



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# METODA PRO SIMULACI ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI VÝROBNÍCH STROJŮ V ETAPĚ VÝVOJE

METHOD FOR ENERGY EFFICIENCY SIMULATION OF MACHINE TOOLS IN DESIGN STAGE

## ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Tůma

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

BRNO 2017

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

obráběcí stroj, energetická účinnost, posuvové osy obráběcího stroje, simulace energetické náročnosti, verifikace

## **KEYWORDS**

machine tool, energy efficiency, machine tool feed axes, simulation of energy demand, verification

# OBSAH

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD .....</b>                                                                  | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>SHRNUTÍ SOUČASNÉHO POZNÁNÍ VE VĚDĚ.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| 2.1      | Energetická účinnost obráběcích strojů .....                                       | 6         |
| 2.2      | Problematika konstrukce a optimalizace energeticky účinných obráběcích strojů..... | 6         |
| 2.3      | Zvyšování energetické účinnosti strojů řízením technologických procesů.....        | 6         |
| 2.4      | Modelování spotřeby energie u obráběcích strojů .....                              | 7         |
| <b>3</b> | <b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>                                                 | <b>8</b>  |
| <b>4</b> | <b>ZVOLENÉ METODY .....</b>                                                        | <b>8</b>  |
| 4.1      | Měření spotřeby elektrické energie na obráběcích strojích [3] .....                | 8         |
| 4.2      | Srovnání spotřeby elektrické energie obráběcími stroji.....                        | 8         |
| 4.3      | Metody analýzy komponent obráběcího stroje .....                                   | 9         |
| 4.4      | Metoda analýzy rezných podmínek .....                                              | 9         |
| 4.5      | Simulace a výpočetní metody .....                                                  | 9         |
| <b>5</b> | <b>NÁVRH METODY PREDIKCE SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE .....</b>                     | <b>10</b> |
| 5.1      | Sběr dat.....                                                                      | 10        |
| 5.2      | Zpracování a analýza dat.....                                                      | 11        |
| 5.3      | Příprava simulačního modelu.....                                                   | 11        |
| 5.4      | Simulace .....                                                                     | 12        |
| <b>6</b> | <b>OVĚŘOVACÍ EXPERIMENTY .....</b>                                                 | <b>13</b> |
| 6.1      | Verifikační experiment na lineárním měřicím standu.....                            | 14        |
| 6.2      | Validační experiment na stroji MCV 750 Quick .....                                 | 17        |
| <b>7</b> | <b>STANOVENÍ HRANIC POUŽITELNOSTI METODY.....</b>                                  | <b>22</b> |
| 7.1      | Požadavky na analyzovaný objekt .....                                              | 22        |
| 7.2      | Požadavky na dráhu nástroje.....                                                   | 22        |
| 7.3      | Požadavky na měřicí aparaturu .....                                                | 22        |
| 7.4      | Požadavky na software.....                                                         | 23        |
| 7.5      | Požadavky na datové vstupy .....                                                   | 24        |
| 7.6      | Požadavky na aplikaci metody již ve fázi vývoje stroje .....                       | 24        |
| <b>8</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>                                                                  | <b>24</b> |
| 8.1      | Shrnutí dosažených výsledků .....                                                  | 25        |
| 8.2      | Teoretický přínos práce.....                                                       | 25        |
| 8.3      | Praktický přínos práce.....                                                        | 25        |
| 8.4      | Pedagogický přínos práce .....                                                     | 26        |
| <b>9</b> | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>                                               | <b>27</b> |



# 1 ÚVOD

Vývoj lidstva je historicky spjat s pokrokem ve vědě, což s sebou přináší pokrok v technologiích, které lidstvo ke svému rozvoji používá. Vedlejším produktem technického rozvoje jsou emise, které nepříznivě působí na životní prostředí, důsledkem toho je globální oteplování. Od jisté míry pokroku lidstva pak vznikly dva protichůdné pohledy na rozvoj civilizace, přičemž jedním z nich je omezení produkce emisí a větší důraz na životní prostředí, druhý pak vychází z poptávky lidstva na pohodlnější život využívající všech technologických možností a pokroku právě na úkor životního prostředí. Působení člověka za účelem udržení a zvýšení svého životního standardu na planetě Zemi se vyznačuje značnými dopady na životní prostředí.

Přestože se dopady lidského působení na životní prostředí zabývá více dokumentů – viz [12], [37], [38], v případě obráběcích strojů zatím neexistuje direktiva, která by regulovala přímo obráběcí stroje a jejich vliv na životní prostředí. Potenciál energetických úspor je u obráběcích strojů i přes absenci směrnice značný, což dokládá vypracování pracovního plánu na období 2009-2011 podle směrnice o ekodesignu [36], kde je zmíněn významný dopad na životní prostředí vysokou spotřebou energie ( $>1000$  PJ/rok) a významný potenciál ke zlepšení.

V případě výroby a vývoje obráběcích strojů je tedy nutné přihlížet také na tuto stránku věci, neboť v současnosti působí tlak ke zvyšování jejich účinnosti, jak v ohledu dílčích komponent, z nichž se obráběcí stroj skládá, tak jako celku, což je důsledek efektu použitých komponent a celkové konstrukční, výrobní a logistické koncepce daného stroje. Měřením spotřeby obráběcího stroje, například na patě stroje, je možné porovnat jeho spotřebu s ostatními stroji. Je nezbytné zabývat se problematikou spotřeby energie již v rané fázi jejich vývoje. Metoda, navrhující způsob, jak získat výsledek ve formě naměřeného patního výkonu virtuálního prototypu obráběcího stroje, je předmětem této disertační práce.

## 2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO POZNÁNÍ VE VĚDĚ

Problematika energeticky úsporných obráběcích strojů je již delší dobu poměrně diskutovaným tématem jak v praxi, tak i ve vědě a výzkumu [7]. Dokladem je množství publikovaných vědeckých studií zabývajících se danou problematikou. Obráběcí stroje tvoří dominantní podíl na celkovém úhrnu spotřeby elektrické energie třískovým obráběním a jsou tak významným činitelem při působení na životní prostředí [5].

Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) vytvořila normu zabývající se výpočtem dopadů obráběcích strojů na životní prostředí, která je založena na testovací proceduru během třískového obrábění kovů. Cílem je vytvoření indexu obráběcího stroje, který se získá na základě měření [9], [10], norma se nevztahuje přímo na obráběcí stroje, ale nastavuje rámec problematiky stanovení indexů energetických spotřebičů, které je pak možné rozčlenit do energetických tříd.

V současnosti právě díky nasazení velmi vysokého počtu obráběcích strojů v průmyslu je nutné se problematikou spotřeby obráběcích strojů zabývat. Studie dokazují poměrně značný potenciál v úsporách při návrzích optimalizací obráběcích strojů [17], [18], [19], [20]. Na základě těchto studií byla stanovena klíčová otázka modelu energetické spotřeby

obráběcích strojů, sloužící k výpočtu spotřeby energie a dává prostor k optimalizacím stroje a výrobního procesu [21], [22], [23], [24]. Různé přístupy k tvorbě modelu spotřeby energie mají především za cíl kvantifikovat míru spotřeby energie vztažené na jednotku odebraného materiálu, popřípadě na jednotku času. V první řadě je otázkou výzkumu jak stanovit energetickou účinnost obráběcího stroje.

## 2.1 Energetická účinnost obráběcích strojů

IEA (International Energy Agency) považuje energetickou efektivitu jako klíč k udržitelnému rozvoji a jako krok k redukci dopadů spojených s produkcí elektrické energie při zachování kvality provozovaných energetických spotřebičů. Tedy snížení energetických vstupů do stroje při zachování stejného výsledku [25].

- **Termodynamický přístup.** Podstata termodynamického přístupu spočívá v dosazení hodnoty uvedené v rovnici jako užitečná práce [26]. Jedním z nich je výpočet entalpické účinnosti pomocí poměru užitečných výstupů a všech energetických vstupů.
- **Okamžitá a procesní energetická účinnost.** V současnosti množství studií využívá tzv. specifickou spotřebu energie (SEC – specific energy consumption) pro vyjádření energetické účinnosti obráběcího procesu. SEC je definována jako spotřebovaná energie stroje nutná pro oddělení objemové jednotky materiálu. Tato veličina je také nazývána jako energetická intenzita nebo specifická řezná energie.
- **Elementární kroky spotřeby elektrické energie.** Na proces obrábění je také možné nahlížet z jednodušší perspektivy a rozdělit daný technologický proces na jednotlivé kroky spotřeby energie, tzv. ECS (energy consumption step), které se vyznačují v rámci jednotlivých úkonů u obráběcího stroje poměrně jednoduchým a opakujícím se úkonem [8], [6]. Kvantifikace dopadů na životní prostředí u obráběcích strojů

## 2.2 Problematika konstrukce a optimalizace energeticky účinných obráběcích strojů

V daném rozsahu vyplývajícím z tématu práce lze identifikovat mnohé přístupy vedoucí ke zlepšení energetického profilu stroje, nebo k jeho analýze.

Požadavek na vysokou produktivitu, vysokou kvalitu a nízkou spotřebu energie zásadním způsobem ovlivňuje konstrukci strojů. Tento trend pochází z legislativních, etických a v nemalé míře i finančních požadavků na úsporu a zachování zdrojů nerostného bohatství [27][28]. Norma [10] zaměřená na energeticky efektivní obráběcí stroje by měla být právě využita v momentu, kdy je stroj teprve konstruován. Lehká stavba a výběr energeticky úsporných komponent jsou pak běžnými postupy pro tvorbu energeticky úsporných obráběcích strojů [29]. Perspektiva lehkých staveb obráběcích strojů, pak může být dosažení co největšího LF (lightweight factor), tedy poměru modelu pružnosti  $E$  a hustoty  $\rho$ , nebo poměru tuhosti  $c$  a hmotnosti  $m$  (8). Pro zvyšování LF je pak možné snížit hmotnost při zachování tuhosti, nebo zvýšit tuhost při zachování hmotnosti.

## 2.3 Zvyšování energetické účinnosti strojů řízením technologických procesů

Energetická účinnost může být zlepšena prostřednictvím optimalizace výroby na obráběcím stroji snižováním nevýrobních časů, vhodné aktivaci dílčích subsystémů a snižování jalového výkonu stroje [30].

- 1) **Optimalizace spotřeby energie v režimu stand-by:** obráběcí stroje bývají zpravidla uváděny do stand-by režimu pro během čekání na další operaci pro úsporu energie. Tímto lze docílit okolo 10% až 15% úspory energie. Řízením tohoto procesu lze dosáhnout větších úspor. [31].
- 2) **Optimalizace sekvence technologického procesu:** důležitý vliv na energetickou spotřebu má i posloupnost jednotlivých technologických operací. Správně nastavený proces bez úzkých míst může znamenat až 50% úsporu.
- 3) **Optimalizace výběru obráběcích strojů:** během technologického procesu může být značná spotřeba energie způsobena dalšími subsystemy, které se nepodílí, nebo nepřímo podílí na technologickém procesu. Tomu je možné zamezit výběrem vhodného stroje a nikoliv nepřiměřeného zařízení vhodného pro obrábění při daleko náročnějších řezných podmínkách.
- 4) Další možné **optimalizace použití obráběcích strojů:** snížení nevýrobních časů je možné docílit například spřažením rozběhu vřetene během vysokorychlostního obrábění a polohování obrobku [32]. Optimalizací dráhy nástroje lze taktéž docílit nemalých energetických úspor [33]. Další možnou optimalizací technologického procesu může být plynulá změna a adaptivita mazacích podmínek během obrábění [34].

