



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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Tůma

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

BRNO 2017

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 řešeršní 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.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

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.

KEYWORDS

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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TŮMA, J. Metoda pro simulaci energetické náročnosti výrobních strojů v etapě vývoje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 127 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat svému školiteli doc. Ing. Petru Blechovi, Ph.D., panu doc. Ing. Zdeňku Hadašovi Ph.D., mé rodině a zvláště mé ženě Elišce za trpělivost a za cenné připomínky vedoucí k dokončení této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Blechy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Ing. Jiří Tůma

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	SHRNUTÍ SOUČASNÉHO POZNÁNÍ VE VĚDĚ.....	11
2.1	Energetická účinnost obráběcích strojů	11
2.1.1	Termodynamický přístup	12
2.1.2	Okamžitá a procesní energetická účinnost.....	12
2.1.3	Elementární kroky spotřeby elektrické energie	13
2.2	Kvantifikace dopadů na životní prostředí u obráběcích strojů.....	15
2.3	Problematika konstrukce a optimalizace energeticky účinných obráběcích strojů...	16
2.4	Zvyšování energetické účinnosti strojů řízením technologických procesů.....	17
2.5	Modelování spotřeby energie u obráběcích strojů	18
2.5.1	Model založený na lineární závislosti MRR a SEC.....	19
2.5.2	Model založený na závislosti procesních parametrech a spotřebě energie	20
2.5.3	Model energetické účinnosti orientovaný na výrobní proces	21
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	23
4	ZVOLENÉ METODY	24
4.1	Způsob měření spotřeby elektrické energie na obráběcích strojích [4]	24
4.1.1	Fundamentální teoretická východiska.....	24
4.1.2	Výkony při harmonickém napájecím napětí při lineární zátěži	24
4.1.3	Výkony při harmonickém napájecím napětí na nelineární zátěži	26
4.1.4	Činný výkon zdroje konstantního napětí	28
4.1.5	Výkony při neharmonickém napájecím napětí na nelineární zátěži	28
4.1.6	Popis měřicího zařízení PMDB-01	31
4.2	Možnosti kategorizace obráběcích strojů z hlediska ekodesignu	35
4.2.1	Rozdělení dle účelu a typu obráběcího stroje	35
4.2.2	Rozdělení dle konstrukčního uspořádání obráběcího stroje	36
4.2.3	Rozdělení dle velikosti pracovního prostoru	36
4.2.4	Rozdělení dle příkonu obráběcího stroje	37
4.2.5	Rozdělení dle možného úběru materiálu.....	37
4.2.6	Rozdělení z hlediska velikosti a hmotnosti obrobku	37
4.2.7	Analýza zátěže životního prostředí obráběcích strojů	38
4.3	Metody analýzy komponent obráběcího stroje	39
4.3.1	Analýza pasivních komponent.....	39
4.3.2	Hodnocení subsystémů obráběcího stroje.....	40
4.4	Metoda analýzy řezných podmínek	43
4.5	Simulace a výpočetní metody	46
4.5.1	Interpretace G-kódu	46
4.5.2	Řízení simulačního modelu.....	49
4.5.3	Multi body simulace	50
5	NÁVRH METODY PREDIKCE SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	54
5.1	Sběr dat.....	54
5.1.1	Konfigurace stroje.....	55
5.1.2	CAD model	57
5.1.3	Technologie.....	57
5.2	Zpracování a analýza dat.....	57
5.2.1	Analýza subsystémů obráběcího stroje	58

5.2.2	Analýza pasivních komponent	58
5.2.3	Analýza potřebné technologie.....	59
5.2.4	Analýza řezných podmínek.....	60
5.2.5	Zpracování CAD modelu	60
5.3	Příprava simulačního modelu.....	62
5.3.1	Příprava matematického modelu.....	62
5.3.2	Překlad G-kódu	62
5.3.3	Částečná časová parametrizace G-kódu.....	62
5.3.4	Kompletní časová parametrizace G-kódu	63
5.3.5	Příprava fyzikálního modelu v MSC Adams	64
5.4	Simulace	65
6	OVĚŘOVACÍ EXPERIMENTY	68
6.1	Verifikační experiment na lineárním měřicím standu.....	68
6.1.1	Popis měřicího standu	68
6.1.2	Určování spotřeby elektrické energie lineárního měřicího standu.....	69
6.2	Validační experiment na stroji MCV 750 Quick	81
6.2.1	Určování spotřeby elektrické energie stroje MCV 754 Quick.....	82
7	STANOVENÍ HRANIC POUŽITELNOSTI METODY	104
7.1	Požadavky na analyzovaný objekt	104
7.2	Požadavky na dráhu nástroje.....	105
7.3	Požadavky na měřicí aparaturu	106
7.4	Požadavky na software.....	106
7.5	Požadavky na datové vstupy	107
7.6	Požadavky na aplikaci metody již ve fázi vývoje stroje	107
8	ZÁVĚR.....	108
8.1	Shrnutí dosažených výsledků	109
8.2	Teoretický přínos práce.....	109
8.3	Praktický přínos práce	109
8.4	Pedagogický přínos práce	110
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	111
10	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	120
11	SEZNAM TABULEK	122
12	SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ	123

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. Tyto dopady můžeme následovně kategorizovat [28]:

Lokální dopady (hluk, zápach, znečištění ovzduší, znečištění půdy a podzemní vody)

Regionální dopady (přehnojení a znečištění půdy a vody, vysušování, produkce odpadu, znečištění vzduchu)

Fluviální (znečištění řek, regionálních toků a povodí)

Kontinentální (acidifikace dešťů, zvýšený smog v zimním období, těžké kovy)

