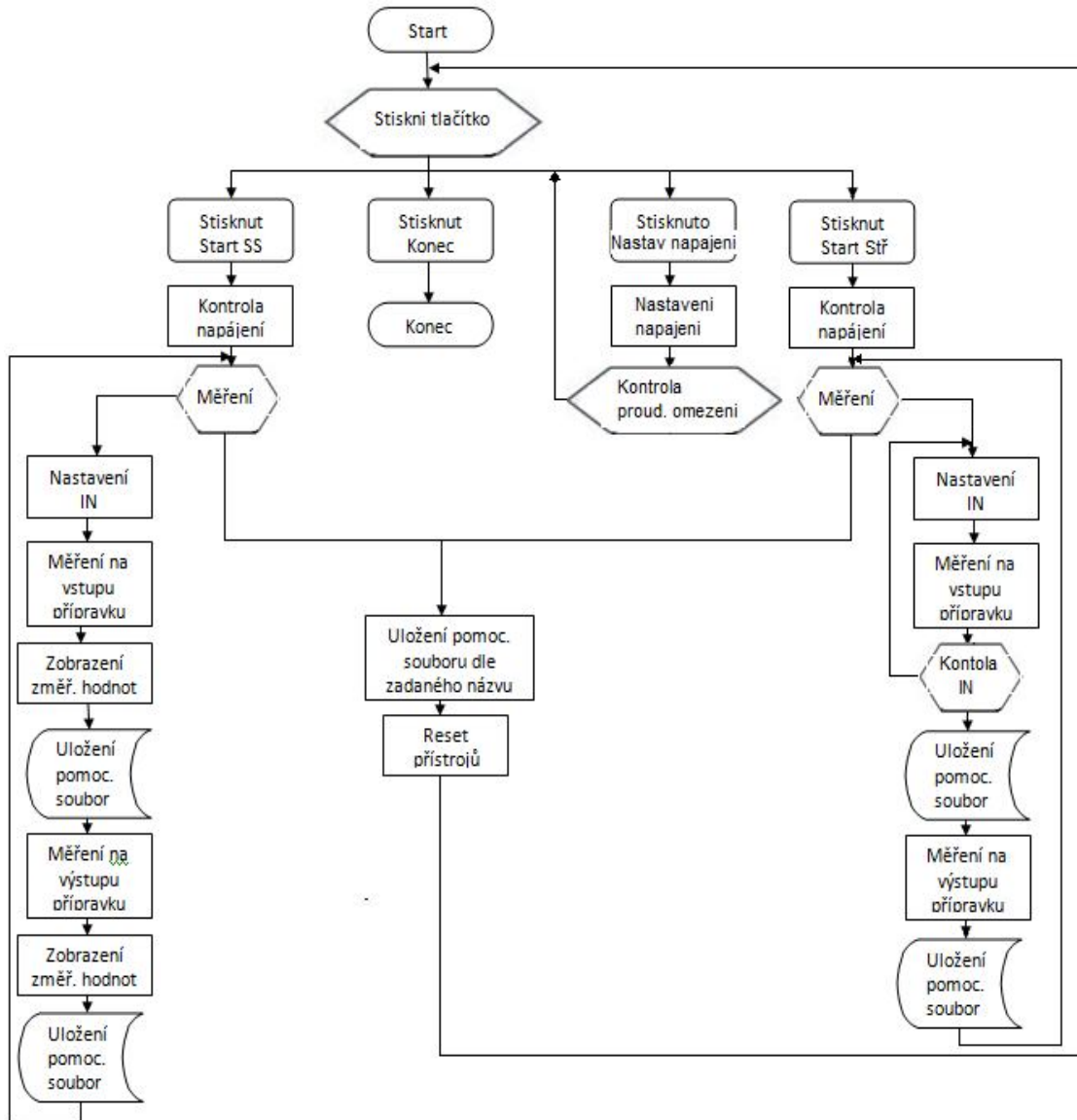
Obr. 13: Zapojení měřicího pracoviště pro měření střídavých veličin

Blokové schéma zapojení pracoviště je vidět na Obr. 13. Oproti měřicímu pracovišti pro stejnosměrná měření došlo ve schématu k několika obměnám. Ve skutečnosti však nebylo nutno pracoviště nijak přepojovat, protože díky vlastnostem GPIB mohou být připojeny všechny přístroje najednou a podle potřeby jsou pouze zapínány a vypínány ty, které jsou zrovna potřeba (dle typu měření). Některé přístroje zůstaly dokonce stejné, v našem případě se jednalo o přístroj Agilent E3631A, v obou případech slouží jako napájecí zdroj přípravku a o jeden multimetr Agilent 34401A, ten v předchozím případě také sloužil, k měření na výstupu měřeného přípravku. Jak je vidět bylo použito ještě několika dalších přístrojů. Jako zdroj signálu byl použit funkční generátor Agilent 33220A. Spektrální analyzátor Agilent 4395A slouží k měření úrovně signálu na vstupu, ale i na výstupu měřeného přípravku. Spektrální analyzátor disponuje vstupy s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ . Proto, aby měřený přípravek nebyl po připojení analyzátoru nevhodně zatížen, je signál přiváděn na vstupy analyzátoru přes aktivní sondy Agilent 41800A, jejichž vstupní charakteristická impedance je  $100 \text{ k}\Omega$ . Hodnoty na vstupu jsou měřeny, protože hlavně na vyšších frekvencích dochází k tomu, že generátor nedokáže dodávat signál s přesně zadanou amplitudou, amplituda bývá většinou nižší, než která je numericky zadána. V případě, že se amplituda liší o více, než je zadaná přípustná odchylka, generátor díky zpětné vazbě ze spektrálního analyzátoru upraví amplitudu tak, aby byla splněna podmínka maximální odchylky. Teprve po nastavení správné amplitudy dojde k měření na výstupu měřeného přípravku. Multimetrem Agilent 33401A je měřena stejnosměrná složka a spektrální analyzátor měří první a druhou harmonickou složku výstupního signálu.

## 2.2 Software

### 2.2.1 Návrh obslužného programu v prostředí VEE

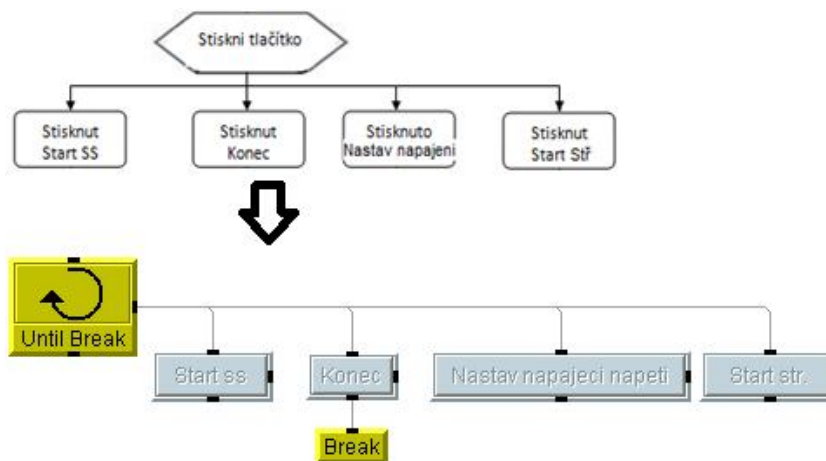
Pro návrh programu automatizovaného měřicího pracoviště bylo použito prostředí pro virtuální instrumentaci Agilent VEE 9.2 [7].



Obr. 14: Vývojový diagram vytvořeného programu

Posloupnost programu je vidět z vývojového diagramu Obr. 14. V této kapitole budou postupně ukázány a objasněny jednotlivé části tohoto diagramu.

