

# **Měření dlouhodobé stability oscilátorů pro přijímače GPS**

Measurement of long-term stability of oscillators for GPS receivers

Bc. Marek Cahlík

---

Diplomová práce  
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek CAHLÍK**  
Osobní číslo: **A09351**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Měření dlouhodobé stability oscilátorů pro přijímače GPS**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši a popište současný stav dané problematiky.
2. Navrhněte měřicí pracoviště pro měření dlouhodobé stability oscilátorů.
3. Z dostupných prostředků sestavte měřicí pracoviště, popište jeho obsluhu a seznamte se s možnostmi jeho řízení přes PC.
4. Navrhněte ve vhodném programovacím prostředí vlastní software pro obsluhu a měření.
5. Proveďte měření dlouhodobé stability oscilátorů používaných v přijímačích GPS.
6. Vypracujte vzorový protokol a návod pro zavedení úlohy do výuky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **SEDLÁČEK, M.:** Zpracování signálů v měřicí technice. Dotisk 2. vyd. – Praha : ČVUT, 1999.
2. **ANGUS R., HULBERT T.:** VEE Pro: Practical Graphical Programming, Springer 2004.
3. **REGTIEN P. P. L.:** Measurement science for engineers, London and Sterling, VA, 2004.
4. **KAPLAN E.D.** Understanding GPS ? Principles and Applications. ISBN: 0-89006-793-7. Artech House Publishers, Boston & London. 1996.
5. Firemní literatura fy Stanford research system dostupná z <http://www.thinksrs.com/>.
6. **CHUDÝ, Vladimír.** Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita, 1999. 688 s. ISBN 8022712752.
7. **HÄBERLE, Heinz O; HANDLÍŘ, Jiří.** Průmyslová elektronika a informační technologie. Vyd. 1. Praha : Europa-Sobotáles, 2003. 719 s. ISBN 8086706044.
8. **TUMANSKI, Szawomir.** Principles of electrical measurement. New York : Taylor & Francis, 2006. 472 s. ISBN 0-7503-1038-3.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**  
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**27. května 2011**

Ve Zlíně dne 25. února 2011

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



  
doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*veditel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na měření dlouhodobé stability nejen oscilátorů GPS, ale i běžných oscilátorů.

V teoretické části jsou popsány základní pojmy měřicích přístrojů a chyby měření, následuje struktura a princip GPS. Závěr teoretické části se věnuje oscilátorům, kde jsou popsány mechanické a elektronické oscilátory, včetně jejich rozdělení a příkladů.

Praktická část obsahuje popis vytvořeného pracoviště a měřicích přístrojů, kterými je měřena dlouhodobá stabilita oscilátorů. Dále je popsán program, který byl vytvořen pro obsluhu a automatizaci měření. Naměřené hodnoty jsou statisticky zpracovány. V závěru praktické části je vypracován vzorový protokol a návod pro zavedení měření do výuky.

Klíčová slova: měření, oscilátor, GPS, nejistota měření, chyba měření, stabilita oscilátoru, frekvence oscilátoru

## **ABSTRACT**

The thesis focuses on measuring long-term stability of oscillators, not only GPS but also normal oscillators.

The theoretical part describes the basic concepts of measuring instruments and measurement errors, followed by the structure and principles of GPS. Conclusion theoretical part oscillators, which describes the mechanical and electronic oscillators, including their distribution and examples.

The practical part includes a description of the work created and measuring instruments, which is measured by long-term stability of oscillators. We also describe a program that was created to handle measurement and automation. The measured values are statistically processed. In conclusion, the practical part of the A standard protocol and guidelines for the introduction of measurement in education.

Keywords: measurement, oscillator, GPS measurement uncertainty, measurement error, oscillator stability, frequency oscillator

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D., za odborné konzultace a poskytnutí všech možností, které byly nutné k vypracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, především rodičům, kteří mi dopřáli možnost studia na vysoké škole a po celou dobu mne morálně i psychicky podporovali.

V neposlední bych chtěl poděkovat svým přátelům, kteří mi byli především duševní oporou nejen při vypracování diplomové práce, ale po celou dobu studia.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

podpis diplomanta

.....

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MĚŘENÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 VOLBA JEDNOTEK .....	12
1.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE .....	12
1.2.1 Citlivost, přesnost, správnost .....	13
1.3 CHYBY MĚŘENÍ .....	14
1.4 CHYBY MĚŘENÍ ANALOGOVÝMI MĚŘICÍMI PŘÍSTROJI.....	15
1.4.1 Absolutní chyba .....	16
1.4.2 Relativní chyba.....	16
1.4.3 Třída přesnosti.....	16
1.5 CHYBY DIGITÁLNÍCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ .....	17
1.6 NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	18
1.6.1 Vyhodnocení standardních nejistot metodou A .....	19
1.6.2 Vyhodnocení standardních nejistot metodou B .....	20
1.7 MĚŘENÍ FREKVENCE.....	21
1.7.1 Přímé měření frekvence .....	22
<b>2 GPS</b> .....	<b>24</b>
2.1 HISTORIE GPS.....	24
2.1.1 První část.....	24
2.1.2 Druhá část.....	25
2.1.3 Třetí část.....	25
2.2 OBĚŽNÉ DRÁHY DRUŽIC .....	25
2.3 STRUKTURA SYSTÉMU GPS.....	26
2.3.1 Kosmický segment .....	26
2.3.2 Řídící segment.....	27
2.3.3 Uživatelský segment .....	27
2.4 PRINCIP FUNGOVÁNÍ GPS.....	28
2.5 SIGNÁLY GPS .....	28
2.6 ROZDĚLENÍ GPS Z UŽIVATELSKÉHO HLEDISKA.....	29
2.6.1 Výběrový přístup SA (Selective Availability) .....	30
2.7 DIFERENČNÍ GPS .....	30
<b>3 OSCILÁTORY</b> .....	<b>32</b>
3.1 MECHANICKÉ OSCILÁTORY .....	32
3.1.1 Kyvadlo .....	32
3.2 ELEKTRONICKÉ OSCILÁTORY .....	33
3.2.1 Fázová podmínka kmitání .....	33
3.2.2 Amplitudová podmínka kmitání .....	34
3.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY OSCILÁTORŮ .....	34
3.3.1 Dlouhodobá stabilita .....	34
3.3.2 Krátkodobá stabilita .....	34

3.3.3	Přesnost frekvence .....	34
3.4	OSCILÁTORY S VELKOU STABILITOU KMITOČTU.....	35
3.4.1	Krystalový oscilátor .....	35
3.4.2	Rubidiový oscilátor .....	36
3.4.3	Cesiový oscilátor .....	36
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>VYTVOŘENÍ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ DLOUHODOBÉ STABILITY OSCILÁTORŮ .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....</b>	<b>41</b>
6.1	SIM 940 10MHZ RUBIDIOVÝ FREKVENČNÍ STANDARD.....	41
6.2	ČASOVÝ A FREKVENČNÍ STANDARD GPG24.....	41
6.3	AGILENT 33220A.....	42
6.4	PENDULUM CNT-91 .....	43
6.5	AGILENT HP 53131A .....	43
6.6	AGILENT 108833A GPIB (GENERAL PURPOSE INTERFACE BUS) .....	44
6.6.1	Popis rozhraní GPIB .....	45
<b>7</b>	<b>SOFTWARE PRO OBSLUHU A MĚŘENÍ.....</b>	<b>46</b>
7.1	VEE PRO.....	46
7.2	PROGRAM PRO OBSLUHU A AUTOMATIZACI MĚŘENÍ .....	46
<b>8</b>	<b>POSTUP MĚŘENÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>49</b>
8.1	URČENÍ KOMBINOVANÉ STANDARDNÍ NEJISTOTY .....	49
8.2	URČENÍ FREKVENČNÍ STABILITY.....	50
8.3	ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT.....	50
8.3.1	Postup a vysvětlivky ke zpracovaným datům .....	51
8.3.2	SIM 940 jako zdroj po dosažení provozní teploty; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po zapnutí.....	51
8.3.3	SIM 940 jako zdroj po zapnutí; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty .....	53
8.3.4	Agilent 3322A jako zdroj po dosažení provozní teplot; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po zapnutí.....	54
8.3.5	Agilent 3322A jako zdroj po zapnutí; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty .....	56
8.3.6	GPG24 jako zdroj po dosažení provozní teploty; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty .....	57
8.4	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	58
<b>9</b>	<b>VZOROVÝ PROTOKOL A NÁVOD PRO ZAVEDENÍ DO VÝUKY.....</b>	<b>60</b>
9.1	ÚKOL MĚŘENÍ.....	60
9.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	60
9.3	TEORIE MĚŘENÍ .....	61
9.3.1	Dlouhodobá stabilita oscilátorů.....	61
9.3.2	Přímé měření frekvence .....	61
9.3.3	Chyby měření .....	62

---

9.4	POSTUP MĚŘENÍ.....	63
9.5	PROGRAM PRO AUTOMATIZACI MĚŘENÍ.....	63
9.6	GRAF PRŮMĚRNÉ HODNOTY A SMĚRODATNÉ ODCHYLKY V ZÁVISLOSTI NA ČASE.....	64
9.7	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	65
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>67</b>
<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>		<b>69</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>71</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>73</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>74</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>76</b>

## ÚVOD

V posledních deseti letech došlo k prudké expanzi GPS technologií. Dnes se s nimi setkáváme téměř v každém automobilu (navigace) a mobilním telefonu. Uživatelé využívají GPS technologie především pro určení přesné polohy, na které se aktuálně nachází.

Mnoho lidí se domnívá, že GPS technologie tvoří jen přijímače v autech. Tento pohled je velice zúžený, jelikož systém GPS je rozdělen do tří segmentů (kosmický, řídicí uživatelský) a jeho původní využití sloužilo výhradně pro armádní účely. V dnešní době je hojně využíván v letectví, námořní dopravě, zemědělství, ve vesmírných projektech atd.

Pro určení přesné polohy přijímači GPS jsou klíčové přesné parametry a počet viditelných satelitů. Viditelnými satelity jsou myšleny satelity, od kterých je přijímač schopen přijímat signál. Zvyšujícím se počtem viditelných satelitů, stoupá přesnost určení výsledné polohy. Mezi nejdůležitější parametry patří čas, který je v GPS přijímačích řízen pomocí integrovaného oscilátoru a je jedním z parametrů pro určení přesné polohy. Jakákoli nepřesnost či nestabilita oscilátoru, způsobí odchylku mezi časem přijímače a družice. Tato odchylka má za následek zkreslení výsledné polohy až o několik metrů. Pár metrů není mnoho, ale pokud se bude brát v úvahu, že raketoplán letí rychlostí 7500 m/s a dojde ke zkreslení času v přijímači o 1 sekundu, raketoplán mine cíl o 7,5 kilometru. Z tohoto důvodu je měření dlouhodobé stability oscilátorů velice důležité, aby bylo možné vzniklé chyby a nepřesnosti odstranit, či zahrnout do výpočtu pro určení přesné polohy.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 MĚŘENÍ

Měření znamená číselné zkoumání vlastností předmětů (jevů, procesů) obvykle porovnáváním s obecně přijatou jednotkou. Výsledkem měření je tedy číslo, které vyjadřuje poměr zkoumané veličiny k jednotce. Jednotka je buď definována fyzikální konstantou, nebo je vztažena k určité mezinárodně přesné jednotce. Vždy je nezbytné, aby jednotka byla jednoznačně i přesně stanovena, a aby její neproměnnost byla co nejdůkladněji zajištěna. Význam měření je hlavně v tom, že:

- charakterizuje měřenou veličinu významně přesněji než kvalitativní údaje (např. krátký, nízký, lehký)
- dovoluje měření opakovat a porovnávat
- výsledek lze zpracovávat matematicky, především ve vědách [12, 13]

## 1.1 Volba jednotek

Již v minulosti vyvstala potřeba měřit, aby bylo možné při obchodování jednoznačně definovat např. kolik látky kupec koupí. Pro měření délky, lidé užívali rozměry lidského těla např.: palec, stopa či loket. S délkou si tedy lidé v minulosti dokázali poradit, ale ne u všech fyzikálních veličin vystačili s jednotkami délky a proto bylo nutné pro fyzikální veličiny, jako jsou teplota, tlak, hmotnost atd. jednotky vytvořit.

Jednotka fyzikální veličiny se stanoví tak, že definuje experimentální předpis pro její jednoznačné určení, např. teplotní stupeň je 273,16 díl teplotního rozdílu mezi absolutní nulou a teplotou trojného bodu vody měřený na termodynamické stupnici teplot. Za jednotku se také může stanovit veličina, kterou vykazuje určité těleso – prvotní jednotka – prototyp za předepsaných podmínek, např. metr byl až do roku 1960 definován jako vzdálenost mezi dvěma základními ryskami, vyznačenými na mezinárodním prototypu uloženém v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy, měřená při teplotě 0 °C a tlaku 1 at (760 torrů). [1,9]

Základní jednotky se vyznačují tím, že jsou nezávislé na ostatních jednotkách. Jednotky, které jsou násobky či mocninami základních jednotek, se nazývají odvozené.

## 1.2 Měřicí přístroje

Měřené elektrické veličiny není možno přímo vnímat smyslovými orgány. Měření se proto uskutečňuje nepřímou, a to převodem na jinou fyzikální veličinu nebo na počet impulzů.

K převodu veličin a následnému zobrazení převedené veličiny slouží měřicí přístroje analogové a číslicové. K analogovým měřicím přístrojům (přístrojům s analogovým zobrazováním) patří ručkové přístroje a osciloskop. K vlastnímu převodu měřené veličiny dochází v měřidle. [7]

Měřicí přístroje slouží k určování velikosti měřených hodnot. Důvodem, jejich četného používání je především rychlé a poměrně přesné měření. Fungují na principu porovnávání velikosti zkoumané veličiny s jednotkou. Údaj zobrazený na měřicím přístroji je vyjádřen v příslušných jednotkách nebo je k němu ve známém poměru. Dle měřené veličiny tlaku (rychlosti, teploty, rozměrů), způsobu použití, požadované přesnosti a prostředí, ve kterém pracuje, je jejich konstrukce různě složitá.

Hlavní požadavky na měřicí přístroje jsou:

1. Minimální choulostivost na obsluhu a údržbu
2. Maximální odolnost proti vlivům prostředí, ve kterém pracují
3. Odolnost proti rychlému opotřebení
4. Schopnost opakovatelného určování velikosti měřených veličin

Pro dosažení optimální odolnosti proti nepříznivým vlivům jsou měřicí přístroje uloženy do ochranných pouzder, skříní, opatřují se tlumícími závěsy atd.

Měřicí přístroj v podstatě tvoří dvě základní části:

1. První část, která měřenou hodnotu snímá, se nazývá čidlo (snímač)
2. Druhá část, která měřenou hodnotu odečítá nebo registruje, se nazývá indikátor (ukazatel).

### 1.2.1 Citlivost, přesnost, správnost

- Citlivost přístroje udává, jakou výchylkou ručky reaguje na jednotku měřené veličiny. Čím je tato výchylka větší, tím je přístroj schopen měřit menší hodnoty veličiny. Je-li třeba měřit naopak větší hodnoty veličin velmi citlivým měřicím přístrojem, umožní se to snížením jeho citlivosti, zvětšením měřicího rozsahu. [14]
- Přesnost přístroje je definována jako rozmezí statistické nejistoty výsledků. Souvisí s náhodnými chybami a odpovídá reprodukovatelnosti měření. Vyjadřuje se jako rozptyl kolem střední hodnoty n-tice naměřených výsledků. [15]

- Správnost přístrojů udává průměrnou vzdálenost výsledků měření od skutečné hodnoty a souvisí se systematickými chybami. Odpovídá odchylce průměrné hodnoty výsledku měření od referenční hodnoty. Zatímco přesnost lze odhadnout na základě statistické analýzy opakovaných měření, správnost je nutno definovat s využitím standardů nebo vyššího počtu přístrojů.[15]

### 1.3 Chyby měření

Měřením nelze zjistit přesnou hodnotu zkoumané veličiny, jelikož je ovlivňována mnoha nežádoucími vlivy (nedokonalost přístrojů, změny vnějších podmínek atd.). Tyto vlivy se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Naměřené hodnoty se pak pohybují v určitém rozmezí od skutečné hodnoty. Proto je důležité definovat, v jakých mezích se skutečná hodnota pohybuje. Tento údaj lze zjistit vyhodnocením nepřesností neboli chyb, které při měření vznikají. Čím je chyba při měření menší, tím je měřicí přístroj či výsledek přesnější.

Chyby, které mohou při měření vzniknout, dělíme podle místa vzniku:

- **Chyby metody** - jejich příčinou jsou různá zjednodušení vztahů pro výpočet měřené veličiny, zjednodušení zapojení, vliv spotřeby měřicího přístroje na jeho údaj, atd. Tyto chyby je obvykle možno vypočítat a výsledek měření podle nich korigovat.
- **Chyby přístrojů** – jsou způsobeny vlastnostmi (nedokonalostí) měřicích přístrojů. Chyba měřicího přístroje je dovolenou chybou měřicího přístroje, která je dána jeho třídou přesnosti. Výpočet těchto chyb se provádí zejména při přesných laboratorních měřeních.
- **Chyby provozovatele** – do této kategorie patří nesprávná volba metody měření, chybné zapojení přístrojů do obvodu, nevhodná volba měřicího rozsahu, chybné čtení údajů, atp. Jedná se o chyby způsobené lidským faktorem.  
Podle jejich charakteru můžeme rozdělit chyby měření na systematické (soustavné), nahodilé a hrubé (omyly).
- **Systematické (soustavné) chyby** – jsou chyby, které se při určitém způsobu měření vyskytují pravidelně. Jsou způsobeny použitou měřicí metodou, vlastnostmi použitých měřicích přístrojů, pozorovatelem, atd. Systematické chyby se do jisté míry stále opakují a zkreslují tak výsledek bez ohledu na počet provedených

měření. Dalším znakem systematických chyb je to, že známe jejich znaménka a většinou i přibližnou hodnotu, takže obvykle můžeme provést korekci výsledku.

- **Nahodilé chyby** – jedná se o chyby, které se vyskytují zcela nepravidelně. Jejich výskyt je náhodný. Zjistit je lze při opakovaném měření. Opakuje-li se měření několikrát za stejných podmínek, se stejným přístrojem a se stejným stupněm pečlivosti, budou se výsledky měření lišit. Vliv nahodilých chyb na výsledek lze omezit opakovaným měřením a z naměřených hodnot se stanoví střední hodnota (aritmetický průměr) podle vztahu:

$$X_M = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (1)$$

X měřená veličina

n počet opakovaných měření

Hodnota arytmičského průměru se nejvíce přibližuje skutečné hodnotě měřené veličiny.

- **Hrubé chyby** – jedná se o chyby, které jsou při měření způsobeny nepozorností (např. odečítání na špatném rozsahu), omylem, únavou, či špatnými podmínkami při měření (špatné osvětlení, extrémní teplota, vyrušování při měření atd.). Hrubé chyby jsou nápadné tím, že se nápadně liší od ostatních výsledků měření nebo leží mimo předpokládaný průběh charakteristiky. Tyto chyby se tedy z dalšího zpracování naměřených hodnot vylučují a dále se s nimi nepočítá. [3, 10]

## 1.4 Chyby měření analogovými měřicími přístroji

Hlavní příčiny chyb u analogových měřicích přístrojů jsou:

- nepřesnosti výroby a kalibrace
- oteplení vlastní spotřebou
- stárnutí materiálů a součástí
- rušivé síly a momenty
- vnitřní rušivá magnetická a elektrická pole
- opotřebení a poškození měřicího přístroje [10]

### 1.4.1 Absolutní chyba

Absolutní chyba měření analogovými přístroji je definována jako rozdíl naměřené a skutečné hodnoty měřené veličiny

$$\Delta_x = X_N - X_S \quad (2)$$

$X_N$  naměřená hodnota veličiny

$X_S$  skutečná hodnota veličiny

Skutečnou hodnotu měřené veličiny nelze nikdy přesně zjistit, proto se výpočet nahrazuje tzv. konvenční pravou hodnotou, což je hodnota zjištěná podstatně přesnějším měřením.

