

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přenos dat mezi asynchronními číslicovými systémy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej ŠTOK**
Osobní číslo: **E08B0418P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Přenos dat mezi asynchronními číslicovými systémy**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Popište možné vzájemné vztahy dvou číslicových elektronických systémů z pohledu taktovacího signálu.
2. Definujte pojem metastabilita klopného obvodu, vysvětlete příčinu vzniku a hrozbu přinášející číslicovému elektronickému systému.
3. Najděte a popište metody vhodné pro vzájemnou synchronizaci dvou asynchronních číslicových systémů.
4. Zhodnoňte nalezené metody z pohledu spolehlivosti, datové propustnosti a hardwarové náročnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- 1. Pinker, J.; Poupa, M.: Číslicové elektronické systémy a jazyk VHDL**
- 2. Elektronické informační zdroje**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michael Holík**
Katedra kybernetiky
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michael Holík**
Katedra kybernetiky

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Bakalářská práce podává přehled o možnostech přenosu dat mezi asynchronními číslicovými systémy a popisuje problematiku s tím související. Bakalářská práce je rozdělena do 4 kapitol. V první kapitole je vysvětlen pojem časovací doména. Dále jsou v ní popsány vzájemné vztahy mezi dvěma časovacími doménami. V následující kapitole je analyzován pojem metastability klopného obvodu a jeho význam pro číslicový systém. Třetí kapitola se zabývá nebezpečím při přenosu dat mezi asynchronními systémy. Dále popisuje často používané synchronizační techniky. V poslední kapitole jsou synchronizační techniky srovnány z hlediska hardwarové náročnosti, použitelnosti a datové propustnosti. Cílem bakalářské práce je nalezení a porovnání synchronizačních technik užívaných při spojování asynchronních číslicových systémů.

Klíčová slova

Hodinový signál, klopný obvod, metastabilní stav, synchronizace

Abstract

The Bachelor Thesis is focused on the data transfer between two asynchronous digital systems and on the description of problems associated with it. The Bachelor Thesis is divided into 4 chapters. In the first chapter the concept of the clock domain is explained. Next, there are described possible mutual relations between the two clock domains. In the following chapter the concept of the metastability of the flip-flop circuit is analyzed. Meaning and cause of the occurrence of the metastability in the digital system is also described. The third chapter deals with potential threats present during the data transfer between asynchronous systems. Next, there are described common techniques often used for system synchronization. In the last chapter the synchronization techniques are compared in terms of the hardware complexity, usability and data throughput. The Bachelor Thesis objective is to find and compare the synchronization techniques based on described problems with connecting asynchronous digital systems.

Key words

Clock signal, flip-flop circuit, metastability, synchronization

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 4.6.2012

Ondřej Štok

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michaelu Holíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 VZÁJEMNÉ VZTAHY DVOU ČÍSLICOVÝCH SYSTÉMŮ Z POHLEDU TAKTOVACÍHO SIGNÁLU	11
1.1 ČASOVACÍ DOMÉNY	11
1.2 VZTAHY MEZI ČASOVACÍMI DOMÉNAMI	11
1.2.1 Křížení se stejnou frekvencí hodinového signálu a nulově posunutou fází	11
1.2.2 Křížení se stejnou frekvencí hodinového signálu a konstantním fázovým posuvem	12
1.2.3 Křížení s různými frekvencemi hodinových signálů	13
1.2.4 Asynchronní	16
2 METASTABILNÍ STAV	17
2.1 POPIS METASTABILNÍHO STAVU	17
2.2 MÍSTA VZNIKU METASTABILNÍHO STAVU	17
2.3 VZNIK METASTABILNÍHO STAVU	18
2.4 PRŮMĚRNÝ ČAS MEZI CHYBAMI	19
2.5 DOPADY METASTABILNÍHO STAVU NA ČÍSLICOVÝ SYSTÉM	21
2.6 OMEZENÍ VÝSKYTU METASTABILITY	22
3 SYNCHRONIZACE	25
3.1 PŘENOS MEZI SYSTÉMY	25
3.1.1 <i>Metastabilní stav</i>	25
3.1.2 <i>Ztráta dat</i>	25
3.1.3 <i>Nesouvislá data</i>	27
3.2 FIFO	29
3.2.1 <i>Asynchronní FIFO – vnitřní struktura</i>	29
3.2.2 <i>Princip funkce</i>	30
3.3 HAND-SHAKE (KORESPONDENČNÍ PROVOZ)	32
3.3.1 <i>Vnitřní struktura</i>	32
3.3.2 <i>Princip funkce</i>	33
4 ZHODNOCENÍ	34
ZÁVĚR	35
SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ:	36
POUŽITÁ LITERATURA	37

Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na popis problematiky spolehlivého přenosu dat mezi dvěma asynchronními číslicovými systémy a na možné způsoby jejich synchronizace.

Motivací pro výběr tohoto tématu bakalářské práce byly následující důvody. V dnešní době je přenosu dat mezi vzájemně asynchronními systémy hojně využíváno a křížení hodinových domén je velmi běžné. Při takovémto přenosu dat může docházet k mnoha problémům. Problémy mohou vyústit v dodání chybných dat, v přivedení celého systému do neznámého stavu a v krajním případě i v poškození, či zničení celého číslicového systému. Z tohoto důvodu vyplívá nutnost nalezení vhodných způsobů, jak bezpečně přenášet data z jednoho systému do druhého.

V první kapitole je nejdříve definován pojem časovací domény a jejich křížení. Následně se kapitola věnuje možným vzájemným vztahům při křížení dvou časovacích domén. U jednotlivých křížení jsou popsány problémy, které se u nich mohou vyskytnout. Pro daná křížení jsou dále vybrány vhodné synchronizační metody.

Ve druhé kapitole je detailně rozebrán metastabilní stav. Je zde vysvětleno, co metastabilní stav znamená pro klopný obvod a jeho vznik. Následně je popsán průměrný čas mezi chybami, jež definuje dobu mezi výskytem dvou metastabilních stavů a je zde uveden výpočet pravděpodobnosti jeho výskytu. Na konci kapitoly jsou vyjmenovány možné dopady výskytu metastabilního stavu na číslicový systém a je zde uveden způsob omezení jeho výskytu.

Třetí kapitola se zabývá hlavními problémy vystávajících při přenosu dat mezi dvěma časovacími doménami a jejich řešením. Hlavními problémy jsou zejména výskyt metastabilního stavu, ztráta dat a nesouvislá data. Poté jsou popsány synchronizační systémy FIFO a Hand-Shake. Je zde vysvětleno z jakých částí se skládají a na jakém principu pracují.

V poslední kapitole jsou všechny synchronizační systémy porovnány z hlediska hardwarové náročnosti, propustnosti dat a jejich použitelnosti.

Cílem této bakalářské práce je nalezení a porovnání synchronizačních systémů z hlediska problémů vznikajících při přenosu mezi dvěma různými časovacími doménami.

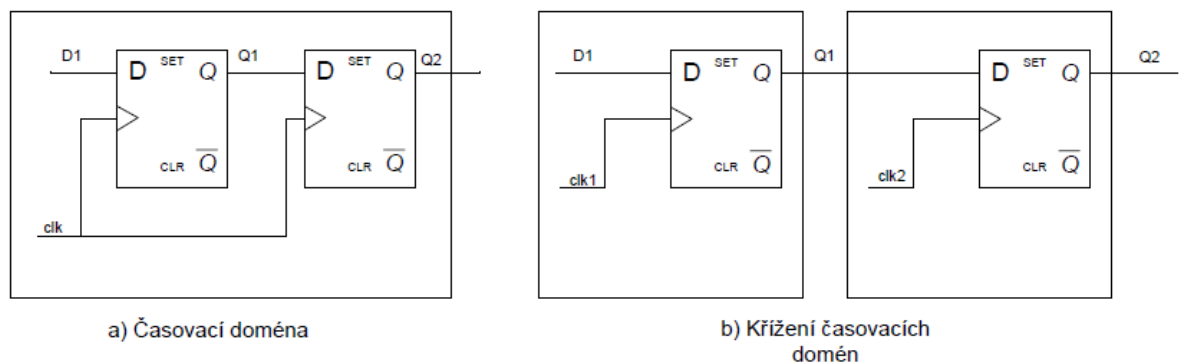
Seznam symbolů

<i>ACK</i>	[].....	Potvrzení o přijmuté žádosti o nová data (Acknowledge)
<i>DV</i>	[].....	Potvrzení o vyslání nových dat (Data Valid)
<i>EF</i>	[].....	Prázdné FIFO (Empty FIFO)
<i>EN</i>	[].....	Inicializace multiplexorů (Enable)
f_{clk}	[Hz].....	Frekvence hodinového signálu
f_{in}	[Hz].....	Frekvence vstupních dat
<i>FF</i>	[].....	Plné FIFO (Full FIFO)
<i>FIFO</i>	[].....	Bezadresová paměť (First In First Out)
<i>MSB</i>	[].....	Bit s nejvyšší hodnotou (Most Significant Bit)
<i>MTBF</i>	[s].....	Průměrný čas mezi chybami (Mean Time Between Failures)
n	[bit].....	Počet bitů
<i>RQ</i>	[].....	Informace o úspěšném čtení dat (Request)
<i>SD</i>	[].....	Žádost o nová data (Send Data)
t_h	[s].....	Doba přesahu
t_{su}	[s].....	Doba předstihu
t_x	[s].....	Průměrná doba trvání metastabilního stavu
T	[ns ⁻¹]	Konstanta
T_o	[s].....	Konstanta

1 Vzájemné vztahy dvou číslicových systémů z pohledu taktovacího signálu

1.1 Časovací domény

Číslicový systém je tvořen jednou časovací doménou tehdy, je-li k jeho synchronizaci použit pouze jeden hodinový signál. Přenosem dat mezi různými číslicovými systémy pracujícími na různých frekvencích, na stejné frekvenci s různými fázemi nebo mezi časovacími doménami v jednom systému dochází ke křížení časovacích domén, jak je vidět na obr. č. 1. I když jsou data v jedné doméně synchronní s příslušným hodinovým signálem, na vstupu následující domény jsou tytéž data brána jako asynchronní. To sebou přináší řadu obtíží při přenosu dat mezi jednotlivými systémy pracujícími v různých časovacích doménách. Je tedy nutné data vycházející z domény před vstupem do následující upravit (synchronizovat) pro bezpečný a spolehlivý přenos.