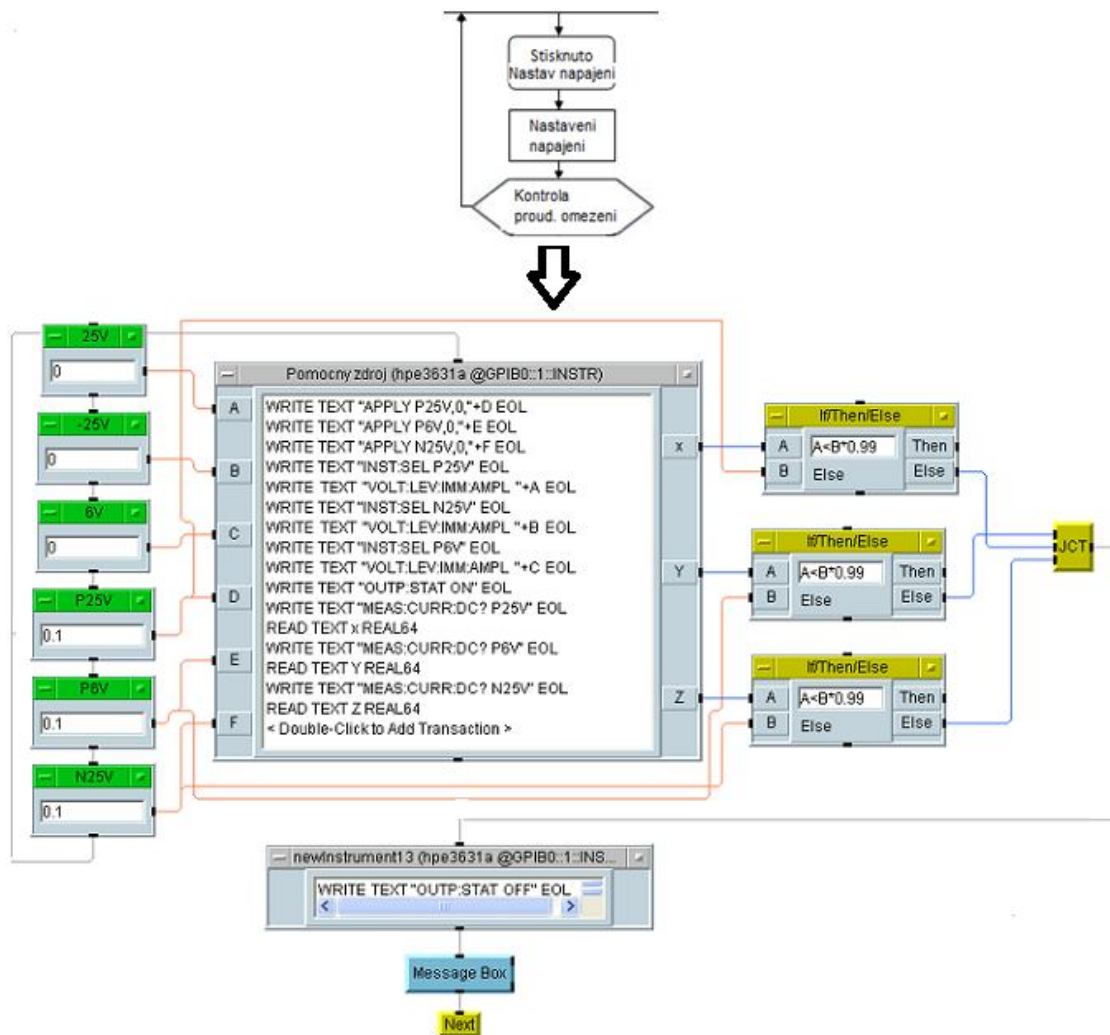
Po spuštění programu se otevře uživatelské rozhraní, kde je možné zadat jednotlivé parametry měření a název souboru, do kterého se mají naměřené hodnoty ukládat Obr.22. Program čeká na stisknutí některého ze čtyř základních tlačítek. Po stisku některého z nich je provedena daná část programu.



Obr. 15: První část programu - čekání na stisk některého z tlačítek

Na Obr. 15 je vidět část vývojového diagramu společně s odpovídající částí programu. Po stisknutí tlačítka „Start ss“ dojde ke spuštění části programu, která má na starosti stejnosměrná měření. Další z možných tlačítek je tlačítko „Konec“, toto tlačítko pouze pošle posloupnost programu, k dalšímu bloku, kterým je blok Break, který ukončí běh celého programu. Tlačítko „Nastav napajeci napeti“ jak již napovídá jeho název, pošle program do části, kde dojde k nastavení pomocného napájecího zdroje. Posledním tlačítkem je tlačítko „Start stř“ po kterém následuje část měření střídavých veličin.

Větev programu, která nastaví pomocné napájení je vidět na Obr. 16. Z obrázku je patrné, že jsou postupně nastaveny všechny tři zdroje přístroje Agilent E3631A. Nejprve jsou nastaveny proudová omezení jednotlivých zdrojů a také příslušné hodnoty napětí. Teprve po nastavení všech zdrojů dochází k zapnutí výstupů. Ihned po zapnutí výstupů dochází k přeměření výstupních proudů, jakmile je některá z hodnot větší než 0,99 zadaného proudového omezení dojde k odpojení zdroje, aby nedošlo ke zničení měřeného přípravku. O této události je dále uživatel informován varovným oknem. Jakmile jsou vykonány všechny instrukce, program se vrátí do cyklu čekání na stisk některého z dalších tlačítek.



Obr. 16: Druhá část programu - nastavení pomocného napájecího napětí

### Vysvětlení jednotlivých příkazů:

#### **Agilent 3631A**

„WRITE TEXT “APPLY P6V,0,+E EOL” oznamuje přístroji, že budeme nastavovat šestivoltový kladný zdroj P6V, první parametr, v tomto případě 0 určuje napěťové omezení, pokud je zadána 0 není napěťové omezení aplikováno a druhý parametr, který určuje proudové omezení tohoto zdroje je zadán proměnou E, kterou zadává obsluha v grafickém rozhraní Obr. 18.

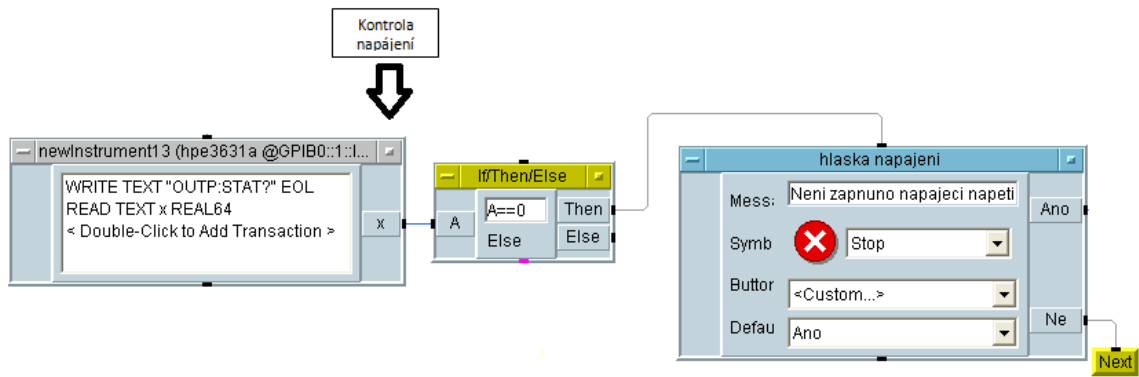
„WRITE TEXT “INST:SEL P6V” EOL” určuje, že další příkazy které budou zadány, budou nastavovat zdroj P6V

„WRITE TEXT “VOLT:LEV:IMM:AMPL ”+A EOL” říká, že napětí dříve zvoleného zdroje bude nastaveno na hodnotu proměnné A

„WRITE TEXT “OUTP:STAT ON/OFF,” EOL” zapíná/vypíná výstupní svorky

„WRITE TEXT “MEAS:CURR:DC? P6V” EOL” spouští měření výstupního stejnosměrného proudu na svorkách zdroje P6V

