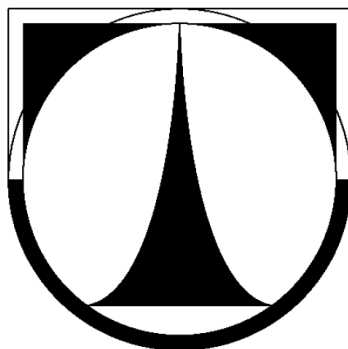


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



## AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

**Inteligentní čidlo pro on-line vyhodnocování kvality příze**

**Intelligent sensor for on-line yarn quality evaluation**

Autor: Ing. Pavel Kousalík  
Studijní program: P2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 2612V045 Technická kybernetika  
Pracoviště: Ústav mechatroniky a technické informatiky  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Technická univerzita v Liberci  
Školitel: Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.  
Konzultant specialista: Ing. Jiří Sloupenský, CSc.

## **Anotace**

Stále rostoucí požadavky trhu na vyšší kvalitu textilních výrobků nutí výrobce textilních strojů neustále zvyšovat kvalitu jednotlivých meziproduktů v procesu jejich výroby. Prvním stupněm při výrobě textilních produktů je výroba příze. Je tedy zřejmé, že právě kvalita vypřádané příze má zásadní vliv na kvalitu a tedy i prodejnost finálního textilního výrobku. Výrobci dopřádacích strojů musí tedy zajistit, aby kvalita příze byla trvale kontrolována, a proto vybavují své stroje kontrolními systémy, které trvale sledují (on-line) kvalitu produkované příze. Princip takového zařízení spočívá v instalaci snímače nestejnoměrnosti příze na každé spřádací místo s následným elektronickým vyhodnocením naměřených hodnot. Shodná zařízení jsou v textilním průmyslu instalována běžně na soukacích strojích.

Dopřádací stroje vybavené takovouto kontrolou kvality příze vyrábějí přízi, kterou není nutno před dalším zpracováním přesoukávat ani jinak dále kontrolovat. Přitom je zajištěno, že do následujícího výrobního procesu vstoupí pouze kvalitní příze bez vad. Stejně jako elektronické čističe soukacích strojů, tak i zařízení pro kontrolu kvality příze na rotorových a tryskových dopřádacích strojích umožní vyloučit z příze vady, které by byly v hotové textilií (tkanině nebo pletenině) viditelné a staly by se tak příčinou zařazení do nižší jakostní třídy.

Účelem tohoto zařízení je kontinuální kontrola vyráběné příze a v případě výskytu rušivé vady, která překročí uživatelem zadané limity, vyvolat přerušení předení. Vhodným nastavením hraničních limitů lze docílit toho, že z příze budou odstraněny pouze takové vady, které by byly v hotové textilií skutečně viditelné.

Náplní této práce je komplexní studie technických možností detekce vad v přízi, měření kvality vypřádané příze, posouzení jednotlivých metod detekce vad z hlediska požadované přesnosti a extrémní dynamiky a průmyslová realizace integrovaného čidla kvality příze. Dále je v práci provedena podrobná analýza navrženého řešení integrovaného čidla kvality příze z hlediska přesnosti a jeho dynamického chování.

Teoretická část práce je zaměřena na vyhledání a implementaci vhodných softwarových algoritmů pro detekci, vyhodnocování a třídění vad v přízi. Tato část obsahuje posouzení jednotlivých metod detekce vad a vyhodnocení kvality příze z hlediska přesnosti, rychlosti, efektivnosti a z hlediska dynamiky tak, aby bylo možno kvalitu příze vyhodnocovat on-line.

Zvláštní pozornost je věnována periodickým vadám, nalezení speciálního algoritmu pro detekci vady typu „moiré“, určení nejvhodnější metody výpočtu spektrogramů pro ostatní periodické vady a optimalizace této metody podle možností použitého mikroprocesoru.

Realizované integrované čidlo kvality příze je navrženo tak, aby bylo plně integrovatelné do elektronického konceptu rotorového a tryskového dopřádacího stroje.

***Klíčová slova:*** rotorový, tryskový, dopřádací stroj, čistič příze, integrovaný snímač kvality příze, vady příze, detekce vad v přízi, on-line vyhodnocení vad v přízi, moiré, nestejnoměrnost příze, CV%, imperfekce, periodické vady, Fourierova transformace, FFT, spektrogramy.

## **Annotation**

The constantly increasing market requirements for higher textile fabric quality put pressure on the spinning machine producers to increase the quality of their production. The yarn production is the first step in textile fabric manufacturing. It appears from this that the yarn quality fundamentally influences the quality and saleability of the final textile product. The manufacturers of textile machines have to guarantee the permanent inspection of the produced yarn. That is why they equip the machines with online yarn quality monitoring systems. Such systems involve the installation of a yarn irregularity sensor at every spinning position. The sensor electronically monitors the yarn quality. The device has the same function as the electronic yarn clearers installed on the winding machines.

Spinning machines equipped with a yarn quality monitoring system produce yarn that does not have to be rewound and checked before it is further processed. Thereby the yarn quality for subsequent operations is ensured. Winding machine clearers and rotor and/or air-jet machine yarn quality monitoring systems are capable of eliminating yarn faults that would be visible in a finished textile (woven or knitted). Such faults would consequently bring down the quality rating of such textile.

The device continually checks the produced yarn and stops the spinning process if there is a disturbing fault that exceeds limits pre-set by the user. The right setting of limits can guarantee that the faults eliminated out of the yarn will only be those that would be visible in a textile.

The thesis covers the comprehensive study of the technical possibilities of yarn fault detection, of a yarn quality measurement, the assessment of detection methods in terms of required accuracy and very high dynamics and industrial realization of the integrated yarn quality- measuring detector. The thesis analyses the designed integrated yarn quality detector with a view to static accuracy and dynamic behaviour.

The theoretical part of the thesis is focused on the discovery and the implementation of the algorithm for on-line yarn fault detection, evaluation and classification. This part explores the methods of yarn fault detection and yarn quality evaluation with views on accuracy, speed, efficiency and dynamics with the aim of online yarn quality supervising.

Special attention is given to the periodical faults, finding the special algorithm for periodical moiré detection, determination of the optimal method of calculation of the spectrogram of the remaining periodical faults and optimisation of this method in accordance with the capabilities of the microprocessor being used.

The realized integrated yarn quality sensor is designed to be fully integrated into the electronic concept of the rotor and air-jet spinning machine.

**Keywords:** rotor, air-jet, spinning machine, yarn clearer, integrated yarn quality sensor, yarn faults, yarn fault detection, on-line evaluation, moiré, yarn irregularity, CV%, yarn imperfection, periodical faults, Fourier transform, FFT, spectrograms.

<b>Obsah:</b>	
<b>1</b>	<b>ÚVOD ..... 5</b>
<b>2</b>	<b>SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY ..... 7</b>
2.1	Elektronické vybavení stroje..... 7
2.2	Čističe příze ..... 8
2.2.1	Počátky čističů příze ..... 8
2.2.2	Přehled čističů příze ..... 8
2.2.3	Porovnání čističů ..... 10
2.3	Principy měření kvality příze..... 11
2.3.1	Kapacitní měřicí princip..... 11
2.3.2	Optický měřicí princip ..... 11
2.3.3	Opticko-digitální měřicí princip ..... 11
2.3.4	Porovnání měřicích principů ..... 12
2.3.5	Optický senzor MSBF032 ..... 13
<b>3</b>	<b>CÍLE PRÁCE ..... 14</b>
<b>4</b>	<b>PŘEDMĚT ŘEŠENÍ ..... 15</b>
4.1	Koncepce čističe příze..... 15
4.1.1	Uspořádání čističe příze ..... 15
4.1.2	Integrace do elektronického vybavení stroje..... 15
4.2	Detekce, vyhodnocování a třídění vad ..... 16
4.2.1	Snímání příze ..... 16
4.2.2	Vyhodnocování signálu ze senzoru ..... 17
4.2.3	Základní vyhodnocování vad ..... 17
4.2.4	Základní třídění vad ..... 18
4.3	Vyhodnocovací algoritmy..... 20
4.3.1	Blokové schéma..... 20
4.3.2	Předfiltrace ..... 21
4.3.3	Základní filtr..... 21
4.3.4	Průměrná hodnota P1MV a P10MV ..... 21
4.3.5	Referenční hodnota..... 21
4.3.6	Krátké silné vady N a S..... 22
4.3.7	Dlouhé vady L a T ..... 23
4.3.8	Vady pramene SI+ a SI- ..... 24
4.3.9	Vady čísla příze C+ a C- ..... 24
4.3.10	Zápředky P+ a P- ..... 25
4.3.11	Moiré..... 25
4.3.12	Nestejnóměrnost příze YI% ..... 28
4.3.13	Imperfekce (IPI vady) ..... 30
4.3.14	Periodické vady (Výkonová spektra, „spektrogramy“) ..... 31
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR ..... 44</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA ..... 45</b>
<b>7</b>	<b>PŘEHLED PUBLIKOVANÝCH PRACÍ ..... 47</b>

# 1 ÚVOD

Textilní výroba je jedno z nejstarších řemesel, textilní výrobky provázejí člověka v jeho dějinách již více jak 10 000 let a každý jednotlivec se s nimi denně setkává po celý svůj život. Současná průmyslová výroba příze vznikla z ručního předení a díky technologickému pokroku byla postupně změněna tak, že většina textilních výrobků dnes pochází ze sériové průmyslové výroby.

Aby mohla vzniknout tkaná nebo pletená textilie, je třeba nejprve přírodní či umělá vlákna převést z neurovnané beztvaré formy do formy uspořádané, čili vyrobít přízi. Technologický proces výroby příze se skládá z několika dílčích kroků a probíhá v přádelnách na řadě za sebou následujících strojů. Nejprve je třeba materiál připravit rozvolněním chomáček vláken, vyčištěním od cizích příměsí a seřazením vláken do jednoho směru a dále průtahem pozvolně ztenčovat vrstvy vláken. Vlastní výroba příze se nazývá předení a jeho výsledkem je příze, která vzniká spojením a zakroucením přibližně sta jednotlivých textilních vláken o délce 5 až 50 mm. Dále proces pokračuje zpracováním přízi do tkanin a pletenin. Celý proces výroby textilního produktu je nejen velmi náročný na energii a lidskou práci, ale je i investičně velice náročný.

V současné době jsou komerčně dostupné dopřádací stroje, využívající 3 základní principy pro výrobu staplových přízí. Prvním z nich je prstencový dopřádací stroj, který je stále na trhu dominantní, ačkoliv byl vynalezen ve 30. letech 19. století. Dále se jedná o rotorový dopřádací stroj, který byl vynalezen ve VÚB v Ústí nad Orlicí a komerčně realizován v 60. letech 20. století a dále tryskový stroj, realizovaný japonskou firmou Murata s prvním komerčním využitím kolem roku 1980.

I když se textilní stroje a technologie předení, ale i proces zpracování, kontroly a přípravy výchozí suroviny neustále zdokonalují, přesto doposud není možné vyrábět přízi ve 100% kvalitě, tj. naprosto bez vad, které by byly rozeznatelné ve finálním produktu, pletenině nebo tkanině. Vady příze, které se dostanou až do procesu tkaní nebo pletení, lze odstranit jen za cenu velmi vysokých nákladů anebo je nelze odstranit vůbec a ve výsledném produktu působí velice rušivě. Zdaleka ne všem vadám lze předejít kvalitním zpracováním, kontrolou a přípravou suroviny. Některé vady mohou vzniknout až ve spřádací jednotce během vlastního spřádacího procesu. Jedná se zpravidla o nezakroucené shluky vláken, nálety vláken, dlouhá zesílená nebo zeslabená místa v přízi apod. Proto se stále častěji na dopřádací stroje instalují systémy čištění a měření kvality příze.

Je třeba si ale uvědomit, že žádné zařízení pro kontrolu kvality příze nedokáže zlepšit kvalitu vypřádané příze. Toto zařízení pouze během procesu předení v reálném čase přízi kompletně kontroluje, v případě zjištění vady zastaví přísun vstupního materiálu a přeruší proces předení. Poté je vada odstraněna a proces předení je opět spuštěn. Rušivá vada je tak nahrazena méně rušivým zápletkem nebo jiným spojením konců příze.

Na rotorové a tryskové dopřádací stroje lze systém čištění příze instalovat poměrně snadno, jelikož výstupem z těchto strojů jsou křížové cívky, navíjené ve stacionárních navíjecích ramenech, které jsou určeny přímo pro další zpracování v tkalcovnách či pletárnách. V tomto případě je možné umístit čidlo na každou spřádací jednotku stroje, kontinuálně kontrolovat vyráběnou přízi a přerušit předení v případě výskytu rušivé vady, která překročí uživatelem zadané limity. Vhodným nastavením limitů lze docílit toho, že z příze budou odstraněny pouze takové vady, které by byly skutečně viditelné v hotové textilií.

Na prstencový dopřádací stroj zatím není možné přímo instalovat systém čištění příze, protože cívky s přízí rotují vysokou rychlostí a při případném přetrhu není snadné na spřádacím místě znovu proces předení obnovit. V tomto případě však vždy následuje operace přesoukání příze na křížovou cívku na soukacím stroji a na tento stroj lze již systém čištění příze nainstalovat.

Firma Rieter CZ s.r.o. je součástí švýcarského koncernu Rieter, který je světově vedoucím dodavatelem strojů pro přádelny a jejich komponent. Rieter CZ je dceřinnou společností koncernu Rieter a vyvíjí a vyrábí bezvřetenové a tryskové dopřádací stroje a dále posukovací stroje. Závod v Ústí nad Orlicí disponuje vlastním Design centrem, jehož úkolem je vývoj nových produktů a inovace stávajícího výrobního programu. V rámci Design centra bylo vytvořeno oddělení vývoje elektroniky, které koncentruje odborníky na různé oblasti elektroniky pro textilní stroje. Jde především o HW a SW vývoj řídicích systémů, vývoj čidel, návrh individuálních pohonů nebo řešení komunikací.

Jak již bylo zmíněno, kvalita příze je dnes velice důležitým faktorem při výrobě, prodeji a zpracování příze a systémy čištění příze se stávají nezbytnou součástí téměř všech dopřádacích strojů. Různé systémy čištění příze jsou známé a používány již celou řadu let, ale dříve se vždy jednalo o autonomní, složitá a drahá zařízení, která vyráběly a dodávaly specializované elektronické firmy. V tomto případě ovšem dochází k dublování hardwarových a softwarových prostředků, a tím k navyšování vývojových i výrobních nákladů. Instalace takovýchto autonomních zařízení je tedy nejen ekonomicky nevýhodná, ale obzvláště je v dnešní době ceněné a nutné i vlastnictví potřebného know-how.

Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto vyvinout v rámci Design centra vlastní Rieter čistič příze (Rieter Yarn Clearer- RYC), který by byl plně zintegrován do stávajícího konceptu elektroniky dopřádacího stroje. Jedním z cílů tohoto vývoje bylo zamezit dublování hardwarových prostředků a docílit tak značné úspory nákladů. Zároveň by bylo možné vyvinout, potřebám zákazníků přizpůsobit a optimalizovat algoritmy kontinuálního vyhodnocování kvality vypřádané příze.

Mým úkolem v týmu, který vyvíjel tento nový čistič příze, bylo řízení vývoje, stanovení koncepce, vytvoření zadání a specifikací, navržení potřebných algoritmů a částečně praktická realizace softwarových prostředků. V mojí disertační práci je popsáno řešení Rieter čističe příze, které je v určitých ohledech světově unikátní.

Cílem disertační práce je nejprve popsat a kategorizovat jednotlivé typy vad vyskytujících se na přízích vyráběných rotorovým nebo tryskovým předemím a dále analyzovat dostupné měřicí principy a postupy vhodné pro získání komplexní informace o kvalitě vypřádané příze během výrobního procesu.

Hlavní náplní práce je studie proveditelnosti a popis průmyslové realizace integrovaného čidla kvality příze se speciálním zaměřením na vyhledání a implementování vhodných matematických metod a algoritmů pro detekci vad a on-line měření kvality příze. Zvláštní pozornost je věnována periodickým vadám, nalezení speciálních algoritmů a metod výpočtu spektrogramů metodou, optimalizovanou podle možností použitého mikroprocesoru. Čidlo kvality příze musí kontinuálně kontrolovat vyrobenou přízi s cílem přerušit předemím v případě výskytu rušivé vady, která je následně odstraněna a proces předemím je obnoven.

Nezbytnou součástí je začlenění systému kontroly příze do celkové koncepce elektronického řízení dopřádacího stroje.

Teoretická část práce rovněž obsahuje srovnání jednotlivých metod vyhodnocení kvality příze z hlediska požadované přesnosti a dynamiky tak, aby bylo možno kvalitu příze vyhodnocovat on-line i při nejvyšších používaných rychlostech předemím.

## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

[25][26][27][28]

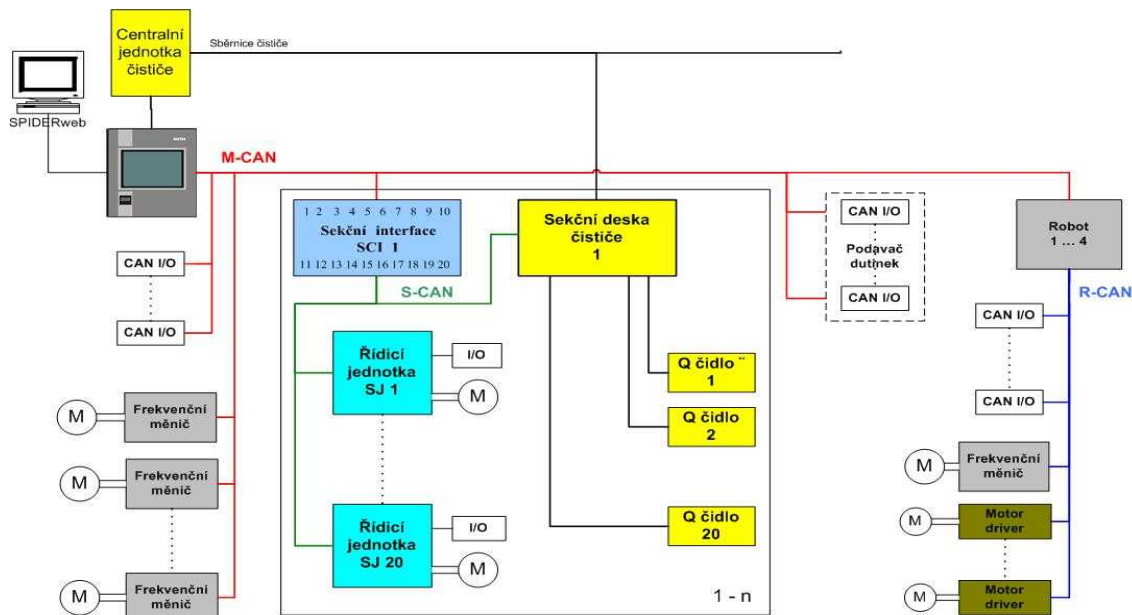
Automatizace a robotizace obslužných činností je u rotorových a tryskových doprřadacích strojů mnohem snadnější než u klasického prstencového doprřadání a jak už bylo zmíněno, lze u tohoto typu stroje technicky poměrně snadno on-line kontrolovat kvalitu vypřádané příže. Čidlo kontrolující kvalitu vypřádané příže je umístěno mezi spřadací jednotkou a odtahovými válečky, odvádějícími přízi k navíjecímu zařízení. V této oblasti je poloha příže stabilizovaná a pohybuje se konstantní rychlostí. Rotorové a tryskové předení je podstatně produktivnější než výroba příže na prstencovém doprřadacím stroji. Rotorové stroje pracují s více jak desetinásobnou a tryskové až s třicetinásobnou rychlostí, takže dosahované odtahové rychlosti jsou v oblasti až do 600 m/min. Pokud se má kontrolovat kvalita příže skutečně stoprocentně, je potřeba změřit minimálně každý 1 až 2 mm vypřádané příže, znamená to tedy vzorkovací a vyhodnocovací frekvenci v oblasti až 10 kHz.

### 2.1 Elektronické vybavení stroje

Měřicí a řídicí systémy na textilních strojích nejsou, na rozdíl od počítačových sítí, modulární, ale jsou sestavené pro konkrétní aplikaci s jednoúčelovým aplikačním programovým vybavením.

Textilní rotorový doprřadací stroj má v dnešní době více než 500 spřadacích míst, z každého místa je třeba snímat několik vstupních signálů a následně ovládat několik výstupů. Stroj má délku více než 60 metrů. Při centralizovaném řízení by to znamenalo několik tisíc vstupů a výstupů a více jak deset tisíc metrů kabelů. Z výše uvedených důvodů byl pro řízení stroje již v 80. letech zvolen distribuovaný systém řízení, který se i v dnešní době dále rozvíjí.

Dále bude stručně popsán systém řízení doprřadacích strojů tak, jak je používán u strojů firmy Rieter.



Obr. 1: Koncept řízení doprřadacího stroje

Centrální řídicí systém zajišťuje styk s obsluhou stroje (HMI – Human Machine Interface), komunikaci s ostatními subsystémy, plní různé centrální řídicí funkce, sbírá a vyhodnocuje data o průběhu předení na všech spřadacích jednotkách atd. Centrální řídicí systém stroje je obvykle připojen přes ethernet k nadřazenému sběru dat. Páteří celého systému je sběrnice CAN (M-CAN) přes kterou jsou propojeny ostatní subsystémy jako decentralizované vstupy/výstupy, frekvenční měniče, roboty a jednotlivé sekce stroje.

Elektronika každé sekce pro 20 spřádacích míst se skládá ze sekčního interface, jehož hlavním úkolem je routovat zprávy mezi M-CANem a sekčním S-CANem. Každé spřádací místo má potom svoji vlastní řídicí elektroniku, která inteligentně řídí celé spřádací místo. Hlavně vyhodnocuje stavy všech vstupů (čidla, senzory, tlačítka. .) a ovládá výstupy (magnety, ventily, signalizační prvky...), řídí jednotlivé motory spřádacího místa (krokové, BLDC, AC), zapřádání, předení, detekuje chyby...

Na Obr. 1 je znázorněno i nejčastější řešení integrace čističe příze do celkového konceptu. Na každém spřádacím místě je Q-čidlo měřící kvalitu příze. Tato čidla jsou propojena do Sekční desky čističe, která vyhodnocuje informace z čidel a posílá je do Centrální jednotky čističe. V případě výskytu vady příze je požadavek na přerušení předení poslán po sběrnici buď z Centrální jednotka čističe do Centrálního řídicím systému stroje anebo je Sekční deska čističe propojena sběrnici S-CAN se Sekční deskou stroje, případně má přímé výstupy, signalizující vadu příze a potřebu přerušení předení.

V této práci bude navrženo řešení s integrovaným Q-čidlem koncipované tak, že již nebude třeba Sekční deska čističe ani Centrální jednotka čističe, čímž dojde mimo jiné i ke značné úspoře výrobních nákladů.

## 2.2 Čističe příze

[1][2][3][4][5][6][7][8][9][11][12][13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24]

Tato rešeršní část disertační práce se zabývá podrobným přehledem dostupných čističů příze. Důraz je kladen zejména na podrobnější prozkoumání a zmapování situace na trhu. V tomto autoreferátu bude tato kapitola značně zkrácena.

### 2.2.1 Počátky čističů příze

Kvalita vypřádané příze byla velice důležitým kritériem již po 2. světové válce. Již v této době se u starých soukacích strojů obvykle příze vedla přes úzkou štěrbinu, která mechanicky nedovolila průchod silným místům, které by způsobily v látce optickou vadu.

Začátkem 50. let Peter Wilson vytvořil elektronický čistič příze s doutnavkou použitou jako zdroj světla, germaniovou fotonkou s průměrem 3mm použitou jako přijímač a modifikovaným elektromagnetickým relátkem pro přerušení předení. Tento čistič byl schopen zachytit menší vady, než do té doby používaný čistič mechanický.

První rotorový dopřádací stroj BD200 byl představen v roce 1967, ale teprve v roce 1984 byl vyvinut a poprvé instalován čistič příze na tento typ stroje. Od té doby uplynulo 26 let a za tuto dobu čističe zaznamenaly velký rozvoj a rozmach. Zatímco zpočátku čističe odstraňovaly z příze pouze základní hrubé vady a byly nasazovány sporadicky, dnes dokáží detekovat na přízi skoro neviditelné vady, které se projeví až ve skutečné tkanině. Zároveň je v současné době velká většina prodávaných strojů těmito čističi vybavena

### 2.2.2 Přehled čističů příze

V následném shrnutí aktuální situace na trhu bude brán ohled pouze na on-line čističe, tzn. čističe, kdy je čidlo instalované na každém spřádacím místě a kontroluje kvalitu vypřádané příze při předení a v případě vady se předení ihned přeruší a vada odstraní. Zároveň jsou zde uvedeny pouze čističe, dostupné pro rotorové, případně tryskové dopřádací stroje, nejsou zde zmíněny čističe pro soukací stroje.