## 2.4 Modelování spotřeby energie u obráběcích strojů

Zlepšování energetické účinnosti je založeno na přesném odhadu. Model spotřeby energie obráběcích strojů je závislý na mnoha proměnných a z toho důvodu je nutné správně porozumět zákonitostem, které souvisí s technologickými procesy obráběcího stroje. Podle způsobu vyjádření vytvořených modelů spotřeby energie lze rozdělit přístupy do třech kategorií. První kategorie je získání lineární závislosti mezi SEC (Specific Energy Consumption) a MRR (Material Removal Rate). Druhá kategorie je zaměřena na analýze souvislosti mezi spotřebou energie a procesními parametry. Třetí kategorie je založena na tvorbě obecného modelu technologického procesu pro výpočet energetické náročnosti vyráběného dílu.

- **Model založený na lineární závislosti MRR a SEC.** Byl vytvořen zjednodušený pohled na vstupní a výstupní energetické a materiálové toky ve výrobním procesu založený no konceptu termodynamiky[4][35].
- **Model založený na závislosti procesních parametrech a spotřebě energie.** Na základě různých přístupů při volbě vstupních parametrů pro simulaci spotřeby elektrické energie řezného procesu může být tato kategorie modelů rozdělena na čtyři dominantní přístupy: zaměření se na opotřebení nástroje, na deformaci kovu při obrábění, na řezné parametry a na řeznou sílu.
- **Model energetické účinnosti orientovaný na výrobní proces.** Tato kategorie modelu je stanovena z úhlu pohledu realizovaných pohybů obráběcího stroje [1][2]. Tento způsob tvorby modelu má lepší a univerzálnější využitelnost, takže analýza částí obráběcích strojů a mechanismů pro přenos síly a krouticího momentu můžou být detailně rozebrány.

### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Na základě popsaného současného stavu vědy a techniky a na základě zadání disertační práce byl stanoven hlavní cíl disertační práce, čímž je **návrh metody predikce spotřeby elektrické energie obráběcího stroje** ve fázi užití již ve fázi vývoje stroje. Řešení hlavního cíle dizertační práce bylo rozděleno na následně uvedené dílčí cíle:

- Vývoj simulačního modelu
- Realizace verifikačního experimentu
- Realizace validačního experimentu
- Stanovení hranice použitelnosti vytvořené metody

### 4 ZVOLENÉ METODY

Metody uvedené v této kapitole shrnují využitě postupy pro dosažení výsledku, který se očekává od navrhovaného postupu predikce spotřeby elektrické energie obráběcího stroje ve fázi vývoj

#### 4.1 Měření spotřeby elektrické energie na obráběcích strojích [3]

Cílem měření je dlouhodobé testování spotřeby stanovených výrobních strojů v normálním výrobním procesu. Spotřeba energie, za kterou zákazník/provozovatel stroje distribuční společnosti platí, je určena tzv. činným výkonem. Z hlediska ekodesignu však nelze pominout i další skutečnosti, jmenovitě účinník (který bývá dodavatelem elektrické energie spotřebiteli pod hrozbou znatelných finančních sankcí předepsán) a splnění požadavků na elektromagnetickou kompatibilitu, danou závaznými ČS a EN normami. Pro stanovení postupu měření na pohonech stroje je proto nezbytné celou problematiku teoreticky popsat.

#### 4.2 Srovnání spotřeby elektrické energie obráběcími stroji

Výrobní stroje tvoří obsáhlou oblast průmyslového působení po celém světě. Nejedná se pouze o stroje obráběcí, ale dle průmyslového odvětví můžeme hovořit i o strojích tvářecích, strojích pro zpracovatelský průmysl, strojích pro potravinářský průmysl, nekonvenčních jednoúčelových strojích, strojích v oblasti papírenského průmyslu, strojích pro textilní průmysl atd. Není tedy možné sestavit jednotnou metodu posuzování z hlediska energetické náročnosti a nelze jednotně metodologicky stroj analyzovat, vytyčit možné energetické uzly, sestavit energetickou mapu a vytyčit měřící body, z nichž by bylo možné získávat podklady pro hodnocení jejich energetické účinnosti. Ani při zúžení zkoumaného intervalu obráběcích strojů není možné docílit stanovení jednotné metody, z důvodu různých konfigurací hlavních konstrukčních uzlů stroje, použitých pohonných systémů a periférií. Kategorie tedy přináší řadu úskalí, protože dělením se více prohlubuje nutnost vytvářet další kritéria specifická pro určitou kategorii výrobních strojů. Proto je vzhledem k tématu disertační práce, vhodné zabývat se detailněji kategorizací oblasti obráběcích strojů, obsažení všech výrobních strojů v návrhu metody by se však vymykalo rozsahu této práce.

### 4.3 Metody analýzy komponent obráběcího stroje

- **Analýza pasivních komponent.** Z hlediska energetických ztrát je nutné zajistit patřičnou přesnost simulace definicí pasivních ztrát komponent, popřípadě mechanismů, které nejsou přímými spotřebiči elektrické energie, ale vlivem jejich konstrukce a účinnosti dochází ke ztrátám například třením nebo valivým třením.
- **Hodnocení subsystémů obráběcího stroje.** Obráběcí stroje jsou složeny z dílčích subsystémů, které vykonávají funkce, které se přímo nebo nepřímo podílí na technologickém procesu. Dle vytvořené metody je nutné dílčí subsystémy popsat jejich charakteristikami, se kterými je možné dále uvažovat v matematickém a fyzikálním modelu. Pro zpřehlednění jednotlivých subsystémů je nutné vytvořit tzv. mapu spotřebičů tak, aby byla mezi nimi zřetelná souvislost.

### 4.4 Metoda analýzy řezných podmínek

Predikce velikosti energetické ztráty vlivem řezného procesu je poměrně komplikovanou záležitostí a přístupů pro výpočet energetické náročnosti je několik. Nejčastěji používaný přístup je přes výpočet řezného procesu na základě empirických vzorců, které poskytují hrubý náhled na problematiku obrábění.

### 4.5 Simulace a výpočetní metody

Podle požadavků vytvořené metody je nutné pro zjednodušení a zrychlení dosažení výsledků použít vhodný výpočetní software, který po nastavení dopočítá potřebná data, která jsou vyžadována jak pro chod samotné simulace, tak pro konečné zpracování. V této kapitole jsou shrnuty metody pro výpočet a simulaci a týkají se různých kroků vytvořené metody.

- **Interpretace G-kódu.** G-kód (jinak také ISO kód) je kód pro definici jednotlivých operací a jejich parametrů CNC obráběcího stroje. Pro účely simulace byl sestaven skript v programu MATLAB umožňující překlad txt souboru s obsaženým G-kódem na požadovaná vstupní data simulace. Podobně jak funguje čtení g-kódu u CNC strojů po řádcích, neboli blocích, je tomu tak i u tohoto překladače.
- **Řízení simulačního modelu.** Vstupními daty simulace jsou data z CAD modelu a G-kód definující požadované dráhy nástroje. Pro převod G-kódu do matice zahrnující průběhy úhlových rychlostí jednotlivých kuličkových šroubů v závislosti na čase je použit Matlab překladač. Překladač G-kódu je vytvořen jako skript v prostředí Matlab a G-kód je zadán v textovém souboru. Překladač vyhodnocuje požadované dráhy nástroje jako matici bodů, které jsou definovány G-kódem. Výstupem z MSC Adams jsou průběhy krouticích momentů na jednotlivých kuličkových šroubech. Výstupní veličiny jsou zaznamenávány v prostředí Matlab Simulink, kde je přes úpravu signálu vyhodnocován průběh aktuálního mechanického výkonu soustavy a spotřebované energie.
- **Multi body simulace.** Jako fyzikální model slouží CAD model stroje, který je analyzován. Čím je kompletnější, tím simulace poskytne přesnější výsledek energetické náročnosti v rámci technologického procesu. Teoretický způsobu zpracování modelu Vyexportované podsestavy ve formátu STP umístíme do prostředí MSC Adams.



provozován. Z toho důvodu je důležité, aby byla tato etapa nebyla opomíjena. Je třeba získat data od všech účastníků, kteří se na vývoji tohoto stroje podílí. Výsledkem je zde stanovení geometrie stroje; materiálů, které budou pro stavbu použity; komponent, periférií a dalších. V této metodě by nemělo docházet k hodnocení mechanických parametrů zvolených komponent, ale k hodnocení jejich energetických profilů. Výstupem by měl být průběh spotřeby elektrické energie, popřípadě aktuálního výkonu na patě stroje s možností detailnějšího zaostření na konkrétní spotřebič.

## 5.2 Zpracování a analýza dat

Po fázi sběru dat, kdy je vytvořen co nejvíce kompletní obraz o analyzovaném stroji ve fázi vývoje, je zapotřebí nasbíraná data o stroji analyzovat a vytvořit na základě těchto dat matematický a fyzikální model analyzovaného stroje a technologického cyklu. Cílem analýzy je zjistit údaje, které již budou vloženy do samotných modelů. Poté, co jsou na základě požadavků na obráběcí stroj vybrány jednotlivé komponenty, je nutné provést jejich analýzu z hlediska jejich chování během technologické operace a během celkového provozu stroje.

## 5.3 Příprava simulačního modelu

Cílem tvorby simulačního modelu je kompletace všech poznatků o obráběcím stroji a jejich zapojení do technologického cyklu. Je nutné vycházet ze všech nasbíraných údajů, které poskytnou vstupní data pro simulaci.

Na základě vstupních dat v podobě G-kódu je možné simulovat průběh technologického cyklu. G-kód vychází z technologických požadavků na konkrétní obráběcí stroj a na typický obrobek, který bude stroj vyrábět. Na základě tohoto kódu je možné sestavit sekvenci pohybů a aktivaci periferních subsystémů podílejících se na technologickém procesu i na samotném průběhu spotřeby energie. Cílem je časová parametrizace technologického procesu, ke které je třeba překlad.

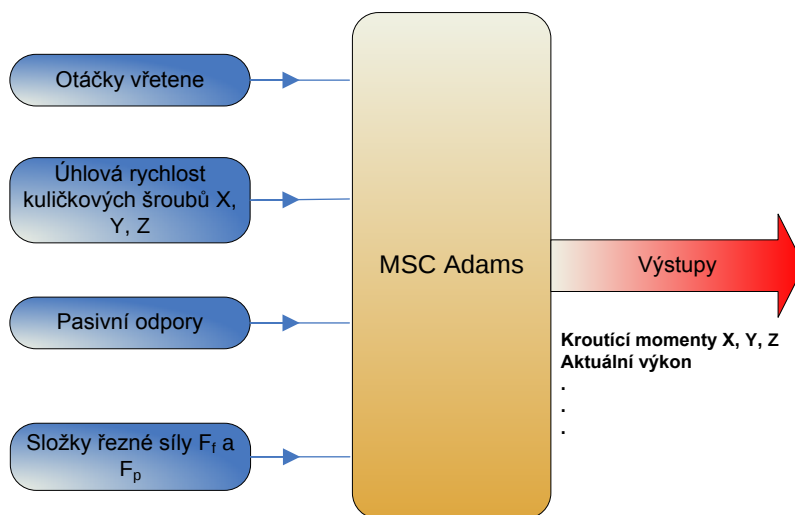
Na základě dopočítaných vektorů je nutné vytvořit časovou parametrizaci pohybu koncového bodu nástroje dle stanoveného vzorkování. Vzorkování probíhá na základě vzorkování měřicího zařízení, což je 50ms. V překladači se pak jedná o proměnnou „sample“ rovnou 0,05s, kterou lze dle požadavku měnit.