Jednotkou absolutní chyby je jednotka příslušné měřené veličiny. Absolutní chyba může nabývat kladných i záporných hodnot. [1,10]

### 1.4.2 Relativní chyba

Relativní chyba je rovna velikosti absolutní chyby vztažené ke skutečné hodnotě měřené veličiny a nejčastěji se udává v procentech.

$$\delta_X = \frac{\Delta_X}{X_S} 100 [\%] \quad (3)$$

Při posuzování se obvykle dává přednost relativní chybě.

### 1.4.3 Třída přesnosti

Při měření působí na měřicí přístroj řada vnitřních rušivých vlivů (vznikají nedokonalostí přístroje). Každý z těchto vlivů zanáší do měření určitou chybu a přístroj jako celek pak vykazuje tzv. základní chybu, která je souhrnem všech těchto dílčích chyb. Pro praktickou potřebu byla zavedena a normována charakteristika nazývaná třída přesnosti  $\delta_{TP}$ . Třída přesnosti zahrnuje všechny dílčí chyby a definuje tak (maximální, dovolenou) relativní chybu v celém měřicím rozsahu přístroje.

$$\delta_{TP} = \frac{|\Delta_m|}{X_R} 100 [\%] \quad (4)$$

$\Delta_m$	mezní (maximální) absolutní chyba přístroje
$X_R$	největší hodnota měřicího rozsahu

Maximální hodnota měřicího rozsahu  $X_R$  je určena:

- horní hranicí měřicího rozsahu (je-li dolní hranicí nula),
- součtem obou mezních hranic (je-li nula uprostřed stupnice),
- rozdílem horní a dolní hranici (u přístrojů s potlačenou nulou)

Má-li přístroj určitou třídu přesnosti, je tím definována jeho maximální dovolená relativní chyba vyjádřená v % největší hodnoty měřicího rozsahu. Dle ČSN se rozeznávají u analogových měřicích přístrojů tyto třídy přesnosti:

$$0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5$$

Je-li známa třída přesnosti přístroje, lze z její hodnoty určit maximální (mezní) absolutní chybu, kterou může přístroj vykazovat. [3, 10]

## 1.5 Chyby digitálních měřicích přístrojů

U digitálních měřicích přístrojů jsou nejčastěji způsobeny chyby měření převodníky, které převádí všechny měřené veličiny na stejnosměrné napětí.

Většina výrobců digitálních přístrojů udává přesnost přístroje (tzv. základní chybu) ve tvaru  $\delta_X = \pm(\delta_1 + d)$ , někteří ve tvaru  $\delta_X = \pm(\delta_1 + \delta_2)$ , kde

$\delta_1$	chyba z naměřené hodnoty, bývá vyjádřena v % a je v celém měřicím rozsahu konstantní někdy se za ni připisuje značka rdg (fading – čtení)
$\delta_2$	chyba z měřicího rozsahu, někdy se za ni připisuje značka FS (full scale – plný rozsah)
$d$	chyba udaná v počtu digitů (jednotek) posledního místa displeje. Její přepočtení na chybu z měřicího rozsahu závisí na počtu zobrazovaných míst displeje. Přepočtení na procentuální chybu z měřicího rozsahu je:

$$\delta_2 = \frac{d}{\text{maximální počet indikovaných jednotek}} 100 [\%] \quad (5)$$

Celkovou relativní chybu digitálního přístroje lze vypočítat podle vztahu:

$$\delta_X = \pm \left( \delta_1 + \delta_2 \frac{X_R}{X_M} \right) [\%] \quad (6)$$

$X_R$  hodnota měřicího rozsahu

$X_M$  měřená hodnota

Moderní digitální přístroje přepínají rozsahy automaticky a to tak, aby bylo při měření vždy dosaženo maximální přesnosti. [8, 10]

## 1.6 Nejistoty měření

Jak již bylo zmíněno, na měření působí nejrůznější vlivy, které způsobují zkreslení hodnot měřené veličiny. Naměřené hodnoty se (po aplikaci korekcí systematických chyb) pohybují v určitém „tolerančním pásmu“ kolem skutečné hodnoty. Rozsah hodnot, které je možno racionálně přiřadit k měřené veličině, charakterizuje právě nejistota měření.

Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je standardní nejistota. Je to standardní (směrodatná) odchylka veličiny, pro niž je nejistota udávána. Označuje se symbolem  $u$  (uncertainty, česky nejistota).

Standardní nejistoty se dělí podle způsobu svého vyhodnocení:

- **standardní nejistoty typu (kategorie) A (označení  $u_A$ )** - jsou stanoveny statistickou analýzou z výsledků opakovaných měření. Podobný postup se používá u náhodných chyb měření. Jejich příčiny nelze určit a jejich hodnota klesá s počtem měření;
- **standardní nejistoty typu (kategorie) B (označení  $u_B$ )** - jsou získány jinak než statistickým zpracováním výsledků opakovaných měření. Jsou vyhodnoceny pro jednotlivé zdroje nejistoty konkrétního měření a jejich hodnoty nejsou závislé na počtu opakování měření (obdobně jako systematické chyby měření). Pocházejí od různých zdrojů a jejich společné působení vyjadřuje výsledná standardní nejistota typu B.

V praxi jsou oba typy nejistot samostatně nedostačující. Proto je nutné stanovit výsledný efekt kombinace nejistot měření obou typů, A i B. Sloučením obou typů nejistot vzniká tzv. kombinovaná standardní nejistota  $u_C$ , která se získá sloučením standardní nejistoty typu A označené  $u_A$  s výslednou standardní nejistotou typu B označenou  $u_B$ . dle vztahu:

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (7)$$

Směrodatná odchylka (a tedy i standardní nejistota) veličiny  $x$  představuje u veličiny rozdělené podle normálního rozdělení pravděpodobnosti polovinu šířky intervalu, v jehož středu leží střední hodnota veličiny  $x$ , a ve kterém s pravděpodobností přibližně 68 % leží každá hodnota veličiny  $x$ .

Abychom zajistili, že v pásmu, jehož šířka je určená nejistotou, leží větší procento hodnot než např. 68%, je nutné použít interval o šířce větší než  $2u$ . Standardní nejistota se vynásobí koeficientem rozšíření  $k_r$ . Pro normální rozdělení odpovídá koeficient rozšíření  $k_r = 2$  úrovni spolehlivosti 95 % a  $k_r = 3$  odpovídá úrovni spolehlivosti 99,7 %.

Rozšířená nejistota označená  $U(x)$  je definována jako součin kombinované standardní nejistoty  $u_C$  a koeficientu rozšíření  $k_r$ , tedy vztahem:

$$U(x) = k_r u_C \quad (8)$$

$U$  rozšířená nejistota

$k_r$  koeficient rozšíření

$u_C$  kombinovaná standardní nejistota

$x$  měřená veličina

S rozšířenou nejistotou je nutno vždy uvést číselnou hodnotu použitého koeficientu rozšíření  $k_r$ . [16]

### 1.6.1 Vyhodnocení standardních nejistot metodou A

Metoda vyhodnocení nejistot typu A vychází ze statistické analýzy série opakovaných měření. Je-li  $n$  nezávislých stejně přesných pozorování ( $n > 1$ ), bude odhad výsledné hodnoty  $x$  měřené veličiny  $X$  reprezentován hodnotou výběrového průměru (aritmetického průměru).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

Důležité je doplnit, jakou chybou je zatížen výsledek. K hodnocení přesnosti výsledku jednoho (resp. jednotlivého) měření se zavádí výběrová směrodatná odchylka jednoho měření:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i^2)}{(n-1)}} \quad (10)$$

$$\Delta_i = (\bar{x} - x_i) \quad (11)$$

Nejistotu příslušnou k odhadu  $\bar{x}$  lze určit jako směrodatnou odchylku této výsledné hodnoty a je tedy možné psát:

$$u_A(X) = \sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

$\sigma_{\bar{X}}$  odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru  $\bar{X}$

$\sigma$  směrodatná odchylka libovolného odměru z výběrového souboru

$n$  počet prvků výběrového souboru

Tato nejistota je způsobena kolísáním naměřených údajů. V případě malého počtu měření ( $n < 10$ ) je hodnota určená dle uvedeného vztahu málo spolehlivá. Pro maximální spolehlivost je tedy nutné opakovat měření vícekrát. [16]

### 1.6.2 Vyhodnocení standardních nejistot metodou B

Standardní nejistotu typu B lze odhadnout na základě dostupných informací a zkušenosti. Nejčastěji se používají:

- technické údaje výrobce měřicího přístroje,
- zkušenosti z předchozích měření,
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky,
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů,
- nejistoty referenčních údajů v příručkách.

Pokud se přístroj používá za stanovených pracovních podmínek, určí se provozní nejistota (údaje) přístroje z parametrů udaných výrobcem. Jediným zdrojem nejistoty typu B je v tomto případě vlastní nepřesnost přístroje.

Hodnota měřené veličiny leží s velkou pravděpodobností v intervalu  $\langle -\Delta Z_{\max}, +\Delta Z_{\max} \rangle$ . Pravděpodobnost výskytu jakékoliv hodnoty z tohoto intervalu je stejná. Nejistota údaje přístroje se pak vypočítá ze vztahu:

$$\sigma = \frac{\Delta Z_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

V případě, že se přístroj nepoužívá za stanovených pracovních podmínek, tj. ovlivňující veličiny nabývají hodnot mimo rozsah definovaný výrobcem a je znám jejich vliv na údaj přístroje, skládá se postup vyhodnocení nejistoty údaje přístroje metodou B.

Pro vyhodnocení nejistot metodou B je nutné definovat zdroje dílčích nejistot  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ . Pro každou z ovlivňujících veličin  $Z$  se určí interval  $\pm\Delta Z_{\max}$ , jehož meze nebudou s velkou pravděpodobností překročeny odchylkou  $\Delta Z$  od jmenovité hodnoty veličiny  $Z$ . Na základě těchto informací se určí nejistota  $u_z$  ze vztahu  $u_z = \Delta Z_{\max}/m$ , kde hodnota  $m$  je určena dle druhu rozdělení (rovnoměrné, normální). [16]

Výsledná standardní nejistota typu B se pak vypočítá ze vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{zi}^2} \quad (14)$$

## 1.7 Měření frekvence

Frekvence je jednou z charakteristických veličin periodicky proměnných napětí a proudů. Je definována počtem period sledované veličiny za sekundu. Spolu s efektivní hodnotou napětí je základním parametrem střídavého elektrického signálu.

V technických aplikacích se používají frekvence od zlomků Hz po desítky GHz. Toto široké pásmo se dělí:

- velmi nízké frekvence –  $10^{-3}$  až 10 Hz
- technické frekvence – 10 až 1000 Hz
- střední (tónové) frekvence – 20 Hz až 20 kHz
- vysoké a velmi vysoké frekvence – nad 20 kHz

Střední a vysoké frekvence se nejčastěji používají ve zvukové technice a radiotechnice. Podle způsobu měření frekvence se rozlišuje měření na přímé a nepřímé. Při přímých měřeních udává hodnotu frekvence ručka přístroje, rozkmitaný jazýček či displej přístroje. Při nepřímých měřeních se frekvence určí výpočtem z velikosti proměnných parametrů.

Pro nepřímá měření frekvence se velmi často používá osciloskop. Na jeden kanál se přivádí signál neznámé frekvence a na druhý signál z generátoru frekvence. Porovnáním neznámé frekvence se známou frekvencí z generátoru lze snadno zjistit velikost neznámé frekvence. [10]



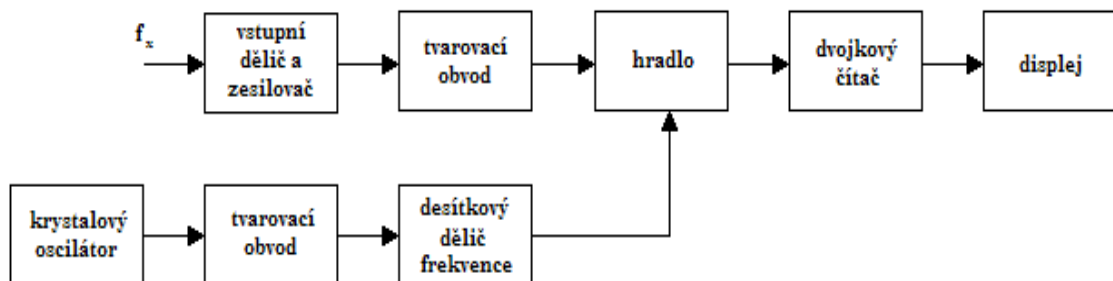
Obr. 1. Osciloskop Rigol DS 6104 [24]

Jelikož se v současné době nepřímých metod příliš nevyužívá, budou dále zmíněny pouze metody přímé.

### 1.7.1 Přímé měření frekvence

V dnešní době se výhradně používají číslicové měřicí přístroje. Blokové schéma pro přímé měření je na Obr. 2. Skládá se z dvojkového čítače (obvodu počítajícího počet impulzů, které přišly na jeho vstup) a řady pomocných obvodů. Vstupní dělič a zesilovač upravují velikost přivedeného signálu na úroveň, kterou přístroj zpracovává. Tvarovací obvody upravují průběh měřených a pomocných veličin na obdélníkový průběh. Hlavní hradlo slouží jako elektronický spínač, který je spínán na předem definovanou dobu. Tuto dobu určuje frekvence krystalového oscilátoru, která je následně vydělena v desítkovém děliči frekvence. Konstanta pro dělení v desítkovém děliči je nastavena tak, aby doba trvání impulzu byla dekadickým podílem či násobkem jedné sekundy.

Čítač čítá po definovanou dobu obdélíkové impulzy, jejichž frekvence je shodná s frekvencí příváděného signálu. Po ukončení načítání se zobrazí hodnota měřené frekvence na displeji. [1, 10]



Obr. 2. Schéma přístroje pro přímé měření frekvence

Frekvenci lze měřit několika způsoby. Nejčastěji je pro měření využíván čítač, který čítá frekvenci ze zdroje kmitů, který představuje generátor. Čítač s generátorem jsou propojeny koaxiálním kabelem. Následně záleží na uživateli, zda bude zapisovat data z čítače ručně na papír nebo si nechá data z čítače zpracovat v počítači.

## 2 GPS

GPS je zkratkou amerických slov Global Positioning System, což v překladu znamená globální polohový systém. Tento satelitní navigační systém se používá ke zjištění aktuální polohy a poskytuje velmi přesnou časovou referenci téměř kdekoli na Zemi.

### 2.1 Historie GPS

Historii družicových systémů lze začít datovat na začátku šedesátých let, kdy vzdušné síly ministerstva obrany USA byly pověřeny sloučením pokusných programů Timation a 621B do programu nazvaného GPS NAVSTAR. Jako první elektronické navigační systémy lze považovat radiomajáky, jejichž přesnost nebyla dostačující. Po vynalezení umělých družic se začalo uvažovat, zda by nemohly sloužit jako přesné navigační systémy.

První navigační systém na principu umělých družic s názvem Transit byl uveden do provozu v šedesátých letech. Rovněž bývalý Sovětský svaz na konci šedesátých let nezáhálel a uvedl do provozu navigační systém nazvaný Cyklon. Sovětský svaz vynalezl další dva systémy, pracující na obdobném principu jako Cyklon. První z nich, Parus, sloužil k vojenským účelům a byl tvořen šesti družicemi. Druhý, s názvem Cikada, byl vynalezen pro civilní sféru a byl tvořen čtyřmi družicemi.

Po zkušenostech s Dopplerovými systémy se na začátku sedmdesátých let USA rozhodly vybudovat nový družicový navigační systém, který by umožňoval určení polohy v trojrozměrném prostoru spolu s přesným časem, a zpřístupnil by tak družicovou navigaci i letectvu. Od prosince 1973 rozvoj programu GPS řídí společná programová skupina (Joint Program Office), která patří do kosmického oddělení velitelstva systémů vzdušných sil USA. JPO tvoří zástupci letectva, námořnictva, armády, námořní pěchoty, pobřežní stráž, obranné kartografické agentury, zástupci států NATO a Austrálie. Práce na budování systému GPS NAVSTAR se rozdělily na tři části:

#### 2.1.1 První část

První část probíhala na začátku osmdesátých let 20. století, kdy byl systém ve zkušebním provozu. V této době byla konstruována i pokusná uživatelská zařízení. V roce 1978 byly vypuštěny první čtyři družice firmy Rockwell, které po omezenou dobu umožňovaly trojrozměrnou navigaci. Tyto testy bylo možné uskutečnit pouze na testovacím polygonu v

Arizoně (Yuma Proving Ground) nebo v jeho okolí. Těchto družic bylo vypuštěno celkem 11 a jsou označovány jako družice bloku I.

### 2.1.2 Druhá část

V této části projektu byl hlavní důraz kladen zejména na vybudování komunikační infrastruktury a řídicích středisek. V roce 1980 byla firmě Rockwell přidělena objednávka na vývoj a výrobu 28 družic bloku II.

### 2.1.3 Třetí část

V roce 1989 byla vypuštěna první z 28 družic bloku II. Družice bloku II zpočátku doplňovaly družice bloku I, které byly postupem času zcela nahrazeny. Tímto krokem se postupně zvyšovaly možnosti systému. Od roku 1993 lze lokalizovat trojrozměrnou polohu libovolného místa na Zemi neomezeně 24 hodin denně. Desátá až dvacátá osmá družice jsou označovány jako družice bloku IIA, které mají modifikovanou paměťovou jednotku, díky níž nemusí komunikovat s řídicím střediskem až 108 dní.

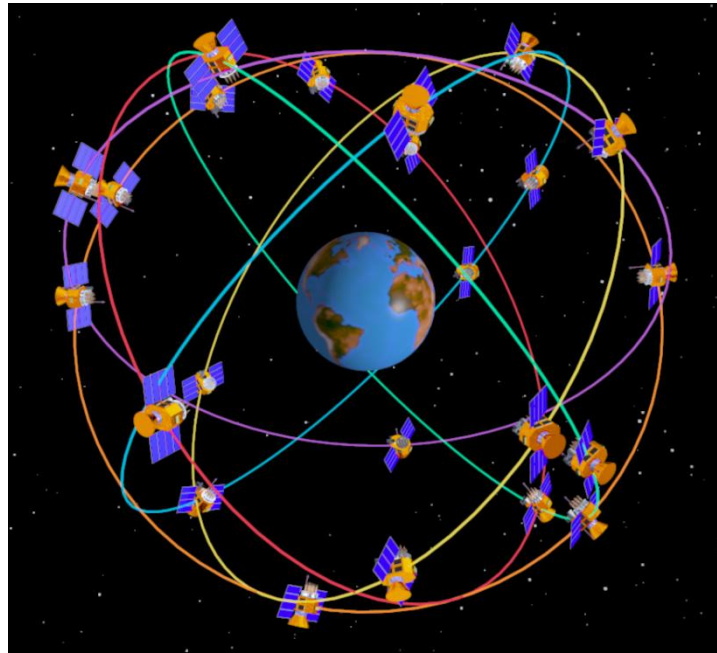
V roce 1989 byl uzavřen kontrakt s firmou General Electrics, která měla za úkol modifikovat a vyrobit 20 družic, které by byly schopné činnosti alespoň 180 dnů bez kontaktu s řídicím střediskem. Tato firma nejen, že tento úkol splnila, ale zajistila také vzájemnou komunikaci a zjišťování polohy mezi družicemi. Nově vytvořený systém poskytuje rychlejší zjištění chyby na poškozené družici a zároveň dokáže zaslat odpovídající zprávu, aniž by kontaktoval řídicí středisko. Vypuštěním třicáté páté družice 8. prosince 1993 bylo dosaženo počátečního operačního stavu systému (IOC - Initial Operational Capability). V systému tedy pracovalo 21 navigačních a 3 aktivní záložní družice. Podmínkou pro dosažení plného operačního stavu (FOC - Full Operational Capability) byla činnost 24 družic bloku II. Tato podmínka byla splněna 3. března 1994.