#### 2.2.2.1. Uster Technologies

Tato firma specializovaná na měřicí zařízení pro textilním průmysl představila již na výstavě ITMA 1959 v Miláně první plně tranzistorový elektronický čistič příze USTER SPECTOMATIC. Tento čistič byl konstruován pro soukací stroje a používal pro měření kapacitní princip. V roce 1984 Uster Technologies předvedla svůj první elektronický čistič USTER POLYGUARD 3 pro rotorový dopřádací stroj. Firma Uster Technologies se zabývala kvalitou příze spoustu let a stala se postupně největším dodavatelem nejen laboratorních



přístrojů pro textilní laboratoře, ale i největším výrobcem on-line čističů pro rotorové doprřadací stroje. Čističe postupně zdokonalovala a v roce 1988 přišla s dokonalejší verzí UPG4, v roce 1993 s modelem UPG5 a v roce 1999 začala vyrábět systémy USTER QUANTUM CLEARER. Dohromady za celou dobu firma vyrobila více než 1,5 miliónu čidel pro rotorové doprřadací stroje firem Rieter, Schlafhorst, Savio, Elitex, Schubert a Salzer,...

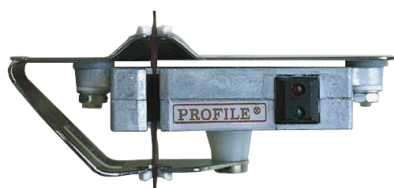


Obr. 2: Čidlo Uster Quantum

Uster Quantum 2 je poslední verze čističe této firmy. Čistič existuje ve variantě jak s optickým tak i s kapacitním čidlem. Uster Technologies je v dnešní době jediná firma nabízející obě varianty.

#### 2.2.2.2. Barco

Tato firma se zpočátku specializovala na výrobu rádií z amerických součástek a poté televizní techniku. V roce 1964 firma rozšířila svůj výrobní program a začala se zabývat vývojem řídicích systémů a čidel pro textilní průmysl. Toto zaměření ovšem nebylo pro firmu Barco nikdy tou rozhodující částí podnikání. V 80. letech uzavřela firma Schlafhorst s firmou Barco exkluzivní dohodu o vývoji a výrobě čističe příze pro rotorové stroje. Do té doby měla firma Uster se svým kapacitním čističem výsadní postavení na trhu. Barco přišlo s novým řešením a totiž použitím optických snímačů. Vznikl tak pro rotorové doprřadací stroje Schlafhorst čistič příze s označením Corolab. V 90. letech získala firma Barco povolení prodávat čistič s označením BarcoProfile i ostatním firmám.



Obr. 3: Čidlo BarcoProfile

Do dnešní doby vzniklo velké množství modifikací tohoto čističe. Poslední provedení je BarcoProfile BP8. Čistič je založen na „analogové technice“, kdy analogové signály ze 4 čidel jsou zavedeny do jednoho mikroprocesoru. 3 takovéto mikroprocesory (12 čidel) jsou umístěny na jedné desce označované Q-board, která zpracovává signály z čidel a výsledky posílá v digitální formě do centrálního řídicího systému. Tento optický čistič je možné nainstalovat i na Rieter rotorové doprřadací stroje.

#### 2.2.2.3. Loepfe

V roce 1955 byla založena ve švýcarském Weitzikonu firma Loepfe Brothers Ltd.. Tato firma se postupně stala významným výrobcem systémů zajišťujících kvalitu příze v oblasti předení a tkání. V oblasti předení se až do nedávné doby soustředila pouze na čištění prstencové příze na soukacích strojích. Od roku 1994 je firma součástí mezinárodní skupiny společností Barco Vision.

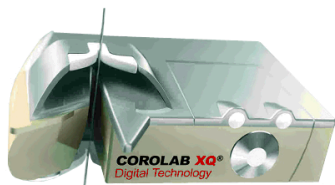


Obr. 4: Loepfe YarnMaster

Tato firma se nikdy nezabývala čističi pro rotorové doprřadací stroje. Poté, co po spojení převzala know-how firmy Barco, vystavila v roce 2007 svůj první čistič příze pro rotorové doprřadací stroje. Čidlo vychází z koncepce Barco. Čidlo měří průměr příze tak, že měří šířku stínu vytvořeného přízí na přijímací fotodiodě. Čidlo má označení YarnMaster 3N1. Čistič v sobě nemá mikroprocesor a celkový koncept je velice podobný systému Barcoprofile včetně vyhodnocovacích sekčních desek.

### 2.2.2.4. Oerlikon Corolab Q, XQ

Oerlikon Corolab Q a Corolab XQ je označení pro nové čističe určené pouze pro stroje Oerlikon Schlafhorst. Na většinu těchto strojů byly až do roku 2006 instalovány čističe Corolab firmy Barco. Nyní firma ale na svoje stroje nasazuje vlastní čističe pod označením Corolab Q a XQ. Na rozdíl od „společného“ Corolabu firmy Barco je tento čistič označován jako digitální, což v této podobě znamená, že analogový signál je zpracován a vyhodnocen přímo v samotném čidle. Čidlo má v sobě zaintegrovaný obvod ASIC a 20 MHz mikroprocesor. Výsledky jsou potom přes sběrnici CAN a Gateway posílány do Centrály čističe příze.



Obr. 5: Oerlikon Corolab

### 2.2.2.5. Shanghai ShangLu Electric

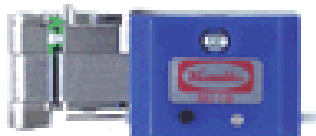
Jde o čínskou firmu, která se specializuje na vývoj a výrobu elektronických zařízení pro čínský textilní průmysl. Jejimi hlavními výrobky jsou elektronický čistič příze, počítadlo délky a analyzátor obrazu. V dnešní době vyrábí čistič příze SunLight 200 pro čínské rotorové dopřádací stroje. Jelikož čističe tohoto výrobce jsou nasazovány pouze na lokálních čínských strojích není o tomto čínském výrobcu zatím k dispozici dostatek podrobných informací.



Obr. 6: ShangLu SunLight 200

### 2.2.2.6. Keisokki

Japonská firma **Keisokki** se zabývá testovacími a laboratorními zařízeními pro textilní průmysl. Původně začínala díky technicko-obchodnímu spojení s firmou Uster Technologies. V roce 1983 ukázala svůj vlastní čistič a do dnešní doby představila několik verzí čističů pro soukací stroje. V současné době z oblasti čističů příze vyrábí optický a kapacitní čistič příze „Tri Chord Clearer flex“ pro soukací stroje Schlafhorst, Murata a Savio. Tato firma vyrábí také čistič příze pro tryskový dopřádací stroj Murata. Pro rotorové dopřádací stroje ale žádný čistič nevyrábí.



Obr. 7: Tri Chord Clearer flex

## 2.2.3 Porovnání čističů

Následující tabulka ukazuje porovnání základních vlastností nejvýznamnějších čističů příze pro rotorové dopřádací stroje.

Funkce	Firma	Uster	Barco	Loepfe	Oerlikon	Oerlikon
	Výrobek	Quantum 2	BP8	3N1	Corolab Q	Corolab XQ
Princip čidla	Princip	optický kapacitní	optický	optický	optický	optický
Základní čistič	Nopky	x	x	x	x	x
	Silná místa (krátká)	x	x	x	x	x
	Silná/Tenká místa (dlouhá)	x	x	x	x	x
	Zápředek	x	x	x	x	x
	Chyba pramene	x	x	x	x	x
	Chyba čísla příze	x	x	x	x	x
	Moiré	x	x	x	x	x
Klasifikace vad	x	x	x	x	x	
Kvalita příze	Nestejněměrnost příze (CV%)	x	x	x	x	x
	Imperfekce (IPI)	x	x	x	x	x
	Chlupatost	x	x	x		
	Spectrogram	x	x			

Tab. 1: Porovnání čističů příze

## 2.3 Principy měření kvality příze

[9][12][23][24][31][32][33][34]

Aby bylo možné monitorovat přízi a vyhodnocovat jednotlivé vady, je nutné převést tloušťku příze na elektrický signál. V současné době se používají pro převod tloušťky příze na elektrický signál dva základní principy měření: kapacitní a optický.

### 2.3.1 Kapacitní měřicí princip

Základem kapacitního snímače je dvouelektrový kondenzátor. V prostoru mezi dvěma paralelními kovovými elektrodami se působením střídavého napětí vytváří elektrické pole. Jestliže se v tomto poli pohybuje příze s proměnlivou tloušťkou, mění se tím dielektrikum a tudíž i kapacita měřicího kondenzátoru. Změna kapacity je závislá na množství vláken v přízi, na dielektrické konstantě zpracovávaného materiálu, ale také např. na obsahu vlhkosti v přízi. U kapacitního měřicího principu je výsledný signál úměrný hmotnostnímu průřezu příze.

Dielektrická konstanta bavlny  $\epsilon_r$  je 1,4 a voda má přibližně 80. Proto má vlhkost vloženého materiálu i lokální změny vlhkosti velký vliv na výsledky měření. Kapacitní snímače tedy musí být používány v klimatizovaných přádelnách (při doporučené teplotě 20°C a relativní vlhkosti 65%) a předkládaný materiál musí být stabilní.

Přesnost a citlivost měření ovlivňuje i tzv. činitel plnění kondenzátoru, tzn. poměr objemu měřené příze k celkovému objemu kondenzátoru. Jen pro činitele plnění do 10% lze říci, že změna kapacity kondenzátoru je proporcionální k množství příze v kondenzátoru. Výrobci kapacitních snímačů proto nabízejí a doporučují snímače, u kterých se liší velikost měřicí šterbiny podle čísla (průměru) vyprádané příze. Délka měřicí šterbiny zároveň ovlivňuje i citlivost a rozlišení snímače, protože výsledný signál je integrálem příze z celé měřicí šterbiny. Současné kapacitní snímače mají délku měřicí šterbiny 6-8 mm.

### 2.3.2 Optický měřicí princip

Základem optického snímače je vysílač, přijímač světla a difuzér pro rozptýlení světla. Přijímač světla poskytuje signál, který je úměrný množství přijatého světla. Jestliže je příze uvnitř měřicí zóny, je část světla absorbována přízí, čímž dojde ke snížení přijatého množství světla a tím i ke změně výstupního signálu.

U optického měřicího principu je výsledný signál úměrný průměru příze. Změny průměru příze způsobí proporcionální změny výsledného signálu.

Většina dnešních optických čističů příze má navíc integrovaný referenční přijímač mimo měřicí zónu, takže na něho dopadá světlo neovlivněné přízí a ostatními vnějšími vlivy. To umožňuje čistič nakalibrovat a redukovat vlivy vnějšího světla, znečištění či stárnutí světelného vysílače.

### 2.3.3 Opticko-digitální měřicí princip

Již v 80. letech minulého století firma Uster patentovala použití řádkového optického senzoru pro měření průměru příze (L.[33]). Tehdejší stav techniky však skutečnou realizaci neumožnil. Teprve společnost RIETER však využila příležitosti, kterou poskytl bouřlivý vývoj digitálních optických prvků a jako první a zatím jediná použila tento opticko-digitální princip pro průmyslovou realizaci plně digitálního čističe příze. Opticko-digitální měřicí princip vyhodnocuje, stejně jako klasický optický princip, průměr příze. Měřenou veličinou není ovšem celkové množství světelné energie dopadající na snímač, ale přímo geometrická šířka stínu příze promítaného na řádkový senzor. Výstup z tohoto senzoru je již přímá digitální informace o počtu osvětlených a zastíněných pixelů.

Světlo emitované zdrojem světla je optickou čočkou upraveno tak, aby intenzita světla dopadajícího na senzor byla po celé jeho aktivní délce konstantní. Přijímačem světla je řádkový digitální senzor, který obsahuje množinu velmi malých světlo-citlivých přijímacích bodů tzv. pixelů. Tyto pixely jsou uspořádány do jedné řady a protože se příze pohybuje ve

směru kolmém na tuto řadu, promítá se její stín na tento aktivní řádek senzoru. Délka zastíněného úseku (tj. počet zastíněných pixelů) odpovídá okamžitému průměru příze, která se nad ním právě nachází. K vyhodnocení průměru proto stačí odlišit zastíněné pixely od osvětlených a převést tuto informaci v digitální podobě k dalšímu zpracování.

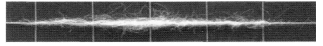
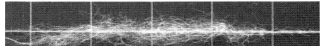


Ve srovnání s klasickými optickými systémy přináší tento princip nové možnosti především v přesnosti měření průměru příze, odolnosti proti rozptylu parametrů a stárnutí součástek, odolnosti proti vlivu vnějšího osvětlení a hlavně snížení nepříznivého vlivu prachu na přesnost měření.

### 2.3.4 Porovnání měřicích principů

Všechny výše uvedené měřicí principy se v dnešních senzorech, vyhodnocujících kvalitu vypřádané příze, skutečně používají. Samozřejmě se liší svými vlastnostmi, přičemž každý z nich má své výhody a nevýhody především s ohledem na vnější vlivy, působící při měření. Doposud není znám takový měřicí princip, který by bez kompromisů splnil všechny požadavky, kladené na tato zařízení.

Historicky první systémy byly založeny na kapacitním principu. Krátce po kapacitních systémech se ale objevily i systémy optické a jejich podíl neustále roste. Konečným posuzovatelem kvality textilního produktu je lidský zrak a optické měření je z tohoto pohledu výhodnější. Některé rušivé vady jsou totiž viditelné až v hotové textilii, a protože lidský zrak vnímá změny průměru a nikoliv hmotnosti příze, je zřejmé, že jejich hlavní příčinou jsou především průměrové odchylky příze. Další skutečností, která hovoří ve prospěch optického měření je i charakter vad. Převážná většina rušivých vad je tvořena vláknými nálety, nespředenými shluky vláken či tzv. připředky. U těchto vad je hustota vláken výrazně nižší než je tomu u příze, a proto hmotnostní nárůst vady je menší, než tomu odpovídající nárůst průměru.

Následující tabulka shrnuje rozdíly vlastností jednotlivých měřicích principů (L.[9]).

Vlastnost	Kapacitní princip	Optický princip
Výstupní signál	Střední hodnota hmoty, průřezu příze, počtu vláken v měřicí zóně.	Závislý na průměru příze, vizuálním dojmu
Efektivní vyhodnocovací délka	6-8mm	Optický - 3mm
<b>Vyhodnocení vady</b>		
Normální vada 	Vada je vyhodnocená přesně dle navýšení průřezu (hmotnosti) příze	Vada je vyhodnocená přesně dle navýšení průměru příze
Objemná (načechraná) vada 	Jelikož počet přidaných vláken není extrémně vysoký, je tato vada vyhodnocena jako relativně nevýznamná	Objemná vada pohltí velké množství světla a je tudíž vyhodnocena jako významná
Krátká vada (3mm) 	Vada je zprůměrovaná přes celou měřicí zónu a je tedy vyhodnocena s poloviční velikostí	Vada je vyhodnocená přesně dle navýšení průměru příze
Kompaktní (hustá) vada 	Vada je vyhodnocená přesně dle navýšení průřezu příze. Vzhledem k velkému počtu vláken v průřezu absorbuje silné místo velké množství barvicí látky a ve výsledném produktu bude vada viditelná	Kompaktní vada absorbuje malé množství světla. Nárůst průměru bude vyhodnocen jako nevýznamný ve srovnání s nárůstem průřezu.
<b>Vnější prostředí</b>		
Materiál	Většinu materiálů lze měřit. Přízi s vodivými vlákny nelze změřit.	Většinu materiálů lze měřit. Problémy činí reflexní materiály.
Vlhkost vzduchu a příze	Změna vlhkosti může způsobit neopodstatněné přerhy	Změna vlhkosti neovlivňuje měření
Znečištění	Malý vliv jemného prachu	Vliv jemného prachu i hrubých nečistot
Vnější světlo	Vnější světlo neovlivňuje měření	Velká intenzita vnějšího světla může způsobit nefunkčnost čidla

Tab. 2 Porovnání vlastností měřicích principů

### 2.3.5 Optický senzor MSBF032

Společnost RIETER komerčně realizovala jako první a zatím jediná čistič příze s využitím opticko-digitálního principu. Pro tento účel byl ve spolupráci se švýcarskou firmou SWATCH a její vývojovou organizací ASICentrum Praha speciálně vyvinut jednořádkový optický CMOS senzor MSBF032 (L.[31]), schopný měřit tloušťku příze v rozsahu 0.15 to 6.3 mm. Výstup z tohoto senzoru je digitální informace o počtu zastíněných pixelů, který je přímo úměrný optickému průměru příze.

#### Parametry optického senzoru MSBF032

- Počet pixelů: 1024
- Velikost (rozteč) pixelu: 5 x 200  $\mu\text{m}$
- Rozteč pixelů: 7  $\mu\text{m}$
- Rozměry čipu: 7,84mm x 2,11mm
- Světelná citlivost: viditelné spektrum
- Nominální měřicí rychlost: 20 kSnímků/s
- Rozměry čipu: 7,84mm x 2,11mm
- Napájecí napětí: 4,5V až 5,5V
- Pracovní teplota: 0 až +50°C
- Interní krystalový oscilátor nebo externí hodiny
- Interní komparátor analogových pixelů s externí referencí
- Integrovaná vyhodnocovací logika
- SPI jako 8-bit sériový komunikační interface (max. frekvence 3 MHz)
- 1 $\mu\text{m}$  CMOS A/D technologie

Každý pixel se chová v podstatě jako samostatný optický přijímač s analogovým výstupem, který individuálně vyhodnocuje intenzitu na něho dopadajícího světla. Výstupní signál každého pixelu je následně porovnán v komparátoru s pevně určenou komparační úrovní. Velikost komparační úrovně pak vymezuje hranici mezi zaručeným stínem vyvolaným přízí a ostatními osvětlenými pixely nebo polostíny způsobenými například prachem. Při znalosti příčného rozměru pixelů (7 $\mu\text{m}$ ) je snadné určit průměr příze pouhým sečtením zastíněných pixelů. Čidlo tak pracuje jako přesné optické měření průměru příze vložené do snímací zóny.

Pixely s intenzitou osvětlení v rozsahu od plného světla až po prahovou úroveň jsou vyhodnoceny jako nezastíněné a pixely pod touto prahovou úrovní jako zastíněné přízí. Tím se tyto původně analogové signály převedou na dvouhodnotový (digitální) signál, který je dále zpracován v digitální části senzoru.

Vyhodnocením všech pixelů je v definovaném okamžiku získán změřený vzorek úměrný okamžitému průměru příze. Vzorek v daném okamžiku zaznamená světelný řez příze na délce 200 $\mu\text{m}$  (podélný rozměr pixelu řádkového snímače). Úkolem vlastního senzoru je načíst a zpracovat v krátkém čase velké množství vzorků (světelných řezů) tak, aby bylo dosažena dostatečná přesnost měření. V praxi se jako dostačující pro všechny odtahové rychlosti příze ukázala konstantní perioda snímá ní 20 000 vzorků za 1s. Například pro odtah 240m/min je tedy na každém 1mm délky příze změřeno celkem 5 vzorků průměru příze, pro maximální rychlost 600m/min jsou změřeny 2 vzorky na každém 1mm příze..

Senzor MSBF032 je velice důležitá samostatně pracující součást čidla. Integruje v sobě optický, analogový a digitální vyhodnocovací blok. Potřebné informace (dle předchozí kapitoly) mezi senzorem a mikrokontrolérem se vyměňují přes komunikační rozhraní SPI. Z hodnot vzorků od posledního vyčtení přes komunikační rozhraní SPI je neustále senzorem propočítáván tzv. průměrný milimetrový vzorek, průměrná hodnota polohy příze na senzoru a počet vzorků od posledního vyčtení. Průměrný milimetrový vzorek, jako nejdůležitější informace, je používán při dalším vyhodnocování v připojeném mikroprocesoru.

### 3 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je popsat technické řešení a následnou realizaci systému pro online kontrolu kvality příze vypřádané na rotorových a tryskových dopřádacích strojích s využitím opticko-digitální metody, popsané v kapitole 2.3.3. V práci bude kromě hardwarového řešení popsána i řada softwarových algoritmů, použitých při vyhodnocení kvality příze.

Základní funkcí čističe příze je kontinuální kontrola vyráběné příze a přerušení předení v případě výskytu rušivé vady, která překročí uživatelem zadané limity. Vhodným nastavením limitů lze docílit toho, že z příze budou odstraněny pouze takové vady, které by byly skutečně viditelné v hotové textilii. Jako dodatečné jsou v poslední době do čističů příze implementovány i funkce, vyhodnocující i další parametry příze, které nejsou přímo spojeny s okamžitým přerušováním předení a slouží spíše ke statistickému sledování provozu. Rovněž těmito funkcemi se předkládaná práce zabývá.

Různé systémy čištění příze jsou známé a používány již řadu let, ale vždy se jedná o autonomní, složitá a drahá zařízení. Společnost Rieter jako první na světě vyvinula a jako jediná prakticky používá unikátní opticko-digitální čistič příze, který je plně integrovaný do stávajícího konceptu elektroniky dopřádacího stroje. Toto řešení má výhodu v jednoduchosti a nižších nákladech, protože nedochází k dublování hardwarových prostředků instalovaných na stroji jako jsou napájecí zdroje, kabeláž, ovládací panely,.... Integrované čidlo kvality příze je kompaktní systém se zabudovaným vyhodnocováním vad příze a s definovaným komunikačním rozhraním pro připojení nadřazeného systému. Mimo opticko-digitálního senzoru je nejdůležitější částí čidla mikroprocesor, který zajišťuje základní měřicí funkci čidla, změřená data zpracovává, vyhodnocuje a rozhoduje o přerušení předení v případě překročení nastavených limitů. Přes komunikační sběrnici přijímá a vysílá data z/do nadřazeného systému. Jednou z nejdůležitějších částí čidla jsou softwarové algoritmy vyhodnocující kvalitu příze.

Čidlo musí pro všechny druhy přízí vyhodnocovat a detekovat v dnešní době standardní vady, jako krátká a dlouhá silná místa, dlouhá slabá místa, dále vady předlohy (pramene) a čísla příze, a kontrolovat kvalitu zápledek. Proto se v této části práce zaměřím na nalezení a implementování optimálních algoritmů pro detekci standardních vad v přízi.

V přízi se ovšem objevují i malé periodické vady. Tyto vady jsou většinou tak malé, že je standardní měřicí kanály nezachytí, ovšem ve výsledné tkanině či pletenině jsou díky své periodičnosti značně rušivé. Jednou z nich je periodická vada moiré, která je nejčastější vadou u rotorového stroje. Tato vada vzniká nestejným usazením nečistot v drážce rotoru. Je třeba ji zachytit co nejdříve po jejím vzniku, a proto je nutné pro její detekci aplikovat speciální algoritmus. Pro detekci ostatních periodických vad je třeba vytvořit speciální měřicí kanály. Jako nejvhodnější se ukazuje použití spektrogramů délkového průměru příze v celém vlnovém spektru. Periodická vada se tak ve spektrogramu projeví jako „komín“ na určité vlnové délce. Výpočet spektrogramů je pro vyhodnocovací jednotku výpočetně velmi náročný a bude nutné najít nejvhodnější metodu výpočtu a optimalizovat ji podle možností použitého mikroprocesoru s ohledem na vstupní data z měřicího senzoru.

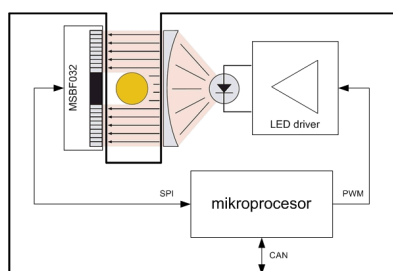
Dalším úkolem čidla je měření kvality příze, což znamená kontinuální měření a vyhodnocování nestejnosti příze, případně dalších, dlouhodobě sledovaných parametrů.

## 4 PŘEDMĚT ŘEŠENÍ

### 4.1 Koncepce čističe příze

#### 4.1.1 Uspořádání čističe příze

Koncepce čističe je založena na použití optického senzoru MSBF032. Pro realizaci funkčního čističe je ovšem nutné ho doplnit o další součástky a mechanické komponenty. Na Obr. 8 je blokově znázorněno technické řešení Rieter čističe na základě opticko-digitálního principu (bez podpurných obvodů jako jsou napájecí zdroje, signalizační a detekční prvky atd.). Mimo optického senzoru je nejdůležitější částí čidla mikroprocesor. Mikroprocesor je propojen s optickým senzorem přes komunikační sběrnici SPI, přes kterou získává m.j. informace o šířce stínu a zároveň po ní posílá do senzoru nezbytná nastavení. Mikroprocesor dále zajišťuje zpracování naměřených dat, změřená data vyhodnocuje a přes komunikační sběrnici CAN přijímá a vysílá data z/do nadřazeného systému. Z uvedeného blokového schématu je patrné, že prakticky veškerá funkčnost a inteligence čidla je realizována prostřednictvím softwarových algoritmů. Právě těmto algoritmům je věnováno těžiště této práce.