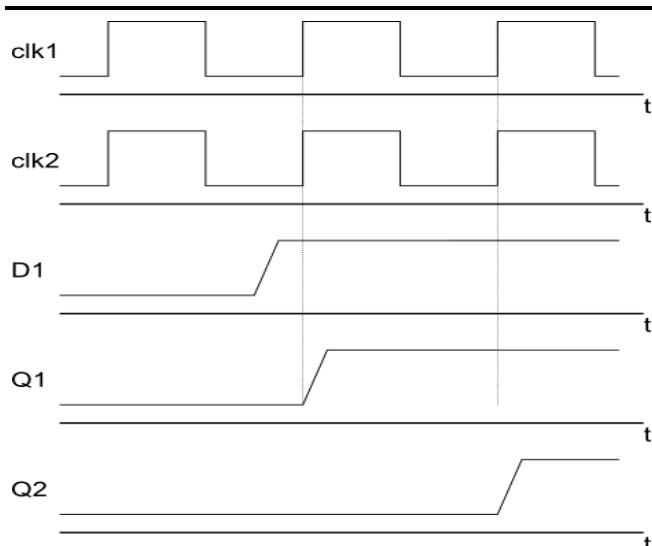


Obr. č. 1 Časovací domény

1.2 Vztahy mezi časovacími doménami

1.2.1 Křížení se stejnou frekvencí hodinového signálu a nulově posunutou fází

Jak je ukázáno na obr. č. 2, jelikož se jedná o jednu frekvenci a není zde žádný fázový posun, tak se v tomto případě vlastně nejedná o křížení časovacích domén. Jedná se o případ jedné časovací domény. Jsou-li dodrženy doby předstihu a přesahu v okolí aktivní hrany hodinového signálu, nebude v tomto případě docházet k metastabilně, ztrátě dat ani nesouvislosti dat [1].

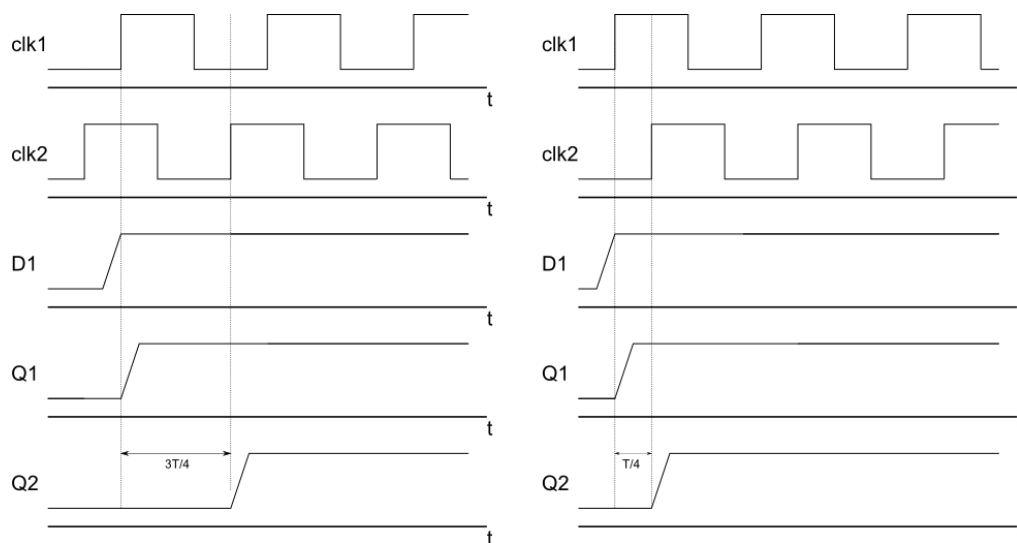


Obr. č. 2 Křížení časovacích domén se stejnou frekvencí a nulově posunutou fází[1]

1.2.2 Křížení se stejnou frekvencí hodinového signálu a konstantním fázovým posuvem

V případě z obr. č. 3 mají hodinové signály obou domén stejnou frekvenci, ale mají mezi sebou konstantní fázový posun. Typickým příkladem je vzájemné posunutí o $\frac{1}{2}$ periody. Jsou tedy vůči sobě invertovány. Dalším příkladem může být případ, kdy vysílací doména předbíhá cílovou doménu o $\frac{3}{4}$ periody.

Je-li kombinační zpoždění takové, že při přenosu dat nejsou porušeny časy předstihu a přesahu u cílové domény není opět potřebné žádné speciální synchronizační řešení. Musí být zaručeno, aby data zůstala neměnná v okolí aktivní hrany hodinového signálu [1].



Obr. č. 3 Křížení časovacích domén se stejnou frekvencí a konstantně posunutou fází [1]

1.2.3 Křížení s různými frekvencemi hodinových signálů

Toto křížení časovacích domén se vyznačuje vzájemně různými frekvencemi a hlavně proměnným fázovým posunem. Fázový posun je vzdálenost mezi aktivními hranami hodinových signálů a vzniká rozdílnou délkou period těchto signálů. To znamená, že vzdálenost aktivních hran hodinového signálu není v čase stálá, ale proměnná.

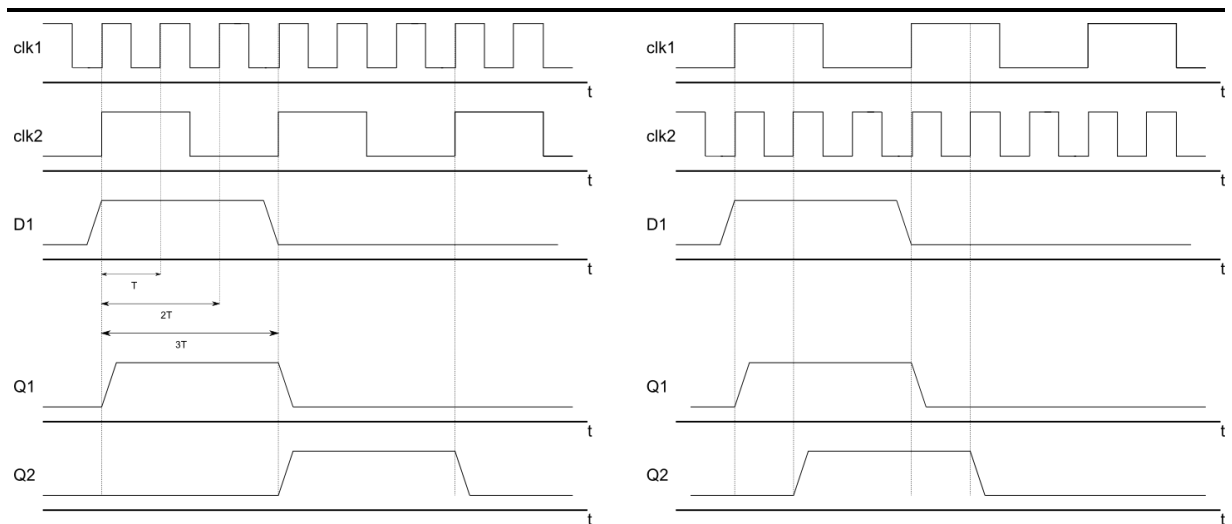
Takovýto vztah hodinových signálů lze dále rozdělit na dvě kategorie. První kategorií je, když perioda jednoho hodinového signálu je celočíselným násobkem druhého. Druhou kategorií je pak případ, kdy násobek není celočíselný, ale reálný.

1.2.3.1 Druhá frekvence hodinového signálu je celočíselným násobkem první

V tomto případě je jeden hodinový signál celým násobkem signálu druhého. Fázový posun signálů je proměnný. V případě, že oba signály vycházejí ze stejného zdroje, je minimální fáze mezi aktivními hranami signálů rovna jedné periodě rychlejšího signálu. V případě tohoto křížení záleží, zda jsou data přenášena z domény s rychlejším hodinovým signálem do domény s pomalejším, nebo naopak. Na obr. 4 je vidět příklad, kdy je jeden ze signálů trojnásobkem druhého.

Při přenosu z domény s pomalejším hodinovým signálem do domény s rychlejším je pro navzorkování dat dostupná minimálně jedna perioda cílového hodinového signálu. Nedochozí tak k metastabilně, ani ke ztrátě dat. V tomto případě tak není nutná žádná synchronizace.

V druhém případě, kdy přenášíme z domény rychlejším hodinovým signálem do domény s pomalejším, hrozí ztráta dat. Je nutné zajistit neměnná data minimálně po dobu jedné periody cílového hodinového signálu. To lze zajistit pomocí stavového automatu. V příkladu z obr. 4 by to znamenalo, že nová data by se generovala každé 3 periody rychlejšího hodinového signálu [1].

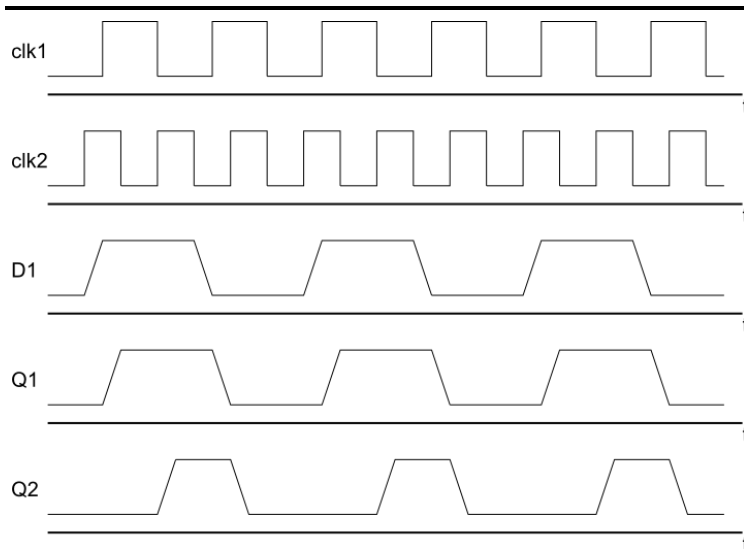


Obr. č. 4 Křížení časovacích domén kdy jedna frekvence je celočíselným násobkem druhé [1]

1.2.3.2 Druhá frekvence hodinového signálu je reálným násobkem první

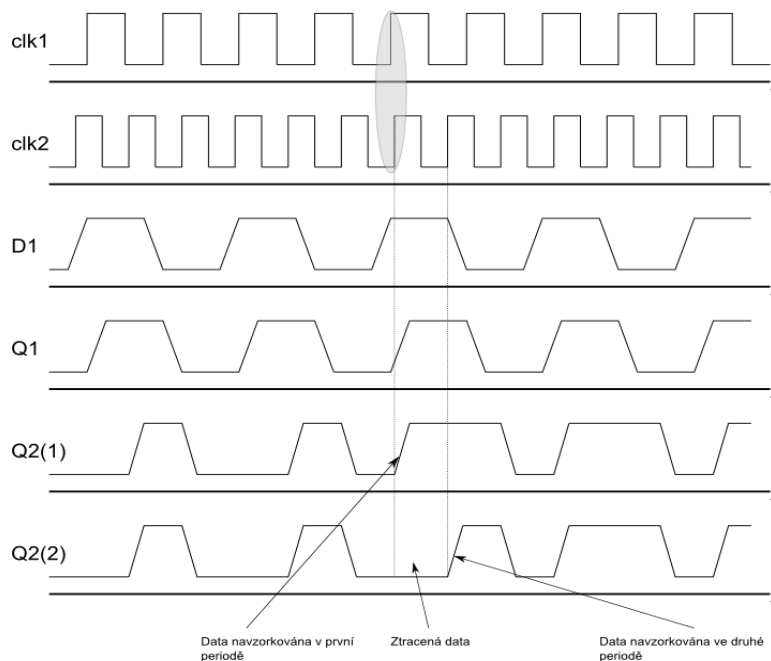
Zde je vztah mezi frekvencemi hodinových signálů takový, že jeden ze signálů je reálným násobkem toho druhého. Fázový posun mezi nimi je jako v případě celého násobku proměnný, ale na rozdíl od předchozího případu zde může být fázový posun mezi signály natolik malý, že hrozí vznik metastability. V případě reálného násobku mohou nastat tři případy.

