

**TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI**

Autoreferát disertační práce

Experimentální studium proudových polí prohozu vzduchového tkacího stroje metodami laserové anemometrie

Vypracoval: Ing. Michal Kotek

Školitel: Prof. Ing. Václav Kopecký CSc.

2010

Anotace:

Disertační práce se věnuje rozvoji moderních experimentálních metod v mechanice tekutin a jejich využití při studiu proudových polí v prohozu tryskového tkacího stroje.

Pro experimentální studium proudových polí byl zvolen laserový anemometrický systém PIV. Nejprve byly definovány základní postupy pro synchronizaci s periodickými nestacionárními ději, které se při běžném provozním režimu v prohozu tkacího stroje vyskytují. Postupy byly navrženy pro několik základních uspořádání PIV systému a zobecněny pro aplikace na podobných typech proudění. Ověření těchto synchronizačních postupů a jejich využitelnost na dalších výzkumných projektech je v práci rovněž zmíněno. Proudová pole v prohozním ústrojí byla sledována společně s prohazovanou útkovou nití. K tomuto účelu byly navrženy techniky pro záznam, předzpracování a analýzu obrazových dat PIV systému. S využitím těchto technik byla zkoumána podoba proudového pole v nejbližším okolí útkové nitě i samotný pohyb útkové nitě v proudu. V předkládané práci je popsáno několik technik pro sledování útkové nitě a určení dynamiky jejího chování. Je zde nastíněn postup určování výkonových ztrát v proudícím vzduchu vlivem zanesené útkové nitě. Zobecnění tohoto řešení umožňuje experimentálně sledovat chování dvoufázového proudění tekutiny a pevného objektu.

Abstract:

The aim of this thesis is to evolve the novel techniques of experimental fluid mechanic and their application on the study of air jet weaving machine. Laser anemometric system PIV was selected for experimental studies of flow fields in weft propulsion mechanism.

The basic synchronization procedures were defined to observe periodical unsteady flow fields. The four variable synchronization configurations were set to cover wide range of flow field's applications.

Flow fields in weft propulsion mechanism were visualized simultaneously to the thread motion. For this purpose the unique techniques of recording, image pre-processing and analyzing, as well as weft tracking algorithm were designed. Flow field in the vicinity of the weft and the motion of the thread itself were investigated. In this thesis the energy dissipation estimation was described.

This solution enables experimental tracking of two-phase flow (fluid and solid object) behaviour in general.

Obsah:

Úvod:	4
1. Specifika zkoumání dějů v prohozním ústrojí vzduchových tryskových tkacích strojů .	6
1.1 Tkací stavy.....	6
1.2 Problematika vzduchového prohozu	6
1.3 Analytické a numerické metody pro sledování rychlosti proudu a útku	7
1.4 Dosavadní experimentální studie proudových profilů vzduchového prohozu	8
2. Postupy a techniky navržené při řešení disertační práce	9
2.1 Synchronizační metodiky ke studiu periodických nestacionárních proudů	11
2.2 Metodika sledování pevných objektů unášených proudem tekutiny.....	13
2.2.1 Separace sytících částic a unášených objektů, maskování	14
2.2.2 Využití separačního algoritmu pro automatické maskování	15
2.2.3 Analýza pohybu objektů unášených v proudu.....	16
2.2.4 Sledování objektů v proudu pomocí rychloběžné kamery	17
3. Návrh uspořádání experimentu a měřicího systému.....	19
3.1 Popis měřicího systému pro studium dějů v prohozním ústrojí	19
3.2 Uspořádání experimentu, sestavení modelu prohozního ústrojí.....	20
3.2.1 Uspořádání experimentu při sledování proudového pole samotné tkací trysky.....	21
3.2.2 Uspořádání experimentu při sledování proudového pole s vloženým útkem	21
4. Výsledky experimentální studie dějů v prohozním ústrojí.....	23
4.1 Postupy měření	23
4.2 Měření proudového pole samostatné tkací trysky	23
4.2.1 Rozběh proudu trysky.....	23
4.3 Měření proudového pole trysky se zavedenou útkovou nití, sledování pohybu útku	25
4.3.1 Změny rychlostních profilů proudu v důsledku zavedení útku, odhady ztrát výkonu proudícího vzduchu	25
4.3.2 Časový vývoj rychlosti útku v rámci tkací periody	28
Závěr:.....	30
Použitá literatura:.....	33
Vybraná publikační činnost autora:	34

Úvod:

Disertační práce navazuje na dlouholetý experimentální výzkum vzduchového prohozu tkacích strojů, prováděný ve VÚTS v Liberci a od roku 1995 na TU v Liberci. Ranné práce Prof. Ing. Václava Kopeckého CSc. byly prováděny metodou LDA (Laserová Dopplerovská Anemometrie). Protože LDA je bodová metoda měření, nebylo realizovatelné měření celého proudového pole v prohozu současně a měření probíhalo v kontinuálním režimu činnosti trysek. Byla zkoumána zejména součinnost rozběhlého proudu hlavní trysky a přídavných tzv. štafetových trysek [9]. Idealizaci kontinuálního proudění je možné přijmout především v oblasti prohozního kanálu, kam obvykle vstupuje útek do již ustáleného proudu tvořeného řízenými štafetovými tryskami. V případě hlavní tkací trysky je zmíněná idealizace sporná.

Na tento výzkum přímo navázala předkládaná práce, ve které bylo experimentální studium vzduchového prohozu realizováno metodou PIV (Particle Image Velocimetry). Metoda PIV je schopna určovat v jediném okamžiku celé pole rychlostí proudění.

Cílem této disertační práce bylo měření proudových polí v nestacionárních, resp. pulzních provozních režimech, které popisují poměry ve skutečném prohozním ústrojí tkacího stroje. Protože vlastním účelem proudění trysek v prohozu je pohyb útkové nitě, bylo rozhodnuto výzkum rozšířit nejen na identifikaci nestacionárního proudového pole tkací trysky, ale i na dynamickou interakci proudu s unášenou útkovou nití.

Pro měření proudových polí i pohybu nitě byla zvolena metoda laserové anemometrie – PIV a její nové zobecnění na měření pohybu útkové nitě.

Hlavním rozdílem mezi měřením kontinuálního proudového režimu a měřením časově rozlišených režimů je nutnost vnést do měření časový rozměr. Časově rozlišená měření lze provádět buď velmi rychlým snímáním po sobě jdoucích měření, nebo pomalejším měřením se současnou fázovou synchronizací s periodickým jevem. I když použitý měřicí PIV systém Dantec Dynamics obsahuje v sobě jisté omezené možnosti synchronizace měření, ukázalo se, že bude nutné vyvinout vlastní daleko náročnější synchronizační systém.

Celá problematika práce byla rozdělena do několika dílčích cílů řešených v jednotlivých krocích:

- 1) Identifikace potřebných vlastností synchronizačního zařízení, návrh a výroba elektroniky, stanovení synchronizačních postupů pro studium nestacionárních periodických proudových polí
- 2) Sestavení funkčního modelu prohozního ústrojí, jeho řízení a synchronizace s měřicím zařízením
- 3) Návrh a realizace nových algoritmů pro sledování pohybu pevných objektů unášených proudem tekutiny
- 4) Výzkum proudového pole se zaneseným útkem, sledování vývoje rychlosti unášeného útku
- 5) Studium interakce a výměny hybnosti mezi proudící tekutinou a útkem.

V disertační práci je v první kapitole podán obecný úvod do problematiky vzduchových prohozů. Druhá kapitola se zabývá obecnými synchronizačními postupy, vývojem nové výkonné synchronizační jednotky, vývojem algoritmů a software pro softwarovou identifikaci pevných objektů unášených proudem tekutiny a použitím rychloběžné kamery pro sledování objektů v proudu. Ve třetí kapitole je popsána konstrukce originálního zkušebního zařízení a všechny ostatní prvky experimentu. Čtvrtá kapitola uvádí výsledky všech měření a jejich analýzu.

1. Specifika zkoumání dějů v prohozním ústrojí vzduchových tryskových tkacích strojů

1.1 Tkací stavy

U tkacích strojů s vysokou frekvencí prohazování útku a potažmo s vysokou tkací rychlostí se využívá tryskového prohazovacího principu. Jako nosné medium slouží voda nebo stlačený vzduch. Disertační práce se zabývá prohozem vzduchového tkacího stroje.

Útkovou niť transportuje skrz prošlup s osnovními nitěmi proud vzduchu. Tkací tryska pracuje na principu ejektorového jevu. Proudem vzduchu ve směšovací komoře je zachycen útek a vystřelen z trysky do kanálku s lamelami, mezi nimiž jsou nataženy osnovní nitě. Síla samotného proudu hlavní trysky by nestačila přenést útek až dvoumetrovým prošlupem, proto do kanálku ústí pomocné štafetové trysky, s jejichž pomocí je nosná síla složeného proudu dostatečná na překonání celé délky prošlupu.

Náklady na provoz pneumatického tkacího stroje jsou nižší než u mechanických strojů. Optimalizací prohozního cyklu a vhodně nastavenými parametry stroje se snižuje stále značná energetická náročnost. Typická hodnota průtoku tlakového vzduchu tkacími tryskami činí zhruba $17\text{m}^3/\text{hod}$.

1.2 Problematika vzduchového prohozu

Měření vzduchového prohozu klade vysoké nároky na použitou metodu, která musí vyhovět požadavkům vyplývajícím z charakteru proudu:

- 1) prostorová členitost proudu
- 2) zkoumaná oblast s malými příčnými rozměry (6 mm x 6 mm)
- 3) nestacionární periodický charakter proudu ve skutečném provozním režimu
- 3) vysoké rozpětí rychlosti - od nulových až po subsonické hodnoty
- 4) velké příčné i podélné gradienty rychlosti
- 5) směšování jednotlivých proudů uvnitř kanálu
- 6) vysoká turbulence

Jednoduchá orientační měření pro hrubé nastavení tkacích strojů probíhají za pomoci základních anemometrických pomůcek – tlakové sondy, vrtulkové anemometry, základní termické anemometry. Pro podrobnější studie jsou tyto základní kontaktní metody nevyhovující a jsou nahrazovány moderními laserovými anemometrickými metodami. Laserové systémy LDA a PIV ve vhodném uspořádání plně vyhovují výše zmíněným kritériím. Při použití synchronizovaného měření lze navíc získat podrobný časový vývoj proudových polí v prohozu s rozlišením v řádu ms. Podrobné snímání je důležité zejména při popisu rozběhové oblasti tkací periody.

1.3 Analytické a numerické metody pro sledování rychlosti proudu a útku

Proudové pole kapaliny za tkací tryskou se chová jako tzv. zatopený proud. Útková rychlost u vzduchového tkacího stroje dosahuje typicky hodnot kolem 30% rychlosti nosného vzduchu.

Tázná síla útku je v tryskovém prohozu přímo úměrná drsnosti povrchu. Vliv drsnosti se projevuje zejména při vzduchovém prohozu, kde je viskozita hnacího média velmi nízká a navíc zde nepůsobí přilnavost. Určování drsnosti povrchu útkové nitě není triviální záležitost. Závisí na jemnosti příze, množství odstávajících vláken apod. Z uvedených důvodů jsou pro tkaní vzduchovými stavy nevhodnější předené materiály.