V případě tohoto způsobu časové parametrizace G-kódu postačí pro daný účel pouze částečná časová parametrizace zrychlení, budeme-li vycházet z předpokladu, že derivace zrychlení podle času (jerk) bude nulová a zrychlení v průběhu nenulového zrychlení bude konstantní. Částečná časová parametrizace pak bude vytvářet vektor, v němž budou dopočítány časy, během nichž bude docházet ke změně zrychlení.

Z důvodu možnosti řízení simulace je následně nutné vytvořit tzv. kompletní časovou parametrizaci G-kódu, což zahrnuje znalost chování všech vstupních parametrů podle nastavené vzorkovací frekvence tak, aby nedocházelo k výpadkům komunikace a ke zkreslení dat. Částečná časová parametrizace poskytuje údaje pouze v momentě, kdy dochází ke změně sledované veličiny – v tomto případě změně zrychlení.

Při přípravě fyzikálního modelu je vhodné zanedbat několik jevů, které mohou do jisté míry ovlivnit energetický profil stroje. Prvním z nich je tuhost soustavy, protože v případě simulace nejde o zjišťování přesnosti chodu stroje, ani o zjištění dosažitelných řezných parametrů při zachování stability řezného procesu. Je pravdou, že vibrace celého systému se

taktéž podílí na energetickém profilu stroje, neboť pohlcováním těchto vibrací dochází také k přeměně kinetické energie na teplo a tudíž k energetickým ztrátám, nicméně takto vzniklé ztráty budou zanedbatelné, vzhledem ke složitosti řešení takovéto soustavy a vzhledem k parametrům řešených strojů. Dále ve fyzikálním modelu nejsou zakomponovány třecí síly a valivé odpory ložisek, resp. kuličkových šroubů. I zadávání tření v tomto softwaru je komplikované a nevhodné danou aplikaci.

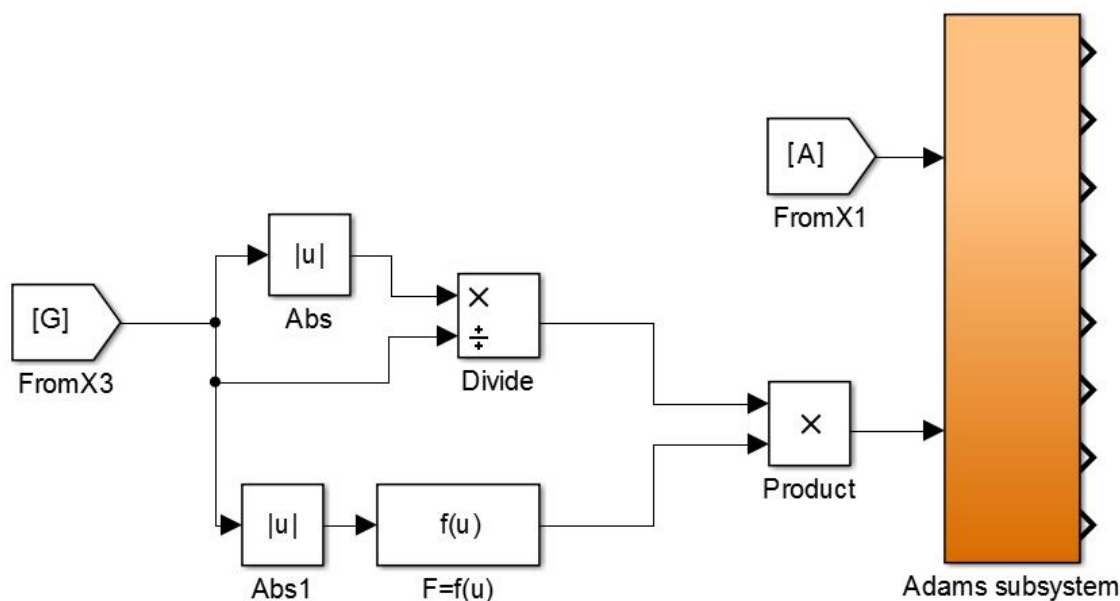


Obr. 2 Vstupy a výstupy subsystému MSC Adams

## 5.4 Simulace

Po zpracování vstupních dat, jejich správné konfiguraci a nastavení výstupů je možné provést simulaci. Pro realizaci simulace je nutné aktivovat podklady pro komunikaci mezi softwary. Jedním z nich je vyvolání subsystému Adams pomocí příkazu „adams\_sys“. Tímto příkazem je otevřen model v Matlab Simulink s daným blokem. Krom tohoto subsystému jsou zde připraveny vstupy a výstupy, které jsou definovány. Vstupní i výstupní proměnné lze pak upravovat přímo v prostředí Simulink. Dalším nutným úkonem je načtení skriptu, který se automaticky generuje při exportu proměnných do Matlabu. Tím dojde k načtení vstupních a výstupních proměnných do Matlabu. Pro spuštění simulace je nejdříve zásadní správně nastavit čas a vzorkování simulace. Čas simulace je nastaven proměnnou, která je dopočítána z parametrizace G-kódu. Vzorkování simulace je pak převzato z možnosti reálného vzorkování měřicího zařízení, což je 50ms.

Vstupní signály do simulace je pak nutné náležitě upravit. Jak již bylo zmíněno výše pasivní odpory způsobené méně než stoprocentní účinností posuvových rotačních a pohonných mechanismů jsou dopočítávány v závislosti na posuvové rychlosti os, nebo na základě úhlové rychlosti kuličkového šroubu. V samotném simulačním softwaru (Adams) se to pak projeví jako síla působící proti pohybu daného dílce.



Obr. 3 Blokové schéma dopočtu pasivních odporů

Zpracování signálu jdoucího z časové parametrizace G-kódu probíhá podle schématu uvedeného na Obr. 3. Do tohoto schématu vstupuje signál [G], kde vstup je v podobě mm/s. Poté se signál štěpí na dvě větve. V první větvi získáváme znaménko (orientaci) pasivní síly tak, aby vždy působila proti směru pohybu. Druhá větev tohoto schématu přepočítává absolutní hodnotu vstupu přes polynom druhého stupně, který určuje závislost pasivního odporu na velikosti posuvové rychlosti. Tato funkce je získána experimentálně. Vynásobením velikosti síly pasivních odporů s +1 nebo -1 získáváme vstup do simulace v podobě velikosti a orientace síly pasivních odporů vzhledem k směru posuvu dané osy.

Podobným způsobem je možné rozšířit vstupy bloku subsystému Adams o pasivní odpory související s dalšími posuvovými osami a vřetenem a dalšími spotřebiči s proměnnou spotřebou závislou na aktuálních technologických podmínkách. Aktivní komponenty s konstantní spotřebou není nutné zahrnovat do vstupů subsystému Adams, ale je možné je zakomponovat na stranu výstupů ze subsystému, kdy budou aktivovány na základě impulsu z časové parametrizace G-kódu.

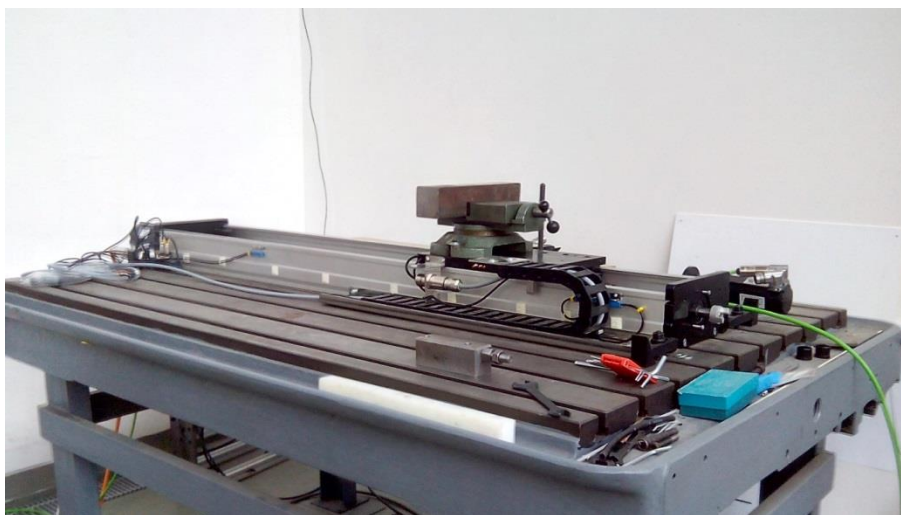
## 6 OVĚŘOVACÍ EXPERIMENTY

V rámci navržené metody pro určování spotřeby elektrické energie obráběcího stroje byly provedeny experimenty, které posloužily pro zpřesnění a ověření platnosti zmiňované metody. Cílem bylo provést porovnání mezi naměřenými daty na reálném zařízení a daty získané prostřednictvím použití uvedené metody. V prvním případě byl realizován verifikační experiment využívající modelového případu uložení upínacího stolu na lineární posuvové ose. Cílem tohoto experimentu, uvedeného v kapitole 6.1, byla zkouška metody a její kalibrace na daném zařízení. Závěry a postupy použité během verifikačního experimentu byly následně použity při validačním experimentu uvedeném v kapitole 6.2. To mělo za následek zpřesnění výstupů metody. Součástí obou experimentů byly realizovány referenční měření, které sloužily jako zdroj dat pro simulaci, zejména pro získání konstantní spotřeby elektrické

energie nazývané jako Basic Load a pro získání průběhu ztrátové funkce jednotlivých posuvových os.

### 6.1 Verifikační experiment na lineárním měřicím standu

Experimentální lineární osa (stand) byla navržena k testování a ověřování účinnosti mechanismu s kuličkovým šroubem a maticí, a to ve dvou variantách. S klasickým jedním pohonem nebo se zdvojenými pohony, kdy je na každé straně kuličkového šroubu přidán jeden motor, jehož parametry jsou oproti variantě s jedním pohonem značně slabší.



Obr. 4 Experimentální pracoviště pro měření elektrické spotřeby lineárního standu

#### – Analýza pasivních komponent

Z důvodu přesnosti měření je nutné správně definovat pasivní odpory celé soustavy. Mezi pasivní odpory řadíme odpor kuličkového šroubu a lineárního vedení.