V prvním případě je násobek takový, že aktivní hrany obou signálů se k sobě nedostanou natolik blízko, aby hrozil vznik metastabilního stavu. Takový případ ukazuje obr. č. 5. Neměla by se však na rozhraní přidávat další kombinační logika, protože i malé zpoždění navíc by již mohlo narušit doby přesahu a předstihu a způsobit metastabilitu. Pokud je toto dodrženo, nebude u tohoto křížení v případě přenosu z domény s pomalejším hodinovým signálem do domény s rychlejším docházet ke ztrátě dat a není tedy potřeba další synchronizace. V opačném případě je opět nutné zajistit neměnnost dat minimálně po jednu periodu pomalejšího signálu.



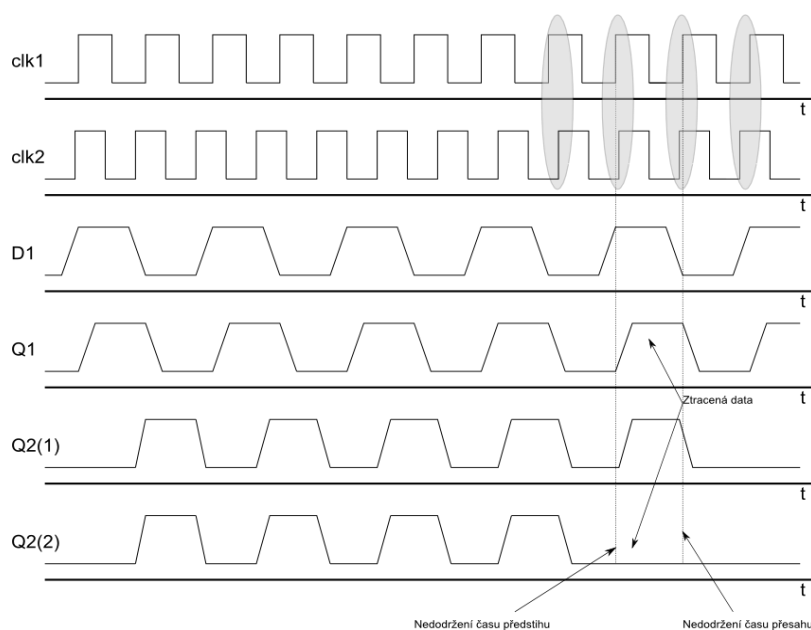
Obr. č. 5 Křížení časovacích domén s dostatečným fázovým posunem [1]

Ve druhém případě se mohou aktivní hrany hodinových signálů chvilkově přiblížit natolik, aby mohl vzniknout metastabilní stav. Hrany budou takto blízko pouze po jednu periodu, v následujících periodách jsou opět hrany dostatečně daleko od sebe pro správné navzorkování dat cílovou doménou. Příklad takového křížení je na obr. č. 6. Při přenosu z pomalejší domény do domény s rychlejším hodinovým signálem by tak opět nemělo dojít ke ztrátě dat. To na obrázku ukazuje výstup Q2(1). Může se, ale vyskytnout metastabilní stav a způsobit správné navzorkování až s další periodou cílového hodinového signálu, jak je vidět na výstupu Q2(2). To v případě více datových signálů může vyústit v nesouvislá data. Při opačném přenosu je opět nezbytné zajistit neměnná data po dostatečně dlouho dobu.



Obr. č. 6 Křížení časovacích domén s chvilkovým nedostatečným fázovým posunem [1]

Poslední je případ, kdy je fázová vzdálenost hodinových signálů dostatečně malá pro vznik metastability po několik period po sobě. Tento případ ukázaný na obr. č. 7 je velmi podobný asynchronnímu křížení, až na to že fázové vzdálenosti obou signálů jsou známi a budou se pravidelně opakovat. Hrozí tak ztráta dat a pro více signálů nesouvislost dat. Na obr. č. 7 ukazuje výstup Q2(1) případ kdy ke ztrátě dat nedošlo a výstup Q2(2) případ kdy vlivem metastabilního stavu došlo ke ztrátě dat. Ztrátě dat lze zabránit zajištěním neměnných dat alespoň po dvě periody hodinové signálu cílové domény. Toto platí pro oba směry přenosu [1].



Obr. č. 7 Křížení časovacích domén s dlouhodobě nedostatečným fázovým posunem [1]

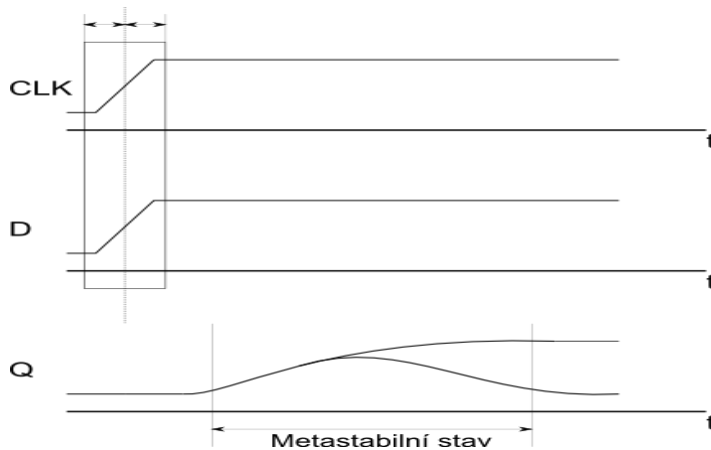
1.2.4 Asynchronní

Jedná se o křížení, při kterém je vztah mezi hodinovými signály neznámý. Fázový posun nelze předvídat a není možné jednoduše přenášet data mezi doménami, aniž by hrozil výskyt metastabilního stavu vlivem špatně načasovaného vzorkování na straně příjemce dat [1]. Kvůli možnosti ztráty dat nebo jejich nesouvislosti je u takového křížení vždy nutné provést synchronizaci datových signálů. Jsou-li frekvence hodinových signálů známy, stačí pro zabránění vzniku metastabilního stavu zaručení stálosti dat alespoň po dvě periody hodinového signálu cílové domény.

2 Metastabilní stav

2.1 Popis metastabilního stavu

Jedná se o stav na výstupu klopného obvodu. Tento stav je způsoben vnitřními vlastnostmi obvodu. Dochází k němu u klopných obvodů při nedodržení správného časování během vzorkování. Tedy pokud se vstupní data mění v době předstihu a přesahu. Metastabilní stav na výstupu obvodu znamená, že místo aby výstupní signál nabyl jeden ze dvou stabilních stavů (logických úrovní), zůstane po neurčité době v nestabilním stavu, který neodpovídá ani jedné logické hodnotě [2]. Vlivem vnitřního šumu, vnitřní nesymetrie a vnějšího rušení se obvod nakonec překloupí do jednoho ze dvou stabilních stavů. Bohužel nelze přesně předpovědět dobu, za kterou se takto překloupí, ani ve kterém ze dvou stavů se ustálí. Ukázka průběhu metastabilního stavu je na obr. č. 8.

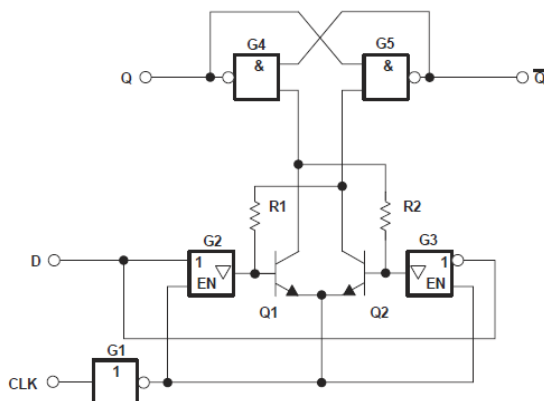


Obr. č. 8 Ukázka průběhu metastabilního stavu

2.2 Místa vzniku metastabilního stavu

Jak již bylo napsáno výše metastabilita se objeví v případě nedodržení správného časování vstupního signálu. K tomu dochází, pokud je vstupní signál asynchronní. Dalším případem, kdy se může metastabilní stav objevit je při křížení dvou číslicových systémů pracujících na rozdílných frekvencích nebo na stejné frekvenci s rozdílnými fázemi. Metastabilita se může také objevit, pokud je zpoždění datového signálu takové, že se vstupní signál mění v kritické době, tedy že se nestihl včas ustálit. Další možnou příčinou vzniku je špatná kvalita hodinového signálu (příliš dlouhá doba náběhu, doběhu překračující toleranční hodnoty, špatná střída...) [3].

2.3 Vznik metastabilního stavu

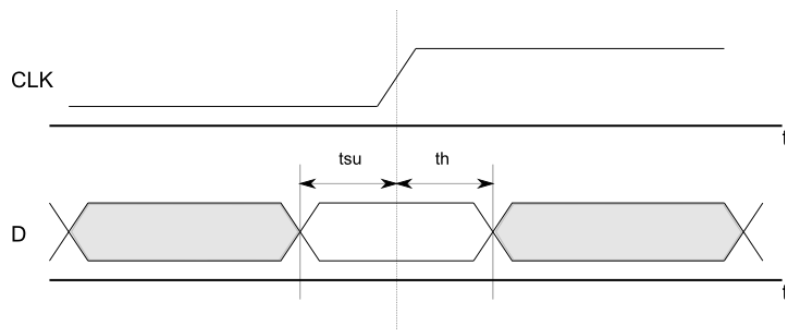


Obr. č. 9 Bipolární obvod typu D řízený hranou [4]

Příklad vzniku metastabilního stavu bude uveden na 5V bipolárním obvodu typu D.

Obr. č. 9 zobrazuje vnitřní zapojení bipolárního obvodu řízeného hranou typu D. Výstup obvodu je řízen stavem dvou tranzistorů Q1 a Q2 při náběžné hraně hodinového signálu CLK. Díky vstupu D je vždy na jedné bázi tranzistorů vysoká úroveň napětí a na druhém nízká úroveň. Pokud je na hodinovém signálu nízká úroveň, jsou emitory tranzistorů ve vysoké úrovni a tudíž vypnuté. Při kladné hraně CLK jde napětí na emitorech z vysoké úrovně do nízké. Tranzistor s vyšším napětím na bázi se otevře, zatímco druhý tranzistor zůstane zavřený. Obvod zůstává v tomto stabilním stavu díky zpětnovazebním rezistorům R1 a R2. Zároveň s tím nastaví slave obvod, složený z bran G4 a G5 výstupy Q.

Obvod může takto pracovat, jen pokud jsou dodrženy časy předstihu t_{su} (setup time) a přesahu t_h (hold time). To je vidět na obr. č. 10. Kde čas t_{su} je jistá minimální doba před hranou hodinového signálu a čas t_h je jistá minimální doba po jeho hraně. To znamená, že vstupní signál D se nesmí měnit určitou dobu před a za kladnou hranou signálu CLK.