Základní vztah, kterým je definována přenosová síla mezi pracovní látkou a útkem:

$$F_d = (C_f \cdot \Pi \cdot d_u) l_t \cdot v_p^2 \cdot \rho / 2 \quad (1)$$

kde: F_d = hnací síla

C_f = koeficient tření médium – útek

d_u = průměr útku

l_t = délka útku v trysce

v_p = rychlost média v trysce

ρ = hustota média

Koeficientem $(C_f \cdot \Pi \cdot d_u)$ jsou charakterizovány vlastnosti každé útkové nitě. Chlupatost a drsnost povrchu útku ovlivňuje parametr C_f . Průměr útku d_u bývá zpravidla obtížně měřitelný vzhledem k nestejnóměrnosti a měkkosti nití. Celý koeficient uvedený v závorce se tedy určuje pro každý materiál experimentálně. Za použití tenzometrů se určuje síla působící na útek. Měření probíhají pouze s upevněným neprohazovaným útkem. Většina

materiálů se při působení proudícího vzduchu na stojící útek v trysce roztrhá. Náhradní způsob zjišťování těchto charakteristických vlastností přízí představuje zachycení vývoje rychlostí nosného média a útku. Měření pohybu útku se v praxi řešilo pomocí světelných závor a měřením času průletu mezi jednotlivými místy. Další variantu představuje vizualizační měření s využitím stroboskopu. Experimentální určení a popis dějů v prohozním ústrojí přispívá ke správnému časování tkacího stroje, nastavení optimálního tlaku přívodního vzduchu vzhledem k energetické náročnosti a také nalezení vhodného okamžiku uvolnění útkové nitě do trysky. Další možnosti při sledování dějů v prohozním ústrojí dávají matematické simulace. Pomocí komerčních CFD softwarů lze vypočítat podobu proudového pole. Dále experti zkoumají možnosti simulačních výpočtů pro pohyb útkové nitě. Výpočty přecházejí na komplikované dvoufázové modely (vzduch – útek) [13]. Za pomoci simulací lze popsat nejen maximální rychlosti útku vzhledem k rychlosti hnacího média, ale rovněž problematickou oblast při zastavování útku.

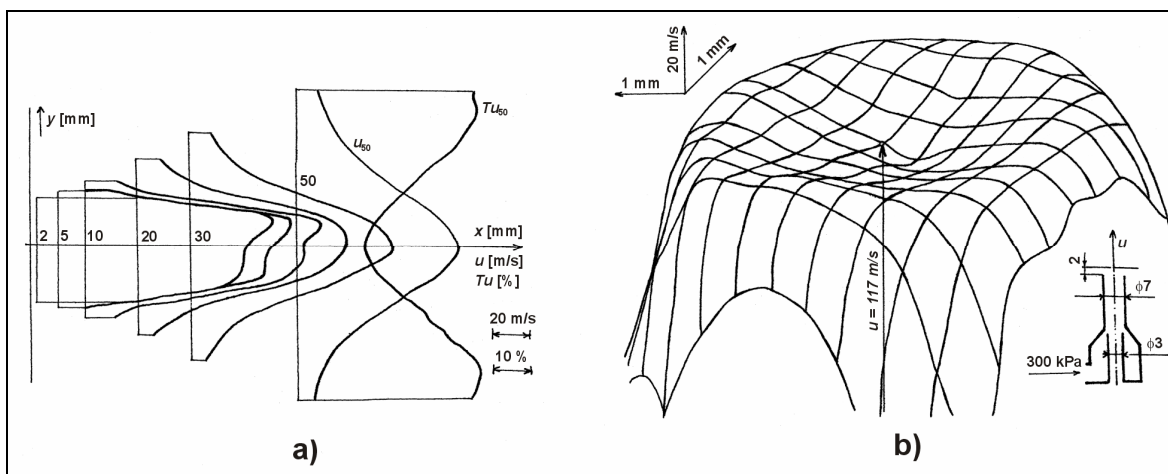
Další simulace [13] popsaly vystřelení útkové nitě z trysky. Bylo simulováno v jaké vzdálenosti od trysky dochází vlivem slábnutí rychlostního pole ke krabacení nitě. V praxi se tomuto jevu předchází zavedením proudu vzduchu do prohozního kanálku. Dosavadní praxí byly získány pouze časy průletů čela útku. Přesná podoba deformací a krabacení celé délky útku není tímto způsobem zachytitelná. Ke sledování tohoto jevu se nabízelo využít modifikovaný laserový PIV systém.

Rozšiřování databáze charakteristik a zkušeností s jednotlivými materiály, ať již formou matematických simulací nebo experimentální studie, umožňuje jednodušší seřizování tkacích stavů a efektivnější výrobu textilií. Odstranění chyb vzniklých špatně načasovaným vložením a následně nevhodným brzděním útku pomáhá zvyšovat kvalitu tkané textilie. Z metodiky sledování pohybu útku navržené v této práci může vzniknout užitečný nástroj nápomocný při vývoji textilních strojů.

1.4 Dosavadní experimentální studie proudových profilů vzduchového prohozu

V uplynulých letech byl vzduchový prohoz podrobně zkoumán pomocí laserových anemometrických metod. Předchozí měření se soustředila na provozně nejdůležitější ustálenou oblast tkací periody. Tryska při nich byla sledována v kontinuálním režimu. Bylo zkoumáno jak proudové pole tkací trysky, tak i jeho následná podoba po zavedení do

prohozního kanálku s přidavnými štafetovými tryskami. Experiment byl realizován bez zavedené útkové nitě.



Obr.1: Rychlostní profil tkací trysky měřený metodou LDA [8]

Na Obr. 1 je zachycen profil osové rychlosti tkací trysky při vstupním tlaku 0,3MPa. Společně s proudovým polem samotné tkací trysky byla měřena podoba proudu uvnitř prohozního kanálku. Kanálek byl osazen soustavou štafetových trysek. Takto prováděná měření zdokumentovala ovlivnění proudových polí uvnitř prohozního kanálku různými variantami uspořádání a několika typy štafetových trysek.

Předešlá měření podrobně popsala proudová pole v kontinuálním režimu a bez vložené útkové nitě. V této disertační práci byly předchozí měření rozšířeny o studium nestacionárních přechodových oblastí na počátku a na konci prohozního cyklu. Dalším faktorem ovlivňujícím chování proudu je samotná útková niť. V dosavadních studiích bylo proudové pole prohozu měřeno vždy bez útkové nitě. Útková niť v proudu se stává zdrojem celé řady nestacionarit. Další neznámou představuje samotné chování útkové nitě uvnitř nosného vzduchového proudu.

2. Postupy a techniky navržené při řešení disertační práce

K experimentálnímu studiu dějů v prohozu tryskového tkacího stroje byl použit měřicí systém PIV. K měřicímu systému byly navrženy doplňky a řídicí obvody umožňující synchronizaci měření se spínacími signály jednotlivých akčních členů vzduchového provozu.

Nový náhled na proudové pole prohozu přineslo jeho proměření v reálných provozních

podmínkách. Za provozu je proud z trysky časově opakovaně otevírán elektromagnetickým ventilem, což způsobuje jeho periodický nestacionární charakter. Podle předpokladů se na čele proudu tvoří vírové struktury a až po přechodové fázi rozběhu se proud začne ustalovat do profilu se zformovaným jádrem proudu trysky. Během přípravy experimentu byla sestavena synchronizační metodika pro sfázování zkoumaného děje a měřicího systému. K tomu musely být nejprve popsány vstupní a výstupní signály jednotlivých komponent měřicího systému PIV, včetně hlavních řídicích jednotek HUB a Timer Box. Jejich popis v dokumentaci dodané se systémem u některých komponent zcela chybí, nebo neobsahuje všechny potřebné parametry. Po prozkoumání možností integrované synchronizace vyšlo najevo, že je pro plnohodnotná měření nedostačující a musí být doplněna vlastní externí synchronizační jednotkou. Tato jednotka napomohla spolupráci jednotlivých akčních členů tohoto experimentu, v budoucnu poslouží jako užitečný nástroj pro obecná synchronizovaná měření periodických nestacionárních proudových jevů. Během realizace projektu, jež je popisován v této práci, došlo k posunu na poli hardwaru k využívanému systému PIV. Nově existuje možnost ovládní jednotlivých komponent systému prostřednictvím počítače a tzv. Timer boxu. Navržené metodiky synchronizace byly tedy rozšířeny i pro tento nový hardware a řídicí aplikaci.

Nové poznatky v oblasti přineslo zkoumání proudu se zakomponováním útkové nitě. Při měření pohybu útku v proudovém poli bylo třeba sestavit měřicí trať, simulující práci jednotlivých součástí prohozu tkacího stroje. Jednalo se o komponenty pro zavádění útku do tkací trysky, odvíjení útkové nitě a její odstříhnutí. Celý soubor prvků prohozního ústrojí byl synchronizován mezi sebou i s měřicím systémem. K tomuto účelu posloužila rovněž navrhovaná synchronizační jednotka.

V první fázi byl pohyb útku zkoumán pomocí záznamové a osvětlovací techniky PIV systému. Zachycená data byla podrobena vlastním algoritmům pro analýzu obrazu. Jednalo se především o separaci útkové nitě od obrazu sytících částic proudu a následné určení jejího pohybu. Vyhodnocení pohybu útku z PIV obrazu bylo provedeno dvěma způsoby. Jejich popis je detailně rozepsán v *Kapitole 2.2*. Při experimentech se sledováním útku byla dále využita vysokorychlostní kamera s pomocným osvětlovacím systémem. V tomto případě nebyl použit zavedený laserový řez jako u metody PIV, celá scéna byla nasvětlena silnou výbojkovou lampou. Výhody i nevýhody této techniky jsou zmíněny v příslušné podkapitole, spolu s podrobným popisem analýzy získaných dat.

2.1 Synchronizační metodiky ke studiu periodických nestacionárních proudů

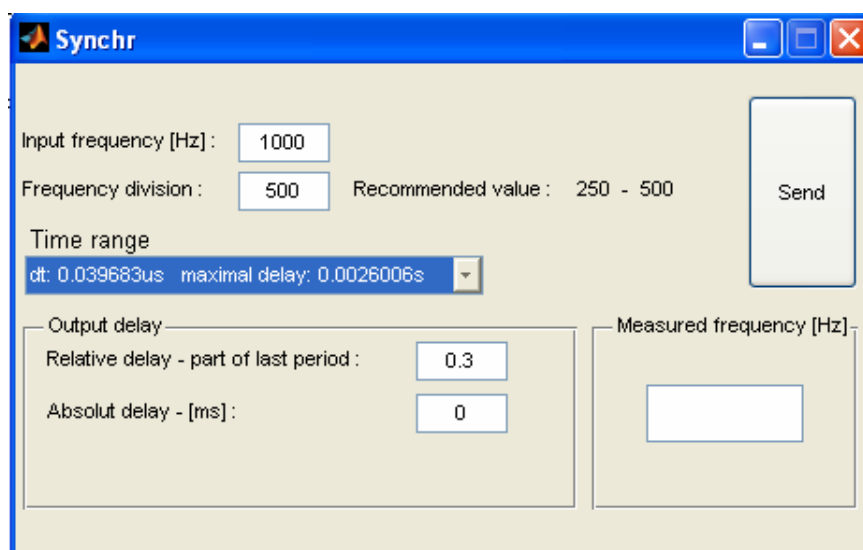
Oproti bodovým měřicím technikám umožňuje metoda PIV zachytit celou zkoumanou oblast v jednom časovém okamžiku. Tím se nabízí možnost prozkoumat vývoj určitého jevu v čase. Vzhledem k vysoké frekvenci pulsací vzduchové trysky nebylo možné provádět náhodně spouštěná měření s vnitřním časováním PIV systému. Maximální možná vzorkovací frekvence PIV systému je dokonce nižší než frekvence pulsací. V této kapitole jsou dopodrobna návodně popsány postupy pro synchronizaci měřicího systému PIV, obecně využitelné v celé řadě aplikací. Je popsána synchronizace pomocí vstupních triggerů i programovatelných signálových výstupů pro obě generace hardwaru i softwaru.

Pro skutečně univerzální synchronizovaná měření bylo nutno navrhnout vlastní doplňkovou synchronizační jednotku. Jednotka byla vyrobena ve spolupráci s odborníky z Katedry elektroniky a zpracování signálů FM.

