

## Oponentský posudek k disertaci Very High Resolution Time Measurement Pavla Broulíma

### a) Zhodnocení významu disertační práce pro obor:

Čas je jednou ze základních fyzikálních veličin. Kvantová mechanika dává vztah přímé úměrnosti mezi energií stavu a frekvencí v časovém vývoji jeho vlnové funkce a zároveň nepřímé úměrnosti mezi hybností stavu a vlnovou délkou jeho vlnové funkce. Proto při studiu mikrosvěta se při zmenšujících se vzdálenostech zmenšuje vlnová délka, čímž roste energie a frekvence vyžadující měření na kratších a kratších škálách. Nejmenší škály délky a tím největší škály energie a frekvence byly kdy dosaženy v částicové fyzice, pro kterou Pavel vyvíjel svoje metody přesného měření času. Proto jeho práce zaměřená na měření času s pikosekundovou přesností dobře zapadá do celkové snahy částicové fyziky o další vývoj.

### b) Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle:

Pavel zvolil systém založený na přenosu elektrických signálů. Kromě centrálních hodin použil též lokální hodiny na nódech a pro jejich synchronizaci použil konvertor času na digitální výstup s korekčním algoritmem. Tento konvertor vyvinul na základě komerčního čipu s vlastním navrženým ovládáním. V práci Pavel ukazuje, v čem je jeho volba lepší než alternativy. Splnění cíle pak dokládá simulacemi a měřeními.

### c) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce:

Původním konkrétním přínosem je už zmíněný návrh systému na přesné měření času s přesností pikosekund, realizace návrhu a prokázání, že návrh funguje.

### d) Vyjádření k systematicce, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce:

Práce má přehlednou a logickou strukturu. Po úvodu shrnujícím práci a její kontext v 1. kapitole následuje stručná diskuse měření času ve fyzice obecně a ve fyzice částic konkrétně v 2. a 3. kapitole. Srovnání elektrického a optického přenosu je ve 4. kapitole a různé možnosti konvertoru času na čísla jsou popsány v 5. kapitole. Ve zbylých kapitolách jsou pak popsána měření, analýza jejich chyb, kalibrace a výsledky. V příloze jsem napsal občasné drobné gramatické chyby, překlepy a též drobné náměty na možné zlepšení formulací a zejména na podrobnější vysvětlení některých míst pro čtenáře mimo obor, jako jsem já.

### e) Vyjádření k publikacím studenta:

Seznam publikací na konci práce obsahuje devět příspěvků ve formě konference proceedings. Tento seznam považuju za dostatečný.

f) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě:

Práci jednoznačně doporučuju k obhajobě, pro kterou mám tři doplňující otázky níže.

V Plzni, 23.5.2019

Šimon Kos

Otázky k obhajobě:

1. Můžeš podrobněji popsat, jak jsi prováděl simulace na str. 27-29?
2. Můžeš mě (nás) podrobněji provést třemi verzemi řízení konvertoru založeném na čipu THS788 pomocí PC popsanými na str. 39-43?
3. Vedla měření času s pikosekundovou přesností k novým výsledkům pro rozpad na mezony nebo jiný proces, případně na jaká další měření plánujete v CERNu použít Tvůj systém?

## Seznam drobných gramatických chyb, překlepů a námětů na podrobnější vysvětlení

### •Abstract

„The resolution is in the order of picoseconds.“ Asi má být on the order of... Taky dál v textu.

„TDC with very high resolution“ zavést zkratku?

### •str. 1

„Specifically, research in particle physics.“ Není celá věta. Taky dál v textu.

„Due to the speed of particles moving close to the speed of light and the connected calculation,“ vynechal bych slovo moving. Co je connected calculation?

„...their matching in TOTEM Experiment at CERN“ co je their matching? Dal bych člen k TOTEM.

„One is focused on the signal distribution with defined timing (jitter, delay). While the other deals with time converters.“ Má být jedna věta?

„The time resolution is related to the resolution of the signals propagation...“ má být signal propagation? Rozlišení by bylo omezené i bez propagace?

„On the market, there can be found several solutions for TDCs.“ ...realizations of? Taky dál v textu.

„wider area of application“ překlep

### •str. 2

„...errors, which may or may not effect the measurement, i.e. the resolution of the measurement is not capable of recognizing errors. The measurements with designed TDC are described in the following subsections.“ asi má být affect? Nerozumím tvrzení za i.e. K TDC bych asi dal člen.

„The measurements are described with discussion of results...At the end, the conclusions are mentioned.“ Možná dát lepší slovesa?

### •str. 3

„Especially diffraction physics as higher and higher energies need more precise time measurements.“ Není celá věta.