## 2.2 Oběžné dráhy družic

Podle původního plánu měly být družice vypuštěny na tři oběžné dráhy se sklonem  $63^\circ$  k polární rovině. Tři oběžné dráhy byly zvoleny za účelem nepřetržitého chodu celého systému. Tato volba oběžných drah měla zaručit stálou viditelnost minimálně šesti a maximálně jedenácti družic při povoleném elevačním úhlu  $5^\circ$ , čímž byla zajištěna maximální robustnost systému, který rovněž umožňoval měnit dráhu oběhu všech družic. Doba oběhu kolem Země byla 11 h 58 min, což jsou víc jak dva oběhy denně.

Později byla vytvořena nová koncepce, ve které se zvýšil počet oběžných drah na šest a sklon k polární rovině se snížil na  $55^\circ$ . Nyní na každé dráze obíhají čtyři družice. Na oběžných drahách tedy zůstalo nadále 24 družic, pouze došlo k jejich přeskupení na nové oběžné dráhy.

Na Zemi se nacházejí záložní družice, které jsou schopny nahradit poškozenou družici na oběžné dráze v průběhu dvou dnů.



Obr. 3. Oběžné dráhy družic [25]

## 2.3 Struktura systému GPS

Systém GPS lze rozdělit do tří segmentů:

- Kosmický
- Řídící
- Uživatelský

### 2.3.1 Kosmický segment

Kosmický segment GPS systému tvoří aktivní a záložní družice, které jsou rozmístěny na šesti oběžných drahách tak, aby z každého místa na Zemi byly viditelné vždy alespoň čtyři. Družice obíhají ve výšce 20 200 km nad povrchem Země. Každá družice je vybavena přijímačem a vysílačem, atomovými hodinami (cesiový nebo rubidiový standard), tryskami pro pohon a řadou dalších přístrojů, které slouží pro navigaci nebo jiné speciální účely.

Jako zdroj elektrické energie používají akumulátory, které jsou dobíjeny pomocí solárních panelů. Družice komunikují s pozemními řídicími centry, které na základě získaných informací mohou korigovat dráhu jejich letu.

### 2.3.2 Řídicí segment

Řídicí složka nese zodpovědnost za nepřetržité monitorování a řízení systému GPS, určování systémového času, korekci oběhu družic, pravidelné obnovování navigační zprávy pro jednotlivé družice atd.

Řídicí segment tvoří:

- Velitelství (Los Angeles, USA)
- Hlavní řídicí stanice (Colorado Springs, USA)
- Vysílací stanice (Ascencion, jižní Atlantik; Diego Garcia, Indický oceán; Kwajalein, Polynésie; Cape Canaveral, Florida)
- Osmnáct monitorovacích stanic (umístěné rovnoměrně po obvodu Země)

Hlavní řídicí stanice (MCS - Master Control Station) je umístěna nedaleko letecké základny Falcon se speciální ochranou. Monitorovací stanice sledují družice pasivně, přijímají jejich data (rychlost, pozici, výšku atd.), která jsou posílána dále do hlavní řídicí stanice. Zde jsou na základě přijatých dat vypočteny přesné parametry oběžných drah (efemeridy) a korekce hodin pro jednotlivé družice s přesností na jednu mikrosekundu. Tyto vypočtené parametry jsou minimálně jednou denně posílány družicím pomocí vysílacích stanic. Tato kalibrace hodin a oběžných drah družic jsou velice důležité pro přesnější určení polohy uživatelů GPS.

### 2.3.3 Uživatelský segment

Uživatelský segment lze rozdělit podle účelu využití na vojenský sektor a civilní sektor. Oba sektory tvoří GPS přijímače (pozemní, námořní, letecké kosmické), uživatelé, nástroje a postupy nutné k vyhodnocení měření. GPS přijímače dekodují přijaté signály z družic a provedou předběžné výpočty polohy, rychlosti a času. Signály je nutné přijímat alespoň ze čtyř družic, jelikož pro určení přesné polohy je potřeba tří souřadnic a přesný čas.

Přijímače se dělí na jednokanálové a vícekanálové. Jednokanálové přijímače mají pouze jeden vstupní kanál. To znamená, že mohou přijímat data pouze z jedné družice. Pro zjištění přesné polohy se musí tento kanál postupně přepínat mezi jednotlivými družicemi.

Vícekanálové přijímače mají dostatečný počet vstupních kanálů, aby mohli současně sledovat všechny dostupné družice a tím zvyšovat přesnost výpočtu.

## 2.4 Princip fungování GPS

Přijímač GPS pasivně určuje vzdálenost od viditelných satelitů a přesnou polohu následně určí triangulací. Každá družice vysílá údaje o své astronomicky přesné poloze dále přesný čas získaný z atomových hodin, odhad zpoždění signálu v ionosféře a několik dalších dat. Pro stanovení co nejpřesnější vzdálenosti přijímače od družice je nutné, aby byl čas v přijímači stejně přesný jako v GPS satelitu. GPS přijímač vypočítá svoji vzdálenost od družice na základě informací o rychlosti šíření signálu a časového rozdílu mezi odesláním a přijetím signálu. Přesná poloha se určí triangulací. Pokud GPS přijímač přijímá signál z jediného satelitu, nachází se na povrchu pomyslné koule, jejíž střed tvoří satelit vysílající signál. Ve chvíli kdy přijímač zachytí signál z druhého satelitu, přijímač vypočítá průnik povrchů obou koulí, na jejímž povrchu se zákonitě nachází. Signál z třetí družice vytváří třetí pomyslnou kouli, díky které se možnost polohy zúží na dva body, z nichž se pouze jeden nachází na povrchu Země. Získáním signálu ze čtyř a více satelitů se přesnost určení polohy zvyšuje.

## 2.5 Signály GPS

Signály, které družice systému GPS vysílají, jsou odvozené ze soustavy přesných frekvenčních normálů, které definují časovou základnu. Velice přesné oscilátory družic pracují na frekvenci 10,23 MHz, jejímž celočíselným násobením se vytvoří dvě nosné frekvence, které jsou označeny L1 a L2. Nosné frekvence jsou fázově modulované binárními kódy, které slouží na měření času (C/A kód a P kód) a přenos informací (navigační zpráva). Oba vysílané kódy jsou vzájemně časově synchronizovány. C/A kód se vysílá na frekvenci L1 a jeho varianty jsou přiděleny každé družici. Je bez omezení přístupný všem uživatelům GPS. Slouží k navigaci s nižší přesností a časovou synchronizací, umožňuje číst navigační zprávu a je potřebný pro orientaci v P kódu. Od roku 2005 se C/A kód vysílá i na frekvenci L2. [11]

P kód má složitější strukturu a schéma generování není přístupné všem uživatelům. Jsou jím modulovány obě nosné frekvence L1 a L2. Družice bloku II mají možnost zabránit zneužití P kódu jeho transformací na tzv. Y kód. Transformační algoritmus je přístupný pouze autorizovaným uživatelům.

V přijímačích jsou nosné signály dekodovány, ze kterých se získají potřebné údaje pro přesné určení pozice družice v daném čase.

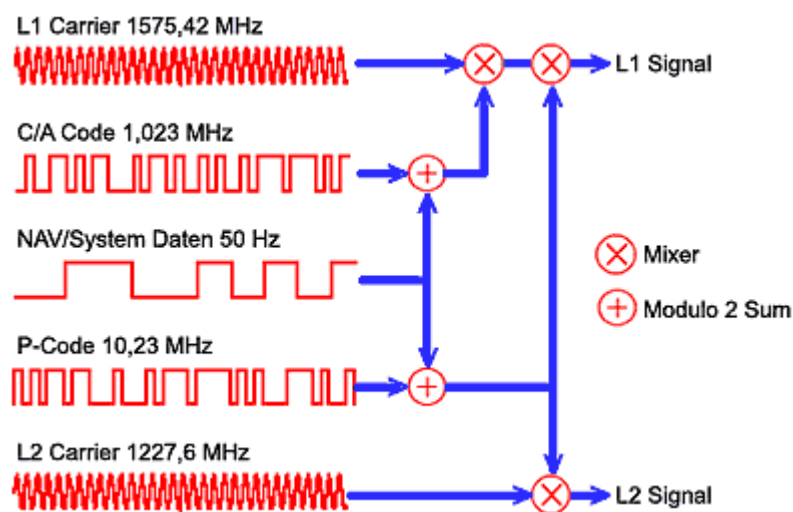
Nosné frekvence:

1. L1 (1575.42 MHz o vlnové délce 19 cm) - standardní polohový systém
2. L2 (1227.60 MHz o vlnové délce 24 cm) - přesný polohový systém.

Frekvence jsou modulovány následujícími kódy:

- C / A - Standardní polohový systém (pro civilní přijímače) Má frekvenci 1.023MHz.
- P - kód, moduluje obě nosné frekvence (využívá se pro civilní i vojenské účely) Má frekvenci 10.23 MHz
- Y - kód, je to vlastně šifrovaný P kód armádou (není určen pro civilní využití)

P a Y kód tvoří základ přesného polohového systému. [4, 11]



Obr. 4. Princip tvorby signálů [26]

## 2.6 Rozdělení GPS z uživatelského hlediska

Při budování GPS se uvažovalo o využití systému nejen vojenskými, ale i civilními uživateli. Proto se hledala rozumná míra omezení přístupu civilních uživatelů, která by zajistila přijatelně nízké riziko zneužití celého systému, a přitom by podstatně neomezila civilní využití. Nakonec bylo rozhodnuto o rozdělení přístupu pro autorizované a neautorizované uživatele. Autorizovaný uživatel je armáda Spojených států, armády vybraných států NATO a někteří civilní uživatelé. Autorizovaní uživatelé využívají službu

s označením přesná polohová služba (PPS - Precise Positioning Service). Tato služba spočívá v přístupu k C / A kódu na nosné frekvenci L1 a k P - kódu (Precision code) resp. Y - kódu (šifrovaný Precision code) na frekvencích L1 a L2 bez omezení. K využívání služby PPS je zapotřebí speciální GPS přijímač, který po zadání hesla dokáže eliminovat umělou chybu SA (Selective Availability) a zpracovávat šifrovaný Y - kód. Neautorizovaní uživatelé využívají standardní polohovou službu (SPS - Standard Positioning Service). Tato služba spočívá v přístupu k C / A kódu a navigačním datovým zprávám na nosné frekvenci L1 a je nepřetržitě k dispozici všem uživatelům GPS.

### 2.6.1 Výběrový přístup SA (Selective Availability)

Americká vláda s ohledem na strategické zájmy a bezpečnost státu rozhodla o zavedení zvláštního režimu provozu GPS tzv. výběrový přístup (SA - Selective Availability). Výběrový přístup záměrně zhoršoval přesnost měření vzdálenosti změnou hodinové frekvence signálu a efemerid ve vysílané navigační zprávě, což mělo za následek zkreslení polohy až o několik stovek metrů. Tato náhodná funkce, která zhoršovala přesnost měření, byla zavedena u všech družic bloku II. Po protestech veřejnosti byl zvláštní režim výběrového přístupu (Selective Availability) vládou Spojených států zrušen.

## 2.7 Diferenční GPS

Diferenční (rozdílová) metoda měření se používá pro zvýšení přesnosti určování polohy v reálném čase. Přesnost určení polohy je závislé na mnoha faktorech např. kvalita GPS přijímače, přesnost udání polohy satelitu, vliv atmosféry na šíření signálu, přesnost zabudovaných hodin přijímače atd. Diferenční metoda vychází z poznatku, že rozdíly údajů měřených dvěma blízkými GPS přijímači jsou zatíženy podstatně menšími chybami, které jsou razantně sníženy vzájemnou závislostí obou měření. Jelikož se signál z družice šíří k oběma přijímačům po téměř identické dráze, je zpoždění signálu, zapříčiněné vlivy atmosféry, téměř stejné. Chyby měření (nezávislé) způsobené samotnými přijímači, různými odrazy od objektů, rušení atd., jsou v současné době obtížně odstranitelné. Jako výslednou chybu měření u diferenciálního GPS, lze tedy považovat součet výše zmíněných nezávislých chyb.

Pro určení polohy metodou diferenční GPS je nutné využít minimálně dva GPS přijímače. První z přijímačů se nazývá referenční stanice. Nachází se na předem známé poloze a je zde možné určit rozdíl mezi skutečnou a vypočtenou polohou (korekce). Tento přijímač

neustále provádí měření ke všem viditelným družicím. Změřené pseudovzdálenosti porovnává s údaji o své poloze a jejich rozdíly vysílá samostatným kanálem k uživateli DGPS, který tvoří druhý přijímač.

V přijímačích uživatelů DGPS se přijaté korekce používají k opravě měření, které tak výrazně zvýší přesnost určení jejich polohy v reálném čase. Korekční údaj se provádí pomocí radiového spojení nebo se zahrne do výpočtů po skončení měření. [4]

### 3 OSCILÁTORY

Oscilátor je systém, kde dochází ke vzájemné přeměně jedné formy energie na jinou a následně se z nově vytvořené formy mění na energii výchozí (původní). Oscilátor se projevuje opakovanou výchylkou dané veličiny do krajních hodnot (minimálních, maximálních). Fyzikálních kmitajících systémů (oscilátorů), lze sestavit velké množství.

Pokud se výchylky pravidelně opakují, jedná se o periodické kmity. V případě lineární vazby systému se jedná o kmity harmonické.

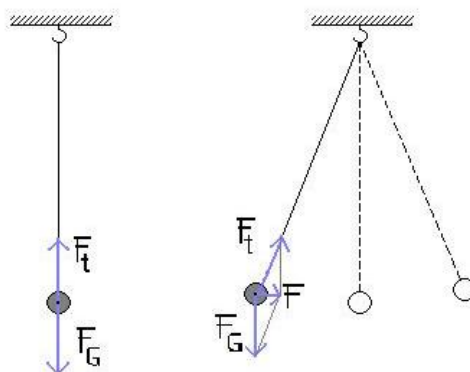
#### 3.1 Mechanické oscilátory

Soustava, která umožňuje vykonat kmitavý pohyb, se nazývá mechanický oscilátor. Typickým příkladem mechanického oscilátoru je závaží zavěšené na pružině. V případě, že dojde k vychýlení závaží z klidové polohy, začne měnit svou polohu ve vertikálním směru střídavě nahoru a dolů neboli bude kmitat.

Za ideálních podmínek, kdy bude gravitační pole homogenní, pružina lineární (síla vyvolaná pružinou je přímo úměrná výchylce) a proti pohybu závaží nebude působit žádný odpor, vznikne harmonický oscilátor. To znamená, že závaží bude kmitat harmonicky.

##### 3.1.1 Kyvadlo

Kyvadlo tvoří závaží zavěšené na provázku. Pokud je zavěšené závaží v klidové poloze, je gravitační síla  $F_G$  rovna tahové síle  $F_T$ . Jestliže dojde k vychýlení z klidové polohy, součtem sil  $F_G$  a  $F_T$  vznikne výslednice sil  $F$ , která se snaží vrátit kyvadlo do klidové polohy, čímž vznikne kmitavý pohyb kyvadla. Po vychýlení se kyvadlo periodicky vrací do své klidové polohy, kde má největší rychlost a pohybuje se dále do polohy největší výchylky, a pak se znovu vrací do klidové polohy.



Obr. 5. Kyvadlo

## 3.2 Elektronické oscilátory

Elektronický oscilátor tvoří zesilovač s kladnou zpětnou vazbou, člen určujícího kmitočtu a omezovač amplitud viz Obr. 6.



Obr. 6. Blokové schéma oscilátoru

Zpětná vazba, která přivádí signál z výstupu na vstup ve stejné fázi, se nazývá kladná zpětná vazba. Zesiluje účinný vstupní signál, jehož zesílení vede opět k zesílení výstupního signálu a tím i signálu zpětnovazebního. Při dostatečně silné zpětné vazbě není třeba na vstup oscilátoru přivádět cizí budící napětí. K rozběhu oscilátoru stačí malá změna napětí (malý zákmit) způsobená např. zapojením napájení. [7]

Ke kompenzaci vlastních ztrát v oscilátoru musí zpětná vazba přivádět ve fázi dostatečně velkou energii, aby se oscilátor kdykoliv rozkmital a kmity udržel. Zpětnovazební napětí musí být nejméně tak velké jako napětí, které oscilátor vybudí a udrží jej v činnosti. Činitel zpětné vazby  $K$  udává, jaká část výstupního napětí je vedena na vstup. Čím větší je napěťový zesilovací činitel  $V_u$ , tím menší může být činitel zpětné vazby  $K$ . Součin  $K \times V_u$  se nazývá kruhové zesílení. K bezpečnému rozběhu oscilátoru je potřeba nastavit zpětnou vazbu tak, aby platilo  $K > 1/V_u$ . Je-li  $K < 1/V_u$ , musí být oscilátor buzen cizím střídavým signálem a po jeho odpojení vlastní kmity postupně ustanou (tlumené kmitání). [3,7]

Aby byl oscilátor schopen kmitání, musí být splněny následující podmínky.

### 3.2.1 Fázová podmínka kmitání

Oscilátor potřebuje zpětnou vazbu, která přivádí na vstup zesilovače část výstupního signálu ve správné souhlasné fázi. [7]

### 3.2.2 Amplitudová podmínka kmitání

Pro rozkmitání oscilátoru je nutné, aby bylo kruhové zesílení větší než 1. Při rezonanci neboli kmitání vlastními kmity, je kruhové zesílení rovno 1.