„READ TEXT X REAL64” posílá naměřená data na výstup X



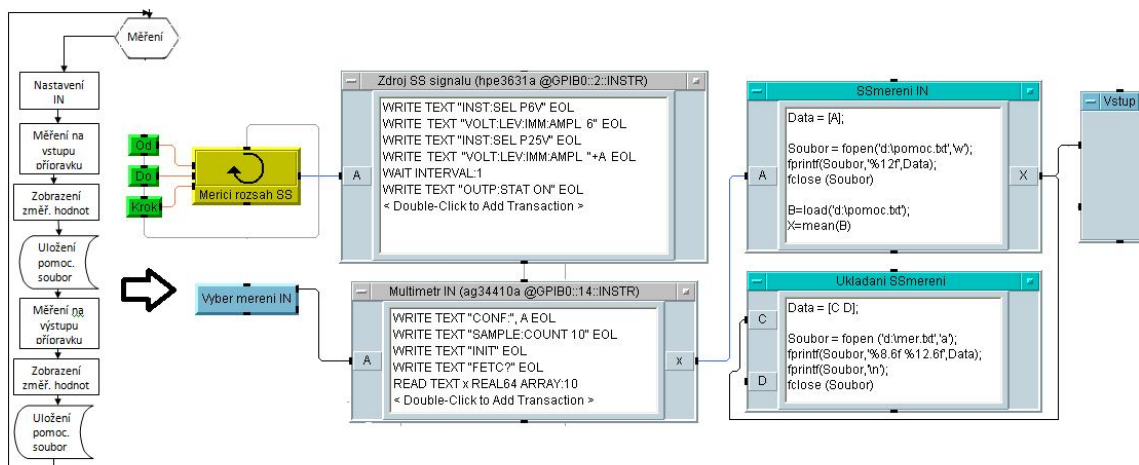
Obr. 17: Třetí část programu - kontrola zapnutí napájení

Po stisknutí tlačítka pro stejnosměrná, ale i střídavá měření postupuje program vždy k části, ve které zkontroluje, zda je aktivní pomocné napájecí napětí měřené desky viz. Obr. 17. Pokud je napájení spuštěno, pokračuje program dál, k samotnému cyklu měření. Pokud ne, zobrazí se varovné okno s upozorněním „Není zapnuto napájecí napětí. Chcete pokračovat?“. V případě, že není napájecí napětí zapotřebí, obsluha stiskne tlačítko „Ano“ a program běží dál, v opačném případě, když obsluha zapoměla napájení spustit, stiskne tlačítko „Ne“ a program se vrátí zpět do stavu čekání na stisknutí některého z tlačítek, kde obsluha může napájecí napětí spustit a poté se vrátit zpět k měření.

#### Vysvětlení jednotlivých příkazů:

#### **Agilent 3631A**

„WRITE TEXT “OUTP:STAT?,” EOL” zjišťuje, zda je na některých, z výstupních svorek přítomno napětí pokud ne nabývá výsledek hodnoty 0, pokud ano je výsledek změřený výsledek roven 1



Obr. 18: Čtvrtá část programu - cyklus stejnosměrného měření

Po kontrole napájecího napětí se program dostává k samotnému cyklu měření. Bylo použito cyklu For Range. Do tohoto cyklu jsou zadávány počáteční hodnoty, koncové hodnoty a hodnoty kroku, o který se má cyklus snižovat nebo zvyšovat. Tyto hodnoty

byly do programu zadány opět v grafickém rozhraní po spuštění programu. Samotné tělo cyklu je tvořeno bloky zdroje signálu, měřicích přístrojů, bloků pro zpracování dat a display. Nastavení zdroje signálu se děje obdobně jako nastavování napájecího napětí, protože se jedná o stejný přístroj. Dalším krokem se nastavuje multimetr Agilent 34401A. Nejprve je nastaven typ měření, ten je opět zadán obsluhou při úvodním nastavování, jelikož se jedná o multimetr, je zde široká škála možností měření. Dalším krokem je již samotné měření. Aby byl omezen vliv šumu, je provedeno 10 měřicích cyklů, jejichž výsledné hodnoty jsou zprůměrovány. Výsledky průměrování jsou následně uloženy do prozatímního pomocného souboru a zobrazeny na display. Průměrování a ukládání hodnot probíhá ve vložených skriptech programu Matlab. Na Obr. 18 je zobrazena část programu pro měření na vstupu měřeného přípravku, měření na výstupu probíhá analogicky k vstupnímu měření.

#### Vysvětlení jednotlivých příkazů:

##### **Agilent 3631A**

Příkazy pro nastavení zdroje ss. signálů jsou stejné, jako příkazy pro nastavení zdroje pomocného napájecího napětí, proto již nebudou znovu vysvětlovány.

##### **Agilent 34401A**

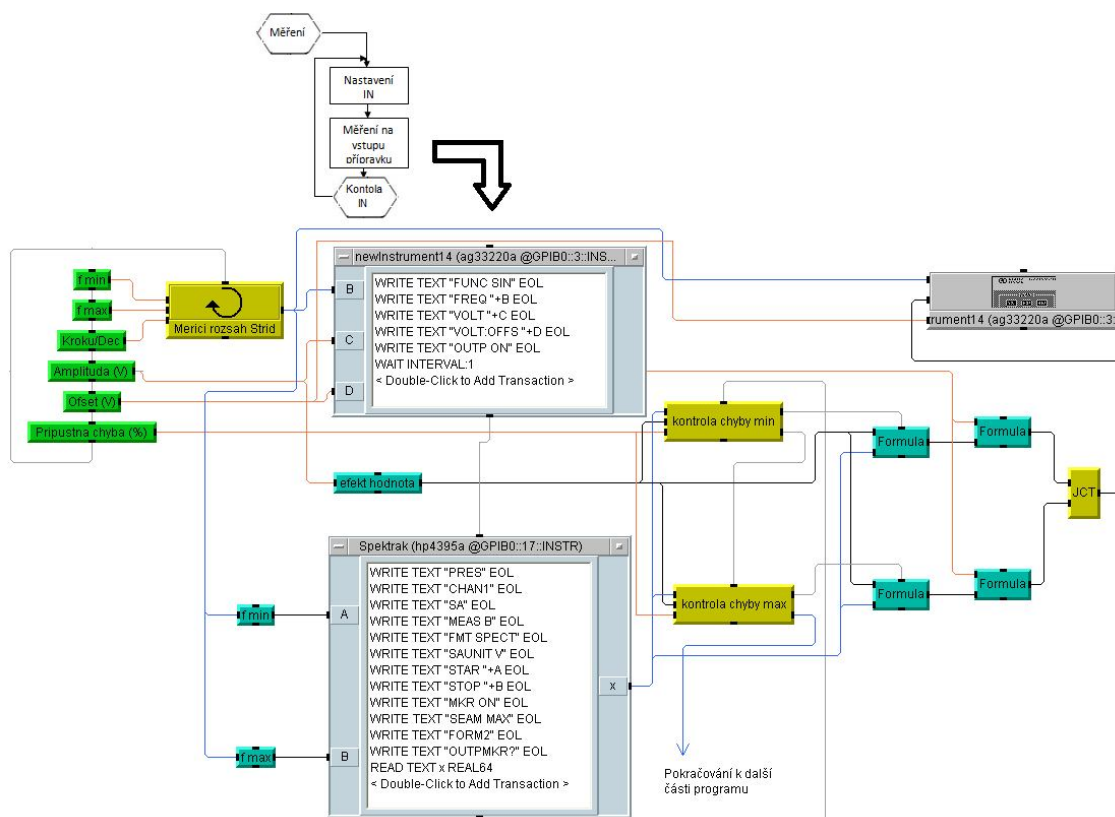
„WRITE TEXT “CONF:”+A EOL” tento příkaz nastavuje typ měření, který bude prováděn multimetrem, typ měření je zadán obsluhou před samotným měřením v grafickém rozhraní, je zadáván pro každý z multimetrů zvlášť, je tedy možné měřit na vstupu desky napětí a na výstupu kupříkladu proud

„WRITE TEXT “SAMPLE:COUNT 10,” EOL” dává přístroji instrukci, aby provedl 10 shodných měření, výsledky jednotlivých měření jsou ukládány do vnitřní paměti multimetru

„WRITE TEXT “INIT” EOL” provádí inicializaci přístroje, aby bylo v dalším kroku možné vyčíst naměřené hodnoty z vnitřní paměti

„WRITE TEXT “FETC?” EOL” vyčítá hodnoty z vnitřní paměti měřicího přístroje a poskytuje je k dalšímu zpracování