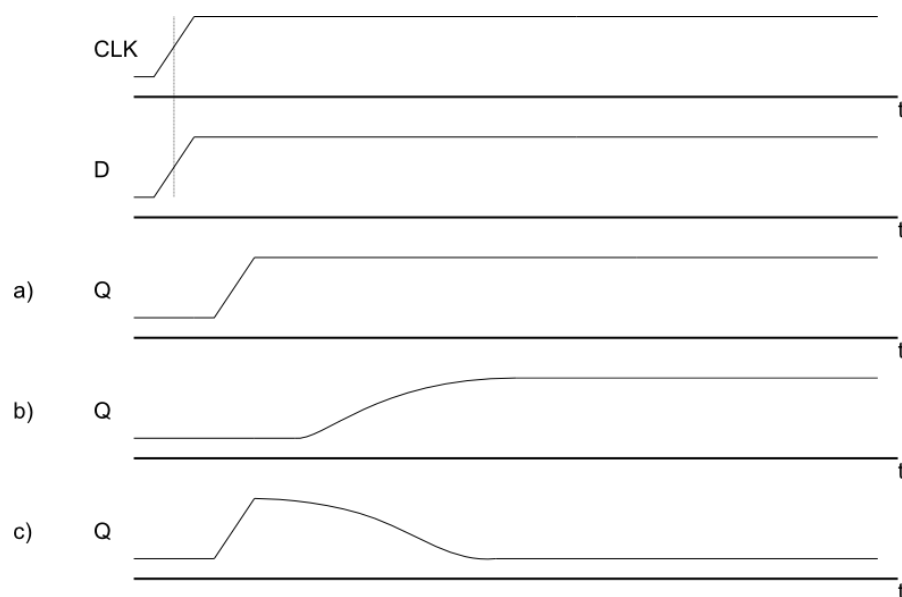


Obr. č. 10 Doby předstihu a přesahu [4]

Synchronní systémy mohou snadno tyto časy dodržet. Problém nastává u synchronních systémů. Pokud se například vstup D mění z nízké úrovně do vysoké, napětí

na výstupu brány G2 půjde z nízké úrovně napětí do vysoké, zároveň na bráně G3 proběhne opačný proces a ve stejnou dobu nastane náběžná hrana CLK. Pokud toto nastane v době kdy je rozdíl mezi bázemi tranzistorů Q1 a Q2 roven virtuální nule nebude řídicí obvod schopen dosáhnout stabilního, definovaného stavu. Logická úroveň není ani vysoká ani nízká. Toto se nazývá metastabilní stav. Důsledkem tohoto není na řízeném klopném obvodu žádný definovaný stav.

Výstup obvodu reaguje na výskyt metastabilního stavu nepředvídatelně, jak je ukázáno na obr. č. 11. Křivka a) představuje standardní průběh výstupního signálu bez výskytu metastability. V případě křivky b) obvod slave nerozeznal vznik metastabilního stavu na řídicím obvodu. Až když se řídicí obvod dostane z nestabilního stavu, slave zareaguje a na výstupu se to projeví jako velmi pomalá hrana signálu. V praxi to znamená vznik značného zpoždění. Křivka c) ukazuje, že metastabilní stav řídicího obvodu nejdříve vyvolal na výstupu obvodu slave vysokou úroveň. Překlopením řídicího obvodu do stabilního stavu se na výstupu objeví nízká úroveň opět se značným zpožděním [4].



Obr. č. 11 Reakce výstupu na metastabilní stav [4]

Metastabilitu nelze nikdy úplně odstranit. Jediné co lze v otázce výskytu metastabilního stavu udělat, je omezit jeho výskyt.

2.4 Průměrný čas mezi chybami

Velmi důležitým údajem v otázce metastability je čas mezi výskytem metastabilních stavů, který je označován jako průměrný čas mezi chybami MTBF (Mean Time Between failures). Při určování MTBF je nutno vzít do úvahy několik různých parametrů daného

obvodu.

V číslicových systémech s asynchronními vstupními daty, která jsou synchronizována hodinovým signálem, je MTBF definován vztahem:

$$MTBF = \frac{\exp(T * t_x)}{f_{in} * f_{clk} * T_o} \quad (1)$$

Kde f_{in} je frekvence vstupního signálu, f_{clk} je frekvence hodinového signálu a t_x je průměrná doba od hrany hodinového signálu a vzniku metastabilního stavu do výskytu stabilního stavu na výstupu. Konstanty T a T_o popisují metastabilitu pro různé typy obvodů. Příklady těchto konstant pro různé typy bipolárních klopných obvodů zobrazuje tab. č. 1.

Konstanta T je odvozena z pokusných měření. Výsledky těchto měření jsou ukázány na obr. č. 12. Tato konstanta představuje sklon křivek na tomto obrázku. Při určování T se musí brát v potaz, že osa pro MTBF je na obrázku logaritmická. Vzorec pro tuto konstantu pak je:

$$T = \frac{\ln MTBF(2) - \ln MTBF(1)}{t_x(2) - t_x(1)} \quad (2)$$

Konstanta T_o se vypočte ze vzorce pro MTBF a představuje nejhorší možný případ pro výskyt metastability. Takový případ nastane, když se vstupní data mění při každé náběžné hraně hodinového signálu. Vstupní frekvence je tedy ve fázi s hodinovým signálem, ale je proti němu poloviční. Vzorec pro MTBF (1) pak vypadá následovně:

$$MTBF = \frac{\exp(T * t_x)}{0,5 * f_{clk}^2 * T_o} \quad (3)$$

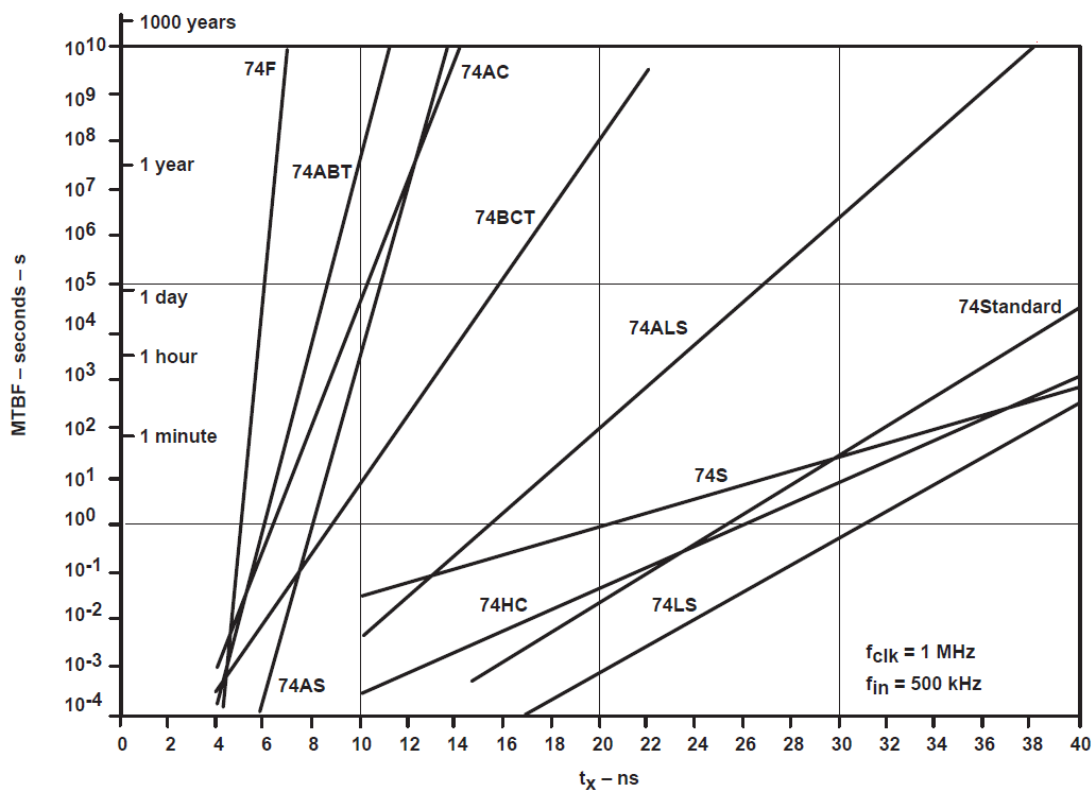
A konstanta T_o se z tohoto (3) vzorce vypočítá jednoduchou úpravou takto:

$$T_o = \frac{2 * \exp(T * t_x)}{f_{clk}^2 * MTBF} \quad (4)$$

Pomocí takto získaných hodnot lze získat dobu MTBF pro obvod pracující na různých frekvencích hodinového signálu a s různou frekvencí vstupních dat.

Je požadováno, aby doba MTBF byla co největší. Ze vzorce vyplývá, že tato doba úměrně klesá se zvyšující se frekvencí vstupních dat a s frekvencí hodinového signálu. Negativně také působí konstanta T_o . Naopak konstanta T , jež se nachází v čitateli, ovlivňuje výslednou dobu velmi kladně z technologického hlediska.

Z pokusných měření času MTBF vyplynulo, že klopné obvody s rychlými dynamickými vlastnostmi (rychlé klopné obvody) stráví v metastabilním stavu kratší dobu (kratší doba t_x). Mají tedy lepší hodnoty konstant T a T_o . Z toho plyne, že jejich doba MTBF je delší [4].



Obr. č. 12 Ukázka charakteristik výskytu a trvání metastabilního stavu pro různé typy bipolárních klopných obvodů [4]

Typ	T (ns^{-1})	T_o (s)
Std-TTL	0,74	$2,9 * 10^{-4}$
LS	0,74	$4,8 * 10^{-3}$
S	0,36	$1,3 * 10^{-9}$
ALS	1,0	$8,7 * 10^{-6}$
AS	4,0	$1,4 * 10^3$
F	9,2	$1,9 * 10^8$
BCT	1,51	$1,14 * 10^{-6}$
ABT	3,61	$33 * 10^{-3}$
HC	0,55	$1,46 * 10^{-6}$
AC	2,8	$1,1 * 10^{-4}$

Tab. č. 1 Ukázka konstant T a T_o pro různé typy bipolárních klopných obvodů [4]

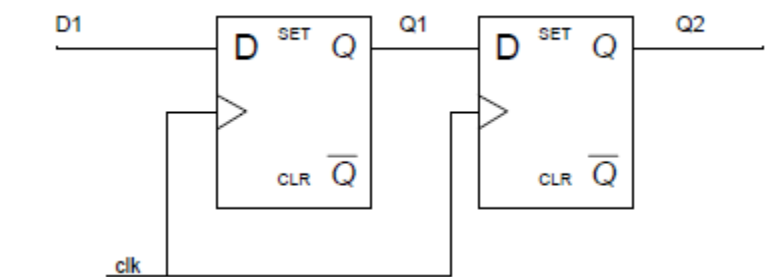
2.5 Dopady metastabilního stavu na číslicový systém

Metastabilita může na obvod působit různým způsobem. Metastabilita se projevuje pomalým průběhem na výstupu a tedy trvá dlouho, než se obvod přepoklopí do stabilního stavu. Výskyt metastability tedy vede k problémům s časováním. Dalším problémem, jenž

metastabilní stav způsobuje, je možné překlopení obvodu do nesprávného stavu. Protože při výskytu metastabilního stavu neplatí Boolovy zákony. Mohou výstupy následujících připojených obvodů nabýt libovolné hodnoty a celý číslicový systém může být přiveden do neznámého stavu. Ovšem metastabilita je pro číslicový systém nebezpečná i proto, že její výskyt může vést až k jeho zničení. Pokud jsou nestabilní data posílána do dalších částí obvodu, může dojít ke zvýšení proudového odběru systému vedoucího až k jeho přetížení a zničení [1].