## 3.3 Základní parametry oscilátorů

Oscilátory a jiné zdroje periodických signálů, používané v elektronice, jsou charakterizovány třemi základními parametry. Je to stabilita frekvence, přesnost frekvence a fázový šum. Stabilita frekvence je obecně definována jako míra její změny s časem. U uvažovaných polovodičových zdrojů signálů je definována dlouhodobá stabilita a krátkodobá stabilita. [17]

### 3.3.1 Dlouhodobá stabilita

Dlouhodobá stabilita  $S_f$  je určena maximální odchylkou  $\Delta f_{\max}$  skutečné frekvence od referenční hodnoty  $f_o$ , která se uvažuje během dostatečně dlouhého časového intervalu  $\Delta t$ , například za 1 minutu, 1 hodinu, 1 den atd.; je závislá především na okolní teplotě a dalších fyzikálních parametrech daného prostředí. [17]

$$S_f = \frac{\Delta f_{\max}}{f_o} \frac{1}{\Delta t} \quad (14)$$

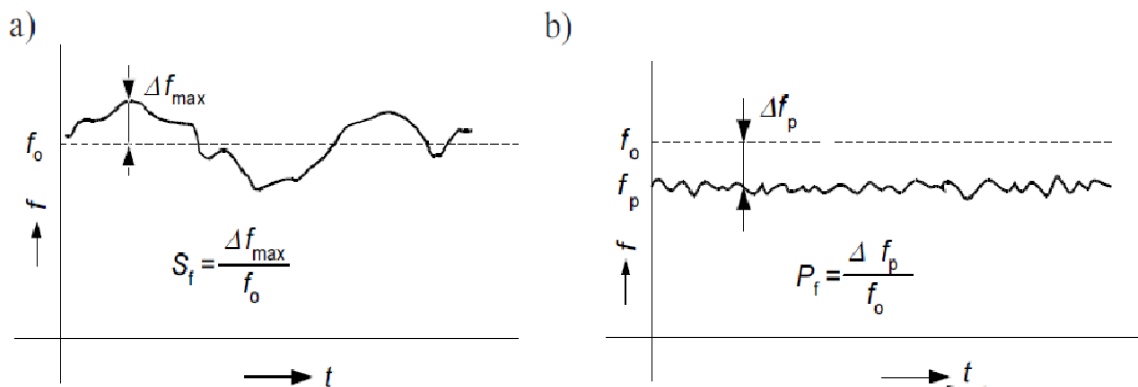
### 3.3.2 Krátkodobá stabilita

Krátkodobá stabilita je odchylka frekvence uvažovaná v relativně krátkém časovém intervalu ( $\Delta t \ll 1$  sekunda), která je způsobena nejrůznějšími náhodnými vlivy (šumem obvodů oscilátoru ap.). [17]

### 3.3.3 Přesnost frekvence

Přesnost frekvence  $P_f$  se vyjadřuje poměrnou odchylkou  $\Delta f_p/f_o$  průměrné hodnoty frekvence  $f_p$ , uvažovanou opět za určitý časový interval  $\Delta t$ , od referenční hodnoty  $f_o$ . Přesnost je charakterizována systematickou a náhodnou chybou; čím jsou tyto chyby menší, tím je přesnost větší. Přesnost vztažená pouze k systematické chybě se někdy nazývá správnost. Význam uvedených pojmů nám objasňují Obr. 7a, b, znázorňující závislost okamžité hodnoty frekvence zdroje sinusového signálu na čase. První průběh (Obr. 7a) odpovídá zdroji, který má malou stabilitu avšak velkou přesnost; na druhém

obrázku (obr. 7b) je naopak průběh charakterizující zdroj s velkou stabilitou a malou přesností (v tomto případě s velkou systematickou chybou).



Obr. 7. Signál generovaný zdrojem: a) s malou stabilitou a velkou přesností; b) s velkou stabilitou a malou přesností [17]

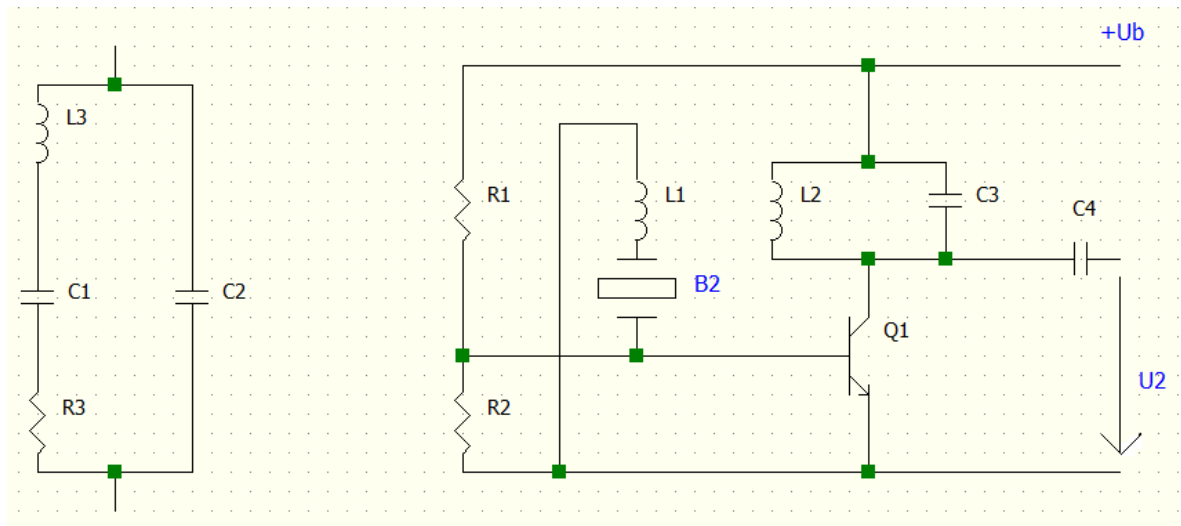
### 3.4 Oscilátory s velkou stabilitou kmitočtu

#### 3.4.1 Krystalový oscilátor

U krystalového oscilátoru je řídicím obvodem krystal, který se vyznačuje velkou stabilitou kmitočtu a vysokou jakostí. Jeho náhradní schéma ukazuje, že může být simulován jak sériovým, tak i paralelním kmitavým (rezonančním) obvodem. Krystaly proto mohou být zapojeny jako paralelní nebo i jako sériové rezonanční obvody.

Při menších požadavcích na přesnost jsou na místo krystalů používány piezoelektrické rezonátory nebo rezonátory s povrchovou vlnou. U krystalového oscilátoru viz obr. Je kladná zpětná vazba největší, když je reaktance kmitajícího krystalu nejmenší, tedy při jeho sériové rezonanci.

Krystalové oscilátory jsou používány v hodinách, v počítačích, kmitočtových generátorech a jako časové základny měřicích přístrojů. [1,7]



Obr. 8. Krystal v krystalovém oscilátoru

### 3.4.2 Rubidiový oscilátor

Používají se jako frekvenční standardy GPS přijímačů, v leteckých aplikacích atd. Předností rubidiového oscilátoru je nízká cena, malé rozměry a krátkodobá stabilita.

Měření přesné frekvence a času je nezbytné pro telekomunikace, televizní a radiové vysílání, navigace a další vědecké experimenty. Pokud raketoplán poletí rychlostí 7900 m/s a dojde ke zkreslení o 1 sekundu, raketoplán mine cíl o 7,9 kilometru.

### 3.4.3 Cesiový oscilátor

Cesiový oscilátor je v laboratorních podmínkách jedním z nejstabilnějších generátorů frekvence. Primárně se používá jako frekvenční nebo časový standard. Pro jeho velkou dlouhodobou stabilitu je používán v atomových hodinách družic.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Pro určení přesné polohy přijímače GPS hraje čas veledůležitou roli. Každá družice vysílá své aktuální souřadnice (x, y, z) a čas odeslání signálu  $t_i$ , který je čtvrtým parametrem pro určení přesné polohy. Pro stanovení co nejpřesnější vzdálenosti přijímače od družice je nutné, aby byl čas v přijímači stejně přesný jako v GPS satelitu.

Pro zachování přesného času jsou zabudovány v přijímači i družici atomové hodiny, které jsou řízeny rubidiovým nebo cesiovým oscilátorem. Jsou velmi stabilní, ale pro výpočet je třeba přesných a synchronních hodin na všech družicích i na Zemi. Jakákoli nepřesnost či nestabilita oscilátorů, způsobí při určení polohy přijímače zkreslení až několik metrů. Z tohoto důvodu je měření dlouhodobé stability oscilátorů velice důležité, aby bylo možné vzniklé chyby a nepřesnosti odstranit, či zahrnout do výpočtu.

Mezi další nežádoucí faktory, které způsobují nepřesnosti výpočtu, patří:

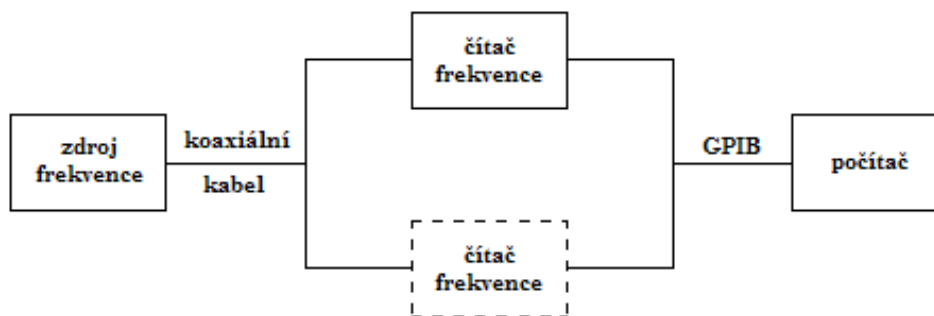
- Atomové hodiny družic  $\pm 2,5$  m
- Ionosférické vlivy  $\pm 4$  m
- Efemeridy družic  $\pm 2,1$  m
- Chyby způsobené mnohacestným šířením signálu (odrazy od budov)  $\pm 1,3$  m
- Troposférické vlivy  $\pm 0,7$  m

Velikost nepřesnosti (chyby) lze vypočítat jako efektivní hodnotu chyby RMS (Root Mean Square) podle vzorce:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{chyba^2}{n}} \quad (15)$$

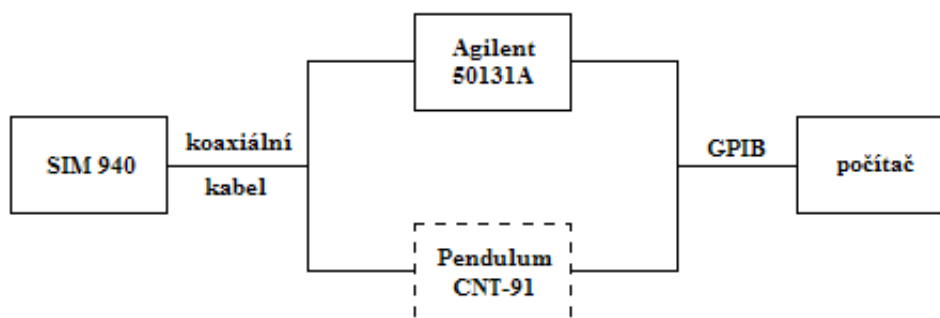
## 5 VYTVOŘENÍ PRACOVNÍHO MÍSTĚ PRO MĚŘENÍ DLOUHODOBÉ STABILITY OSCILÁTORŮ

Pro měření dlouhodobé stability oscilátorů je zapotřebí zdroj frekvence (např. rubidiový, cesiový oscilátor), čítač pro měření frekvence a zařízení na zpracování velkého množství dat. Pro zpracování dat je ideální počítač s příslušným softwarem.



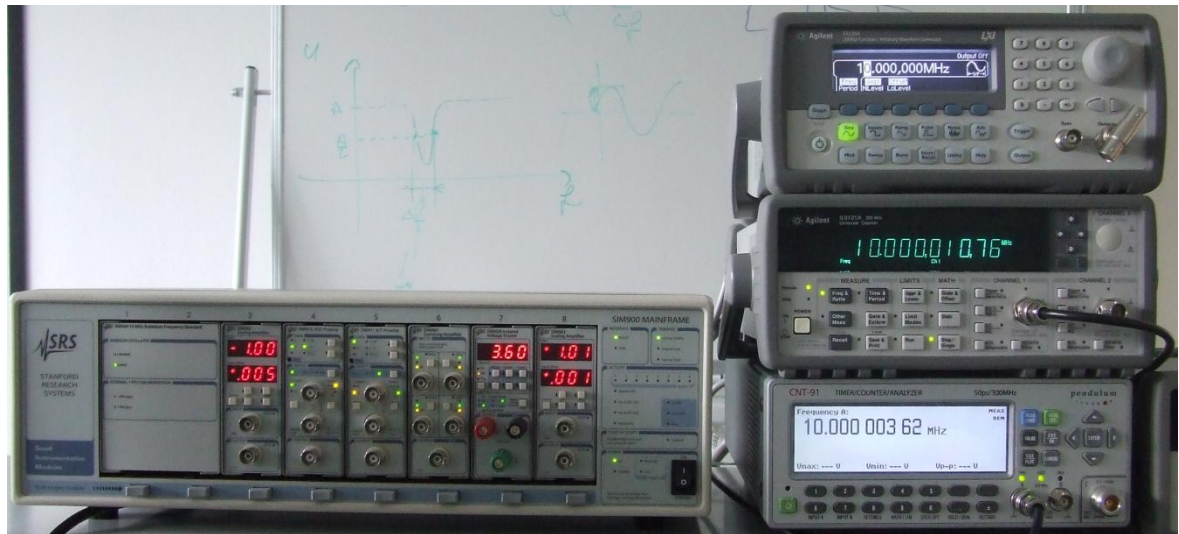
Obr. 9. Blokové schéma zapojení

Pro měření byl použit jako zdroj frekvence SIM 940 Rubidiový standard, Agilent 33220A, časový a frekvenční standard GPG24, čítače frekvence Pendulum CNT-91 a Agilent HP 53131A, které sloužily také jako zdroj frekvence. Pro zpracování dat byl zvolen počítač, který přijímal naměřené hodnoty z čítačů. Aby bylo měření automatizováno, byl vytvořen příslušný program pro obsluhu a automatizaci měření.



Obr. 10. Blokové schéma zapojení s použitými přístroji

Zdroj frekvence byl propojen s čítači přes koaxiální kabel s impedancí  $75 \Omega$ . Čítače měřily frekvenci zdroje a naměřené údaje dále posílaly do počítače přes rozhraní GPIB (General Purpose Interface Bus). V počítači byla data zpracována pomocí programu vytvořeného v softwaru VEE Pro 9.0. Další výpočty a úprava dat byly provedeny v softwaru Microsoft Excel.



Obr. 11. Vytvořené pracoviště pro měření dlouhodobé stability oscilátorů

## 6 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

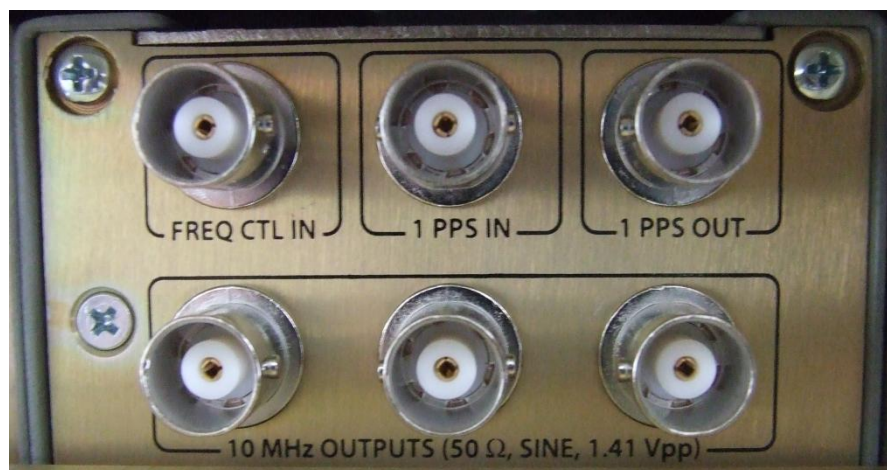
Pro měření dlouhodobé stability oscilátorů byly použity následující přístroje.

### 6.1 SIM 940 10MHz Rubidiový frekvenční standard

SIM 940 je zařízení, které má integrovaný rubidiový oscilátor. Tento přístroj zajišťuje stabilní a spolehlivý výkon. Je vhodným nástrojem pro kalibraci jakýchkoli aplikací, které vyžadují přesné frekvenční standardy. Všechny funkce SIM 940 je možné ovládat z počítače přes modul SIM 900.

#### Parametry:

- 3 výstupní kanály s rozsahem do 10MHz
- ultra-nízký fázový šum ( $< -130$  dBc/Hz při 10 Hz)
- možnost vzdáleného ovládání
- vstupní a výstupní kanál pro synchronizaci GPS



Obr. 12. SIM 940 10MHz Rubidiový standard

### 6.2 Časový a frekvenční standard GPG24

Oscilátor GPG24 lze použít pro kalibraci měřicích přístrojů, komunikačních systémů a v mnoha dalších aplikacích. V přístroji je integrován termostátový krystalový oscilátor, který slibuje velkou frekvenční stabilitu.

#### Parametry:

- 1 výstupní kanál s rozsahem do 10 MHz
- fázový šum ( $< -125$  dBc/Hz při 10 Hz)

- 1 vstupní kanál pro synchronizaci GPS
- vstup pro anténu pro příjem signálu



Obr. 13. Časový a frekvenční standard GPG24

### 6.3 Agilent 33220A

Agilent 33220A je generátor signálů, který kromě 11 předdefinovaných funkce dokáže generovat libovolný průběh obdélníkových a sinusových signálů až do frekvence 20 MHz. Mezi jeho přednosti patří zejména snadné ovládání a grafický display.

#### Parametry:

- fázový šum -115 dBc / Hz
- frekvenční rozsah 1uHz-20MHz
- modulace AM, PM, FM, PWK, FSK
- výstupní úroveň 10 mV až 10 V /50 Ω
- operační teplota 0 – 55°C



Obr. 14. Generátor signálů Agilent 33220A

## 6.4 Pendulum CNT-91

Měřicí přístroj Pendulum CNT-91 slouží k měření frekvence z oscilátorů, kde pracuje jako čítač frekvence. Tento přístroj lze také využít jako časovač, zdroj frekvence a analyzátor pro měření. Jeho přednostmi jsou vysoký výkon a vysoké rozlišení. Pendulum CNT-91 lze také ovládat dálkově přes GPIB rozhraní.

### Parametry:

- frekvenční rozsah až 300MHz
- tři vstupní kanály s rozsahy (2x(0,001Hz – 300MHz); 1x(3, 8, 14 nebo 20 GHz)
- nejmenší měřitelný časový interval 50ps
- rozlišení displeje až 12 míst (digitů)
- možnost grafické analýzy měřených hodnot na displeji přístroje
- vestavěný programovatelný pulzní výstup 0,5 Hz až 50 MHz



Obr. 15. Pendulum CNT- 91

## 6.5 Agilent HP 53131A

Agilent HP 53131A je univerzální frekvenční čítač, který dokáže s velikou přesností a rychlostí měřit periodu, frekvenci, frekvenční poměr, šířku pulzu, sestupnou i náběžnou hranu pulzu, časový interval, střidu, fázový úhel i počet událostí a špičkové napětí.

### Parametry:

- frekvenční rozsah až 225 MHz
- tři vstupní kanály s rozsahy (2x(0,1Hz – 225MHz); 1x(3, 5 nebo 12,4 GHz)
- nejmenší měřitelný časový interval 500ps

- rozlišní displeje až 10 míst (digitů)



Obr. 16. Agilent HP 53131A

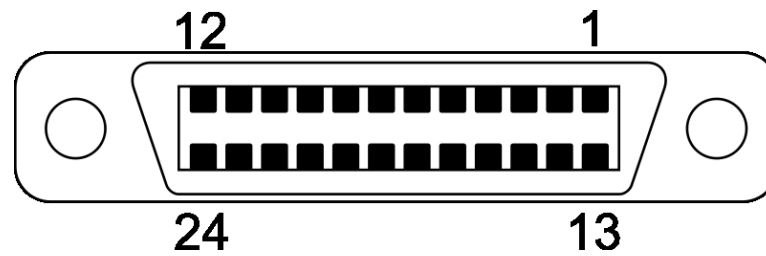
## 6.6 Agilent 108833A GPIB (General Purpose Interface Bus)

Agilent 108833A GPIB je rozhraní, které slouží k přenosu dat mezi přístroji nebo mezi počítačem a přístrojem. Umožňuje komunikaci až mezi 15 přístroji.