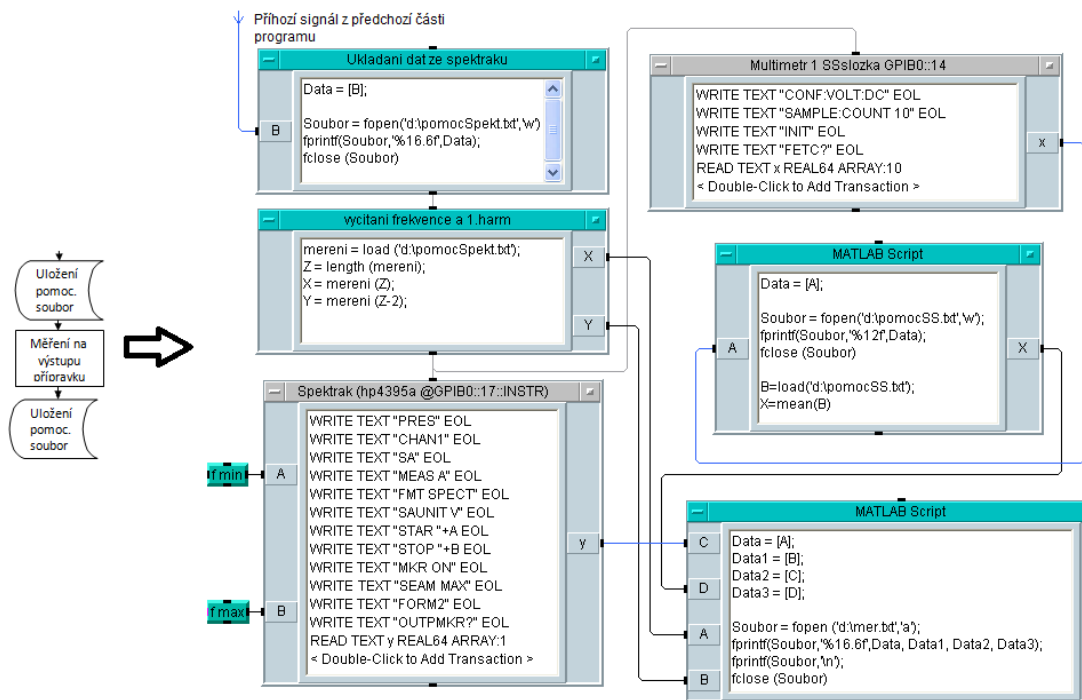
„READ TEXT X REAL64 ARRAY 10” posílá naměřená data ve formě řady do proměnné X



Obr. 19: Pátá část programu - první polovina střídavého měření

Po stisknutí tlačítka „Start str“ dochází ke kontrole spuštění napájecího napětí a v případě, že je vše v pořádku, pokračuje program již samotným měřicím cyklem Obr. 19 a Obr. 20.

Pro účely střídavého měření bylo použito cyklu For Log Range. Tento cyklus má velmi podobné vlastnosti jako cyklus For Range použitý u stejnosměrného měření. V tomto případě obsluha zadává v grafickém rozhraní počáteční měřenou frekvenci, konečnou měřenou frekvenci a počet měřicích kroků, které má systém provést na každou dekádu z měřeného rozsahu. Nejprve jsou nastaveny všechny potřebné parametry generátoru Agilent 33220A. Jakmile je generátor nastaven, dochází k měření efektivní hodnoty napětí na vstupu měřeného přípravku. Změřená hodnota je poté porovnávána s vypočítanou, referenční efektivní hodnotou zadané amplitudy budícího signálu. Liší-li se naměřená hodnota od vypočtené o více než je povolená odchylka (také zadána obsluhou v grafickém rozhraní), dochází k úpravě amplitudy generátoru a opakování celého měření. Když je naměřená hodnota dostatečně přesná, přechází program k měření na výstupu měřeného přípravku. Nejprve je však zjištěna hodnota frekvence, na které měření probíhá a ta je pak zapsána do pomocného souboru.



Obr. 20: Šestá část programu - druhá polovina střídavého měření

Jakmile jsou potřebná data uložena, dochází k měření stejnosměrné složky, ta je měřena multimetrem Agilent 34401A, aby bylo vyloučeno zkreslení šumem, je provedeno, stejně jako u stejnosměrných měření, 10 samostatných měření, jejichž výsledné hodnoty jsou nakonec zprůměrovány. Dále je spektrálním analyzátozem Agilent 4395A změřena první a druhá harmonická výstupního signálu. Naměřené hodnoty jsou poté uloženy společně s hodnotou měřené frekvence do pomocného souboru. Tato ukládání jsou řešena pomocí skriptů programu Matlab.

#### Vysvětlení jednotlivých příkazů:

##### **Agilent 33220A**

„WRITE TEXT “FUNC SIN,” EOL” určuje tvar generovaného signálu, v tomto případě se jedná o sinus

„WRITE TEXT “FREQ ”+B EOL” frekvence výstupního signálu je nastavena na hodnotu uloženou v proměnné B

„WRITE TEXT “VOLT ”+C EOL” příkaz nastavující amplitudu špička-špička, hodnota je nastavena na hodnotu proměnné C

„WRITE TEXT “VOLT:OFFS ”+D EOL” nastavuje o kolik je signál posunut vůči nulové hodnotě, odchylka je dána hodnotou uloženou v proměnné D

„WRITE TEXT “OUTP ON” EOL” zapíná výstupní svorky generátoru

##### **Agilent 4395A**

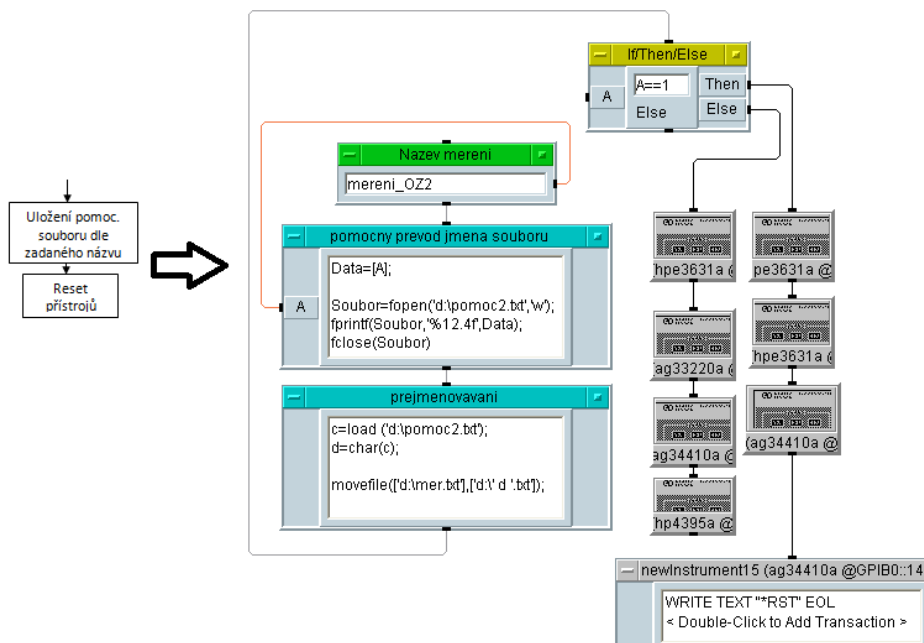
„WRITE TEXT “PRES” EOL” provádí preset přístroje

„WRITE TEXT “CHAN 1” EOL” říká přístroji, že měření bude probíhat na prvním kanále

- „WRITE TEXT “SA” EOL” nastavuje typ měření na spektrální analýzu
- „WRITE TEXT “MEAS A” EOL” určuje, že měření bude probíhat na vstupu A
- „WRITE TEXT “FMT SPECT” EOL” nastavení pro měření spektra
- „WRITE TEXT “SAUNIT V” EOL” nastavuje, v jakých jednotkách bude probíhat měření, v tomto případě Volty
- „WRITE TEXT “STAR/STOP”+A EOL” nastavuje minimální/maximální frekvenci, jedná se o rozsah, který bude zobrazen a ve kterém bude probíhat měření spektra, hodnoty jsou opět nastaveny na hodnoty z proměnných
- „WRITE TEXT “MKR ON” EOL” zapíná marker
- „WRITE TEXT “SEAM MAX” EOL” vyhledá nejvyšší špičku v měřeném rozsahu a přesune na ni marker
- „WRITE TEXT “FORM2” EOL” nastaví formát dat na 32bitový formát čísla s plovoucí desetinnou čárkou
- „WRITE TEXT “OUTPMKR?” EOL” čte jednotlivé hodnoty markeru
- „READ TEXT X REAL64 ” posílá naměřená data do proměnné X