2.6 Omezení výskytu metastability

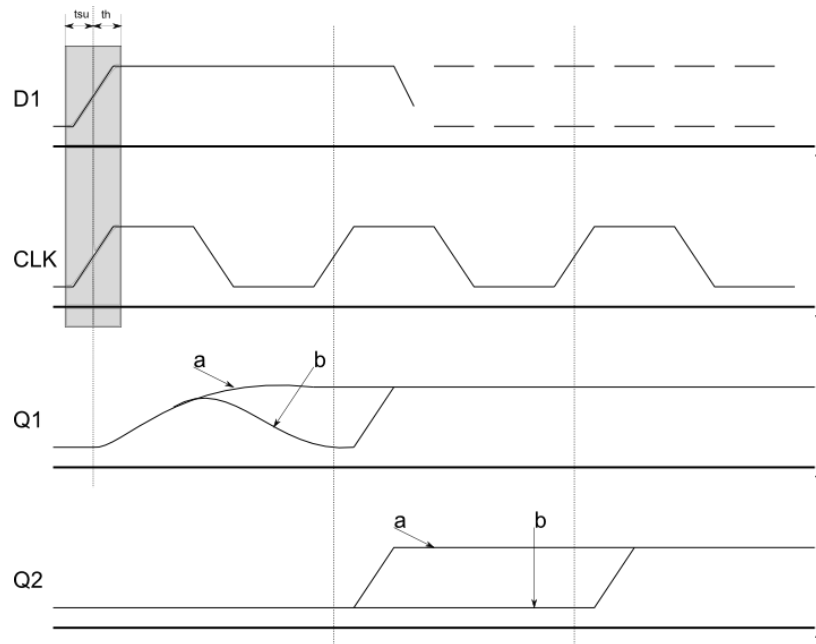
Jak bylo řečeno výše, výskyt metastabilního stavu je ovlivněn několika faktory. Těmi jsou frekvence vstupních dat, frekvence hodinového signálu a použitý typ klopného obvodu. Platí, že čím nižší jsou frekvence tím je pravděpodobnost výskytu metastability nižší. Frekvence jsou většinou pevně dané. Lze tedy dosáhnout jistého zlepšení změnou typu klopného obvodu za typ s lepšími vlastnostmi. Pokud nelze typ obvodu z nějakého důvodu změnit. Musí se přistoupit k obvodovému řešení.



Obr. č. 13 Dvoustupňový vzorkovač [5]

Dvoustupňový vzorkovač z obr. č. 13 je velmi účinným způsobem jak omezit výskyt metastabilního stavu. Jedná se o posuvný registr, sestavený ze dvou klopných obvodů typu D. Průběhy na vzorkovači ukazuje obr. č. 14. Celý princip spočívá v tom, že pokud se objeví na výstupu prvního D-členu metastabilní stav, tak druhý vzorkuje tento výstup až s dalším taktem hodinového signálu. V této době tedy má první obvod čas dostat se z metastabilního stavu. Podmínkou, aby obvod takto pracoval, je trvání metastabilního stavu kratší dobu, než je perioda hodinového signálu. Pro co nejrychlejší zotavení obvodu z metastabilního stavu nesmí být první člen zatížen. Bude-li po návratu prvního D-členu do stabilního stavu na výstupu chybná úroveň, tak bude opravena s dalším impulzem hodinového signálu. To ale za

předpokladu, že stavy na vstupu obvodu budou trvat beze změny déle než jednu periodu hodinového signálu. Tedy frekvence hodinového (vzorkovacího) signálu bude proti frekvenci vstupního signálu minimálně dvojnásobná. To odpovídá Shannonovu vzorkovacímu teorému.



Obr. č. 14 Průběhy na vzorkovači [5]

Takovéto zpoždění v obvodu nemusí vadit, pokud máme jen jeden jednobitový signál. U skupiny více signálů se vzájemnou vazbou (např. osmibitové číslo), by chyby způsobené zpožděním vedli k možnému chybnému vyhodnocení výsledků. Je tedy nutno zavést řídicí signály [5].

Jednoduchým příkladem lze ukázat, jak takovéto zapojení ovlivní výskyt metastabilního stavu. Například pokud jsou použity dva klopné obvody typu SN74ALS74. Frekvence vstupních dat je $f_{in} = 10 \text{ MHz}$, frekvence hodinového signálu je $f_{clk} = 25 \text{ MHz}$ a doba předstihu $t_{su} = 15 \text{ ns}$.

Doba t_x se spočte následovně:

$$t_x = \frac{1}{f_{clk}} - t_{su} = \frac{1}{25 \cdot 10^6} - 15 \cdot 10^{-9} = 25 \cdot 10^{-9} \quad (5)$$

Doba MTBF pro pouze jeden klopný obvod SN74ALS74 je:

$$MTBF = \frac{\exp(T \cdot t_x)}{f_{in} \cdot f_{clk} \cdot T_o} = \frac{\exp(1 \cdot 10^9 \cdot 25 \cdot 10^{-9})}{10 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 8,7 \cdot 10^{-6}} = 33105,7 \text{ s} = 9,19 \text{ hod} \quad (6)$$

Druhý klopný obvod vzorkuje výstup prvního při periodě hodinového signálu a může přejít do metastabilního stavu pouze, pokud jsou jeho podmínky pro vznik metastability také nedodrženy. To znamená, že na výstupu prvního klopného obvodu je stále ještě metastabilní

stav v době příchodu hrany hodinového signálu. Kritická vstupní frekvence druhého klopného obvodu pak spočítána z MTBF prvního klopného obvodu jako:

$$f_{in(2)} = \frac{1}{MTBF(1)} = \frac{1}{33105,7} = 30,2 * 10^{-6} \text{ Hz} \quad (7)$$

Výsledný MTBF dvoustupňového vzorkovače je pak dán:

$$MTBF = \frac{\exp(T * t_x)}{f_{in(2)} * f_{clk} * T_o} = \frac{\exp(1 * 10^9 * 25 * 10^{-9})}{30,2 * 10^{-6} * 25 * 10^6 * 8,7 * 10^{-6}} \cong 1,09621526 * 10^{13} \text{ s} \cong 347607,6 \text{ let} \quad (8)$$

Z výsledků je jasně patrné snížení výskytu metastabilního stavu při použití dvoustupňového vzorkovače [4].

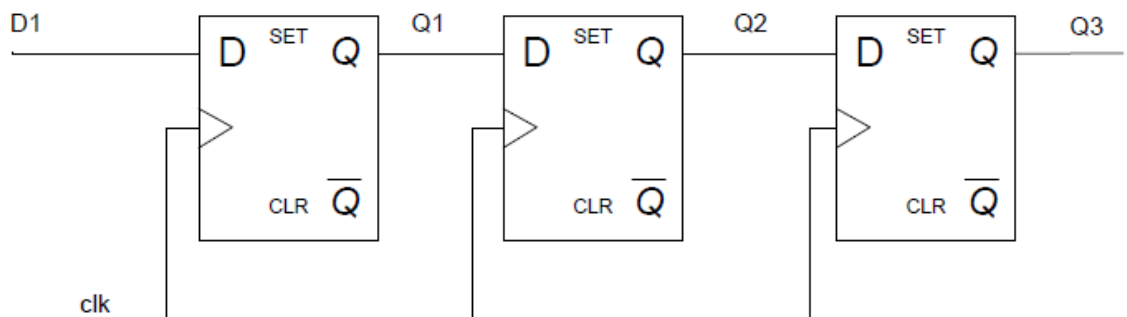
V některých případech ale nemusí dvoustupňový vzorkovač stačit a hodnota MTBF je stále příliš nízká. Například při vysokých frekvencích vstupních dat a hodinového signálu. Pak je možné jej rozšířit o další stupně a ještě vylepšit hodnotu MTBF. Takové rozšíření je zobrazeno na obr. č. 15. Následuje výpočet pro třístupňový vzorkovač s využitím již spočtených hodnot.

Z předchozího případu je opět nejdříve spočítána kritická frekvence třetího klopného obvodu:

$$f_{in(3)} = \frac{1}{MTBF(2)} = \frac{1}{1,09621526 * 10^{13}} = 9,122295926 * 10^{-14} \text{ Hz} \quad (9)$$

MTBF třístupňového vzorkovače je následně spočten jako:

$$MTBF = \frac{\exp(T * t_x)}{f_{in(3)} * f_{clk} * T_o} = \frac{\exp(1 * 10^9 * 25 * 10^{-9})}{9,122295926 * 10^{-14} * 25 * 10^6 * 8,7 * 10^{-6}} \cong 3,629097445 * 10^{21} \text{ s} \cong 1,150779251 * 10^{14} \text{ let} \quad (10)$$



Obr. č. 15 Třístupňový vzorkovač

3 Synchronizace

3.1 Přenos mezi systémy

Cílem přenosu dat mezi číslicovými systémy je přenést tyto data bez poškození. To ale není ve všech případech snadné. Při přenosu dat mezi systémy s různými časovými doménami může dojít ke třem problémům. Výskyt metastabilního stavu. Ztráta dat, kdy při přenosu dojde k trvalé ztrátě dat. Výskyt nesouvislých dat, To znamená, že se na určitou dobu na výstupu objeví chybná data.

3.1.1 Metastabilní stav

K metastabilnímu stavu může dojít, pokud vstupní data nejsou stabilní blízko aktivní hrany hodinového signálu. Metastabilita se tedy vyskytne, jsou-li aktivní hrany vysílací domény a přijímací domény příliš blízko u sebe. Při výskytu metastabilního stavu se na výstupu objeví nestandardní průběh výstupního signálu, který neodpovídá žádné logické úrovni. Signál má pak často charakter velkého zpoždění s nepředvídatelnou délkou trvání. Metastabilní stav může při svém výskytu vyřadit z provozu celý číslicový systém. Vlivem dlouhé doby výskytu se může šířit do dalších částí systému, pokud je navzorkován. Více o metastabilně, o jejím vzniku, důsledcích a způsobech jejího omezení v předcházející části této práce [1].