### Parametry:

- 24 pinů
- Asynchronní přenos dat
- Přenos informace po 8 bitech
- Maximální přenosová rychlost 1MB/s

### 6.6.1 Popis rozhraní GPIB



Obr. 17. GPIB rozhraní

Pin 1-4; 13-16 Datový vstup/výstup přenosu dat

Pin 5 Ukončení přenosu dat nebo identifikace přístroje

Pin 6 Potvrzení dat na sběrnici

Pin 7 Zařízení nemůže přijmout data

Pin 8 Data nepřijata

Pin 9 Vymazání dat z rozhraní

Pin 10 Požadavek na servis

Pin 11 Upozornění

Pin 12-16; 18 – 23 GND (uzemnění)

Pin 17 Vzdálený přístup

Pin 24 Logická nula

## 7 SOFTWARE PRO OBSLUHU A MĚŘENÍ

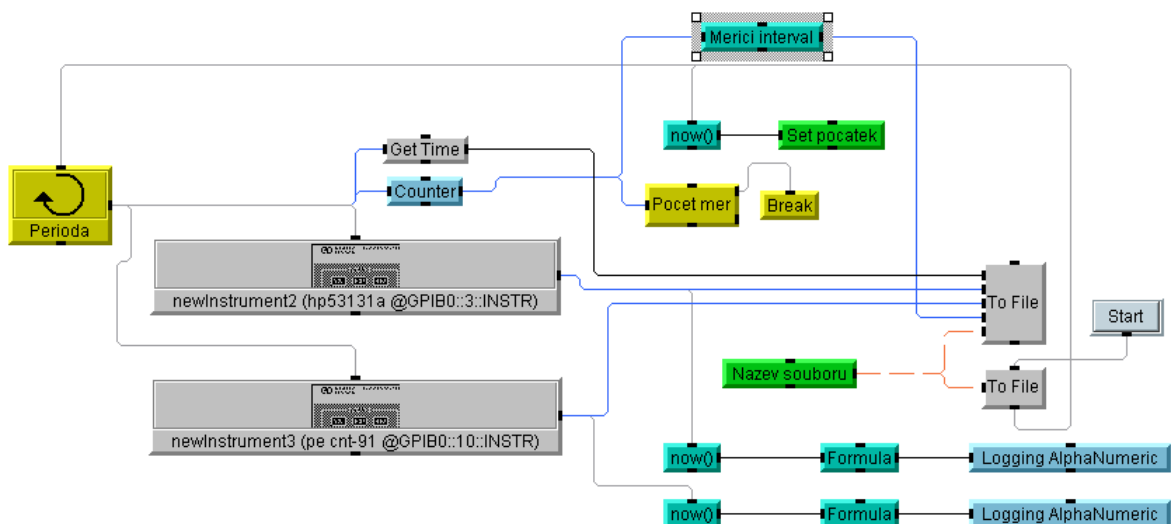
V této kapitole bude popsán software VEE Pro a rovněž program, který byl vytvořen pro automatizaci a obsluhu měření. Každé měření probíhalo 2 hodiny, během nichž bylo získáno velké množství dat. Jelikož by se tato data obtížně zpracovávala manuálně, muselo být měření automatizováno.

### 7.1 VEE Pro

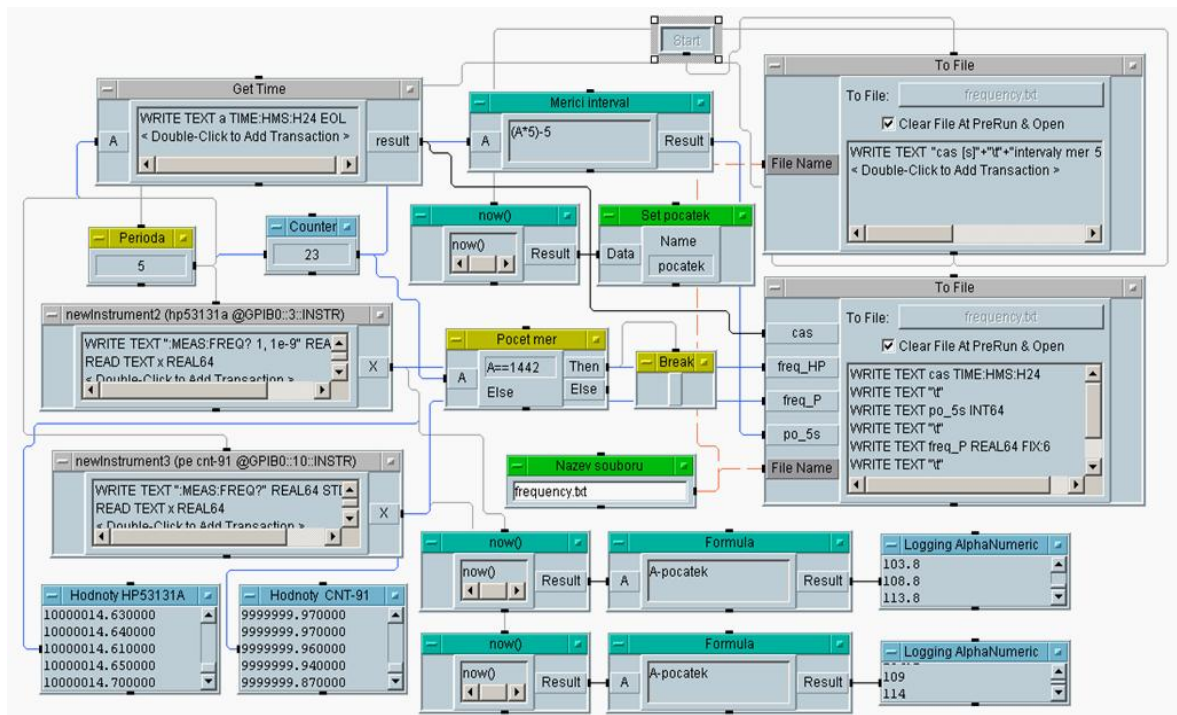
Visual Engineering Environment (VEE Pro) společnosti Agilent je vizuální, převážně intuitivní programovací jazyk, pro tvorbu programů sloužících k měření, zpracování dat a řízení. Je určen pro provoz v prostředí Windows. Kromě vlastního kompilátoru má integrován software MATLAB, což zvyšuje jeho flexibilitu.

Části každého programu jsou Objekty a ikony. Každý objekt přidáný do programu představuje část příkazu vybraného z interní knihovny. Pokud se přidá do programu nový objekt a propojí se s ostatními, program připraví nové odkazy pro další instrukce. Po propojení všech potřebných objektů vznikne požadovaný program.

### 7.2 Program pro obsluhu a automatizaci měření



Obr. 18. Blokové schéma programu



Obr. 19. Program pro obsluhu a měření

Program se spouští objektem Start. Naměřené hodnoty z čítače jsou zaznamenávány v intervalu 5 s. Jelikož každé měření probíhá 2 hodiny, je počet měření nastaven na hodnotu 1442 ( $2 \cdot 60 \cdot 60 / 5 = 1440$  + úvodní a poslední hodnota). „Counter“ čítá počet pulzů, které se opakují každých 5 sekund. Jakmile dosáhne hodnoty 1442 je program ukončen pomocí funkce break. V objektu formula (Měřicí interval) je nastaven měřicí interval 5 s. Pro zajištění nulté hodnoty, je použit vzorec  $(A \cdot 5) - 5$ . Funkce Get Time, udává aktuální čas měření. Čítače jsou v programu zastoupeny jako newinstrument 2 a 3. Objekty Hodnoty HP 53131A a Hodnoty CNT-91 zobrazují aktuální naměřené hodnoty čítačů. Objekt Perioda zajišťuje, že každých 5s jsou načteny naměřené hodnoty do počítáče. Spodní dvě větve programu měří dobu reakce čítačů, zda se nachází v intervalu 5 sekund. Všechna potřebná data jsou zapisována pomocí objektu To File a následně uloženy do souboru frequency.txt.

V souboru frequency.txt jsou zapsána následující data:

cas [s]	intervaly mer 5s	Frekvence P [Hz]	Frekvence HP [Hz]
15:48:30	0	9999989.610000	9999994.040000
15:48:35	5	9999989.910000	9999994.090000
15:48:40	10	9999990.020000	9999994.060000
15:48:45	15	9999990.070000	9999994.030000
15:48:50	20	9999990.170000	9999994.100000
15:48:55	25	9999990.060000	9999994.120000
15:49:00	30	9999990.070000	9999994.130000

Obr. 20. Ukázka naměřených dat

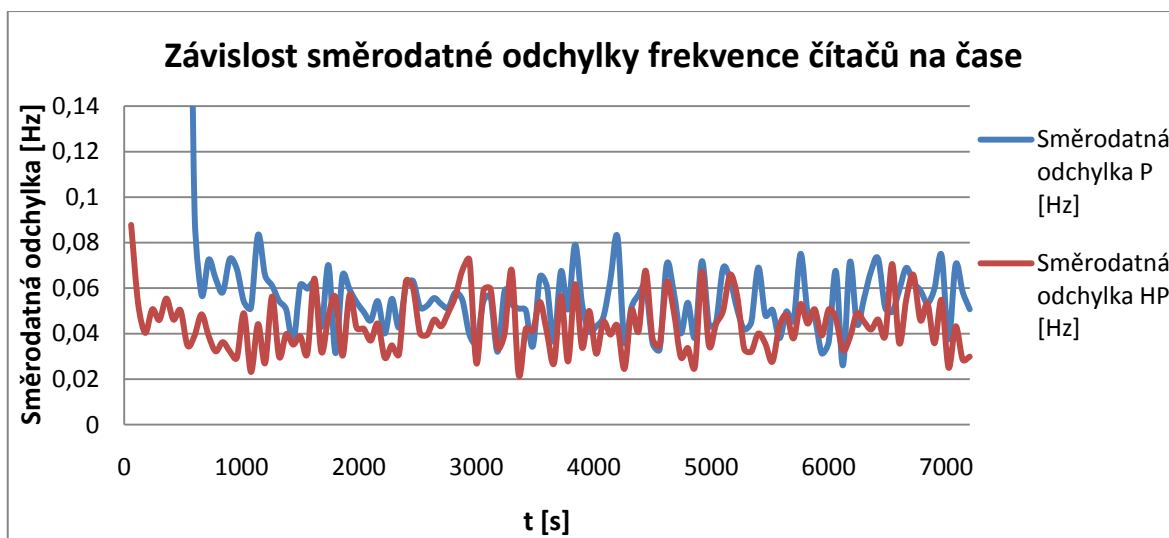
- Aktuální čas měření,
- Intervaly měření po 5s,
- Naměřené hodnoty frekvence čítačem Pendulum CNT-91,
- Naměřené hodnoty frekvence čítačem Agilent HP 53131A.

Data ze souboru frequency.txt byla statisticky zpracována v softwaru Microsoft Excel, kde se pomocí příslušných funkcí a vzorců dopočítaly průměrné hodnoty a směrodatné odchylky naměřených hodnot, v intervalu 60 sekund.

čas [s]	Směrodatná odchylka P [Hz]	Směrodatná odchylka HP [Hz]	Průměrná hodnota P [Hz]	Průměrná hodnota HP [Hz]
60	0,27	0,088	9999989,86	9999994,152
120	0,39	0,053	9999988,61	9999994,176
180	0,25	0,041	9999987,59	9999994,259
240	0,21	0,051	9999986,86	9999994,387
300	0,32	0,046	9999985,98	9999994,450

Obr. 21. Ukázka statisticky zpracovaných dat v softwaru Microsoft Excel

Statisticky zpracovaná data byla následně vynesena do grafu v závislosti na čase. Čas odpovídal době měření tedy 7200 sekund (2 hodiny).



Obr. 22. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase

## 8 POSTUP MĚŘENÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

Stabilita oscilátorů byla měřena vždy po dobu 2 hodin, během nichž byla sledována a vyhodnocena odchylka od referenční hodnoty 10 MHz. Jako zdroje frekvence byly použity oscilátor SIM 940 10MHz Rubidiový standard, Agilent 33220A, časový a frekvenční standard GPG24, Pendulum CNT-91, Agilent HP 53131A. Měřicí přístroje Pendulum a Agilent HP 53131A ve funkci čítačů měřily frekvenci zdroje, jejichž data byla následně zpracována v počítači pomocí vytvořeného programu v softwaru VEE Pro. U čítačů bylo nutné nastavit otevření Gatu (Brány) a časovou základnu na stejnou hodnotu, aby měly stejné výchozí podmínky. Měření bylo prováděno pro odlišné pracovní (provozní) teploty měřicích přístrojů. Více v podkapitole Analýzy naměřených dat.

### 8.1 Určení kombinované standardní nejistoty

Kombinovaná standardní nejistota  $u_c$  (16) definuje rozsah hodnot, které je možno racionálně přiřadit k měřené veličině. Vznikne sloučením nejistot typů A, B.

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (16)$$

Standardní nejistota typu A se určí u každého měření statistickým zpracováním naměřených hodnot. Standardní nejistota typu B se určí z parametrů udaných výrobcem, jelikož přístroje byly používány za stanovených pracovních podmínek. Podrobnější informace lze nalézt v podkapitole Nejistoty měření.

#### Určení nejistoty typu B pro čítač Agilent HP 53131A:

$$u_b = \left( \pm \text{Chyba časové základny} \pm \frac{t_{acc}}{t_G} \right) * f$$

$$u_b = \left( \pm 2,5 * 10^{-9} \pm \frac{1 * 10^{-11}}{500 * 10^{-3}} \right) * (10 * 10^6)$$

$$u_b = 0,025 \text{ Hz}$$

$u_b$  standardní nejistota typu B

$t_G$  doba otevření Gatu (brány)

$t_{acc}$  doba náběhu měřeného signálu, hodnota je určena z dokumentace čítače HP Agilent HP 53131A (100 ps)

*Chyba časové základny* rovněž určena z dokumentace

f frekvence přivedená na vstup čítače

### Určení nejistoty typu B pro čítač Pendulum- CNT91:

$$u_b = \sqrt{\frac{1}{3} \{ [TBE * MR]^2 + [(200ps/MT) * MR]^2 \}}$$

$$u_b = \sqrt{\frac{1}{3} \{ [(1,2 * 10^{-5}) * 10]^2 + [(200ps/500ms) * 10]^2 \}}$$

$$u_b = 0,006 \text{ Hz}$$

*TBE* Chyba časové základny, určena z dokumentace Pendulum CNT-91 ( $1,2 * 10^{-5}$ )

*MR* Rozlišení displeje (10 digitů)

*MT* Doba otevření Gatu

Měřicím přístrojům byly nastaveny totožné hodnoty (nastavení Gatu, časové základny, rozlišení displeje atd.), aby měly stejné výchozí podmínky. Uvedené nastavení zůstalo stejné i po vypnutí přístrojů. Pro další výpočty lze tedy považovat standardní nejistoty typu B jako konstantní.

Výsledná hodnota měření bude ve tvaru ( $\bar{f} \pm u_c$ ).

## 8.2 Určení frekvenční stability

Dlouhodobá stabilita  $S_f$  je určena maximální odchylkou  $\Delta f_{\max}$  skutečné frekvence od referenční hodnoty  $f_o$  (10 MHz), která se uvažuje během dostatečně dlouhého časového intervalu  $\Delta t$  (2 hodiny). Základní jednotkou frekvenční stability je  $s^{-1}$ . Někdy bývá udávána jako odchylka frekvence za rok.

$$S_f = \frac{\Delta f_{\max}}{f_o} \frac{1}{\Delta t} \quad (17)$$

## 8.3 Analýza naměřených dat

Jak již bylo zmíněno, měření stability oscilátorů bylo měřeno vždy po dobu 2 hodin, během nichž byla sledována a vyhodnocována odchylka od referenční hodnoty 10 MHz. Měření bylo prováděno pro odlišné pracovní (provozní) teploty měřicích přístrojů. Zařízení byly měřeny v následujících kombinacích:

1. Oscilátor po zapnutí; čítače po zapnutí

2. Oscilátor po dosažení provozní teploty; čítače po zapnutí
3. Oscilátor po zapnutí; čítače po dosažení provozní teploty
4. Oscilátor po dosažení provozní teploty; čítače po dosažení provozní teploty

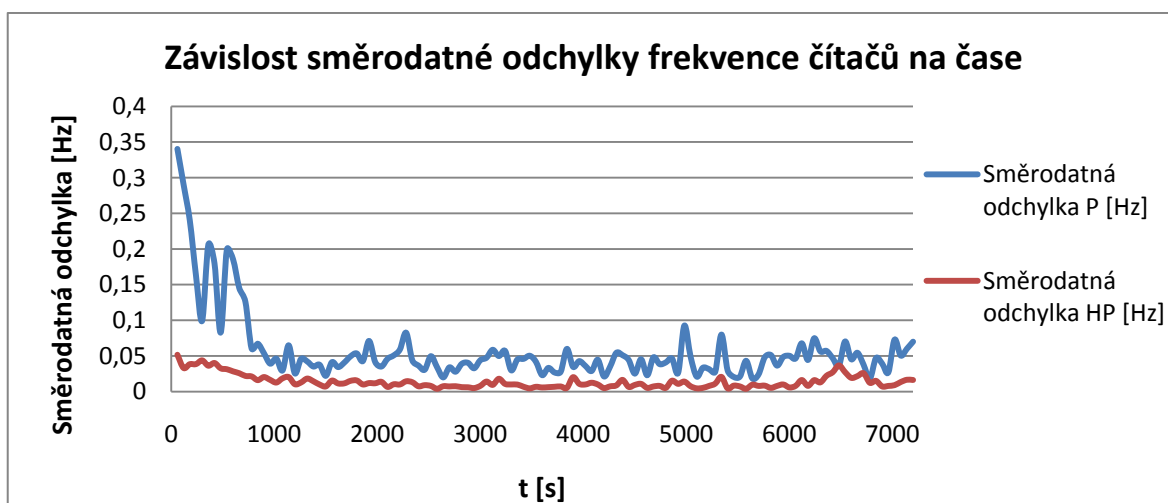
Jelikož v kombinacích 1 a 4 lze obtížně určit, který z přístrojů má vliv na průběhy funkcí, budou v této diplomové práci použity pouze kombinace měření 2 a 3, tedy oscilátor po dosažení provozní teploty; čítače po zapnutí a oscilátor po zapnutí; čítače po dosažení provozní teploty. Kombinaci měření 1 a 4 se budou nacházet v přílohách této diplomové práce.

### 8.3.1 Postup a vysvětlivky ke zpracovaným datům

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány v programu Microsoft Excel. Zkratky „P“ a „HP“ v legendách grafů reprezentují čítače Pendulum CNT-91 a Agilent HP 53131A. Směrodatné odchylky a průměrné hodnoty naměřených hodnot byly počítány pro intervaly jedné minuty. Podrobnější informace viz kapitola Program pro obsluhu a automatizaci měření.

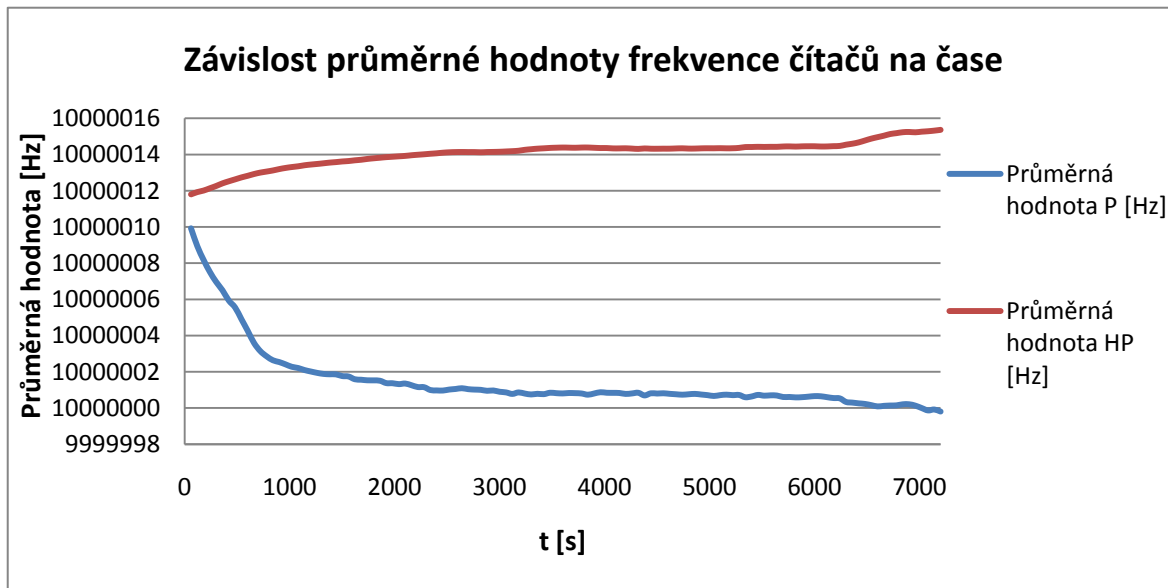
Pro každé měření byla určena kombinovaná nejistota  $u_c$  a maximální odchylka frekvence od referenční hodnoty 10 MHz, z níž byla vypočtena dlouhodobá stabilita oscilátoru, uvažována pro časový interval 2 hodin.