V první fázi měření není možné přesně stanovit podíly ztrát jednotlivých komponent, ale je možné vyjádřit soustavu jako celek. Cílem je získat funkci, jejíž tvar je definován mocninnou funkcí a proměnnou bude úhlová rychlost, tedy závislost posuvové rychlosti na velikosti násobitele ztrát. Postup získání finálního průběhu ztrát byl následující:

- **Referenční měření aktuálního výkonu bez zatížení při různých posuvových rychlostech.** V případě, že by byly pasivní odpory rovny nule, aktuální výkon v momentu, kdy se soustava pohybuje rovnoměrným pohybem, bude také nulový. Nenulový výkon bude jen v případě zrychlení a brždění. To je dáno způsobem zapojení měřicí soustavy, která je vložena mezi frekvenční měnič a motor.
- **Získání průměrných hodnot aktuálního výkonu.** Průměrnou hodnotou aktuálního výkonu rozumíme ustálenou hodnotu aktuálního výkonu získanou v momentě, kdy se soustava pohybuje rovnoměrným pohybem.
- **Vydělení aktuálního výkonu odpovídající posuvovou rychlostí.** Tím je získáno měřítko, jímž je následně násobena posuvová rychlost tak, aby se docílilo přesnějších výsledků a rozdíl mezi simulací a měřením byl minimální.
- **Získání rovnice spojnice trendu mocninnou regresí.** Mocninná regrese byla vybrána z důvodu absence koeficientu, který i v případě nulové posuvové rychlosti

způsobuje nenulovou hodnotu ztrátového násobitele. Násobitel je pak vybrán jako funkce posuvové rychlosti a přes signál v Matlab Simulink zakomponován do celkového signálu síly působící proti pohybu soustavy.

Výsledkem důležitým je pro simulaci získaná funkce pomocí mocninné regrese ve tvaru:

$$y = 0,2505 \cdot x^{0,3471} \quad (1)$$

## – Analýza potřebné technologie

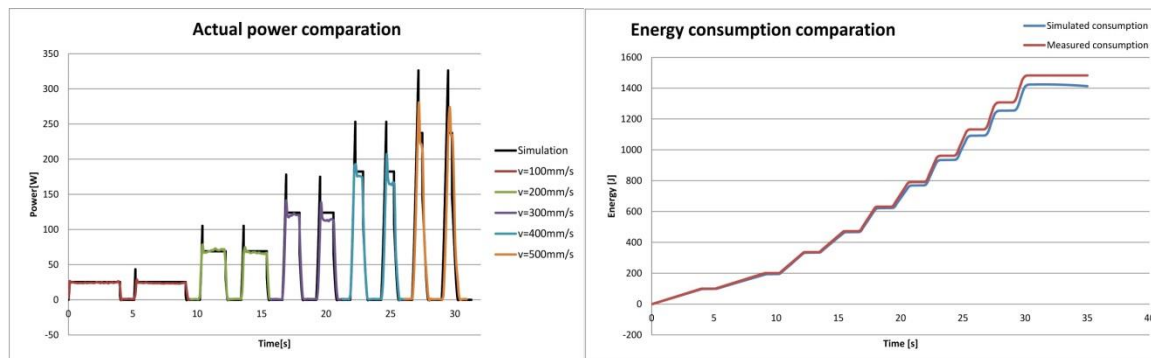
Součástí analýzy je u standardních obráběcích strojů rozbor G-kódu a nasazení různých nestandardních technologií, nicméně v případě lineárního měřicího standu se nedá hovořit o typických technologických operacích. Jedná se pouze o získání experimentálních dat pro srovnání reálného modelu se simulací. Díky tomu, že je možné stand ovládat pomocí softwarového rozhraní dodávaného s měniči Beckhoff, je možné nastavovat různé dynamické parametry. Experiment byl naplánován následovně:

- Použity různé hmotnosti simulující zátěž.
- Měření při různých zrychleních.
- Různé posuvové rychlosti.

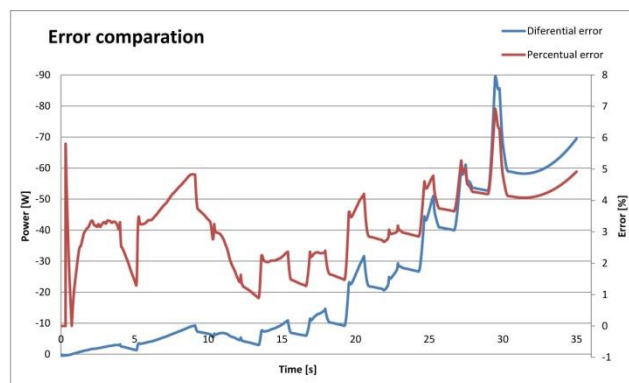
### 1. Interpretace výsledků simulace a jejich srovnání s měřením lineárního standu

V rámci ověřování simulace bylo provedeno měření při různých posuvových rychlostech a zatíženích. Měření proběhlo při zatíženích upínacího stolu 0 kg, 17,336 kg a 22,711 kg a při posuvových rychlostech 100, 200, 300, 400 a 500 mm/s. Výstupem je srovnání průběhů aktuálního výkonu naměřených a simulovaných dat, srovnání spotřebované energie a u každého měření diferenční a procentuální chyba. Měření na testovacím zařízení bylo provedeno opakovanou sekvencí pohybu pracovního stolu lineárním vratným pohybem o 400 mm s prodlevou 1 s kvůli možnosti oddělení jednotlivých měření. Stejně tak tomu bylo u simulovaného průběhu měření.

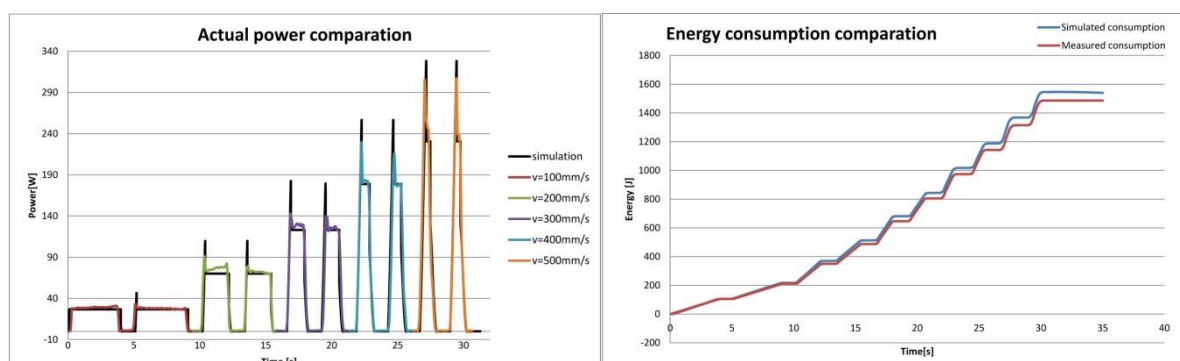
Součástí experimentu bylo extrahování relevantních vzorků simulace a časové sjednocení měření se simulací, což může být důvodem chyby mezi simulovanými a měřenými daty.



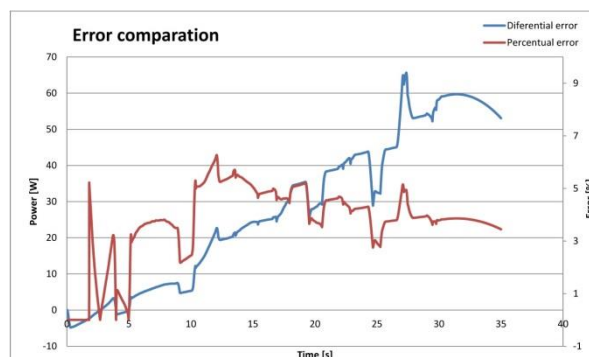
Obr. 5 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu a energie při  $m=0$  kg



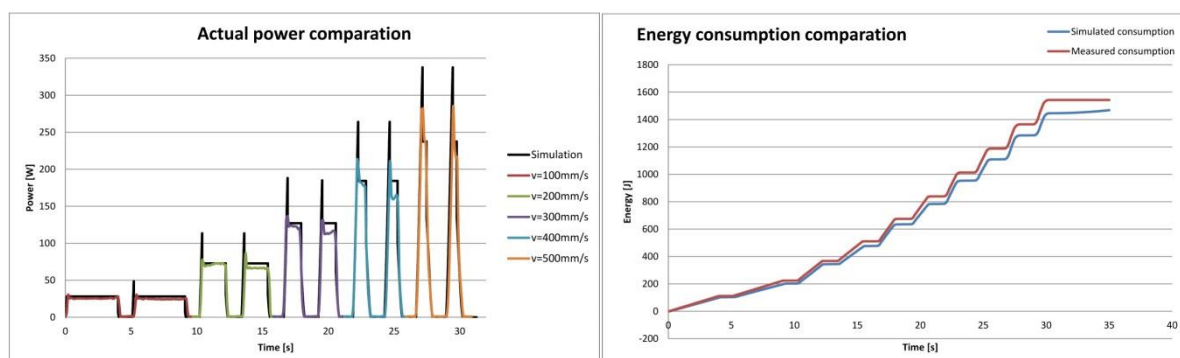
Obr. 6 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při  $m=0$  kg



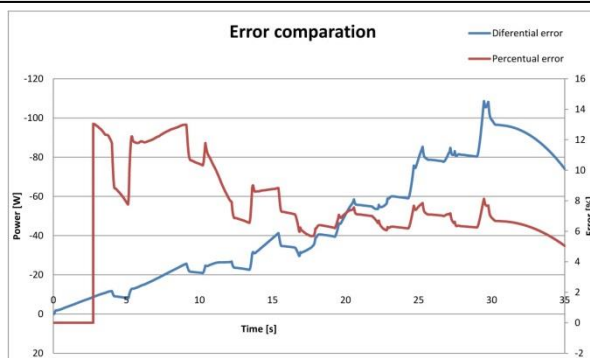
Obr. 7 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu a energie při  $m=17,336$  kg



Obr. 8 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při  $m=17,336$  kg



Obr. 9 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu a energie při  $m=22,711$  kg



Obr. 10 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při  $m=22,711$  kg

Tab. 1 Srovnání chyby měření a simulace u lineárního standu

| Proměnná                           | Zatížení upínacího stolu [kg] |         |         |
|------------------------------------|-------------------------------|---------|---------|
|                                    | 0                             | 17.336  | 22.711  |
| Průměrná diferenciální chyba [Ws]  | 23.8979                       | 28.4603 | 46.1149 |
| Průměrná procentuální chyba [%]    | 3.1951                        | 3.7308  | 7.4343  |
| Maximální diferenciální chyba [Ws] | 89.5604                       | 65.6364 | 108.593 |
| Maximální procentuální chyba [%]   | 6.9205                        | 6.2675  | 13.0441 |

Výsledky a shrnutí experimentu jsou provedeny v grafech na Obr. 5, **Chyba! enalezen zdroj odkazů.**, Obr. 6, Obr. 7, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, Obr. 8, Obr. 9, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a v Obr. 10 a v tabulce Tab. 1 shrnující řesnost této metody. V případě nižších zatížení jsou výsledky poměrně příznivé, u nejvyššího zatížení je maximální chyba nad 10% hranicí, což je pravděpodobně způsobeno nedokonalou časovou synchronizací simulovaných a naměřených dat.

## 6.2 Validační experiment na stroji MCV 750 Quick

Dalším krokem ve validaci metody pro určování spotřeby elektrické energie během fáze vývoje obráběcího stroje je její aplikace na reálný obráběcí stroj v provozu. K tomuto účelu poslouží tříosé obráběcí centrum firmy Kovosvit MAS Sezimovo ústí označený jako MCV 754 Quick. Do simulace a samotného měření nebudou zahrnuty některé periferní zařízení stroje, včetně samotného řezného procesu. Jedná se o určení spotřeby obráběcího stroje při pracovním posuvu a rychloposuvu.