„At the specific points, the beams are crossed (cross section).“ Možná bych nedal the k specific. Říká se překřížení beamů cross section?

„The total cross section is 110mbarns [22] meaning the probability of interaction between small particles.“ Podle [22] to je při 7TeV? Možná lepší říct, že cross section není přímo pravděpodobnost, už tím, že má jednotky, takže je to pravděpodobnost na jednotkový tok částic a dobu.

„The total cross section can be distinguished into:“ divided?

### •str. 4

„evaluated from two point of view“ má být points?

### •str. 5

„The behaviour in radiation environment means single event effects in the components which can cause a malfunction of the time measurement.“ Možná zvolit nějakou jasnější formulaci?

Co je power rail?

Co je parasitic bipolar transistor?

### •str. 7

„Presen possibilities“ překlep

Figure 3.2: označuje standard přístroj?

### •str. 8

„Short-term stability refers to seconds, maximum hundreds of seconds, the longterm stability refers to days and more.“ Chybí spojka? Taky dál v textu

### •str. 9

„The need for time measurement is primary in experiments“ možná lepší slovo než primary?

„the distance (path) for signals vary“ varies? Taky dál v textu.

„For example the velocity of propagation of coaxial cables is determined by the dielectric material, the velocity of propagation of optical cables is determined by the refractive index.“ Spojka místo čárky mezi větami? Stejná závislost v obojím případě?

### •str. 10

„Further, the different connection length is seen.“ ...lengths are...?

„The trigger signal propagates in two places,...“ propagates to?

„Continuously measurement of the propagation delay“ continuous?

### •str. 11

„But the environment parameters in the system can vary, such as temperature.“ Lepší slovosled?

„...the intensity of the change of the environment conditions.“ Možná lepší slovo než intensity?

Co je splitter in the timestamp device?

„The propagation delay measurement unit has to be included in the central unit.“ Proč se nemůže měřit v každém device?

„Also another advantage is implied from that,...“ follows from that?

### •str. 12

„The signal is transferred through the voltage level via a conductor.“ Možná lepší předložka než through?

„The signaling levels depend on transferring an analogue or a digital signal.“ ...on whether we are transferring...? Analog? Taky dál v textu

With respect to?

Table 4.1: má být maximum a minimum? Taky dál v textu. Bylo by dobré nadefinovat OL a OH a vysvětlit, proč jsou minimální hodnoty větší než maximální?

### •str. 13

„The common-mode voltage level is the average value of a p-signal and n-signal with respect to the ground.“ K čemu je tahle hodnota dobrá, když signál je v rozdílu?

„The principal is shown in Fig. 4.4.“ Principle?

Co je DC a AC coupling?

„...and also there is no need of the ground connection with AC coupling.“ ...need for...? Taky dál v textu.

•str. 14

„The multi-mode fiber is used for shorter distance and it is used for more wavelengths, which is ensured by the variable refractive index of the fiber.“ Jak mění se index se postará o více kanálů?

„The advantage of optical media is a bigger resistance to the disturbances from the environment (for example temperature) than electrical media.“ ...than that of... nebo nějaká jiná lepší formulace?

„The basic structure of the optical connection with a respect to time measurement is shown in the following figure (Fig. 4.5)“ nějaká lepší formulace než with a respect?

•str. 15

„...and it is called fiber bragg grating (FBG).“ Má být velké B?

„LiNbO3 is the material, which the modulator is made from.“ Bez čárky?

Jaký je rozdíl mezi bias voltage a RF voltage?

•str. 16

„The first way is superimposing a 1kHz tone signal to the modulating signal.“ ...superimposing... over...? Nebo ...adding...to...?

„It allows a photodiode in the modulator...“ co je podmět a co předmět?

„The best setting is the lowest harmonic distortion caused by a 1kHz tone signal. Another way to control the bias voltage is by comparing the input optical power with the output optical power. The advantage of this method is that there is no additional signal in the modulating signal. It means no additional jitter.“ Není mi jasné.

„There are 4 channels in the multiplexer and demultiplexer for DWDM multiplex.“ Na Fig. 4.5 vidím jenom dva?

V čem je add/drop multiplexer jiný než MUX?

•str. 17

„...the time between the start and stop events..“ dvě tečky.

„A resolution around 100ps corresponds to the frequency above 10GHz. That is the reason

why a more sophisticated method has to be chosen than a simple counter.“ Proč je to ten důvod?

„Using capacitors instead of D-flip-flops is a better way.“ Proč?

„They allow higher resolution and they have another advantage. The delay can be adjusted by the voltage, which can be controlled.“ Má být dvojtečka? Jak napětí nastaví zpoždění?