Globální (změna klimatu, zvýšení hladiny moří, ztenčení ozonové vrstvy)

V e chvíli, kdy začalo být znečištění znatelné, přišlo společenství národů s myšlenkou tzv. Kjótského protokolu. Kjótský protokol [29] je protokol k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách. Průmyslové země se v něm zavázaly snížit emise skleníkových plynů o 5,2 %. Za skleníkové plyny jsou považovány plyny, které se vyskytují v atmosféře Země a absorbují dlouhovlnné infračervené záření, což má za následek ohřívání spodní vrstvy atmosféry a zemského povrchu. Snížení emisí požadované Kjótským protokolem se vztahuje na šest plynů a jejich agregované průměrné emise (v jednotkách tzv. uhlíkového ekvivalentu) za pětileté období 2008–2012. Kromě oxidu uhličitého (CO_2), metanu (CH_4) a oxidu dusného (N_2O), jejichž emise budou porovnávány k roku 1990, se závazek týká hydrogenovaných fluorovodíků (HFCs), polyfluorovodíků (PFCs) a fluoridu sírového (SF_6), jejichž emise mohou být porovnávány buď s rokem 1990, nebo s rokem 1995.

Jako reakce na Kjótský protokol vznikl v EU v roce 2006 tzv. Akční plán pro energetickou účinnost. Na základě dat, která udávají, že Evropa v důsledku špatného hospodaření s energiemi vyplývá nejméně 20 % své energie.

Tento akční plán předkládá rámec politik a opatření, jež mají do roku 2020 posílit proces využití možností více než 20 % odhadovaných úspor v roční spotřebě primární energie v EU. Uvádí soubor opatření k dosažení efektivnosti nákladů a navrhuje, aby nejdůležitější opatření byla zahájena okamžitě a ostatní postupně v průběhu šestiletého období účinnosti plánu. Plné využití možností do roku 2020 si následně vyžádá další opatření. Smyslem plánu je mobilizace široké veřejnosti i politických činitelů na všech úrovních státní správy, jakož i mobilizace účastníků a přeměna vnitřního trhu s energií tak, aby občané EU mohli využívat infrastrukturu, budovy, spotřebiče, postupy, dopravní prostředky a energetické systémy, které jsou v celosvětovém měřítku energeticky nejúčinnější. Vzhledem k důležitosti lidského faktoru v procesu snižování spotřeby energie tento akční plán zároveň nabádá občany, aby využívali energii tím nejracionálnějším možným způsobem. Energetická účinnost se týká dobře informovaného jedince, a nikoliv pouze právních předpisů.

Naplnění využití 20% potenciálu v roce 2020, které se rovná přibližně 390 Mtoe (tonne of oil equivalent (toe)), bude značným energetickým a ekologickým přínosem. Součástí základního scénáře je snížení produkce emisí CO₂ o 780 Mt CO₂, což představuje více než dvojnásobné snížení, které po EU bylo do roku 2012 požadováno Kjótským protokolem. Investiční výdaje na úspornější a modernější technologie nahradí více než 100 miliard EUR úspor u pohonných látek ročně. (1 MWh = 0.086 toe (tj. 1 toe = 11630.0 KWh))

Uvedené dokumenty dokládají celosvětovou snahu snížit emise škodlivých látek do životního prostředí tak, aby nedocházelo k další soustavné devastaci planety ve snaze o co největší technologický rozvoj. Působení těchto dokumentů je poté následně na lokální úrovni podepřeno dalšími nařízeními podmiňujícími například uvedení určitého produktu na trh. Na jednu stranu je to způsob, jakým lze snížit dopady technologického rozvoje. Na stranu druhou je to ochrana výrobců energetických spotřebičů tak, aby byla zachována jejich konkurenceschopnost vzhledem k výrobcům ze zemí, kde nejsou legislativní požadavky na jejich produkty tak striktní a tudíž jsou schopni obdobné, méně energeticky úsporné produkty vyrábět s nižšími náklady.

V případě obráběcích strojů zatím neexistuje direktiva, která by regulovala přímo obráběcí stroje a jejich vliv na životní prostředí. K dispozici je pouze přijatá direktiva EU stanovující požadavky na ekodesign elektromotorů [86]. Další legislativní podklad, který se obráběcích strojů týká omezenou mírou, je nařízení evropské komise, týkající se stanovení požadavků na ekodesign směrových světelných zdrojů [88] a zářivek [87]. 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 [89], kde je zmíněn významný dopad na životní prostředí vysokou spotřebou energie (>1000 PJ/rok) a významný potenciál ke zlepšení. Po několikaleté neaktivitě Evropské komise v této oblasti, se ekodesignem obráběcích strojů zabývá až pracovní plán pro období 2016-2019 [90]. Zde se předpokládají úspory primární energie v roce 2030 až 9 TWh/rok, což je podloženo dobrovolnou dohodou o obráběcích strojích mezi Evropskou komisí a průmyslem. Uvedená hodnota potenciálních úspor byla sestavena na Konzultačním fóru v roce 2014 [91] na základě studií samoregulační iniciativy CECIMO.

V případě výroby a vývoje obráběcích strojů je nutné taktéž přihlížet 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. Přičemž je na zvážení výrobců těchto strojů, zda budou po tomto srovnání stroj upravovat tak, aby se choval jako menší spotřebitel energií. Což s sebou přináší další náklady na vývoj a výrobu prototypu, včetně vynaložené energie, která se v konečném důsledku projeví jako uhlíková stopa, na jejíž redukci se vynakládají nemalé prostředky. Z toho důvodu 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 [23]. Dokladem je množství publikovaných vědeckých studií zabývajících se danou problematikou. V celkovém úhrnu spotřeby elektrické energie v průmyslu patří 75% spotřebě elektrické energie třískovým obráběním [32]. Tímto setřískové obrábění taktéž významně podílí na tvorbě škodlivých emisí do životního prostředí [33], [34]. Obráběcí stroje tvoří dominantní podíl na celkovém úhrnu spotřeby elektrické energie třískovým obráběním a jsou tak významným činitelem při působení na životní prostředí [11].

