

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti měření časových událostí s rozlišením do 10ps

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel KRUPIČKA**
Osobní číslo: **E13B0454P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Možnosti měření časových událostí s rozlišením do 10ps**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zpracujte přehled možných způsobů pro vytvoření tzv. time-to-digital převodníků.
2. Kladte důraz na metody umožňující rozlišení řádově 10ps.
3. Porovnejte rozlišení jednotlivých metod a jejich dynamický rozsah.
4. Uveďte výhody a nevýhody vybraných řešení (např. možnosti implementace do hradlových polí, vhodné pro návrh vlastního čipu, atd.).

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

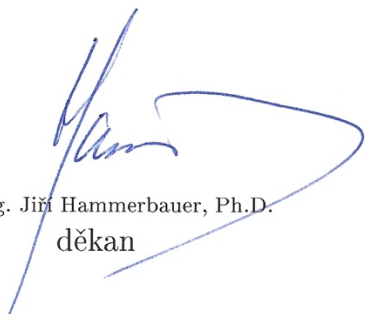
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Broulím**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi měření časových intervalů s velmi vysokým rozlišením až do řádu desítek pikosekund. V úvodu je zmíněn náhled do problematiky měření frekvence a časového intervalu. Další část práce popisuje přehled metod měření časového intervalu. Dále je krátký přehled dostupných zařízení pro měření časových intervalů, tzv. Time-to-Digital Convertors (TDC). Pro tato zařízení je zpracován přehled jejich možností a použitých metod k získání daného rozlišení s odkazem na přehled metod v předchozí kapitole. Závěrem je zmíněno možné využití TDC zařízení a shrnutí možností měření časových intervalů.

Klíčová slova

Čítač, Měření času, Noniová metoda, Time to Digital Converter, Zpoždovací linka, Vysoké rozlišení

Abstract

This bachelor thesis is focused on a time measurement with high resolution up to picoseconds. A theory of measurement of frequency and time is mentioned at the beginning. In the next part, several methods of the time measurement are described. The following part is a short overview of commercially available devices for the time measurement, Time-to-Digital Convertors (TDC). It consists of an overview of TDC devices and methods used for reaching high resolution with a respect to methods described before. Possible applications of TDC devices and a summary of the time measurement are mentioned at the end of the bachelor thesis.

Key words

Counter, Delay line, High resolution, Time measurement, Time-to-Digital Converter, Vernier method.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2017

.....

Karel Krupička

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Broulímovi za vstřícný přístup a poskytnutí cenných rad při vypracování bakalářské práce.

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk.....	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíl práce	10
1.2 Definice času a frekvence.....	10
2 Měření času.....	12
2.1 Číslicové měření frekvence a času	12
2.2 Měření časového intervalu	13
2.3 TDC zařízení	15
3 Měřící metody.....	17
3.1 Čítač.....	17
3.2 Noniová metoda	18
3.2.1 Měření s pomocí hlavního a reversibilního čítače	19
3.2.2 Měření s využitím dvojitě noniové metody	21
3.2.3 Měření pomocí zpožďovacích obvodů.....	21
3.3 Interpolační metoda.....	22
3.4 Měření střední hodnoty z n intervalů t_x	23
3.5 Realizace pomocí zpožďovacích linek implementovaných v FPGA	24
3.6 Kombinace měřících metod.....	25
4 Přehled komerčně dostupných TDC zařízení	28
4.1 TDC7200	29
4.2 TDC-GP22.....	30
4.3 TDC-GPX.....	33
4.4 TDC-GPX2.....	34
4.5 THS788	36
5 Využití TDC v praxi	37
6 Závěr	38
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	40
Seznam obrázků.....	42
Seznam tabulek.....	43

Seznam symbolů a zkratk

CMOS – Complementary Metal-Oxid-Semiconductor

FPGA – Field Programmable Gate Array

TDC – Time to digital converter

1 Úvod

1.1 Cíl práce

Měření času mělo vždy zásadní význam pro člověka a společnost. První měření probíhala již za pomoci slunečních hodin nebo nádoby s vodou. Jak se lidstvo dále vyvíjelo a technologie s ním, byly kladeny stále vyšší požadavky na přesnost měření času. V současné době, a to především v oblasti vědy a výzkumu, je potřeba velmi přesných, rychlých a spolehlivých systémů pro měření s vysokým rozlišením. Tyto nároky nejlépe splňují digitální číslicové systémy, které umožňují získávat výsledky v rozlišení řádu pikosekund.

Cílem bakalářské práce je zhodnocení a porovnání různých metod pro měření času s velkým rozlišením, vysvětlení principu jednotlivých metod, jejich rozlišení apod.

První kapitola se věnuje definici a teoretickému úvodu a měření frekvence. V další kapitole je popis používaných metod pro měření časových intervalů a dále jejich porovnání z hlediska hlavních parametrů a v různých případech použití. Dále je uveden přehled několika komerčně dostupných TDC zařízení a provedeno jejich srovnání.

Závěr práce je věnovaný shrnutí a porovnání aktuálně využívaných a na trhu dostupných TDC zařízení, z hlediska funkcionality (dosažitelnosti rozlišení, dynamického rozsahu), konstrukční a finanční náročnosti.

1.2 Definice času a frekvence

„Čas a frekvence spolu úzce souvisejí. Frekvence f je definována jako počet opakování periodického děje za jednotku času – jednu sekundu – a je převrácenou hodnotou doby periody T , tedy $f = \frac{1}{T}$.“ [1]

Jedna sekunda patří mezi základní jednotky soustavy SI. Její definice zní následovně:

„Jedna sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period záření vznikajícího při přechodu elektronu mezi dvěma velmi blízkými hladinami základního stavu atomu cesia 133.“ [1]

K měření času jsou nyní nejčastěji využívány krystalové a atomové hodiny. Nejvyužívanějšími a nejpřesnějšími hodinami jsou atomové hodiny, které předčily krystalové.

Krystalové hodiny fungují na principu využívající elektronický oscilátor, který je řízen krystalem. Nejčastěji využívaným materiálem s piezoelektrickými vlastnostmi je křemen. Výbrus krystalu křemene má tvar tyčinky, destičky, nebo prstence. Křemen je využíván pro dlouhou trvanlivost, pevnost a nízkou cenu. Nevýhodou krystalových hodin je stárnutí křemene, které má za následek postupné změny kmitočtu. Kvůli této vlastnosti je nutné krystalové hodiny kontrolovat jiným zařízením, které má stálý kmitočet.

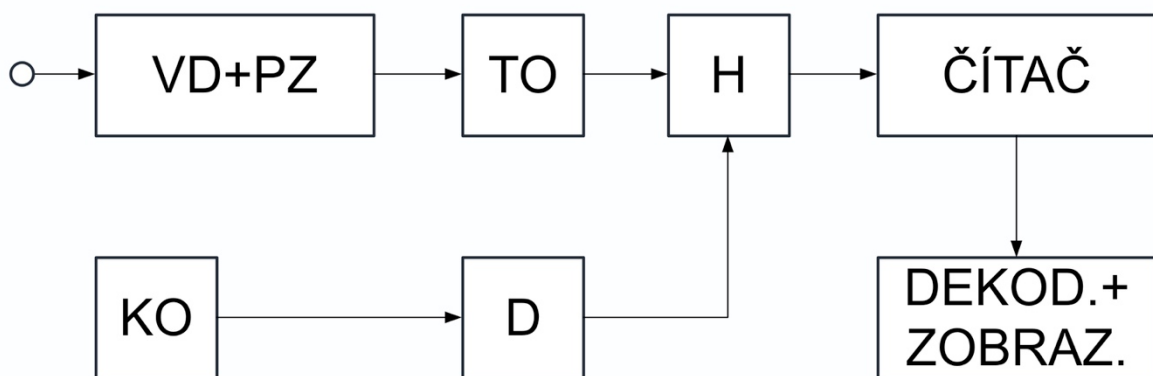
Atomové hodiny jsou založeny na kmitání atomů, které mají daleko vyšší kmitočet než krystal křemene, a tak je i dosažena vyšší přesnost měření. Pro výrobu atomových hodin se nejvíce využívají atomy cesia. Mezi další materiály, které se používají na výrobu atomových hodin, patří např. rubidium. Atomové hodiny jsou nejpřesnější hodiny času, a proto jsou využívány v GPS satelitech nebo právě na kalibraci krystalových hodin [3].

2 Měření času

2.1 Číslicové měření frekvence a času

K měření frekvence se nejčastěji používají čítače. Obvod se skládá ze základních částí jako je čítač, hradlo, tvarovací obvod, vstupní dělič a předzesilovač. Vstupní signál prochází vstupním děličem a předzesilovačem. Dále je signál tvarován v tvarovacím obvodu na požadované úrovně pulsů. Následně signál vstupuje přes hradlo do čítače. Pokud je doba měření, resp. doba otevření hradla rovna 1s, je počet pulsů N napočtené čítačem roven frekvenci f_x v hertzech.

Délka otevření hradla je určena frekvencí f_0 krystalem řízeného oscilátoru. Frekvence je vydělena v číslicové děličce (D). Číslicová dělička má takovou konstantu, aby výsledná doba otevření hradla byla dekadickým násobkem, nebo podílem jedné sekundy. Převážně při měření v oblasti nízkých frekvencí se objevuje chyba, která je zapříčiněna rozlišovací schopností čítače. Během měření frekvence se může objevit další chyba, která vzniká při nevhodném tvaru signálu nebo při nevhodně nastavené komparační úrovni tvarovacího obvodu. V těchto případech můžeme změřit až několikanásobek měřené frekvence, proto je vhodné nejdřív změřit přibližnou frekvenci osciloskopem a pomocí čítače měřenou frekvenci zpřesnit.