•str. 18

„One block is dedicated to increasing the dynamic range of the whole measurement, e.g. seconds or hundreds of seconds.“ Co je dynamic range? Je nějaká jiná range? Jaká by byla bez prodloužení?

Co je coarse counter? Je taky fine counter?

„The counter runs on a very stable frequency. This frequency can be obtained from a stable clock generator or a Phase-Locked-Loop (PLL) which is connected to the stable clock generator.“ Když je clock stabilní, tak proč ještě potřebuje PLL?

„The smaller resolution of the coarse counter, the higher requirements of the fine measurement circuitry.“ Členy před resolution, requirements?

„The FPGA makes such counters possible.“ Jak?

„The counter in FPGA is synchronous, that means every flip-flop reacts simultaneously.“ Dal bych člen před akronym, taky dál v textu.

„An asynchronous implementation of the counter is not convenient because the whole systém in FPGA is designed as synchronous. Furthermore the addition of a synchronization stage complicates the design. The width of the counter corresponds to the dynamic range. The dynamic range is doubled with an increasing bit width of one.“ Co tohle znamená?

Co znamená tapped?

•str. 19

(5.1) a (5.2) jsou jenom přeznačené  $T_1$  a  $T_2$  a  $m$  na  $m+1$ , nebo je nějaký zásadní rozdíl? Kde se pak vezmou rovnice (5.3) a (5.4)?

•str. 20

„...an integrator, which integrates the constant current.“ Možná a constant current? Jak je to přesná metoda?

•str. 21

„The resolution of this method is a sampling period of the taken samples. So it is in the order of nanoseconds.“ Odkud plynou nanosekundy?

•str. 22

„The frequency is used for the coarse measurement which is based on the counter.“ Co to znamená?

„The delay of one element determines the resolution.“ Co je element? Je element totéž co delay element? Jak zpoždění určí rozlišení?

Fig 5.6: co je hit? Kde je fine time? Jak souvisí s předchozím obrázkem?

•str. 23

„It would be about 200-800 elements for 600ps-2400ps total delay. Only 4 or 6 clock management units are in most FPGAs.

The resolution of 265 ps (obtained by phase

shifting) is not high enough, ten times higher resolution is needed.“ Jak se dostane 200-800 a jak desetkrát lepší rozlišení?

„The fastest connection is carry between logic elements (look-up tables).“ Člen před carry? A co je carry?

„The path between the logic array blocks is not the same as the path between look-up tables ( $\tau_1$  and  $\tau_2$  in Fig. 5.7).“ nemají být časy obráceně?

„The delay from the output of the LUT to D flip-flop is not important from a delay line point of view, because it is the same in each logic element.“ I když je pořád stejné, tak je důležité?

Co je n elements a N bits a co je adder?

•str. 24

Jak souvisí Fig. 5.8 s Fig. 5.7?

„The delay is longer between LABs than between LUTs. That is why a wave generator is necessary.“ Jak to spolu souvisí?

Co je thermometric code?

Co je one-hot code?