Ideový návrh jednotky byl podřízen potřebám vycházejícím z dosavadních zkušeností s měřicím systémem a s přihlédnutím k obecnému využití do budoucna. Jednotlivé parametry byly navrženy tak, aby umožnily co nejširší využití při maximálním možném rozmezí vstupních frekvencí, posuvů a vyhovující jemnosti dělení časové osy. Jednotka zvládá práci se signály z měřicího zařízení PIV, spolupráci s různými typy rychlých triggerovatelných kamer a dalších akčních členů zapojených do experimentu. Operativnost celého systému se tak v mnohém zlepšila. Nyní lze postihovat děje o řádově vyšších frekvencích než dříve. Oproti tomu u velmi pomalých dějů (jednotky až setiny Hertz) nemá vnitřní jednotka systému možnost postihnout celou periodu vzhledem k poddimenzovaným schopnostem čítačů zpoždění synchronizačních pulsů. Nová synchronizační jednotka umožňuje velmi jemné postupné zasynchronizování a proměření dějů s takto malými frekvencemi. Po ověření její funkčnosti byla nasazena na měření proudového pole v prohozu tkacího stroje i na další projekty v rámci výzkumných center a úkolů řešených v Laboratoři laserové anemometrie. Vyroběný prototyp byl realizován na programovatelném hradlovém poli.

Ovládání synchronizační jednotky zajišťuje navržený řídicího softwaru z počítače experimentátora. Software byl vyvinut ve prostředí GUI Matlabu. Uživatelské rozhraní programu umožňuje nastavit všechny potřebné parametry. Navíc informuje o použitém

vzorkovacím intervalu, limitech zpoždování signálu a o měřené frekvenci děje.



Obr.2: User interface navrženého řídicího softwaru

Dle očekávané frekvence měřeného děje aplikace uživateli doporučí dělení frekvence takové, aby výstupním signálem po průchodu jednotkou bylo možno přímo spouštět měřicí systém. To znamená dosažení opakovací frekvence z jednotky max. 4 Hz. Univerzálnosti a širokého rozsahu měřitelných frekvencí bylo dosaženo využitím volby minimálního žádaného rozlišení posunutí (Time range). Uživatel tak může sám volit vhodný kompromis mezi rozlišením nejmenšího posunutí a délkou celkového maximálního posuvu signálu.

Tabulka 1: parametry a limity navržené synchronizační jednotky

Maximální dělení vstupní frekvence	4096
Maximální měřitelná frekvence	16 kHz
Minimální krok posunutí	40 ns
Maximální posunutí	5440 s

Navržené metodiky a zařízení byly nasazeny a ověřeny v celé řadě praktických experimentů v Laboratoři laserové anemometrie FM na TUL. Těmito metodami byly zkoumány nestacionární periodické proudy širokého rozsahu absolutních rychlostí, velikostí snímaných oblastí a frekvencí děje. Všechny akční prvky i generátory funkcí pro řídicí a spouštěcí signály bylo možno propojit díky použité technologii TTL. Pro dosažení této spínací úrovně byly vyrobeny univerzální přípravky pro napěťové přizpůsobení s přidruženými spínacími obvody z rychlých MOSFET tranzistorů. Příslušným dělením

frekvence tak bylo možno proměřit chování za aktuátory v různých médiích – ve vzduchu (velmi rychlé frekvence) i ve vodě (pomalé frekvence, dlouhý rozsah měřitelné periody).

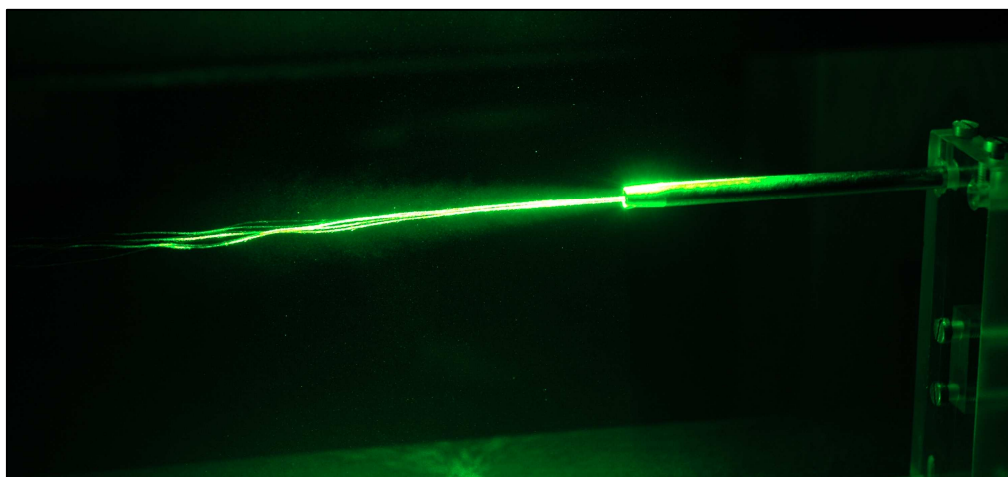
2.2 Metodika sledování pevných objektů unášených proudem tekutiny

Dosavadní práce ukazovaly systém PIV pouze jako nástroj pro experimentální výzkum proudových polí v tekutinách. Jeho potenciálu však lze využít při sledování pevných objektů unášených tekutinami a to ve spolupráci s dalšími vizualizačními technikami. V rámci této práce byl zkoumán pohyb útku unášeného proudem za tkací tryskou.

V prvním případě byl útek sledován ze získaných PIV obrazů. Tato metoda dosahovala vysoké přesnosti v zachycení pohybu útku nicméně byla časově náročnější. Stejně jako u zkoumaného proudu byly postupně snímány jednotlivé okamžiky tkací periody a sledována poloha útku..

Druhým způsobem sledování pohybu útku bylo snímání modelu prohozního ústrojí rychlokamerou. Scéna musela být dostatečně nasvícena, snímání frekvencí 1000 Hz poskytuje velmi krátkou dobu pro expozici obrazu. Pro analýzu dat a sledování pohybu útkové nitě byly připraveny algoritmy využívající technik zpracování obrazu.

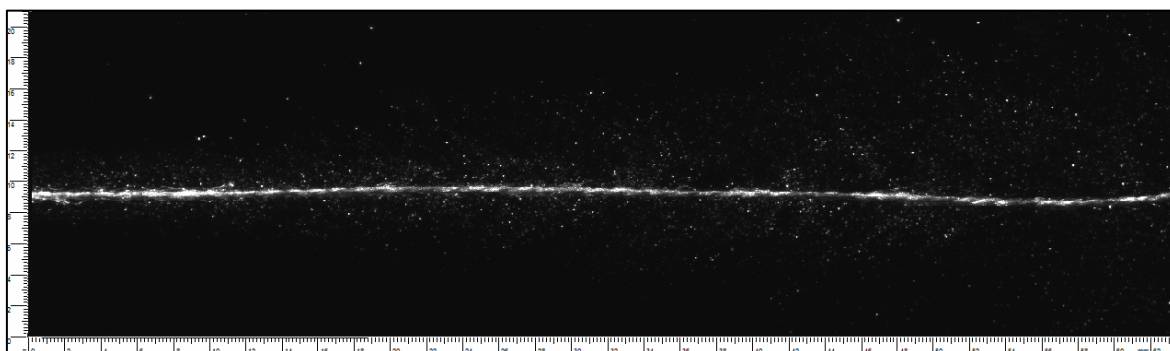
Takto navržené algoritmy sledování objektu jsou v současné chvíli vyladěny právě pro nit' a jí podobným objektům – výrazný kontrast v obraze proudu, drobné poruchy na povrchu objektu, jako odstávající vlákna apod. Při implementaci těchto algoritmů na jiné aplikace, bude zapotřebí provést příslušné korekce.



Obr. 3: Vizualizace proudu vzduchu s částicemi unášejících útkovou nit'

2.2.1 Separace sytících částic a unášených objektů, maskování

Mezi hlavní příčiny nekvalitních dat v PIV záznamech se řadí výskyt pevných objektů uvnitř sledované oblasti. Tyto objekty jako jsou stěny nádob, obtékané předměty, prolétávající kousky nečistot apod. zanášejí do výpočtu korelací význačnou chybu. V této práci byl zanesený předmět sledován s tím, že i obrazy částic v jeho těsné blízkosti byly využity pro zjištění proudového pole. Získaná PIV data musela být podrobena maskovací analýze, kdy je předmět co nejpřesněji z obrazu vyjmut – nahrazen černým pozadím. Čím precizněji se takovéto maskování povede, tím přesnější jsou výsledky zachycující proud v přímém sousedství. Příklad obrazových PIV dat z měření proudového profilu tkací trysky společně s unášenou útkovou nití je na *Obr.4*.



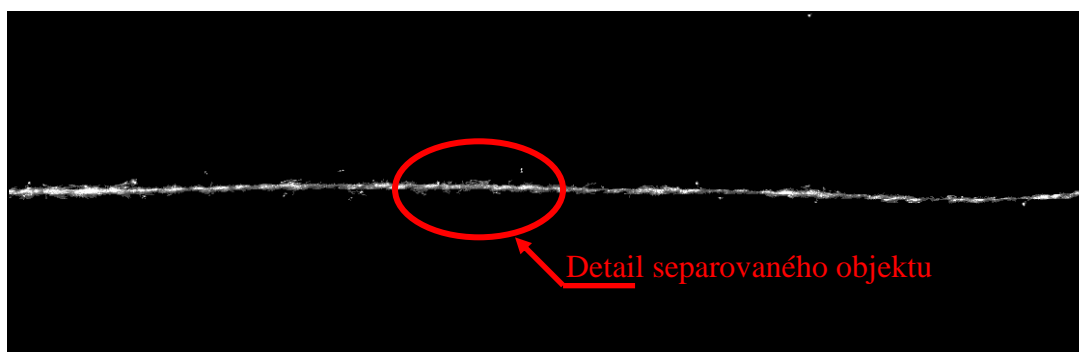
Obr. 4: PIV data měření proudu trysky se zaneseným útkem

Pro maskování byl využit algoritmus navržený v Matlabu. Ten nejprve provedl prahování zachyceného šedotónového obrazu a následně odstranil zbývající stopovací částice. Logickým součinem takto získaného obrazu a původního PIV záznamu lze získat oba požadované výstupy. Zpět do databáze PIV měření byl vrácen obraz sytících částic s dokonale zamaskovanou útkovou nití.

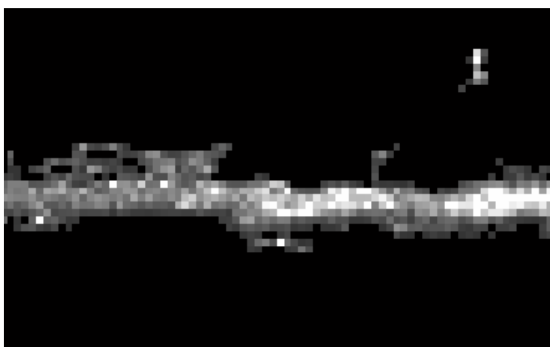


Obr. 5: Zpracovaný PIV záznam připravený pro výpočet korelací - invertovaný

Logickým součinem inverzní maskovací matice a záznamu z PIV měření je získán separovaný obraz unášeného objektu, připravený pro další analýzy pohybu. V tomto případě se jedná o obraz útkové nitě na *Obr. 6*.