Obr. 1 - Blokové schéma čítače v režimu měření frekvence

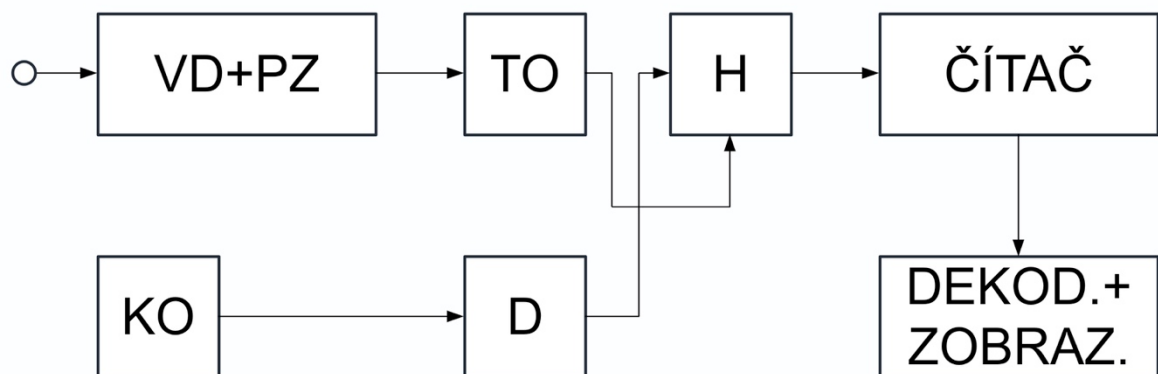
Při číslicovém měření frekvence se měří do hodnot v řádech GHz. Při vyšších frekvencích se využívá metoda směšování. V případě měření nižších frekvencí se využívají další metody. Změřený kmitočet můžeme vynásobit 10× nebo 100×. Při této metodě se využívá obvod s fázovým závěsem [1].

Další využívanou metodou při měření nízkých frekvencí je nepřímá metoda měření. Měříme dobu periody a hledanou frekvenci zjistíme ze vztahu:

$$f_x = \frac{1}{T_x} \quad (1)$$

2.2 Měření časového intervalu

Při měření časového intervalu jsou prohozeny vstupy do hradla oproti měření frekvence. Můžeme měřit v režimu měření doby periody, délky impulsu, nebo délku mezi dvěma pulsy. V OÚS (obvod úpravy signálu) se převede měřený časový interval na délku impulsu, kterým je otevíráno hradlo. Po dobu otevření hradla čítač počítá dané impulsy frekvence f_n .



Obr. 2 - Blokové schéma čítače v režimu měření časového intervalu

Měřený časový interval se vypočte z daného vztahu, kde N je počet pulsů a f_n je daná frekvence.

$$T_x = \frac{N}{f_n} \quad (2)$$

Při měření časového intervalu vznikají stejné chyby, jako při měření frekvence a navíc kvantovací chyba, která vzniká při převodu měřeného časového intervalu na délku impulsu, která otevírá hradlo. Nejmenší možný měřitelný časový interval odpovídá délce periody T_0 . Jeho skutečná velikost se liší od naměřené velikosti o kvantovací chybu. Velikost kvantovací chyby určíme z následujícího vztahu:

$$\Delta kv = t_{xs} - t_x \quad (3)$$

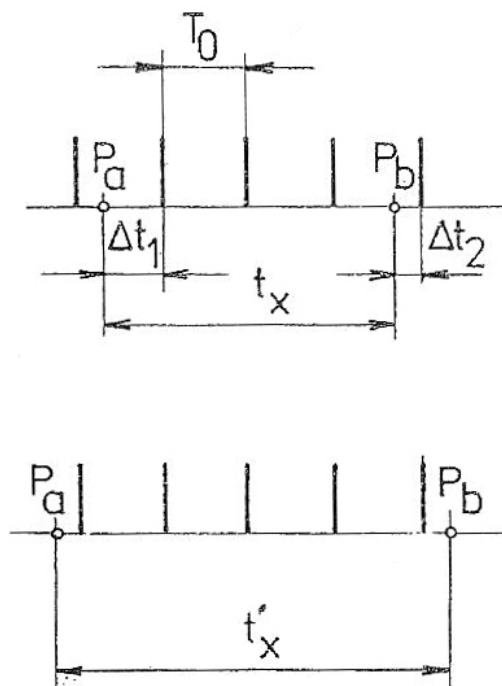
Kde t_{xs} je skutečná hodnota a t_x je naměřená hodnota. Převodní charakteristika tohoto číslicového měřiče délky časového intervalu by měla podobný stupňovitý průběh jako u A/D převodníků. Šířka jednoho stupně tedy je:

$$\Delta kv = T_0 \quad (4)$$

tudíž pro vztah kvantizační chyby a velikosti T_0 , platí vztah:

$$-T_0 < \Delta kv \leq T_0 \quad (5)$$

Během kvantování se vyskytuje přídavná chyba, kterou ovlivňuje asynchronnost spouštěcích impulsů P_a a P_b . Pro správnou ilustraci poslouží obrázek 1.3. Během měření časového intervalu t_x je možné, že nastane situace, kdy měřený interval bude přesně roven násobku časového intervalu T_0 . Není možné přesně určit polohu P_a a P_b a proto čítač zaznamená počet pulsů o hodnotě n_x nebo $n_x \pm 1$. Z jednoho jediného měření není možné zjistit, jaký konkrétní stav vznikl, a tak je neurčitost obsahu čítače $n_x \pm 1$. Během měření díky neurčitosti vzniká chyba Δ_a , která nabývá hodnot $\pm T_0$. Chyba měření bude vždy v intervalu $\langle -T_0, T_0 \rangle$ [1].



Obr. 3 - Schéma kvantování, kvantizační chyba [1]

2.3 TDC zařízení

V různých reálných aplikacích je potřeba znát určitý časový úsek mezi dvěma událostmi. Time to Digital Converter (TDC) je elektronické zařízení, které měří časové intervaly ohraničené začátkem a koncem. TDC naměřený časový interval zpracuje pomocí určité měřící metody, nebo jejich kombinací a výsledek převádí do digitální binární podoby, která je na výstupu.

Time to digital convertory jsou využívány v mnoha aplikacích. Měření jsou ohraničena náběžnou nebo doběžnou hranou řídicího signálu. Tato měření jsou hojně využívána při měření fyzikálních experimentů, kde je nutné zjistit časový interval letu částic, ve vysokoenergetické fyzice nebo při laserových měření. TDC se využívají v aplikacích, kde se měření časového intervalu vyskytuje častěji.

Základní princip měření časového intervalu pomocí TDC je realizován vysokofrekvenčním čítačem, který zvyšuje svoji hodnotu při každém hodinovém cyklu. Aktuální hodnota čítače představuje měřený časový interval. Během události, kdy je ukončeno dané měření, čítač vyhodnocuje naměřené cykly a převádí na výsledný čas. V případě, že je potřeba měřit s vyšší přesností, tudíž dosahovat měření s vyšším rozlišením, je potřeba využívat rychlejší zdroje hodinového signálu. Přesnost měření je závislá na stabilitě frekvence zdroje hodinového signálu.

Měření časového intervalu je rozděleno na zjištění hrubého a jemného času. Měření hrubého času má velký rozsah měřících hodnot, ale malé rozlišení. U měření jemného času je to naopak, tedy je přesnější z hlediska rozlišení, ale má menší rozsah.

Pro měření jsou využívány digitální a analogové metody. Měření hrubého času je realizováno čítačem, zpožďovacími obvody, nebo metodou průměrováním. Tyto metody jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

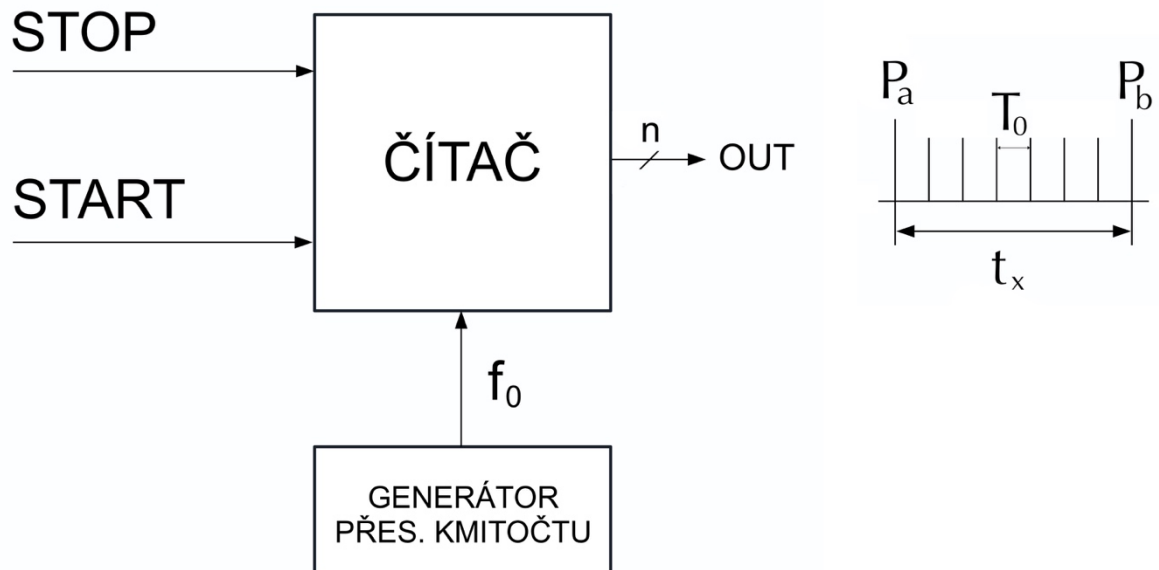
Pro měření jemného času jsou využívány noniové metody, zpožďovací linky a metoda interpolační. Hlavním znakem analogové interpolační metody je využívání nabíjení kondenzátoru konstantním proudem od začátku časové události až do konce časové události. V okamžiku ukončení měření přímo úměrně odpovídá hodnota napětí nabitého kondenzátoru časovému intervalu.

Zpožďovací linky pracují na principu doby průchodu signálu, přes různé zpožďovací elementy, kde známe jejich přesnou dobu zpoždění. Jako zpožďovací element je možné využívat např. kondenzátory, a tak vzniká kombinace analogové a digitální metody. Podrobnému popisu zpožďovacích linek a jejich kombinací s dalšími metodami jsou věnovány následující kapitoly.

3 Měřicí metody

3.1 Čítač

Nejčastější a na výrobu nenáročná metoda pro měření časového intervalu je pomocí čítače. Při této metodě měření je čítač plněn impulsy o frekvenci f_0 z generátoru stálého kmitočtu. S příchodem časové události START se otevírá hradlo a začíná měření. Po dobu měření, čítač počítá pulzy ze zdroje stálého kmitočtu. Jakmile nastane událost STOP, tedy ukončení měření, hradlo se uzavře a ukončí se měření. Nyní má čítač hodnotu n_x , která představuje počet pulzů.