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 [26], [27]. Tato norma navazuje na dříve vydanou směrnici evropské komise o ekodesignu energetických spotřebičů [35], která se nevztahuje přímo na obráběcí stroje, ale nastavuje rámec problematiky stanovení indexů energetických spotřebičů, které je pak možné rozčlenit do energetických tříd. Rostoucí energetická spotřeba a v dlouhodobém trendu vzrůstající ceny za energii mají za důsledek potřebu zvyšování energetické účinnosti a tvorbu návrhu strojů s nízkou spotřebou. Tím jsou jak akademická sféra tak průmysl nuceni zabývat se problematikou energetické účinnosti obráběcích strojů a samotného výrobního procesu [36], [37], [38]. Dříve nebylo věnováno přílišné pozornosti právě energetické spotřebě obráběcích strojů ve srovnání se spotřebou energie na tavení rudy, odlévání kovů a hutním zpracování. 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 [39], [40] při návrzích optimalizací obráběcích strojů [41], [42]. 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 [43], [44], [45], [46]. 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. Existuje pak několik přístupů ke kvantifikaci energetické účinnosti obráběcích strojů.

2.1 Energetická účinnost obráběcích strojů

V této části jsou uvedeny některé metody a strategie, které byly stanoveny a aplikovány na vědecko-výzkumných pracovištích ve světě i u nás. Vycházím zejména z aspektů týkajících se samotné konstrukce obráběcích strojů a jejich provozování.

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 [47].

2.1.1 Termodynamický přístup

Dalším základním přístupem ke kvantifikaci energetické účinnosti je přístup termodynamický, kde jde o poměr mezi vstupní a výstupní energií (1) pro stanovení úrovně konverze energie [48]. Podstata termodynamického přístupu spočívá v dosazení hodnoty uvedené v rovnici jako užitečná práce. Jedním z nich je výpočet entalpické účinnosti pomocí poměru užitečných výstupů a všech energetických vstupů. Ve studii [48] je uvedeno několik přístupů získání indikátorů, které jsou čistě termodynamické, mechanicko-termodynamické, ekonomicko-termodynamické a čistě ekonomické. Rozdíl spočívá v jednotkách, které se pro výpočet účinnosti využívají.

$$\eta = \frac{\text{užitečná práce}}{\text{celková spotřebovaná energie}} \quad (1)$$

V oboru obrábění je energetická účinnost z pohledu termodynamiky často užívána jako poměr výstupu (produktu) a celkového vstupu energie [49]. U obráběcích strojů má vliv na jeho energetickou účinnost jeho vnitřní konfigurace i nastavené technologické podmínky. Vnitřní konfigurace stroje má dopad na energetickou účinnost především v podobě energetických ztrát v podobě elektrické ztráty na pohonech, mechanické ztráty, ztráty hydraulické soustavy a pod. [24]

Ztráty v pohonech jsou především charakterizovány jako ztráty v železe, ztráty třením, ztráty ve vinutí a ztráty vzniklé bludnými proudy (které bývají závislé na odporu a proudu v motoru). Mechanické ztráty zahrnující, coulombovské a viskózní tření, bývají především vztaženy k navzájem se pohybujícím se částem stroje. To dále závisí na rychlostech, koeficientu útlumu, tuhosti a mazání. Hydraulické ztráty zahrnují především objemovou ztrátu mazacích kapalin vlivem netěsnosti systému a jsou závislé na konstrukci čerpadla, průřezu hadice a vlastnostech oleje.

Samotný proces třískového obrábění má vliv na účinnost v závislosti na nastavení jednotlivých technologických operací. Vzhledem ke komplexnosti funkcí obráběcího stroje je definice energetické účinnosti těžko stanovitelná, a proto je na některé celkové hodnotící ukazatele pro energetickou účinnost obráběcích strojů nutné nahlížet nejen z pohledu energetického vstupu a výstupu. Z toho důvodu publikoval S. Thiede v [50] definice na základě odběru elektrické energie v závislosti na počtu vyprodukovaných obrobků uvedenou v rovnici (2).

$$\eta_{\text{energie}} = \frac{\text{vyprodukované obrobky}}{\text{odebraná elektrická energie} \cdot \text{čas}} \quad (2)$$

Zde ovšem nelze hovořit o energetické účinnosti dle fyzikální definice, protože jednotka není bezrozměrná. V tomto případě je uvažován koeficient vyjadřující závislost mezi obrobkem a spotřebovanou energií.