Obr. 6: Separovaný obraz útkové nitě



Obr. 7: Detail separovaného objektu

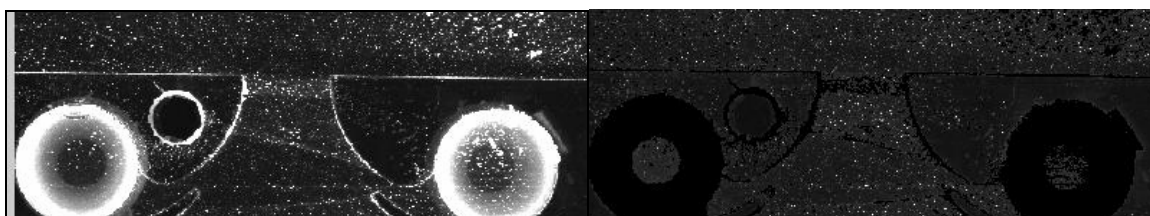
provádět nejen při každém měřicím cyklu, ale i pro každý záznam dvojobrazu zvlášť. V principu algoritmus neseparuje pouze objekty unášené proudem, nýbrž i jakékoliv překážky, stěny, odlesky apod.

Výhodou takového maskování je zachování nejmenších možných detailů a zároveň odstranění obrazů stopovacích částic v těsné blízkosti objektu. Uživatelé pracující se systémem PIV vědí, jak náročnou a zdoluhavou operaci maskování představuje. Ručním způsobem nelze nikdy dosáhnout tak účinné separace sytících částic a unášeného objektu. Navíc maskování by se muselo

2.2.2 Využití separačního algoritmu pro automatické maskování

Při standardním zpracování se maskování objektů provádí najednou pro celou sadu dat s využitím jedné připravené masky. Výše zmiňovaný algoritmus separace objektů byl nasazen pro maskování nežádoucích odlesků, jež by bylo obtížné a časově náročné provádět manuálně. Výsledky automatického maskování jsou demonstrovány na *Obr. 8*. Jedním z příkladů je zařízení na studium usměrňovacího účinku syntetizovaných proudů. Stěny této tratě jsou v úzkých hrdlech zaobleny s proměnným poloměrem křivosti, maskování takového tvaru ručně by bylo velice zdoluhavé a nikdy by nedosáhlo

přesného odstranění stěny pixel po pixelu. Při ručním maskování by navíc byly odstraněny i sytící částice v blízkosti stěny. A charakteristiky toku v těchto oblastech patří z proudařského hlediska k nejzajímavějším.



Obr. 8: Automatického maskování (původní data- vlevo, zamaskované objekty a stěny- vpravo)

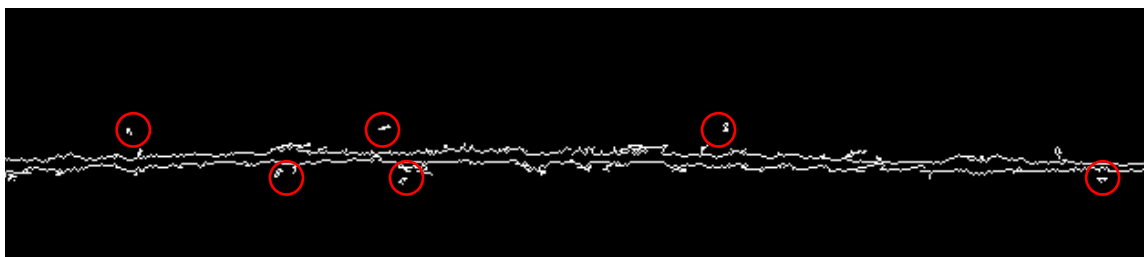
Obr. 8 ukazuje výsledek algoritmu separace nežádoucích objektů, jak byla popsána na útkové niti. V tomto případě jsou algoritmem z přední stěny průzoru odstraněny usazené bubliny.

V tomto konkrétním případě maskování stěn a usazených bublin v trati pro studium usměřňovacích účinků syntetizovaných proudů bylo prokázáno výrazné snížení chybovosti korelací. Nejvíce se maskování projevilo v úzkých výtocích ze SYJ pulsátorů. Obrazy odlesků stěn zde deformovaly proudový profil v hrdle výtoku. Bubliny, které se za působení proudu pomalu posunovaly po stěně, stahovaly velikosti rychlostí v daných vyhodnocovaných oblastech k nule. Až po odstranění těchto bublin byly získány správné vektory rychlostí proudového pole.

2.2.3 Analýza pohybu objektů unášených v proudu

Separovaný objekt je možno podrobit několika technikám k určení jeho posunutí. V této práci byly porovnány dvě metodiky, obě využívající metody analýzy obrazu. V prvním případě byly sledovány významné body na unášeném objektu. S využitím matematické morfologie byl obraz ztenčován až po dosažení jednotlivých bodů objektu. Výhodné se ukázalo využití skeletonizace a následné separování těchto významných bodů. Na příkladu útkové nitě lze jako významné body pozorovat jednotlivá odstávající vlákna. Obr. 9 ukazuje podobu zpracovaného obrazu se separovanými významnými body. Podle žádané úrovně separace, počtu významných bodů a charakteru objektu je třeba nastavit počet

iteračních kroků pro ztenčování (erozi) a skeletonizaci.



Obr. 9: Skelet objektu se zvýrazněnými významnými body

Takto získané body jsou dále sledovány obdobným způsobem jako stopovací částice PIV záznamu. Korelací vhodně posunutých obrazů bodů objektu v počáteční poloze s obrazem bodů objektu v koncové poloze jsou vypočteny vektory posunutí mezi záznamy a následně rychlost pohybu.

Komplikace přináší stopování objektů lišících se významně od rychlosti hnacího média. Metoda PIV se vyznačuje malým dynamickým rozsahem, to samé platí pro sledování objektů. Nelze tedy předpokládat že jedním měřením budou vhodně zachyceny posuny obou sledovaných složek. Proto se doporučuje provést standardní PIV měření a následně s přibližnou znalostí chování unášeného objektu zaznamenat přesně jeho pohyb. Vzhledem k tomu, že se analýza média i unášeného objektu provádí až po separaci, nelze tomuto postupu nic vytknout. Obtížnější je následné skládání datových souborů do jednoho celku, ale vedl li si experimentátor pečlivě záznamy z měření, nemělo by dojít k problémům.

2.2.4 Sledování objektů v proudu pomocí rychloběžné kamery

Další možnost sledování pohybu pevného objektu v proudu tekutiny představuje využití rychloběžné kamery. K zachycení pohybujících se předmětů o rychlostech desítek až stovek metrů za sekundu je zapotřebí pracovat s technikou umožňující zaznamenávat snímky s frekvencí v řádech kilohertz.

Použitá kamera Nanosense MKIII dokáže při plném rozlišení CMOS čipu 1280 x 1024 pixelů zaznamenávat obraz s frekvencí 1 kHz. Z hlediska osvětlovací aparatury se jako nejvhodnější řešení jeví pulzní laser. Obzvláště v režimu double frame pro měření PIV je to jediné možné řešení. Kamery s čipy uzpůsobenými pro záznam PIV obrazů zachycují druhý obraz s řádově větší dobou expozice. Jiné řešení než pulzní laser s krátkým (ns) zábleskem pro každý obraz není možné použít. Pulzní laser pracující s kilohertzovými

frekvencemi nebyl v době realizace experimentální části práce k dispozici. Pro sledování objektů unášených proudem se tedy využívá náhradní osvětlovací řešení. – sírové výbojové lampy od Efpe Design.

Metodika sledování objektu v proudu pomocí rychlokamery byla opět vyvíjena a testována na měření pohybu útkové nitě v prohozu tkacího stroje. Proces záznamu i analýzy dat musel uvažovat rychlost pohybujícího se předmětu až několik desítek metrů za sekundu.

Rychlokamera disponuje mezipamětí pro uložení 4GB dat, což představuje cca 3 tisíce obrázků. Při snímání tisíců obrázků za sekundu je zapotřebí spouštět záznam synchronně se sledovaným dějem, aby byl správně a celý zachycen a následně přesně časově identifikován. I v tomto případě byl využit vhodně posunutý řídicí TTL signál.

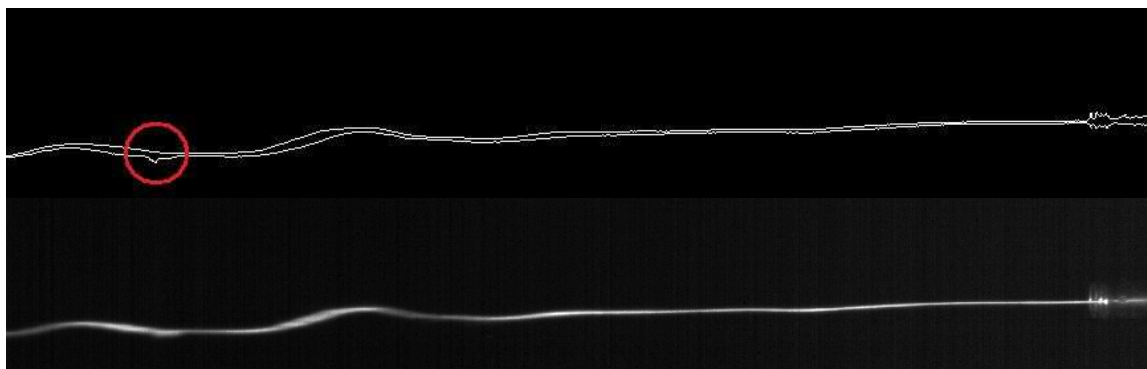
Výpočet pohybu byl zpřesněn použitím dvou metod. Obě se zakládaly na nalezení unášeného objektu a jeho separaci od pozadí. Vzhledem k tomu, že oproti nasvícení laserovým řezem u PIV měření zde byla osvětlena celá scéna, bylo zapotřebí už s předstihem eliminovat veškeré okolní objekty, odlesky a dbát výrazného kontrastu pozadí. Na obraz byly nasazeny podobné algoritmy jako v předchozím případě analýzy objektu separovaného z PIV záznamů. Objekt byl prahován a následně diletován až na skelet. Výsledek zostření obrazu a jeho separaci pro potřeby zjišťování pohybu ukazuje *Obr. 10*. V pravém spodním rohu je zachycena část nůžek, které po každém prohozu odstřihávají dodávanou útkovou nit.



Obr. 10: Zaostrěný, prahovaný a skeletovaný obraz objektu

Při separaci byl zjištěn počet pixelů zaplněných objektem. Podle nárůstu tohoto počtu v čase byla vypočítána rychlost pohybu. Druhým zpřesňujícím způsobem sledování pohybu bylo opět trasování významných bodů v obraze za pomoci korelací. Tento způsob je nutno použít v okamžiku, kdy objekt zaplňoval celou délku obrazu a postupoval dále. To

byl právě případ dobíhající útkové nitě. *Obr. 11* ukazuje podobu probíhajícího útku s nalezeným významným bodem.



Obr. 11: Hledání významných bodů objektu

Hledání a trasování významných bodů není při využití kontinuálního osvětlení tak zřetelné a přesné. Poruchy a odstávající nitě jsou příliš rozmazané a jejich přesná lokalizace je daleko obtížnější.

3. Návrh uspořádání experimentu a měřicího systému

Při přípravě disertační práce bylo využito vybavení Laboratoře laserové anemometrie Ústavu řízení systémů a spolehlivosti na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Autor této práce působí v laboratoři od roku 2003, podílí se na rozvoji jednotlivých měřicích systémů z oblasti tzv. Global Imaging. Laboratoř je vybavena základními laserovými systémy pro bezkontaktní sledování proudových polí v tekutinách, zjišťování velikostní distribuce sprejů a zkoumání teplotních a koncentračních polí pomocí fluorescence. Kromě základních měřicích aplikací jsou tyto systémy využívány i pro nestandardní využití, zahrnující různé metody vizualizací, analýzu obrazů nasvětlených laserovým řezem a sledování pohybu i množství částic a předmětů rozptýlených v různých mediích.