Obr. 4 - Schéma obvodu pro číslicové měření pomocí čítače

Celkový měřený časový interval získáme pomocí následujícího vzorce:

$$t_x = n_x \cdot T_0 \quad (6)$$

Hodnota T_0 představuje délku doby jedné periody generátoru stálého kmitočtu. Hodnota T_0 se vyjádří ze známého vzorce:

$$f = \frac{1}{T} \quad (7)$$

A tudíž lze výpočet časového intervalu vyjádřit vztahem:

$$t_x = \frac{n_x}{T_0} \quad (8)$$

Ze vztahů pro výpočet je vidět, že přesnost měření časového intervalu pomocí čítače závisí na době periody T_0 a ta závisí na velikosti frekvence generátoru kmitočtu. Pokud generátor frekvence bude mít vyšší frekvenci, i měření časového intervalu bude daleko přesnější. Pomocí této měřicí metody lze dosahovat měření s rozlišením desítek mikro vteřin. Výhodou je velký dynamický rozsah měření. Toto měření je citlivé na kvalitu generátoru kmitočtu. Je vyžadován stabilní zdroj, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření. Během tohoto měření vzniká kvantovací chyba, která se zmenšuje s rostoucí frekvencí zdroje.

3.2 Noniová metoda

Měření pomocí noniové metody může být realizováno více způsoby. Hlavními prvky při realizaci měření pomocí této metody jsou vždy dva a více generátorů kmitočtů, čítače impulsů a koincidence signálů. Dále následuje shrnutí několika možných variant realizace měření časového intervalu.

3.2.1 Měření s pomocí hlavního a reversibilního čítače

V okamžiku zahájení události je přiveden impuls P_a . Tento impuls otevře hradlo H_2 a zároveň klopný obvod spustí rychle startující generátor f_{02} . Nyní probíhá čítání impulsů obou čítačů. Reversibilní čítač počítá impulsy ze zdroje f_{02} a hlavní čítač ze zdroje signálu f_{01} . Čítání pulsů probíhá až do doby koincidence impulsů ze zdroje signálů f_{01} a f_{02} . Jakmile dojde ke koincidenci, kterou detekuje hradlo H_1 , zastaví se reversibilní čítač. Stav koincidence vznikne v době, kdy platí tento vztah:

$$(n_1 \cdot T_{02}) + \Delta t_1 = n_1 \cdot T_{02} \quad (9)$$

Po první koincidenci hlavní čítač stále čítá impulsy ze zdroje f_{01} . V okamžiku, kdy nastane událost P_b , což je funkce vyvolávající konec našeho hledaného měření, je opět spuštěn zdroj signálu f_{02} . Nyní čítače opět znovu čítají a čekají na stav koincidence signálů f_{01} a f_{02} . Jakmile nastane druhá koincidence, opět platí podobný vztah jako při první koincidenci:

$$(n_2 \cdot T_{02}) + \Delta t_2 = n_2 \cdot T_{01} \quad (10)$$

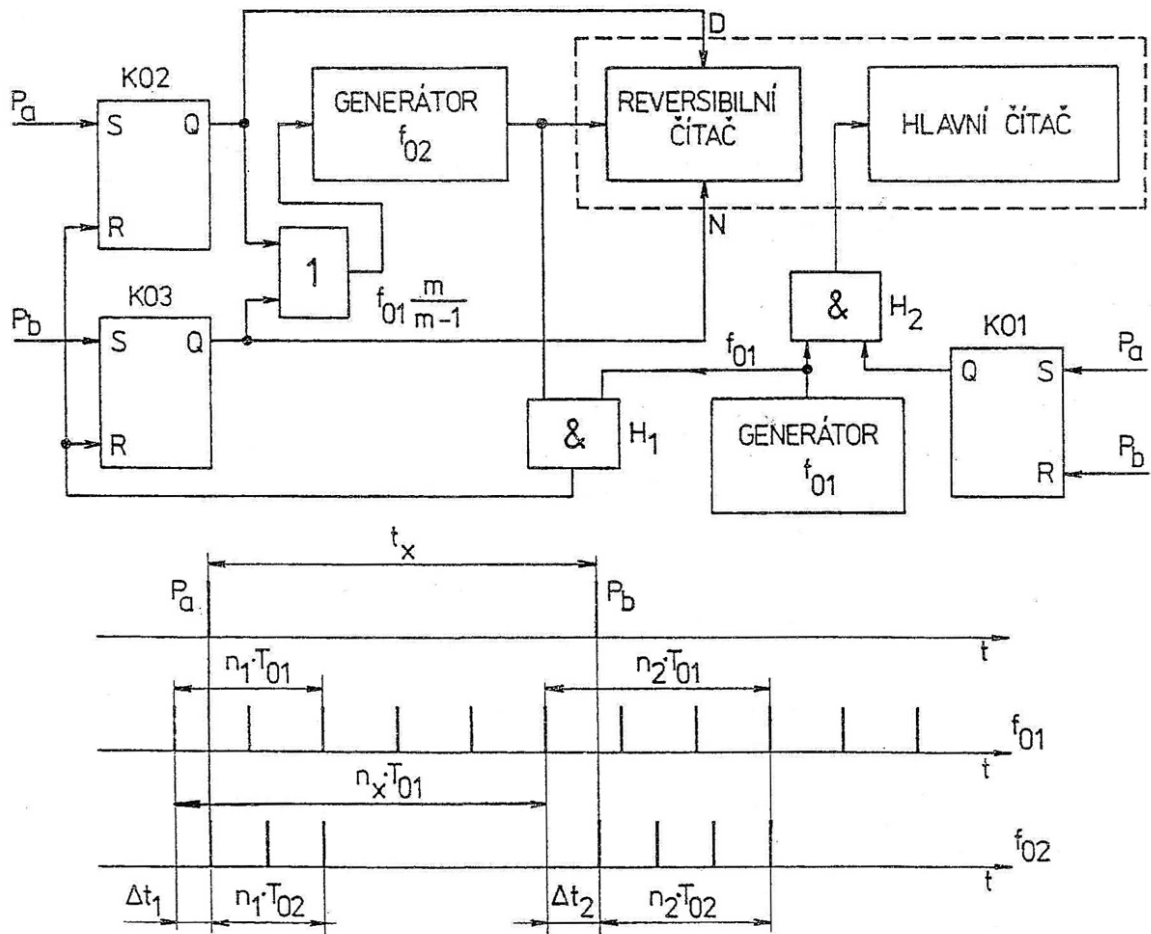
Z obrázku 1. 4 vidíme, že pro měřený časový interval t_x platí následující vztah:

$$t_x = n_x \cdot T_{01} + \Delta t_1 + \Delta t_2 \quad (11)$$

Hodnota n_x je počet naměřených impulsů hlavního čítače. Rozdíl $\Delta t_2 - \Delta t_1$ určíme z předchozích dvou vztahů při zjišťování první a druhé koincidence vznikne tento vztah:

$$\Delta t_2 - \Delta t_1 = n_2 \cdot (T_{01} - T_{02}) - n_1 \cdot (T_{01} - T_{02}) = (n_2 - n_1) \cdot \frac{T_{01}}{m} \quad (12)$$

Hodnota $n_2 - n_1$ je hodnota z reversibilního noniového čítače, který pro hodnotu $m=10$ vyjadřuje poslední dekádu. Aby funkce noniového měřiče časového intervalu dané konstrukce byla správná, je nutné malé zpoždění mezi impulsy P_a , P_b a prvními impulsy ze zdroje signálu f_{02} [2].



Obr. 5 - Schéma měření pomocí noniové metody s hlavním a reversibilním generátorem [2]

3.2.2 Měření s využitím dvojité noniové metody

V momentě začátku měření časového intervalu t_x je přiveden impuls P_a , který spouští první generátor signálu f_{01} . Tato realizace využívá spuštění dvou noniových generátorů. Konec měřeného časového úseku je ohraničen událostí P_b , která spouští druhý noniový generátor f_{02} . Čítač impulsů signálu f_{01} je spuštěn v době koincidence signálu f_{01} a prvního zdroje signálu f_{02} spuštěného impulsem P_b . Tento hlavní čítač, který nabyde hodnoty n_x je ukončen v době koincidence signálu f_{01} a druhého signálu f_{02} spuštěného impulsem P_b .

Pro správné fungování této realizace takzvané dvojité noniové metody je důležité, aby zpoždění sepnutí generátoru po impulsu P_a a P_b bylo co nejmenší, a aby bylo ve stejné fázi. Rychlé starty generátorů mají vliv na dlouhodobou stálost kmitočtu. Tato metoda lze využívat při rychle se opakujících událostech start a stop. Pro měření časových událostí s delšími intervaly start a stop musí být využívána jiná realizace než pomocí dvojité noniové metody [2].

3.2.3 Měření pomocí zpoždovacích obvodů

V jaderné fyzice je využívána varianta noniové metody, která funguje na principu zpoždovacích smyček. Je to z důvodů měření velmi krátkých časových intervalů. Pomocí této metody lze měřit časové intervaly v řádu ns. Tato realizace je vytvořena pomocí dvou zesilovačů, dvou hradel, zpoždovacích smyček a koincidenčním obvodem. Při startu měřeného časového intervalu t_x je impulsem P_a spuštěn první zpoždovací obvod, který má větší zpoždění než druhá smyčka. Na konci měřeného časového intervalu je spuštěn druhý zpoždovací obvod impulsem P_b . Nyní impulsy obou zpoždovacích obvodů obíhají ve své smyčce. Každý zesilovač z daného zpoždovacího obvodu vstupují do koincidenčního obvodu KO, který hledá koincenci. Jakmile nastane stav koincidence zpoždovacích obvodů, začíná vyhodnocení, respektive výpočet měřeného časového intervalu t_x . Stav koincidence nastává v okamžiku, pokud platí následující vztah:

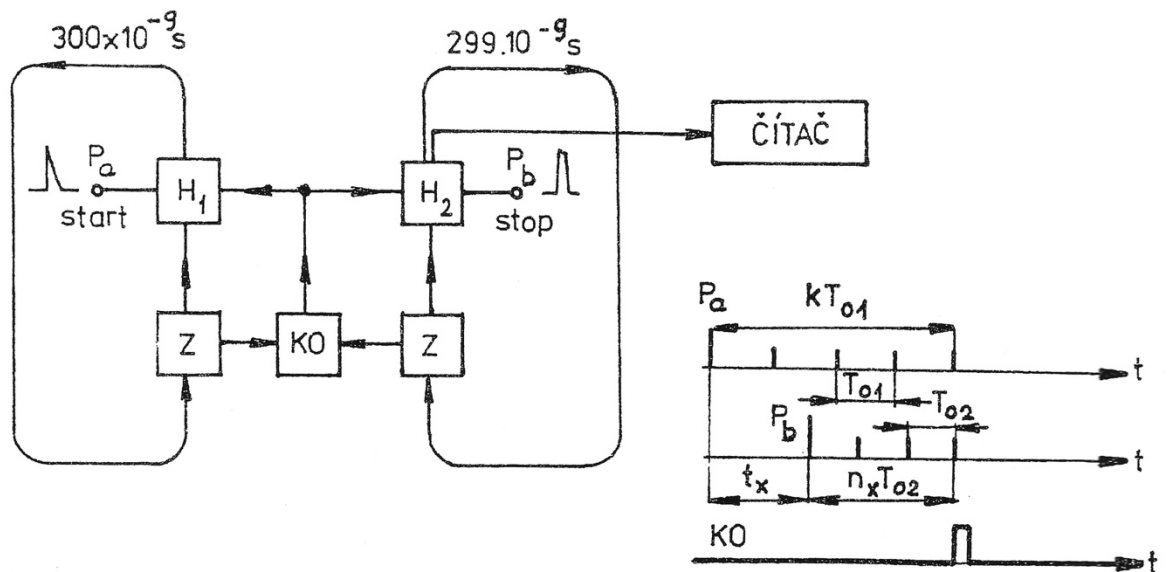
$$k \cdot T_{01} = t_x + (n_x \cdot T_{02}) \quad (13)$$

K je v daném vztahu celkový počet impulsů od spouštěcího impulsu P_a v první zpožďovací smyčce a n_x je počet impulsů ve druhém zpožďovacím obvodu od události P_b . Pokud bude měřený časový interval t_x menší než časová perioda T_{01} , pak bude výpočet měřeného časového intervalu následující odvozením z předchozího upraveného vztahu:

$$n_x \cdot T_{01} = t_x + (n_x \cdot T_{02}) \quad (14)$$

Z toho vyjádříme hledanou hodnotu měřeného časového intervalu t_x .

$$t_x = n_x \cdot (T_{01} - T_{02}) \quad (15)$$

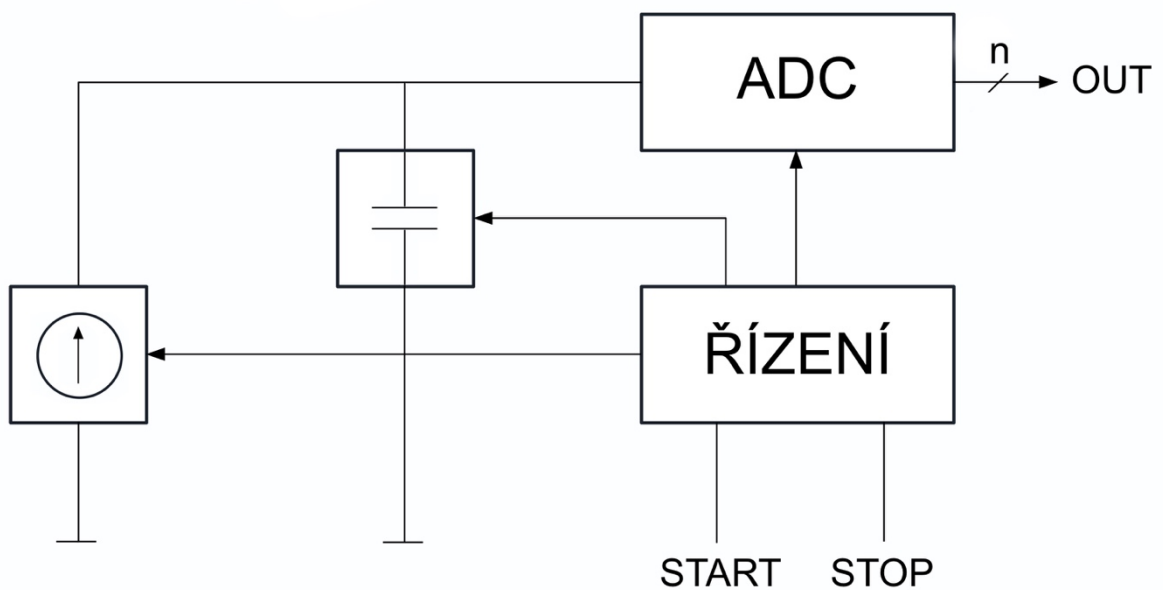


Obr. 6 - Schéma zapojení při měření časového intervalu pomocí zpožďovacích smyček [2]

3.3 Interpolační metoda

Pro měření pomocí interpolační metody je využíváno nabíjení a vybíjení kondenzátoru.

Jakmile začne měření, je spuštěn proud, který nabíjí kondenzátor konstantním proudem. Tento kondenzátor se nabíjí během měření. V čase ukončení měření je nabíjecí proud vypnut. Napětí, které je na kondenzátoru, přímo úměrně odpovídá naměřenému časovému intervalu. Po změření časové události a převedení analogové hodnoty napětí na digitální je nutné tento nabíjecí kondenzátor vybit, aby mohlo následovat další měření. Při užití této metody je třeba určitého mrtvého času mezi měřeními časových intervalů. Na obrázku 7 je stručné blokové schéma hlavních prvků pro interpolační metodu. Proudový zdroj, kondenzátor, digitální převodník a řídicí blok. ADC převodník nesmí zatěžovat integrátor, proto je třeba, aby měl co největší impedanci [2].



Obr. 7 - Schéma zapojení při měření časového intervalu pomocí interpolační metody

3.4 Měření střední hodnoty z n intervalů t_x

Díky této metodě měření je možné zmenšit kvantovací chyby a díky tomu zpřesnit měření. Při používání této metody jsou rozlišovány tři typy měření.

Nejefektivnější měření časových intervalů je takové, která je na sebe navazující. Měří se celkový počet n intervalů a v okamžiku ukončení jednoho intervalu, ve stejný okamžik začíná druhý. Celková doba se následně vydělí počtem intervalů a kvantovací chyba se rozprostře mezi

všechny intervaly, a tak bude přesnost největší. Výpočet časového intervalu probíhá tímto vztahem:

$$T_x = \frac{N_x}{n \cdot f_0} \quad (16)$$

Kde f_0 je n -krát větší, tudíž se kvantovací chyba n -krát zmenší.

Další možnosti měření je situace vzájemně oddělených, nenavazujících časových intervalů. Pokud bude pravděpodobnost jejich polohy začátku a konce vůči periodě T_0 stejná, bude kvantovací chyba zmenšena v průměru \sqrt{n} – krát.

Poslední možností, která má nejhorší vlastnosti je situace, kdy jsou měřené časové intervaly oddělné a opakovací kmitočet intervalů je roven celočíselnému podílu f_0 . V tomto případě každý měřený časový interval obsahuje chybu Δt_1 a Δt_2 a výpočet průměru celkový výsledek nezmění. Tato varianta metody nemá žádné výhody.

Tato metoda je časově náročná z důvodu velkého počtu opakování pro získání co nejpřesnějšího výsledku [2].

3.5 Realizace pomocí zpožďovacích linek implementovaných v FPGA

Měření času s vysokým rozlišením je využíváno při měřeních ve fyzice. Měření pomocí zpožďovacích prvků dosahuje rozlišení v řádu desítek pikosekund. Pro výrobu TDC s vysokým rozlišením se využívají FPGA, které jsou vhodné kvůli nízké náročnosti na realizaci, flexibilitu a cenu. V realizaci pomocí FPGA dochází k rozdílným dobám zpoždění elementů, proto je nutná kalibrace. Je výhodnější využít přímý návrh zpožďovací linky v rámci čipu. Zpožďovací linka obsahuje několik buněk, kde je přesně daný jejich čas zpoždění. Signál prochází řadou zpožďovacích elementů a výsledný časový interval je součtem daných zpožděných intervalů.

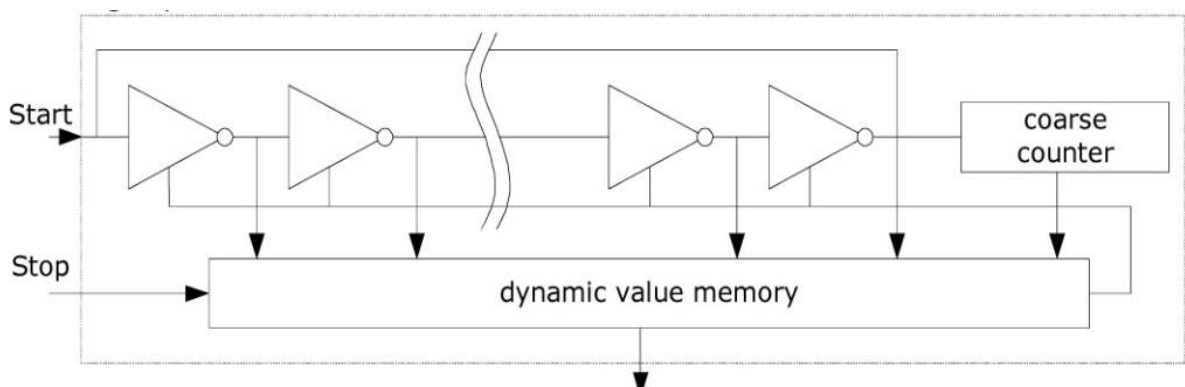
Pro měření jemného času je využít řetězec více bitových čítačů. Při tomto měření je důležité, aby čas zpoždění mezi bity součtů byl jednotný.

Často používanou zpožďovací linkou při výrobě TDC je kruhový oscilátor. Základním prvkem kruhového oscilátoru jsou prvky, kde každý výstup prvku je přiveden na vstup prvku následujícího. Při výrobě TDC zařízení se využívají kruhové oscilátory s CMOS invertory.

CMOS invertor je konstruován pomocí kombinace tranzistoru NMOS a PMOS.

Každý invertor má určitou dobu zpoždění. Zpoždění vzniká, protože se na každém prvku vyskytují parazitní kapacity. Toto zpoždění je u každého prvku shodné, a proto doba zpoždění je úměrná počtu zpožďovacích elementů. CMOS technologie dovoluje dosahovat kmitočtů v oblasti gigahertzů, proto jsou tyto kruhové oscilátory využívány pro měření jemného času.