### Agilent 34401A

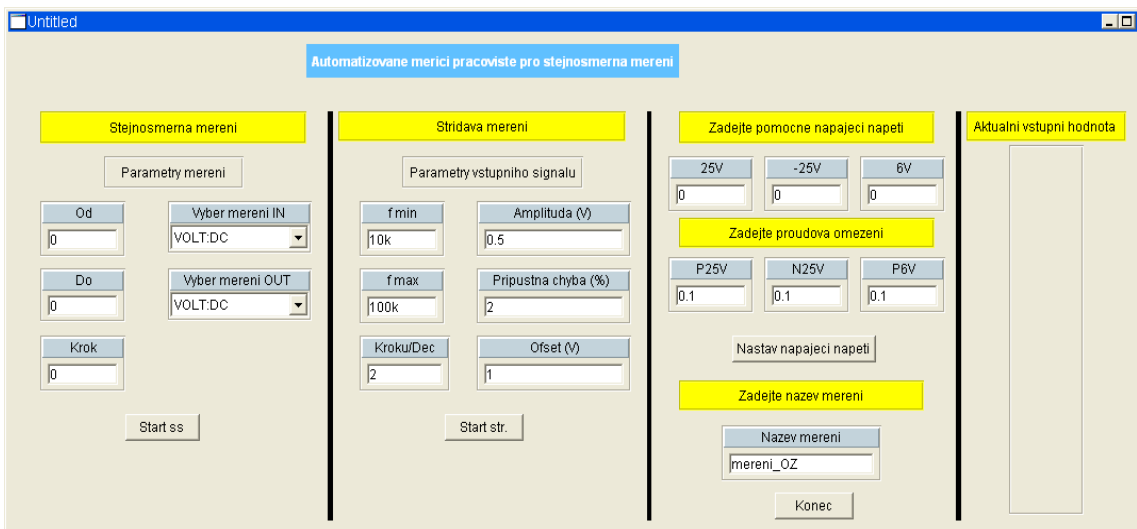
Jako multimetr pro měření stejnosměrné složky byl používán přístroj Agilent 34401A jehož nastavování je již známo z předchozího textu a tudíž zde nebude dále vysvětlováno.



Obr. 21: Sedmá část programu - řešení ukládání a reset přístrojů

Po skončení některého z měřicích cyklů je postoupeno k poslední části programu Obr. 21, ta je realizována pouze pomocí skriptů programu Matlab a zajišťuje přeuložení pomocného souboru do námi zvoleného souboru s příponou \*.txt, tento typ souborů je pro pozdější zpracování naměřených hodnot v programu Matlab plně dostačující. Po dokončení všech předchozích kroků, je do všech přístrojů vyslán příkaz „WRITE TEXT “\*RST” EOL”, který je vynuluje a program skočí zpět do cyklu čekání na stisk některého tlačítka.

Z výše popsaného je vidět posloupnost celého programu a jeho funkce. Je-li pro uživatele některá z částí programu nevhodná je schopen ji na základě výše popsaného změnit, nebo úplně zrušit. V opačném případě běžný uživatel pracuje pouze s grafickým uživatelským rozhraním Obr. 22. V tomto rozhraní jsou k dispozici všechny potřebné ovládací prvky. Obsluha tedy pouze zadá potřebné hodnoty, spustí měření a vše ostatní již vykoná program sám.



Obr. 22: Grafické uživatelské rozhraní

## 2.2.2 Funkce pro zpracování hodnot v Matlabu

Jak bylo uvedeno výše, naměřené hodnoty byly ukládány do souboru s příponou \*.txt. Pro další zpracování byl zvolen program Matlab [16]. Jelikož zpracování naměřených dat je pro stejnosměrná a střídavá měření odlišné, byly vytvořeny dvě různé funkce, první pro zpracování dat ze střídavých a druhá ze stejnosměrných měření.

Každá z funkcí má dva vstupní parametry, které musí být při jejím volání zadány. Prvním z nich je název zdrojového souboru, ze kterého se mají data načítat, druhý pak může nabývat hodnot 0 nebo 1 a udává, zda je či není zapnuta funkce hold. Nabývá-li hodnoty 1 je funkce hold zapnuta a je tedy možno do jednoho grafu vykreslit několik měřených průběhů, v opačném případě se graf s měřeným průběhem při dalším volání funkce překreslí.

## Výsledná funkce pro střídavá měření:

```
function Strid_mereni (in,holt)

A = load(in);
frekvence = A(:,1);
prvni_harmonickaIN = A(:,2);
druha_harmonickaOUT = A(:,3);
offset = A(:,4);
prvni_harmonickaOUT = A(:,5);
pomer = (offset);
col = rand(1,3);
pomer = offset./(2./pi.*prvni_harmonickaIN.*sqrt(2));
pomer_dB = 20.*log10(pomer);
xmin = frekvence(1);
xmax = frekvence(length(frekvence));

figure(1);
semilogx (frekvence, pomer_dB, 'color',col, 'LineWidth',1.5);
xlim([xmin xmax]);
grid on
title ('Závislost p_{AVR} na frekvenci')
ylabel('p_{AVR} (dB)')
xlabel('Frekvence (Hz)')

figure(2);
semilogx (frekvence,
20.*log10(prvni_harmonickaOUT.*sqrt(2).*2), 'color',col, 'LineWidth',1.5
);
xlim([xmin xmax]);
grid on
title ('Amplituda prvni harmonicke na zakladni frekvenci')
ylabel('Amplituda (dB)')
xlabel('Frekvence (Hz)')

figure(3);
semilogx (frekvence,
20.*log10(druha_harmonickaOUT.*sqrt(2).*2), 'color',col, 'LineWidth',1.5
);
xlim([xmin xmax]);
grid on
title ('Amplituda druhe harmonicke na zakladni frekvenci')
ylabel('Amplituda (dB)')
xlabel('Frekvence (Hz)')

if holt==1
    figure(1);
    hold on
    figure(2);
    hold on
    figure(3);
    hold on
else
    figure(1);
    hold off
    figure(2);
    hold off
    figure(3);
    hold off
end
```

### Výsledná funkce pro stejnosměrná měření:

```
function SS_mereni (in,holt)

A=load(in);
Uin=A(:,1);
Uout=A(:,2);

plot(Uin,Uout,'color',rand(1,3),'LineWidth',1.5);
grid on
title ('Závislost U_{OUT} na U_{IN}')
ylabel('U_{OUT} (V)')
xlabel('U_{IN} (V)')

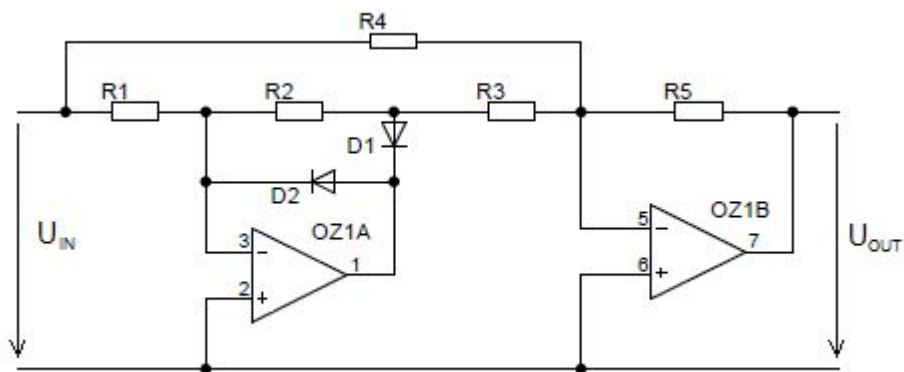
if holt==1
    hold on;
else
    hold off;
end
```

Posloupnost funkcí je taková, že vždy dojde nejprve k načtení všech dat ze zdrojového souboru, což se provádí pomocí příkazu `load`, data jsou tak uložena do jedné velké matice, každý řádek matice obsahuje data z jednoho měření. Dále jsou pak data roztržena do jednotlivých proměnných. V další části jsou data již zpracována dle potřeby. Výsledky jsou vždy zobrazeny do přehledných grafů. Nakonec dochází k posuzování druhého vstupního parametru a podle něj je buď funkce `hold` aktivována nebo ne.