3.1 Popis měřicího systému pro studium dějů v prohozním ústrojí

Při přípravě experimentální části práce byl využit zejména laserový anemometrický systém Particle Image Velocimetry (PIV) od firmy Dantec. Tento systém byl zvolen pro jeho možnosti při popisu složitých nestacionárních polí, které se v prohozním ústrojí tkacích stavů převážně vyskytují. V průběhu několika let, kdy byla tato práce řešena, došlo k částečné obměně a modernizaci přístrojového vybavení PIV. V této práci jsou popsány

způsoby měření jednotlivých variant PIV systému, s důrazem kladeným na synchronizační postupy pro měření periodických nestacionárních dějů. Kapitola 3 popisuje finální uspořádání měřicího systému, jak byl sestaven pro záznam proudového pole s vloženou útkovou nití a jeho signálové propojení s jednotlivými komponentami modelu prohozního ústrojí tkacího stroje.

Hlavní součásti měřicího systému PIV Dantec:

- 1) Pulzní laser New Wave Gemini (2x16Hz, 120mJ, 532nm)
- 2) Kamera HighSense 12bit (12 bitové rozlišení jasu, 1280x1024pix)
- 3) Vysokorychlostní kamera NanoSense (1000Hz při rozlišení 1280x1024pix)
- 4) Synchronizační box FlowMap Hub
- 5) Synchronizační karta National Instruments + Timer Box
- 6) Operační a zpracovatelský software Flomanager
- 7) Operační a zpracovatelský software Dynamic Studio
- 8) Generátor sytících částic (Safex F2010 a Scitek LS-10)

Pro potřeby sledování pohybu útku v proudovém poli byly navrženy výše zmíněné algoritmy. Tyto algoritmy byly naprogramovány v prostředí Matlab. První algoritmus, který byl využit pro separaci útkové nitě je popsán v kapitole **2.2.1**. S jeho pomocí byl z PIV záznamu odstraněn obraz útkové nitě. Přes Matlab link byly separované obrazy (1. částice bez nitě, 2. samostatná nit') nahrány zpět do databáze. Následně byla provedena dynamická analýza částic i útku v prostředí Dynamic Studio.

Druhý vyvinutý algoritmus použitý při zpracování experimentálních dat je algoritmus *Analýzy posunutí unášených objektů* popsáný v kapitole **2.2.3**. Tento skript byl aplikován na již separovaný dvojobraz útkové nitě. Výsledkem této analýzy je časový vývoj rychlostí útku v jednotlivých okamžicích tkací periody. V **Kapitole 4** jsou uvedeny výsledky tohoto skriptu, zasazené do grafu pro porovnání s rychlostmi proudu.

Třetí algoritmus navržený a využitý během těchto experimentů byl popsán v kapitole **2.2.4**. Jedná se o obrazovou analýzu dat z vysokorychlostní kamery.

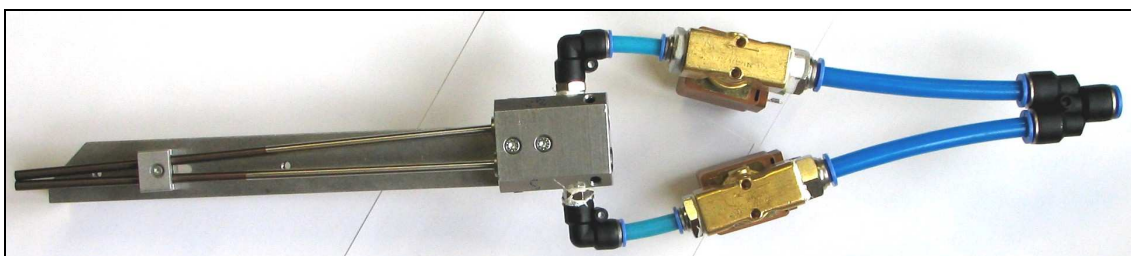
3.2 Uspořádání experimentu, sestavení modelu prohozního ústrojí

V laboratoři byl sestaven funkční model prohozního ústrojí tkacího stroje se všemi potřebnými komponentami. V této podkapitole jsou popsány jednotlivé komponenty

prohozního ústrojí, přívody tlakového vzduchu včetně sycení proudu stopovacími částicemi i elektronika zajišťující řídicí signály a silové napájení.

3.2.1 Uspořádání experimentu při sledování proudového pole samotné tkací trysky

Samotné proudové pole staršího typu tkací trysky bylo podrobně popsáno v předchozí diplomové práci autora [11]. Jednalo se o prototyp tkací trysky vyvinutý před lety Výzkumným ústavem textilních strojů v Liberci. Pro současná měření byla vybrána tryska od firmy TE STRAKE Textile, typ 06. Jedná se o kompilaci dvou tkacích trysek o průměrech ústí 2,5mm a 3 mm, využívaných při tkaní kombinovaných textilií s různými průměry a materiály prohazovaných útkových nití.



Obr. 12 Měřené hlavní trysky tkacího stroje

Měření proudového pole trysky probíhalo v podmínkách blížících se reálnému provozu v tkacím stroji. Pro zajištění pulsního režimu byl přívod vzduchu opatřen solenoidovým ventilem. Po analýze parametrů ventilu byl navržen a sestaven řídicí spínací obvod. Díky tomuto obvodu a jeho přizpůsobení technologii TTL bylo možné ovládat ventil podle požadavků a v synchronizaci s celým PIV měřicím systémem.

Po konzultaci s odborníky na textilní stroje byly stanoveny základní podmínky měření:

- 1) Vstupní přetlak vzduchu: 0,2 MPa a 0,4MPa při otevřeném ventilu
- 2) Otáčky tkacího stroje cca 500 otáček/min \Rightarrow frekvence ventilu = 8 Hz
- 3) Doba otevření ventilu = 40 % periody = 50 ms

3.2.2 Uspořádání experimentu při sledování proudového pole s vloženým útkem

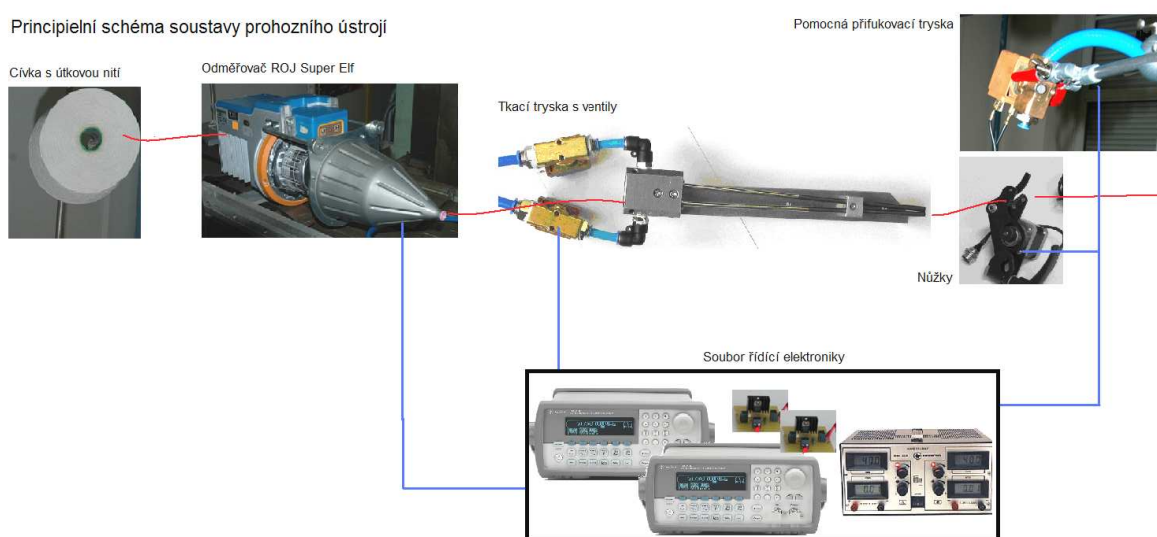
Významný úkol v experimentální části disertační práce představovala příprava modelu prohozního ústrojí vzduchového tkacího stroje. Bylo zapotřebí sestavit soustavu jednotlivých akčních členů prohozního ústrojí tak, jak jsou zapracovány v reálném tkacím

stroji. Celá soustava jednotlivých prvků byla sestavena v Laboratoři laserové anemometrie RSS. Vzhledem k tomu, že nebylo možné využít hlavní řídicí jednotku tkacího stroje, musel být navržen vlastní řídicí obvod a způsob postupného spouštění synchronizačních signálů všech prvků modelu prohozního ústrojí. Celá soustava byla následně sfázována s měřicím systémem PIV na kterém proběhla synchronizovaná měření.

Model vzduchového prohozu se skládal:

- 1) Tkací tryska TE STRAKE Textile, typ 06
- 2) Elektromagnetický ventil tlakového vzduchu
- 3) Zásobník útkové nitě
- 4) Automatický odměřovač
- 5) Automatické nůžky
- 6) Pomocná fixovací tryska
- 7) Spouštěcí obvody jednotlivých členů
- 8) Soustava generátorů funkcí Agilent pro práci s řídicími signály

Jak již bylo uvedeno výše, model prohozního ústrojí neobsahoval řídicí jednotku tkacího stavu. Sfázování jednotlivých akčních členů bylo řízeno pouze s pomocí jednoduše generovaných TTL signálů. Celý model prohozu byl navíc synchronizován s měřicím systémem PIV. Základní triggerovací signál z hlavního generátoru funkcí Agilent 33220A byl rozváděn do Timer Boxu systému PIV i do dalších spouštěcích obvodů.



Obr.13: Uspořádání jednotlivých prvků modelu prohozního ústrojí

4. Výsledky experimentální studie dějů v prohozním ústrojí

4.1 Postupy měření

Měření dějů v prohozním ústrojí tkacího stroje probíhala v několika etapách. Vždy byla zkoumána pouze jedna ze dvojice trysek s průměrem 3mm. Tlak v přívodním potrubí byl udržován na žádaných hodnotách 0,2MPa nebo 0,4MPa.

Výsledky první etapy bez zavedené útkové nitě jsou prezentovány v kapitole **4.2**. Zde je popsáno proudové pole samotné tkací trysky v reálném pracovním režimu s pulzním provozem. Podrobně byl proměřen zejména rychlý rozběh proudu za tkací tryskou po otevření ventilu.

Kapitola **4.3** ukazuje výsledky měření proudového pole se zaneseným útkem. Pro možnost srovnání byly zachovány stejné podmínky jako u předchozích měření. Tkací tryska byla rozšířena o jednotlivé prvky prohozu tkacího stroje a do proudu byla vložena útková nit. Kapitola obsahuje výsledky sledování pohybu útkové nitě v proudu za pomoci upravených algoritmů PIV systému. Porovnáním proudových polí a profilů proudu s identickými vstupními parametry, jednou s vloženou útkovou nití a podruhé bez ní, ukazuje míru ovlivnění a množství nestacionarit generovaných útkem. Z výsledku lze kvantifikovat pokles rychlosti v proudovém poli a usuzovat na energii, jež byla proudu útkem odebrána. Poslední kapitola **4.4** shrnuje výsledky ze sledování chování útku v proudu vzduchu pomocí vysokorychlostní kamery. Jsou zde ukázány jednotlivé sekvence zachyceného útku a výsledky časových průběhů rychlosti letu útku.

Tato technika byla zvolena k ověření výsledků nekonvenčních navržených postupů sledování útkové nitě z PIV záznamů. V kapitole jsou porovnány výsledky jednotlivých metod sledování útku a jeho závislost na rychlosti proudu nosného vzduchu.