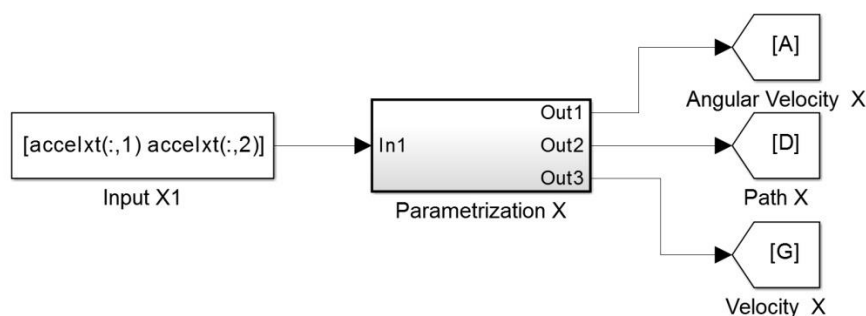
Během simulovaného určování spotřeby elektrické energie stroje MCV 754 Quick bylo postupováno dle na schématu metody uvedeného na Obr. 1. Postupuje se opět ve čtyřech úrovních, kdy je na začátku nutné nashromáždit veškerá data, která poslouží k zpřesnění simulace.

- **Analýza potřebné technologie.** Potřebná technologie v rámci technologického procesu se odvíjí od požadavku měření stroje na patě během chodu posuvových os při různých posuvových rychlostech. Není nutné využívat žádné zvláštní subsystémy ani chlazení řezného procesu.

Testovací cyklus j cyklem používaným pro měření spotřeby elektrické energie u frézovacích center, vychází z normy TS B 0024-1 [9]. Trajektorie je postupně dosahována při různých posuvových rychlostech.

– **Částečná časová parametrizace.** Výstupem částečné časové parametrizace jsou 3 dvourozměrné vektory popisující změny zrychlení jednotlivých os v čase. Dalším výstupem je celkový časový údaj popisující délku procesu. Překladač G-kódu funguje na základě čtení a analýzy strojového kódu, který je nutné spustit před samotnou simulací a úplnou časovou parametrizací.

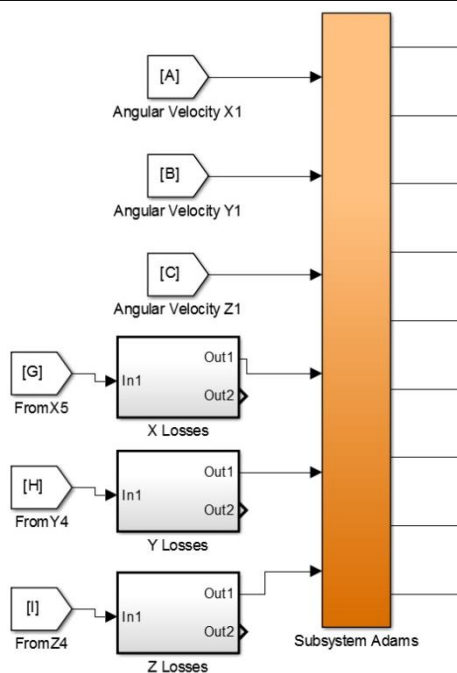
– **Kompletní časová parametrizace.** Poté, co jsou všechna potřebná data načtena a vygenerována, je možné provést kompletní časovou parametrizaci. V první řadě je nutné absolvovat řídicí úroveň. Do této části vstupují data z částečné časové parametrizace v podobě změny zrychlení v daném čase. Výstupem je úplná časová parametrizace s daným údajem v každém časovém úseku simulace popisující úhlovou rychlost šroubu, posuvovou rychlost dané osy v mm/s a dráha nástroje v dané ose, viz Obr. 11.



Obr. 11 Řídicí část kompletní časové parametrizace osy X

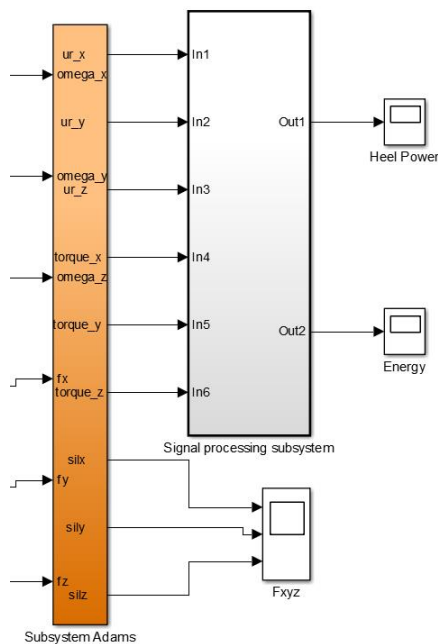
Schéma řídicí části se skládá z jednoho vstupu, kdy proměnná  $accelxt(:,1)$  udává čas simulace a  $accelxt(:,2)$  požadované zrychlení v tomto čase. V pravé části jsou uvedeny výstupy. Blok „Parametrization“ je pak výpočetním blokem dopočítávajícím danou hodnotu výstupu v čase. Vypočtené proměnné z úplné časové parametrizace slouží jako vstup do simulace nebo slouží jako kontrolní veličiny, pomocí nichž je možné ověřit správnost chodu fyzikálního modelu. Úhlová rychlost je přímo používána pro vstup do simulace, zatímco posuvová rychlost slouží jako proměnná ztrátové funkce, což je další úrovní matematického modelu.

Dalšími vstupy do simulace jsou hodnoty násobitele reakční síly na lineární vedení jednotlivých posuvových os stroje, viz Obr. 12. Cílem těchto násobitelů je vytvořit hodnotu odporové síly, která vyvolá požadovaný efekt zvýšení spotřebovávaného výkonu. Další vlastností je nutnost orientace síly proti pohybu dané posuvové osy. Způsob, jakým je dosaženo tvaru ztrátové funkce, je totožný s předchozím experimentem, prostřednictvím referenčního měření.



Obr. 12 Schéma vstupních hodnot do simulace

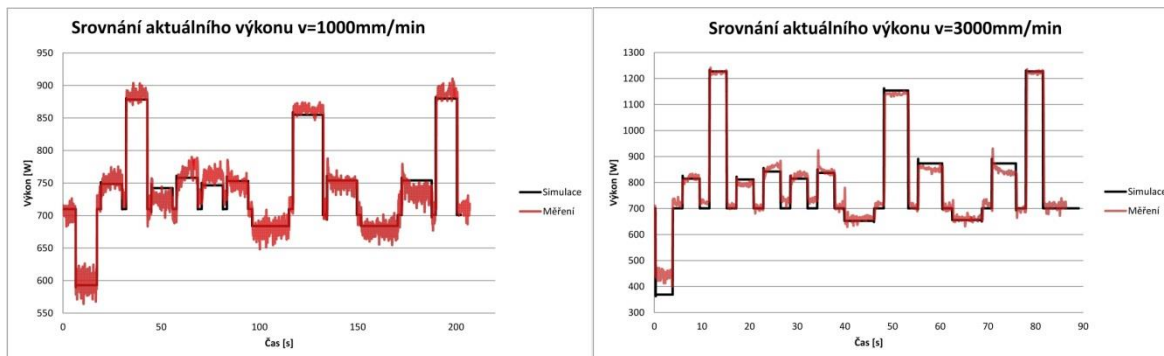
- **Zpracování výstupů simulovaných dat.** Před zahájením samotné simulace je potřeba správně konfigurovat, co se s výstupy simulace bude dít. Ze simulačního software vystupují data, která ještě nejsou schopna být srovnávána s naměřenými, protože měříme průběh výkonu a ze simulace dostáváme data v podobě průběhů jednotlivých krouticích momentů a úhlových rychlostí. Opět vhodným násobením, sčítáním a integrací těchto signálů dostaneme výsledek, který je možné zaznamenávat a srovnat s reálnými daty.



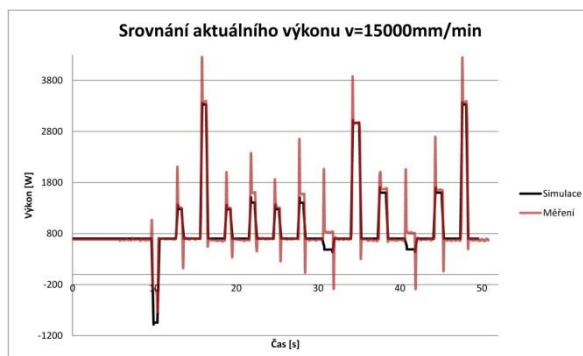
Obr. 13 Výstupy simulace

Na Obr. 13 je znázorněné schéma zpracování signálů ze simulace. V subsystému zpracování signálu se přepočítávají dané mechanické veličiny na spotřebovávaný výkon a spotřebovanou energii.

- **Interpretace výsledků a srovnání simulace s měřením stroje MCV 754 Quick.** Validace modelu proběhla na základě měření stejného průběhu pracovního cyklu, jako probíhal v simulaci. Po proběhlé simulaci je již možné zpracovat data a porovnat je s reálnými naměřenými daty. Výchozím je měření a simulace aktuálního výkonu. Celkové měření a simulace byly pro přehlednost rozděleny podle posuvové rychlosti  $v$ , do  $v = 1000 \text{ mm/s}$ ,  $v = 3000 \text{ mm/s}$  a  $v = 15000 \text{ mm/s}$

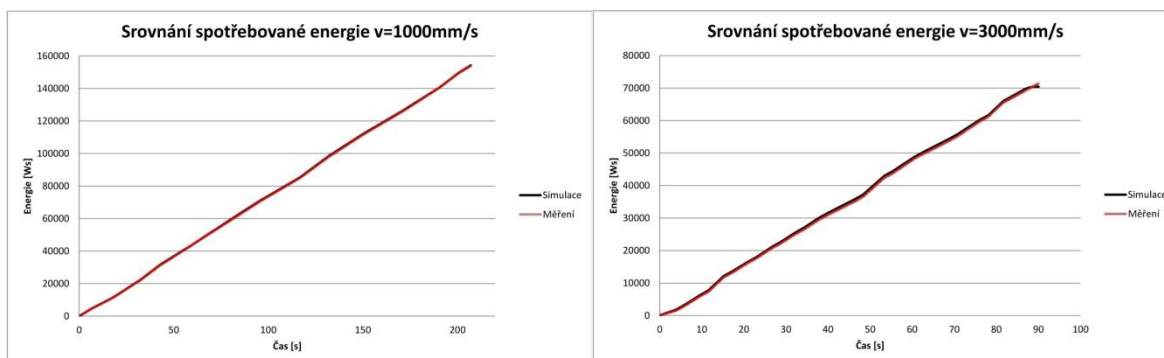


Obr. 14 Průběh měření a simulace výkonu při 1000 mm/min a 3000mm/min

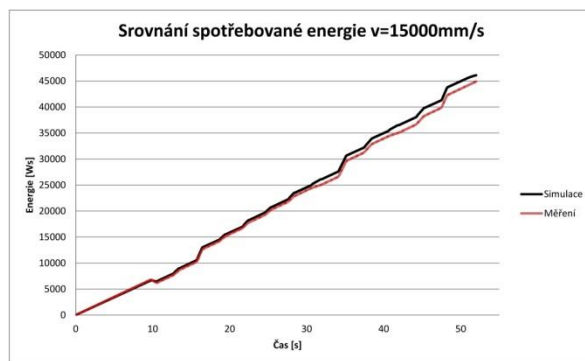


Obr. 15 Průběh měření a simulace výkonu při 15000 mm/s

Pomocí časového sladění dat je možné přímo porovnávat simulovaná a naměřená data v každém časovém okamžiku simulace.