### 3 MĚŘENÉ HODNOTY

Funkčnost celého pracoviště byla vyzkoušena při měření na přípravcích dvoucestných usměrňovačů [14]. Pro stejnosměrná měření bylo měřeno v rozmezí od -1,6 V do 1,6 V s krokem 0,1 V. Střídavá měření byla prováděna v rozsahu 10 Hz – 10 MHz s amplitudou špička - špička 0,5 V a nulovým offsetem. Nejprve byla změřena charakteristika usměrňovače s operačním zesilovačem a potom byl změřen usměrňovač, ve kterém bylo použito proudových konvektorů druhé generace.

#### 3.1 Usměrňovač s OZ



Obr. 23: Zapojení dvoucestného usměrňovače s OZ (převzato z [19])

$$R_1 = R_2$$

$$R_4 = 2R_3$$

Při průchodu kladného signálu je  $D_2$  zavřena a  $D_1$  otevřena výstupní napětí je potom rovno [19]:

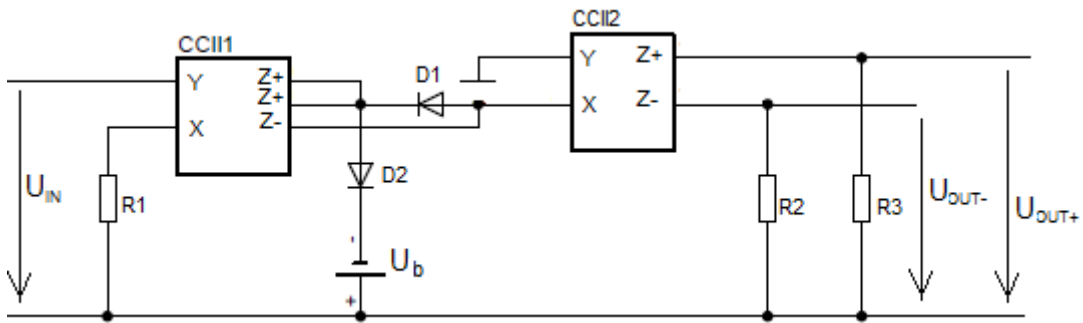
$$U_{OUT} = -\frac{R_5}{R_4} U_{IN} + \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} U_{IN} = -\frac{kR_4}{R_4} U_{IN} + \frac{kR_4}{\frac{R_4}{2}} U_{IN} = -kU_{IN} + 2kU_{IN}$$

$$U_{OUT} = kU_{IN} \tag{3.1}$$

Při průchodu záporného signálu je naopak  $D_2$  otevřena a  $D_1$  zavřena. Výstupní napětí je v tomto případě určeno vztahem [19]:

$$U_{OUT} = -\frac{R_5}{R_4} U_{IN} = -\frac{kR_4}{R_4} U_{IN} = kU_{IN} \tag{3.2}$$

### 3.2 Usměrňovač s proudovými konvejory

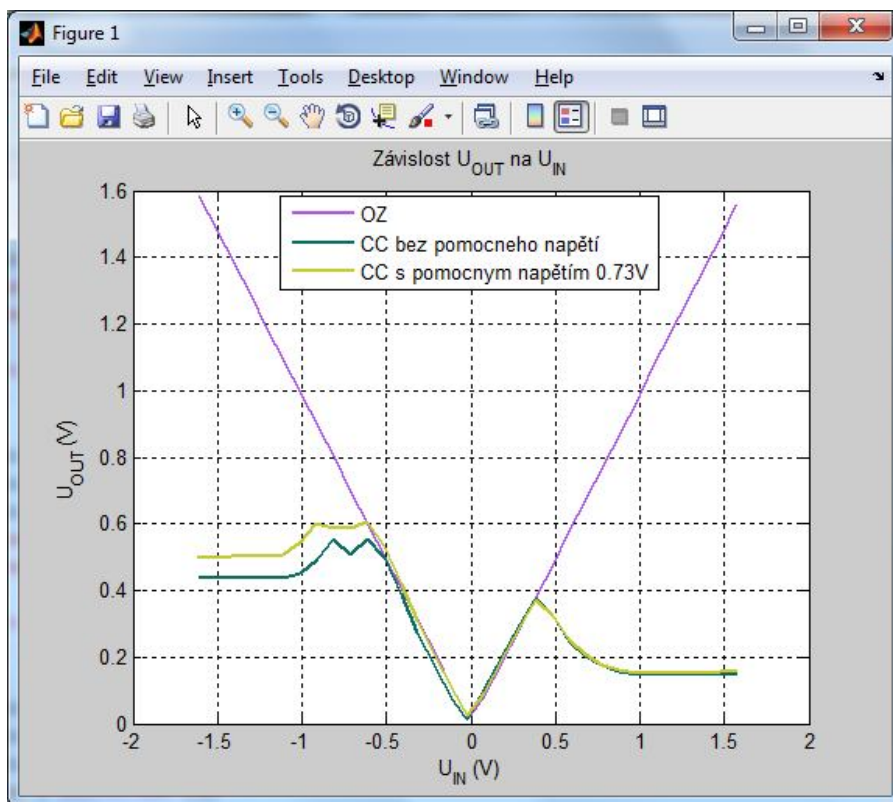


Obr. 24: Zapojení usměrňovače s proudovými konvejory (převzato z [14])

Na Obr. 24 je vidět zapojení usměrňovače s proudovými konvejory, toto zapojení pracuje v napěťovém módu [14]. Konvektor  $CCII_1$  slouží spolu s rezistorem  $R_1$  jako převodník  $U/I$  a konvektor  $CCII_2$  spolu s rezistory  $R_2$  a  $R_3$  jako převodník  $I/U$ . Teoretická hodnota vstupní impedance je v tomto případě nekonečná, což může být v některých případech užitečné.

Výstupní napětí zapojení odpovídá [14]:

$$U_{OUT+} = \frac{R_3}{R_1} |U_{IN}| ; U_{OUT-} = - \frac{R_2}{R_1} |U_{IN}| \quad (3.3)$$

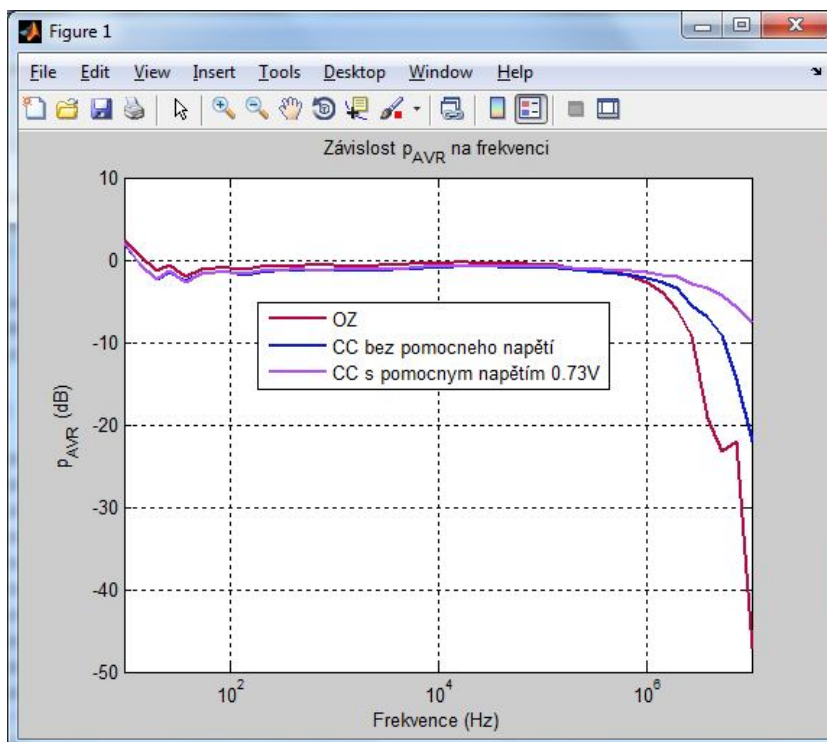


Obr. 25: Porovnání výsledků stejnosměrných měření

Zpracování střídavých veličin bylo poněkud složitější a při výpočtech bylo použito několika důležitých vzorců. Především jde o vyhodnocení stejnosměrného napětí výstupního signálu pro různé kmitočty [13].