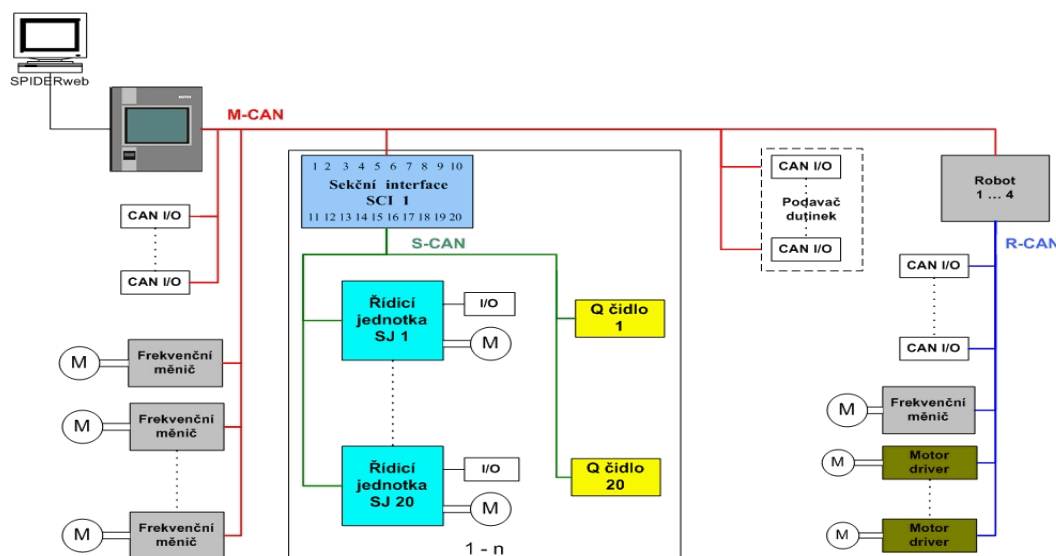


Obr. 8: Uspořádání čističe příze

Obr. 9: RYC - Rieter Yarn Clearer

#### 4.1.2 Integrace do elektronického vybavení stroje

Základní elektronický koncept stroje byl popsán v kapitole 2.1. Na Obr. 10 je naproti tomu znázorněno nové řešení s integrací čističe příze do celkového konceptu. Na každém sprádacím místě je inteligentní Q-čidlo měřící kvalitu příze. Tato čidla jsou připojena přímo na sekční S-CAN, čímž dojde k úspoře sekčního interface čističe a centrální jednotky čističe. V případě že čistič příze zjistí vadu příze pošle se pouze po této sběrnici příkaz pro přerušení předění na příslušném sprádacím místě. Po stejné sběrnici jsou posílány nastavované parametry pro čistič a naopak jsou sbírány statistické informace z čidel. Pro dialog s operátorem, jako je nastavování a kontrola parametrů, zobrazení statistických dat atd., je použit centrální řídicí systém.



Obr. 10: Integrace Čističe příze do elektronického vybavení stroje

## 4.2 Detekce, vyhodnocování a třídění vad

[29][30][57][58]

### 4.2.1 Snímání příze

Jak již bylo uvedeno, poskytuje optický senzor výstupní digitální signál, který je proporcionální k průměru příze. Tento signál je poté procesorem vyčítán, zpracováván a každý 1mm vyprádané příze je vyhodnocován. Vyčítání a vyhodnocování je synchronizováno s rychlostí odtahování příze.

Měření průměru příze je jedním z hlavních úkolů čidla kvality příze. Jestliže budeme uvažovat válcovou přízi s rovnoměrnou hustotou, platí pro teoretický model (R.4.2.1-1):

$$m = \frac{1}{4} * \pi * d^2 * l * \rho, \text{ kde } m \text{ je hmotnost, } d \text{ průměr, } l \text{ délka a } \rho \text{ hustota příze.}$$

Číslo příze  $N_{TEX}$  vyjadřuje váhu 1km příze v gramech. Po dosazení dostaneme teoretický vzorec pro výpočet průměru příze:

$$d_{TEOR} = 0.0357 * \sqrt{\frac{N_{TEX}}{\rho}} \quad (R.4.2.1-2)$$

Hustota příze je pro bavlnu  $\rho=1.5$ , pro polyester  $\rho=1.4$  a pro polypropylen  $\rho=1.1 \text{ g/cm}^3$ .

Ve spřádacím procesu se původně paralelní vlákna zakrucují, čímž vzniká příze. Zákrut významně ovlivňuje hustotu příze a průměr příze je tedy značně závislý na lineární a objemové hustotě příze.

Mnoho výzkumných studií bylo věnováno odhadu průměru příze podle vyprádaných parametrů. Ve studii (L.[29]) z roku 1993 El. Moghazy a kol. uvádějí empirické výrazy pro odhad průměru příze. Pro průměr rotorové příze dle této studie platí:

$$d_{REAL} = -0.16155 + \frac{1.951}{\sqrt{N_e}} = -0.16155 + 0.08029 * \sqrt{N_{TEX}} \quad (R.4.2.1-3)$$

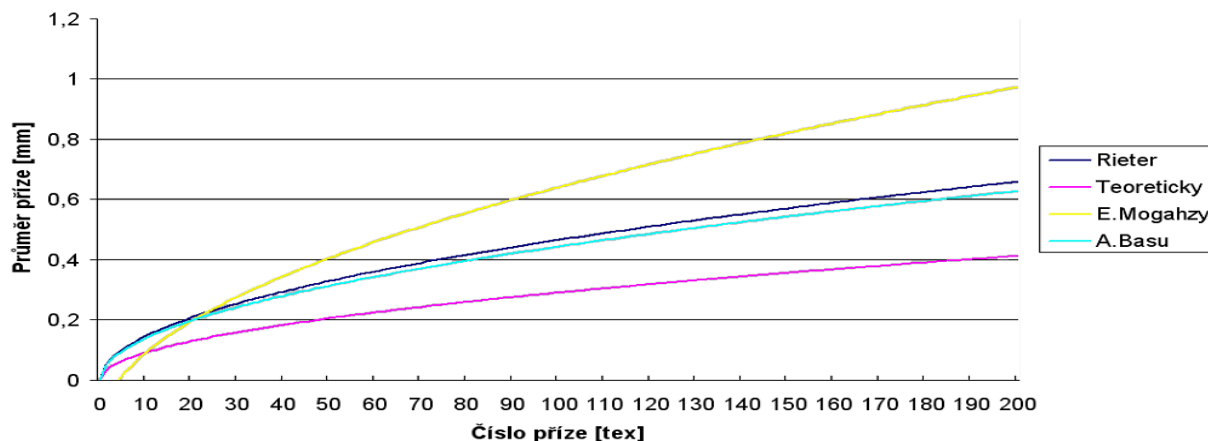
V roce 2003 A. Basu a kol. uveřejnil ve své studii (L.[30]) výraz:

$$d_{REAL} = \frac{1.08}{\sqrt{N_e}} = 0.04444 * \sqrt{N_{TEX}} \quad (R.4.2.1-4)$$

Ze změřených průměrů jednotlivých přízí z rotorového stroje BT923 se jeví jako nejbližší realitě aproximace výrazem:

$$d_{REAL} = K * d_{TEOR}, \text{ kde } K=1.6, \text{ takže } d_{REAL} = 0.057 * \sqrt{\frac{N_{TEX}}{\rho}} \quad (R.4.2.1-5)$$

V následujícím grafu je vidět rozdíly mezi jednotlivými výpočty průměrů příze v závislosti na čísle příze  $N_{TEX}$ :



Obr. 11: Průměr příze v závislosti na jejím čísle

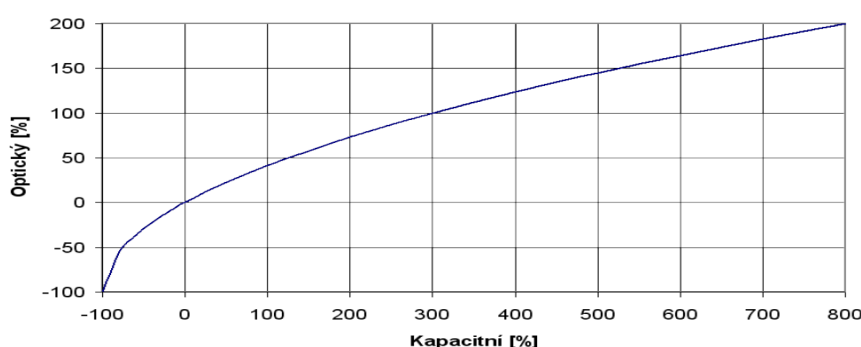


## 4.2.2 Vyhodnocování signálu ze senzoru

Čidlo je v praxi používáno pro různé tloušťky příze a změřený průměr je značně ovlivněn i dalšími parametry, jako je zákrut, vypřádaný materiál, ... Průměr příze se může lišit dokonce i na jednom stroji při stejných parametrech. Ze senzoru MSBF032 je sice vyčtena absolutní hodnota průměru příze, ale pro následné vyhodnocení a zařídění základních vad v přízi je vhodnější použít relativní změnu tloušťky příze vztaženou k „základní“ přízi (tzv. referenční hodnotě). Absolutní průměr bude použit jen pro některé vady a kvalitativní parametry příze. „Základní“ příze je v tomto modelu tedy definována hodnotou 0%, nepřítomnost příze v čidle znamená -100% a když se příze pohybuje v měřicí zóně, odpovídá výstupní signál změnám tloušťky příze od základní příze.

Výše uvedený systém relativního měření a vyhodnocování vad je platný pro optický ale i kapacitní měřicí princip. Procentuální změny ale mají u každého principu jiný význam a nabývají při stejných odchylkách v přízi jiných hodnot. Odchylka odpovídá v případě kapacitního měřicího principu změně hmotnostního průřezu a v případě optického principu změně průměru příze.

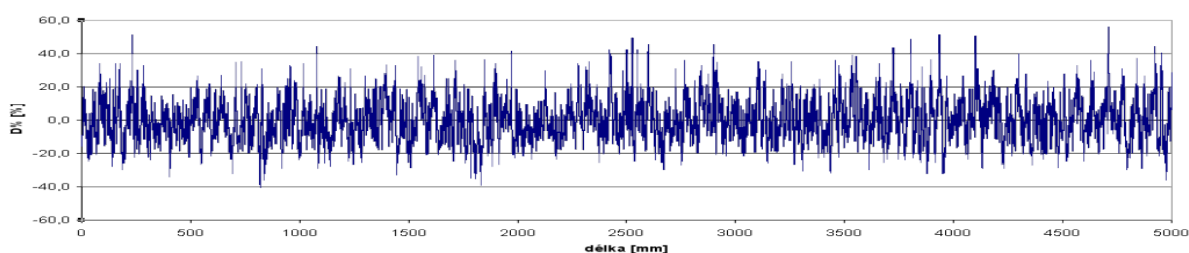
Teoretický přepočítání odchylek od základní příze je uveden na následujícím obrázku:



Obr. 12: Přepočítání nastavení odchylek kapacitního a optického principu

## 4.2.3 Základní vyhodnocování vad

Každá vada příze je definována zesílením průměru příze, které je v procentech vztaženo k referenční hodnotě a délkou tohoto zesílení. Na Obr. 13 je zobrazen typický signál příze na délce 5m. Z obrázku je patrný především velký šum v signálu způsobený především nerovnoměrností a chlupatostí příze a dalšími vlivy jako je proměnlivé sprádací napětí.



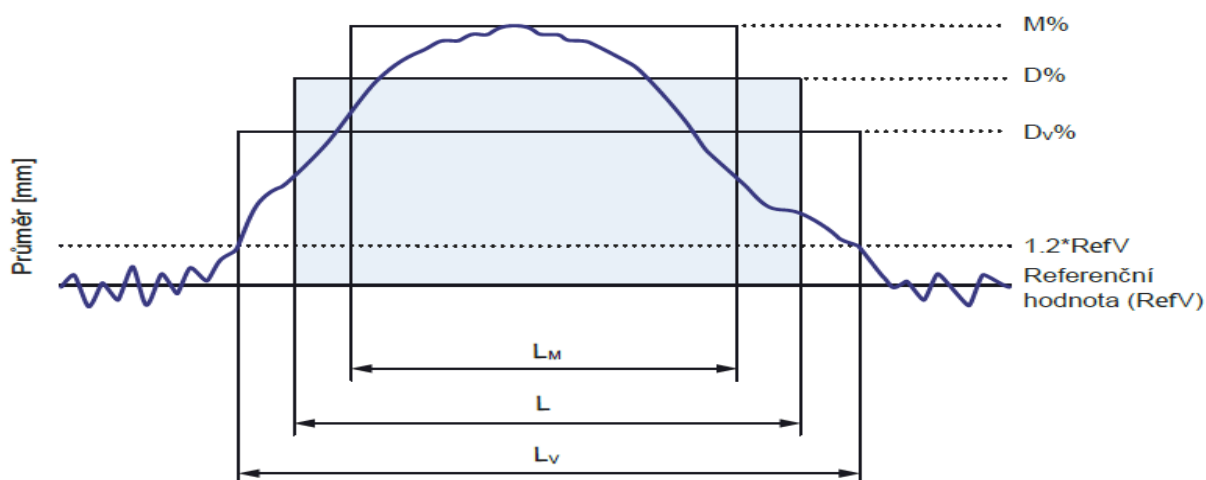
Obr. 13: Průběh normální příze

S ohledem na tento velký šum, je nutné vymezit tzv. oblast šumu, ve které zesílení či zeslabení v porovnání s referenční hodnotou není považováno za vadu. Experimentálně byla oblast šumu stanovena na  $\pm 20\%$  od referenční hodnoty. Za začátek vady je tedy považován okamžik, kdy průměr příze překročí stanovenou oblast šumu a konec vady je okamžik, kdy se průměr příze vrátí zpět do oblasti šumu. Po ukončení bude každá vada popsána dvěma parametry: odchylkou průměru příze  $D\%$  a délkou  $L$ . Pro popis vady jsou výrobci čidel používány různé parametry. Např. Barco definuje délku vady ( $L_V$ ) jako délku, po kterou je průměr příze mimo mez šumu a velikost vady ( $D_V\%$ ) jako průměrnou odchylku od referenční hodnoty na této délce. Uster definuje velikost vady ( $M\%$ ) jako maximální odchylku a délka vady ( $L_M$ ) je měřena v polovině velikosti maximální odchylky.

Velký počet pokusů a testů ukázal, že ani jeden z výše uvedených způsobů popisu vady není ideální a vždy záleží na konkrétním tvaru vady a použitém měřicím principu. Každý systém má své výhody a nevýhody. Řešení firmy Uster, které jako velikost vady bere maximální odchylku, vychází historicky z kapacitního měřicího principu. Krátká silná vada má většinou méně zákrutů než standardní příze a tudíž je opticky načechnější. Kapacitní měřicí princip v tomto případě změří menší zesílení než je vidět v přízi. V tomto případě je snaha preferovat a zvýšit popisující odchylku na úkor délky. Zároveň tento popis vady není vhodný pro delší vady, které na délce mění zřetelným způsobem zesílení.

Naproti tomu druhý uvedený způsob preferuje délku vady na úkor odchylky. V některých případech je tedy popisující odchylka menší než skutečnost a systém je méně citlivý, každopádně je třeba zdůraznit, že se vždy spíše jedná o subjektivní hodnocení.

Zapojením několika textilních technologií a odborníků z přádelen byl nakonec stanoven pro popis vady kompromis, kdy vada je dle Obr. 14 popsána odchylkou  $D\%$  a délkou  $L$ .



Obr. 14: Popis základní vady v přízi

Odchylka  $D\%$  je zde stanovena jako aritmetický průměr maximální odchylky  $M\%$  a průměrné odchylky  $D_v\%$ .

Délka vady  $L$  je obdobně aritmetický průměr délky  $L_v$  a  $L_m$ .

Za předpokladu, že platí  $D_v\% \cdot L_v = M\% \cdot L_m$ , tedy že „výkon“ vady je shodný, můžeme definovat:

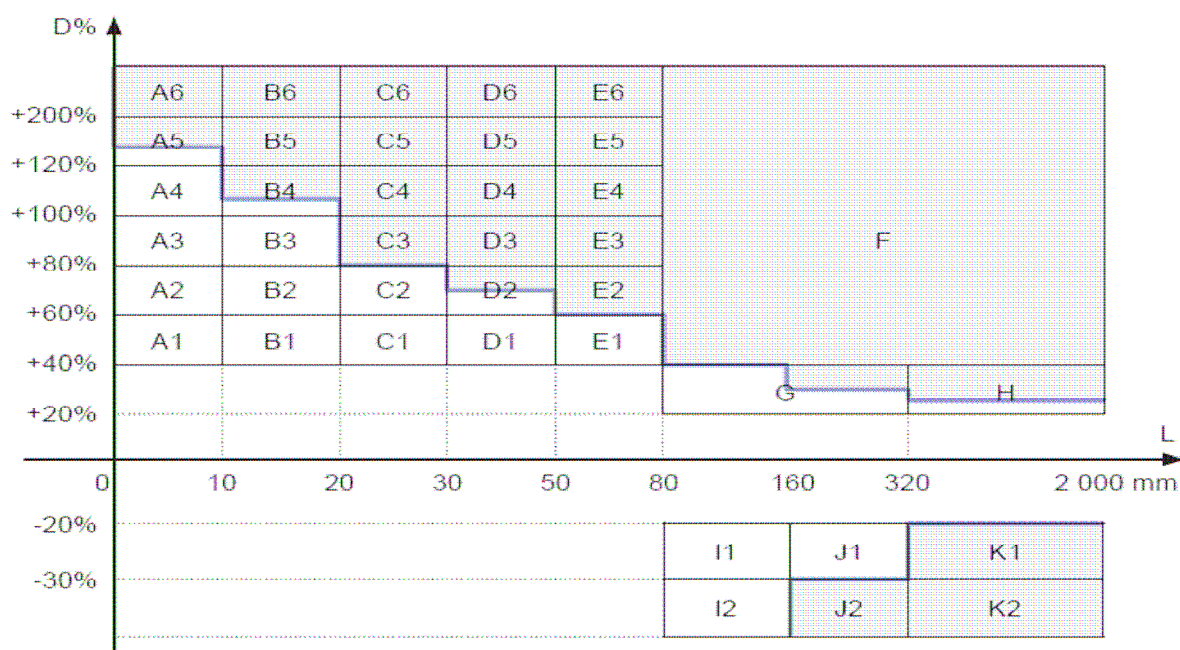
$$D\% = \frac{M\% + D_v\%}{2} \quad (\text{R.4.2.3-1})$$

$$L = \frac{L_v + L_m}{2} = \frac{L_v + \frac{D_v\% \cdot L_v}{M\%}}{2} = \left(1 + \frac{D_v\%}{M\%}\right) \cdot \frac{L_v}{2} \quad (\text{R.4.2.3-2})$$

Tento nejjednodušší algoritmus platí pro krátké silné vady (N a S), pro ostatní vady je třeba aplikovat dodatečné filtrace.

#### 4.2.4 Základní třídění vad

Zjištěná vada příze je poté podle odchylky  $D\%$  a délky  $L$  zatříděna do jednotlivých tříd klasifikační matice (Obr. 15). Klasifikační matice je přepočítaná a rozšířená podoba „kapacitní“ matice Uster Classimat, která je používaná u laboratorních přístrojů této firmy. Rozšíření spočívá v jemnějším dělení sloupců dle odchylek  $D\%$ , jemnějším dělení v oblasti 20 až 80mm a 80 až 320mm. Zatímco v matici Classimat je možné vady zatřídit do 23 různých polí, matice Rieter jich obsahuje celkem 39.



Obr. 15: Klasifikační matice

Pro čistič lze dle požadavků na kvalitu příze nastavit příslušnou čisticí křivku. Čisticí křivka se nastavuje čisticími body jako procentuální odchylky průměru příze od referenční hodnoty ve vztahu k délce jednotlivých vad. Systém umožňuje nastavit čisticí křivku tak, aby vyhovovala každému zákazníkovi a jeho požadavkům na kvalitu. Nejčastěji je ale voleno nastavení, kdy délky zůstávají shodné s délkami v matici a mění se procentuální odchylky. Čidlo potom jako nepřijatelné vady prohlásí vady v modré oblasti matice, tzn. nad čisticí křivkou. Jelikož do matice jsou zařazeny všechny vady bez ohledu na to, zda splňují čisticí limity či nikoli a obě skupiny jsou pro každé pole ukládány, lze potom jednoduchým způsobem posoudit přísnost nastavení čisticí křivky nebo odhadnout změnu počtu přetrhů při změně čisticí křivky.

Pokud vyhodnocená vada dosáhne nastavené hranice, je vyhodnocena jako nepřijatelná vada kvality příze a spřádací proces je přerušen. Dle délky vady se vady dále rozlišují na:

Typ vady	Délka vady	Pole matice
Nopek N	1-10mm	A1-A6
Krátká vada S	11-80mm	B1-E6
Dlouhá silná vada L	81-2000mm	F,G,H
Dlouhá tenká vada T	81-2000mm	I1-K2

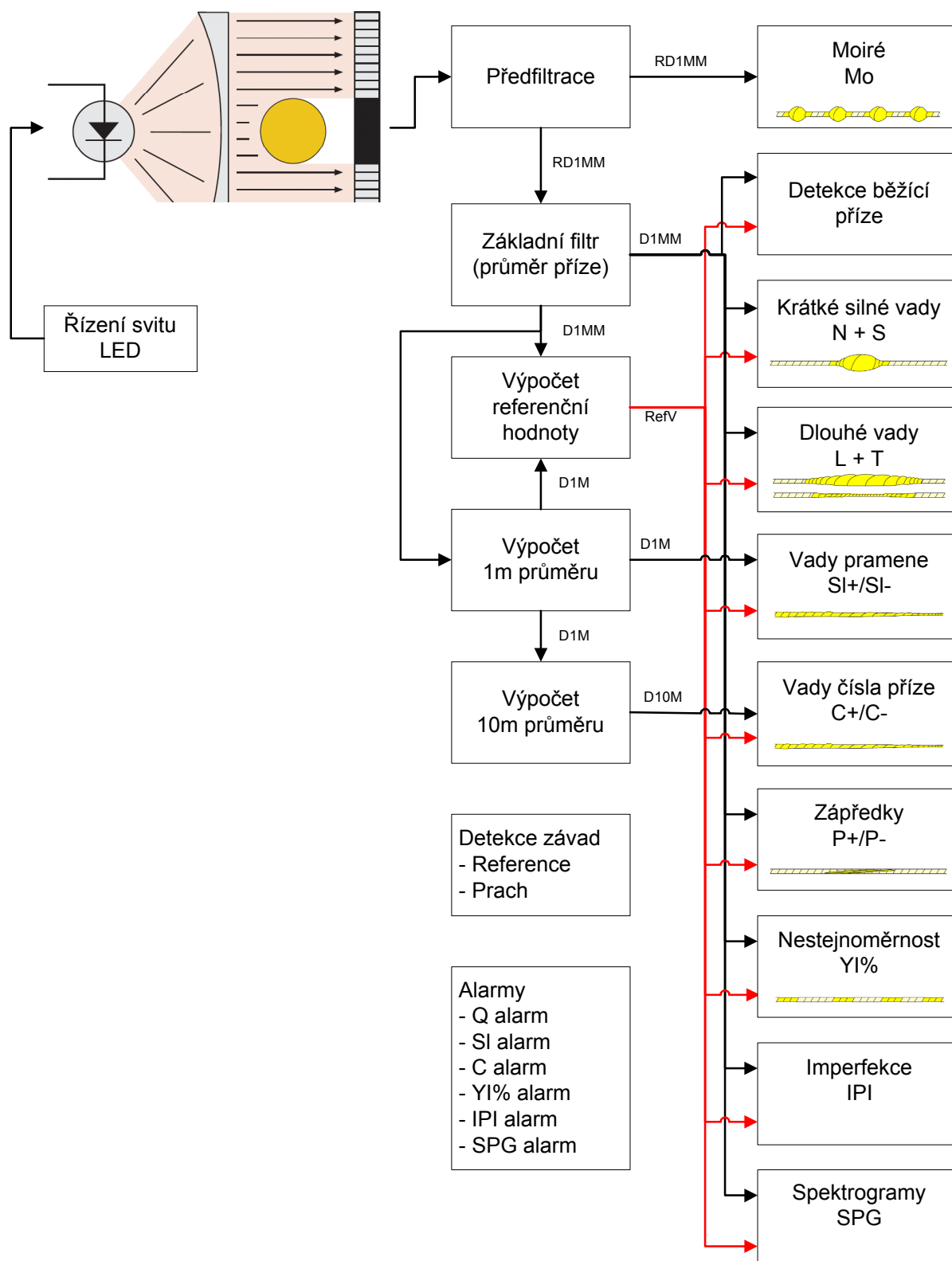
Tab. 3 Typy vad dle délky

Nastavení čisticí křivky by mělo být vždy optimální pro plánované použití vyrobené příze, což v praxi znamená určitý kompromis mezi přísností nastavení a využitím (užitkovým výkonem) stroje. Optimální nastavení je takové, které odstraňuje z příze pouze rušivé vady, které jsou viditelné v hotovém zboží a snižují jeho kvalitu. Jestliže nastavením přísnějších parametrů než je třeba dosáhneme stavu, kdy jsou z příze odstraňovány i vady, které by nezhoršovaly kvalitu hotové textilie, potom je takové nastavení zbytečně přísné. Při tomto přísném nastavení se zvyšuje počet přetrhů a dochází ke ztrátám ve výrobě příze. Je nutné si uvědomit, že každé nucené přerušování znamená vložení dalšího zápředku do příze. I když jsou zápředky kvalitní, vždy představují určité zesílení a tím v podstatě i další vadu v přízi. V žádném případě by neměla nastat situace, kdy zápředek představuje srovnatelnou nebo dokonce větší vadu, než byla původně zachycená vada příze.