3.1.2 Ztráta dat

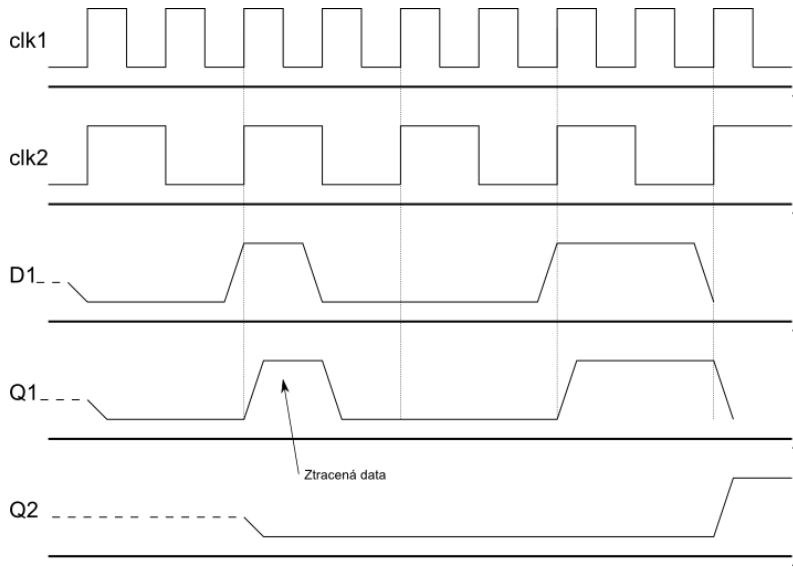
Ke ztrátě dat dochází, pokud nejsou data navzorkována cílovou doménou. K tomu může dojít při výskytu metastabilního stavu. Nebo nejsou-li data na výstupu domény, která je generuje, držena beze změny po dostatečně dlouhou dobu. Data, jež jsou generovány vysílací doménou, se nesmí měnit po tak dlouhou dobu, aby alespoň u jedné aktivní hrany hodinového signálu v cílové doméně byly dodrženy doby předstihu a přesahu. Tato hrana pak může data úspěšně navzorkovat.

Vyskytne-li se metastabilní stav a data byla na výstupu vysílací domény držena po dostatečně dlouhou dobu, budou tato data navzorkována cílovou doménou s další aktivní hranou jejího hodinového signálu.

Nejsou-li však data držena po takovou dobu, aby i v případě výskytu metastabilního stavu byla úspěšně navzorkována, dochází k jejich ztrátě v cílové doméně.

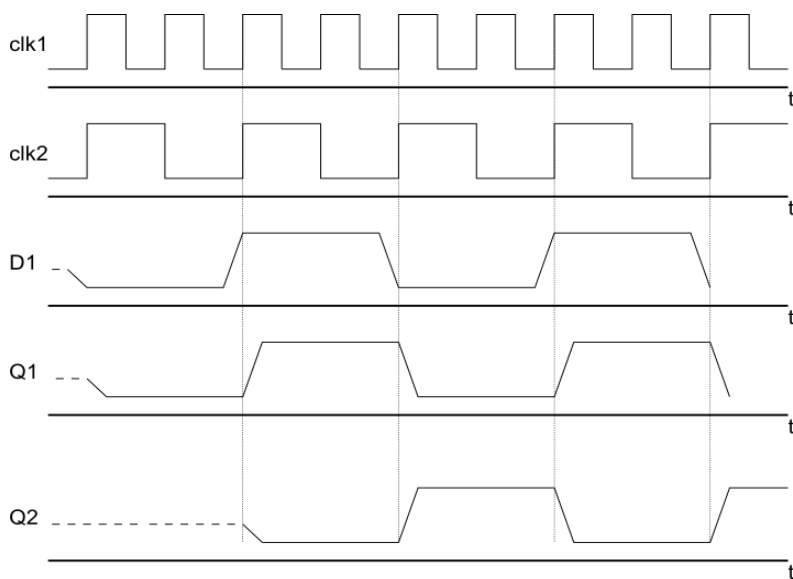
Například pokud je frekvence hodinového signálu vysílací domény dvojnásobná a bez fázového posunu oproti frekvenci cílové domény. Jsou-li vysílací doménou generována data

„00110011“. Ty budou v cílové doméně všechna zdárně navzorkována. Dojde-li ke změně a generují se data „00100011“. „Jednička“ uprostřed není držena vysílací doménou dostatečně dlouhou dobu pro její zachycení v cílové doméně. Dojde tak k její ztrátě, jak je vidět na obr. č. 16.



Obr. č. 16 Přenos se ztrátou dat [1]

Přenos beze ztráty dat je na obr. č. 17. K zabránění ztráty dat lze použít stavového automatu, jež umožní generovat data pouze takovým tempem, aby byla k dispozici vždy alespoň jedna perioda cílového signálu pro navzorkování dat. To lze použít v případě synchronního křížení, kdy známe frekvence obou hodinových signálů. Také je možné při přenosu použít metody FIFO nebo Hand-Shake k synchronizaci [1].

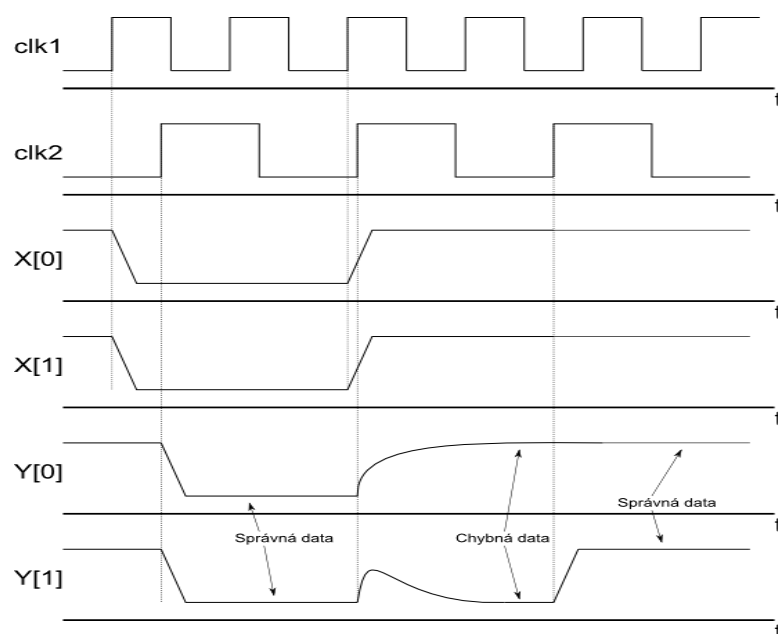


Obr. č. 17 Přenos bez ztráty dat [1]

3.1.3 Nesouvislá data

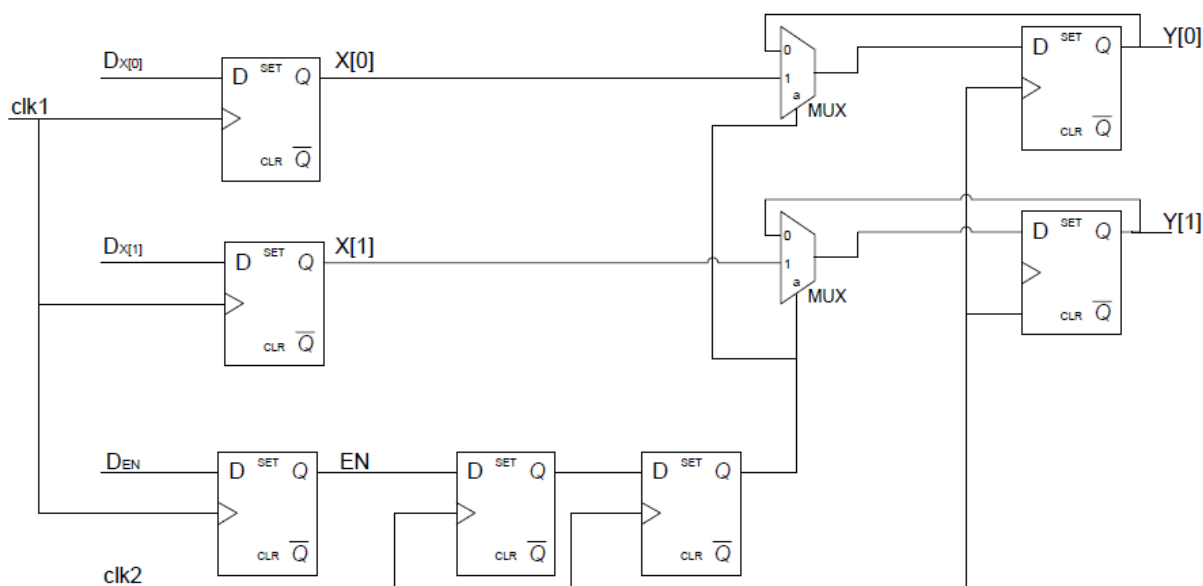
Při přenosu dat z vysílací domény, je může cílová doména navzorkovat se zpožděním jeden, nebo i více period svého hodinového signálu. Důležité je, v jakém okamžiku se data objevila na vstupu cílové domény a zda se vyskytl metastabilní stav. Toto zpoždění nepředstavuje problémem, pokud je přenášen pouze jediný signál nebo více signálů, které mezi sebou nemají žádnou souvislost. Problém nastává při přenosu více signálů s vzájemnou souvislostí, a pokud se mění více signálů současně. Například datové signály z výstupu binárního čítače. V takovém případě jsou-li jednotlivé signály na vstupu cílové domény vzorkovány každý zvlášť, může dojít vlivem výše popsaného zpoždění k výskytu chybných mezistavových hodnot na dobu několika period hodinového signálu cílové domény. I když by se nakonec na vstupu objevila správná hodnota, tak tyto mezistavy mohou přivést systém do neznámého stavu.

Například na obr. č. 18 jsou výstupem z vysílací domény dva signály, jež nabývají hodnot $X[0,1]$ „00“ a „11“. Pokud při přechodu z „11“ do „00“ přijdou data z vysílací domény včas před aktivní hranou hodinového signálu přijímací domény. Jsou obě hodnoty navzorkovány stejnou hranou hodinového signálu. Data se tedy změní současně. Na výstupu $Y[0,1]$ se objeví „00“ a k žádnému mezistavu nedojde. Mění-li se ale data příliš blízko aktivní hrany hodinového signálu přijímací domény, pak se na vstupu přijímací domény vyskytne metastabilní stav. Ustálí-li se jeden, nebo oba ze signálů na chybné hodnotě. Na vstupu se po dobu jedné periody může objevit mezistav „10“ nebo „01“, ale i původní hodnota „00“. Ten může být dále chybně zpracován systémem.



Obr. č. 18 Přenos s nesouvislými daty [1]

Jak vyplývá z výše uvedeného textu, je potřeba zajistit aby byla data na vstupu cílové domény správně vzorkována stejnou hranou hodinového impulzu. Mění se tedy najednou ze staré hodnoty do nové. To lze zajistit zavedením nového signálu (EN) z vysílací domény, který je převeden do cílové domény pomocí dvoustupňového vzorkovače. Tento signál následně řídí průchod datových bitů pomocí multiplexorů. Tímto způsobem se synchronizují všechny bity najednou a ne každý zvlášť. Tento synchronizační obvod je ukázán na obr. č. 19. Je ale třeba zajistit, aby se data neměnila v době, kdy je signál EN aktivní. Je také možné použít k přenosu FIFO nebo Hand-Shake.



Obr. č. 19 Synchronizace pomocí multiplexorů se zpětnou vazbou [1]

Další možností jak zajistit přenos více bitů bez vzniku mezistavů je navrhnout systém tak, aby se měnil v jednu dobu, pouze jeden bit. To znamená, že zatímco se mění jeden bit, ostatní zůstávají beze změny. Systém, tak i v případě výskytu metastability, nabude buď novou hodnotu, nebo zůstane stará hodnota zachována. Nemůže tak dojít ke vzniku mezistavu. Příkladem je, pokud systém využívá k přenosu dat Greyova kódu [1]. Tab. č. 2 ukazuje binární a Grayův kód pro 3bity.