4.2 Měření proudového pole samostatné tkací trysky

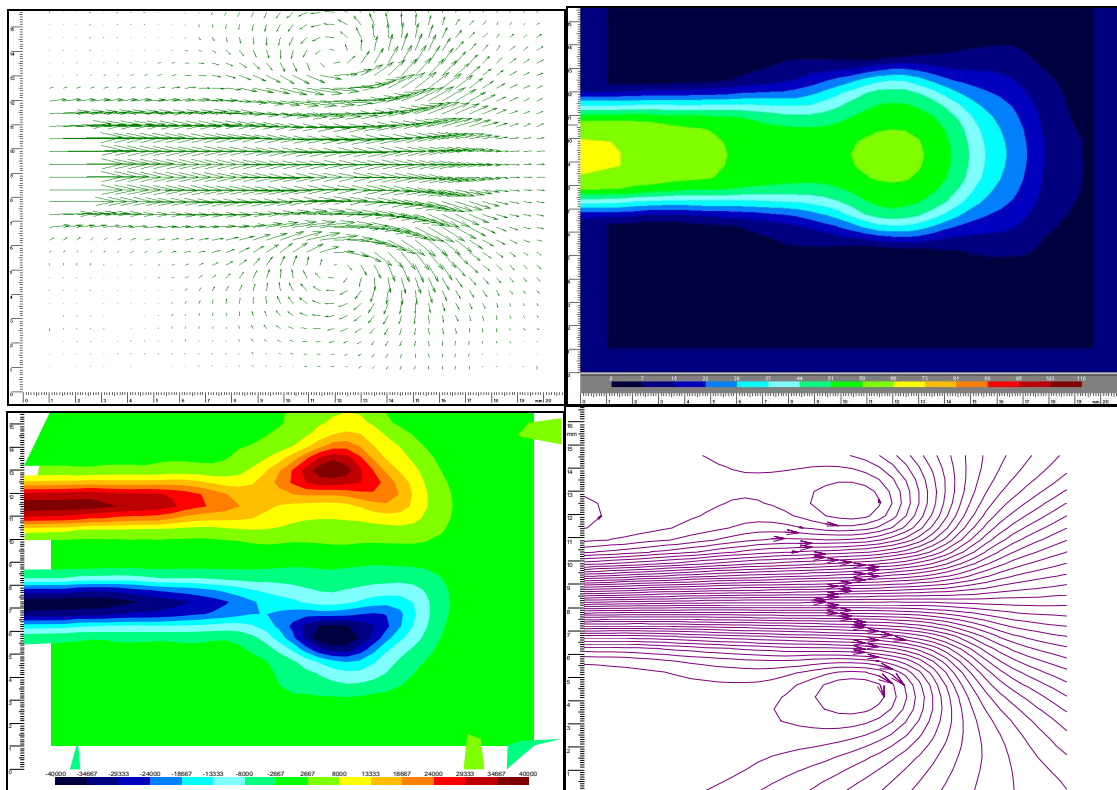
4.2.1 Rozběh proudu trysky

Proud za tryskou se začíná projevovat 17,00 ms po spouštěcím signálu ovládacího obvodu ventilu. Tato doba je dána zpožděními v mechanice ventilu, průchodem vzduchu skrz přívodní vedení a trysku. Při náběhu proudu bylo postupně zaznamenáno deset časových

kroků během prvních dvou milisekund. Rychlost proudu v této fázi při vstupním tlaku 0,2MPa vystoupala ke 100 m/s. Při měřeních s tlaky nad hranicí 0,4MPa dosahovala rychlost v proudu v tomto čase rychlostí až 250 m/s.

Z měření je tedy patrné, že vzdušný proud trysky bude mít dostatečnou energii pro nesení útkové nitě již od 19. milisekundy. V tento okamžik by se tedy měla uvolnit zářezka útku na odměřovači.

Na následujících obrázcích jsou demonstrovány struktury vznikající na čele rozbíhajícího se proudu v čase 17,75ms po otevření ventilu (0,75ms po rozběhu samotného proudu).



Obr. 14 Podoba proudu v čase 17,75 ms – max. rychlost 60 m/s (vektorová mapa vlevo nahoře, skalární mapa velikosti rychlostí vpravo nahoře, mapa vířivosti vlevo dole, podoba proudni vpravo dole)

Při pronikání proudu vzduchu do stojícího média lze na čele proudu pozorovat vznik vírových struktur. Tyto vírové struktury mají podobu anuloidního víru v řezu se jevícího jako dva protiběžné víry v okolí hlavního proudu.

4.3 Měření proudového pole trysky se zavedenou útkovou nití, sledování pohybu útku

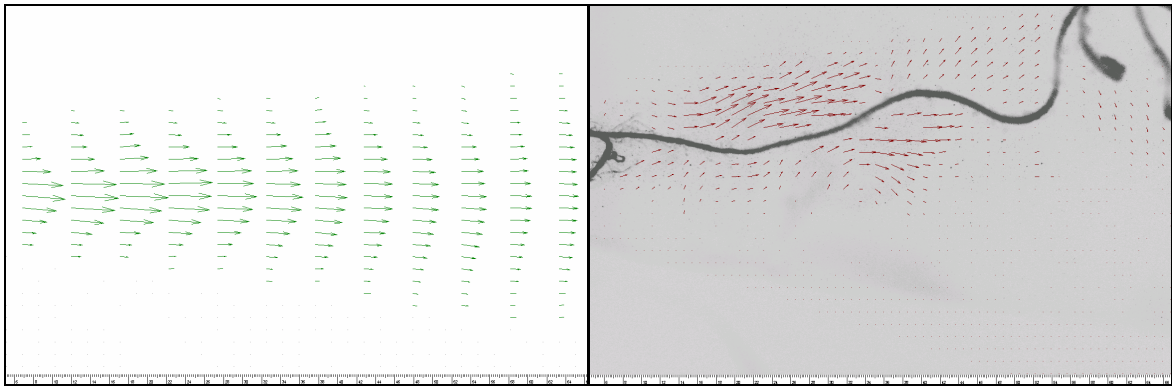
Experimentální výzkum dějů v prohozním ústrojí tkacího stroje dále pokračoval za přítomnosti útkové nitě. V předchozích krocích byly nalezeny techniky pro podrobné sledování vývoje proudového pole samotné tkací trysky a nyní byly rozšířeny o metodiku sledování a kvantifikace pohybu unášené útkové nitě.

K realizaci tohoto cíle byl navržen soubor algoritmů pro analýzu obrazových dat popsany v kapitole 2.2. Výsledky proudového pole bez zavedeného útku byly získány statistickou analýzou sta záznamů. V případě aplikace této analýzy na obrazy s neseným útkem dojde k vyhlazení výsledné podoby proudového pole a snížení skutečné rychlosti proudu. Problém sledování útku v proudu je ten, že se nepohybuje stále po stejné trajektorii. Představa o tom, že útek bude vtlačen do jádra proudu trysky a nesen přesně v ose se ukázala jako chybná.

4.3.1 Změny rychlostních profilů proudu v důsledku zavedení útku, odhady ztrát výkonu proudícího vzduchu

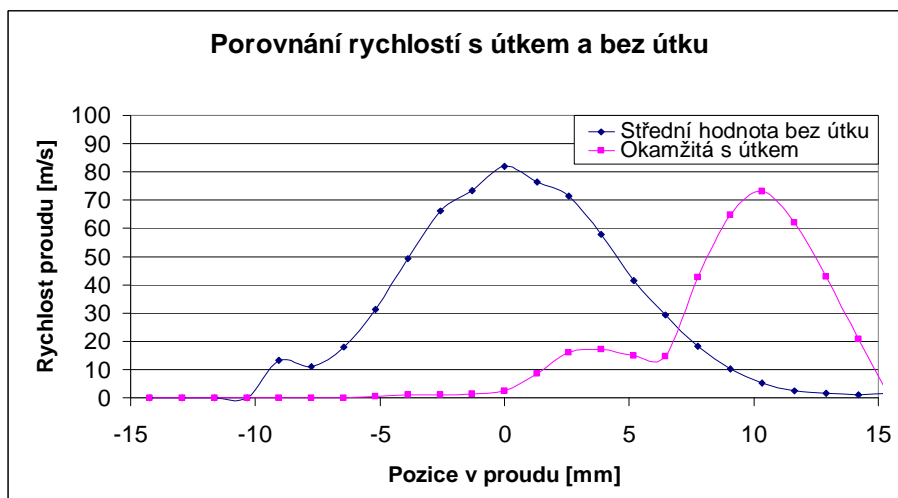
Popis proudového pole tkací trysky společně se zmapováním pohybu a vlivu útkové nitě přináší silný nástroj pro pochopení vztahů mezi proudícím médiem a unášeným objektem. Většinou se parametry potřebné ke správnému nastavení tkacího stroje a zjištění vlivu jednotlivých parametrů hledají za pomoci experimentálního nastavování, numerických simulací a zkušeností konstruktérů a obsluhy. V této kapitole jsou popsány výsledky a porovnání proudových polí přímo ovlivněných zaneseným útkem, je zde proveden orientační výpočet výkonu proudu vzduchu v plošném elementu za tryskou v obou režimech. Tyto postupy pomohou v budoucnu lépe definovat a kvantifikovat interakci mezi proudem a neseným předmětem.

Nedeformované proudové pole na *Obr. 15 vlevo* odpovídá klasické podobě tzv. zatopeného proudu vnikajícího do stojícího okolí se zformovaným kompaktním jádrem trysky. V pravé části je zachycena podoba proudového pole se zanesenou útkovou nití. Data byla zaznamenána ihned v návaznosti na předchozí měření. Tím byly zachovány všechny vstupní podmínky (tlak, teplota apod.). Proudové pole je zasazeno zpět do vizualizace s útkovou nití. Vlivem útkové nitě dochází k rozbití jádra proudu trysky podobně jak to bylo popsáno v kapitole 4.3.1. Na čele je útková niť značně zkrabacená, což vnáší další významné nestacionarity do proudu. Proud je vlivem útku významně vychýlen mimo osu trysky.



Obr. 15: Proudové pole v čase 25ms, bez zavedeného útku (maximální rychlost 109m/s) vlevo a po zavedení útkové nitě (maximální rychlost 82m/s) vpravo

Proudové pole vlivem zanesení útku značně ztrácí na rychlosti, potažmo na kinetické energii a na teoretickém výkonu vzdušného proudu. Dochází k ucpávání samotného těla trysky, snižování rychlosti proudu vlivem tření o povrch útku a vzniku nestacionárních vírových struktur pohybujícím se útkem. Maximální rychlost v jádru proudu trysky bez útku dosahuje 109 m/s. Po zanesení útku se maxima sníží na 82 m/s.



Obr. 16: Porovnání proudových profilů ve vzdálenosti 20mm od trysky

Energetické bilance a ztráty byly vyvozeny z rovnic pro výpočet teoretického výkonu proudícího vzduchu. Následující výpočty a rovnice slouží pouze pro orientační zjištění úbytku výkonu a energetických ztrát. Ukazují směr jakým by bylo možno experimentálně zjišťovat přenosy energií v okolí předmětů unášených proudem. Výpočet lze provést pouze v zaznamenaném tenkém 3mm řezu ozářeným laserovým světlem.

Rovnice pro výpočet výkonu vzdušného proudu:

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (2)$$

ρ – hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

V – objemový průtok vzduchu [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

v – rychlost vzduchu [m/s]

Objemový průtok vzduchu lze vztáhnout k ploše kde provádíme vyšetřování výkonu a kde byly zaznamenány hodnoty rychlostí. V tomto konkrétním případě jde o plochu ve tvaru obdélníka – 3mm tlustý řez, vyšetřovaný 30mm na výšku. Rovnice pro výpočet výkonu měla tvar:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S_k \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot S_k \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3)$$

S_k – plocha, která je kolmá k proudícímu vzduchu [m^2]

Vzhledem k tomu, že změřené rychlosti v jednotlivých bodech profilu nejsou stejné, byla provedena integrace napříč celou plochou.

$$P = \frac{1}{2} \cdot S_k \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot d_l \cdot \Delta h \cdot \sum_n v^3_{(n)} \quad (4)$$

d_l – tloušťka laserového řezu [m]

Δh – diferenční výška odpovídající rozestupu naměřených profilů [m]

Na základě výše uvedených vztahů byly určeny hodnotu výkonu proudícího vzduchu z rychlostních profilů na Obr. 16.