„The number of delay elements should be to the power of 2 due to the complexity of the encoder.“ ...be a power of 2? Proč?  
•str. 25  
Odkud formule 5.6?  
„Here is an example for an 8-bit carry chain: the carry chain output changes from 110011110 to 11000111. It is shown in Fig. 5.10.“ různé počty číslic tady mezi sebou a s obrázkem?  
Jak obrázky 5.11 a 5.12 souvisejí s předchozími obrázky?  
•str. 26  
V programu, co je sw, a, b, others?  
„The usage of FPGA resources for a 5-bit calibration unit, i.e. 32bit long carry chain, is in Table 5.2.“ odkud 32 a odkud čísla v tabulce?  
•str. 27  
Co vidím v obr. 5.13?  
•str. 29  
„The hits are evenly distributed.“ Ale na str. 24 se píše o random hits v druhé fázi?  
•str. 30  
„A host serial interface ensures all programming of THS788 and the interface uses an LVCMOS standard.“ Jak interface zařídí programovací jazyk?  
Co dělá DE0-nano?  
„The die temperature of THS788 is measured by the ADC available on the kit.“ Proč se měří teplota? Říct už tady radši než dál na str. 34? A i tam by se dalo říct detailněji, jak teplota narušuje stabilitu. Nebo rozvést letmou poznámku na str. 11?  
•str. 32  
Je něco navíc v obr. 5.19 oproti 5.18b?  
•str. 33  
„The host state machine controls communication between the FPGA and the THS788.“ Kde je spojení s TDC na obr. 5.20?  
Kde se vzalo  $n=12$  v rovnici 5.7?  
•str. 34  
V tab. 5.6, co je pad? Co je pak  $R_{sa}$ ?  
Co jsou různé kanály?  
„From the plot, the temperature dependance on the number of running channels can be seen.“ ...dependence?  
•str. 36  
„According to the previous TDC with USB2.0, the new version of TDC was designed in order to increase the data throughput and to make synchronization easier.“ Kde se v předchozím popisu projevilo USB2.0? Kvůli němu tam nebyl return channel? Ten je pro druhou nebo třetí metodu na str. 10?  
„According to the frequency and the FIFO width, the maximum data rate is either 1.056Gbps or 1.6Gbps, which is significantly better than the previous version.“ Předchozí verze je v tab. 5.5? Co znamená Bd?  
„The communication with the THS788 chip is done by the FPGA in the development kit, it is the same as the previous version.“ Spojka nebo středník místo čárky? Rozdíl oproti obr. 5.17 je, že tady je Reset místo Buttons. Proč?  
•str. 37  
Co je additive jitter? Je taky nějaký jiný jitter?  
Co je pin-to-pin skew?  
•str. 38  
„In addition, there are other FTDI signals, with names corresponding to the pin name of the FTDI chip.“ Co je pin name?  
Co je 40b dat v tab. 5.9? podobně pak 24b dat v tab. 5.10?  
•str. 39  
„The packet is wider in comparison with TDC with USB2.0 because of requirements for the width, which is a multiple of 16.“ Jak byl široký s USB2.0?  
•str. 40  
„The split menu allows the register to be chosen, whose bits will be set.“ Jak se volí registry a bity?  
•str. 41  
„There are 4 configurations of the measurement.“ podle čeho se jedna vybere?  
•str. 42  
„The current data can be seen on the bottom side.“ Co je bottom side?  
„The user version allows enabling channels separately“ separately?  
•str. 45  
Co je datasheet?  
„This is shown for the rising edge and the falling edge in the following figure (Fig. 6.1).“ kde tam je 1V? nebo  $t_{r1V}$  a  $t_{f1V}$  jsou směrnice, o kterých se píše v dalším odstavci? Co je v obrázku threshold,  $\Delta U_{TH}$ ,  $\Delta T_{TH}$ ?  
„Influence of the threshold drift with supply voltage“ má být influence of the supply voltage on the threshold drift?  
Co je  $\Delta U_{THsupply}$ ? Z rovnic 6.4 a 6.5 plyne rovnost v 6.1 a 6.2 místo zesílené nerovnosti?  
•str. 46  
Jak dostaneme 6.15 a 6.16?  
•str. 47  
„The transition is considered a linear transition.“ Lineární vztah mezi čím?  
•str. 48  
„The next table shows the relation among signal levels when the length of the rising edge or the falling edge is kept.“ Relations between?  
„From the tables it is seen that LVDS signals are the most convenient,“ protože je nejmenší napětí?

•str. 49

Jak může být pravda jak 6.32 tak 6.33?

•str. 50

„The formulas mentioned in Section 6.2 help to find parameters of signals which are applied on the input of TDC and the signals don't worsen the time resolution of TDC.“ ...applied to the input of TDC so that the signals do not worsen...?

V rovnici 6.34 bych k číselné hodnotě napsal jednotku. Taky dál.

V rovnici 6.39 má být jednotka ns/V?

•str. 51

„The measured test setup is shown in Fig. 7.1.“ measurement?

Co je splitter tak jako už na str. 11? Prostě pošle signál po dvou drátech?

•str. 52

„The interconnection in the test setup was established with the same cable“ stejný jako co?

„time difference between sync input and event input“ co je sync a co je input? Je to tentýž signál jenom ve dvou různých kabelech?

„The results are shown in Tab. 7.1. The mean value is almost zero, corresponding to the previous assumption.“ V tabulce je -30 fs. Umí TDC měřit s takovou přesností? Nebo to je přesnost osciloskopu? Tyhle rozdíly udělá splitter?

„The histogram is fitted with the Gauss probability distribution function.“ Fig. 7.2—oranžová čára má být fit modré? Možná spíš říct, že modrá čára je Gaussián se stejnou střední hodnotou a variancí, který právě moc nesedí.

Velká přesnost hodnot v tabulce a v obrázku, na desetiny fs? Taky dál v tabulkách a obrázcích.

„The die temperature is 40°C during the 10°C ambient temperature.“ Možná at místo during?

•str. 53

Menší deviace při vyšší teplotě? Nebo se nedá říct, když je rozdíl sám menší než hodnota deviace?

Co je moving average FIR filter a jak zmenšuje max-min?