Desítková soustava	Binární kód	Grayův kód
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Tab. č. 2 Ukázka binárního a Grayova kódu pro 3 bity [6]

Vzorce pro převod z binárního kódu na Grayův kód jsou následující [6]:

$$g_2 = b_2, \quad g_1 = b_1 \oplus b_2, \quad g_0 = b_0 \oplus b_1 \quad (11)$$

Vzorce pro opačný převod vypadají takto [6]:

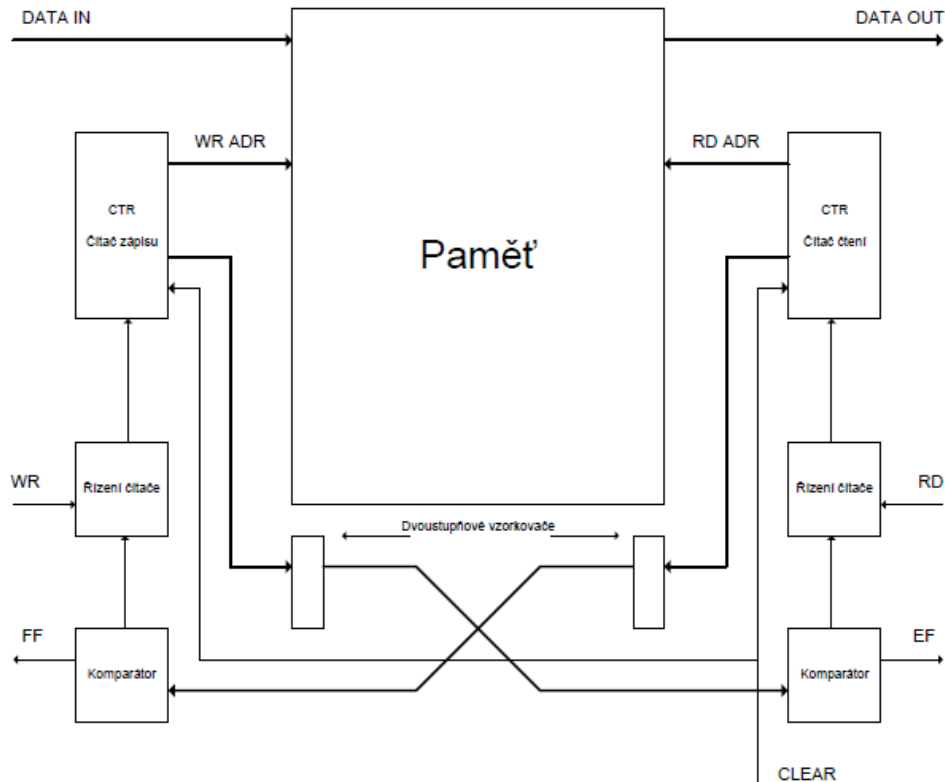
$$b_2 = g_2, \quad b_1 = g_1 \oplus g_2, \quad b_0 = g_0 \oplus g_1 \oplus g_2 \quad (12)$$

3.2 FIFO

FIFO je synchronizační systém pro přenos vícebitových dat. Používá se pro bezchybný přenos mezi synchronními a asynchronními časovacími doménami. Zabraňuje, jak ztrátě dat, tak výskytu nesouvislých dat. Pro účely synchronizace se používá asynchronní FIFO.

3.2.1 Asynchronní FIFO – vnitřní struktura

Asynchronní FIFO se skládá z několika částí. Hlavní částí je dvoubranová paměť. Následují dva čítače čítající v Grayově kódu. Jeden čítač je synchronní s vysílací doménou. Určuje místo v paměti pro zápis. Druhý čítač je naopak synchronní s cílovou doménou a určuje místo odkud mají být data vybrána. Další jsou obvody pro řízení zápisu a výběru z paměti. Asynchronní FIFO vyžaduje pro správnou funkci minimálně dva řídicí signály. To jsou signály FF a EF. Signál FF signalizuje úplné zaplnění paměti. EF signál opačně signalizuje prázdnou paměť bez dat. Pro synchronizaci při přenosu mezi řídicími obvody jsou použity dvoustupňové vzorkovače [5]. Princip paměti FIFO je ukázán na obr. č. 20.



Obr. č. 20 FIFO [5]

3.2.2 Princip funkce

Samotná funkce paměti FIFO je jednoduchá. Výstup čítače na straně zápisu ukazuje na místo v paměti, do kterého se budou zapisovat data. Po jejich zápisu se čítač inkrementuje a ukazuje na místo následující. Obdobně čítač na straně čtení ukazuje na místo v paměti, ze kterého se teprve bude číst. Po přečtení dat se čítač také inkrementuje. Důležité je také zdůraznit, že po dosažení posledního místa v paměti se zapisuje a čte opět od začátku.

Protože se ale jedná o asynchronní FIFO, pracují oba čítače v různých časovacích doménách s různou frekvencí hodinových signálů. Jeden čítač se tak inkrementuje rychleji než druhý. Podle toho, který čítač inkrementuje rychleji, může dojít ke dvěma situacím. Pokud je rychlejší čítač na straně zápisu. Paměť se postupně zaplní a zapisovací čítač nakonec dožene čtecí čítač. V opačném případě by čtecí čítač dohonil zapisovací. Bez ošetření těchto stavů by čítače čítaly dál. V prvním případě by došlo přepsání ještě nepřečtených dat. V druhém případě by došlo k opakovanému čtení již jednou přečtených dat. Oba tyto případy mohou přivést číslicový systém do neznámého stavu. Tyto stavy jsou nežádoucí a je nutné je ošetřit. K tomu slouží řídicí signály EF (Empty FIFO) pro případ kdy čtecí čítač dohoní zapisovací a FF (Full FIFO) pro případ opačný.

Pro zpracování těchto signálů je nutné přenést výstupy z obou čítačů do opačné

časovací domény. Výstup ze zapisovacího čítače je přenášen do cílové domény a výstup z čtecího je přenášen opačně. Oba tyto přenosy je nutné synchronizovat. Pro usnadnění synchronizace jsou namísto binárních čítačů použity čítače v Grayově kódu. U nich se při inkrementaci mění pouze jeden bit. Rozdíly mezi Grayovým a binárním kódem jsou ukázány v tab. č. 1. K samotné synchronizaci pak postačí dvojstupňové vzorkovače. Pro určení místa v paměti je ale nutný binární kód. Čítače jsou tak moduly obsahující jak samostatný inkrementační prvek, tak logiku pro převod binárního kódu na Grayův a dvojici registrů. Jeden pro binární výstup a druhý pro výstup v Grayově kódu.

K určení stavů EF a FF je nutné porovnat hodnoty čítačů. Rovnají-li se hodnoty obou čítačů, tak nastal jeden z těchto stavů. Zde ale nastane problém. I když se obě hodnoty rovnají, není jisté, o který stav se jedná. Řešením je rozšíření čítačů ještě o jeden bit. Bylo by možné použít dva čítače namísto jednoho. Jeden by měl n bitů a druhý pro adresování o $n - 1$ bitech. Efektivnější je mít pouze jeden čítač o n bitech a výsledek pak konvertovat na n a $n - 1$ bitů. Opět je ale nutné vyřešit problém. V tab. č. 1 j vidět, že bity v druhé polovině tabulky jsou od druhého MSB bitu níže zrcadlovým obrazem bitů v první polovině. Pro čítač o $n - 1$ bitech je nutné, aby nižší byty nebyli zrcadlovým obrazem. Tyto bity musí být naopak stejné jako nižší bity v první polovině jak ukazuje tab. č. 3. Řešením je invertování druhého MSB bitu v dolní polovině tabulky. Takový $n - 1$ bitový kód s přidaným jedním bitem již není skutečným Grayovým kódem. Nyní již je možné bezpečně rozlišit stavy EF a FF.

Upravený Grayův kód
000
001
011
010
100
101
111
110

Tab. č. 3 Upravený Grayův kód pro 3 bity

Určení jedná-li se o signál EF je jednoduché. Jsou-li si MSB a ostatní bity čítačů rovny, stane se aktivním signál EF. Ten zastaví inkrementaci čtecího čítače. Dokud je tento signál aktivní, je zabráněno dalšímu čtení z paměti.

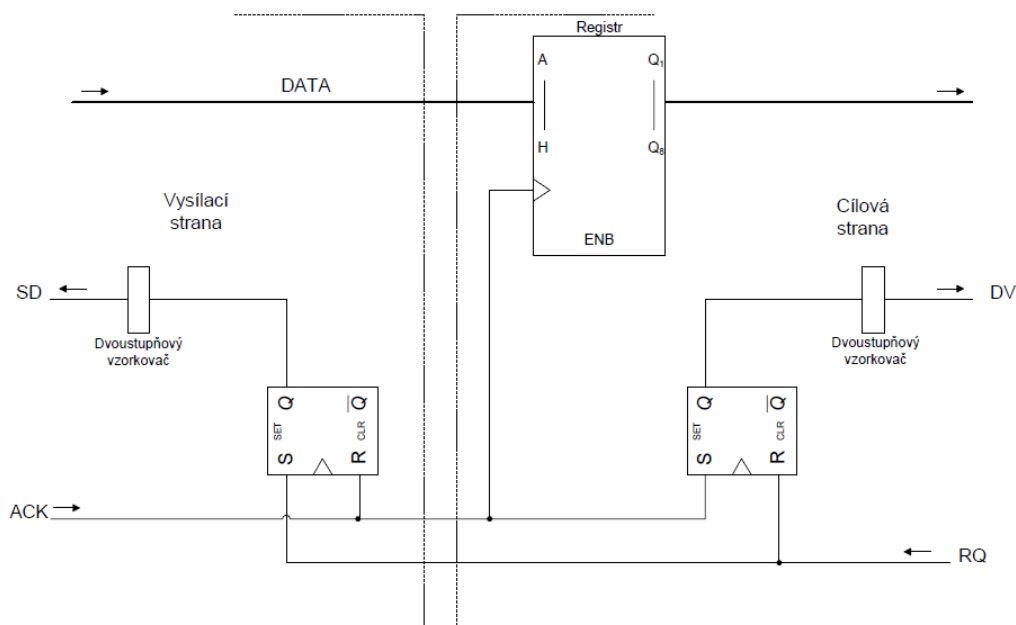
Určení signálu FF tak triviální není. Kvůli tomuto signálu byly provedeny úpravy obou čítačů popsané výše. Signál FF se stane aktivním pouze, jsou-li splněny následující podmínky. MSB a zároveň druhé MSB čítačů se nerovnaj. Všechny ostatní bity si musí být rovny. Tento signál svou aktivací zastaví čítání zapisovacího registru a zároveň zabrání posílání nových dat [7].