Výkon proudícího vzduchu bez zavedeného útku: $P_1 = 0,446 \text{ W}$

Výkon proudícího vzduchu se zavedeným útkem: $P_2 = 0,193 \text{ W}$

\Rightarrow výkonová ztráta proudícího vzduchu ve zkoumané ploše $\Delta P = 0,253 \text{ W} \approx 57\%$

V průběhu zpracování výsledků se ukázalo, jak významné ovlivnění proudu je způsobeno unášenými předměty. Neovlivněné proudové profily jsou osově symetrické a lze je popsat jediným měřením v řezu proudu. Proud s unášeným objektem je silně vychylován do strany. Nelze tedy určit celkový výkon proudícího vzduchu v ploše kolmé na osu trysky. Jako východisko tohoto problému se nabízí měření systémem 3D PIV, při němž bude proveden řez kolmo na osu trysky a vyšetřeny profily v celé ploše. Jedině tak bude možné získat představu o výkonu proudícího vzduchu a celkových ztrátách vlivem unášeného objektu.

4.3.2 Časový vývoj rychlosti útku v rámci tkací periody

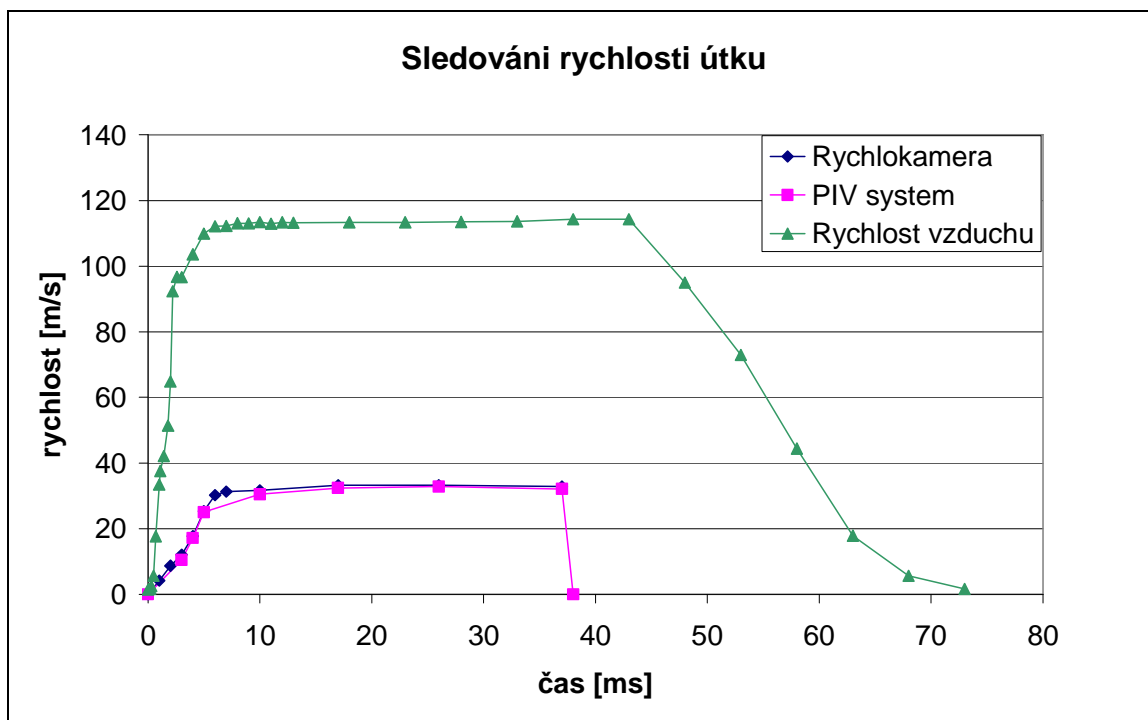
Pohyb útku byl sledován dvěma výše popsanými způsoby. Prezentované metody jsou velmi citlivé na intenzitu nasvětlení scény a na vhodně zvolený rozestup mezi záznamy PIV obrazů. Zejména je třeba dbát vyšší opatrnosti u měření proudu a pohybu objektů s výrazně odlišnými rychlostmi. V těchto případech se pro výpočet proudového pole tekutiny ve větší míře využívá adaptivní korelace. Uvedená metoda byla v průběhu řešení práce doplněna o vlastní algoritmy, sledující pohyb významných bodů v obraze.

Při sledování pohybu útku upraveným anemometrickým systémem PIV nelze dosáhnout žádaných opakovacích frekvencí záznamu obrazu. Vše bylo řešeno pomocí synchronizace a postupným proměřením časového vývoje přes všechny okamžiky tkací periody. Jak již bylo zmíněno, chování útku z hlediska trajektorie pohybu je neopakovatelný jev. Na výsledcích měření v kapitole 4.3 bylo zjištěno, že lze dosáhnout spolehlivé opakovatelnosti výskytu útku vzhledem ke vzdálenosti od ústí trysky, nikoliv však v poloze útku vzhledem k ose proudu. Za pomoci vysokorychlostní kamery lze souhrnně zaznamenat pohyb jednoho prohozeného kusu útkové nitě. Tento postup byl využit v poslední fázi řešení práce. Použitá technika je popsána v kapitole 2.2.4 společně s vypracovanými algoritmy pro zpracování dat. Nevýhoda této metodiky je zejména v tom, že nelze zároveň měřit pohyb útku a proudu nosného vzduchu. Použitá kamera sice obsahuje funkce pro záznam tzv. Time Resolved PIV dat, chybělo však vhodné osvětlovací zařízení – pulzní laser s dostatečnou opakovací frekvencí (1000Hz).

Záznamy vysokorychlostní kamery byly snímány s frekvencí 1000Hz s dobou expozice 30 μ s. Maximální možnou dobu 1ms nebylo možné využít z důvodů významného

rozmazání obrazu. Informativní časy o okamžiku záznamu jsou počítány od prvotního zaznamenání pohybu útku. Tento okamžik odpovídá času 19ms v tkací periodě.

Na základě obrazové analýzy byly vypočteny hodnoty rychlostí útku mezi jednotlivými záznamy. Tyto rychlosti byly zaneseny do grafu s výsledky z předešlých měření. Na *Obr. 17* je zpracován graf s celkovým porovnáním naměřených rychlostí proudu vzduchu a útku zjištěných oběma metodami.



Obr.17: Porovnání rychlostí útku změřených oběma metodami a rychlosti vzduchu

Maximální rychlost vzduchu dosahovala 118 m/s, což je ovlivněno vstupním tlakem vzduchu 0,2MPa. Útek je tímto proudem akcelerován na hodnotu 32 m/s. Z grafu lze vypočítat celkovou délku prohozeného útku. Při integrování plochy pod křivkou grafu lze dojít k hodnotě blížíící se jednomu metru, nastavené na automatickém odměřovači

Průběhy vypočtených rychlostí oběma metodami korespondují v rozmezí 3%. Nedostatečná hustota vzorkování se projevila u sledování rychlosti útku z PIV dat na konci oblasti náběhu proudu a akcelerace útku. U rychlokamery byly hodnoty rychlosti počítány mezi každými záznamy s rozestupem 1ms a tak je i tato oblast zachycen detailně. Hodnota rychlosti, na kterou byl útek akcelerován, odpovídá 30% hodnoty nosného vzduchu. Tento trend byl potvrzen i u měření s rychlostmi nosného vzduchu 250 m/s (vstupní tlak 0,4MPa, místo měření 0,2mm od ústí), kdy rychlost útku dosahovala hodnoty 66 m/s.

Závěr:

Předložená disertační práce navázala na experimentální výzkum vzduchového prohozu tkacích strojů, prováděný dlouhodobě ve VÚTS v Liberci a na TU v Liberci. Tento výzkum, dosud prováděný pouze v ustálených režimech proudění, práce rozvinula na měření proudových polí v nestacionárních, resp. pulzních režimech, které popisují reálné poměry ve skutečném prohozním ústrojí tkacího stroje.

Praktická část práce byla realizována měřicím systémem Particle Image Velocimetry od firmy Dantec Dynamics, který byl ale nově doplněn originální synchronizační jednotkou s daleko vyšším frekvenčním rozsahem a fázovou přesností synchronizace. Současně bylo navrženo a zkonstruováno zkušební zařízení, využívající prvků reálného prohozu, které umožňovalo zkoušky prohozních trysek za realistických provozních podmínek.

Navržené zkušební zařízení a nová synchronizační jednotka pak umožnily bezkontaktní vizualizační měření pulzních proudových polí ve vzduchovém prohozu v reálných provozních podmínkách. Byl zjištěn časový vývoj proudu za tryskou a stanoveny hodnoty zpoždění rozběhu proudu od spouštěcího signálu. Tyto časy jsou důležité zejména z hlediska správného časování tkacího stroje.

Protože vlastním účelem proudění trysek v prohozu je pohyb útkové nitě, byl výzkum proudění rozšířen i na dynamickou interakci proudu s unášenou útkovou nití. Byla navržena metodika sledování pohybu pevných objektů v proudových polích tekutin. Tato metodika byla primárně připravena pro sledování útkové nitě v prohozním ústrojí, nicméně její nasazení je možné na další obdobné experimenty. Pro tyto účely byly navrženy algoritmy separace a zpracování záznamů PIV dat, umožňující sledování základních charakteristik proudového pole v okolí vložených předmětů i pohyb těchto předmětů. Pro trasování objektu v tekutinách byly navrženy samostatné korelační algoritmy. Hlavním účelem těchto algoritmů je separovat pohybující se objekt od proudící tekutiny. Vyvinutá technika separace obrazů je v současnosti na FM TU v Liberci běžně využívána k odstranění nežádoucích součástí PIV obrazu v celé řadě výzkumných projektů. Takovými nežádoucími prvky jsou zejména tvarově složité stěny nádob, vnořené prvky tratě, objekty v pozadí, případně obrazy obtékaných předmětů. S využitím těchto algoritmů není nutné používat komplikované a časově náročné ruční maskování PIV záznamů.

Technika modifikovaného PIV sledování pohybu útkové nitě v obrazu (a obecně pevných objektů v proudu) byla rozšířena o záznam dějů vysokorychlostní kamerou a následnou analýzu takovýchto obrazů. Pro předzpracování obrazových dat s vyhodnocením trajektorie pohybu objektu byly navrženy algoritmy v programovém prostředí Matlab. Vzhledem k vysokým frekvencím záznamů a rychlostem unášených předmětů byl zvláštní důraz kladen na kontrast a intenzitu osvětlení snímané scény. Byl optimalizován osvětlovací systém a jeho uspořádání.

Zvládnutí předchozích úkolů (t.j. měření nestacionárních rychlostních polí v prohozu a měření pohybu nitě v prohozu) rozšiřuje možnosti popisu časově rozlišené interakce proudu vzduchu s nití za nestacionárních podmínek. Byl popsán časový vývoj rozběhu a rychlosti letu útkové nitě v proudu a míra ovlivnění proudového pole vloženou útkovou nití. Ze znalosti rychlostních profilů byly provedeny výpočty výkonu proudícího vzduchu a ukázán směr pro zjišťování ztrát vznikajících vložením útku do proudu. Na základě těchto výsledků by mělo být v budoucnu možné vysledovat a kvantifikovat interakce mezi proudícím vzduchem a neseným objektem. Výsledky analýzy dat získaných systémem PIV a obrazových dat z vysokorychlostní kamery jsou v dobré shodě, což dokazuje správnost vyvinuté metodiky a navržených algoritmů pro tuto aplikaci.