Možností konstrukčního provedení zpožďovacích linek je více. Jako zpožďovací elementy lze využívat sériově zapojené kondenzátory. Každý kondenzátor se nabíjí určitý čas, který je u všech prvků shodný. Toto řešení je kombinací více metod a vzniká digitálně analogová zpožďovací linka. Na obrázku číslo X je znázorněna propagace signálu přes zpožďovací linku a její jednotlivé elementy. Na znázorněném schématu probíhá měření jemného a hrubého času pomocí zpožďovací linky a propagace hodnot do paměti [4].



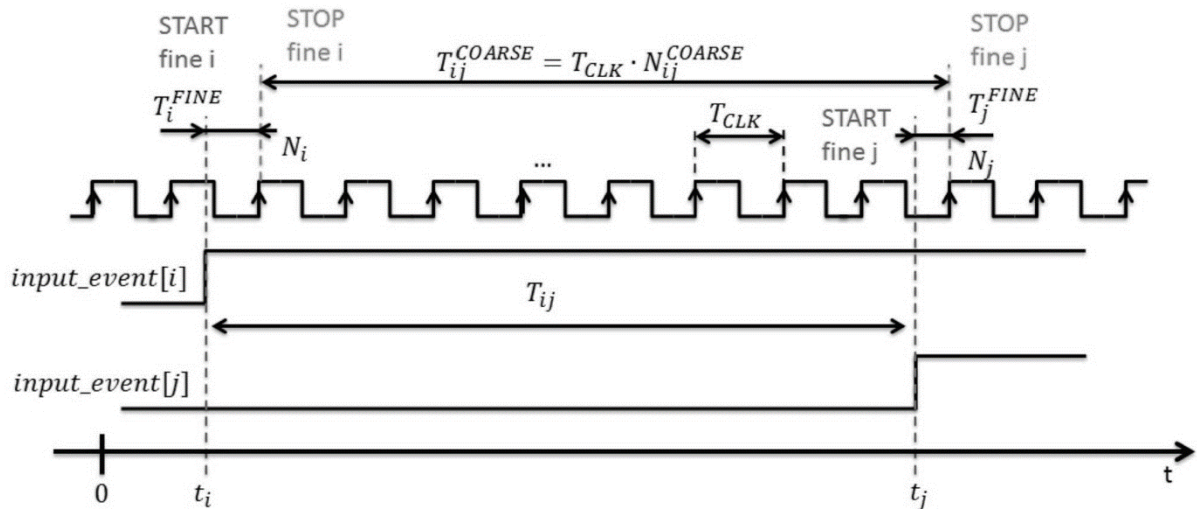
Obr. 8 - Schéma zapojení zpožďovací linky [6]

3.6 Kombinace měřících metod

Pro maximální efektivitu měření je využíváno kombinací různých měřících metod. Pro měření hrubého času se v reálných TDC zařízení nejčastěji využívá čítač. Hrubý čas lze měřit i pomocí noniové metody, zpožďovacími obvody nebo metodou měření středních hodnot. V některých případech lze hrubý čas měřit i zpožďovacími linkami, konkrétně kruhovým oscilátorem. Tato varianta měření je použita v zařízení TDC7200, které je popsáno v následující

kapitole. V případě měření hrubého času kruhovým oscilátorem je dosaženo poměrně přesných výsledků, ale dynamický rozsah je omezen.

Analogová interpolační metoda nebo metoda využívající zpožďovací linky je aplikována pro měření jemného času. Kombinací více měřících metod dosáhneme vyššího rozlišení a zároveň i zachování velkého dynamického rozsahu.



Obr. 9 – Časový diagram měření hrubého a jemného času [5]

Na obrázku 1.9 je znázorněno měření časového intervalu v zařízení TDC implementovaného do FPGA. Kombinací měřících metod je dosaženo nejlepších výsledků z hlediska rozlišení a dynamického rozsahu. Základním prvkem je zdroj signálu, kde doba trvání pulzu od náběžné hrany k další náběžné hraně je označena T_{CLK} . Vstupní událostí $START$ je započato celé měření. Jako první probíhá měření jemného času pomocí některé z výše popsaných metod, v tomto případě pomocí zpožďovací linky. Měření jemného času je aktivní do první náběžné hrany. V okamžiku náběžné hrany není kladen takový důraz na přesnost, a tak začíná měření hrubého času. Hrubý čas je měřen pomocí čítače a celkový hrubý čas T_{ij}^{COARSE} je vypočten z jednoduchého vztahu.

$$T_{ij}^{COARSE} = T_{CLK} \cdot N_{ij}^{COARSE} \quad (17)$$

Kde N_{ij}^{COARSE} je aktuální hodnota čítače. Toto měření hrubého času pomocí čítače probíhá až do události STOP, která spouští měření jemného času. Jemný čas je měřen do následující náběžné hrany zdrojového signálu. Nyní má TDC zařízení tři naměřené hodnoty, z kterých vypočte dle následujícího vztahu celkový měřený časový interval.

$$T_{ij} = T_i^{FINE} - T_j^{FINE} + T_{ij}^{COARSE} \quad (18)$$

Odečtením první hodnoty měřeného jemného času po události STOP T_j^{FINE} od doby události START po první náběžnou hranu T_i^{FINE} získáme hodnotu časového intervalu, jemného času. Tato hodnota se přičte k době intervalu měření hrubého času T_{ij}^{COARSE} . Výsledkem je celkový měřený časový interval od počáteční události START až po konečnou událost STOP. Tento výsledek je docílen pomocí kombinací rozdílných metod pro měření hrubého a jemného času [5].

4 Přehled komerčně dostupných TDC zařízení

V této kapitole jsou popsána běžně dostupná TDC zařízení, která lze zakoupit. Při popisu konkrétních TDC zařízení jsou zkoumány metody měření časového intervalu. Nejdůležitější vlastností, která je zkoumána, je rozlišení. Dále je také důležitý dynamický rozsah zařízení. Veškeré informace o těchto zařízeních jsou čerpány z dostupných datasheetů, které jsou ke stažení na internetových stránkách výrobců nebo prodejců. Tyto datasheety jsou v seznamu použité literatury. Někteří výrobci v datasheetu daného zařízení příliš nerozebírají technologie měření časového intervalu. Technologie měření časových intervalů v datasheetech není dopodrobna popsána, protože pro koncového uživatele není příliš důležitá. Výrobci tyto informace neposkytují, protože je to součástí jejich výrobního know-how.

V následujících kapitolách jsou popsány základní parametry, které jsou pro měření časového intervalu nejdůležitější. Většina zařízení využívá kombinaci více měřících metod pro dosažení nejlepších výsledků.

V příložené tabulce číslo 1 je jsou shrnuté důležité parametry běžně dostupných TDC zařízení. Ceny TDC zařízení jsou brány z oficiálních stránek výrobců a jsou aktuální ke květnu 2017 [6-10].

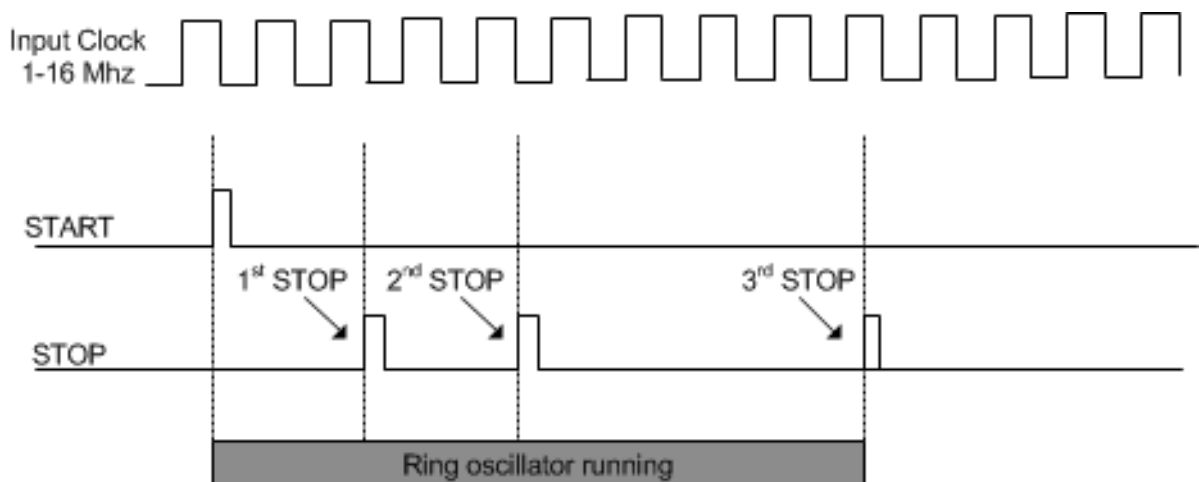
Tabulka č. 1 – Základní parametry dostupných TDC zařízení

TDC Zařízení	Režim	Rozlišení	Dyn. rozsah	Počet kanálů	Cena [USD]
TDC 7200		55 ps	12 ns-500 ns	1	5
TDC - GP22	Mód 1	45 ps	4 ms - 700 ns	1	7,5
	Mód 2	22 ps	3,5 ns - 2,5 μ s	2	
TDC - GPX	I - mód	81 ps	9,8 μ s - ∞	8	162
	G - mód	40 ps	0 ns - 65 μ s	2	
	R - mód	27 ps	0 μ s - 40 μ s	2	
	M - mód	10 ps	0 ns - 10 μ s	2	
TDC - GPX2		10 ps	0 s - 16 s	4	50
THS 788		13 ps	0 s - 7 s	4	181

4.1 TDC7200

Zařízení, které má obchodní název TDC7200, vyrábí americká firma Texas Instruments, která se zaměřuje na výrobu integrovaných obvodů a počítačové techniky.

Pomocí zařízení TDC7200 lze měřit dvěma režimy. První režim je využíván pro měření časového intervalu, který je menší než 500 nanosekund. V případě měření časového intervalu, který je delší než 500 nanosekund, se přesnost zařízení snižuje. V tomto režimu je možné změřit nejkratší časový interval o velikosti 12 nanosekund.