Proč je v obr. 7.4 svislá osa s měřítkem v násobcích 26?

•str. 54

„The jitter of the generator used is higher than the resolution of the THS788, thus the measured jitter should be the same or less.“ Jak může být míň?

V grafu dvakrát stejné číslo na vodorovné ose?

„According to the datasheet, the jitter is  $\pm 100\text{ppm} + 500\text{ps}$ .“ Různé jednotky? Taky dál v tabulce 7.4 na str. 57

„From Fig. 7.5, the jitter (worst-case) is  $\pm 1339\text{ps}$ .“ Kde tam vidím tuhle hodnotu?

Opět linearita?

•str. 55

Offset je mezi čím a čím?

Říct někde explicitně, že  $b = a + c$ ?

•str. 56

„The other channels are calibrated in the same way with the same formulas.“ Na obr. 4.1 na str. 9 to vypadá, že každé zařízení má jednu hodnotu zpoždění, tj. jeden kanál, nebo všechny kanály mají stejné zpoždění?

•str. 57

Co znamená, že number of channels je trigger +4? Jako že trigger je jeden kanál?

„Because of the jitter level, the three signal approach for the calibration (described previously) is used instead of two signals.“

Kdy by se použily dva signály?

„The statistical data (mean value, sigma, mode, median) is also seen in the histogram.“ Co je mode? Proč jsou hodnoty záporné? Data je množné číslo, taky dál v textu.

•str. 58

„The calibration statistics of channel 2 are in Tab. 7.5“ překlep a chybí tečka za větou.

•str. 59

„The next figure shows the histogram of time interval  $t_i$  measured by channel 2 of another TDC.“ Proč zase zrovna druhý kanál?

•str. 60

„The difference between the calibration offset of channel 1 and channel 2 or channel 3 and channel 4 is less than the difference between channel 1 and channels 3, 4 or channel 2 and channels 3, 4.“ To má nějaký hlubší důvod nebo to prostě tak vyšlo?

•str. 61

„According to the calibration measurement of one TDC the variation can be up to 200ps.“ Kde vidím 200 ps?

Co jsou channel-to-channel skew a part-to-part skew?

•str. 63

„You can see the shift of each histogram according to the 5ps shift showed in the legend.“ Shown? Taky jinde v textu.

„In addition, the measurement was made for delays of LSB multiples of the TDC resolution.

It means delays of 65ps, 130ps, etc.“ Odkud víme 65ps?

„The measured trend of the curve is linear but the increment does not exactly correspond to the 5ps increment of the generator.“ Teď teda mluvíme zpátky o předchozích měřeních s 5ps?

„The TDC can be used in several standalone applications.“ Co znamená standalone?

•str. 64

„The pulse width measurement is based on the measurement between the rising edge and the falling edge of the signal or vice versa. In order to measure that, the signal has to be split into two signals.“ Proč se musí rozdělit na dva?

„The first approach requires to using cables with the same length or cables of a known length (propagation delay).“ Requires using nebo requires to use?

•str. 66

„Other configurations did not cause a drop in the histogram.“ Jaké byly další konfigurace?

•str. 67

Co je function generator v obr. 8.1?