3.3 Hand-Shake (Korespondenční provoz)

Hand-shake je synchronizační systém založený na vzájemné komunikaci obou stran přenosu. Každá strana přenosu leží v jiné časovací doméně. Strany se v práci s daty střídají. Při použití Hand-shaku se nemůže stát, že by s daty pracovaly vysílací i cílová strana najednou. Hand-shake zabráňuje ztrátě dat, nesouvislým datům, chybnému čtení a opakovanému čtení dat.

3.3.1 Vnitřní struktura

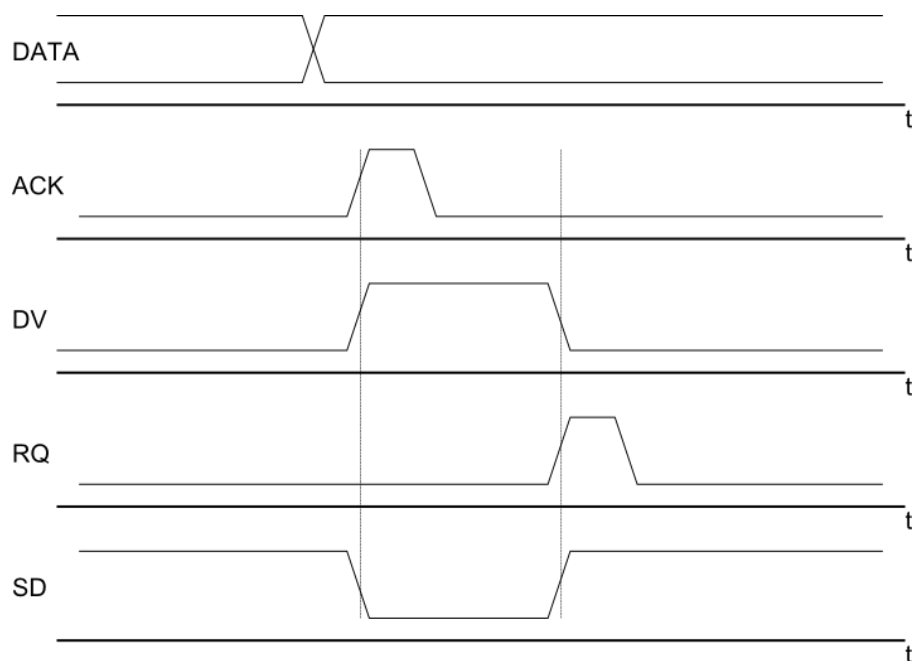
Hand-shake je možné sestavit z jednoho registru pro uložení dat. Řídicími signály se nastavují dva pomocné klopné obvody. Takto sestavený obvod ukazuje obr. č. 21. Protože se při synchronizaci jedná o přenos mezi různými časovacími doménami je potřeba synchronizovat řídicí signály do protější domény. K tomu jsou použity dvoustupňové vzorkovače.



Obr. č. 21 Hand-Shake [5]

3.3.2 Princip funkce

Hand-shake pracuje na následujícím principu. Použitím dvou řídicích signálů ACK a RQ je řízeno, která strana přenosu právě manipuluje s datovým registrem. To znamená, že tyto signály řídí, zdali je do registru zapisováno, nebo je z něj čteno. Nikdy nelze provádět tyto operace současně. Signálem ACK (Acknowledge) signalizuje vysílací strana to, že v registru jsou čerstvá data. Signálem RQ (Request) žádá cílová strana o data nová. Průběhy těchto signálů ukazuje obr. č. 22.



Obr. č. 22 Průběh signálů Hand-Shaku [5]

Při generaci nových dat je vyslán impuls ACK. Ten provede dvě operace. Zapiše nová data do registru a změní stavy na pomocných klopných obvodech. Výstup klopného obvodu na vysílací straně je nastaven do nízké logické úrovně. Tento výstup je označen SD (Send Data). Vynulováním tohoto výstupu je zabráněno generaci nových dat. Výstup druhého klopného obvodu DV (Data Valid) je nastaven do vysoké logické úrovně. Signál DV svou logickou úrovní informuje cílovou stranu přenosu o tom, že jsou v registru nová data a je možné je bezpečně přečíst.

Po úspěšném zpracování dat vyšle cílová strana impuls RQ s žádostí o nová data. Tento impuls také nastaví klopné obvody. Signál DV se změní na nízkou logickou úroveň a zabrání dalšímu čtení již jednou čtených dat. Signál SD se nastaví na vysokou logickou úroveň. Tento signál nyní umožňuje generaci nových dat.

Tento cyklus komunikace se periodicky opakuje [5].

4 Zhodnocení

Žádný synchronizační systém popsaný v této práci není systémem universálním a nelze jej použít vždy. Každý ze systémů má své výhody a nevýhody.

Dvoustupňový vzorkovač je nejjednodušším synchronizačním systémem, protože je složen pouze ze dvou klopných obvodů. Vzorkovač ale pouze omezuje vznik metastability. Nezabrání ztrátě dat ani vzniku nesouvislých dat. Z toho plyne, že je samostatně nepoužitelný pro přenos vícebitových dat. Proto se vzorkovač nejčastěji používá pro synchronizaci řídicích signálů. Ty bývají většinou jednobitové.

Dalším zde popsaným systémem je synchronizér s multiplexory. Tento systém je již složitější. Z hlediska hardwaru jsou zde navíc multiplexory. Zároveň je třeba upravit systém ve vysílací doméně pro generaci signálu EN. Systém zamezuje vzniku nesouvislých dat. Lze jej použít pro synchronizaci v synchronních kříženích. Nevýhodou jak dvoustupňového vzorkovače, tak synchronizačního systému s multiplexory je to, že vysílací strana nemá možnost ověřit si, zda data byla úspěšně zpracována cílovou doménou. Následující systémy již takovou zpětnou vazbou disponují.

Hand-shake je hardwarově složitější. I když se samotná vazba může skládat jen z registru a dvou klopných obvodů. Je třeba upravit systémy na obou stranách přenosu, aby správně generovaly řídicí signály a reagovaly na ně. Pro synchronizaci řídicích signálů je použit dvojitý vzorkovač. Jedná se o nejpomalejší z popsaných synchronizačních systémů, protože se jednotlivé strany přenosu musí střídat v práci s daty. Na druhou stranu se jedná o systém velmi spolehlivý.

Paměť FIFO je hardwarově nejnáročnější zde popsaný synchronizační systém. Skládá se z paměti, dvou čítačů, dvojitých vzorkovačů pro synchronizaci řídicích signálů, obvodů pro porovnání řídicích signálů. Zároveň je opět nutné upravit obě strany přenosu pro správné zpracování těchto signálů. Jelikož je použita asynchronní FIFO, přístup k datům z obou stran je nezávislý. To zajišťuje velmi dobrou rychlost přenosu dat.

Závěr

Cílem této práce bylo nalézt, popsat a porovnat způsoby synchronizace dvou asynchronních číslicových systémů.

Práce vysvětluje problémy, na které je možné při synchronizaci narazit. Hlavním problémem při přenosu dat mezi asynchronními číslicovými systémy je výskyt metastabilního stavu. Z pohledu synchronizace představuje výskyt tohoto stavu závažný problém, protože vede na velké zpoždění signálu na výstupu. Toto zpoždění poté může způsobit ztrátu dat, nebo výskyt nesouvislých dat. Takovéto stavy mohou vést k chybným výsledkům na výstupu, mohou uvést systém do neznámého stavu, nebo mohou vést až ke zničení systému.

Dále je při synchronizaci třeba vzít v potaz vzájemný vztah, který mezi sebou mají hodinové signály synchronizovaných systémů. U každého vztahu se vyskytují jiné problémy, které je potřeba řešit, jež určují výběr vhodného způsobu synchronizace. Pro synchronizaci lze s přihlédnutím ke vztahu hodinových signálů často použít jednodušší, méně spolehlivý systém.

Systém s nejvyšší přenosovou rychlostí je dvoustupňový vzorkovač, následují paměť FIFO a synchronizér s multiplexory, nejpomalejším systémem je Hand-shake. Z hlediska technické náročnosti jsou nejjednodušší dvoustupňový vzorkovač a synchronizér s multiplexory, složitějšími systémy jsou Hand-shake a FIFO.

Z hodnocení vyplívá, že žádný synchronizační systém není dokonalý. Každý z popsaných systémů má své využití.

Seznam tabulek a obrázků:

Obr. č. 1 Časovací domény

Obr. č. 2 Křížení časovacích domén se stejnou frekvencí a nulově posunutou fází

Obr. č. 3 Křížení časovacích domén se stejnou frekvencí a konstantě posunutou fází

Obr. č. 4 Křížení časovacích domén kdy jedna frekvence je celočíselným násobkem druhé

Obr. č. 5 Křížení časovacích domén s dostatečným fázovým posunem

Obr. č. 6 Křížení časovacích domén s chvilkovým nedostatečným fázovým posunem

Obr. č. 7 Křížení časovacích domén s dlouhodobě nedostatečným fázovým posunem

Obr. č. 8 Ukázka průběhu metastabilního stavu

Obr. č. 9 Bipolární obvod typu D

Obr. č. 10 Doby předstihu a přesahu

Obr. č. 11 Reakce výstupu na metastabilní stav

Obr. č. 12 Ukázka charakteristik výskytu a trvání metastabilního stavu pro různé typy bipolárních klopných obvodů

Obr. č. 13 Dvoustupňový vzorkovač

Obr. č. 14 Průběhy na vzorkovači

Obr. č. 15 Třístupňový vzorkovač

Obr. č. 16 Přenos se ztrátou dat

Obr. č. 17 Přenos bez ztráty dat

Obr. č. 18 Přenos s nesouvislými daty

Obr. č. 19 Synchronizace pomocí multiplexorů se zpětnou vazbou

Obr. č. 20 FIFO

Obr. č. 21 Hand-Shake

Obr. č. 22 Průběh signálů Hand-Shaku

Tab. č. 1 Ukázka konstant T a T_o pro různé typy bipolárních klopných obvodů

Tab. č. 2 Ukázka binárního a Grayova kódu pro 3 bity

Tab. č. 3 Upravený Grayův kód pro 3 bity

Použitá literatura

- [1] Understanding clock domain crossing issues [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z : http://www.gstitt.ece.ufl.edu/courses/ee14712/lectures/metastability/EEIOL_2007DEC24_EDA_TA_01.pdf
- [2] Clock Domain Crossing (CDC) Design & Verification Techniques Using System Verilog [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: http://www.sunburst-design.com/papers/CummingsSNUG2008Boston_CDC.pdf
- [3] What is Metastability? *Asic world* [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.asic-world.com/tidbits/metastablity.html>
- [4] Metastable Response in 5-V Logic Circuits (Application Note SDYA006.pdf) [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: <http://focus.ti.com/lit/an/sdya006/sdya006.pdf>
- [5] PINKER, Jiří., POUPA, Martin. *Číslicové systémy a jazyk VHDL*. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-198-5
- [6] Grayův kód [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: http://www.copsu.cz/mikrop/didakticka_pomucka/cislicova_technika/kodovani/gray/gray.html
- [7] Simulation and Synthesis Techniques for Asynchronous FIFO [online]. [Cit. 22. 3. 2012]. Dostupné z: <http://www.csee.umbc.edu/~tinoosh/cmpe415/tutorials/FIFO.pdf>