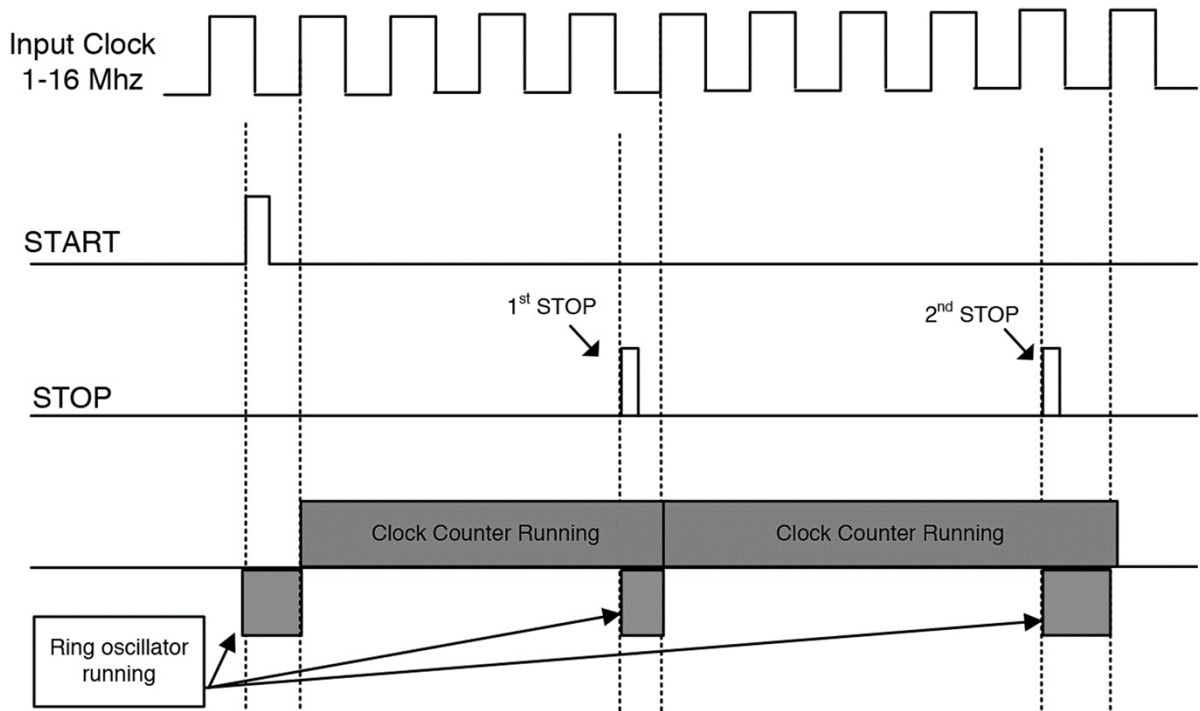


Obr. 10 – TDC7200 - časový diagram měření intervalu kruhovým oscilátorem [6]

Hrubý a jemný čas je v prvním režimu měřen pouze kruhovým oscilátorem, což je znázorněno na obrázku číslo 10. Na stop lince jsou tři události stop, které jsou měřeny. V datasheetech je vícenásobná událost stop na jedné lince označována jako „multihit“.

Druhý režim měření využívá také vnitřní kruhový oscilátor a čítač. Toto měření je vhodné pro delší časové intervaly. Jakmile nastane začátek měření, je spuštěn kruhový oscilátor, který měří časový interval až do příchodu náběžné hrany zdroje hodinového signálu. V tento okamžik je kruhový oscilátor vypnut a zapnut vnitřní čítač. Až do příchodu události stop se čítač plní hodnotami náběžných hran hodinového signálu. S příchodem události stop je opět spuštěn kruhový oscilátor, který měří časový interval až do následující náběžné hrany zdroje

hodinového signálu. Tento mód je kombinací pro měření jemného času zpoždovací linkou, v tomto případě kruhovým oscilátorem a hrubého času měřeného čítačem.



Obr. 11 – TDC7200 - časový diagram měření intervalu kombinací kruhového oscilátoru a čítače [6]

Na obrázku 11 je znázorněno měření hrubého a jemného času pomocí odlišných měřících metod. Toto TDC zařízení měří pomocí principu, který je popsán v kapitole 3.6 pojednávající o kombinaci více měřících metod pro změření jednoho časového intervalu.

Druhý mód potřebuje nejkratší časový interval 125 nanosekund.

Toto zařízení má rozlišení měření 55 pikosekund a dynamický rozsah 12 až 500 nanosekund. Je to jedno z nejjednodušších TDC zařízení, které lze zakoupit. Cena zařízení se pohybuje okolo pěti dolarů [6].

4.2 TDC-GP22

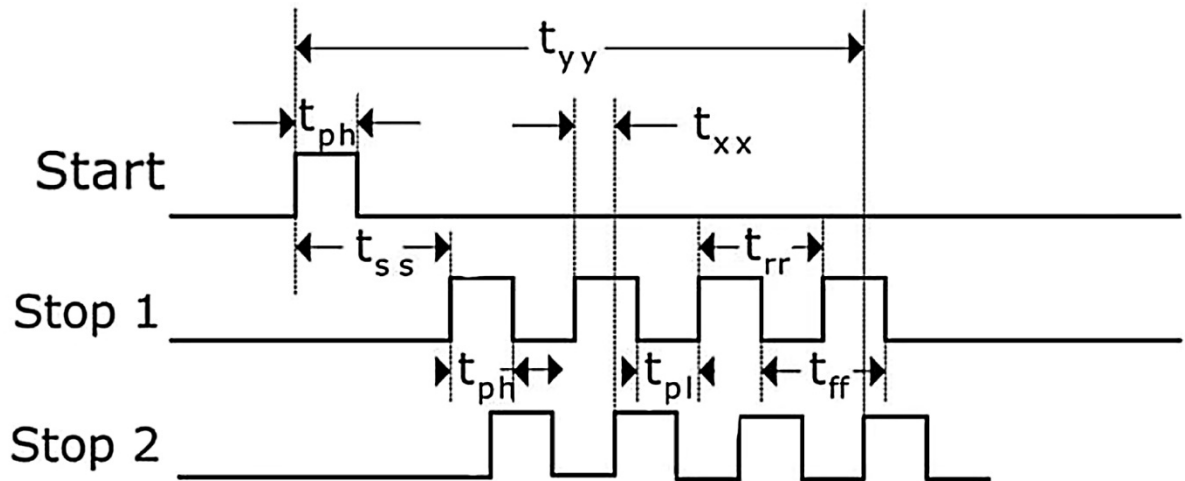
TDC-GP22 vyrábí firma AMS, která se zaměřuje na výrobu různých senzorů. Toto zařízení umožňuje měřit dvěma režimy. Přesnost TDC-GP22 dosahuje lepších hodnot než předchozí popisované zařízení TDC7200, ale žádné nedosahuje rozlišení při měření časového intervalu 10 pikosekund.

Tento Time to Digital Convertor pro měření časového intervalu využívá zpoždovací elementy a čítač. Pro měření jemného času s velkou přesností je použita zpoždovací linka. Hrubý čas je měřen pomocí čítače. Kombinací dvou metod toto zařízení dosáhne přesnosti v rozlišení až 22 pikosekund.

Při měření v prvním módu je možné měřit jednu, nebo dvě časové události stop. Měření více událostí stop je možné, protože zařízení obsahuje 2 stop kanály. Každý stop kanál měří „multihity“. „Multihit“ je několikanásobný stop zásah. Díky této skutečnosti lze měřit více časových intervalů od začátku události start. Tyto metody jsou využívány pro měření časů letu částic.

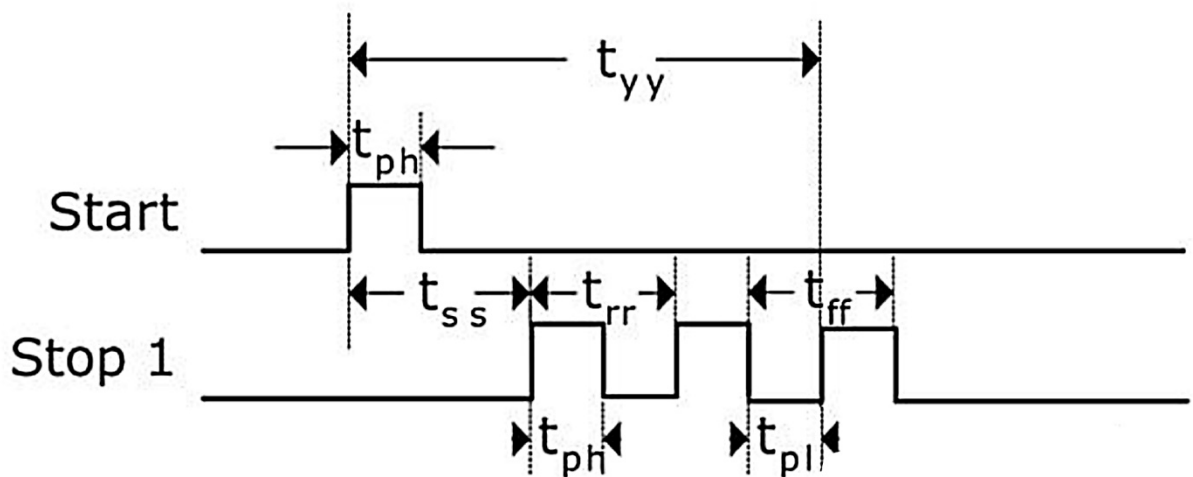
Pokud se bude měřit pouze s jedním stop kanálem, je dosaženo rozlišení 45 pikosekund. V případě měření režimu dvou stop kanálů je dosaženo rozlišení 90 pikosekund. První režim pracuje v dynamickém rozsahu od 3,5 nanosekund až do 2,5 mikrosekund. Na obrázku číslo 12 je znázorněno měření časového intervalu, kde jsou využity dva stop kanály a na každý kanál připadají 4 „multihity“.

Časové diagramy měření z datasheetů pro zařízení TDC-GP22, TDC-GPX a TDC-GPX2 obsahují proměnné popisující doby trvání dílčích částí měření. Nejdůležitější proměnnou je t_{ss} , která ohraničuje dobu od počátku měřící události start až po konec intervalu stop. Proměnná t_{ph} představuje dobu trvání vysoké úrovně pulzu a proměnná t_{pl} dobu trvání nízké úrovně. Doba trvání od náběžné hrany k následující náběžné hraně je označena t_{tr} a doba trvání od doběžné hrany k následující doběžné hraně je označena t_{ff} . Maximální rozsah měření představuje proměnná t_{yy} . Doba mezi stop událostí prvního stop kanálu a druhého stop kanálu je značena proměnnou t_{xx} .