### 8.3.2 SIM 940 jako zdroj po dosažení provozní teploty; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po zapnutí



Obr. 23. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase

Z průběhu funkcí úvodního grafu je zřejmé, že čítač Agilent HP 53131A je přesnější, zatímco čítač Pendulum CNT-91 je citlivější. Po 13 minutách dosáhnou oba čítače své provozní teploty a směrodatné odchylky měřených hodnot se pohybují v rozmezí 0 - 0,1 Hz.



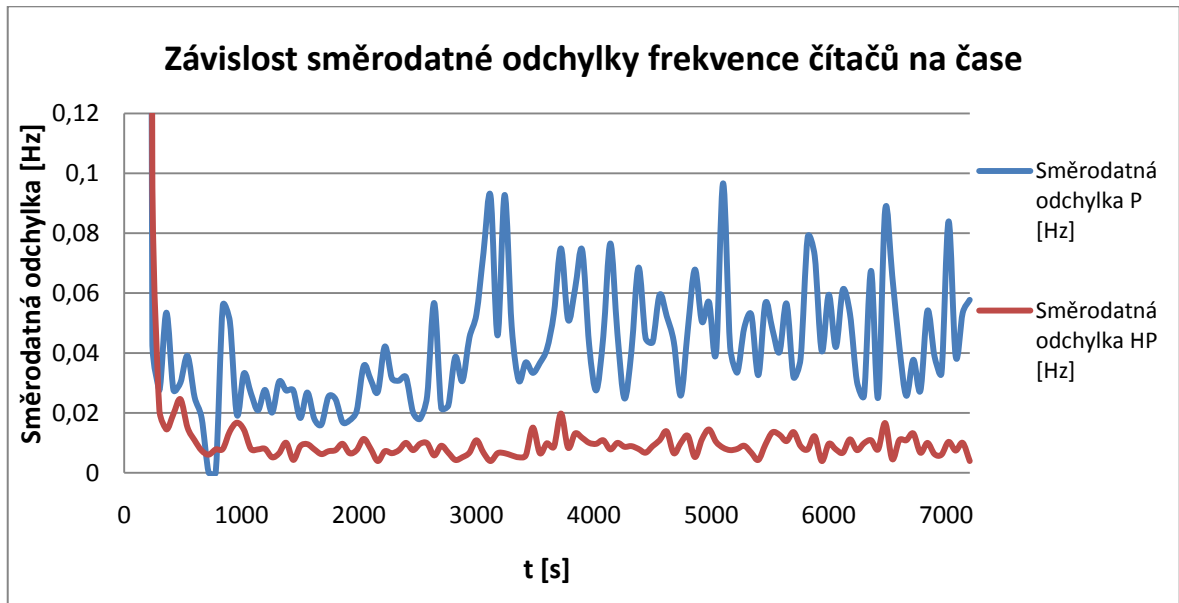
Obr. 24. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

Po dosažení provozní teploty čítačů, což je po 13 minutách, se pohybují měřené hodnoty čítače Pendulum CNT-91 kolem referenční hodnoty 10 MHz. Ačkoliv předchozí graf dokázal, že je čítač Agilent 51131A přesnější, tento graf dokazuje, že čítač Pendulum CNT-91 je správnější. Průměrné hodnoty čítače Agilent HP 53131A jsou v rozmezí 12-16 Hz od referenční hodnoty. Tato odchylka je zanedbatelná, jelikož se liší od referenční hodnoty o 0,00012 – 0,00016%.

Po určení kombinovaných nejistot  $u_c$  je výsledná hodnota měření frekvence čítačem Agilent HP 53131A ( $10000014,076 \pm 0,029$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $10000001,463 \pm 0,058$ ) Hz.

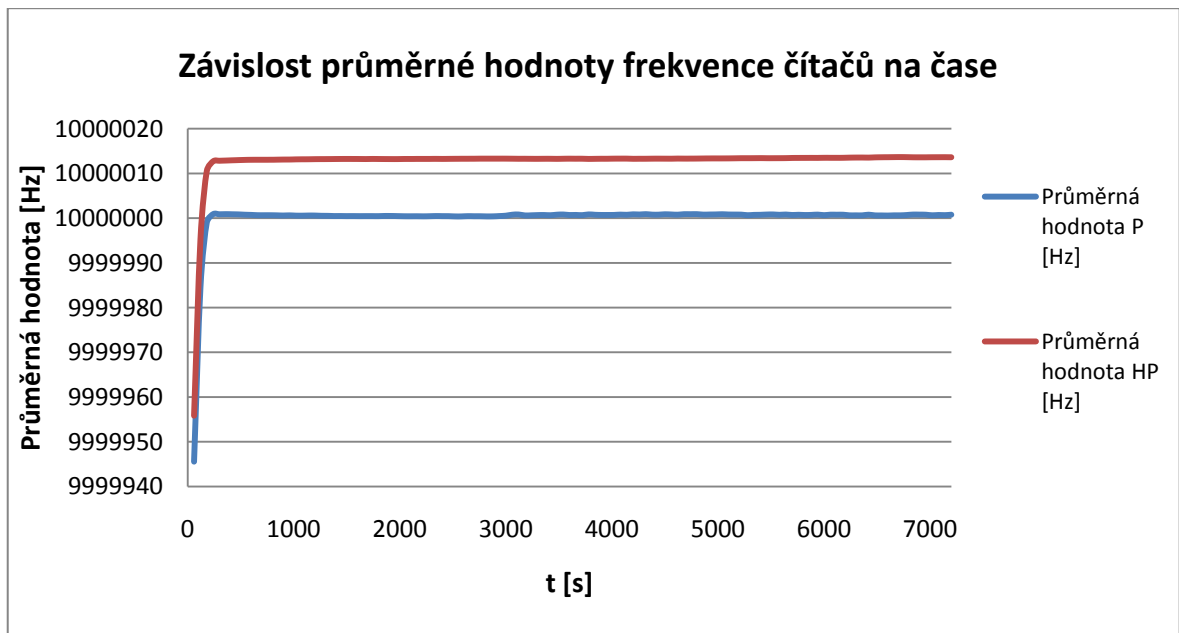
Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT-91 ( $1,45 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$  a čítačem Agilent HP 53131A ( $2,13 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ .

### 8.3.3 SIM 940 jako zdroj po zapnutí; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty



Obr. 25. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase

V prvních třech minutách dochází k největšímu zkreslení, které je způsobeno oscilátorem SIM 940. Jakmile oscilátor dosáhne provozní teploty (cca 3 minuty) je měření velice přesné, jelikož se směrodatná odchylka měřených hodnot pohybuje v rozmezí 0 - 0,1 Hz. Agilent HP 53131A opět vykazuje vyšší přesnost, zatímco čítač Pendulum CNT-91 vyšší citlivost.



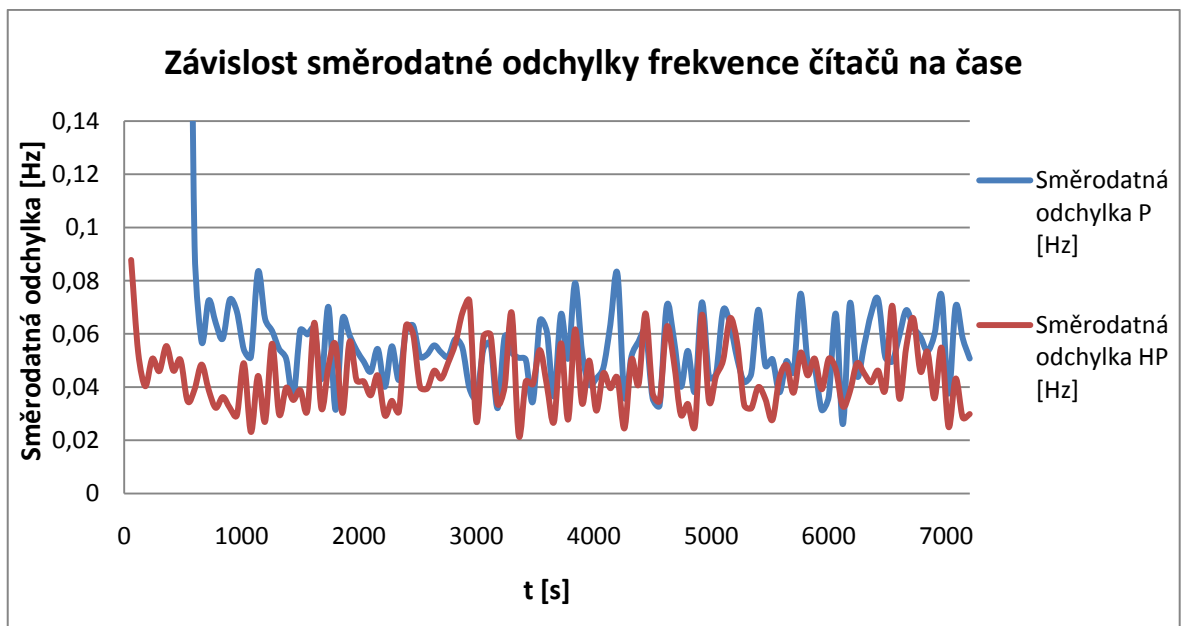
Obr. 26. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

V prvních třech minutách lze vidět postupné rozehtívání oscilátoru SIM 940. Po dosažení provozní teploty, již generuje požadovaný kmitočet 10 MHz. Jelikož čítače měří na své provozní teplotě, pohybují se měřené hodnoty kolem referenční hodnoty 10 MHz. Pendulum CNT-91 potvrdil svou správnost. Odchylka průměrných hodnot čítače Agilent HP 53131A je 13 Hz od referenční hodnoty, což je zanedbatelná nepřesnost.

Po určení kombinovaných nejistot  $u_c$  je výsledná hodnota frekvence měření čítačem Agilent HP 53131A ( $10000012,66 \pm 0,21$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $10000000,06 \pm 0,24$ ) Hz. Pokud se úvodní tři minuty měření nebudou brát v úvahu, je výsledná hodnota frekvence měření čítačem Agilent HP 53131A ( $10000013,319 \pm 0,027$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $10000000,666 \pm 0,042$ ) Hz.

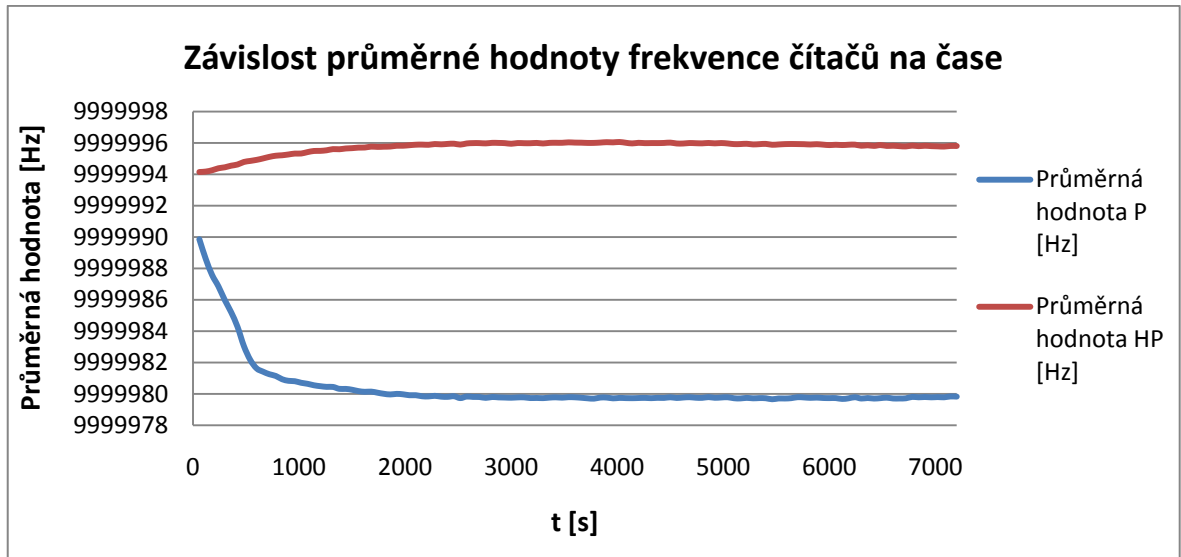
Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT-91 ( $9,98 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ) a čítačem Agilent HP 53131A ( $8,46 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ).

#### 8.3.4 Agilent 3322A jako zdroj po dosažení provozní teplot; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po zapnutí



Obr. 27. Závislost směrodatné odchytky frekvence na čase

Po 12 minutách dosáhnou čítače své provozní teploty a směrodatné odchytky měřených hodnot se pohybují v rozmezí 0,02 – 0,08 Hz. Zařízení vykazují vysokou přesnost měření.



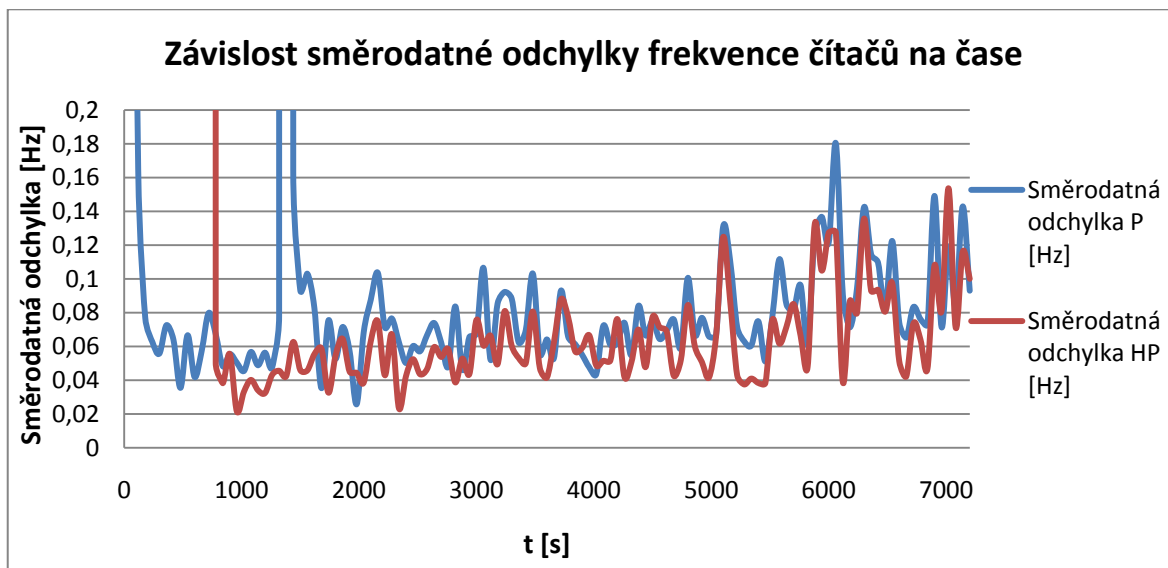
Obr. 28. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

Po dosažení provozní teploty čítačů, což je po 12 minutách, se měřené hodnoty ustálí. Přístroj Agilent 51131A vykazuje vyšší správnost, jelikož se přibližuje referenční hodnotě 10 MHz. Odchyłky průměrných hodnot čítačů se pohybují v rozmezí do 20 Hz od referenční hodnoty, což je zanedbatelná nepřesnost (0,0002%).

Po určení kombinovaných nejistot  $u_c$  je výsledná hodnota frekvence měření čítačem Agilent HP 53131A ( $9999995,738 \pm 0,051$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $9999980,000 \pm 0,073$ ) Hz.

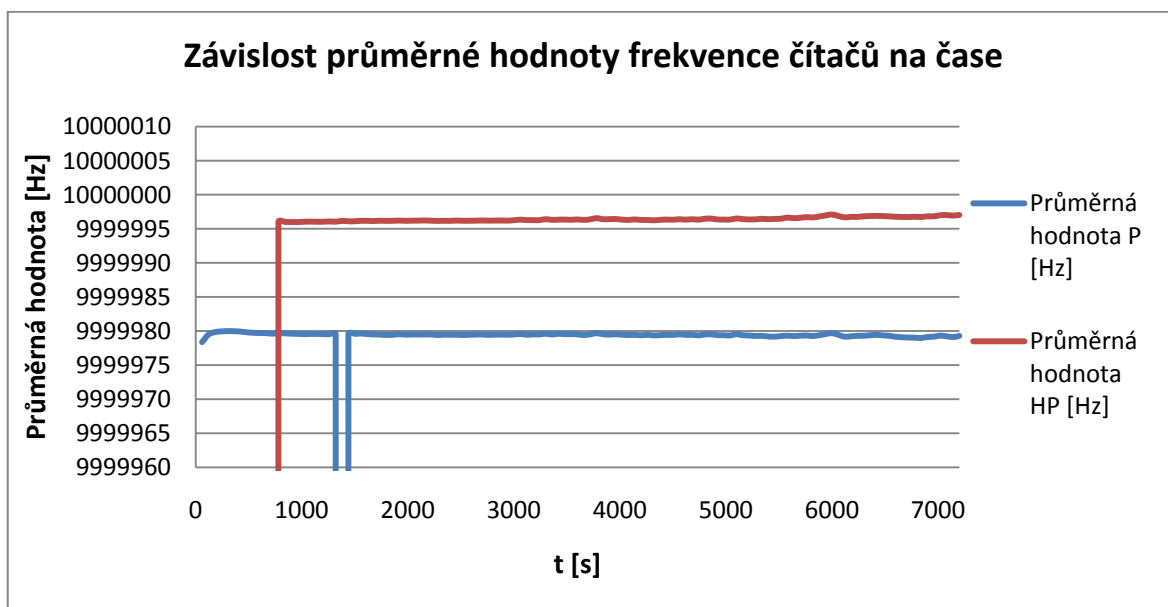
Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT- 91 ( $2,84 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$  a čítačem Agilent HP 53131A ( $8,29 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ .

### 8.3.5 Agilent 3322A jako zdroj po zapnutí; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty



Obr. 29. Závislost směrodatné odchyly frekvence na čase

Oscilátor Agilent 33220A potřebuje k dosažení provozní teploty 27 minut, během nichž dochází ke zkreslení až 1,8 MHz. Po ustálení se měřené hodnoty pohybují v rozmezí 0,02 – 0,18 Hz. Jakmile oscilátor dosáhne své provozní teploty, čítače vykazují vysokou přesnost.



Obr. 30. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

Po dosažení provozní teploty (27 minut) se oscilátor přibližuje požadovanému kmitočtu 10 MHz. Jelikož čítače měří na své provozní teplotě, pohybují se měřené hodnoty kolem referenční hodnoty 10 MHz. Agilent HP 53131A vykazuje vyšší správnost. Odchylna

průměrných hodnot čítače Pendulum CNT-91 je cca 20 Hz od referenční hodnoty, což je zanedbatelná nepřesnost.

Pokud by se výsledná hodnota počítala z celého průběhu měření, pohybovaly se kombinované nejistoty  $u_c$  v rádech desítek kHz. Proto je vhodné vypočítat výsledné hodnoty po 27 minutách měření, kdy již došlo k rozehrání oscilátoru Agilent 33220A.