### 4.3 Vyhodnocovací algoritmy

Navržení vyhodnocovacích algoritmů je věnována stěžejní část práce. Jejich podrobné odvození je uvedeno v disertační práci. V tomto autoreferátu jsou v některých kapitolách vynechána odvození a jsou uvedeny pouze výsledné postupy.

#### 4.3.1 Blokové schéma



Obr. 16: Blokové schéma vyhodnocení vad

### 4.3.2 Předfiltrace

První předfiltrace probíhá automaticky uvnitř senzoru MSBF032. Senzor v této aplikaci běží s konstantní vzorkovací frekvencí 20 000 vzorků za 1s, vypočítává ze změřených hodnot průměrnou hodnotu a připojený mikroprocesor, v němž se provádí další zpracování, taktuje podle skutečné odtahové rychlosti příze vyčítání milimetrových vzorků přes sběrnici SPI. Vyčítací frekvence je tedy proměnlivá, závislá na odtahové rychlosti a je stanovena tak, aby byl ze senzoru vždy vyčten průměrovaný milimetrový vzorek. Milimetrový vzorek  $RD1MM$  je vždy vypočten z  $n$  hodnot vzorků  $D_i$  od posledního vyčtení přes SPI.

$$RD1MM = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (R.4.3.2-1)$$

Počet vzorků  $n$  je tedy taktéž proměnlivý a je závislý na vzorkovací frekvenci  $VF$  [vzorek/s] a odtahové rychlosti  $OR$  [m/min].

$$n = \frac{VF}{OR} * 0.06 \quad (R.4.3.2-2)$$

Pro stanovenou maximální odtahovou rychlost 600m/min a vzorkovací frekvenci 20 000 vzorků/s tedy vychází 2 vzorky/mm, čímž je zabezpečena dostatečná přesnost měření.

Tímto způsobem je hned na vstupu digitálního zpracování signálu provedena základní předfiltrace nahodilých odchylek průměru příze na velmi krátkých úsecích, které nejsou způsobeny skutečnou změnou průměru příze, ale například chlupatostí příze.

### 4.3.3 Základní filtr

Jedna z nejdůležitějších hodnot, která vstupuje skoro do všech dále popsanych algoritmů je průměrný milimetrový vzorek  $D1MM$ . Ten je vytvořen ze „surových“ milimetrových vzorků  $RD1MM$  aplikací nejjednoduššího lineárního FIR filtru.

$$D1MM = 0.5 * RD1MM + 0.5 * D1MM \quad (R.4.3.3-1)$$

### 4.3.4 Průměrná hodnota P1MV a P10MV

Základem výpočtu pro některé vady je výpočet průměrného 1m vzorku  $D1M$  a 10m vzorku  $D10M$ .  $D1M$  je aritmetický průměr jednoho tisíce 1mm průměrů příze  $D1MM$ .

$$D1M = \frac{\sum_{i=1}^{1000} D1MM_i}{1000} \quad (R.4.3.4-1)$$

$D10M$  je aritmetický průměr deseti 1m průměrů.

$$D10M = \frac{\sum_{i=1}^{10} D1M_i}{1000} \quad (R.4.3.4-2)$$

### 4.3.5 Referenční hodnota

Referenční hodnota  $RefV$  je průměrná hodnota tloušťky (průměru) příze, změřená na statisticky dostatečně dlouhém úseku příze. Měření sice probíhá v absolutních hodnotách průměru příze, ale dvě příze se stejnou jemností nemusí mít opticky stejný průměr a při stejném výpředu se průměry mezi jednotlivými spřádacími jednotkami mohou lišit. Proto je nutné vytvářet referenční hodnotu a k ní vztahovat všechny vady příze.

Nová referenční hodnota se začne vytvářet vždy po zapnutí napájení, při změně nastavení jemnosti příze a po vyčištění čidla, které bylo odstaveno kvůli velkému znečištění.

Referenční hodnota je neustále po určitých úsecích vypočítávána a upřesňována, aby bylo možné detekovat i velmi malé změny průměru příze. Základem výpočtu referenční hodnoty je neustále opakovaný výpočet průměrného 1m vzorku  $D1M$  (viz. 4.3.4).

První referenční hodnota se stanoví po 5m vypředené příze jako aritmetický průměr pěti předchozích  $D1M$  ( $n=5$ ).

$$RefV = \frac{\sum_{i=1}^n D1M_i}{n} \quad (R.4.3.5-1)$$

K dalšímu upřesňování referenční hodnoty dochází po 10m vypředené příze a poté každých dalších 10m až do 100m ( $n=10,20,\dots,100$ ). Pokud by došlo k přetržení příze na prvních 100m, začne se referenční hodnota vyhodnocovat znovu. V úseku od 100m do 1000m se referenční hodnota opravuje po každých 100m ( $n=100,200,\dots,1000$ ). Po prvních 1000m ( $RefV1$ ) je spočítána následující 1000m referenční hodnota ( $RefV2$ ). Jejich aritmetický průměr se zafixuje a tato referenční hodnota je použita pro všechna další vyhodnocení.

$$RefV = \frac{RefV1 + RefV2}{2} \quad (R.4.3.5-2)$$

$RefV$  je jeden z nejdůležitějších parametrů pro zpracování naměřených hodnot a spolehlivou detekci vad v přízi.

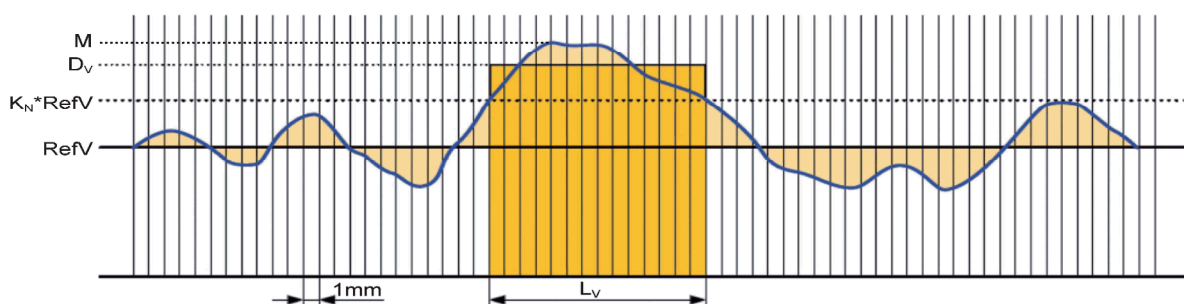
Zároveň pro další zpracování je počítána i klouzavá průměrná referenční hodnota  $RefVA$ . Její porovnání s  $RefV$  dokáže odhalit některé speciální vady v prameni či ve sprádací jednotce nebo postupující zaprašování čidla. Pro tyto účely je počítán aritmetický průměr tisíce 1m průměrů  $D1000M$  a z něho hodnota  $RefVA$ .

$$D1000M = \frac{\sum_{i=1}^{1000} D1M_i}{1000}, \quad RefVA = 0.5 * D1000M + 0.5 * RefVA \quad (R.4.3.5-3)$$

#### 4.3.6 Krátké silné vady N a S

Za krátké silné vady považujeme vady do délky 8cm. Vady kratší než 10mm se zatřídí do kanálu N (Neps) a vady delší do kanálu S (Short thick), v matici (Obr. 15) jsou nopky v polích A a vady S jsou v polích B až E.

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.2.3 je vada popsána vždy dvěma parametry: odchylkou průměru příze  $D\%$  a délkou  $L$ .



Obr. 17: Model krátké silné vady

Z Obr. 17 je patrné, že délka vady  $L_V$  je počet vzorků, po které je průměr příze mimo mez šumu a velikost vady  $D_V\%$  je průměrná odchylka od referenční hodnoty na této délce a  $M\%$  je maximální odchylka vady.

$$D_V \% = \frac{\sum_{i=1}^{L_V} (D1MM)}{L_V} - RefV \quad * 100 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{L_V} (D1MM)}{L_V * RefV} - 1 \right) * 100 \quad (R.4.3.6-1)$$

$$M\% = \frac{M - \text{Ref}V}{\text{Ref}V} * 100 \quad (\text{R.4.3.6-2})$$

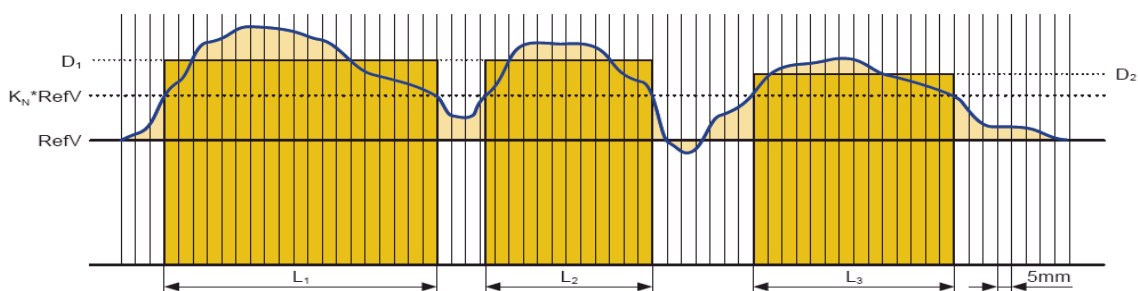
Z hodnot  $D_V\%$ ,  $L_V\%$  a  $M\%$  lze dle vztahů uvedených v 4.2.3 vypočítat hodnoty odchylky  $D\%$  a délky  $L$  popisující vadu. Pokud vada po zařídění do klasifikační matice překročí nastavené čistící limity, je vyhodnocena vada kvality příze (N nebo S) a sprádací proces je přerušen.

#### 4.3.7 Dlouhé vady L a T

Za dlouhé vady považujeme vady delší než 8cm a kratší než 2 metry. Dlouhé silné vady se zařídí do kanálu L (Long thick) a vady, kdy dojde k zeslabení, do kanálu T (Long Thin). V matici jsou dlouhé silné vady v polích F, G, a H, a dlouhé slabé vady v polích I1 až K2.

I u dlouhých vad platí, že vada je popsána dvěma parametry: odchylkou průměru příze  $D\%$  a délkou  $L$ . Vyhodnocení dlouhých vad je patrné z Obr. 18 a je uvedeno pro dlouhé silné vady, ale analogicky platí i pro dlouhé tenké vady.

Ve srovnání s vyhodnocením vad S zde dochází k modifikaci vyhodnocovacího algoritmu. Dojde-li při odměřování délky vady ke krátkému poklesu zesílení příze pod mez šumu (tzn. průměr příze se vrátí zpět do meze šumu), tak potom se při následném návratu nad mez šumu nezačíná počítat vada od začátku, ale nová délka tohoto úseku je připočítávána k předešlé naměřené hodnotě. Vada je považována za ukončenou, když je v oblasti šumu naměřena délka 20mm. Jelikož odchylky dlouhých vad jsou velice blízké limitu šumu, působí toto opatření jako filtr při krátkých poklesech zesílení pod mez šumu, které by mohly znemožnit správné odměření délky vady. Stejně vyhodnocení probíhá i u zeslabení příze.



Obr. 18: Vyhodnocení dlouhých silných vad

Z příkladu dlouhé silné vady uvedené na Obr. 18 je patrné, že první vada má délku  $L_1 > 80\text{mm}$  a tedy bude vyhodnocena jako vada L. Pak následuje mezera kratší než 20mm, takže první vada nebude vyhodnocena a druhá vada bude připočtena k vadě první. Další mezera je větší než 20mm, takže vada je ukončena a třetí vada bude vyhodnocena jako samostatná vada, v tomto případě vada S, protože délka je menší než 80mm. Délka první vady L je tedy  $L = L_1 + L_2$ .

Aplikováním výše uvedeného postupu dostaneme:

$$L = \sum_{i=1}^n x(i), \text{ kde} \quad (\text{R.4.3.7-1})$$

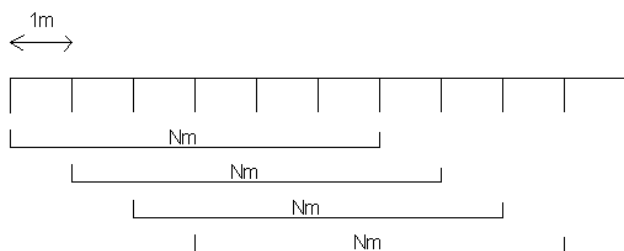
$$x(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } D \geq K_{N2} * \text{Ref}V \\ 0 & \text{if } (D > K_{N1} * \text{Ref}V) \wedge (D < K_{N2} * \text{Ref}V) \\ 1 & \text{if } D \leq K_{N1} * \text{Ref}V \end{cases} \text{ pro } i \text{ dle výše uvedeného popisu.}$$

$$D\% = \frac{\sum_{i=1}^L (D1MM) - \text{Ref}V}{\text{Ref}V} * 100 = \left( \frac{\sum_{i=1}^L (D1MM)}{L * \text{Ref}V} - 1 \right) * 100 \quad (\text{R.4.3.7-2})$$

#### 4.3.8 Vady pramene SI+ a SI-

Klasifikační matrice kontroluje vady příze do maximální délky 2m. Delší vady s větší odchylkou průměru jsou vzácné. Často se však v přízi vyskytují dlouhé vady, ale s malými odchylkami průměru. Jelikož senzor MSBF032 měří průměr příze absolutním způsobem, je schopen rozeznat i malou změnu průměru příze.

Kanály SI+ a SI- slouží pro vyhodnocování dlouhých vad s malou odchylkou průměru. Vady bývají způsobeny nestejnou měrností předkládaného pramene. Délka se vyhodnocuje na délce jednotek metrů (2-9 metrů) a procentuální odchylka je u těchto vad menší než dříve popsaná oblast šumu (0-30%). Z tohoto důvodu není možné pro tyto vady aplikovat stejný algoritmus popisu vady jako u vad S,L,T.



Základem detekce této vady je neustále opakovaný výpočet průměrného 1m vzorku  $DIM$  (viz.4.3.4). Tyto hodnoty jsou ukládány do kruhového bufferu a vždy po výpočtu nové hodnoty  $DIM$  je dle nastavené délky vady vyhodnocován příslušný počet hodnot  $DIM$ . Z těchto hodnot je vypočtena průměrná hodnota  $DSI_N$ .

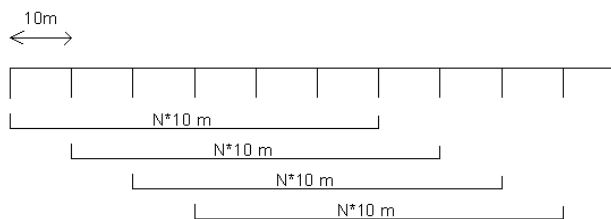
Je-li u tohoto kanálu nastavena hodnota citlivosti na  $LDSI\% / N$  metrů, je vada detekována jestliže platí:

$$DSI_N = \frac{\sum_{i=1}^N DIM_i}{N} \geq \frac{(LDSI\% + 100)}{100} * RefV \quad (R.4.3.8-1)$$

#### 4.3.9 Vady čísla příze C+ a C-

Kanály C+ a C- slouží pro vyhodnocování velmi dlouhých vad s velmi malou odchylkou průměru, tzn. jsou schopny detekovat dlouhodobé změny jemnosti vyprádané příze.

Délka vady se vyhodnocuje na délce desítek metrů (10-1000 metrů) a procentuální odchylka je (0-10%) od referenční hodnoty  $RefV$ . Na vady tohoto typu je aplikován modifikovaný algoritmus pro vady SI+ a SI-. Protože vada C+ a C- je vždy delší než 10 metrů je tato vada považována za alarm kvality příze, tzn. vadu, kterou nelze standardním postupem odmotat a nahradit zápledkem, ale je nutné posouzení obsluhou stroje, jakou akci provést.



Základem detekce této vady je neustále opakovaný výpočet průměrného 10m vzorku  $D10M$  (viz.4.3.4). Tyto hodnoty jsou ukládány do kruhového bufferu a vždy po výpočtu nové hodnoty  $D10M$  je dle nastavené délky vady vždy

vyhodnocován příslušný počet hodnot  $D10M$ . Z těchto hodnot je vypočtena průměrná hodnota  $DC$ .

Je-li u tohoto kanálu nastavena hodnota pro alarm  $LDC\%$  na  $N*10$  metrů, je alarm vyvolán jestliže platí:

$$DC_N = \frac{\sum_{i=1}^N D10M_i}{N} \geq \frac{(LDC\% + 100)}{100} * RefV \quad (R.4.3.9-1)$$



#### 4.3.10 Zápředky P+ a P-

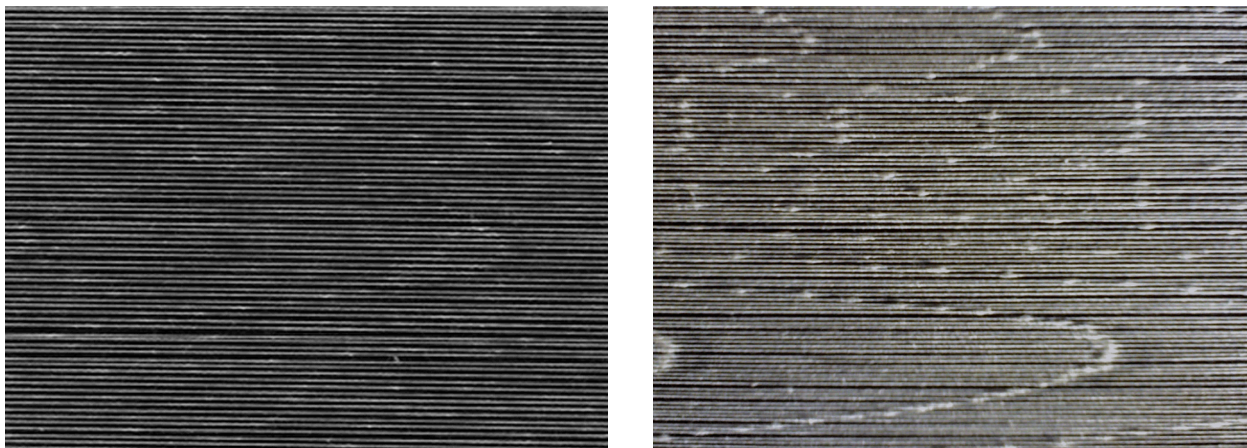
Díky skutečnosti, že čidlo kvality je integrováno přímo do elektroniky stroje, lze při zapřádání přesně definovat okamžik průchodu zápředku čidlem. Na rozdíl od jiných čističů je v tomto případě zápředek vyhodnocován za stejných podmínek jako normální příze, tzn. pomocí kritérií nastavených v kanálech S a T. Jediný rozdíl je v tom, že při vyhodnocení vady a přerušení předení není tato vada (vadný zápředek) započítána do kanálu, kterým byla vyhodnocena, ale je připočtena do kanálu P+ či P-. V tomto kanálu se tedy nepředepisují speciální podmínky pro tvar zápředku, ale kanál P slouží pouze pro statistiku a vyhodnocení kvality zápředků v porovnání s hodnotami nastavenými pro čištění příze. Popisované čidlo kvality tedy v zásadě nerozlišuje mezi vadou příze a nekvalitním zápředkem a hodnotí je podle stejných kritérií. Jeví se jako nevhodné nastavovat pro zápředek jiná kritéria a dojít tak do stavu, kdy může být vada v přízi nahrazena zápředkem s parametry vady, která by měla být z příze vyjmuta. Jako vztažná hodnota pro kontrolu zápředku se bere referenční hodnota před přetržením příze.

Pro účely seřizování zapřádání a testů byl pouze zaveden parametr citlivosti kanálu zápředků. Pomocí tohoto parametru lze zvýšit citlivost kanálu a tedy zpřísnit kritéria pro vyhodnocení kvality zápředku.

#### 4.3.11 Moiré

Moiré je periodická vada typická pro rotorové předení. Bývá nejčasněji způsobena bodovým znečištěním vnitřní drážky rotoru nebo mechanickým poškozením této drážky. Na přízi se pak vytvářejí krátká silná a slabá, periodicky se opakující místa s periodou odpovídající délce obvodu rotoru.

Zesílení těchto vad je ovšem tak malé, že je kanál S není schopen zachytit. Ovšem ve tkanině působí tato vada díky své periodicitě velice rušivě. Na Obr. 19 je vidět příze s malou a velkou vadou moiré navinutá na černé destičce.

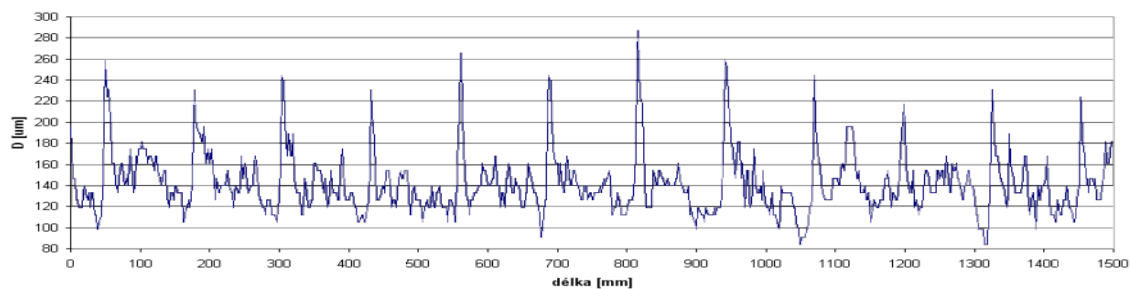


Obr. 19: Příklad malého a velkého moiré

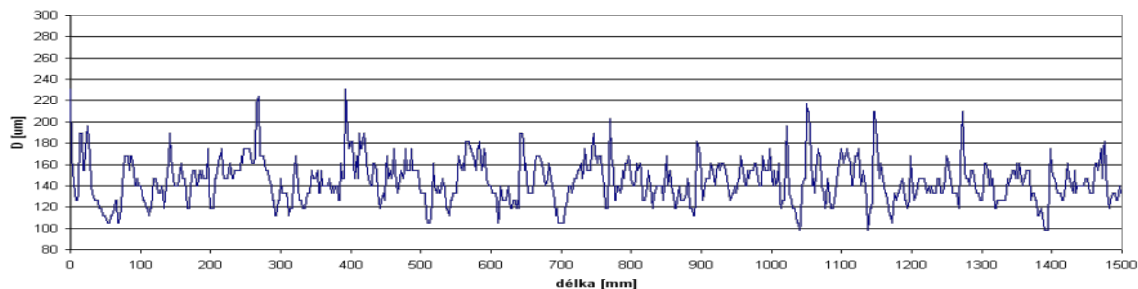
Moiré je typická periodická vada pro rotorové předení. Jelikož tuto vadu je nutné detekovat co nejrychleji, není vhodné aplikovat v tomto případě algoritmus pro standardní periodické vady („spektrogramy“), přestože informaci o moiré lze ze spektrogramů bez problémů získat. Detekovat moiré pomocí spektrogramů je možné až po zpracování dat z několik metrů dlouhého úseku příze, což je pro praktický provoz nepřijatelné.

Cílem je naopak rozpoznat vadu moiré do 10 obvodů rotoru, tzn. maximálně do 2 m vypředené příze. Jako nejvhodnější, s ohledem na rychlost a výkon procesoru a na vysokou citlivost detekce moiré, se ukázal níže popsáný algoritmus.