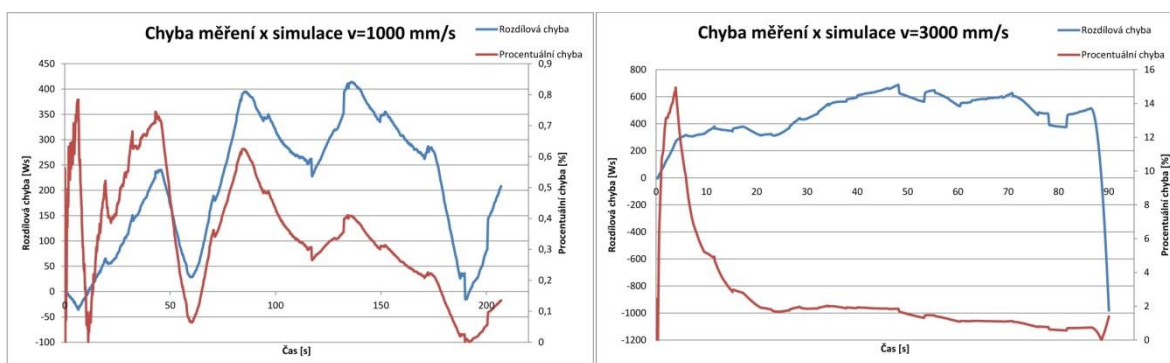


Obr. 16 Průběh měření a simulace spotřebované energie při 1000 mm/min a 3000mm/min

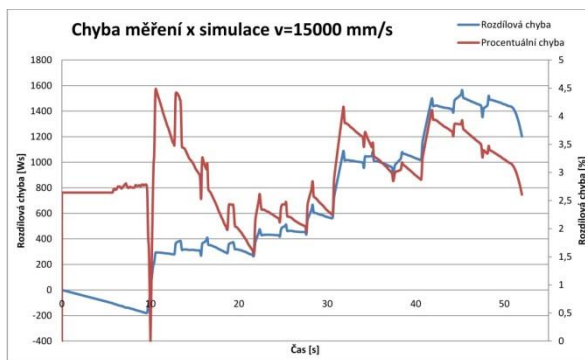


Obr. 17 Průběh měření a simulace spotřebované energie při 15000 mm/min

Posledním typem zjišťovaných charakteristik jsou průběhy diferenciální a procentuální chyby Obr. 18, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, Obr. 19. Tím lze v každém časovém kamžiku technologického procesu porovnat, jak se liší simulace od skutečnosti.



Obr. 18 Průběh chyby při 1000 mm/min a při 3000 mm/min



Obr. 19 Průběh chyby při 15000 mm/min

Uvedená tabulka Tab. 2 shrnuje srovnání měření a simulaci z hlediska chyby. Největší maximální diferenciální chyba byla zaznamenána u posuvu 3000 mm/min s hodnotou 687 Ws, což odpovídá 15 % rozdílu. Tato hodnota pak poměrně strmě klesá a ustaluje se na průměrné hodnotě 2,4 %. Vzhledem k množství neznámých a proměnných se jedná o výsledek, který je dostatečně přesný na to, aby tato metoda byla použitelná v praxi.

Tab. 2 Shrnutí chyby měření a simulace u stroje MCV 754 Quick

| Proměnná                              | Posuvová rychlost (mm/min) |       |         |
|---------------------------------------|----------------------------|-------|---------|
|                                       | 1000                       | 3000  | 15000   |
| Průměrná<br>diferenciální chyba [Ws]  | 207,3                      | 456,4 | 642,2   |
| Průměrná<br>procentuální chyba [%]    | 0,3                        | 2,4   | 2,9     |
| Maximální<br>diferenciální chyba [Ws] | 414,1                      | 687,6 | 1564,64 |
| Maximální<br>procentuální chyba [%]   | 0,7                        | 14,9  | 4,4     |

## 7 STANOVENÍ HRANIC POUŽITELNOSTI METODY

Jedním z cílů disertační práce je stanovení hranic použitelnosti metody. Tím je myšlena specifikace podmínek, za jakých bude metoda fungovat v akceptovatelných mezích přesnosti predikce. Vzhledem ke komplexnosti samotné metody a způsobu zpracování dat je nutné specifikovat požadavky na samotný vyhodnocovaný objekt, na jeho konstrukční uspořádání, na druh softwaru, na kterém dochází k řízení simulace a k simulaci samotné a k vyhodnocení simulace. Stanovené požadavky se vztahují na metodu a na řídicí model v čase, v jakém je práce odevzdána. Není vyloučeno, že je možné rozvinout model o další moduly, které rozšíří hranice použitelnosti metody, nicméně metoda je zatím omezena specifikovanými podmínkami. Schématický algoritmus celé metody je ukázán na Obr. 20.

### 7.1 Požadavky na analyzovaný objekt

- Stroj se sériovou kinematikou.
- Tříosý obráběcí stroj.
- Programově řízené osy.
- Pohon lineárních os kuličkovým šroubem.
- Využití valivých lineárních vedení

### 7.2 Požadavky na dráhu nástroje

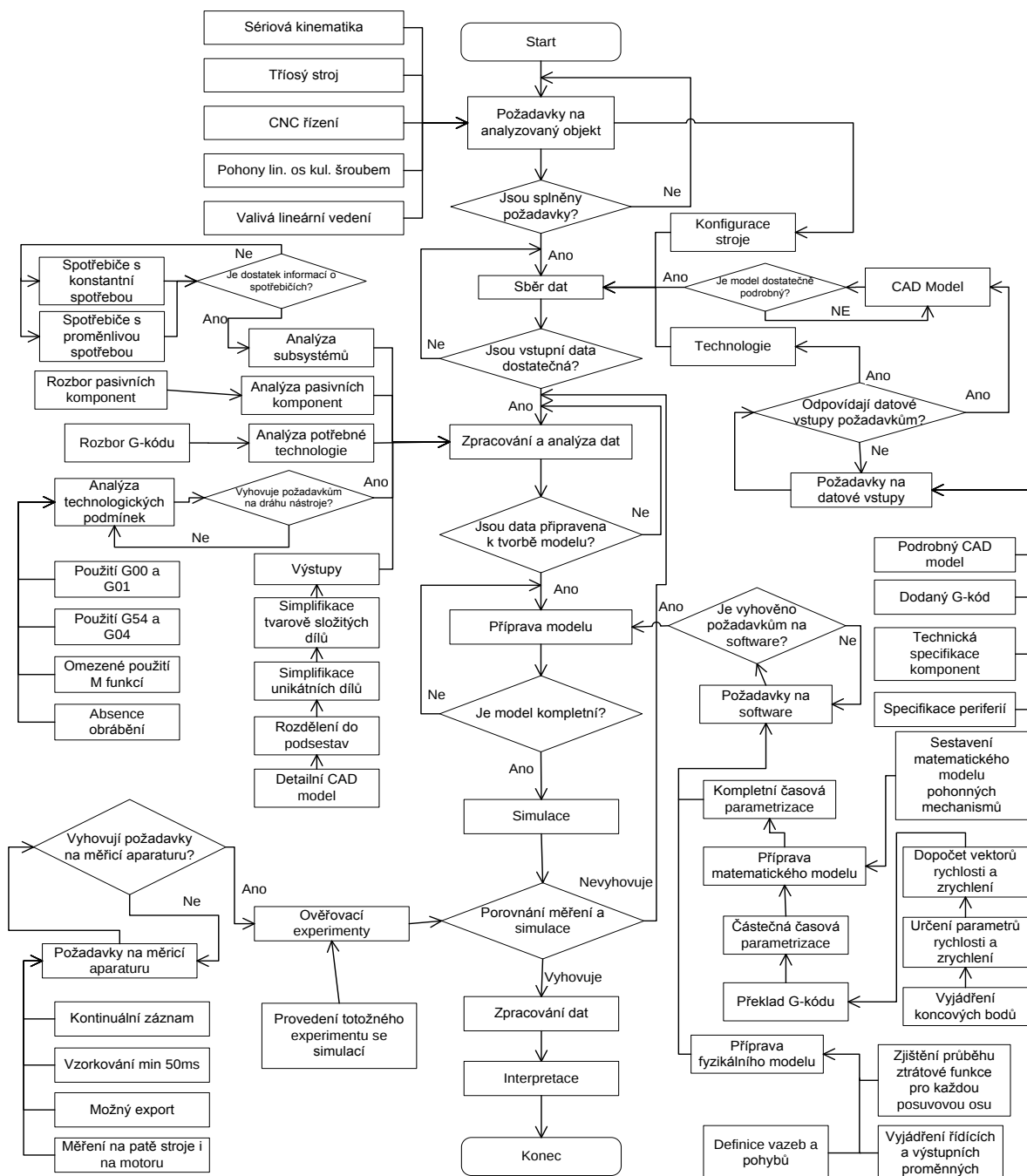
- Použití rychloposuvu a lineárních interpolací.
- Možnost využití příkazů G54 a G04.
- Omezené použití M funkcí.
- Absence obráběcích operací.

### 7.3 Požadavky na měřicí aparaturu

- Kontinuální měření se záznamem.
- Vzorkování alespoň ve frekvenci 50 ms.
- Export naměřených dat do interpretovatelné formy
- Možnost měření přímo na motoru.
- Možnost měření na patě stroje.

## 7.4 Požadavky na software

Součástí navržené metody je i řízení simulace pomocí matematického modelu, který vychází z konstrukčních prvků stroje a z ISO kódu. K tomu je zapotřebí softwaru, který umožňuje kontinuální zpracování signálu generovaného skriptem. Metoda predikce spotřeby elektrické energie byla vytvářena na základě skriptu pro překládání ISO kódu v programu Matlab, matematický model řízení fyzikálního modelu byl vytvořen v prostředí Matlab Simulink a samotná simulace průběhu technologického cyklu byla provedena v software MSC Adams. Softwary spolu musí komunikovat a na základě dat generovaných v jednom softwaru provádět simulaci v druhém a to v reálném čase, přičemž zpátky se vrací signál v podobě výstupních dat, které se dále zpracovávají.



Obr. 20

Vývojový diagram metody určení spotřeby elektrické energie včetně verifikace

## 7.5 Požadavky na datové vstupy

- **Podrobný CAD model**
- **Dodaný ISO (G-) kód typického obrobku.**
- **Technická specifikace klíčových komponent.**
- **Specifikace periferních zařízení.**

## 7.6 Požadavky na aplikaci metody již ve fázi vývoje stroje

- **Průběhy účinnosti motorů**
- **Průběhy ztrát pohonných a posuvových mechanismů.**

Výše zmíněné požadavky vytváří rámec podmínek, jejichž splněním je možné dosáhnout výsledku s dobrou přesností. Jsou přípustné i drobné změny, které však způsobí prodloužení času potřebného k dosažení výsledku. Požadavky byly stanoveny na základě podmínek, při nichž byla metoda ověřena.