$$p_{AVR} = \frac{\frac{1}{T} \int u_{OUT}(t) dt}{\frac{2}{\pi} U_{MAX}} \quad (3.4)$$

kde jako čitatel byla doplňována vždy aktuálně změřená hodnota stejnosměrného signálu na výstupu pro danou frekvenci a za  $U_{MAX}$  byla dosazena maximální hodnota amplitudy signálu. Jedná se tedy o poměr skutečného a ideálního stejnosměrného výstupního signálu dvoucestného usměrňovače [13]. Tento poměr se používá k popisu kvality usměrnění u dvoucestných usměrňovačů. V ideálním případě by měl být tento poměr roven 1 tedy 0 dB. Ve skutečnosti však s rostoucí frekvencí stejnosměrná složka výstupního signálu klesá, což způsobuje pokles poměru pod hodnotu 1 [13]. Jak je vidět na Obr. 26 měřené přípravky se blížili k ideální hodnotě až do frekvence 1 MHz, kolem této frekvence docházelo u usměrňovače s OZ ke zlomu a prudkému poklesu  $p_{AVR}$  u přípravků s proudovými konvejory k tomuto zlomu docházelo na vyšších frekvencích a pokles také nebyl tak prudký jako u přípravku s OZ z čehož lze usuzovat, že přípravek s proudovými konvejory lze provozovat na vyšších frekvencích než přípravek s OZ.



Obr. 26: Porovnání průběhů  $p_{AVR}$

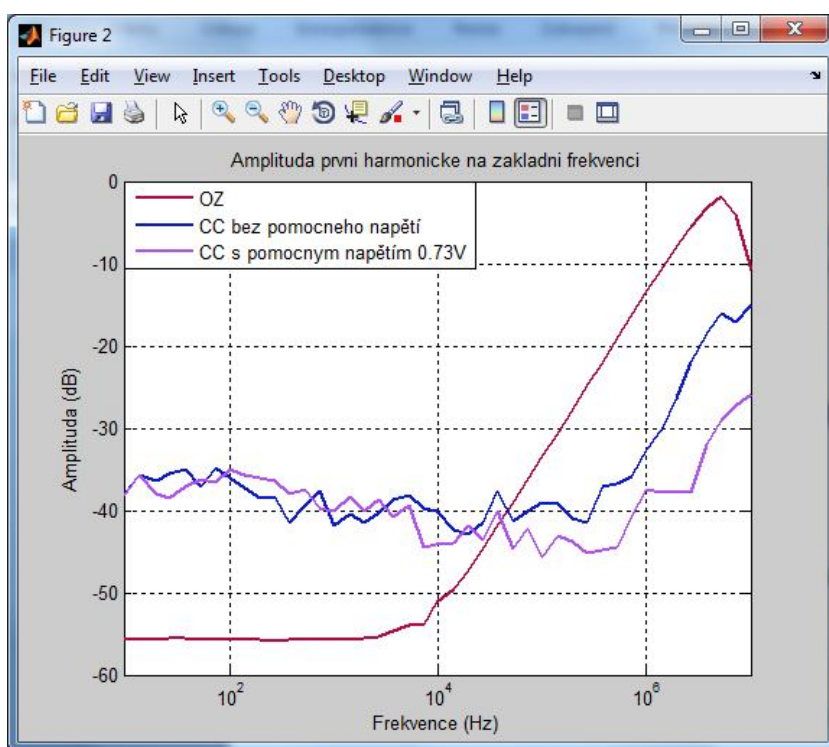
Další parametry, které byly měřeny na výstupu usměrňovačů, byly první a druhá harmonická. U kvalitně dvoucestně usměrněných signálů by první harmonická měla být co nejvíce potlačena stejně jako další liché harmonické složky. Naopak druhá harmonická složka by měla být dominantní složkou signálu. Pro teoretický výpočet sudých harmonických složek usměrněného signálu slouží vzorec [11]:

$$U_n = \frac{4U_a}{\pi} \frac{(-1)^{n+1}}{4n^2 - 1}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.5)$$

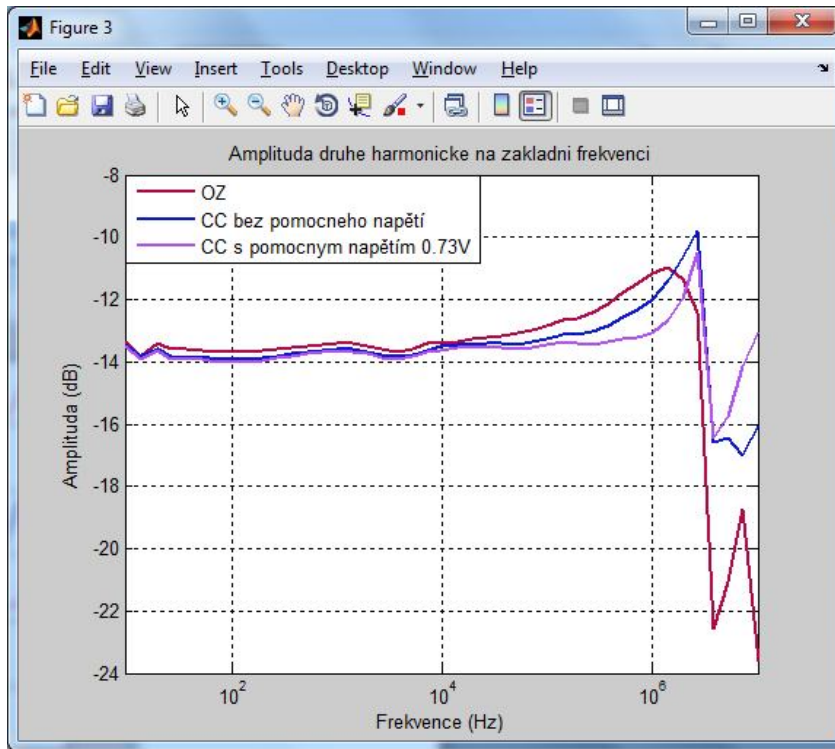
kde  $U_a$  je amplituda vstupního signálu a  $n$  je číslo požadované sudé harmonické

Obr: 27 a 28 ukazují výsledky měření první a druhé harmonické. Jak je vidět z prvního obrázku pro nižší frekvence řádově do desítek MHz je signál první harmonické lépe potlačen usměrňovačem s OZ, se stoupající frekvencí však dochází k prudkému nárůstu amplitudy první harmonické. U usměrňovače s proudovými konvejsory je první harmonická na nižších frekvencích potlačena méně, ale své vlastnosti si přípravek udrží do vyšších frekvencí a nárůst amplitudy není tak strmý. Na druhém obrázku vidíme průběh amplitudy druhé harmonické, vztažené k základní frekvenci, hodnoty tohoto grafu můžeme porovnat s vypočtenou teoretickou hodnotou, kterou dostaneme po dosazení do vzorce 3.5. Po dosazení naší amplitudy, získáme výsledek -13,55 dB. Jak je vidět měřené přípravky této hodnoty dosahují až zhruba do frekvence 1 MHz, kde dochází k překmitu a následnému propadu charakteristiky. U přípravku s OZ začíná tento překmit již od nižších frekvencí, pro přípravek s proudovými konvejsory je tento překmit užší a následný pokles není tak velký a zastaví se někde kolem hodnoty -16 dB.

Z uvedeného je patrné, že dvoucestné usměrňovače s proudovými konvejsory mají lepší vlastnosti a dají se používat do vyšších kmitočtů, než jejich konkurenti s OZ. Nejlepších vlastností dosahoval usměrňovač s proudovými konvejsory, který byl ještě podepřen napětím 0,73 V, které sloužilo k rychlejšímu vybíjení difusní kapacity diody  $D_2$  [15].