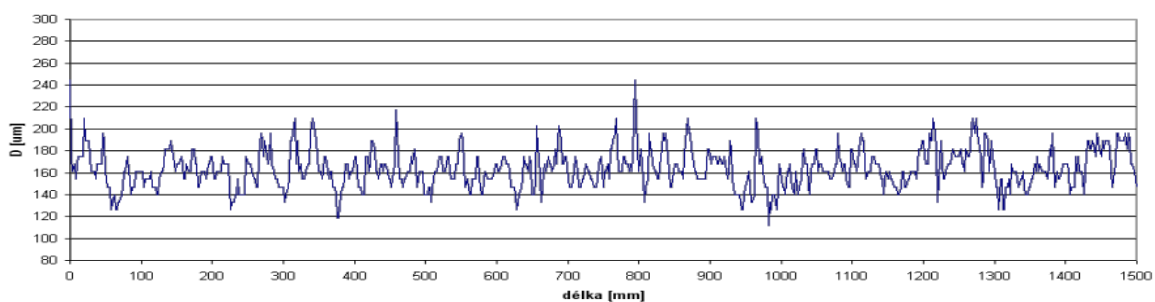
Následující 3 obrázky ukazují reálné výchozí signály, které poskytuje čidlo pro přízi s velkým a malým moiré a dále bez vady moiré.



Obr. 20: Příklad velkého moiré



Obr. 21: Příklad menšího moiré

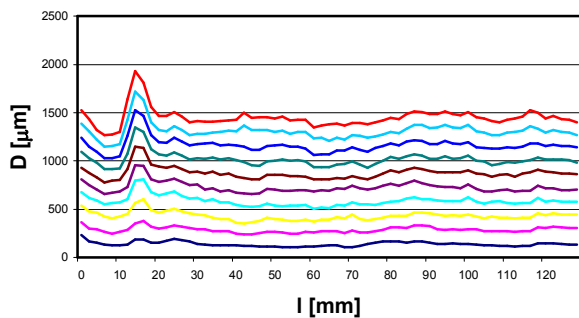


Obr. 22: Příklad příze bez moiré

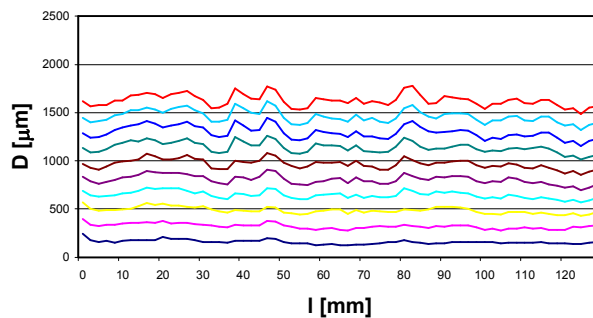
Pro předpokládanou délku obvodu rotoru  $O$  je vytvořeno „okno“  $D$  velikosti  $O$ . Do tohoto okna jsou sumarizovány hodnoty vždy 10 obvodů rotoru. Pro každý prvek „okna“ platí:

$$D_{(k)} = \sum_{i=0}^9 RD1MM_{(O+i+k)}, \text{ kde } k=\langle 1, O \rangle. \quad (\text{R.4.3.11-1})$$

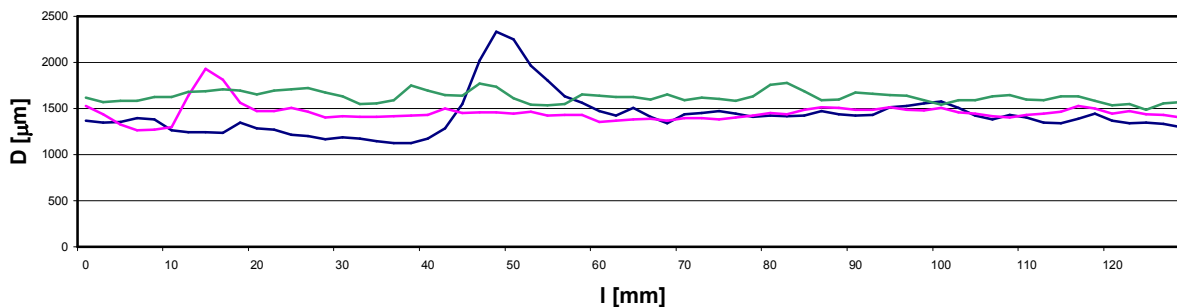
Na následujících obrázcích ( Obr. 23 až Obr. 24) jsou zobrazená okna a průběh sumarizace hodnot pro přízi s moiré a pro přízi bez moiré, kde  $D$  je průměr příze a  $l$  je délka periody, odpovídající obvodu rotoru s průměrem 41mm. Z Obr. 25 je patrné porovnání výsledných hodnot.



Obr. 23: Vyhodnocení pro malé moiré



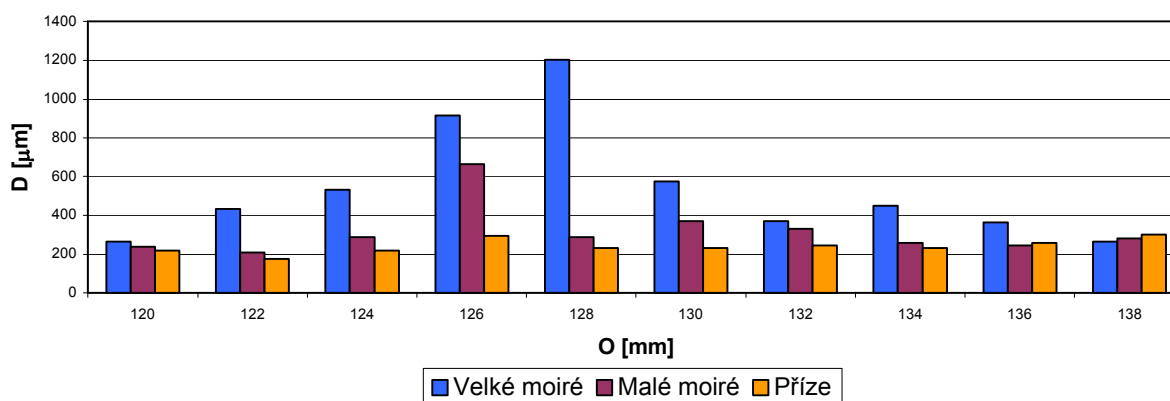
Obr. 24: Vyhodnocení pro přízi bez moiré



Obr. 25: Vyhodnocení moiré

Jelikož v praxi není vzdálenost vad přesně shodná s obvodem rotoru, ukázalo se jako vhodné sbírat data v jednom okamžiku do více oken s rozdílnou periodou (velikostí). Perioda moiré je závislá na parametrech předení (číslo příze, materiál...) ale i na osazených komponentech ve spřádací jednotce a není ji možné přesně určit. Jako optimální se jeví vyhodnocování 5-ti period závislých na obvodu rotoru - (O-4)mm, (O-2)mm, O, (O+2)mm, (O+4)mm.

Moiré je charakteristické svým zeslabením a zesílením s přesnou periodou. Z uvedených grafů je patrné, že rozhodující pro vyhodnocení velikosti moiré je rozpětí  $R$  neboli rozdíl maximální a minimální hodnoty v okně. V grafu na Obr. 26 jsou zobrazeny hodnoty rozpětí pro různé příze a různé velikosti „okna“.



Obr. 26: Rozpětí

Hodnotu rozpětí ovšem nelze použít pro přímé vyhodnocení vady, protože je závislé nejen na velikosti moiré, ale zároveň i m.j. na průměru příze. Proto je nutné moiré normovat. Vztažení k referenční hodnotě neposkytl tak dobré výsledky jako vztažení k „normálnímu“ rozpětí  $R_N$  a „normálnímu“ aritmetickému průměru  $AM_N$ . „Normální“ hodnoty se stanoví z hodnot dalšího „okna“ s velikostí  $0,9 \cdot \text{Obvod rotoru}$ . Při této velikosti je zajištěno, že po 10 sumách je započítáno 9 skutečných period, takže zesílení způsobené moiré je na různých pozicích „okna“.

Algoritmus pro výpočet moiré potom vypadá takto:

1. Naplnit v reálném čase hodnotami „okna“ (R.4.3.11-2):

a. pro periody  $L = O-4, O-2, O, O+2$  a  $O+4$  mm:  $D_{L(k)} = \sum_{i=0}^9 RD1MM_{(L*i+k)}$ , kde  $k=\langle 1,L \rangle$ .

b. pro periodu  $L = N = 0,9 \cdot O$  mm:  $D_{N(k)} = \sum_{i=0}^9 RD1MM_{(L*i+k)}$ , kde  $k=\langle 1,L \rangle$ . (R.4.3.11-3)

Po naplnění oken je spuštěno vyhodnocování moiré pro každé okno  $D_L$ .

2. Spočítat Rozpětí  $R$  pro jednotlivá okna.

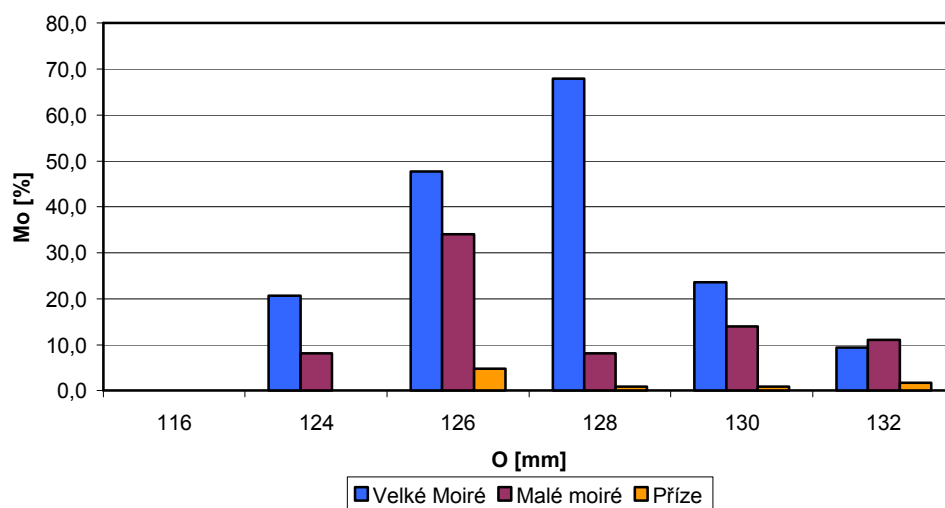
$$R_L = \text{MAX}(D_L) - \text{MIN}(D_L) \quad (\text{R.4.3.11-4})$$

$$R_N = \text{MAX}(D_N) - \text{MIN}(D_N) \quad (\text{R.4.3.11-5})$$

3. Výpočet „normálního“ aritmetického průměru a normovaného moiré  $\text{Mo}\%_L$ .

$$\text{AM}_N = \frac{\sum_{k=1}^N D_{N(k)}}{N}, \quad \text{Mo}\%_L = \frac{(R_L - R_N) * 100}{\text{AM}_N} \quad (\text{R.4.3.11-6})$$

Na obrázku Obr. 27 je vidět hodnoty  $\text{Mo}\%_L$  pro jednotlivé typy přízí a různé periody.



Obr. 27: Normované moiré

4. Výpočet maximální hodnoty  $\text{Mo}\%_L$ .

Výsledná normovaná hodnota  $\text{Mo}\%$  je stanovena jako maximální hodnota  $\text{Mo}\%_L$ .

$$\text{Mo}\% = \text{MAX}(\text{Mo}\%_L) \quad (\text{R.4.3.11-7})$$

V uvedeném příkladu výsledná hodnota činí 67,9% pro velké moiré, 34,1% pro menší moiré a 4,7% pro příze bez moiré. Praktické výsledky prokázaly dostatečně vysokou citlivost, rychlost a opakovatelnost detekce vady moiré popsanou metodou. Jelikož vada je detekována na 10 obvodech rotoru, není u automatického stroje vyžadován žádný zásah obsluhy a u poloautomatického stroje obsluha vadnou přízí snadno odvine.

Je-li u tohoto kanálu nastavena hodnota pro chybu  $LMo\%$ , je chyba vyvolána jestliže platí:

$$\text{Mo}\% \geq LMo\% \quad (\text{R.4.3.11-8})$$

#### 4.3.12 Nestejnoměrnost příze $YI\%$

Již dlouhou dobu se v textilním průmyslu jako veličina určující nestejnomyěrnost příze používá variační koeficient. Tento koeficient popisuje nerovnoměrnost průměru příze a v mnoha případech je považován za základní parametr určující celkový vzhled příze. Většina čističů pro variační koeficient příze používá označení  $CV\%$ . Jelikož přístroje ale používají různé měřicí principy a liší se i různou efektivní vyhodnocovací délkou, nejsou výsledné hodnoty variačního koeficientu z různých čističů identické. Z tohoto důvodu byla pro označení variačního koeficientu u čističe Rieter použita zkratka  $YI\%$  (Yarn Irregularity).

Střední kvadratická nestejnomyěrnost čili variační koeficient  $IY\%$  je definován jako:

$$YI\% = 100 \cdot \frac{s}{\bar{x}}, \quad s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{R.4.3.12-1})$$

kde  $\bar{x}$  je aritmetický průměr (střední hodnota) z naměřených vzorků  $x_i$  a  $s$  je směrodatná odchylka těchto vzorků.

$$YI\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - 2x_i\bar{x} + \bar{x}^2)}{(N-1) \cdot \bar{x}^2}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - 2N\bar{x}^2 + N\bar{x}^2}{(N-1) \cdot \bar{x}^2}} \quad (2)$$

Po jednoduché úpravě pro velká  $N$ , kdy platí ( $N-1 \cong N$ ), dostáváme:

$$YI\% = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N \cdot \bar{x}^2}{N \cdot \bar{x}^2}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} - 1} = \sqrt{10000 \cdot N \cdot \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{(\sum_{i=1}^N x_i)^2} - 10000} \quad (3)$$

Čistič počítá hodnotu  $YI\%$  z posledních 1000 m vyrobené příze pro každé spřádací místo a aktualizuje tuto hodnotu každých 100 m.

Hodnota  $YI\%$  se porovnává s průměrem této hodnoty na stroji nebo s předem definovanou absolutní hodnotou. Jestliže hodnota  $YI\%$  nějakého spřádacího místa překročí průměrnou hodnotu o určité procento nebo překročí toleranci definované absolutní hodnoty, je toto spřádací místo odstaveno. Povolenou procentuální odchylku si může uživatel nastavit libovolně na základě zkušeností nebo na základě standardně požadované kvality.

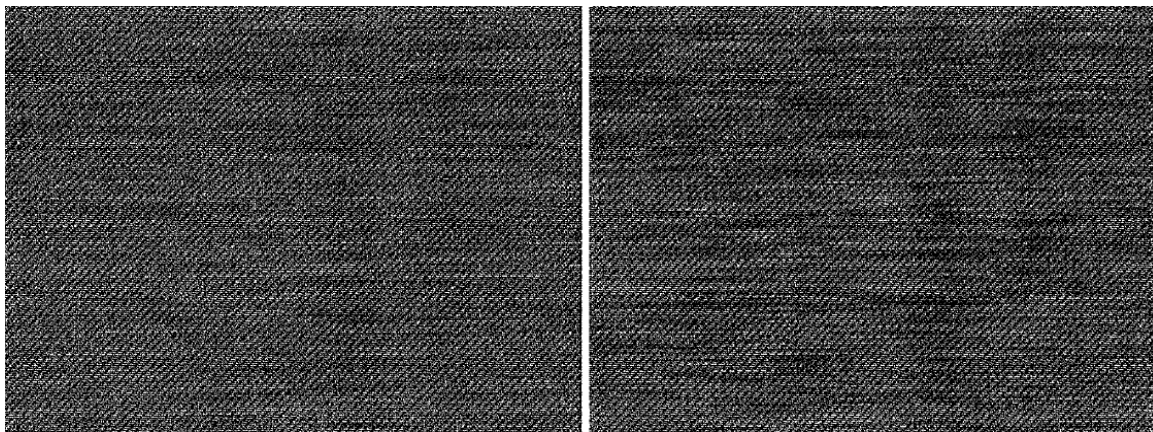
Je-li  $YI\%_M$  průměrná hodnota celého stroje

$$YI\%_M = \frac{\sum_{i=1}^N YI\%_i}{N}, \quad \text{kde } N \text{ je počet spřádacích jednotek stroje.} \quad (\text{R.4.3.12-4})$$

a  $LYI\%$  nastavená procentuální mezní odchylka, potom je alarm signalizován, jestliže platí:

$$YI\%_i \geq \frac{(LYI\% + 100)}{100} \cdot YI\%_M \quad (\text{R.4.3.12-5})$$

Téměř všechny mechanické problémy spřádací jednotky mají za následek menší či větší zvýšení hodnoty  $YI\%$ . Protože pomocí  $YI\%$  lze velice snadno detekovat různé závady (rotor, vývodka, pramen, odtahový, vyčesávací nebo podávací váleček,...), je kontrola parametru  $YI\%$  jedna z neefektivnějších metod kontroly kvality spřádacího procesu. Obecně platí, čím nižší je hodnota  $YI\%$ , tím stejnoměrnější je příze a i stejnoměrněji vypadá výsledná tkanina.



Obr. 28: Tkanina z příze z různým  $YI\%$  (11,5% a 17,5%)

### 4.3.13 Imperfekce (IPI vady)

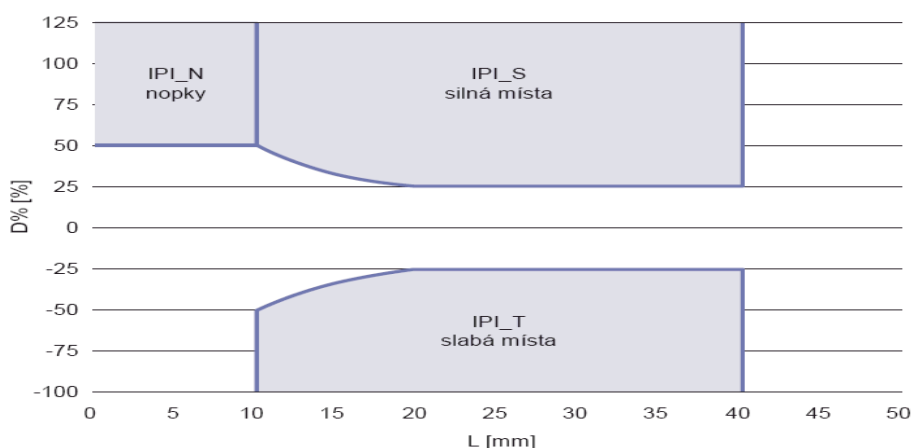
Imperfekce je další parametr popisující kvalitu vypřádané příze. Hodnota imperfekce neboli IPI vad je údaj o počtu nopků, tenkých a silných míst na 1000m vyprodukované příze. Imperfekce na rozdíl od YI% je založena na počítání absolutního počtu definovaných vad na 1000 metrů vypředené příze.

Jednotlivé IPI vady jsou definovány takto:

IPI	délka (mm)	odchylka průměru (%)
Nopky (IPI_N)	1-10	> +50
Silná místa (IPI_S)	20 (10) - 40	> +25
Slabá místa (IPI_T)	20 (10) - 40	< -25

Tab. 4: Definice IPI vad

V Obr. 29 jsou graficky znázorněny IPI oblasti s vyznačením registrovaných chyb.



Obr. 29: Zatřídění IPI vad

Úkolem čističe je v tomto případě jednak monitorování IPI vad a zároveň odstavení spřádacího místa z důvodu vysokého počtu IPI vad.

Počty jednotlivých vad na 1000m se porovnávají s průměrnými hodnotami celého stroje. Jestliže hodnota IPI\_x některého spřádacího místa překročí průměrnou hodnotu stroje o určité procento, je toto spřádací místo odstaveno.

Jsou-li  $IPI_{N_i}$ ,  $IPI_{S_i}$ ,  $IPI_{T_i}$  počty jednotlivých vad na 1000m pro  $i$ -té spřádací místo stroje, potom průměrné hodnoty celého stroje jsou:

$$IPI_{N_M} = \frac{\sum_{i=1}^N IPI_{N_i}}{N}, \quad IPI_{S_M} = \frac{\sum_{i=1}^N IPI_{S_i}}{N}, \quad IPI_{T_M} = \frac{\sum_{i=1}^N IPI_{T_i}}{N}, \quad (R.4.3.13-1)$$

kde N je počet spřádacích jednotek stroje.

Jsou-li  $LIPI_{N\%}$ ,  $LIPI_{S\%}$ ,  $LIPI_{T\%}$  povolené procentuální odchylky IPI hodnot, potom je alarm pro  $i$ -tou jednotku signalizován, jestliže platí:

$$IPI_{N_i} \geq \frac{(LIPI_{N\%} + 100)}{100} * IPI_{N_M} \quad (R.4.3.13-2)$$

$$IPI_{S_i} \geq \frac{(LIPI_{S\%} + 100)}{100} * IPI_{S_M} \quad (R.4.3.13-3)$$

$$IPI_{T_i} \geq \frac{(LIPI_{T\%} + 100)}{100} * IPI_{T_M} \quad (R.4.3.13-4)$$

Obecně platí, čím nižší je hodnota IPI\_X, tím kvalitnější a stejnoměrnější je příze a i stejnoměrněji vypadá výsledná tkanina.

#### 4.3.14 Periodické vady (Výkonová spektra, „spektrogramy“)

[35][36][37][38][39][40][41][42][43]

Periodické vady jsou silná a slabá místa, která se v přízi vyskytují vždy po stejné vzdálenosti. Tyto vady jsou většinou tak malé, že standardní N, S, L a T kanály je nezachytí, ovšem ve výsledné tkanině či pletenině jsou díky své periodičnosti značně rušivé. Periodické vady jsou způsobeny závadou buď ve vlastním spřádacím procesu anebo v přípravě pramene pro předení na strojích, které tento pramen připravují. Může jít o znečištěnou drážku rotoru (viz.4.3.11 Moiré), ale také o poškození některých rotujících částí stroje.

Vada moiré, která je nejčastější vadou stroje, je detekována speciálním výše popsaným algoritmem. Pro detekci ostatních vad je třeba vytvořit jiný univerzální kanál. Jako nejlepší se ukázalo použití výkonových spekter v celém vlnovém spektru. V textilní terminologii je pro toto výkonové spektrum používán termín „spektrogram“, a proto i v této práci je používán, i když zřejmě ne zcela správně. Periodická vada se ve spektrogramu projeví jako „komín“ (zvýšení výkonové spektrální hustoty) na určité vlnové délce.

Jedním s cílů práce je nalezení a implementování optimálního algoritmu pro detekci periodických vad. Při návrhu je brán hlavní zřetel na optimalizaci algoritmu pro procesor založený na architektuře ARM Cortex-M3.

Frekvenční spektrum představuje podíl harmonických složek v signálu. V minulosti se k vyhodnocení spektra používaly frekvenčně selektivní voltmetry, tj. voltmetry s pásmovou propustí – filtrem. Střední frekvence pásmového filtru se nastavovala skokově nebo byla plynule přeladována. Frekvenčními filtry lze v reálném čase přímo vyhodnotit úroveň složek z jistého frekvenčního rozsahu s tím, že ostatní složky spektra jsou potlačeny. Dle vzájemného vztahu mezi šířkami dílčích pásem frekvenčního rozsahu spektra rozlišujeme analyzátoři s konstantní relativní šířkou pásma, tzv. CPB (Constant Percentage Bandwidth), které charakterizuje logaritmická frekvenční osa a s konstantní absolutní šířkou pásma, které charakterizuje lineární frekvenční osa (L.[35]).

Moderní CPB analyzátoři jsou řešeny výhradně s číslicovými filtry. Každý kanál analyzátoru realizuje měření výkonu signálu v přenosovém frekvenčním pásmu filtru. Realizace takového analyzátoru spočívá v definování sady pásmových propustí a jejich aplikaci na změřená data. Velkou výhodou tohoto řešení by byla, ve srovnání s ostatními metodami, nízká výpočetní i paměťová náročnost. Další výhodou je okamžitá odezva ve frekvenčním pásmu, jakmile jsou vzorky z úseku vhodné vlnové délky k dispozici. Nevýhodou tohoto řešení je pracnější návrh koeficientů filtrů, mírně komplikovanější algoritmus a omezený útlum na vlnových délkách mimo žádané frekvenční pásmo. Ovšem velikou nevýhodou tohoto řešení jsou zaokrouhlovací chyby, které mohou způsobit nestabilitu filtru, tedy vybuzení nekonečných amplitud. Hlavně z tohoto důvodu a z důvodu pracovního návrhu koeficientů filtrů nebylo toto řešení pro zde popisovaný čistič Rieter použito.