2.1.2 Okamžitá a procesní energetická účinnost

Třetí, možným způsobem kvantifikace energetické účinnosti [51] je rozdělení na okamžitou energetickou účinnost a procesní energetickou účinnost. Okamžitá energetická účinnost stroje $\eta_{\text{energy}}(t)$ je poměr výkonu nutného pro odběr materiálu $P_{\text{cut}}(t)$ a příkonu obráběcího stroje $P(t)$ (3). Procesní energetická účinnost η_{energy} je vyjádřena jako poměr užitečné energie a energie spotřebované strojem v daném čase T v integračním tvaru (4).

$$\eta_{energy}(t) = \frac{P_{cut}(t)}{P(t)} \quad (3)$$

$$\eta_{energy} = \frac{E_{cut}}{E} = \frac{\int_0^T P_{cut}(t)dt}{\int_0^T P(t)dt} \quad (4)$$

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.

$$SEC = \frac{E}{V_{material}} \quad (5)$$

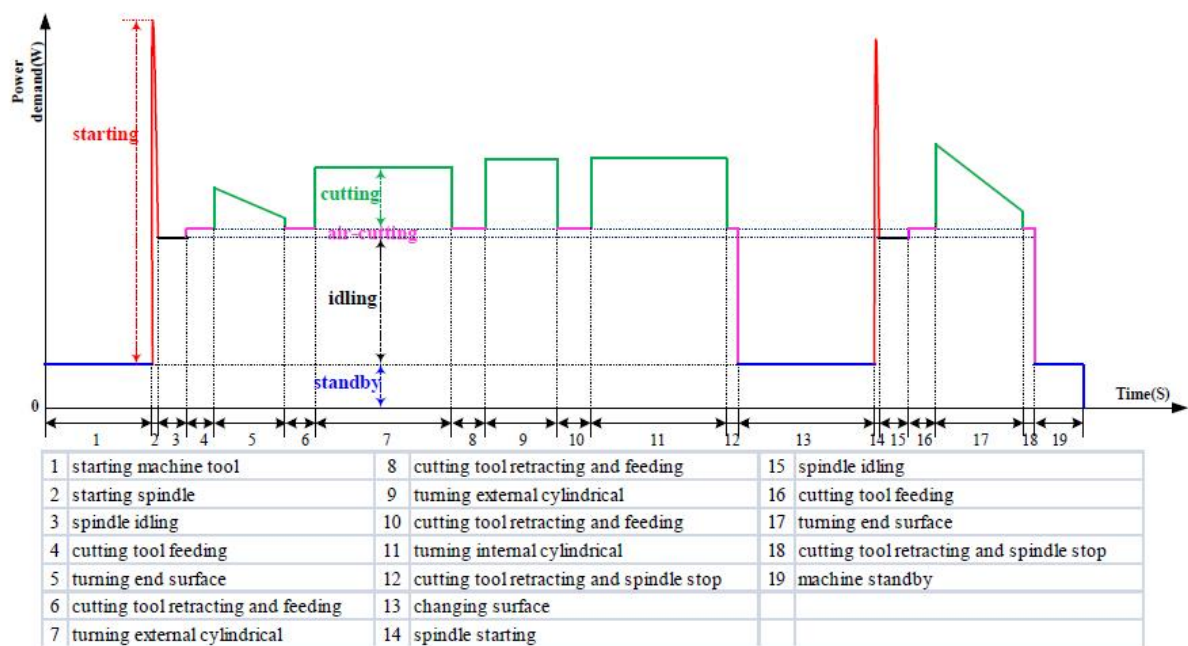
$$SEC = \frac{P \cdot T}{MRR \cdot T} = \frac{P}{MRR} \quad (6)$$

$$SEC = \frac{F}{a_e \cdot h} \quad (7)$$

Kde $V_{material}$ představuje celkový objem odstraněného materiálu, T je celkový čas řezného procesu, MRR (material removal rate) značí objem nebo hmotnost odstraněného materiálu za jednotku času, F je řezná síla, a_e představuje hloubku řezu, h je tloušťka třísky. Rovnice (5), (6) a (7) slouží především k vyjádření a kvantifikaci energetické spotřeby stroje během obrábění. Problémem tohoto přístupu je charakteristika stroje při nevýrobních situacích, například, když se vřeteno otáčí naprázdno a nedochází k žádnému odběru materiálu [52]. Nicméně použití SEC je vhodné pro vyjádření energetické účinnosti během obrábění a umožňuje detailně sledovat distribuci energie během technologického procesu.

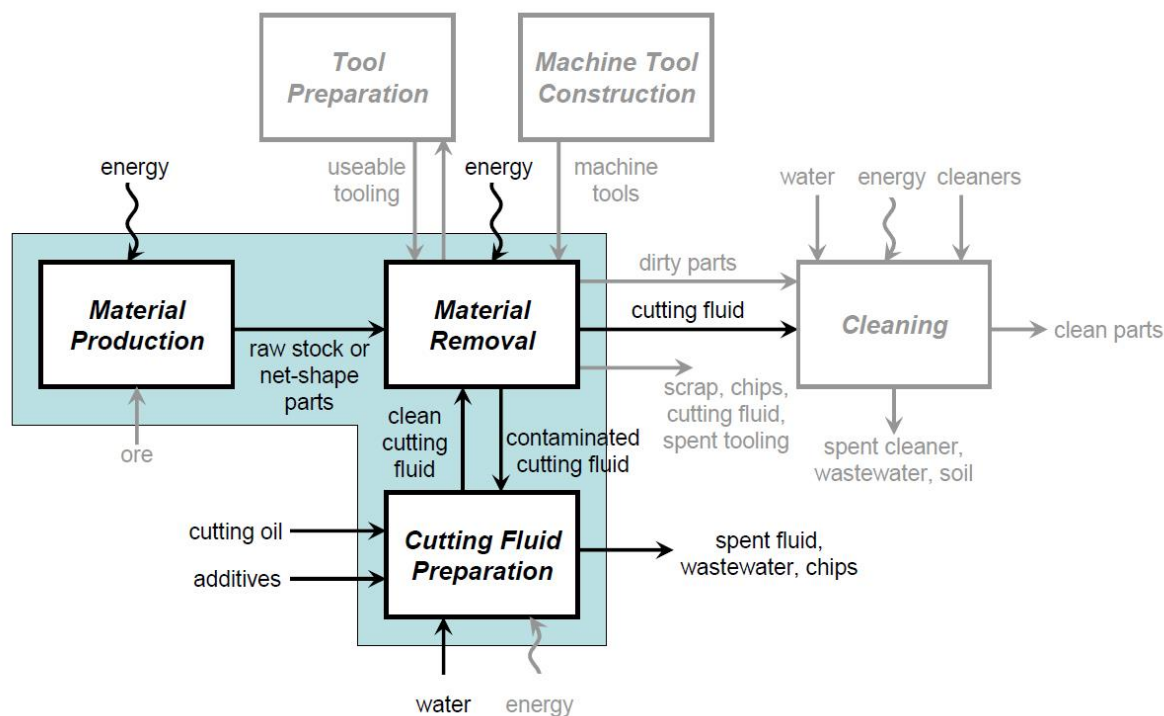
2.1.3 Elementární kroky spotřeby elektrické energie