Obr. 27: Výsledky měření první harmonické



Obr. 28: Výsledky měření druhé harmonické vztažené k základní frekvenci

## 4 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl řešen návrh a realizace automatizovaného měřicího pracoviště pro stejnosměrná a střídavá měření. Pracoviště je koncipováno takovým způsobem, aby obsluha zadala v uživatelském rozhraní požadované rozsahy měření a krok, po kterém se má měření posouvat. Po spuštění pak pracoviště pracuje zcela automaticky bez nutnosti jakéhokoliv zásahu obsluhy. Projekt byl rozdělen do několika částí.

První část byla věnována teoretickému rozboru možností realizace pracoviště. Byly zde rozebrány jednotlivé součásti automatizovaného měřicího pracoviště od výběru softwaru přes sběrnici až po měřicí přístroje. Podrobně byly rozebrány vlastnosti sběrnice GPIB a prostředí pro virtuální instrumentaci od firmy Agilent VEE 9.2.

Druhá část práce ukazuje již postup samotné realizace pracoviště. V této části je předvedena konfigurace zapojení měřicího pracoviště a dále jsou zde rozebrány jednotlivé přístroje, které jsou na pracovišti použity. Tato část také ukazuje a postupně vysvětluje návrh obslužného programu. Nejprve je uveden vývojový diagram programu jako celku a poté je vždy zobrazena vybraná část vývojového diagramu spolu s odpovídající částí programu, která je vždy také podrobně vysvětlena. Jelikož součástí zadání práce byla podmínka, že naměřené hodnoty musí být ukládány do souboru pro další zpracování v programu Matlab, je v této části také obsažen návrh funkce v tomto programu, která po jejím zavolání vykreslí graf naměřených hodnot.

V poslední části této práce je předvedena názorná ukázka výsledků měření na navrženém pracovišti. Měřenými prvky byly usměrňovač s OZ a usměrňovač s proudovými konvejory.

Výsledkem této práce je měřicí pracoviště s komplexním využitím a jednoduchou obsluhou. Díky tomu, že jsou měřená data ukládána do souborů \*.txt, je možné s nimi dále pracovat a to nejen za pomoci přiložených funkcí ale téměř jakkoli dle potřeby a možností programu Matlab. Podrobný popis konfigurace dílčích částí pak dalším zájemcům poskytuje návod na snadnou modifikaci či vlastní realizaci automatizovaného měřicího pracoviště vyhovujícího individuálním požadavkům uživatele.

## LITERATURA

- [1] *Agilent 33220A 20MHz Function / Arbitrary Waveform generator*, Agilent Technologies, May 2007, 362s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/33220-90002.pdf>>
- [2] *Agilent 34401A 6 1/2 Digit Multimeter User's Guide*, Agilent Technologies, August 2007, 242s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/34401-90004.pdf>>
- [3] *Agilent 3631A Triple Output DC Power Supply User's Guide*, Agilent Technologies, October 2007, 168s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E3631-90002.pdf>>
- [4] *Agilent 41800A Active probe Operation Note*, Agilent Technologies, December 1999, 71s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/41800-90010.pdf>>
- [5] *Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer Operation Manual*, Agilent Technologies, Februar 2008, 575s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/04395-90040.pdf>>
- [6] *Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer Programming Manual*, Agilent Technologies, December 2002, 399s. Dostupný na WWW:  
< <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/04395-90031.pdf>>
- [7] *Agilent VEE Pro 9.2 & Agilent VEE Express 9.2 Quick Start Guide*, Agilent Technologies, April 2010 27s. . Dostupný na WWW:  
<[http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&ckey=1881061&cname=AGILENT\\_EDITORIAL&lc=eng&cc=CZ&nfr=-34095.806312](http://www.home.agilent.com/agilent/redirector.jsp?action=ref&ckey=1881061&cname=AGILENT_EDITORIAL&lc=eng&cc=CZ&nfr=-34095.806312)>
- [8] ANGUS, Boil, R., B; HULBERT, E. *VEE Pro: practical graphical programming*. London : Springer-Verlag, 2005. 448 s. ISBN 18-523-3870-9.
- [9] BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V., KOLKA, Z. AC analysis of operational rectifiers via conventional circuit simulators. In Proceedings of the WSEAS Conferences AIC'04, ISCGAV'04, ISTASC'04. Tenerife, Spain: WSEAS, 2004. s. 1-5. ISBN: 960-8457-06-8.
- [10] DOŇAR, B., ZAPLATÍLE, K.: *MATLAB - tvorba uživatelských aplikací*, BEN - technická literatura, 2004, 209s. ISBN: 80-7300-133-0.
- [11] GIFT, J. G., MAUNDY, B. Versatile Precision Full-Wave Rectifiers for Instrumentation and Measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 5, October 2007,s. 1703 – 1710
- [12] Interfacebus.com [online]. 2010-10-31 [cit. 2011-05-17]. GPIB Bus. Dostupné z WWW: < [http://www.interfacebus.com/Design\\_Connector\\_GPIB.html#a](http://www.interfacebus.com/Design_Connector_GPIB.html#a) >.
- [13] KHATEB, F.; VÁVRA, J.; BIOLEK, D. A Novel Current-Mode Full- Wave Rectifier Based on One CDTA and Two Diodes. Radioengineering, 2010, roč. 19, č. 3, s. 437-445. ISSN: 1210- 2512.

- [14] KOTON, J.; HERENCŠÁR, N.; VRBA, K. Current and Voltage Conveyors in Precision Full- Wave Rectifiers. In *Proc. 33rd International conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2010*. 2010. s. 10-13. ISBN: 978-963-88981-0-4.
- [15] KUBÁNEK, D.; VRBA, K. Přesné usměrňovače s proudovým buzením diod a vliv závěrné zotavovací doby diod na jejich funkci. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2010, roč. 2010, č. 6, s. 1-6. ISSN: 1213-1539.
- [16] Mathworks.com [online]. [cit. 2010-12-07]. Simulink - Simulation and Model-Based Design. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/products/simulink/?BB=1>>.
- [17] Ni.com [online]. [cit. 2010-12-07]. NI LabVIEW. Dostupné z WWW: <<http://www.ni.com/labview/>>.
- [18] *NI-488.2 User Manual*, National Instruments, Februar 2005, 132s. Dostupný na WWW: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/370428c.pdf>>
- [19] VRBA, K. *BANA Kap.8 Obvody s nelineárním rozdělením*. Prezentace k přednáškám. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [20] Zone.ni.com [online]. 2009-6-15 [cit. 2010-12-07]. History of GPIB. Dostupné z WWW: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3419>>.
- [21] Zone.ni.com [online]. 2006-8-6 [cit. 2010-12-07]. The HS488 Protocol. Dostupné z WWW: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4283>>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- FFT - Fast Fourier transform, rychlá fourierova transformace
- GPIB - General Purpose Interface Bus, sběrniceový systém přenos digitálních dat
- HP-IB - Hewlett Packard Interface Bus, dřívější označení pro GPIB
- HW - hardware, technické vybavení
- IEEE 488 - Institute of Electrical and Electronics Engineers 488, Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství standart číslo 488
- IMS2 - International Measurement System 2, mezinárodní měřicí systém druhé generace, alternativní označení GPIB
- LAN - Local Area Network, lokální síť
- OZ - operační zesilovač
- PC - personal computer, osobní počítač
- PCI - Peripheral Component Interconnect, počítačová sběrnice pro připojení periférií k základní desce
- RS-232 - Recommended Standard 232, sériový port/linka
- SCPI - Standard Commands for Programmable Instruments, standardizovaná sada příkazů pro programovatelné přístroje
- SW - software, počítačový program
- USB - Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
- VEE - visual engineering environment, prostředí pro virtuální instrumentaci
- 
- A - ampér
- dB - decibel
- k $\Omega$  - kiloohm
- m - metr
- MB/s - megabyte za sekundu
- MHz - megahertz
- pF - pikofarad
- s - sekunda
- V - volt
- 
- N25V - označení záporného napájecího zdroje na přístroji Agilent 3631A s rozsahem 25V
- P25V - označení kladného napájecího zdroje na přístroji Agilent 3631A s rozsahem 25V
- P6V - označení kladného napájecího zdroje na přístroji Agilent 3631A s rozsahem 6V