V diagnostice je někdy výhodné, aby analyzátor pracoval v celém frekvenčním rozsahu s konstantní a velmi malou šířkou propustného pásma. U konce frekvenčního rozsahu ovšem nabývá poměr  $\Delta f/f_R$  takových hodnot, že přeladitelný analogový nebo číslicový filtr pro reálný čas s takovou selektivitou nelze navrhnout. Objev rychlé Fourierovy transformace však situaci změnil a spektrum s konstantní šířkou pásma lze díky Fourierově transformaci vypočítat.

Systémy měřící kvalitu příze používaly v minulosti analogové filtry. CPB analyzátoři a prezentace výsledků podle vlnové délky a v logaritmickém měřítku mají v textilním průmyslu velkou tradici a jsou dodnes používány. Metoda filtrů nebyla z výše uvedených důvodů použita a jako nejlepší řešení se ukázalo použití Fourierovy či jiné transformace, přičemž výsledné spektrum s konstantní absolutní šířkou pásma je přepočítáváno na spektrum s konstantní relativní šířkou pásma (CPB).

#### 4.3.14.1. Transformace do spektrální oblasti

Obecně existuje velké množství variant transformací diskretních dat do spektrální oblasti. Transformace se liší obtížností, výpočetní náročností a přesností poskytovaných výsledků. Při zpracování v reálném čase a díky omezenému výkonu mikroprocesorů se vždy jedná o určitý kompromis. V práci jsou uvedeny jen základní možnosti řešení.

Jednou z nejjednodušších variant je Walsh-Hadamardova transformace (WHT), která na rozdíl od Fourierovy transformace provádí rozklad do tzv. Walshových funkcí, které hrubě řečeno odpovídají obdélníkovým vlnám s různou frekvencí. Klíčovou vlastností WHT je jednoduchost jejího výpočtu a výstupu. Výsledné spektrum se podobá spektru Fourierovu, ale je mnohem více znečištěno postranními „komíny“. S ohledem na výkon moderních procesorů je aplikování jednoduché, ale nedokonalé WHT zbytečné a pro detekci periodických vad v čističi Rieter nebyla tato transformace použita.

Další možností by mohla být Waveletová transformace (WVT), která používá jako základní funkce tzv. wavelety neboli vlnky. Přestože wavelety jsou omezené, nebo-li také lokalizované v čase a jejich tvar může být podobný vadě v přízi, je v práci ukázána nevhodnost použití této transformace. WVT je jednoduše implementovaný rychlý algoritmus, který umožňuje detekci pozice a velikosti hledaného tvaru v analyzovaném signálu. Je obzvláště vhodná pro detekci jednorázově se vyskytujících událostí, není ale příliš vhodná pro detekci periodicit.

#### 4.3.14.2. Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je jednou z nejdůležitějších transformací diskretních dat do spektrální oblasti. Fourierova transformace používá jako základní (bazické) funkce komplexní exponenciály (siny a kosiny) s různou frekvencí a fází. Její hlavní rozvoj nastal po roce 1965, kdy J.W. Cooley a J.W. Tukey popsali velmi efektivní algoritmus výpočtu DFT, tzv. rychlou Fourierovu transformaci (FFT - Fast Fourier Transform) (L.[39]). Díky tomuto algoritmu se stala diskretní Fourierova transformace nejrozšířenějším prostředkem pro numerický výpočet Fourierovy transformace. Algoritmus FFT je implementován ve většině nejrozšířenějších matematických programů a existuje celá řada již hotových knihoven pro různé mikrokontroléry. Jedním z úkolů práce bylo tedy nalezení optimálního algoritmu pro výpočet spektrogramu příze a v něm detekci periodické vady dle zadaných kritérií s použitím rychlé Fourierovy transformace.

Popis a odvození různých algoritmů FFT je uvedeno v samotné práci. Práce se podrobněji zabývá především radix-2, radix-4, radix-8 a split-radix FFT algoritmem a jejich vzájemným porovnáním. Většina ostatních algoritmů se snaží urychlit výpočet FFT především redukcí počtu násobení. Dnešní mikroprocesory mají násobení řešeny hardwarově a tyto „rychlejší“ algoritmy pak díky své komplikovanosti ztrácejí opodstatnění. Tzv. algoritmy v konečných okruzích se zabývají zvýšením přesnosti výpočtu, což opět není pro čidlo kvality podstatné.

#### 4.3.14.3. Porovnání FFT algoritmů a jejich optimalizace

I když počet výsledných operací není vždy tím nejdůležitějším kritériem pro výběr nejvhodnějšího algoritmu, přesto se touto problematikou zabývá mnoho teoretických prací a nalezení algoritmu s nejmenším počtem aritmetických operací se stalo předmětem prací mnoha matematiků. V práci jsou porovnány jednotlivé algoritmy z hlediska počtu „motýlků“, počtu komplexních operací a jsou v ní uvedeny postupy pro optimalizaci výpočtu.

Pro vlastní výpočet, sestavení výpočetního algoritmu, pro jeho rychlost a náročnost je ovšem rozhodující počet reálných operací. Následující tabulka (Tab. 5) přehledně ukazuje vzorce pro výpočet počtu potřebných operací pro různé FFT algoritmy v závislosti na velikosti transformace.



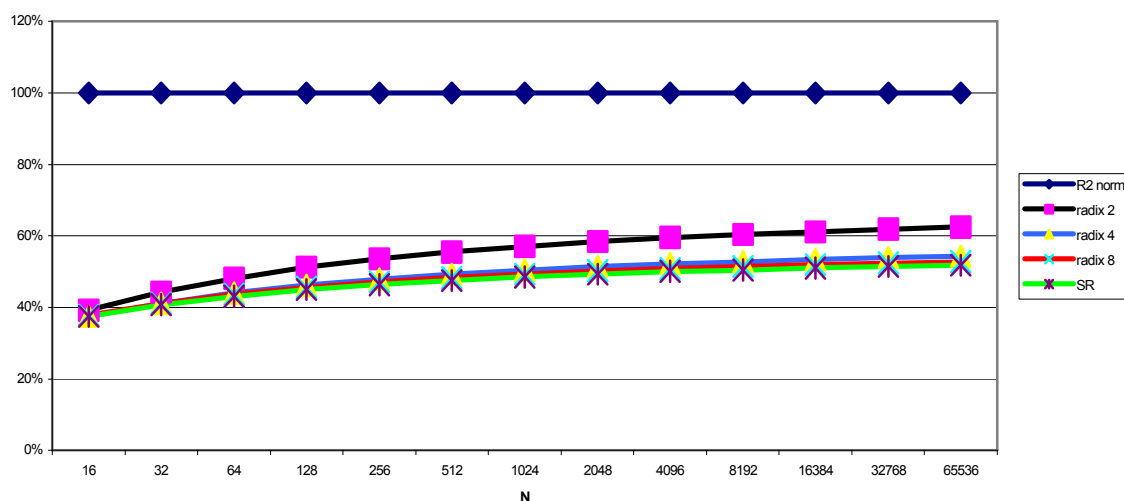
	Reálná sčítání	Reálná násobení
<b>Radix-2</b>	$3 \cdot N \cdot (\log_2 N - 1) + 4$	$2 \cdot N \cdot \log_2 N - 7 \cdot N + 12$
<b>Radix-4</b>	$\frac{33 \cdot N \cdot \log_2 N - 26 \cdot N + 32}{12}$	$\frac{9 \cdot N \cdot \log_2 N - 30 \cdot N + 48}{6}$
<b>Radix-8</b>	$\frac{77 \cdot N \cdot \log_2 N - 57 \cdot N + 64}{28}$	$\frac{56 \cdot N \cdot \log_2 N - 177 \cdot N + 240}{42}$
<b>Split-radix</b>	$\frac{24 \cdot N \cdot \log_2 N - 16 \cdot N + 18 - 2 \cdot (-1)^{\log_2 N}}{9}$	$\frac{12 \cdot N \cdot \log_2 N - 38 \cdot N + 54 + 2 \cdot (-1)^{\log_2 N}}{9}$

Tab. 5 Počty reálných operací pro různé algoritmy FFT

Dále existuje velké množství optimalizací základních FFT algoritmů. Tyto algoritmy ale v době, kdy existují mikrokontroléry, u nichž je sčítání i násobení vykonáváno během jednoho taktu a čtení dat z paměti ve dvou cyklech, ztrácí opodstatnění. Nakonec se ukázal jako nejvhodnější kritérium při výběru nejvhodnějšího algoritmu celkový počet aritmetických operací (součet reálných sčítání a násobení).

Na Obr. 30 je vidět efektivita jednotlivých algoritmů výpočtu FFT.

Efektivita algoritmů



Obr. 30: Efektivita výpočtu dle algoritmu

Výchozím algoritmem je „klasická“ neoptimalizovaná radix-2 transformace. Z Obr. 30 je patrné, že optimalizovaná radix-2 FFT dokáže uspořit 40% aritmetických operací, radix-4, radix-8 a split-radix FFT se dostávají i pod 50%. I když optimalizacemi ušetříme více než 50% operací, přesto i zde je nutné zvážit zatížení procesoru. Pokud nepředpokládáme časový multitasking, je nutné počítat s tím, že během výpočtu FFT se budou spouštět pouze procedury pod přerušením. Z praktických zkoušek vyplynulo, že optimální čas pro výpočet FFT jsou časy do 5ms. Z tohoto důvodu bylo stanoveno jako optimální použití 1024-bodové transformace. Méně bodové transformace jsou nedostatečné a bylo by jich potřeba kvůli dostatečné statistické přesnosti počítat větší množství a více bodové zase mají dlouhý výpočetní čas. 1024-bodová transformace u vybraného procesoru trvá přibližně 2,2ms. Z pouhého porovnání počtu operací je vidět, že doba 2048-bodová transformace, pokud u příslušného algoritmu existuje, by byla 2,2x delší a 4096-bodová dokonce skoro 5x delší. Jelikož radix-8 algoritmus je pouze pro  $8^M$  bodů (512 nebo 4096), nebude ani tento použit. Jako optimální se tedy díky své jednoduchosti (ve srovnání se split-radix) a srovnatelné rychlosti ukázal radix-4 FFT algoritmus. Ten také byl aplikován při výpočtu spektrogramů.

#### 4.3.14.4. Výběr mikrokontroléru a výpočet FFT

Pro realizované čidlo kvality příze byl použit 32-bitový mikrokontrolér s jádrem Cortex-M3 od firmy ARM<sup>®</sup>. Toto jádro je navrženo speciálně pro vestavěné (embedded) aplikace vyžadující vysoký výkon, běh v reálném čase, nízký příkon a díky malé ploše čipu i nízkou cenu. Toto jádro pracuje s tříúrovňovým překrýváním fází vykonávání instrukcí a se spekulativním vykonáváním skokových instrukcí. Obě techniky minimalizují nutný počet taktů k vykonání instrukcí, takže i základní instrukce dělení a násobení jsou vykonávány během jednoho taktu.

Čidlo Rieter bylo nakonec realizováno s mikrokontrolérem STM32F103. Výhodou STMicroelectronics je, že pro tyto procesory vytvořila DSP knihovnu, která obsahuje DSP funkce jako PID regulátor, FFT transformaci nebo FIR a IIR filtry (L.[43]). Tato DSP knihovna vykonává 64-, 256- anebo 1024-bodovou komplexní 16-ti bitovou radix-4 FFT s decimací v čase. Vstupem i výstupem jsou data s 16-ti bitovou reálnou a 16-ti bitovou imaginární částí.

Velikost kódu vlastní FFT je 480 bytů. K tomu je třeba přičíst uložené twiddle faktory. Ty mohou být uloženy v paměti Flash anebo SRAM. Pro 1024-bodovou transformaci tak tato data zabírají dalších 4096 bytů. Přístup do Flash paměti je delší než do paměti SRAM, což se samozřejmě projeví i delší dobou vykonání FFT. Zároveň ale všechny mikrokontroléry disponují podstatně větší pamětí Flash pro program než pamětí SRAM pro data. V čidle kvality bylo z tohoto důvodu lepší uložit twiddle faktory do paměti Flash a tím prodloužit dobu vykonávání FFT. 1024-bodová transformace při 72MHz a koeficientech v SRAM trvá 2,138ms. To je doba neovlivňující zásadním způsobem běh čidla.

Při maximální odtahové rychlosti 600m/min by mělo čidlo během této doby (2,138ms) zpracovat 21 vzorků příze. To lze jednoduše provést tak, že pod přerušením se vyčtou data z čipu MSBF032, uloží se do vyrovnávací paměti (bufferu) a jsou zpracována až po ukončení výpočtu FFT. Kdyby se na těchto 21mm vyskytla vada, čidlo by vadu rozpoznalo se zpožděním. Ovšem zpoždění do 5ms (50mm příze) je z hlediska technologického procesu předání zanedbatelné. Předání není možné z technologických důvodů přerušit rychleji než za 0,5m vypředené příze. Výpočet FFT je tedy pro vybraný procesor poměrně snadno realizovatelný.

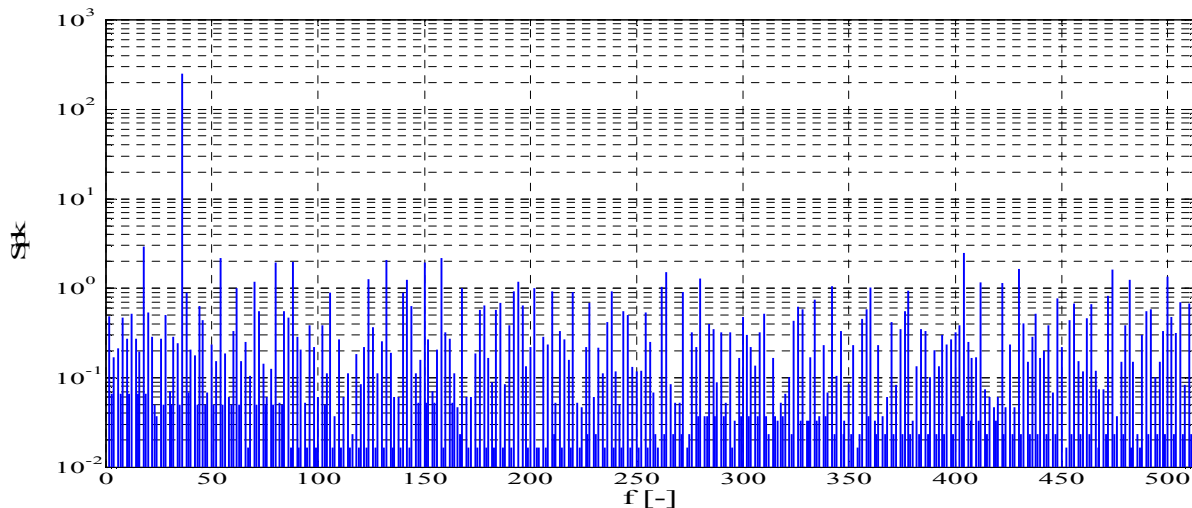
#### 4.3.14.5. Přesnost výpočtu FFT

Přesností výpočtu FFT se zabývá velké množství analýz, např. (L.[35]). V našem případě jde ale o výpočet FFT, kdy výpočetní přesnost mikrokontroléru je vyšší než přesnost změřených dat. Vybraný mikrokontrolér pro výpočet FFT používá 16-bitové vstupní a výstupní hodnoty, 32-bitové aritmetické operace. Kvantum změřeného průměru, které používá čip MSBF032, je 7 $\mu$ m, což pro maximální reálný průměr příze znamená rozlišení 8 bitů. Tato nižší rozlišovací schopnost čipu proto způsobí kvantovací šum, který by mohl ovlivnit výpočet mnohem více než zaokrouhlovací šum aritmetických operací.

Pro testování byl zvolen harmonický signál s 35 periodami na změřenou délku (N=1024 bodů). Zatímco program MATLAB generuje zaokrouhlovací šum přibližně 10<sup>-13</sup>%, hodnota zaokrouhlovacího šumu vygenerovaného mikrokontrolérem je přibližně 0,01%.

Reálný signál příze, tak jak ho poskytne senzor, má běžně rozkmit o něco větší než  $\pm 10$  pixelů, tzn. že signál je hned na vstupu kvantován do těchto hladin, což způsobí na výstupu kvantovací šum. Obr. 31 ukazuje celkovou chybu výpočtu, tzn. celkový vliv kvantování a zaokrouhlování.

Úroveň složek spektra kvantovacího šumu je vyšší než úroveň složek spektra zaokrouhlovacího šumu. Z obrázku je ale patrné, že ani kvantovací šum neovlivní zásadním způsobem výsledek výpočtu. Hodnota kvantovací chyby je <1%.



Obr. 31: Frekvenční spektrum kvantovaného signálu z mikrokontroléru

#### 4.3.14.6. FFT pro reálné signály

FFT je definována obecně pro komplexní vstupní signál a pro všechny frekvence odpovídající indexům od 0 až do  $N$ . Frekvence od  $N/2$  do  $N$  odpovídají záporným frekvencím periodického spektra. Pro reálný signál  $f$  platí sudá symetrie v reálných hodnotách koeficientů  $F(k)$  a lichá symetrie v imaginárních hodnotách koeficientů  $F(k)$ , takže platí  $F(N-k) = F(k)^*$ , kde  $*$  značí komplexně sdružené číslo. Obdobně čistě imaginární signál (nebo reálný vložený do imaginární části)  $g$  platí opačná symetrie  $G_I(N-k) = G_I(k)$ . Pro výstupní koeficienty  $H(k)$  diskretní FT potom bude platit (L.[38]):

$$\begin{aligned} H_R(k) &= F_R(k) - G_I(k) & H_I(k) &= F_I(k) + G_R(k) \\ H_R(N-k) &= F_R(k) + G_I(k) & H_I(N-k) &= -F_I(k) + G_R(k) \end{aligned} \quad (\text{R.4.3.14-1})$$

Úpravou těchto rovnic lze vyjádřit koeficienty  $F$  a  $G$  reálných funkcí  $f$  a  $g$  (R.4.3.14-2).

$$\begin{aligned} F_R(k) &= \frac{H_R(k) - H_R(N-k)}{2} & F_R(N-k) &= F_R(k) = \frac{H_R(k) - H_R(N-k)}{2} \\ F_I(k) &= \frac{H_I(k) - H_I(N-k)}{2} & F_I(N-k) &= -F_I(k) = -\frac{H_I(k) - H_I(N-k)}{2} \\ G_R(k) &= \frac{H_I(k) + H_I(N-k)}{2} & G_R(N-k) &= G_R(k) = \frac{H_I(k) + H_I(N-k)}{2} \\ G_I(k) &= -\frac{H_R(k) - H_R(N-k)}{2} & G_I(N-k) &= -G_I(k) = \frac{H_R(k) - H_R(N-k)}{2} \end{aligned}$$

Tímto jednoduchým způsobem lze urychlit výpočet tak, že můžeme vyhodnocovat dva záznamy najednou.

#### 4.3.14.7. Výpočet spektrogramu

Výkonové spektrum signálu neboli v textilním průmyslu používaný pojem „spektrogram“ lze počítat z jednoho souvislého záznamu dat anebo je možné ho rozdělit na několik úseků, přičemž výsledné spektrum se získá spojením dílčích spekter.

První metoda přímého výpočtu ze souvislých dat je nejjednodušší. Její nevýhodou je nutnost nasbírání všech dat před začátkem výpočtu a výsledky jsou i pro krátké vlnové délky k dispozici za dlouhou dobu. Zároveň vlastní výpočet vícebodové FFT trvá dlouho a po dobu výpočtu omezuje další funkce mikrokontroléru a nakonec i poměrně velká paměťová náročnost, kdy je třeba mít velké datové zásobníky pro všechna vstupní a výstupní data.

Vylepšením předchozího postupu je sumace v dílčích spektrech. Při tomto postupu se nejdříve vypočte FFT z menšího počtu vzorků pro určení krátkých vlnových délek a později

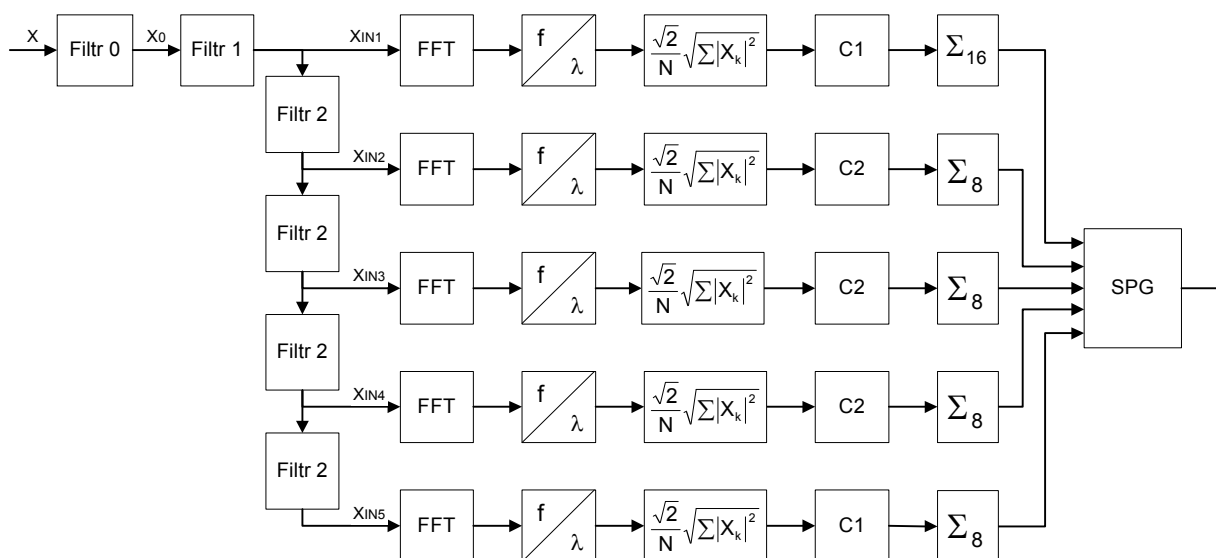
další FFT z menšího počtu decimovaných dat pro určení delších vlnových délek. Výhodou metody je lepší využití paměťových a výpočetních zdrojů a rychlejší odezva pro krátké vlnové délky. Nevýhodou metody je, že s menším počtem vzorků pro výpočet FFT roste riziko vzniku výpočetních vad FFT vlivem výpočtu z délky, která neodpovídá periodě měřeného signálu. Další komplikací může být vzájemné napojení dílčích spekter do jednoho spektrogramu. Těmito negativními jevy se budou zabývat následující kapitoly.

Základním požadavkem je vyhodnocovat periodické vady pro vlnové délky od 1cm až do stovek metrů, tzn. rozsah 14 až 16 oktáv. Je-li  $\Delta L = 5\text{mm}$  délka vzorku, je potom  $\lambda_{\min} = 2 \Delta L = 1\text{cm}$  minimální vlnová délka spektrogramu. Jako optimální se ukázalo použití 1024-bodové FFT. Četná měření prokázala, že jako statisticky vysoce spolehlivé délky lze uvažovat rozsah  $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}/40)$ . Pro jednodušší výpočet použijeme z každé dílčí FFT 3oktávy, tzn. rozsah  $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}/64) = (\lambda_{\min}, 8*\lambda_{\min})$ . Tab. 6 přehledně ukazuje rozdělení výpočtu do 5-ti, případně 4 kroků dle požadované maximální vlnové délky.

	Vzorkování	Min. délka	Max. délka	Vztažná délka	Četnost 240m/min	Četnost 480m/min
1.	5mm	1cm	8cm	5,12m	1,28s	0,64s
2.	4cm	8cm	64cm	40,96m	10,24s	5,12s
3.	32cm	64cm	5,12m	327,68m	1,36min	40,96s
4.	2,56m	5,12m	40,96m (104,86m)	2,62km	10,92min	5,46min
5.	20,48m	40,96m	327,68m (838,86m)	20,97km	87,38min	43,69min

Tab. 6 Rozdělení výpočtu

Obr. 32 pro názornost ukazuje postup výpočtu spektrogramu tak, jak bude postupně rozebrán v následujících kapitolách. V tomto obrázku  $x_0$  je vstupní signál do algoritmu. Jde o data z čipu MSBF032. Filtr0 je předfiltrace v samotném čipu dle kapitoly 4.3.2.



Obr. 32: Výpočet spektrogramu

#### 4.3.14.7.1 Převzorkování vstupního signálu

Příprava vstupního signálu  $x_0$  (Filtr1 dle Obr. 32) spočívá v převzorkování vstupního signálu na požadovanou velikost vzorku. Výchozí signál je vzorkován po 1mm a nejmenší požadovaná délka pro zobrazovaný spektrogram je 10mm, je tedy potřeba signál převzorkovat na velikost vzorku 5mm. Aby nedocházelo k aliasingu, musí decimaci dat předcházet filtrace pro potlačení nežádoucích frekvencí.