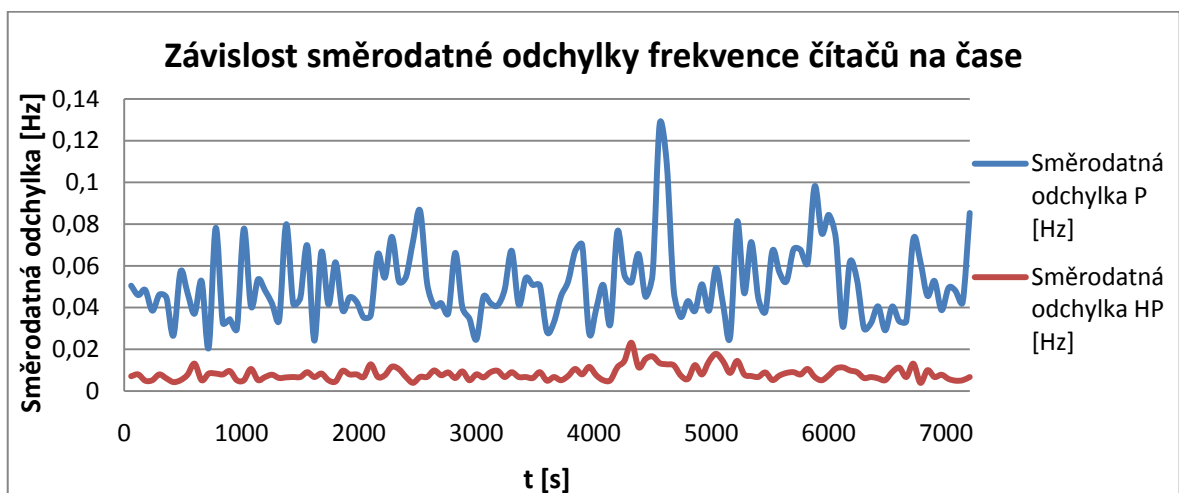
Výsledné hodnoty měření frekvence tedy jsou:

- čítač Agilent HP 53131A ( $9999996,453 \pm 0,070$ ) Hz
- čítač Pendulum CNT-91 ( $9999979,398 \pm 0,081$ ) Hz

Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT-91 ( $2,94 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$  a čítačem Agilent HP 53131A ( $5,51 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ .

### 8.3.6 GPG24 jako zdroj po dosažení provozní teploty; čítače Agilent HP 53131A a Pendulum CNT-91 po dosažení provozní teploty

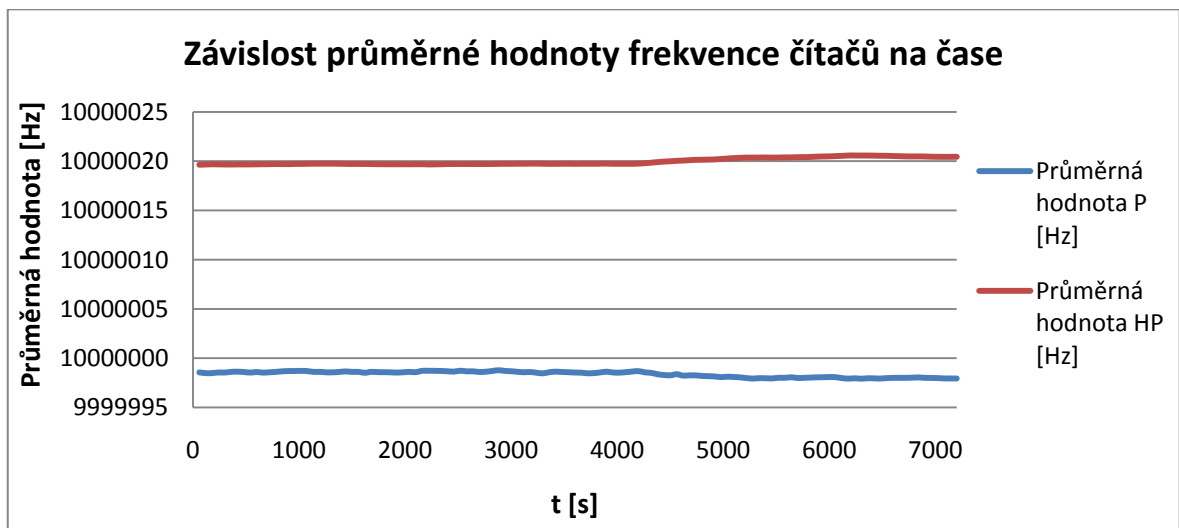
Oscilátor GPG24 byl měřen vždy po dosažení provozní teploty. Z technických důvodů není umožněna jiná kombinace, jelikož oscilátor potřebuje 10 minut k dosažení provozuschopnosti.



Obr. 31. Závislost směrodatné odchyly frekvence na čase

V grafu nedochází v úvodních minutách k výraznému zkreslení, protože oscilátor i čítače již dosáhly provozní teploty. Měření je velice přesné, jelikož se směrodatná odchylna měřených hodnot pohybuje v rozmezí 0 - 0,13 Hz. Oscilátor GPG24 vykazuje velikou frekvenční stabilitu. Agilent HP 53131A je přesnější, zatímco čítač Pendulum CNT-91 je

citlivější, což je viditelné z většího rozsahu směrodatné odchylky oproti čítači Agilent HP 53131A.



Obr. 32. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

Měřené hodnoty čítače Pendulum CNT-91 se pohybují těsně pod hranicí referenční hodnoty 10 MHz. Tento fakt potvrzuje správnost oscilátoru GPG24. Průměrné hodnoty čítače Agilent HP 53131A jsou v rozmezí 19-21 Hz od referenční hodnoty. Tato odchylka je zanedbatelná, jelikož se liší od jmenovité hodnoty 10 MHz o 0,00019 – 0,00021%.

Po určení kombinovaných nejistot  $u_c$  je výsledná hodnota měření frekvence čítačem Agilent HP 53131A ( $10000019,980 \pm 0,026$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $9999998,386 \pm 0,051$ ) Hz.

Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT-91 ( $3,03 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$  a čítačem Agilent HP 53131A ( $2,86 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ .

#### 8.4 Zhodnocení měření

Průběh měření probíhal podle postupu měření (viz kapitola Postup měření). Po zapojení přístrojů dle schématu byl vytvořen příslušný program pro automatizaci měření v softwaru VEE Pro. Po dokončení měření byly hodnoty statisticky zpracovány v programu Microsoft Excel, z nichž byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka, které byly vyneseny do grafu v závislosti na čase.

Z naměřených hodnot byla vypočtena kombinovaná nejistota  $u_c$  a následně z maximální odchylky frekvence se určila dlouhodobá frekvenční stabilita  $S_f$ .

Po analýze všech získaných dat a měření byly oscilátory seřazeny podle výsledků dlouhodobé frekvenční stability:

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1. Časový a frekvenční standard GPG24 | $(3,03 \cdot 10^{-11}) \text{ s}^{-1}$ |
| 2. SIM 940 10 MHz frekvenční standard | $(4,55 \cdot 10^{-11}) \text{ s}^{-1}$ |
| 3. Agilent 33220A                     | $(8,29 \cdot 10^{-11}) \text{ s}^{-1}$ |
| 4. Agilent 53131A                     | $(2,48 \cdot 10^{-10}) \text{ s}^{-1}$ |
| 5. Pendulum CNT-91                    | $(2,70 \cdot 10^{-10}) \text{ s}^{-1}$ |

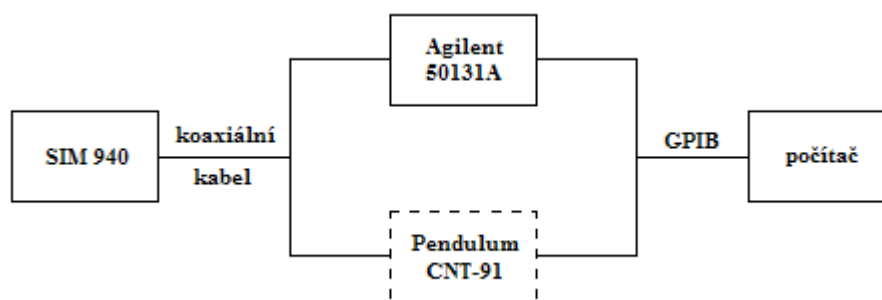
V případě, že Pendulum CNT-91 respektive Agilent 53131A je zapojen jako zdroj a jeho výstupní kanál (10MHz) je připojen na jeho vstupní kanál, je frekvenční stabilita přístroje největší (nulová). Tento fakt způsobuje oscilátor přístroje, který je ve fázi s Gatem (bránou) přístroje, což způsobí nulové zkreslení signálu, tzn. měřené hodnoty odpovídají referenční hodnotě 10 MHz s nulovou odchylkou. Z výše uvedeného důvodu nebyly tyto výsledky dlouhodobé frekvenční stability zahrnuty do statistik.

## 9 VZOROVÝ PROTOKOL A NÁVOD PRO ZAVEDENÍ DO VÝUKY

UTB VE ZLÍNĚ, FAKULTA APLIKOVANÉ INFORMATIKY			
<b>Jméno:</b>	Marek Cahlík	<b>Ročník:</b>	5
<b>Předmět:</b>	Instrumentace a měření	<b>Skupina:</b>	1
		<b>Naměřeno:</b>	
<b>Název úlohy:</b>	Měření dlouhodobé stability oscilátorů	<b>Odevzdáno:</b>	
		<b>Hodnocení:</b>	

### 9.1 Úkol měření

1. Seznamte se s ovládáním a obsluhou přístrojů (viz manuál)
2. Zapojte použité přístroje podle schéma zapojení:



Obr. 33. Schéma zapojení pro měření stability oscilátorů

3. V softwaru VEE Pro vytvořte program vhodný pro obsluhu a automatizaci měření
4. Z naměřených hodnot vypočtete průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku. Tyto údaje následně vyneste do grafu v závislosti na čase. Čas odpovídá době měření.
5. Vypracujte protokol o měření

### 9.2 Použité přístroje

**Zdroj frekvence:** SIM 940 10MHz Rubidiový Standard

**Čítač:** Pendulum CNT-91,

Agilent HP 53131A

**Rozhraní:** GPIB

### 9.3 Teorie měření

Oscilátor je systém, kde dochází ke vzájemné přeměně jedné formy energie na jinou a následně z nově vytvořené formy se mění na výchozí (původní) energie. Oscilátor se projevuje opakovanou výchylkou dané veličiny do krajních hodnot (minimálních, maximálních). Fyzikálních kmitajících systémů (oscilátorů), lze sestavit velké množství.

#### 9.3.1 Dlouhodobá stabilita oscilátorů

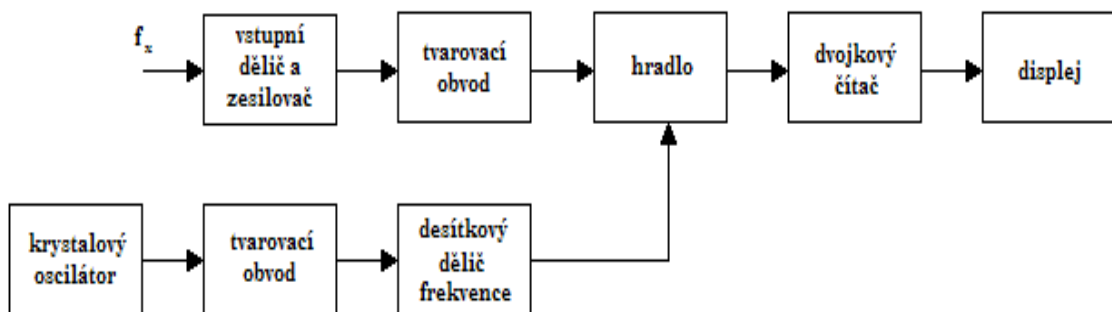
Dlouhodobá stabilita  $S_f$  je určena maximální odchylkou  $\Delta f_{\max}$  skutečné frekvence od referenční hodnoty  $f_0$ , která se uvažuje během dostatečně dlouhého časového intervalu  $\Delta t$ , například za 1 minutu, 1 hodinu, 1 den atd.; je závislá především na okolní teplotě a dalších fyzikálních parametrech daného prostředí. Základní jednotkou je  $s^{-1}$ .

$$S_f = \frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \frac{1}{\Delta t} \quad (18)$$

#### 9.3.2 Přímé měření frekvence

V dnešní době se výhradně používají číslicové měřicí přístroje. Blokové schéma pro přímé měření je na Obr. 31. Skládá se z dvojkového čítače (obvodu počítajícího počet impulzů, které přišly na jeho vstup) a řady pomocných obvodů.

Čítač čítá po definovanou dobu obdélníkové impulzy, jejichž frekvence je shodná s frekvencí přiváděného signálu. Po ukončení načítání se zobrazí hodnota měřené frekvence na displeji.



Obr. 34. Blokové schéma přístroje pro přímé měření frekvence

### 9.3.3 Chyby měření

Měřením nelze zjistit přesnou hodnotu zkoumané veličiny, jelikož je ovlivňována mnoha nežádoucími vlivy (nedokonalost přístrojů, změny vnějších podmínek atd.). Tyto vlivy se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Naměřené hodnoty se pak pohybují v určitém rozmezí od skutečné hodnoty. Proto je důležité definovat, v jakých mezích se skutečná hodnota pohybuje. Tento údaj lze zjistit vyhodnocením nepřesností neboli chyb, které při měření vznikají. Čím je chyba při měření menší, tím je měřicí přístroj či výsledek přesnější.

Pro vyhodnocení nepřesností postačí určení průměrné hodnoty definující výchozí referenční hodnotu a určení směrodatné odchylky definující rozmezí, ve kterém se naměřené hodnoty pohybují.

**Vzorec pro výpočet průměrné hodnoty:**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (19)$$

$\bar{x}$  Průměrná hodnota frekvence

n Počet měření

$x_i$  Měřená frekvence

**Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky:**

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

$\sigma_{\bar{x}}$  Směrodatná odchylka měřené frekvence

$\bar{x}$  Průměrná hodnota frekvence

n Počet měření

$x_i$  Měřená frekvence

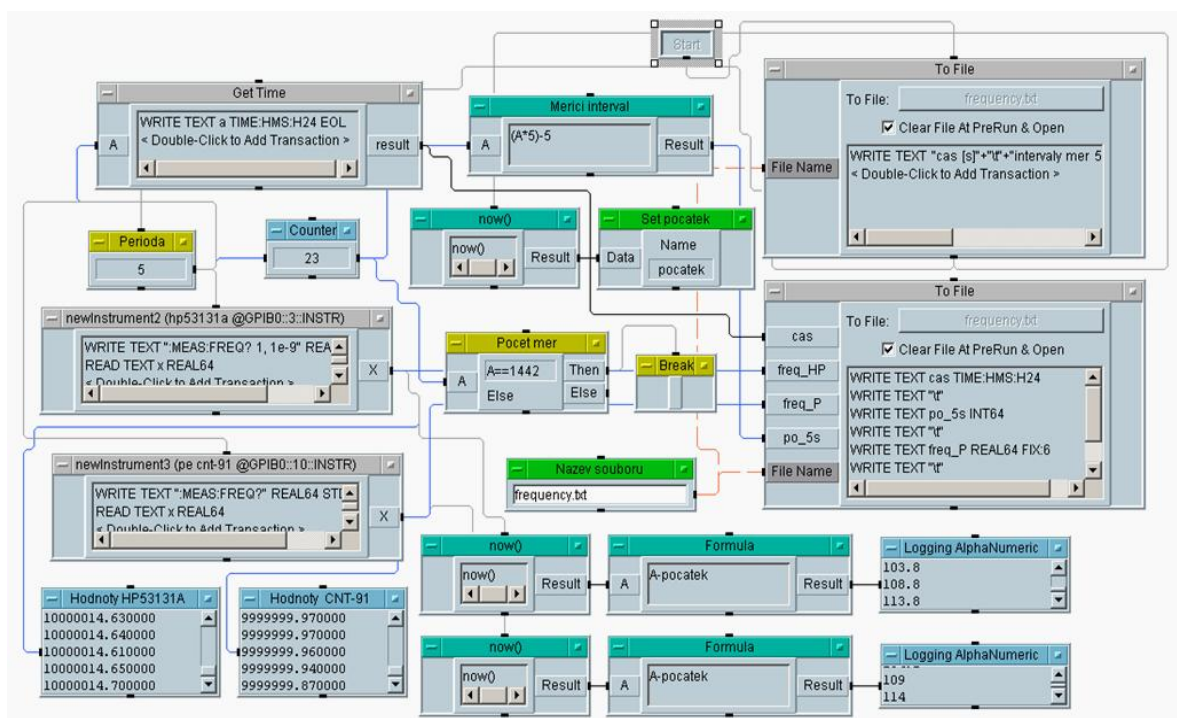
Výsledná hodnota bude např.: (10000258,53±0,29) Hz. Nezapomeňte, že směrodatná odchylka musí být zaokrouhlena maximálně na dvě platná místa.

Podrobnější informace k teorii měření lze nalézt v diplomové práci Měření dlouhodobé stability oscilátorů pro přijímače GPS.

## 9.4 Postup měření

Zapněte SIM 940 Rubidiový standard, aby dosáhl své pracovní (provozní) teploty. 10 MHz výstupy zdroje frekvence (SIM 940 Rubidiový standard) připojte na vstupy čítačů Pendulum CNT-91 a Agilent HP 53131A pomocí koaxiálního kabelu. U čítačů nastavte otevření Gatu (Brány) a časovou základnu na stejnou hodnotu, aby měly stejné výchozí podmínky. Během měření sledujte odchylky kmitočtu od původní hodnoty. Propojte čítače s počítačem přes rozhraní GPIB, abyste byli schopni zpracovat velké množství dat. Pro automatizaci měření vytvořte vhodný program v softwaru VEE Pro. Z naměřených hodnot vypočtete v programu Microsoft Excel průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku. Vypočtené údaje vyneste do grafu v závislosti na čase. Čas odpovídá době měření. Z maximální odchylky frekvence určete dlouhodobou frekvenční stabilitu měřeného oscilátoru.