•str. 68

„The interconnection between the central unit and nodes is established from cables,“ by cables?  
„One main time measurement unit can operate up to 4 nodes,“ kvůli čtyřem kanálům v tabulce 7.4 na str. 57?  
Má na obr. 8.2 každý nod svůj detektor?  
„The period has to be longer than the propagation delay. Otherwise the measured time interval will have a phase difference during one period of the generated signal.“ Posunutí a perioda jsou nezávislé veličiny?  
•str. 69  
„Suppose a system with an asynchronous 200MHz clock in each node, i.e. the system described in the previous chapter which does not have a common clock signal.“ Souvisí to nějak s tím, že FPGA counter je synchronous na str. 18?  
„The parameters of the oscillator are in Tab. 8.1.“ stejné parametry všech oscilátorů?  
„Frequency change due to  $\Delta VCC$ “ změna napětí uzavřením obvodu?  
•str. 70  
Co je x v 8.9?  
V 8.13 má být mocnina 6.  
8.18 jednotky? A odtud jednotky v 8.20? Přesnost v 8.20? Kde se vzalo  $N=40$ ?  
•str. 71  
„The trend is determined by the ratio of the frequencies of the oscillator in the first TDC and the second TDC. Ratio k is calculated according to the following formula for oscillator frequencies  $f_1$  and  $f_2$ .“ Ale 8.21 není podíl?  
•str. 72  
V 8.31  $t_2$  na pravé straně pro shodu s 8.30? Ale stejně mi ten correction algorithm není jasný.  
„The start and stop signals are generated using two independent function generators.“ Který generátor na obr. 8.4 dělá start a který stop?  
„The main part are highlighted in the photo as TDCs, generators and splitter.“ Mají být dva splitters?  
•str. 73  
Co jsou frekvence 20, 25 a 30 Hz?  
Rozdíl frekvencí má být 50ppm, tak proč je v obrázku -5ppm?  
„It means, the error of the LSB of TDC is approximately 67as.“ Takhle malý čas?  
•str. 75  
Na obr. 8.9 je počet rozdílů v podstatě konstantní v daném intervalu? Proč a proč zrovna v tomhle intervalu?  
V obr. 8.10 co jsou samples?  
•str. 76  
Minimum v obr. 8.11 a v 8.12 stejného původu jako v obr. 7.20-22?  
•str. 78  
„The measurement after the power up is seen in Fig. 8.16, the measurement is stabilized after a while (a few minutes), when the device and housing are heated themselves.“ Jak v obrázku vidím a few minutes?  
•str. 80  
Proč je škála v obr. 8.20 desetkrát menší než v 8.19 a 8.16?  
•str. 81  
Jediný rozdíl mezi obr. 8.21 a 8.4 jsou různé délky kabelů a delay generator místo function generator? Delay generator je DG535 na obr. 7.14? K čemu je tady dobrý, když už jsou různé kabely?  
•str. 85  
„The advantage of such an approach is only that hit pixels are dead for approximately 475ns.“ Dát only před for?  
•str. 87  
Kde přesně jsou ty čtyři detektory na obr. 9.2?  
•str. 88  
„Only 2 units are shown in Fig. 9.3, in reality there are four units.“ Spojka nebo středník místo čárky. Tyhle dvě jednotky jsou ty, co tvoří jeden sandwich?  
•str. 89  
Rozdíl délky kabelů je 30 metrů? Je tak velká vzdálenost od středu barelu ke zdi?  
•str. 90  
„One bin corresponds to an LSB resolution of 1.56ns.“ takže ne pikosekundy? Stačí tohle rozlišení pro experimenty? Na další stránce se dokonce píše 1.5625ns, takže je to rozlišení známo s takovouhle přesností?  
•str. 91  
„The usage and the principle are described in details in [28].“ In detail?  
•str. 93  
„The inaccuracy is below the time resolution of the Timepix3, but it can effect the results in short distances.“ At short distances? Proč zrovna na krátkých vzdálenostech?  
•str. 94  
„Two approaches of signal distribution are described (electrical and optical). The designed systems in the thesis only use electrical transmission.“ Tak proč popisuješ taky optický přístup, když ho stejně nepoužíváš?  
„The thesis deals with time measurement and the time measurement is focused on the measurement in time domain.“ Dal by se měřit čas ve frekvenční doméně?  
„A block diagram of the system has been shown and explained.“ Překlep

Posudek na doktorskou disertační práci **Ing. Pavla Broulíma**  
**"Very High Resolution Time Measurement Systems "**  
vypracovanou pod vedením Doc. Dr. Ing. Vjačeslava Georgieva  
na Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací  
Fakulty elektrotechnické Západočeské university v Plzni

Posudek vypracoval Ing. Stanislav Pospíšil, DrSc., ÚTEF ČVUT v Praze

Úlohy oponenta předložené disertační práce jsem se jako experimentální fyzik ujal s tím, že se zaměřím na funkčnost vyvinutých zařízení a na nich postavených systémů, k jejichž vývoji disertant přispěl. A to proto, že je vidím jako potřebné pro současné i budoucí experimenty z oblasti jaderné a subjaderné fyziky.

Disertační práce Ing. Pavla Broulíma je přehledně rozdělena do deseti kapitol, které jsou doplněny odkazy na citované publikace a odborné články.

V prvních čtyřech kapitolách lze nalézt poměrně stručný popis principů užívaných pro přesná měření časů, který je doplněn detailnějším popisem způsobů distribuce a synchronizace signálu z ohledem na používání dvou typů přenosových médií, elektrických kabelů a optických vodičů.

V prvních dvou částech kapitoly 5 se disertant zaměřuje na podrobnější rozbor metod přesného měření času. Zabývá se v ní i otázkou implementace TDC do FPGA. Dochází přitom k závěru, že toto řešení je možné, byť potřeba propojení jednotlivých FPGA a kalibrace, může jeho realizaci komplikovat. Na základě toho, i skutečnosti, že využití TDC v FPGA znamená nestandardní použití FPGA, s čímž vývojové nástroje nepočítají, se tedy disertant rozhodl používat ve své práci specializované TDC čipy.