Obr. 12 – TDC-GP22, 2 stop kanály [7]

Druhý měřicí mód dosahuje lepších výsledků s ohledem na přesnost měření. Rozlišení je 20 pikosekund. Tento mód využívá pouze jeden stop kanál. V čase události stop lze měřit ještě další tři měřicí stop pozice. Při měření jemného času jsou využívány zpožďovací linky a při měření hrubého času čítač. Tento režim měření má dynamický rozsah od 700 nanosekund do 4 milisekund.



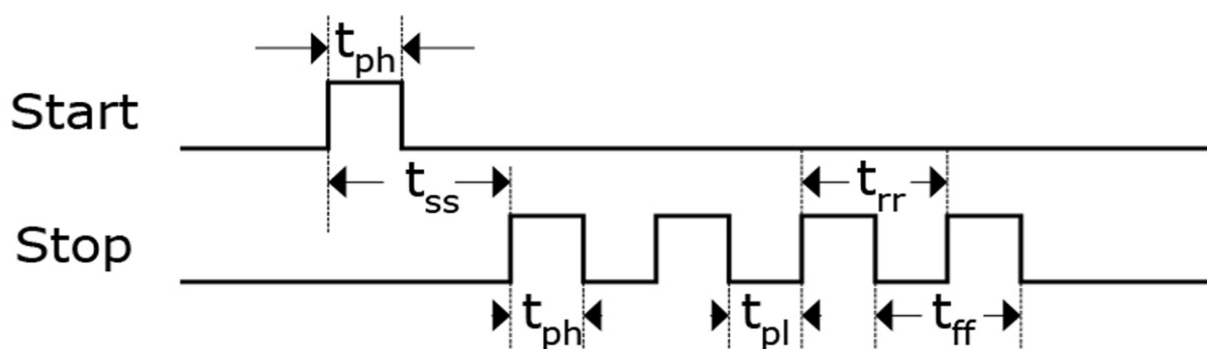
Obr. 13 – TDC-GP22, 1 stop kanál [7]

TDC-GP22 lze zakoupit za cenu okolo 7,5 dolarů [7].

4.3 TDC-GPX

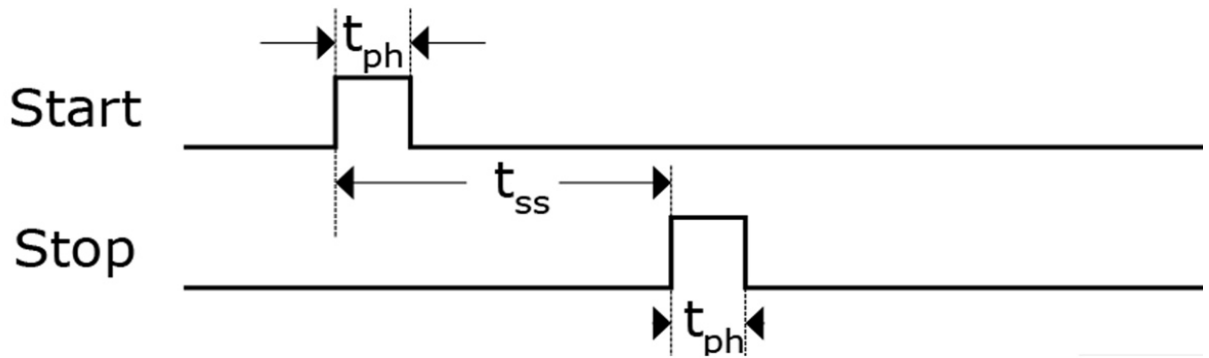
Dalším dostupným TDC zařízením je TDC-GPX od stejného výrobce jako zařízení TDC-GP22. Toto zařízení má osm kanálů a dosahuje rozlišení až 10 pikosekund.

TDC-GPX může pracovat v jednom ze čtyř měřících režimů. Hodnoty rozlišení a dynamických rozsahů konkrétních měřících režimů jsou znázorněny v tabulce číslo 1. Každý z těchto měřících módů je vhodný pro měření, kde jsou rozdílné požadavky na různé vlastnosti. V tomto zařízení lze nastavit, aby měření bylo citlivé na náběžnou nebo sestupnou hranu.



Obr. 14 - TDC-GPX - režim I [8]

Mód I, který má nejnižší rozlišení, je vhodný na měření více událostí stop. V tomto módu je měřeno pomocí osmi stop kanálů. V každém stop kanále po příchodu události stop je možné více „multihitů“. „Multihity“ se vyskytují v stop kanále a jsou znázorněny na obrázku 14. Velikost měřeného časového intervalu je označena proměnnou t_{ss} . Doba trvání vysoké úrovně je označena proměnnou t_{ph} a doba trvání nízké úrovně t_{pl} . Každý z těchto kanálů má rozlišení 81 pikosekund.



Obr. 15 - TDC-GPX - režim M [8]

Nejvhodnější režim měření s ohledem na rozlišení je mód M. Tento mód využívá pouze dva stop kanály a jeden stop hit. Na obrázku je pro ilustraci znázorněn start kanál a jeden stop kanál. Stop kanál obsahuje pouze jeden „hit“. Proměnné v obrázku jsou shodné jako u předchozího obrázku číslo 14, tedy doba měření časového intervalu a šířka pulzu. Mód M dosahuje rozlišení 10 pikosekund.

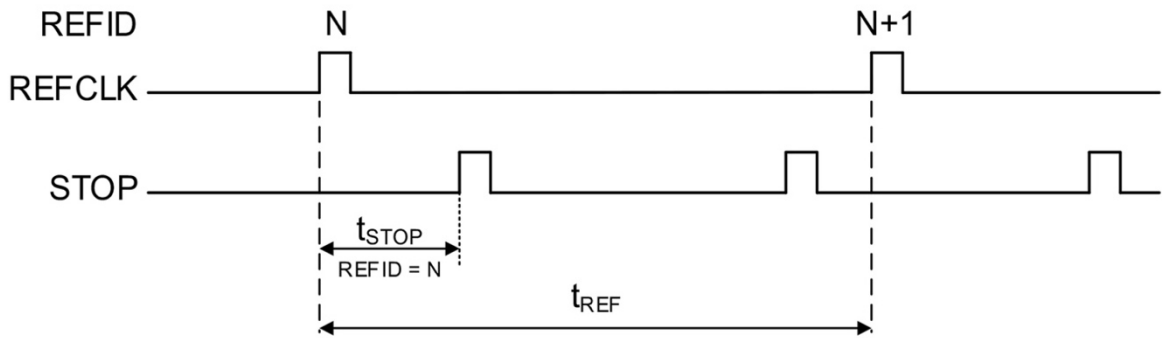
Toto zařízení lze zakoupit za cenu okolo 162 dolarů [8].

4.4 TDC-GPX2

Zařízení TDC-GPX2 využívá pro měření časového intervalu kombinace více měřících metod. Tato kombinace metod je jedna z nejčastějších realizací, protože dosahuje nejlepších měřících výsledků. Pro měření hrubého času měřeného intervalu je využíván čítač. Měření jemného času probíhá pomocí zpožďovacích linek.

Tento Time to Digital Converter má několik měřících režimů. Měření časového intervalu probíhá pomocí referenčního zdroje signálu. Tento zdroj může být periodický. Referenční pulsy jsou analogií k začátku měřící události start. Jakmile na stop kanálu vznikne událost stop, TDC zařízení zpracuje délku časového intervalu, kterou předá na výstup. Čip tohoto zařízení má čtyři vnitřní na sobě nezávislé stop kanály.

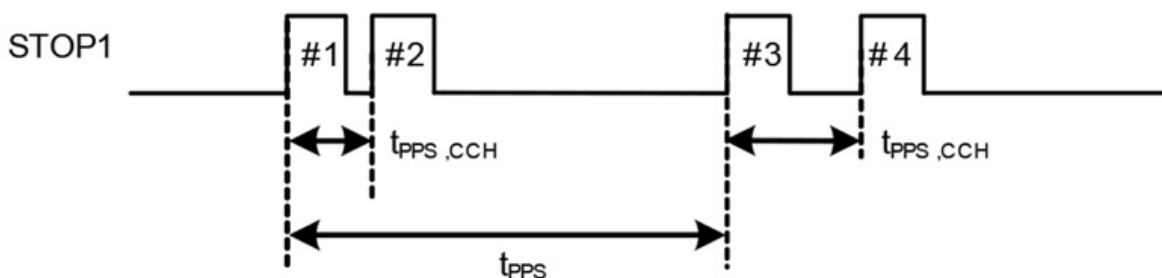
První měřicí režim je znázorněn na následujícím obrázku. Kde t_{REF} je perioda vnitřního měření časového intervalu. Proměnná t_{STOP} vyjadřuje měřený časový interval. REFID je index referenčních pulsů na vnitřním referenčním zdroji signálu REFCLK. Stop kanál je znázorněn proměnnou STOP.



Obr. 16 - TDC-GPX2 – měření časového intervalu [9]

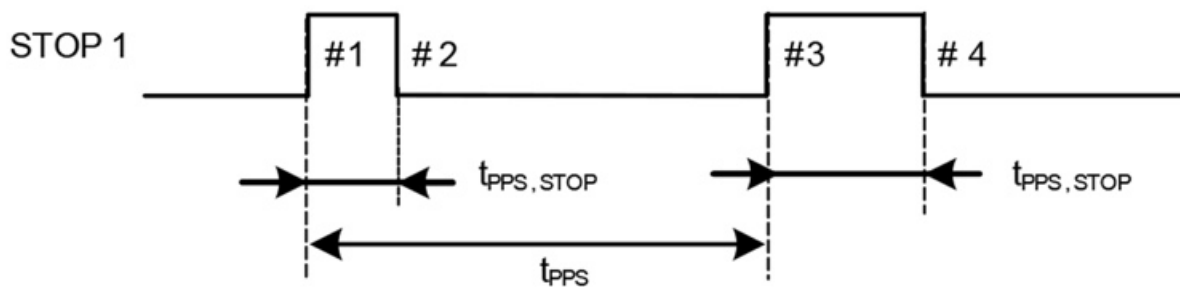
K lepším výsledkům měření je využíván druhý režim. V tomto nastavení je použita kombinace kanálů, a tak je vzdálenost mezi dvěma pulzy kratší než u předchozího nastavení.