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 [25], [18]. Tímto lze získat komplexní pohled na technologický cyklus skládající se z dílčích ECS, tedy z jednotlivých segmentů charakterizujících danou technologickou operaci. Nedílnou součástí je vytvoření rozsáhlé databáze, jejíž prvky charakterizují stroj během různých provozních režimů a při různých parametrech. Databázi je nutné získat z měření spotřeby elektrické energie stroje během technologického cyklu.



Obr. 1 Rozdělení technologického cyklu na ECS [25]

Na systémové řešení spotřeby elektrické energie obráběcího stroje je taktéž možné přistoupit z kvalitativního úhlu pohledu. Zde je možné zahrnout kromě samotného řezného procesu také proces přípravy materiálu a přípravy řezné kapaliny [6]. Metoda spočívá nejprve ve stanovení limitů systému a následné kvalitativní analýze jejich dílčích kroků. Pro ostatní prvky systému se vychází pouze z hrubého odhadu. Výpočet energetické náročnosti řezného procesu probíhá na základě měrné řezné energie (Ws/m^3). Energie potřebná na produkci materiálu polotovaru se počítá na základě měrné spotřeby (MJ/Kg), atd. Tímto systémovým přístupem lze získat komplexní pohled na energetický profil obráběcího stroje.

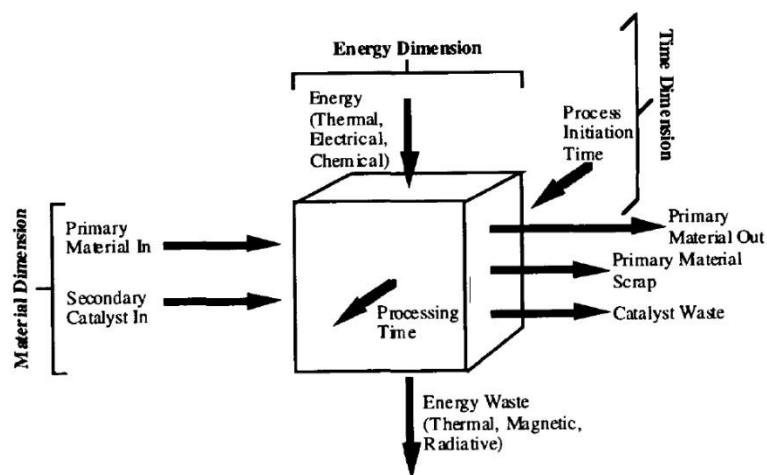


Obr. 2 Hranice systému technologického procesu obrábění [6]

Dalším možným přístupem je shrnutí energetických požadavků na obrábění komplexně pro širokou škálu obráběcích a dalších výrobních strojů [10]. To spočívá ve stanovení rámce výstupní energie, zahrnující jak odpadní energii (např. teplo), tak energii v podobě přidané hodnoty daného produktu, která byla nutná pro přetvoření polotovaru na hotový výrobek. Výsledkem jsou specifické požadavky na elektrickou energii výrobního procesu, které nemívají konstantní průběh, jak udávají jiné analýzy životního cyklu výrobních strojů. Z toho vyplývající trend lze charakterizovat jako energeticky intenzivní proces se zvyšující se tendencí, tedy zkracování výrobních časů, přičemž hodnoty aktuálně spotřebované energie jsou menší. Se zvyšující se účinností tohoto procesu lze dosáhnout vyšší účinnosti zvýšením energetických nároků na produkci, ale zkrácení nutného výrobního času.

2.2 Kvantifikace dopadů na životní prostředí u obráběcích strojů

Jedním z přístupů pro kvantifikaci dopadů provozu obráběcího stroje na životní prostředí je předpověď emisí vznikajících jako důsledek provozu stroje [19][8]. Tím se rozumí vytvoření AHP analýzy (analytic hierarchy proces) pro posouzení tzv. odpadních toků ze stroje. Tím můžou být rezidua podpurných látek při obrábění, jako například řezná emulze, olej atd.



Obr. 3 Hranice analýzy dopadů na životní prostředí během obrábění [19]

Tyto jednotlivé odpadní toky mají stanovenou prioritu na základě AHP a je jim přiřazena matice faktorů pro odpadní toky. Dále je pro daný typ obrábění přiřazena specifická energie nutná pro odebrání jednotky materiálu, čímž jsou dány do souvislosti různé faktory týkající se obrábění jako například počáteční množství řezné kapaliny, dodávané množství řezné kapaliny, ředění řezné kapaliny, interval výměny řezné kapaliny, úniky maziva a další dle [20].