V dalších částech kapitoly 5 a v kapitolách 6 a 7 disertant obšírně prezentuje hlavní přínos práce, kterým je návrh TDC zařízení založeného na čipu TI THS788, který vychází parametrově jako jeden z nejlepších, komerčně dostupných, TDC čipů. Autor realizoval kompletní read-out řetězec pro tento TDC čip, a to od HW návrhu až po aplikační SW v PC. Takové zařízení je možné použít v řadě aplikací bez nutnosti se detailně zabývat funkcí vlastního TDC obvodu. K tomu použité rozhraní USB 3.0 umožňuje přitom rychlou integraci TDC do řady měřicích řetězců. Popsanému řešení se díky tomu otevírá prostor k rozsáhlejšímu využívání tohoto TDC, například v řadě vědeckovýzkumných aplikací v nichž je využíván systém přesně spouštěných a/nebo přesně synchronizovaných detektorů rozmístěných daleko od sebe. Disertant v práci uvádí výsledky komplexního testování a ověřování funkčnosti vyvinutého zařízení. Analyzuje přitom i vlivy jednotlivých vnějších vlivů, jako jsou například změna teploty, fluktuace napájecího napětí, na navržený systém přesného měření času. Zvláště měření provedená v klimatické komoře přispěla také k tomu, že zařízení, které je hlavním výsledkem disertační práce, je v práci kompletně charakterizováno i co do teplotní závislosti, linearity i kalibrace.

Kapitola 8 je věnována demonstraci výsledného TDC zařízení v měřicím systému s distribucí hodinového signálu a synchronizací na úrovni pikosekund. Disertant v ní dále prezentuje synchronizaci "timestampingu" ve dvou bodech, které mají navzájem asynchronní hodinové domény. Autor přitom nevyužívá distribuci společného hodinového signálu, ale vychází z předpokladu, že frekvence lokálního oscilátoru v jednotlivých uzlech/bodech je konstantní. K tomu vyvinul algoritmus pro korekci rozdílných hodinových frekvencí synchronizovaných zařízení.

Kapitola 9 se zabývá popisem využití navrženého TDC zařízení v reálných aplikacích založených na měření s detektory Timepix3 zapojenými do detektorové sítě. Je v ní ukázáno využití TDC jak pro měření fáze hodinového signálu v jednotlivých detektorech, tak pro charakterizaci dlouhého vedení (se započtením zpoždění signálu) pro detektory instalované v ATLAS experimentu. Takto je zřetelně prezentován přínos navrženého zařízení pro měření času v reálných fyzikálních experimentech, který přivedl k vědeckým publikacím s významným podílem disertanta v mezinárodních recenzovaných a impaktovaných časopisech.

V následující části posudku shrnuji svůj pohled na posuzovanou práci Ing. Pavla Broulíma:

- Co se týká formální úpravy a jazykové úrovně předložené práce, hodnotím ji jako velmi přehlednou a dobrou.
- Co se týká významu výsledků disertační práce, představují významný přínos pro obor, ve kterém



působím, což dokládá jejich využití pro synchronizaci systému detektorů Timepix3 v experimentu ATLAS na LHC a připravované Time-of-Flight experimenty s více detektory, jež vyžadují časové rozlišení na úrovni stovek pikosekund, či lepší. Neboť je v práci doloženo dosažení reálného výsledku, svědčí to o autorově efektivním postupu při řešení úloh souvisejících se zadáním cílů disertační práce. K tomu je mi navíc známo, že podíl disertanta na těchto výsledcích byl skutečně podstatný.

- Publikační výstupy související s disertační prací Ing. Pavla Broulíma lze rozdělit do dvou skupin. Ta skupina výsledků, která se vztahuje k využívání vyvinutých zařízení v reálných experimentech, je publikována v mezinárodních recenzovaných a impaktovaných časopisech. Druhá skupina publikací, jež se vztahuje bezprostředně k návrhu a výsledkům technického řešení vyvinutého zařízení, je tvořena publikacemi ve sbornících konferencí, většinou mezinárodních, a třemi autorskými prototypy. Osobně se přitom domnívám, že v práci předložené technické řešení vývoje systému pro měření časů s vysokým rozlišením, by si zasloužilo rovněž prezentaci v širším mezinárodním rozsahu formou časopisecké publikace s mezinárodním dopadem. V této souvislosti bych tedy disertantovi položil otázku, zda-li takovou publikaci připravuje či s ní počítá.