# 8 ZÁVĚR

Předložená disertační práce je zaměřena na tvorbu metody predikce spotřeby elektrické energie, jejímž cílem je stanovení spotřeby elektrické energie obráběcího stroje již ve fázi vývoje zařízení. Spotřeba elektrické je vypočítána na základě typického obrobku, který je strojem produkován během jeho běžného provozu. Navržená metoda je založena na postupu v pěti krocích. V prvním kroku je nutné obstarat všechna relevantní data, která jsou užitečná pro tvorbu výpočetního modelu. Druhým krokem je analýza a zpracování nasbíraných dat tak, aby je bylo možné použít při tvorbě modelu. Ve třetím kroku je vytvářen samotný výpočetní model, kde jsou všechna relevantní data aplikována, přičemž je vytvořena řídicí struktura simulace a vstupní G-kód je časově parametrizován vytvořením dvourozměrného vektoru, postihujícím časovou změnu zrychlení dílčích posuvových os. To je následně časově parametrizováno v každém vzorku simulace tak, aby bylo možné každému vzorku simulace přiřadit hodnotu aktuálního výkonu. Tyto kompletně parametrizovaná data následně vstupují do simulačního software s připraveným fyzikálním modelem, pomocí kterého lze vyšetřit průběh krouticího momentu na každé posuvové ose. K tomu je ještě zapotřebí správně definovat velikost odporové síly působící proti směru pohybu. Ta je závislá na posuvové rychlosti a zatížení stolu. Odporová síla působící proti směru pohybu je tedy součin ztrátového koeficientu a reakční síly působící na lineární vedení stroje. Nenulová síla působící při zrychlení a během rovnoměrného posuvu lineární osy má za důsledek nárůst krouticího momentu. Krouticí moment následně vystupuje ze simulace a jeho součin s úhlovou rychlostí poskytuje průběh aktuálního výkonu stroje, který je již jednou z výstupních veličin celé metody. Integrací tohoto průběhu dostáváme informaci o průběhu spotřeby energie stroje během technologického procesu. Srovnáním naměřených a simulovaných dat dostáváme zpětnou vazbu týkající se přesnosti simulace.

Navržená metoda byla následně aplikována ve dvou experimentech. Experimenty byly realizovány pro získání reálných dat.

V prvním případě se jednalo o aplikaci metody na jednoduchý jednoosý lineární stand. Experiment spočíval v zatěžování posuvové jednotky různými zrychleními, různými posuvovými rychlostmi a různými zatíženími stolu. Měřicí soustava byla zapojena mezi

frekvenční měnič a motor, a to z důvodu odstranění dalších spotřebičů elektrické energie, které by způsobovaly komplikaci simulace. Po získání naměřených dat byla připravena simulace postihující totožné podmínky jako v případě samotného experimentu. V jednom případě bylo měření a simulaci porovnáno za účelem získání ztrátové funkce, vzhledem k doplnění informací o ztrátách na pasivních komponentech. Ta pak byla aplikována na další měření na lineárním standu, kde byla potvrzena správnost metody. Průměrná chyba byla v jednom případě cca 7 %, jinak v ostatních případech se průměrná chyba pohybovala v rozmezí 3-4%.

Ve druhém případě byl proveden experiment zaměřující se na simulaci technologického procesu obráběcího stroje MCV 754 Quick od firmy Kovosvit MAS Sezimovo ústí. Jedná se o tříosé obráběcí centrum se sériovou kinematikou. Zde byl během měření realizován technologický proces definovaný v normě JIS TS B 0024, kdy jsou postupně aktivovány všechny posuvové osy a jejich jednotlivé kombinace. Měření proběhlo při stejném zatížení upínacího stolu a při různých rychlostech posuvu. Při srovnání simulace a měření nebyly zaznamenány žádné větší odchylky, rozdíly jsou patrnější pouze v případě posuvu v záporném směru osy Z, kde se projevuje částečný vliv rekuperace elektrické energie, kterou umožňují speciálně upravené frekvenční měniče. Rekuperace reálně není dokonalá, a proto se projevuje nepřesností ve vyšším aktuálním výkonu stroje než u měření. Simulace a měření se procentuálně průměrně liší v rozmezí od 0,3 do 3 %.

**Experimenty dokládají vhodnost vytvořené metody** pro problematiku obráběcích strojů a v rozšíření tohoto přístupu o simulaci řezného procesu je potenciál využití této metody v praxi ještě větší.

## 8.1 Shrnutí dosažených výsledků

Výsledky disertační práce a jejich shrnutí je detailněji provedeno v závěru kapitol: 6.1 a 6.2, kde je možné se dočíst o konkrétní aplikaci na reálná zařízení. Výsledky plynoucí z předložené metody jsou ověřeny experimenty a měřením, což vede ke srovnání a výpočtu chyby simulace a reálných dat. Velikost průměrné chyby se pak u prvního experimentu s lineárním standem pohybuje při různých zatíženích v intervalu od 3,2 do 7,4 %, viz. Tab. 1. U druhého experimentu provedeného na tříosé CNC frézce se průměrná procentuální chyba při různých posuvových rychlostech pohybuje v intervalu od 0,3 do 2,9%, viz Tab. 2. Ze samotné metody vyplývá sled kroků, které je nutné postupně řešit. Podle těchto navržených kroků je rovněž postupováno během řešení experimentální části.

## 8.2 Teoretický přínos práce

Hlavním teoretickým přínosem této práce je detailní popis problematiky energetických spotřebičů obráběcího stroje, jednotlivých komponent a jejich podíl na energetickém profilu obráběcího stroje a vytvoření funkční metody pro vyhodnocení energetické náročnosti obráběcího stroje již ve fázi vývoje. Vyvinutá metoda poskytuje bázi znalostí pro další výzkum problematiky vývoje energeticky efektivních obráběcích strojů.

## 8.3 Praktický přínos práce

Vyvinutá metoda má díky své univerzálnosti širokou využitelnost a potenciál i pro praktické uplatnění. Důraz byl kladen především na možnost aplikace výstupů disertační práce na

Obráběcí stroje a predikci jejich spotřeby elektrické energie ve fázi vývoje a vytvoření energetického profilu stroje. V experimentální části byly navrženým způsobem popsány vybraná zařízení tak, aby mohla být metoda snadno převzata ve výrobním podniku. Metoda využívá výpočetně nekomplikované přístupy, aby konstruktér mohl aplikovat jednotlivé kroky bez nutnosti zdlouhavého studia pokročilých matematických postupů. K pochopení je nutná pouze orientace v dané problematice a technické vzdělání. Tím je zajištěno, že je možné rozšiřovat neomezeným způsobem spektrum jednotlivých strojů, u kterých je možné dosáhnout úspory energií již ve fázi vývoje, a následovat tak nejnovější trendy ve vývoji obráběcích strojů. Výsledky získané vyvinutou metodou jsou pak vhodné pro budoucí možnou nutnost kategorizace obráběcích strojů jako energetických spotřebičů již zmiňovaných v směrnici evropské komise 2009/125/EC[13], nebo pro vývoj energeticky úsporných obráběcích strojů dle normy ISO 14955 [10].

#### **8.4 Pedagogický přínos práce**

Disertační práce poskytuje návodné postupy pro následné rozvíjení metody v ní uvedené. Jedná se především o potenciál u diplomových prací, které v tomto kontextu mohou metodu rozšiřovat o další a detailnější analýzu subsystémů obráběcích strojů a o kompletaci funkce dopočtu řezných parametrů v rámci simulace. K tomuto tématu již dokonce vznikla diplomová práce: Tvorba simulačního modelu obráběcího stroje pro určení energetické spotřeby, jejíž autor Ing. Tomáš Vespalec postupoval na základě zdrojového kódu pro překlad G-kódu se simulací elektrických veličin, které přímo souvisí s pohony posuvových os obráběcího stroje.

Toto téma se nabízí i jako možné rozšíření výuky konstrukce obráběcích strojů. Výsledky disertační práce byly také publikovány v rámci konferencí a workshopů Mechatronika 2014 a QERS 2016, kde se s ním mohli seznámit odborníci z praxe, studenti technických oborů i vědečtí pracovníci.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ALTINTAS, Y., C. BRECHER, M. WECK A S. WITT. Virtual Machine Tool. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*. 1. 2005, 2(1), 115-138. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600225>
- [2] ALTINTAS, Y., Resul Sercan, Müge KAHYA a Hakkı Özgür ÜNVER. Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. , -. DOI: 10.1007/s00170-016-8441-7.
- [3] HOLUB M., BLECHA R., HOUŠKA P., PAVLÍK J., HUŽLÍK R., SYNEK M., TŮMA J., BLECHA P., SINGULE V., Bradáč, F.,. Ekodesign ve stavbě obráběcích strojů. *FR-TI3/655 - Ekodesign ve stavbě obráběcích strojů: Průběžná zpráva za druhý rok řešení projektu FR-TI3/655*. Brno 2011.
- [4] GUTOWSKI, Timothy, Jeffrey DAHMUS a Alex THIRIEZ. Electrical energy requirements for manufacturing processes. *13th CIRP international conference on life cycle engineering*. , 623-638.
- [5] H. BREZET, C. VAN HEMEL. EcoDesign: A promising approach to sustainable production and consumption. *UNEP, France*. 1997, 1(2). Dostupné také z: <http://www.grida.no/news/press/1711.aspx>
- [6] LAREK, Roland, Ekkard BRINKSMEIER, Daniel MEYER, Thorsten PAWLETTA a Olaf HAGENDORF. A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes. *Production Engineering*. , 575-579.
- [7] VAN HEMEL, CAROLIEN G. What sustainable solutions do small and medium sized enterprises prefer? *Sustainable solutions: Developing products and services for the future*. 1995, , 188-202.
- [8] ZHOU, Xiaona, Fei LIU a Wei CAI. An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system. *Journal of Cleaner Production*. , 1580-1590. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.090.
- [9] TS B 0024-1. *Werkzeugmaschinen: Messmethode der Wirkleistung: Fräsbearbeitungszentren*. 1. Japonsko: Japanese Standards Association, 2010. Dostupné také z: <http://www.freestd.us/soft/137038.htm>
- [10] ISO 14955-1:2014. Machine tools: Environmental evaluation of machine tools. 1. Ženeva: International Organization for Standardization, 2012.
- [11] Drinking Water Report 1992. *Environmental Report 1992*. , 55-56.
- [12] Kjótský protokol k rámcové úmluvě Organizace spojených národů o změně klimatu; Úř. věst. L 130, 15.5.2002, s. 4—20; zvláštní vydání v českém jazyce: Kapitola 11 Svazek 42 S. 27 – 43 [online] Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=DD:11:42:22002A0515%2801%29:CS:PDF> cit. 4.11.2011: Kapitola 11 Svazek 42 S. 27 – 43
- [13] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES: o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie. In: . Štrasburk: Evropská komise, 2009, číslo 125. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125&from=CS>
- [14] ANDERBERG, S E, S KARA a T BENO. Impact of energy efficiency on computer numerically controlled machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2010-4-1, 224(4), 531-541. DOI: 10.1243/09544054JEM1712. ISSN 0954-4054. Dostupné také z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/09544054JEM1712>
- [15] CAGNO, Enrico a Andrea TRIANNI. Exploring drivers for energy efficiency within small- and medium-sized enterprises: First evidences from Italian manufacturing enterprises. *Applied Energy*. 2013, 104, 276-285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.053. ISSN 03062619. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912007726>
- [16] TRIANNI, Andrea, Enrico CAGNO a Alessio DE DONATIS. A framework to characterize energy efficiency measures. *Applied Energy*. 2014, **118**, 207-220. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.042. ISSN 03062619. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191301041>
- [17] SANTOS, João P., Marta OLIVEIRA, Fernando G. ALMEIDA, João P. PEREIRA a Ana REIS. Improving the environmental performance of machine-tools: influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake. *Journal of Cleaner Production*. 2011, 19(4), 356-364. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.10.009. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652610004002>
- [18] SHROUF, Fadi, Joaquin ORDIERES-MERÉ, Alvaro GARCÍA-SÁNCHEZ a Miguel ORTEGA-MIER. Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. *Journal of Cleaner Production*. 2014, **67**, 197-207. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.024. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613008780>
- [19] CAMPOSECO-NEGRETE, Carmita. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production*. 2013, **53**, 195-203. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.049. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261300187X>
- [20] WANG, S., X. LU, X.X. LI a W.D. LI. A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*. 2015, **87**, 914-929. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.008. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010488>
- [21] WANG, Qiulian, Fei LIU a Congbo LI. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. *Journal of Cleaner Production*. 2013, **52**, 122-133. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.03.020. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613001546>
- [22] BHUSHAN, Rajesh Kumar. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of Cleaner Production*. 2013, 39, 242-254. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.08.008. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612004155>
- [23] PENG, Tao a Xun XU. Energy-efficient machining systems: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, 72(9-12), 1389-1406. DOI: 10.1007/s00170-014-5756-0. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5756-0>
- [24] DUFLOU, Joost R., John W. SUTHERLAND, David DORNFELD, Christoph HERRMANN, Jack JESWIET, Sami KARA, Michael HAUSCHILD a Karel KELLENS.

- Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2012, 61(2), 587-609. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.002. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002016>
- [25] SALONITIS, Konstantinos a Peter BALL. Energy Efficient Manufacturing from Machine Tools to Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*. 2013, 7, 634-639. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.045. ISSN 22128271. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113003144>
- [26] PATTERSON, Murray G. What is energy efficiency? *Energy Policy*. 1996, 24(5), 377-390. DOI: 10.1016/0301-4215(96)00017-1. ISSN 03014215. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301421596000171>
- [27] NEUGEBAUER, Reimund, Welf-Guntram DROSSEL, Steffen IHLENFELDT a Hendrik RENTZSCH. Machining With Redundant Kinematics. Volume 6: 35th Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B. ASME, 2011, , 871-882. DOI: 10.1115/DETC2011-47440. ISBN 978-0-7918-5483-9. Dostupné také z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=164101>
- [28] STRANO, Matteo, Michele MONNO a Andrea ROSSI. Optimized design of press frames with respect to energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*. 2013, 41, 140-149. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.017. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612005495>
- [29] DIETMAIR, Anton, Alexander VERL a Philipp EBERSPAECHER. Model-based energy consumption optimisation in manufacturing system and machine control. *International Journal of Manufacturing Research*. 2011, 6(4), 380-. DOI: 10.1504/IJMR.2011.043238. ISSN 1750-0591. Dostupné také z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=43238>
- [30] ZENG LING-LI, ZOU FENG-XING, XU XIAO-HONG a GAO ZHENG. Dynamic scheduling of multi-task for hybrid flow-shop based on energy consumption. *2009 International Conference on Information and Automation*. IEEE, 2009, , 478-482. DOI: 10.1109/ICINFA.2009.5204971. ISBN 978-1-4244-3607-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5204971/>
- [31] MOUZON, Gilles, Mehmet B. YILDIRIM a Janet TWOMEY. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*. 2007, 45(18-19), 4247-4271. DOI: 10.1080/00207540701450013. ISSN 0020-7543. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540701450013>
- [32] MORI, M., M. FUJISHIMA, Y. INAMASU a Y. ODA. A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011, 60(1), 145-148. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.099. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611001004>
- [33] BALOGUN, Vincent Aizebeoje, Ampara ARAMCHAROEN, Paul Tarisai MATIVENGA a Shaw KAH CHUAN. Impact of Machine Tools on the Direct Energy and Associated Carbon Emissions for a Standardized NC Toolpath. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Singapore: Springer Singapore, 2013, , 197. DOI: 10.1007/978-981-4451-48-2\_32. ISBN 978-981-4451-47-5. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-981-4451-48-2\\_32](http://link.springer.com/10.1007/978-981-4451-48-2_32)
- [34] FRATILA, Domnita. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. *Journal of Cleaner Production*. 2009, 17(9), 839-845. DOI:

10.1016/j.jclepro.2008.12.010. ISSN 09596526. Dostupné také z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652608003223>

- [35] GUTOWSKI, Timothy G., Matthew S. BRANHAM, Jeffrey B. DAHMUS, Alissa J. JONES, Alexandre THIRIEZ a Dusan P. SEKULIC. Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes. *Environmental Science*. 2009, **43**(5), 1584-1590. DOI: 10.1021/es8016655. ISSN 0013-936x. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es8016655>
- [36] KOM(2008) 660: *Vypracování pracovního plánu na období 2009–2011 podle směrnice o ekodesignu*. In: . Brusel: Evropská komise, 2008, ročník 2008, číslo 660. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0660&from=CS>
- [37] COM(2016) 773: *Pracovní plán pro ekodesign na období 2016–2019*. In: . Brusel: Evropská komise, 2016, ročník 2016, číslo 773. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016DC0773&qid=1487675029844&from=CS>
- [38] ENTR LOT 5: *WORKING DOCUMENT FOR THE ECODESIGN CONSULTATION FORUM ON MACHINE TOOLS AND RELATED MACHINERY*. In: . Brusel: Evropská komise, 2014, ročník 2014. Dostupné také z: [https://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering/produkter-med-krav/verktygsmaskiner/working-document-entr-lot-5-consultation-forum-6may14\\_final.pdf](https://www.energimyndigheten.se/globalassets/energieffektivisering/produkter-med-krav/verktygsmaskiner/working-document-entr-lot-5-consultation-forum-6may14_final.pdf)

## 10 ŽIVOTOPIS

### Osobní údaje

Ing. Jiří Tůma, narozen 30.11.1985 v Brně

Pracoviště

Ústav výrobních strojů systémů a robotiky

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

### Funkce na pracovišti

Asistent

### Vzdělání a akademická kvalifikace

- 2001-2005: Gymnázium Vídeňská, Vídeňská 47, 639 00 Brno  
Obor: Gymnázium - všeobecné  
(zakončeno maturitní zkouškou)
- 2005-2008: Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2, 616 69, Brno  
Obor: Strojní inženýrství  
(zakončeno SZZ a titulem Bc.)
- 2008-2010: Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2, 616 69, Brno  
Obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
(Zakončeno SZZ a titulem Ing.)
- 2010-dnes: Vysoké učení technické v Brně, FSI, Technická 2, 616 69, Brno  
Obor: Konstrukční a procesní inženýrství  
(doktorské studium, SDZ složena 2013))

### Pedagogická činnost

- 6EE Elektronika a elektrotechnika
- 6SR Stavba výrobních strojů a robotů
- HVS Výrobní stroje

### Přehled zaměstnání

- 2009-2015 IMI Norgren – konstruktér jednoúčelových zařízení pro výrobu
- 2011-2013 NETME Centre – technicko-hospodářský pracovník
- 2014-dnes ÚVSSR – odbor elektrotechniky – asistent

### Vědecko-výzkumná činnost, zapojení do projektů

- FSI-S-11-5 Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů
- FSI-J-11-16 Návrh experimentálního standu pro analýzu energetické náročnosti posuvových os výrobních strojů
- FSI-J-12-9 Moderní přístupy v řešení robotických aplikací
- FSI-J-13-1937 Posuzování vlivů konstrukčních principů při stavbě obráběcích strojů a jejich dopadů na životní prostředí
- FSI-S-14-2401 Green production – production machines and equipments
- FV 14-35 Posuzování vlivu energetických opatření na spolehlivost výrobních strojů
- FR-TI3/655 Ecodesign ve stavbě obráběcích strojů

## ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na návrh metody pro simulaci energetické náročnosti obráběcího stroje v provozu ve fázi jeho vývoje. Pro návrh metody jsou východiskem poznatky získané z rešeršní práce z oblastí vědy a průmyslu. Metoda samotná je tvořena pěti na sebe navazujícími kroky, které je třeba realizovat v náležitém pořadí tak, aby bylo možné vytvořit relevantní energetický profil obráběcího stroje.

Výstupem navržené metody jsou simulovaná data poskytující průběh spotřebované energie a potřebného výkonu, které jsou závislé na čase. Výstupní data jsou získána na základě simulace řízení obráběcího stroje podle G-kódu, který je pro simulaci interpretován do podoby matrice překladačem. Matrice obsahuje potřebná data pro řízení, jako jsou požadované koncové body nástroje, a požadované posuvové rychlosti, ke kterým je přiřazen časový údaj. G-kód je tedy částečně časově parametrizován. To je následně prostřednictvím matematického modelu pohonných mechanismů kompletně časově parametrizováno a dále díky součinnosti softwaru pro řízení pohonných mechanismů (Matlab Simulink) a softwaru pro fyzikální simulace (MSC Adams) zpracováno do podoby výstupních dat. Jako vstupní parametr simulace je užit koeficient sloužící jako násobitel normálové síly u pohonných mechanismů, který je funkcí posuvové rychlosti. Ztrátová funkce je získána experimentálně. V rámci disertační práce byly provedeny dva experimenty sloužící k verifikaci navržené metody. U každého experimentu je postupováno dle navržené metody a součástí je porovnání simulace s naměřenými daty při různých provozních režimech.

Navržená metoda, popsaná v disertační práci, umožňuje konstruktérům sumarizovat energetickou náročnost navrhovaného stroje ještě před jeho výrobou. Při správné interpretaci mohou výsledky metody sloužit jako podklad k zlepšení energetického profilu a tím ke zvýšení energetické účinnosti obráběcího stroje.

## ABSTRACT

Ph.D. thesis is focused on the design of the method for simulation of energy demands of machine tool in operation at the stage of its development. Proposed method is developed on the basis of literature search in science and in industry. The method itself is composed of five related steps, that must be realised in the proper order in order to create a relevant energy profile of a machine tool.

The output from the method are simulated data providing a course of consumed energy and required power which are time dependent. Output data are obtained on the basis of the drive system simulation of machine tool through G-code, that is interpreted for simulation by the compiler into the matrix. It contains data necessary for controlling of machine tool, such as the required end points of the tool and required feed rates, to which is assigned a time value. G-code is partially time parametrized. It is then followed by full time parametrization through a of mathematical model of drive mechanisms and due the synergy of software for drive mechanisms control (Matlab Simulink) and software for physical simulation (MSC Adams) is processed into output data. As an input parameter figures also coefficient used as multiplier of the normal force of driving mechanisms, which is a function of feed rate. This loss function is obtained experimentally. In the context of Ph.D. thesis were conducted two experiments, used to verify the developed method. For each experiment is proceeded

according to established method and it is included a comparison of simulation and measured data for various operating modes.

The proposed method, described in the Ph.D. thesis, allows designers to summarize the energy demand of the proposed machine before its production. When correctly interpreted, the results of the method can serve as a basis for improving the energy profile and thereby increasing the energy efficiency of the machine tool.