2.3 Problematika konstrukce a optimalizace energeticky účinných obráběcích strojů

Přístupů pro dosažení energeticky úsporných obráběcích strojů je mnoho, stejně tak jako přístupů pro porovnání a kvantifikaci energetických ztrát u stroje. 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 [53][54]. Norma [27] zaměřená na energeticky efektivní obráběcí stroje by měla být právě využita v momentu, kdy je stroj teprve konstruován. Tento standard zahrnuje spotřebu energie ve fázi získávání surovin pro výrobu stroje a ve fázi, kdy je stroj používán k účelu, k jakému byl sestaven a vyroben, což poukazuje na optimalizaci energetické účinnosti již v rané fázi životního cyklu stroje [55]. Lehká stavba a výběr energeticky úsporných komponent jsou pak běžnými postupy pro tvorbu energeticky úsporných obráběcích strojů [56]. Perspektiva lehkých staveb obráběcích strojů, pak může být dosažení co největšího LF (lightweight factor), tedy poměru modulu pružnosti E a hustoty ρ , nebo poměru tuhosti c a hmotnosti m (8).

$$LF = \frac{E}{\rho} = \frac{c}{m} \quad (8)$$

Pro zvyšování LF je pak možné snížit hmotnost při zachování tuhosti, nebo zvýšit tuhost při zachování hmotnosti. Přírozenou vlastností hmotných těles je jejich hmotnost,

projevující se gravitační silou a momentem setrvačnosti. Snížením těchto složek logicky dojde při zrychleném pohybu k redukci síly, nebo krouticího momentu pohonu. K tvorbě lehkých staveb obráběcích strojů je pak možné použít různých strategií, jako například topologická optimalizace [58], optimalizace výběru materiálu [59] a elektricko-mechanická integrace modulárních komponent [57] pro redukci redundantních hmot. Pro různé typy obráběcích strojů je vhodná jiná strategie dosažení lehké stavby. Volba energeticky úsporných komponent je také jedno ze strategií pro dosažení úsporného obráběcího stroje, jako například frekvenčně řízené pohony čerpadel hydraulických obvodů [60].

2.4 Zvyšování energetické účinnosti strojů řízením technologických procesů

Strategie pro zlepšování energetického profilu obráběcího stroje pomocí LF, s použitím nových materiálů a nových technologií může zahrnovat úpravu výrobních podmínek a investice do nových technologií zpracování surovin [12]. Z toho důvodu obvykle firmy přistupují k využití stávající technologie s tím, že se efektivněji využije potenciál, který již provozovaná technologie nabízí [3][61]. Energetická účinnost může být zlepšena prostřednictvím optimalizace výroby na obráběcím stroji snižováním nevýrobních časů, vhodné aktivaci dílčích subsystémů a snižování jalového výkonu stroje [62]. Problematiku efektivního plánování výroby je nutné vnímat jako komplexní proces s mnoha vstupy, protože mimo spotřebu energie je nutno brát v potaz i kvalitu, cenu, čas a další požadavky, které je nutné dodržet. To může být vyjádřeno jako například rovnicí (9) [63].

$$\begin{aligned} \min E_{system} = & \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n PE(j_i, k) + \sum_{k=1}^m WE_k + \sum_{k=1}^m TE(k-1, k) \\ & + \sum_{k=1}^m AE_k + CE \end{aligned} \quad (9)$$

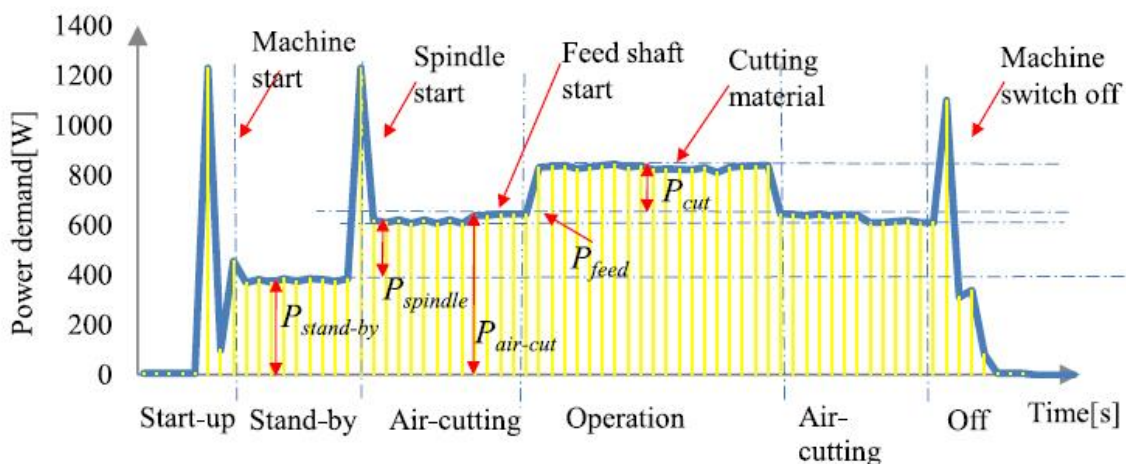
Kde n představuje počet výrobku, m představuje počet strojů, $PE(j_i, k)$ představuje spotřebu energie na výrobu i -tého výrobku na k -tém obráběcím stroji, WE_k je spotřeba energie ve stand-by režimu k -tého stroje, $TE(k-1, k)$ představuje spotřebu energie na transport obrobku z $k-1$ -ho stroje na k -tý stroj, AE_k je spotřeba energie nutné k adaptaci k -tého stroje pro výrobu (např. výměna nástroje), CE je spotřeba energie dalších přídavných zařízení. Po vyplnění všech vstupních parametrů v modelu je možné problematiku dále řešit pomocí dalších optimalizačních matematických nástrojů [64], například optimalizací mravenčí kolonie [68], genetickým algoritmem [65], metodou tabu search, simulovaným žíháním [67], hierarchickým plánováním [66] založeným na Petriho sítích, dekompozičním stromem atd. Následně je uvedeno několik strategií pro dosažení větší energetické účinnosti výrobního procesu:

- 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. To je provedeno tak, aby byl možný rychlý nástup pracovního úkonu. Tímto lze docílit okolo 10% až 15% úspory energie. Řízením tohoto procesu lze dosáhnout větších úspor. Zde je potřeba brát v potaz průměrný čas dodávky obrobku do stroje, výrobní šarži obrobku a zda je spotřeba start-stop cyklu nižší než spotřeba stroje v pohotovostním režimu, protože při použití stand-by módu se bude prodlužovat čas na zpracování obrobku i stabilita obráběcího stroje [69].

- 2) **Optimalizace sekvence technologického procesu:** důležitý vliv na energetickou spotřebu má i posloupnost jednotlivých technologických operací [70]. Maximální kapacita výrobní linky závisí především na úzkých místech v technologických procesech. Tyto úzká místa (bottleneck) způsobují zbytečné prostoje a nárůst nevýrobních časů, tím pádem i nárůst spotřeby strojů ve stand-by módu. 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, přičemž spotřeba způsobena samotným řezným procesem může být ve srovnání daleko menší. Tomu je možné zamezit výběrem vhodného stroje a nikoliv nepřiměřeného zařízení vhodného pro obrábění při daleko náročnějších řezných podmínkách. Ve studii [10] je proveden experiment s obrobením daného materiálu na různých typech obráběcích strojů, který potvrzuje tuto strategii.
- 4) Další možné **optimalizace použití obráběcích strojů:** snížení nevýrobních časů je možné docílit například spřažením rozběhu vřetene během vysokorychlostního obrábění a polohování obrobku [71]. Synchronizací je zamezeno čekání na rozběh vřetene na vysoké otáčky. Jiné studie poukazují na možnost rekuperace kinetické energie vřetene při brzdění zpět na elektrickou. Optimalizací dráhy nástroje lze taktéž docílit nemalých energetických úspor [72]. Další možnou optimalizací technologického procesu může být plynulá změna a adaptivita mazacích podmínek během obrábění, což přináší možnost snížit odběr čerpadel řezného média a zlepšit opotřebení nástrojů [73].

2.5 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. Energetická spotřeba obráběcích strojů je převážně ve formě spotřebované elektrické energie. Spotřebovaná elektrická energie je pak definována násobením výkonu a času, respektive plocha pod výkonovou křivkou v souvislosti časem udává množství spotřebované elektrické energie. Jednotlivé technologické operace se pak projevují podle určitých zákonitostí, které je nutno analyzovat. Na Obr. 4 je znázorněný a popsán průběh výkonu u obráběcího stroje během procesu frézování. Pro dopočítání spotřeby elektrické energie je potřeba tuto křivku integrovat podle času, nebo zjednodušeně rozdělit na jednotlivé segmenty popisující danou výrobní nebo nevýrobní technologickou operaci. Záleží na zvolené strategii a potřebách daného výzkumu, zda je nutné do modelu zahrnovat všechny subsystemy podílející se na energetickém profilu stroje, nebo zda je možné některé zanedbat [16]. Pro kalkulaci celkové spotřeby a modelování spotřeby samotné může být použito různých přístupů. 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.



Obr. 4 Výkonový profil frézování na obráběcím stroji [24]

2.5.1 Model založený na lineární závislosti MRR a SEC

Byl vytvořen zjednodušený pohled na vstupní a výstupní energetické a materiálové toky ve výrobním procesu založený na konceptu termodynamiky[10][74]. Zde byla nastíněna souvislost mezi energetickou spotřebou a MRR ve výrobním procesu. Výpočet SEC pak byl sestaven následovně (10) a (11):

$$P = P_0 + k \cdot MRR \quad (10)$$

$$SEC = \frac{P_0}{MRR} + k \quad (11)$$

Kde P představuje vstupní výkon a P_0 představuje výkon naprázdno, $k \cdot MRR$ reprezentuje řezný výkon. P_0 je závislé na charakteristice samotného obráběcího stroje, přičemž k je konstantní v jednotkách kJ/cm^3 , úzce související s obrobkem a nástrojem. Studie se nezaměřuje na případ, kdy se faktory ovlivňující k změni.

Podobný empirický model založený na studii [75] předkládá souvislost mezi výkonem a MRR. Souvislost mezi těmito veličinami byla uvedena jako nepřímá úměra (12). Model byl ověřen u soustruhu a frézky a přesnost predikce může dosahovat v průměru 94%.

$$SEC = C_0 + \frac{C_1}{MRR} \quad (12)$$

Kde C_0 a C_1 představují specifický koeficient obráběcího stroje. V této studii je znázorněno, že koeficient C_1 získaný experimentálně není stejný jako P_0 , protože spotřeba vřetene a spotřeba způsobená třením jsou závislé na procesních parametrech při běhu naprázdno. V této studii je také provedeno srovnání mezi obráběním na sucho a obráběním s mazáním řezného procesu, přičemž mazání řezného procesu má velký vliv právě na koeficient C_1 .