Na obrázku je stop linka se dvěma dvojicemi pulzů, které vznikají kombinací kanálů. Proměnná $t_{PPS, CCH}$ je vzdálenost mezi pulzy jedné společné skupiny a proměnná t_{PPS} je vzdáleností prvních pulzů z kombinačních skupin.



Obr. 17 - TDC-GPX2 – kombinace stop kanálů [9]

Zařízení TDC-GPX2 má další měřicí režim, který je kombinací více stop kanálů do jednoho. Díky této kombinaci a vhodnému internímu nastavení zařízení lze změnit šířku pulsu. Tato varianta měření je znázorněna na obrázku číslo 18. Proměnné $t_{PPS, STOP}$ znázorňují šířku pulsu a proměnná t_{PPS} úsek mezi dvěma pulzy. Výrobce v datasheetu nepopisuje přesnou realizaci měření. Tyto měřicí metody a schémata průběhu měření časových intervalů jsou ilustrační a ukazují jaké možnosti dané zařízení má.



Obr. 18 - TDC-GPX2 – kombinace stop kanálů [9]

Výrobce udávané rozlišení zařízení je 10 pikosekund a měřicí dynamický rozsah od nuly do šestnácti sekund. Toto zařízení je velmi přesné a variabilní. Pořizovací cena se pohybuje okolo 50 dolarů [9].

4.5 THS788

THS788 vyrábí firma Texas Instruments. Je to jedno z nejlepších zařízení pro měření časového intervalu. Zařízení má čtyři kanály a při měření časových intervalů dosahuje rozlišení 13 pikosekund. Dynamický rozsah je od nuly do sedmi sekund. Měření časového intervalu probíhá na podobném principu jako u předchozích výrobků. Pro měření hrubého času je využíván vnitřní čítač a pro jemný čas princip zpoždovacích linek. Kanály zařízení lze různě programovat, proto má toto zařízení široké spektrum užití.

Zařízení je výkonové náročné a má spotřebu 675 miliwattů na jeden kanál, proto je konstrukčně uzpůsobené na externí pasivní chladič. Cena THS788 je přibližně 181 dolarů [10].

5 Využití TDC v praxi

TDC jsou využívána kvůli velké přesnosti měření časových intervalů. Dalším důležitým rozhodujícím parametrem je vícenásobné využití události stop. V experimentálních měřeních se aplikují TDC konvertory s vysokým počtem kanálů.

Time to digital convertory se nejčastěji využívají pro měření doby letu částic při fyzikálních experimentech v evropském výzkumném středisku v CERNU. Další využití je v různých průtokoměrech nebo pro modelování terénu.

Fyzikální experimenty v CERNu využívají právě TDC zařízení, které měří dobu letu částic. Pomocí změřené doby letu jsou počítány hmotnosti. V konstrukci, kam jsou vystřelovány zkoumané částice, je velké množství čidel, která jsou napojena na TDC zařízení. Jsou použity time to digital convertory s více kanály. Ovládání probíhá pomocí FPGA [11].

Dalším užitím TDC jsou systémy radarové detekce Lidar, které využívají schopnosti měření časových intervalů pro modelování terénu. Tyto senzory jsou využívány pro robotiku, armádu, automobilový průmysl nebo kosmické lety.

Lidar senzor funguje na principu vysílání paprsku do prostoru a jeho následného odražení zpět. V okamžiku začátku vysílání paprsku je spuštěno měření a na základě délky doby návratu paprsku je vypočtena vzdálenost od překážky. V tomto zařízení se pracuje s polem TDC zařízení, které má 31 kanálů. TDC konvertory mají přesnost v řádu desítek piko sekund, a proto je možné zpracovávat velké množství dat [12].

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnat různé metody měření časového intervalu pomocí TDC přístroje. Pomocí rešerše na trhu dostupných a běžně používaných TDC přístrojů byly zjištěny skutečné možnosti těchto metod pro měření časových událostí v praxi.

První kapitola je věnována obecnému seznámení s pojmem času a frekvence.

Následující kapitola je úvodem pro měření časového intervalu a obecným popisem TDC zařízení, která jsou využívána pro měření.

V kapitole měřících metod byly popsány využívané postupy pro měření časových intervalů. Jako první a základní metodou je měření časového intervalu pomocí čítače. Je to nejjednodušší metoda, která pracuje na jednoduchém principu, kdy při každé náběžné nebo doběžné hraně od počáteční události start zvýší hodnotu hradla o jednotku. Čítání probíhá po celou dobu měření, až do události stop. Celkový časový interval měření je součinem hodnoty čítače s dobou jedné periody zdroje hodinového signálu.

Noniová metoda využívá více generátorů zdroje signálu a více čítačů. Realizace může mít různé druhy provedení jako například dvojí noniová metoda, klasické měření pomocí reversibilního čítače nebo pomocí zpožďovacích obvodů.

Analogová interpolační metoda měření využívá nabíjení kondenzátorů stálým proudem a jejich následným vybíjením pro další měření.

Poslední a v praxi nejvyužívanější metodou je měření pomocí různých zpožďovacích elementů, kde je přesně známo časové zpoždění průchodu signálů jednotlivými elementy zpožďovací linky.

Pro dosažení co nejlepšího rozlišení změřeného časového intervalu se musí samostatné měření rozdělit na dvě složky. Měření hrubého času a měření jemného času.

V následující kapitole byla hodnocena běžně dostupná TDC zařízení za účelem zjištění reálného použití různých metod v praxi. Rešerší datasheetů od výrobců byly shrnuty jejich

parametry a popsány metody měření časových intervalů. Někteří výrobci se charakteristikou měření časového intervalu nevěnují příliš v detailu. Z dostupných informací v datasheetech bylo zjištěno, že klíčovou metodou pro měření s co nejvyšším rozlišením jsou zpoždovací linky. Zpoždovací linky pro měření jemného času jsou nejčastěji vytvořeny pomocí kruhového oscilátoru, nebo hradel. Pro měření hrubého času je nejčastěji použito měření pomocí čítače.

Dalším důležitým prvkem TDC zařízení je počet kanálů. Díky většímu počtu kanálů je možné měřit více událostí stop od počáteční události start. Dle informací od výrobců bylo zjištěno, že měřené rozlišení se mění s přibývajícím počtem kanálů. TDC zařízení mívají několik měřících režimů, a tak je vždy na uživateli, jaké parametry jsou pro něj klíčové.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Ďaďo, S. Syntéza měřících přístrojů: Vybrané metody digitalizace a zpracování signálů. ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01102-X
- [2] Haasz, Vladimír. Elektrická měření: přístroje a metody. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7
- [3] Michal, Stanislav. Hodiny: Od gnómu k atomovým hodinám. 2., přeprac. a doplň. vyd. Praha: SNTL, 1987. 269 s.
- [4] Jian Song, Qi An, a Shubin Liu. A High-Resolution Time-to-Digital Converter Implemented in Field-Programmable-Gate-Arrays. IEEE Transactions on Nuclear Science, 27. březen 2006. Online ISSN 1558-1578
- [5] Nicola Lusardi, Angelo Geraci, 8-Channels High-Resolution TDC in FPGA. IEEE. Listopad 2015.
- [6] Texas Instruments, “ Interleaved Short Time Measurements Using TDC7200 ” TDC7200 datasheet, Leden. 2016. Dostupné: <http://www.ti.com/lit/gpn/tdc7200>
- [7] Ams, “ TDC-GP22 Universal 2-Channel Time-to-Digital Converters Dedicated to Ultrasonic Heat & Water Meters ” TDC-GP22 datasheet, Březen 2014. Dostupné: <http://ams.com/eng/content/download/728865/1861672/381515>
- [8] Ams, “ TDC-GPX Ultra-high Performance 8 Channel Time-to-Digital Converter ” TDC-GPX datasheet, Leden 2007. Dostupné: <http://ams.com/eng/content/download/728830/1861532/381479>
- [9] Ams, “ TDC-GPX2 4-Channel Time-to-Digital Converter ” TDC-GPX2 datasheet, Říjen. 2016. Dostupné: <http://ams.com/eng/content/download/951531/2270299/381482>

- [10] Texas Instruments, “ THS788 Quad-Channel Time Measurement Unit (TMU) ” THS788 datasheet, Březen. 2010 [Revize březen 2015]. Dostupné: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/th788.pdf>
- [11] ALICE COLLABORATION, et al. Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC. *International journal of modern physics A*, 2014.
- [12] Chen, Chih-Yuan, et al. A 52 ps resolution ILO-based time-to-digital converter array for LIDAR sensors. In: *Circuits and Systems Conference (DCAS), 2016 IEEE Dallas*. IEEE, 2016. p. 1-4

Seznam obrázků

Obr. 1 - Blokové schéma čítače v režimu měření frekvence	12
Obr. 2 - Blokové schéma čítače v režimu měření časového intervalu.....	13
Obr. 3 - Schéma kvantování, kvantizační chyba [1].....	15
Obr. 4 - Schéma obvodu pro číslicové měření pomocí čítače	17
Obr. 5 - Schéma měření pomocí noniové metody s hlavním a reversibilním generátorem [2]	20
Obr. 6 - Schéma zapojení při měření časového intervalu pomocí zpoždovacích smyček [2]..	22
Obr. 7 - Schéma zapojení při měření časového intervalu pomocí interpolační metody	23
Obr. 8 - Schéma zapojení zpoždovací linky [6]	25
Obr. 9 – Časový diagram měření hrubého a jemného času [5].....	26
Obr. 10 – TDC7200 - časový diagram měření intervalu kruhovým oscilátorem [6].....	29
Obr. 11 – TDC7200 - časový diagram měření intervalu kombinací kruhového oscilátoru a čítače [6].....	30
Obr. 12 – TDC-GP22, 2 stop kanály [7].....	32
Obr. 13 – TDC-GP22, 1 stop kanál [7].....	32
Obr. 14 - TDC-GPX - režim I [8]	33
Obr. 15 - TDC-GPX - režim M [8].....	34
Obr. 16 - TDC-GPX2 – měření časového intervalu [9].....	35
Obr. 17 - TDC-GPX2 – kombinace stop kanálů [9]	35
Obr. 18 - TDC-GPX2 – kombinace stop kanálů [9]	36

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Základní parametry dostupných TDC zařízení	28
---	----