*Závěrem chci konstatovat, že předložená disertační práce Ing. Pavla Broulíma prokazuje předpoklady disertanta k tvůrčí vědecké a výzkumné činnosti. Proto doporučuji, aby práce byla přijata k obhajobě a aby po jejím úspěšném průběhu byl Ing. Pavlovi Broulímovi přiznán akademický titul "doktor" (ve zkratce "Ph.D.") v oboru "Elektronika".*



4. 2. 2020

Stanislav Pospíšil

## Posudek doktorské práce

„Very High Resolution Time Measurement Systems“

autor: Ing. Pavel Broulím

Předložená doktorská práce se věnuje velmi důležité problematice určení časových rozdílů s velkou přesností (jednotky, desítky pikosekund), což má praktické využití v základním výzkumu v částicové a jaderné fyzice, ale i v komerčních aplikacích jako je měření vzdáleností. Přesnost stanovení časové současnosti signálů z detektorů má významný vliv na poměr signál/pozadí.

Výzkum byl prováděn na dvou pracovištích, především na FEL ZČU ve skupině pod vedením doc. Georgieva a částečně i v CERN. Výsledky jsou použity v rámci skupiny ZČU FEL, kde je řešena široká oblast úkolů, skupina má významné postavení ve vývoji řídicí elektroniky a příslušného programového vybavení (pro pokročilé detektory, aplikace do kosmu) pro potřeby reálných experimentů (časová koincidence signálů z různých typů detektorů vzdálených od sebe i stovky metrů).

Doktorská práce je přehledně rozdělena do 10 kapitol, přehledu použité literatury a dalších 3 příloh (seznam publikací autora v časopisech a ve sbornících, seznam prototypů vytvořených autorem).

První čtyři kapitoly obsahují všeobecný rozbor měření času (např. úvod do problematiky, historii měření času, obecné definice a standardy, šíření signálů, vysvětlení funkčnosti různých typů převodníků TDC).

Kapitoly 5 až 9 tvoří hlavní část doktorské práce. Kapitola 5 pojednává o realizaci dvou TDC založených na FPGA Cyclone IV a TDC THS788 (USB2.0; USB 3.0).

Kapitola 6 shrnuje výsledky analýzy chyb, které mohou vznikát při určování časových rozdílů signálů a jejich kompenzaci. V kapitole 7 autor popsal provedená měření s výše zmíněnými TDC (kalibrace, linearita). Kapitola 8 popisuje systém distribuce signálu hodin pro synchronizaci několika TDC umístěných v různých místech (i poměrně vzdálených). Tento systém je důležitý z hlediska přesnosti určení časových rozdílů v tomto případě. Kapitola 9 popisuje dvě realizace testovacích měření s TDC –

i) dvě dvojice Timepix3 detektorů umístěných ve vzdálenosti 44m v experimentu ATLAS

ii) teleskop složený z detektorů Timepix3 použitý pro měření na SPS urychlovači v CERN na svazku pionů

Pavel Broulím je uveden jako autor či spoluautor v celkem 5 článcích, které jsou uvedeny v databázi WOS. Dále je autor či spoluautor 9 příspěvků na konferencích a 3 prototypů.

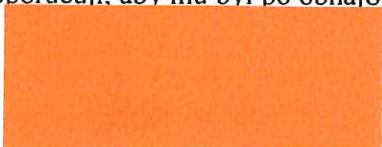
Autor v rámci práce vytvořil dva prototypy TDC na bázi FPGA a THS788, provedl simulace očekávaného chování těchto zařízení, vytvořil software a firmware pro aplikaci na obsluhu těchto TDC (3 varianty v prostředí Microsoft Visual studio), provedl základní měření pro charakterizaci TDC (např. časový rozdíl mezi dvěma signály, pro různé teploty) a výsledky aplikoval na dvě realizace s detektory Timepix3. Výsledky dizertační práce jsou praktické a významné pro mnohá koincidenční měření. Formální úprava dizertační práce

je v pořádku, jazyková úroveň (práce je psána v AJ) je dobrá (jsou zde pouze menší překlepy v jednotlivých slovech).

Mám k doktorandovi dvě otázky:

- 1) Jak by bylo možné navázat systém (časové značky) na čas UTC?
- 2) Na dva vstupy TDC se přivede stejný signál. Při optimálním měření časového rozdílu bychom dostali úzký Gaussovský pík. Jak by se na výsledku projevil vyšší práh (threshold) na jednom vstupu?

Závěrem konstatuji, že odborná práce doktoranda Pavla Broulíma při řešení dané problematiky je na vysoké úrovni, její zaměření je vysoce aktuální jak po teoretické tak po praktické stránce. Na základě výše zmíněných faktů doporučuji, aby mu byl po obhajobě přiznán titul Ph.D.



Doc. Ing. Ivan Stekl, CSc.