Pro zvýšení spolehlivosti se zachováním jednoduchosti filtru probíhá filtrování vstupního signálu ve dvou stupních.

V první fázi se aplikuje jednoduchý filtr s konečnou impulzní odezvou 8.řádu, následován filtrem 5.řádu a zároveň se provede potřebná decimace signálu v poměru 1:5.

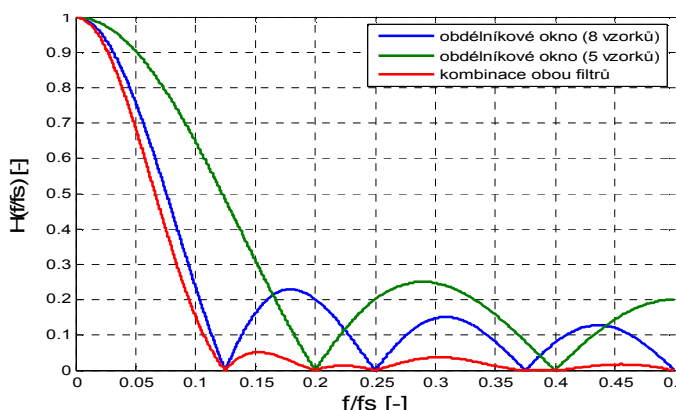
$$x_{T1}[n] = \frac{1}{8} \cdot \sum_{k=0}^7 x_0[n-k] = \frac{1}{8} \cdot x_T[n] \quad (\text{R.4.3.14-3})$$

nebo po jednoduché úpravě, kdy pro výpočet stačí jeden buffer na 8 hodnot.:

$$x_{T1}[n] = \frac{1}{8} \cdot (x_T[n-1] - x_0[n-8] + x_0[n]) \quad (\text{R.4.3.14-4})$$

$$x_{IN1}[m] = \frac{1}{5} \sum_{i=5^*m}^{5^*(m+1)-1} x_{T1}[i], \text{ kde } m = 0, 1, \dots, M \quad (\text{R.4.3.14-5})$$

V tomto případě stačí uložit 5 hodnot  $x_{T1}$  a z nich vypočítat aritmetický průměr.



Tento signál  $x_{IN1}$  se použije jako vstupní signál do algoritmu FFT pro první blok dílčího spektrogramu (pro délky 0,01 – 0,08 m). Obr. 33 ukazuje přenosovou charakteristiku použitého filtru pro předzpracování signálu. Z obrázku je patrné, že i když jde o matematicky a výpočetně jednoduchý algoritmus, přesto je jeho účinnost vysoká.

Obr. 33: Přenosová charakteristika filtru pro předzpracování signálu

#### 4.3.14.7.2 Filtrace

Celý spektrogram se skládá z několika dílčích spektrogramů, jejichž spektra na sebe navazují. Pro jejich vytvoření je nutné signály opět převzorkovat (Filtr2 dle Obr. 32). Filtrace se opět provádí ve dvou krocích a to konvolucí s obdélníkovým oknem o velikosti 12 vzorků a poté konvolucí s dalším obdélníkovým oknem o velikosti 8 vzorků a decimací. Celý spektrogram tvoří 5 bloků, přičemž z každého dílčího spektrogramu jsou použity 3 oktávy. Proto je nutné data před výpočtem nového dílčího spektrogramu decimovat v poměru 1:8.

$$x_{Tj}[n] = \frac{1}{12} \cdot \sum_{k=0}^{11} x_{IN(j-1)}[n-k] = \frac{1}{12} \cdot x_T[n] \quad (\text{R.4.3.14-6})$$

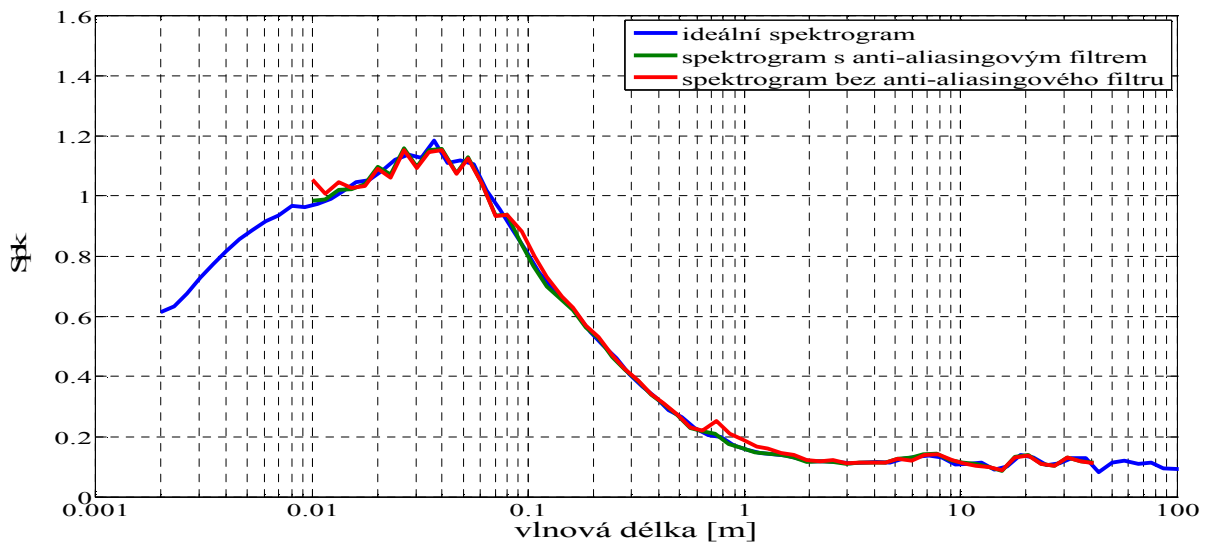
$$x_{Tj}[n] = \frac{1}{12} \cdot (x_T[n-1] - x_{IN(j-1)}[n-12] + x_{IN(j-1)}[n]) \quad (\text{R.4.3.14-7})$$

$$x_{INj}[m] = \frac{1}{8} \sum_{i=8^*m}^{8^*(m+1)-1} x_{Tj}[i], \text{ kde } m = 0, 1, \dots, M_j \quad (\text{R.4.3.14-8})$$

Každý z těchto signálů bude použit jako vstupní signál do algoritmu FFT pro příslušný blok dílčího spektrogramu. Přenosová charakteristika použitých filtrů je velice podobná přenosové charakteristice dle Obr. 33 a filtry jsou dostatečně účinné pro odstranění aliasingu.

Výše uvedené filtrace jsou výpočetní operace, které neubírají zásadním způsobem na celkovém výkonu a paměti mikrokontroléru. Dále je uvedeno porovnání výsledků, kde je spektrogram složen z dílčích spektrogramů, jejichž vstupní data jsou filtrována a decimována tak, aby nedocházelo k aliasingu (Filtr1 a Filtr2) a spektrogramu, kde jsou vstupní data pro dílčí spektrogramy pouze decimována s použitím nedostatečně strmého filtru (aritmetický průměr hodnot), který dostatečně nezabrání aliasingu.

Z Obr. 34 je patrný pozitivní vliv obou filtrů na výsledný spektrogram a důvod jejich použití, kdy se výsledný spektrogram přiblíží ideálnímu spektrogramu.



Obr. 34: Vliv použití filtrů při rozložení signálu do bloků

#### 4.3.14.7.3 Výpočet FFT

Výpočet FFT je daným mikrokontrolérem proveden prostřednictvím DSP funkce `cr4_fft_1024_stm32FFT`. Výsledné spektrum je sice komplexní, ale fáze komplexního spektra není v analýze příze důležitá. Proto bude pro další zpracování použita pouze absolutní hodnota (modul).

$$|X_k|^2 = (\text{Re}\{X_k\})^2 + (\text{Im}\{X_k\})^2 \quad (\text{R.4.3.14-9})$$

Výstupem výpočtu FFT je dvoustranné spektrum. Složka 0 je stejnosměrná, složky 1-512 odpovídají kladným frekvencím a 512-1023 záporným frekvencím. Složka 512 má dvojnásobnou velikost a je třeba ji pro další zpracování vydělit 2. Podle kapitoly 4.3.14.6 jsou počítány dvě nezávislé FFT najednou. Pro absolutní hodnoty koeficientů FFT potom platí:

$$|F(k)|^2 = \frac{1}{4} \cdot \left( (H_R(k) - H_R(N-k))^2 + (H_I(k) - H_I(N-k))^2 \right) \text{ pro první signál} \quad (\text{R.4.3.14-10})$$

$$|G(k)|^2 = \frac{1}{4} \cdot \left( (H_R(k) - H_R(N-k))^2 + (H_I(k) + H_I(N-k))^2 \right) \text{ pro druhý signál.} \quad (\text{R.4.3.14-11})$$

#### 4.3.14.7.4 Spektrogram

Výsledkem diskrétní Fourierovy transformace jsou frekvenční složky s konstantní šířkou pásma  $\Delta f$ . V textilním průmyslu je zvykem zobrazit výsledky podle vlnové délky a v logaritmickém měřítku. Z tohoto důvodu je třeba výstup FFT přepočítat.

##### 4.3.14.7.4.a Převod frekvenčních složek na vlnové délky

Nejdříve je třeba „převést“ všechny frekvenční složky do příslušných vlnových délek spektrogramu. Je-li  $D$  počet sloupců spektrogramu na oktávu a  $\Delta L$  vzorkovací perioda, potom minimální žádaná vlnová délka je  $\lambda_{\min} = 2 \Delta L$  a maximální vlnová délka je  $\lambda_{\max} = N \Delta L$ . Úkolem je určit, které frekvenční složky se započítají do jednotlivých sloupců spektrogramu. Je zřejmé, že pro krátké vlnové délky bude ve sloupci velké množství frekvenčních složek a postupně jich bude ubývat.

Jednotlivé frekvenční složky  $X(k)$  odpovídají následujícím vlnovým délkám:

$$\lambda_k = \frac{N \cdot \Delta L}{k} = \frac{v_o}{\Delta f \cdot k} \quad , \text{ pro } k = \langle 1; N/2 \rangle. \quad (\text{R.4.3.14-12})$$

A jednotlivé sloupce jsou vymezeny následujícími vlnovými délkami:

$$\lambda_i = 2^{\left(\frac{i}{D} + 1\right)} \cdot \Delta L \quad , \text{ pro } i = \langle 0; D \cdot (\log_2 N - 1) - 1 \rangle. \quad (\text{R.4.3.14-13})$$

Každý sloupec spektrogramu představuje součet výkonů všech frekvenčních složek v daném rozsahu vlnových délek příslušného sloupce. Chceme-li nyní určit hraniční frekvenční složky (harmonické), které je třeba sečíst v příslušném sloupci spektrogramu, lze snadno z předchozích rovnic odvodit:

$$k = \frac{N}{2^{\left(\frac{i}{D}+1\right)}} = \text{Ind}[i], \text{ pro } i \leq 0; D \cdot (\log_2 N - 1) - 1 >. \quad (\text{R.4.3.14-14})$$

Každá po sobě jdoucí dvojice hodnot této posloupnosti určuje rozmezí indexů frekvencí pro jednotlivé sloupce spektrogramu. Tab. 7 ukazuje přehledně pro N=1024 a D=5 prvních 5 oktáv (počítány jsou první 3), které „harmonické“ je třeba sečíst v jednotlivých sloupcích spektrogramu.

<b>index</b>	<b>0</b>		<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>		<b>4</b>	
<b>od do</b>	446	512	389	445	338	388	295	337	257	294
<b>index</b>	<b>5</b>		<b>6</b>		<b>7</b>		<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>od do</b>	223	256	195	222	169	194	148	168	129	147
<b>index</b>	<b>10</b>		<b>11</b>		<b>12</b>		<b>13</b>		<b>14</b>	
<b>od do</b>	112	128	98	111	85	97	74	84	65	73
<b>index</b>	<b>15</b>		<b>16</b>		<b>17</b>		<b>18</b>		<b>19</b>	
<b>od do</b>	56	64	49	55	43	48	37	42	33	36
<b>index</b>	<b>20</b>		<b>21</b>		<b>22</b>		<b>23</b>		<b>24</b>	
<b>od do</b>	28	32	25	27	22	24	19	21	17	18

Tab. 7 Tabulka indexů frekvenčních složek pro jednotlivé sloupce spektrogramu

#### 4.3.14.7.4.b Výpočet sloupců spektrogramu

Každý sloupec spektrogramu představuje výkon signálu. V předchozí kapitole bylo ukázáno, které frekvenční složky je třeba sčítat, nyní určíme, jakým způsobem je sčítat.

Pro vzorkované periodické signály platí základní definice výkonové spektrální hustoty (PSD). Pro spektra s významnými izolovanými složkami je výhodnější používat přímo výkonové spektrum (PWR). Další variantou spekter jsou spektra s efektivními hodnotami (RMS) složek.

$$\text{RMS}_k = \frac{\sqrt{2}}{N} \sqrt{|X_k|^2}; \text{ RMS}_0 = \frac{1}{N} \sqrt{|X_0|^2} \text{ pro } k \leq 1; N/2 - 1 > \text{ a } k=0. \quad (\text{R.4.3.14-15})$$

Při integraci tohoto spektra ve zvoleném rozsahu stačí sečíst jen jednotlivé složky. Toto spektrum je použito při výpočtu spektrogramů. Sloupce spektrogramu tedy vypočteme tak, že podle Tab. 7 a následujícího vzorce se pro jednotlivé délky  $2^{\left(\frac{i}{D}+1\right)} \cdot \Delta L$  sečtou energie příslušných „harmonických“.

$$\text{Spk}[i] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sqrt{\sum_{k=\frac{N}{2^{\frac{i}{D}+1}}}^{\frac{N}{2^{\frac{i}{D}+1}-1}} |X(k)|^2}, \text{ pro } i \leq 0; D \cdot (\log_2 N - 1) - 1 >. \quad (\text{R.4.3.14-16})$$

#### 4.3.14.7.4.c Korekce dílčích spekter

Jak již bylo uvedeno, celkový spektrogram se vypočte sumací v dílčích spektrech. Celý spektrogram od vlnové délky 0,01m do vlnové délky 327,68m s rozlišením 5 vzorků na oktávu je složen z 5 bloků dílčích spektrogramů. Z každého dílčího spektrogramu se pro spojení do výsledného spektrogramu vezmou 3 oktávy. Pro každý dílčí spektrogram je nutné

provést před výpočtem filtraci a decimaci signálu (viz.4.3.14.7.1a4.3.14.7.2). V ideálním případě by frekvenční charakteristiky použitých filtrů měly být obdélníkové. Protože tomu tak ale není (viz. Obr. 33), je nutné tyto spektrální složky korigovat.

Nejjednodušší metodou spojování dílčích spektrogramů je vážené průměrování jednotlivých výkonových spektrálních hustot v příslušných sloupcích. Aplikování této metody je velice snadné, ovšem výsledky nejsou ve všech případech uspokojující.

Jako daleko účinnější se ukázala metoda, kdy jsou spektrální složky korigovány koeficienty. Tyto koeficienty jsou určeny z přenosové charakteristiky filtru pro jednotlivé frekvence. Těmito korekčními koeficienty jsou pak násobeny energie na jednotlivých vlnových délkách dílčích spektrogramů. Po korekci je možné dílčí spektrogramy spojit do jednoho spektrogramu.

Korekční koeficienty (C1) pro první dílčí spektrogram (Filtr1) jsou uvedeny v Tab. 8 a korekční koeficienty (C2) pro 2. až 5. dílčí spektrogram (Filtr2) v Tab. 9. Uvedené délky lze

spočítat dle dříve uvedeného vztahu  $\lambda_i = 2^{\left(\frac{i}{D+1}\right)} \cdot \Delta L$ .

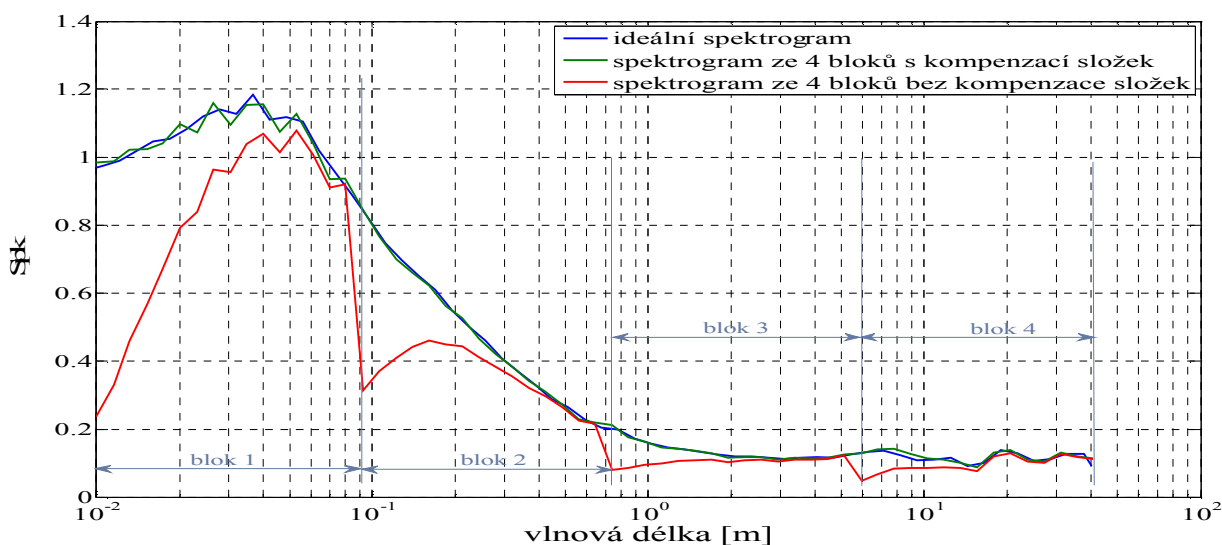
Délka	Koeficient	Délka	Koeficient	Délka	Koeficient	Délka	Koeficient
10,0mm	4,176	20,0mm	1,384	40,0mm	1,082	80,0mm	1,020
11,5mm	2,986	23,0mm	1,276	46,0mm	1,061		
13,2mm	2,219	26,4mm	1,201	52,8mm	1,046		
15,2mm	1,797	30,3mm	1,147	60,6mm	1,034		
17,4mm	1,549	34,8mm	1,110	69,6mm	1,026		

Tab. 8 Korekční koeficienty pro Filtr1

Délka	Koeficient	Délka	Koeficient	Délka	Koeficient	Délka	Koeficient
		0,160m	1,349	0,320m	1,076	0,640m	1,018
0,092m	2,691	0,184m	1,252	0,368m	1,057		
0,106m	2,069	0,211m	1,184	0,422m	1,042		
0,121m	1,709	0,243m	1,135	0,485m	1,032		
0,139m	1,494	0,279m	1,102	0,557m	1,024		

Tab. 9 Korekční koeficienty pro Filtr2

Obr. 35 ukazuje pozitivní vliv korekce dílčích spekter na celkový spektrogram.

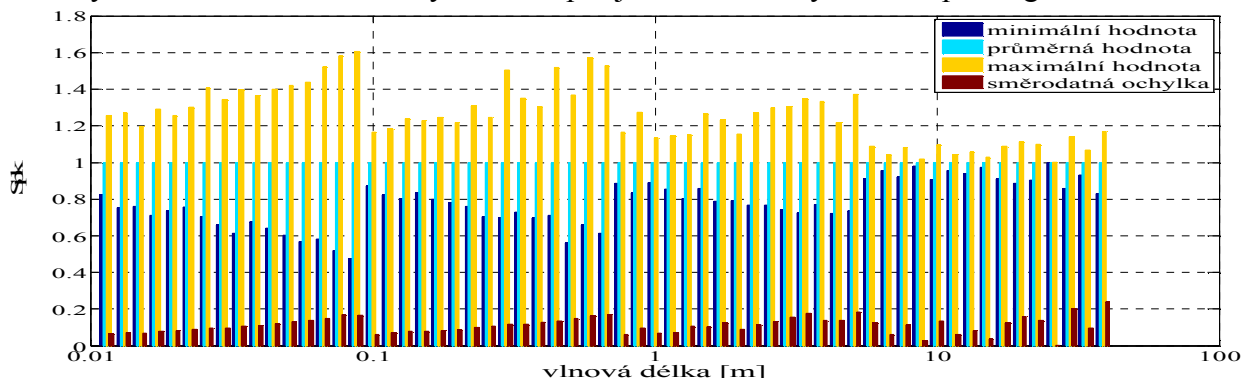


Obr. 35: Vliv korekce dílčích spekter



#### 4.3.14.7.4.d Průměrování dílčích spektrogramů

Signál z příže obsahuje mnoho fluktuací a je díky mnoha jevům v čase velice proměnný. To se projeví ve spektrogramu chybami a nevyhlazenostmi. Obr. 36 ukazuje relativní rozptyl vlnových složek z časově odlišných úseků pro jednotlivé bloky dílčích spektrogramů.



Obr. 36: Relativní rozptyl složek spektrogramu

Abychom tyto chyby redukovali a získali co nejrepresentativnější spektrogram, je třeba sobě odpovídající složky získaných dílčích spektrogramů průměrovat. Počet hodnot pro průměrování je třeba určit tak, aby výsledný spektrogram byl co nejpřesnější, počet hodnot průměrování byl únosný a zároveň spektrogram reagoval na případné závady v procesu předání dostatečně rychle.

Obecně je nutné průměrovat složky  $M$  dílčích spektrogramů podle následujícího vzorce:

$$SPK_M[i] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M spk_m[i], \text{ pro } m = \langle 1; M \rangle \quad (\text{R.4.3.14-17})$$

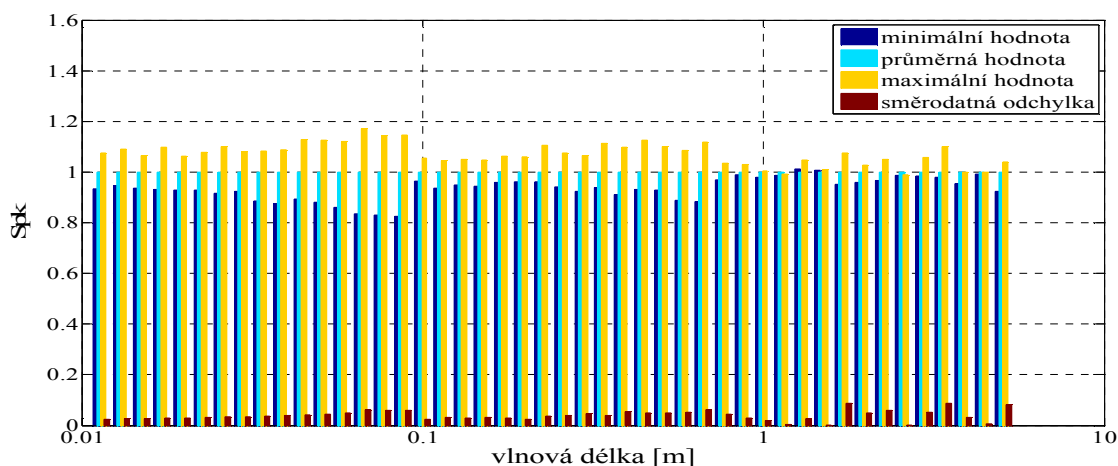
Tento vzorec předpokládá udržovat v paměti jednotlivé mezisoučty, což je nevýhodné. Jednodušší je průměrovat podle následujícího rekurzivního vzorce, tj.

$$SPK_m[i] = \frac{m-1}{m} \cdot SPK_{m-1}[i] + \frac{1}{m} \cdot spk_m[i], \text{ pro } m = \langle 1; M \rangle. \quad (\text{R.4.3.14-18})$$

Průměrování spekter dle tohoto vzorce se zastaví po vyhodnocení  $M$  spekter a přejde na výpočet s konstantními koeficienty:

$$SPK_m[i] = \frac{M-1}{M} \cdot SPK_{m-1}[i] + \frac{1}{M} \cdot spk_m[i], \text{ pro } m = M+1, M+2, \dots \quad (\text{R.4.3.14-19})$$

Na Obr. 36 je vidět, že relativní rozptyl může činit bez průměrování až  $\pm 50\%$ . Pro stanovení optimálního  $M$ , je třeba najít kompromis mezi přesností a rychlostí detekce vady. Obecně platí, že s rostoucím  $M$  klesá chyba a snižuje se rychlost. Jako optimální řešení bylo stanoveno použít  $M=16$  pro 1. blok dílčích spektrogramů a  $M=8$  pro bloky ostatní.