Hlavním přínosem disertační práce bylo

- Vývoj algoritmů a hardwarové i softwarové části synchronizace pro PIV měření v periodickém proudění, které svými vlastnostmi značně převyšují dosud používaná synchronizační zařízení
- Konstrukce realistického zkušebního zařízení pro měření vlastností pneumatických prohozů, jejich časování a vlastností
- Provedení PIV měření nestacionárního proudového pole v pneumatickém prohozu
- Vývoj speciálních algoritmů pro rozpoznávání objektů v proudícím médiu, které umožňují počítačové rozpoznávání objektů i automatizované maskování opticky rušivých objektů při měření. Pomocí těchto postupů lze měřit pohyb útkové nitě nezávisle na rychlosti okolního proudového pole tekutiny
- Společné měření proudového pole ve vzduchovém prohozu a pohybu útkové nitě včetně jejich časových průběhů umožňuje identifikovat nestacionární interakci

proudového pole s útkovou nití a míru ovlivnění proudového pole vloženou útkovou nití.

Lze konstatovat, že disertační práce splnila všechny úkoly, definované při jejím zadání.

Výsledky, vzniklé v průběhu tvorby disertační práce byly publikovány na celé řadě českých i mezinárodních konferencí [14 – 47]. Jednalo se zejména o výsledky ze studie dějů v prohozním ústrojí tkacího stroje společně s výsledky dalších výzkumných projektů. Při řešení těchto projektů byla využita celá řada postupů a technik popsanych v této práci. Experimentální studie dějů v prohozním ústrojí byla publikována v recenzovaném časopise [39], další článek je připravován do tisku [47].

Použitá literatura:

- [1] COSGROVE, J., BUICK, J., Optical Methods for Data Processing in Heat and Fluid
- [2] DANTEC DYNAMICS: FlowMap Particle Image Velocimetry Instrumentation, Denmark, Tonsbaken, 2000
- [3] DANTEC DYNAMICS: Firemní podklady
- [4] DRACOS, T., Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques
- [5] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. Applied Scientific Research 49, p. 191-215, 1992
- [6] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems. Measurement Science and Technology 1, p. 1202-1215, 1990
- [7] KEANE, R.D., ADRIAN, R.J.: Optimization of particle image velocimeters. Part II: Multiple-pulsed systems. Measurement Science and Technology 2, p. 963-974, 1991
- [8] KOPECKÝ, V.: Laserová anemometrie v experimentální mechanice tekutin
- [9] KOPECKÝ, V.: Využití laserové dopplerovské anemometrie při vývoji tryskových tkacích strojů. Jemná mechanika a optika 10/98, ročník 43, str. 303 - 307
- [10] KOPECKÝ, V.: Limits and Biases of Particle Image Velocimetry. 5th workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals, Université Paul Sabatier Toulouse – France, May, 30 – 31, June 1, 2001

- [11] ORMEROD A., Sondhelm W.: Weaving - Technology and Operations, The Textile institute, Manchester, Great Britain, 1998, ISBN 1 870812 76X
- [12] TALAVÁŠEK O., Tkalcovská příručka, SNTL, 1980, Praha
- [13] GRAMSCH S., Hietel D., Olawsky F.: Fadenschluss beim Luftweben, výzkumná zpráva, Institut Techno – und Wirtschaftsmathematik, Fraunhofer, Německo, 2007

Vybraná publikační činnost autora:

- [14] KOTEK M. Diplomová práce na téma Měření proudového pole za hlavní tkací tryskou metodou PIV, TU v Liberci, 2004
- [15] ALBRECHT D., Kotek M., Image Noise Reduction in Raw PIV Data sborník konference STRUTEX, TU v Liberci, 2006, ISBN 80-7372-135-X
- [16] KOPECKÝ, V., Kotek, M., Hejralová, Š.: Měření proudových polí tkacích trysek metodou PIV, sborník konference Aplikácia experimentálných a numerických metód v mechanike tekutin, p. 245-250, 2004
- [17] KOPECKÝ, V., Kotek, M., Hejralová, Š.: Identifikace nestacionárního rychlostního proudového pole za tryskou metodou PIV, sborník konference XXIII. medzinárodná vedecká konferencia katedier a pracovísk mechaniky tekutín a termomechaniky, 2004
- [18] KOPECKÝ, V., Kotek, M.: Experimentální studium periodických nestacionarit v proudovém poli tkací trysky metodou PIV, Konference STRUTEX, TU Liberec, 2004 (ISBN 80-7083-899-X)

- [19] KOTEK, M., Kopecký, V. Pírková, L.: Měření nestacionárního proudění Synthetic Jet metodou PIV, sborník konference 19th Symposium on anemometry, Holany, str. 77 – 84, 2005, ISBN: 80-239-4871-7
- [20] KOTEK, M., Hoznedl, M., Kopecký, V., Linhart J., Měření a vizualizace proudění v rozevíraném difuzoru metodou PIV, sborník konference 20th Symposium on anemometry, Holany, 2006, ISBN 80-239-7144-1
- [21] KOTEK, M., Kopecký V., Pírková L., Nonstationary flow fields in textile applications, sborník konference STRUTEX, TU v Liberci, 2006, ISBN 80-7372-135X
- [22] KŮS, Z. Šubert, R., Halasová, A., Kotek, M., Kopecký, V. Methods of Textiles Evaluation at Extreme Wind Conditions - Model of Wind. Proceedings of 12th international conference STRUTEX, TU Liberec: 2005, p.255-260, ISBN 80-7372-002-7
- [23] VÍT, T., Dančová, P, Kotek, M., Pírková, L.: Použití různých experimentálních metod pro analýzu proudění typu Synthetic jet, sborník konference Setkání kateder hydromechaniky a termomechaniky, Blansko, 2005
- [24] KOPECKÝ V., Kotek M., Pírková L., Jašíková D., Trávníček Z., Hlína J.: Experimentální studium časového vývoje pulzačních proudění klasickým PIV, sborník konference 21th Symposium on anemometry, Holany, str. 81 - 88, 2007, ISBN:978-80-87117-01-9
- [25] KOTEK M., Kopecký V, Janoušek M., Visualization of jet flow field in operating weaving state, sborník konference ECMS 2007, str. 257 - 262, 2007, ISBN: 978-80-7372-218-0
- [26] KOTEK M., Kopecký V, Studium proudových polí v prohozu tkacího stroje, Sborník technických zpráv, Sekce C, VCT II, Speciální měření a modelování, ISRN TUL – VCT2/C – TSM/TZ - - 07/001/CZ

- [27] KOPECKÝ V., Kotek M., Pírková L.: Měření nestacionárního proudění Synthetic Jet metodou PIV, sborník konference 19th Symposium on anemometry, Holany, str. 77 - 84, 2005, ISBN: 80-239-4871-7
- [28] KOPECKÝ V., Kotek M., Pírková L.: Studium pulzních zatopených proudů metodou PIV, sborník konference Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín. Žilinská univerzita, 2006, str.207-212, ISBN 80-8070-533-X
- [29] KOTEK M., Kopecký V., Pírková L.: Nonstationary flow fields in textile applications, sborník konference Strutex, Liberec, 2006, ISBN: 80-7372-135x
- [30] HLÍNA J., Šonský J., Sekerešová Z., Kopecký V., Kotek M., Measurement of plasma and particle velocities in a thermal plasma jet by correlation and PIV methods, sborník konference ICOPS 2008, Karlsruhe, Německo, ISBN 978-1-4244-1929-6
- [31] KOTEK M., Kopecký V., Studium dějů v prohozním mechanismu vzduchového tkacího stroje, sborník konference Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutin, 2008, Terchová, ISBN 978-80-8070-825-2
- [32] KOTEK M., Kopecký V., Využití optických anemometrických metod pro měření v prohozu vzduchového tkacího stroje, sborník konference Energetické stroje a zařízení, 2008, Plzeň, ISBN 978-80-7043-665-3
- [33] KOPECKÝ V., Kotek M., Jašíková D., Hlína J., Šonský J., Měření částic unášených plasmatem pomocí korelačních metod a metody PIV, sborník 6. Konference PTSE, 2008, Praha, ISBN 80-86786-27-7
- [34] KOTEK M., Kopecký V., Jašíková D., Sledování proudu plasmy metodami vizualizace a modifikovaným PIV systémem, sborník grantu Nestandardní aplikace fyzikálních polí, 2008, Liberec

- [35] KOTEK M., Kopecný V., Využití optických anemometrických metod pro měření v prohozu vzduchového tkacího stroje, sborník grantu Nestandardní aplikace fyzikálních polí, 2008, Liberec
- [36] KOTEK M., Kopecný V., Studium proudových polí v prohozu vzduchového tkacího stroje, Sborník technických zpráv, Sekce C, VCT II, Speciální měření a modelování, 2008, Liberec
- [37] KOTEK M., Kopecný V., Využití optických anemometrických metod pro měření v prohozu vzduchového tkacího stroje, sborník grantu Nestandardní aplikace fyzikálních polí, 2008, Liberec, pp. 83-88, ISBN: 978-80-7372-464-1
- [38] KOTEK M., Kopecný V., Jašíková D., Sledování proudu plasmy metodami vizualizace a modifikovaným PIV systémem, sborník grantu Nestandardní aplikace fyzikálních polí, 2008, Liberec, pp. 79-82, ISBN: 978-80-7372-464-1
- [39] KOTEK M., Kopecný V., Využití vizualizačních a anemometrických metod při studiu prohozu tkacího stroje, Strojářstvo/Strojírnoství, Vol.2009, (2009), No.6, pp.125-126, ISSN 1335-2938, Media ST s.r.o. *článek v časopise*
- [40] KOTEK M., Jašíková D., Kopecný V., Šidlof P., Vyhodnocování nanofiltrů vizualizačními metodami, sborník konference XXIII. Sympozium o anemometrii, Holany, 2009, pp. 65-69, ISBN 978-80-87117-06-4
- [41] KOTEK M., Kopecný V., Application of laser anemometric and vizualization methods on research of weft propulsion mechanism, sborník konference Experimental fluid mechanics 2009, Liberec, pp.128-135, ISBN: 978-80-7372-542-6
- [42] KOTEK M., Kopecný V., Vizualization methods used for observation of the weft propulsion mechanism, sborník konference Strutex 2009, Liberec, pp.193-195, ISBN: 978-80-7372-538-9

- [43] KOTEK M., Kopecký V., Studium proudových polí v prohozu vzduchového tkacího stroje, Sborník technických zpráv, Sekce C, VCT II, Speciální měření a modelování, 2009, Liberec , pp: 10 – 14, ISRN: VCT2/C-RMM/TZ-09/001/CZ
- [44] JAŠÍKOVÁ D. Kotek M., Kopecký V., Šidlof P., Vyhodnocování nanofiltrů vizualizačními metodami, sborník konference NANOCON 2009, Rožnov pod Radhoštěm, pp. 51, ISBN 978-80-87294-12-3
- [45] JAŠÍKOVÁ D., Kotek, M., Horálek, R., Horčíčka, J., Kopecký, V.: EHD sprays as a seeding agents for PIV system measurements, ILASS – Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic, September 2010, Tribun EU, pp. 13-14, ISBN 978-80-7399-997-1
- [46] KOTEK M., Kopecký V., Experimental Study Of Impinging Flow Generated By Synthetic Jets Actuators, Experimental Fluid Mechanics 2010, Liberec 24th-26th November 2010, Technical University of Liberec, pp. 244-251, ISBN 978-80-7372-670-6
- [47] KOTEK M., Kopecký V., Application of laser anemometric and visualization methods on research of weft propulsion mechanism, časopis Engineering mechanics, ISSN 1802-1484, stav: příprava do tisku
- [48] TESAŘ V., Kopecký V., Kotek M., Trávníček Z., Entraining actuator nozzle for generation hybrid-synthetic impinging jets, posláno 30. srpna 2010 do redakce časopisu Sensors & Actuators: A. Physical, Elsevier, Ref. No. SNA-D-10-00763, stav: probíhá schvalování