## 9.5 Program pro automatizaci měření

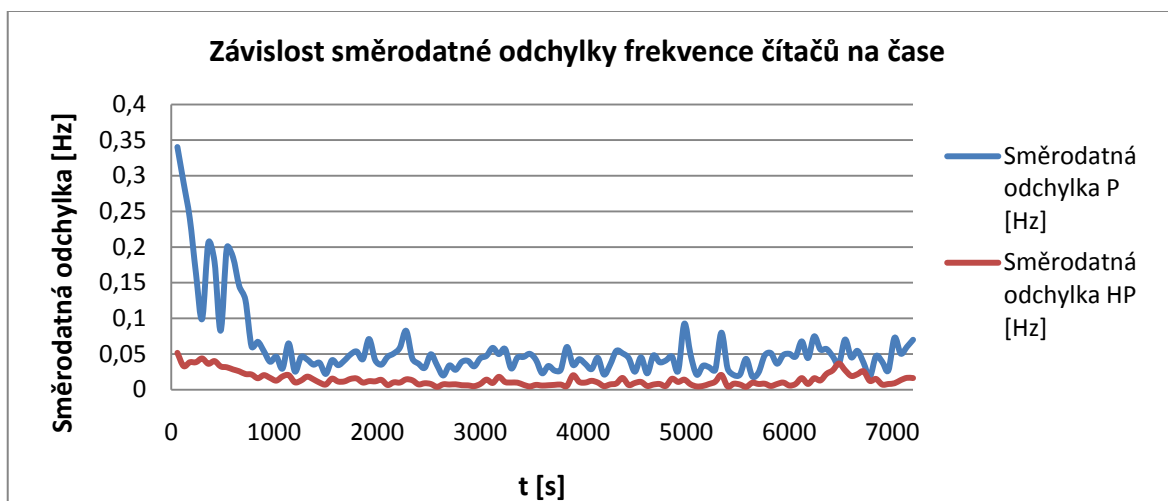


Obr. 35. Program pro obsluhu a měření

Program se spouští objektem Start. Naměřené hodnoty z čítače jsou zaznamenávány v intervalu 5s. Jelikož každé měření probíhá 2 hodiny, je počet měření nastaven na hodnotu 1442 ( $2 \cdot 60 \cdot 60 / 5 = 1440$  + úvodní a poslední hodnota). Counter čítá počet pulzů, které se opakují každých 5 sekund. Jakmile dosáhne hodnoty 1442 je program ukončen pomocí

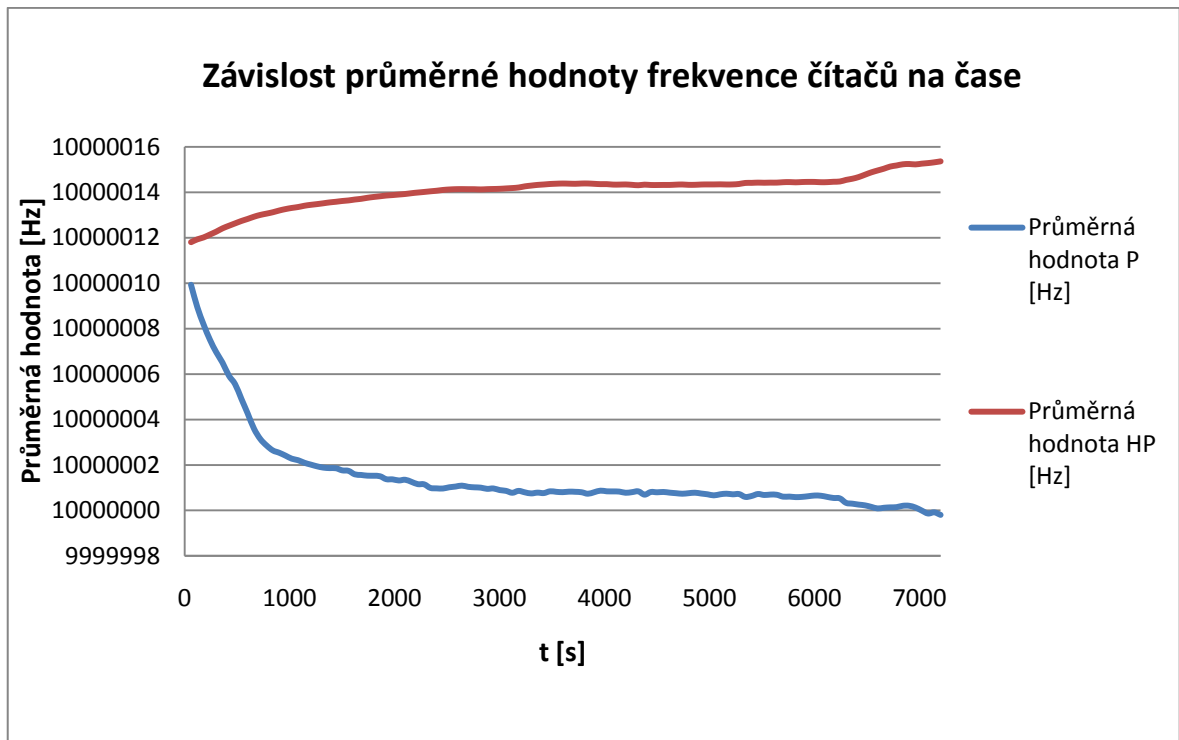
funkce break. V objektu formula (Měřicí interval) je nastaven měřicí interval 5s. Pro zajištění nulté hodnoty, je použit vzorec  $(A*5)-5$ . Funkce Get Time, udává aktuální čas měření. Čítače jsou v programu zastoupeny jako newinstrument 2 a 3. Objekty Hodnoty HPHP 53131A a Hodnoty CNT-91 zobrazují aktuální naměřené hodnoty čítačů. Objekt Perioda zajišťuje, že každých 5s jsou načteny naměřené hodnoty do počítače. Spodní dvě větve programu měří dobu reakce čítačů, zda se nachází v intervalu 5 sekund. Všechna data programu jsou zapisována pomocí objektu To File a následně uložena do souboru frequency.txt.

## 9.6 Graf průměrné hodnoty a směrodatné odchylky v závislosti na čase



Obr. 36. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase

Zkratky P a HP v legendě grafu reprezentují čítače Pendulum CNT-91 a Agilent HP 53131A. Směrodatná odchylka naměřených hodnot byla počítána pro interval 1 minuty. Z úvodního grafu je zřejmé, že čítač Agilent HP 53131A je přesnější, zatímco čítač Pendulum CNT-91 je citlivější. Po 17 minutách dosáhnou oba čítače své provozní teploty a směrodatné odchylky měřených hodnot se pohybují v rozmezí 0 - 0,1 Hz.



Obr. 37. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase

Po dosažení provozní teploty čítačů, což je po 17 minutách, naměřené hodnoty čítače Pendulum CNT-91 dosahují referenční hodnoty 10 MHz. Ačkoliv předchozí graf dokázal, že je čítač Agilent 51131A přesnější, tento graf dokazuje, že čítač Pendulum CNT-91 je správnější. Průměrné hodnoty čítače Agilent HP 53131A jsou v rozmezí 12-16 Hz od referenční hodnoty. Tato odchylka je zanedbatelná, jelikož se liší od referenční hodnoty o 0,00012 %.

Po určení směrodatných odchylek je výsledná hodnota frekvence měření čítačem Agilent HP 53131A ( $10000014,076 \pm 0,014$ ) Hz a čítačem Pendulum CNT-91 ( $10000001,463 \pm 0,058$ ) Hz.

Měřením a následným výpočtem byla určena frekvenční stabilita oscilátoru čítačem Pendulum CNT-91 ( $1,45 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$  a čítačem Agilent HP 53131A ( $2,13 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ .

## 9.7 Zhodnocení měření

Průběh měření probíhal podle návodu. Po zapojení přístrojů dle schématu byl vytvořen příslušný program pro automatizaci měření v softwaru VEE Pro. Po dokončení měření byly hodnoty statisticky zpracovány v programu Microsoft Excel, z nichž byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka, které byly vyneseny do grafu v závislosti na

čase. Z maximální odchylky frekvence byla určena dlouhodobá frekvenční stabilita měřeného oscilátoru.

Z obou grafů je zřejmé, že čítač Agilent HP 53131A je přesnější, zatímco čítač Pendulum CNT-91 je citlivější a správnější. Po 17 minutách dosáhnou oba čítače své provozní teploty a jejich naměřené hodnoty jsou poměrně stabilní. Oba čítače měří velice přesně, jelikož naměřené hodnoty se pohybují s minimální odchylkou od referenční hodnoty.

Z vypočtené frekvenční stability lze soudit, že oscilátor SIM 940 má velkou frekvenční stabilitu.

## ZÁVĚR

Pro určení přesné polohy přijímače GPS hraje čas značnou roli. Každá družice vysílá své aktuální souřadnice ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) a čas odeslání signálu  $t_i$ , který je čtvrtým parametrem pro určení přesné polohy. Pro stanovení co nejpřesnější vzdálenosti přijímače od družice je nutné, aby byl čas v přijímači stejně přesný jako v GPS satelitu.

Pro zachování přesného času jsou zabudovány v přijímači i družici atomové hodiny, které jsou řízeny rubidiovým nebo cesiovým oscilátorem. Pro výpočet přesné polohy je třeba přesných a synchronních hodin na všech družicích i přijímačích na Zemi. Jakákoli nepřesnost či nestabilita oscilátorů, způsobí při určení polohy přijímače zkreslení až několik metrů. Z tohoto důvodu je měření dlouhodobé stability oscilátorů velice důležité, aby bylo možné vzniklé chyby a nepřesnosti odstranit, či zahrnout do výpočtu.

Navržené pracoviště pro měření dlouhodobé stability oscilátorů tvoří zdroj frekvence, čítače pro měření frekvence a zařízení na zpracování velkého množství dat. Ke zpracování dat je ideální počítač s příslušným softwarem.

Dlouhodobá stabilita oscilátorů byla měřena vždy po dobu 2 hodin, během nichž byla sledována a vyhodnocena odchylka od referenční hodnoty 10 MHz. Jako zdroje frekvence byly použity oscilátor SIM 940 10MHz Rubidiový standard, Agilent 33220A, časový a frekvenční standard GPG24, Pendulum CNT-91, Agilent HP 53131A. Měřicí přístroje Pendulum a Agilent HP 53131A ve funkci čítačů měřily frekvenci zdroje, jejichž data byla následně zpracována v počítači pomocí vytvořeného programu pro obsluhu a automatizaci měření v softwaru VEE Pro. Měření bylo prováděno pro odlišné pracovní (provozní) teploty měřicích přístrojů. Zařízení byly měřeny v následujících kombinacích:

1. Oscilátor po zapnutí; čítače po zapnutí
2. Oscilátor po dosažení provozní teploty; čítače po zapnutí
3. Oscilátor po zapnutí; čítače po dosažení provozní teploty
4. Oscilátor po dosažení provozní teploty; čítače po dosažení provozní teploty

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány v programu Microsoft Excel. Pro každé měření byla určena kombinovaná nejistota  $u_c$  a maximální odchylka frekvence od referenční hodnoty 10 MHz, z níž byla vypočtena dlouhodobá stabilita oscilátoru, uvažována pro časový interval 2 hodin.

Měření podle předpokladů dokázalo, že nejlepší vlastnosti má časový a frekvenční standard GPG24, který vykazoval nejvyšší frekvenční stabilitu ( $3,03 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$  a přesnost v průběhu celého měření. Další měřené oscilátory měly frekvenční stabilitu v následujícím pořadí: SIM 940 10MHz Rubidiový standard ( $4,55 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ , Agilent 33220A ( $8,29 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ , Agilent HP 53131A ( $2,48 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ , Pendulum CNT- 91 ( $2,70 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ .

V poslední kapitole byl vypracován vzorový protokol a návod pro zavedení do výuky, který popisuje metodiku měření dlouhodobé stability oscilátorů. Jelikož byl GPS oscilátor firmou dodán až v hraničním termínu, je vzorový protokol vypracován pro oscilátor SIM 940 10 MHz Frekvenční standard. Chtěl bych podotknout, že rubidiové oscilátory se rovněž používají v atomových hodinách družic i přijímačů GPS.

V budoucnu by bylo vhodné se zaměřit na autonomní kalibraci oscilátorů v GPS přijímačích podle přijímaného signálu z družic.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

To determine the exact location of the GPS receiver time plays a significant role. Each satellite broadcasts its current coordinates (x, y, z) and time of sending the signal, which is the fourth parameter to determine the exact location. To determine what the exact distance from the satellite receiver is necessary to allow time at the receiver as accurate as the GPS satellite.

To maintain accurate time are built into the receiver and the satellite atomic clocks, which are managed by rubidium or cesium oscillator. To calculate the exact position must be precise and synchronous clock on all the satellites and receivers on Earth. Any inaccuracy or instability of the oscillator, causing the positioning receiver bias to several meters. For this reason, the measurement of long-term stability of oscillators is important to allow any errors and inaccuracies removed or included in the calculation.

The proposed site for measuring long-term stability of oscillators constitute a source of frequency counters to measure frequency and equipment for processing large amounts of data. The data processing is an ideal computer with appropriate software.

Long-term stability of oscillators was measured every 2 hours during which the monitoring and evaluation of deviation from the reference value of 10 MHz. As the source frequency oscillator used 940 SIM 10MHz rubidium standards, Agilent 33220, GPG24 time and frequency standard Pendulum CNT-91 and Agilent 53131A HP. Measuring instruments Pendulum HP and Agilent 53131A function of frequency counters measure the sources from which data were then processed by a computer program developed for the operation and measurement automation software VEE Pro. Measurements were performed for different working (operating) temperature measuring devices. Devices were measured in the following combinations:

1. The oscillator is switched on, the counter is switched on
2. Oscillator after reaching operating temperature, turn on the counter
3. The oscillator is switched on, the counter after reaching operating temperature
4. Oscillator after reaching operating temperature, the counter of an operating temperature

The measured values were statistically processed in Microsoft Excel. For every measurement uncertainty was determined by UC and the maximum frequency deviation

from the reference value of 10 MHz, which was calculated from the long-term stability of the oscillator, the time interval considered for 2 hours.

Measurements based on assumptions showed the best characteristics of the oscillator time and frequency standard GPG24, which showed the highest frequency stability ( $3,03 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$  and accuracy throughout the measurement. Next they measured the frequency stability of oscillators in the following order: SIM 940 10MHz ( $4,55 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ , Agilent 33220A ( $8,29 \cdot 10^{-11}$ )  $s^{-1}$ , Agilent HP 53131A ( $2,48 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$  and Pendulum CNT-91 ( $2,70 \cdot 10^{-10}$ )  $s^{-1}$ .

The last chapter has been developed model protocol and guidelines for implementation of the instruction, which describes a methodology for measuring long-term stability of oscillators. Since it was delivered by the GPS oscillator to the final date, the standard protocol developed for oscillator SIM 940 10 MHz Frequency Standard. I would like to point out that the rubidium oscillators are also used in atomic clocks of satellites and GPS receivers.

In the future it would be appropriate to focus on autonomous calibration oscillators in GPS receivers to receive signals from satellites.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SEDLÁČEK, M.: Zpracování signálů v měřicí technice. Dotisk 2. vyd. - Praha : ČVUT, 1999.
- [2] ANGUS R., HULBERT T.: VEE Pro: Practical Graphical Programming, Springer 2004.
- [3] REGTIEN P. P. L.: Measurement science for engineers, London and Sterling, VA, 2004.
- [4] KAPLAN E. D. Understanding GPS — Principles and Applications. ISBN: 0-89006-793-7. Artech House Publishers, Boston & London. 1996.
- [5] Firemní literatura fy Stanford research system dostupná z <http://www.thinksrs.com/>.
- [6] CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1999. 688 s. ISBN 8022712752.
- [7] HÄBERLE, Heinz O; HANDLÍŘ, Jiří. Průmyslová elektronika a informační technologie. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2003. 719 s. ISBN 8086706044.
- [8] TUMAŃSKI, Sławomir. Principles of electrical measurement. New York : Taylor & Francis, 2006. 472 s. ISBN 0-7503-1038-3.
- [9] CIBULKA, Jaroslav, et al. *Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 928 s.
- [10] *Elektrotechnická měření*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 256 s. ISBN 80-7300-022-9.
- [11] *GPS + GLONASS + Galileo: nové obzory geodézie*. Vyd. 1. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2006. 150 s. ISBN 80-227-2519-6.
- [12] CHVOJKA, M.; SKÁLA, J. Malý slovník jednotek měření. Praha. Mladá fronta, 1982.
- [13] MÁDR, M. a kol. Fyzikální měření. Praha: SNTL 1991. 304 s. ISBN 80-03-00266-4

- [14] Elektronické měření: Měřicí přístroje [online]. Valašské Meziříčí: ISS Centrum odborné přípravy, 2006 [cit. 2011-05-24]. Citlivost přístroje, Dostupné z WWW: <<http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/mereni%201%20merici%20pristroje%20skripta.pdf>>.
- [15] ŠŤASTNÝ, František. Chyby. Rozlišení systematické a nahodilé složky chyb [online]. 1997, č. 5, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <[http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node6.html](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node6.html)>.
- [16] Nejistoty měření. In Nejistoty dodatek monografie [online]. Praha: ČVUT v Praze, [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <[http://webzam.fbmi.cvut.cz/stepate1/PST/pdfs\\_nejistoty\\_dodatek\\_monografie.pdf](http://webzam.fbmi.cvut.cz/stepate1/PST/pdfs_nejistoty_dodatek_monografie.pdf)>.
- [17] DOBEŠ, Josef; ŽALUD, Václav. Moderní radiotechnika. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [18] Technická dokumentace, SIM 940 10 Mhz Rubidiový standard
- [19] Technická dokumentace, Časový a frekvenční standard GPG24
- [20] Technická dokumentace, generátor signálu Agilent 33220A
- [21] Technická dokumentace, univerzální čítač Agilent HP 53131A
- [22] Technická dokumentace, univerzální čítač Pendulum CNT-91
- [23] Technická dokumentace, Agilent 108833A GPIB
- [24] Delaxcel.com [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Digital Oscilloscope. Dostupné z WWW: <[http://www.dealexcel.com/-electronic-instruments-digital-oscilloscope\\_c2366?productsort=4](http://www.dealexcel.com/-electronic-instruments-digital-oscilloscope_c2366?productsort=4)>.
- [25] Kosmo.cz [online]. 2007 [cit. 2011-05-24]. Účinky slunečních erupcí na GPS. Dostupné z WWW: <<http://www.kosmo.cz/modules.php?op=modload&name=kosmo&file=article&sid=1025>>.
- [26] Kowoma.de [online]. 2009 [cit. 2011-05-24]. Transmission of data. Dostupné z WWW: <<http://www.kowoma.de/en/gps/signals.htm>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

C / A	Coarse / Acquisition code.
DGPS	Differential Global Positioning System.
GHz	Gigahertz.
GPIB	General Purpose Interface Bus.
GPS	Global Positioning System
HP	Hewlett-Packard
Hz	Hertz.
JPO	Joint Program Office
MHz	Megahertz.
NATO	North Atlantic Treaty Organization
P	Precision code
RMS	Root Mean Square
SA	Selective Availability
SPS	Standard Positioning Service
VEE	Visual Engineering Environment

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Osciloskop Rigol DS 6104 .....	22
Obr. 2. Schéma přístroje pro přímé měření frekvence.....	23
Obr. 3. Oběžné dráhy družic .....	26
Obr. 4. Princip tvorby signálů.....	29
Obr. 5. Kyvadlo .....	32
Obr. 6. Blokové schéma oscilátoru .....	33
Obr. 7. Signál generovaný zdrojem: a) s malou stabilitou a velkou přesností; b) s velkou stabilitou a malou přesností [17].....	35
Obr. 8. Krystal v krystalovém oscilátoru .....	36
Obr. 9. Blokové schéma zapojení .....	39
Obr. 10. Blokové schéma zapojení s použitými přístroji.....	39
Obr. 11. Vytvořené pracoviště pro měření dlouhodobé stability oscilátorů.....	40
Obr. 12. SIM 940 10MHz Rubidiový standard .....	41
Obr. 13. Časový a frekvenční standard GPG24.....	42
Obr. 14. Generátor signálů Agilent 33220A.....	42
Obr. 15. Pendulum CNT- 91.....	43
Obr. 16. Agilent HP 53131A .....	44
Obr. 17. GPIB rozhraní.....	45
Obr. 18. Blokové schéma programu .....	46
Obr. 19. Program pro obsluhu a měření.....	47
Obr. 20. Ukázka naměřených dat.....	47
Obr. 21. Ukázka statisticky zpracovaných dat v softwaru Microsoft Excel.....	48
Obr. 22. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	48
Obr. 23. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	51
Obr. 24. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	52
Obr. 25. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	53
Obr. 26. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	53
Obr. 27. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	54
Obr. 28. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	55
Obr. 29. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	56
Obr. 30. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	56
Obr. 31. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	57

---

Obr. 32. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	58
Obr. 33. Schéma zapojení pro měření stability oscilátorů .....	60
Obr. 34. Blokové schéma přístroje pro přímé měření frekvence.....	61
Obr. 35. Program pro obsluhu a měření.....	63
Obr. 36. Závislost směrodatné odchylky frekvence na čase.....	64
Obr. 37. Závislost průměrné hodnoty frekvence na čase.....	65

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I                    Program pro obsluhu a automatizaci měření
- P II                    Naměřené hodnoty