Obr. 37: Relativní rozptyl pro  $M=8$

#### 4.3.14.8. Alarm spektrogramu

Úkolem čističe je nejen monitorování a zobrazení spektrogramu, ale i odstavení sprádacího místa z důvodu výskytu periodické vady. Téměř všechny rotační problémy na sprádacím místě nebo v přípravném procesu se projeví zvýšením hodnoty v kanálu spektrogramu, odpovídajícímu „vadné“ vlnové délce nebo jejímu násobku. Chyba se ve spektrogramu projeví jako zvýšený sloupec („komín“) na příslušné vlnové délce anebo jako „kopcovitě“ zvýšení na více souvislých vlnových délkách. „Komínový“ typ vady je způsoben přesně periodickými vadami a „kopcovitý“ typ vady je způsoben přibližně periodickými vadami.

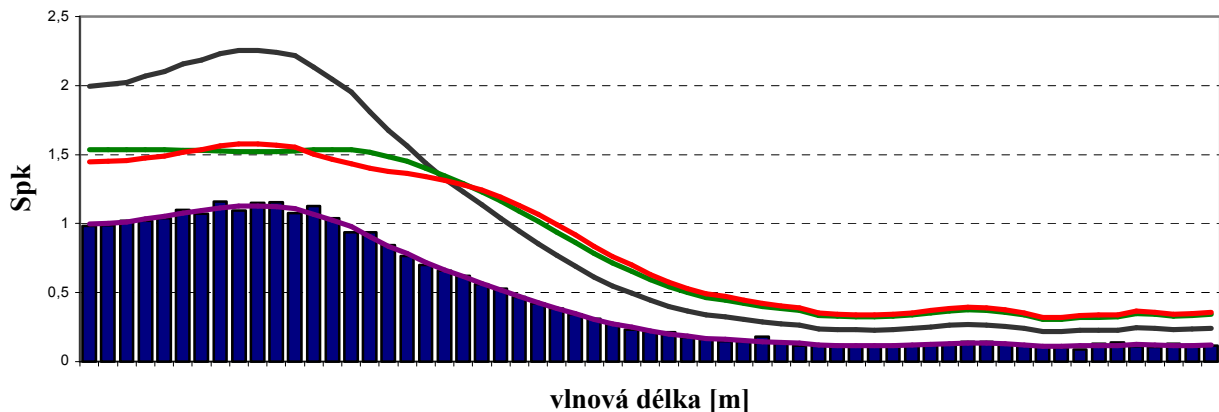
Jedna z možností, jak vyhodnocovat spektrogram, je porovnávat spektrogram konkrétní sprádací jednotky s „průměrným“ spektrogramem celého stroje. Protože ale cílem je nezávislé čidlo, je třeba nalézt algoritmus, který je schopen detekovat vadu v jednom konkrétním spektrogramu.

Alarm spektrogramu je vyvolán, jestliže sloupec kanálu na příslušné vlnové délce je vyšší než nastavená procentuální odchylka  $LSPK\%$ .

Jako střední vztažnou hodnotu každého kanálu  $\overline{SPK}[i]$  (Obr. 38 fialová křivka) pro stanovení limitu periodické vady ve spektrogramu vezmeme střední hodnotu 4 sousedních kanálů (2 vlevo a 2 vpravo od příslušného kanálu) a vztažného kanálu:

$$\overline{SPK}[i] = \frac{Spk[i-2] + Spk[i-1] + Spk[i] + Spk[i+1] + Spk[i+2]}{5} \quad (R.4.3.14-20)$$

Pokud bychom povolenou procentuální odchylku  $LSPK\%$  vztáhli pouze ke střední hodnotě  $\overline{SPK}[i]$ , dostaneme čisticí křivku  $LSpk$  (Obr. 38 černá křivka,  $LSPK\%=100\%$ ).



Obr. 38: Střední vztažné hodnoty a různé čisticí křivky pro spektrogram příže

Zkoušky na přízi ukázaly, že není vhodné mít povolenou procentuální odchylku  $LSPK\%$  konstantní pro všechny vlnové délky, ale je vhodné odchylku modifikovat v závislosti na velikosti sloupce spektrogramu  $Spk[i]$ , respektive na hodnotě  $\overline{SPK}[i]$ . Pro vyšší hodnoty  $\overline{SPK}[i]$  je třeba povolenou procentuální odchylku snížit a naopak pro malé hodnoty je nutné odchylku zvýšit. Obecně lze tedy čisticí křivku nadefinovat vztahem:

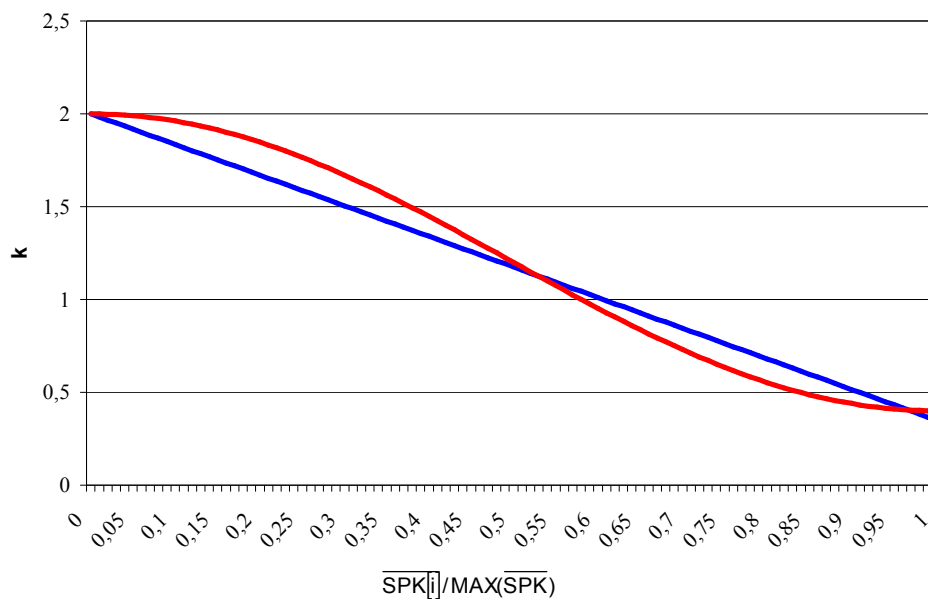
$$LSpk[i] = \frac{(k[i] \cdot LSPK\% + 100)}{100} \cdot \overline{SPK}[i], \text{ kde } k \text{ je modifikační koeficient. } (R.4.3.14-21)$$

Při testech algoritmu se jako nejefektivnější ukázal kosinusový modifikační koeficient  $k$  závislý na velikosti střední hodnoty  $\overline{SPK}[i]$ . Koeficient je definován empirickým vztahem:

$$k[i] = A1 \cdot \cos\left(\frac{\overline{SPK}[i]}{\overline{MAX(SPK)}} \cdot \Pi\right) + A2 = 0,8 \cdot \cos\left(\frac{\overline{SPK}[i]}{\overline{MAX(SPK)}} \cdot \Pi\right) + 1,2 \quad (R.4.3.14-22)$$

Průběh hodnot kosinusového modifikačního koeficientu pro výpočet čisticí křivky spektrogramu je na Obr. 39 červenou barvou a čisticí křivka LSpk je zobrazena na Obr. 38 rovněž červenou barvou (LSPK%=100%).

I když by výpočet kosinusového koeficientu nezatížil zásadním způsobem vybraný mikrokontrolér, přesto byl z důvodů zjednodušení při realizaci použit koeficient lineární. Výpočet tohoto koeficientu je o mnoho rychlejší a přitom průběh kosinusového koeficientu aproximuje dostatečně, což potvrdily i praktické zkoušky. Průběh byl opět stanoven a odzkoušen empirickým způsobem. Hodnoty lineárního modifikačního koeficientu pro výpočet čisticí křivky spektrogramu jsou patrné z Obr. 39 (modrá barva) a čisticí křivka LSpk je zobrazena na Obr. 38 zelenou barvou (LSPK%=100%).



Obr. 39: Koeficient výpočtu procentuální odchylky spektrogramu

Lineární modifikační koeficient  $k$  je definován empirickým vztahem:

$$k[i] = A1 \cdot \frac{\overline{SPK}[i]}{\overline{MAX(SPK)}} + A2 = -1,65 \cdot \frac{\overline{SPK}[i]}{\overline{MAX(SPK)}} + 2 \quad (R.4.3.14-23)$$

Je-li tedy LSPK% nastavená procentuální odchylka pro alarm spektrogramu, potom je alarm spektrogramu signalizován, jestliže platí (R.4.3.14-24):

$$Spk[i] \geq \frac{(k[i] \cdot LSPK\% + 100)}{100} \cdot \overline{SPK}[i] = \frac{\left( \left( -1,65 \cdot \frac{\overline{SPK}[i]}{\overline{MAX(SPK)}} + 2 \right) \cdot LSPK\% + 100 \right)}{100} \cdot \overline{SPK}[i]$$

## 5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo na základě podrobné analýzy vad na přízích navrhnout vhodný integrovaný snímač kvality příze, včetně nalezení a implementace vhodných algoritmů pro detekci vad a zjištění kvality příze, který bude možno použít pro vyhodnocení v reálném čase.

Úvodní rešeršní část disertační práce se zabývá zejména přehledem dostupných čističů příze a dále známými principy měření kvality příze, jejich vzájemným porovnáním s uvedením jejich výhod a nevýhod. Důraz byl kladen zejména na podrobnější prozkoumání a zmapování situace na trhu.

Náplní práce je komplexní studie zaměřená na technické možnosti detekce vad v přízi, měření kvality vypřádané příze, nalezení vhodných algoritmů a na posouzení jednotlivých metod detekce vad z hlediska požadované přesnosti a extrémní dynamiky.

Zaměření disertační práce je do značné míry určováno praxí a problémy, které se vyskytují v přádelnách, a které je nutné řešit. Jedním z nejdůležitějších v poslední době jsou periodické vady. Pokud tyto vady nejsou detekovány včas, projeví se až ve výsledné tkanině či pletenině, čímž dojde ke zničení velkého množství produkce. Hlavní pozornost byla proto věnována zkoumání těchto vad. Pro typickou vadu příze rotorových dopřádacích strojů moiré byl nalezen algoritmus detekující vadu již na 10 obvodech rotoru, což je délka příze, kterou jsou obsluha nebo zapřádací robot schopni snadno z cívky odmotat a není třeba navinutou přízi vyřadit. Ostatní periodické vady je možné zjistit za pomoci tzv. spektrogramů. Pro detekci těchto vad je třeba vytvořit speciální měřicí kanál, implementovat a on-line pro každé spřádací místo vypočítat spektrogram a v něm nalézt vhodnou metodou periodickou vadu. Jelikož získané poznatky je možné ihned využít v praxi na realizovaném a prodávaném čidle, je nezbytné hlavně u výpočtu spektrogramů nalézt nejvhodnější metodu výpočtu a optimalizovat ji podle možností použitého mikroprocesoru.

Teoretická část práce je zaměřena na vyhledání a implementaci vhodných softwarových algoritmů pro detekci, vyhodnocování a třídění vad v přízi. Tato část obsahuje posouzení jednotlivých metod detekce vad a vyhodnocení kvality příze z hlediska přesnosti, rychlosti, efektivnosti a z hlediska dynamiky tak, aby bylo možno kvalitu příze vyhodnocovat on-line. V práci provedena podrobná analýza navrženého řešení integrovaného čidla kvality příze z hlediska statické přesnosti a jeho dynamického chování.

Přínosem práce je realizace integrovaného čidla kvality příze se speciálním zaměřením na algoritmy kontinuálního vyhodnocování kvality vypřádané příze a na detekci vad. Čidlo kvality příze je navrženo tak, že je díky nadefinovanému interface plně integrované do elektronického konceptu řízení dopřádacího stroje a umožňuje kontinuálně kontrolovat vyrobenou přízi s cílem přerušit předení v případě výskytu rušivé vady, odstranit vadný úsek příze a automaticky spustit proces předení.

Dalším přínosem práce je rozšíření teoretických poznatků při praktickém řešení integrovaného čidla kvality příze, zhodnocení naměřených hodnot a výsledků pro návrh nové metodiky detekce a třídění vad a matematický popis vad a jejich detekce a vyhodnocování kvality příze. To umožní výrazně zkvalitnit a zpřesnit detekci vad v realizovaném čidle a zároveň detekovat nové vady. Dalším z přínosů je vypracování metodiky on-line vyhodnocení kvality vypřádané příze, včetně detekce vad, které nebylo možné dříve on-line vyhodnocovat.

Předností čidla je světově unikátní řešení, které ho zásadním způsobem odlišuje od ostatních konkurenčních, na trhu se vyskytujících, čističů. Toto řešení spočívá jednak v použití opticko-digitálního principu měření, dále ve vývoji a nasazení vlastního Rieter optického senzoru, v plném zintegrování čidla do stávajícího konceptu elektroniky tak, aby nedocházelo k dublování HW prostředků, v univerzálnosti jeho použití pro rotorové i tryskové dopřádací stroje a hlavně v jeho autonomnosti. V tomto případě je veškerá inteligence spojená s detekcí a tříděním všech vad a s vyhodnocením kvality příze soustředěna do vlastního čidla a jeho mikrokontroléru, takže není třeba relativně složitá a komplikovaná sekční vyhodnocovací elektronika.

Způsoby použité při návrhu čidla jsou v současné době patentově chráněny.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wilson\\_Yarn\\_Clearer](http://en.wikipedia.org/wiki/Wilson_Yarn_Clearer)
- [2] Výrobní družstvo strojníků a nástrojařů Jiskra Pardubice  
Radiojournal 62/2007
- [3] USTER News Bulletin – Die elektronische Garnreinigungsanlage USTER  
AUTOMATIC  
prosinec 1974
- [4] USTER News Bulletin – Das USTER – System der Garnfehlerkontrolle  
srpen 1981
- [5] USTERPOLYGUARD – Garnüberwachungsanlage zur Qualitätssicherung an  
Rotorspinnautomaten  
firemní materiál, Zellweger Uster, 1981
- [6] USTER News Bulletin – Qualitätssicherung der Produktion mit Rotor-Spinnautomaten  
duben 1987
- [7] USTER POLYGUARD, Model UPG4 – Operating Instructions  
firemní materiál, Zellweger Uster, 1988
- [8] USTER POLYGUARD 5, Überwachungdes gesamten Rotorspinnprozesses  
firemní materiál, Zellweger Uster, 1993
- [9] USTER QUANTUM 2 – Application Handbook  
firemní materiál, Uster Technologies, 2005
- [10] USTER Spektrograph, Band 2  
firemní materiál, Zellweger Uster, 1977
- [11] <http://www.uster.com/>
- [12] BARCOPROFILE – Operating manual  
firemní materiál, Barco Automation, 1999
- [13] <http://www.barco.com/>
- [14] <http://www.visionbms.com/>
- [15] YARNMASTER 3N1  
firemní materiál, Loepfe Brothers Ltd.
- [16] <http://www.loepfe.com/>
- [17] <http://www.stuber.de/>
- [18] <http://www.premier-1.com/>
- [19] <http://www.keisokki.com/>
- [20] <http://www.btsr.com/>
- [21] <http://www.cltme.com/>
- [22] <http://www.sh-zhengji.com/>
- [23] Corolab Q manual  
Saurer/Schlafhorst/suzhou, 2008
- [24] Meyer, Rienas, Birmem – Integriertes Garnreinigungssystem zur Erkennung and  
Ausreinigung von Fremdfasern für Rotorspinnmaschinen  
Oerlikon Schlafhorst, Zweigniederlassung der Oerlikon Textile GmbH & Co. KG  
Saurer/Schlafhorst/suzhou, 2008
- [25] Klička V., Ripka J., Sekotová V., Musil F. – Vývoj textilního strojírenství v regionu  
Orlicka  
OFTIS Ústí nad Orlicí, 2003

- [26] McCreight D., Feil R., Booterbault J., Backe E. – Short Staple Yarn Manufacturing  
Carolina Academic Press, 1997
- [27] Klein W. – The Rieter Manual of Spinning. Volume 1 – Technology of Short-staple Spinning  
Rieter Machine Works Ltd., 2008
- [28] Ernst H. – The Rieter Manual of Spinning. Volume 5 – Rotor Spinning  
Rieter Machine Works Ltd., 2008
- [29] Yehia E. Elmoghazy - Understanding the Fibre-to-Yarn System, Part II: Yarn Characteristics, 1993
- [30] A. Basu, I. Doraiswamy, R. L. Gotipamul – Measurement of Yarn Diameter and Twist by Image Analysis  
Journal Textile Institute, 2003, Volume 94
- [31] Kvaček R. – Linear Optical Sensor MSBF032  
ASICentrum, 2003
- [32] I. Hagen – Evaluation des Rieter Usti IQ-clean Sensors im Hinblick auf die Erfassung langer Dünnstellen  
Diplomarbeit, 2006
- [33] Aeppli K. – Verfahren zur Bestimmung des Durchmessers oder des Querschnittes eines faden- oder drahtförmigen Körpers, Vorrichtung zur Ausföhrung des Verfahrens, sowie Anwendung des Verfahrens  
Patent CH643060  
1979
- [34] Henze H., Rienas G. – Method and Device for the Contactless Measuring of Strandlike Textile Material  
Patent US6242755  
1999
- [35] Tůma J. – Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT  
Sdělovací technika Praha, 1997
- [36] Nevřina P. – Analýza signálů a soustav  
BEN – Technická literatura Praha, 2000
- [37] Jan J. – Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů  
VUTIUM Brno, 2002
- [38] Numerical Recipes In C: The Art Of Scientific Computing  
Cambridge University Press, ISBN 0-521-43108-5, 1988-1992
- [39] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fast\\_Fourier\\_transform](http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Fourier_transform)
- [40] Widhe T., Melander J., Wanhammar L. – Design Of Efficient Radix-8 Butterfly PEs  
Linköping University, Sweden
- [41] Fast Fourier Transform (FFT)  
<http://www.cmlab.csie.ntu.edu.tw/cml/dsp/training/coding/transform/fft.html>
- [42] Richards M. – On Hardware Implementation Of The Split-Radix FFT  
IEEE Transactions On Acoustics, Speech And Signal Processing, Vol.36, No10, 1988
- [43] UM0585 - User manual – STM32F10x – DSP library  
STMicrosystems, Doc ID 14988 Rev 2, June/2010

## 7 PŘEHLED PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

- [44] Kousalík P., Ludvíček J., Špindler Z. - Způsob individuálního zapřádání příze na pracovním místě rotorového dopřádacího stroje a zařízení k provádění tohoto způsobu  
Patent CZ284295, EP0960225, DE69803275, WO9836115, ES2165143, 1997
- [45] Kousalík P., Ludvíček J., Markl J. - Způsob zapřádání příze na pracovním místě rotorového dopřádacího stroje a zařízení k jeho provádění  
Patent CZ290468, DE10133125, US6606847, 2000
- [46] Kousalík P., Ludvíček J., Markl J., Tesař T. - Rotorový dopřádací stroj  
Patent CZ289933, DE10133152, US6591600, 2000
- [47] Hájek L., Kousalík P., Štusák M. - Zařízení pro bezdotykové měření lineárního textilního útvaru, např. příze, niti, textilního vlákna, pramene vláken  
Patent CZ299647, EP1332333, WO0237056, AU120752, 2000
- [48] Kousalík P., Sloupenský J. - Transportní prostředek pro uložení a přepravu vlákenného materiálu, zejména pramenová konev nebo dutinka nebo cívka a způsob dopravy informací o vlákenném materiálu  
Příhláška patentu CZ20012019, 2001
- [49] Hájek L., Kousalík P., Sloupenský J., Štusák M. - Zařízení pro bezdotykové měření vlastností pohybující se příze nebo přízi podobného textilního útvaru  
Patent CZ299684, EP1319926, CN1427103, TW226393, 2001
- [50] Kousalík P., Sloupenský J., Štusák M. - Zařízení pro výrobu složkové příze a zařízení pro sledování alespoň jednoho parametru vypřádané složkové příze  
Patent CZ292980, EP1352996, 2002
- [51] Hájek L., Kousalík P. - Způsob sledování přítomnosti vypřádané složky složkové příze na pracovním místě rotorového dopřádacího stroje  
Patent CZ 295563, 2003
- [52] Kousalík P., Kubový M. - Rotorový dopřádací stroj pro výrobu flámkové příze  
Příhláška patentu CZ20032422, DE102004038461, CN1594686, ITTO20040586, 2003
- [53] Gneupel M., Hájek L., Kousalík P., Štusák M. - Způsob a zařízení pro adresování skupin snímačů a/nebo měřících prostředků na textilním, zejména prstencovém dopřádacím stroji  
Příhláška patentu CZ20040368, 2004
- [54] Beran Z., Kousalík P., Sloupenský J., Štusák M. – Způsob sledování barevné homogenity povrchu příze a zařízení k jeho provádění  
Příhláška patentu CZ2009634, 2009
- [55] Kousalík P., Sloupenský J., Štusák M. – Způsob a zařízení k řízení krokového motoru podávacího ústrojí pramene vláken na pracovním místě rotorového dopřádacího stroje.  
Příhláška patentu CZ2009635, 2009
- [56] Kousalík P. – Comparison of the evaluation algorithms for Yarn quality systems  
Výzkumná zpráva Rieter CZ, 2000
- [57] Kousalík P., Štusák M. - Integrovaný čistič příze IQclean pro BT stroje  
Popis a návod k obsluze, Rieter CZ, 2001
- [58] Kousalík P., Štusák M. - Integrovaný čistič příze IQplus pro BT stroje  
Návod k obsluze, Rieter CZ, 2005
- [59] Kousalík P., Moravec M., Sloupenský J. – Programové vybavení pro Desku sekce (DOUNI)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/1996

- [60] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Desku sekce (KOS902)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/1997
- [61] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Kontrolní systém stroje (CSS902)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/1997
- [62] Hájek L., Kousalík P., Moravec M., Špindler Z. – Programové vybavení pro Řídicí systém automatu (CSA905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 3/1997
- [63] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Ovládací systém automatu (OSA905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/1997
- [64] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Systém pro měření podtlaku (VACOM905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 5/1997
- [65] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Desku sekce (SCQ905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/1998
- [66] Hájek L., Kousalík P., Moravec M. – Programové vybavení pro Modul spřádací jednotky (JELENQ905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/1998
- [67] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Kontrolní systém stroje (CSSR903)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/1999
- [68] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Desku sekce (SCF903)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/1999
- [69] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Modul spřádací jednotky (SUMEC903)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 3/1999
- [70] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Řídicí systém stroje (CSM905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/1999
- [71] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Modul spřádací jednotky (SUMECF903)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/2000
- [72] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Modul spřádací jednotky (JELENF905)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/2000
- [73] Hájek L., Kousalík P. – Programové vybavení pro Řídicí systém stroje (CSM903)  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/2002
- [74] Hájek L., Kousalík P. - Program EC905 Řídicího systému stroje CSMR905  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/2007
- [75] Hájek L., Kousalík P. - Program ES905 pro Desku sekce SCQF905  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/2007
- [76] Hájek L., Kousalík P. - Program EJ905 Modulu spřádací jednotky JELEN905  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 3/2007
- [77] Kousalík P., Moravec M. - Program EA905 Řídicího systému automatu CSA905  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/2007
- [78] Hájek L., Kousalík P. - Program EV905 Desky měření podtlaku VACM905  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 6/2007
- [79] Kousalík P., Krpec R., Moravec M. - Program EC923 Centrály stroje BT923 -  
rozdělené pohony  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 8/2007
- [80] Kousalík P., Moravec M. - Program YCU924 Desky USYS



- Rieter CZ, Autorské dílo č. 10/2007
- [81] Kousalík P, Moravec M. - Program EBUS924 Desky AUTOBUS  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 11/2007
- [82] Hájek L., Kousalík P. - Program EQ923 Čidla kvality IQplus  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 13/2007
- [83] Kousalík P., Kučera P. - Program EF923 Flámkovací desky FLM  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 14/2007
- [84] Kousalík P., Krpec R., Kučera P. - Program FMKMaster  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 16/2007
- [85] Hájek L., Kousalík P. - Program EQRYC Čidla kvality RYC  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/2008
- [86] Hájek L., Kousalík P. - Program EISM pro desku EVA  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 2/2008
- [87] Hájek L., Kousalík P. - Program ECORE\_MSB pro desku Coreyam MSB  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 3/2008
- [88] Hájek L., Kousalík P. - Program ECORE\_SSB pro desku Coreyam SSB  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/2008
- [89] Kousalík P., Mikyska R., Moravec M. - Program EC923 Centrály stroje BT923/V3  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 1/2010
- [90] Kousalík P., Kučera P. - Program EFPGAJ10 pro desku elektroniky spřádního místa  
SDU-J10  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 3/2010
- [91] Beran Z., Kousalík P. - Program EQ10A Čidla kvality Q10A  
Rieter CZ, Autorské dílo č. 4/2010