Vylepšením této metody zahrnující výpočet SEC [76] byl zahrnut vliv otáček vřetene při běhu naprázdno.

$$P_0 = P_{standby} + P_{spindle} = P_{standby} + k_1 n + b \quad (13)$$

$$P = P_{standby} + k_1 n + b + k_0 MRR \quad (14)$$

$$SEC = \frac{P}{MRR} = k_0 + k_1 \frac{n}{MRR} + k_2 \frac{1}{MRR} \quad (15)$$

$$k_2 = P_{standby} + b \quad (16)$$

Kde je P_0 dekomponováno na výkon ve stand-by režimu $P_{standby}$ a na výkon vřetene $P_{spindle}$, což je funkce otáček vřetene n . Konstanta b představuje ztrátu hlavního pohonu zapříčiněnou ztrátami na motoru a převodovém mechanismu. $k_0 MRR$ reprezentuje výkon nutný pro odběr materiálu, k_0 a k_1 jsou experimentální koeficienty. Model nezahrnuje výkon pohonných mechanismů, protože představují malý zlomek z celkového úhrnu spotřeby. V tomto modelu predikce bylo dosaženo průměrné přesnosti 95% při frézování.

Podobný model byl uveden ve studii [77]. Rozdíl spočíval ve významu použitých koeficientů. Zde byl koeficient b použit jako energie ve stabilním stavu a koeficient k měl jednotku v kW. Koeficienty byly ale bez bližší specifikace. V této studii byla získána závislost mezi SEC a MRR kontinuální změnou hloubky řezu a pracovního posuvu. Výsledkem byl poznatek vyjadřující rostoucí výkon v závislosti na rostoucí MRR, ale při nižší spotřebě energie díky zkrácení strojního času.

$$SEC = k \cdot \frac{1}{MRR} + b \quad (17)$$

Uvedené studie a modely mají široké spektrum využití a jsou verifikovány pokusy na různých typech obráběcích strojů. Korelační koeficienty v modelech můžou být snadno experimentálně zjištěny a numericky zpracovány. Problémem je ale právě nejednoznačná definice těchto koeficientů, které silně ovlivňují celkový výsledek a přesnost modelu. Lineární model znamená, že při zachování MRR bude zachována i SEC, ale pokud je MRR funkcí řezné rychlosti, posuvové rychlosti a hloubky řezu, tak to nemusí být správné východisko. Ve studii [78] je provedeno měření spotřeby energie při stejném MRR, ale různých řezných parametrech, přičemž výsledkem je rozdílná spotřeba energie.

2.5.2 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 spotřeby založený na teorii plastické deformace kovu, vychází z předpokladu, že spotřeba energie během řezného procesu odpovídá výpočtu řezné síly a vektoru MRR [79][80]. Studie založené na tomto principu předpokládají, že energie řezného procesu je úzce závislá na míře a druhu použitého maziva [19], vlastnostech materiálu obrobku a množství odebraného materiálu. Matematicky lze tuto závislost vyjádřit rovnicí (17).

$$E_{cut} = \left(\frac{\cos(\beta - \alpha) \cos \eta_s \cos \lambda + \cos(\varphi + \beta - \gamma) \sin \eta_s \sin \lambda}{\cos(\varphi + \beta - \gamma)} \right) \times \frac{\tau \cdot V_{material}}{\sin \varphi \cos \lambda} \quad (18)$$

Kde je β úhel normály třecí síly, γ je úhel břitu nástroje, η_s představuje úhel stříhu, φ je úhel roviny stříhu, τ je úhel napětového toku v obrobku. Přesnost tohoto modelu není nijak závratná, z důvodu staršího data studie a absence moderních metod pro výpočet. Energetický model procesu byl dále rozvíjen ve studii [81], kde byla spotřeba energie vyjádřena jako funkce objemu a materiálových vlastností. Studie dělí energii řezného procesu na tři části, specifickou energii plastické deformace v primární zóně stříhu E_p , specifickou energii

plastické deformace v sekundární zóně stříhu E_S a energii vztaženou k jednotce objemu spotřebovanou pro oddělení části materiálu z matrice E_D . Tento model byl verifikován při obrábění Al_2O_3 .

$$E_{cut} = E_P + E_S + E_D \quad (19)$$

$$E_P = \frac{G}{e+1} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\cos \gamma}{\sin \phi \cos(\phi - \gamma)} \right]^{n+1} \quad (20)$$

$$E_S = (F_\mu h^\alpha / a_e h) \quad (21)$$

$$\frac{dU}{da} = \left[\frac{1 - \nu^2}{Y} \right] \pi \sigma^2 w_1 w_2 \quad (22)$$

Kde G je specifické napětí v zóně stříhu, e je deformační zpevnění, ϕ je úhel roviny stříhu v primární zóně, F_μ je třecí síla třísky, h je tloušťka třísky, h^α je koeficient tloušťky třísky, a_e představuje hloubku řezu, dU je energie deformace, ν je Poissonova konstanta, Y Youngův modul, w_1 délka trhliny v materiálu, w_2 je šířka trhliny v materiálu a σ je napětí v místě lomu materiálu.

Dále se studie zabývají množstvím spotřebované energie vlivem opotřebení nástroje. Logicky vyplývá souvislost mezi mírou spotřebované energie a kondicí nástroje, přičemž na základě studií [82] je tato závislost lineární. V mnohých studiích je problematika modelování energetického profilu řezného procesu převážně zaměřena na nástroj nový s neopotřebovaným ostřím.

V těchto studiích [9] je preferována tangenciální složka řezné síly, která slouží jako podklad pro výpočet SEC [52]. V této studii je zdůrazněn poznatek, že SEC je funkcí účinnosti obráběcího stroje, přičemž účinnost je funkcí tangenciální složky řezné síly a dalších procesních parametrů. SEC byl stanovený na základě metody RSM (Response Surface Methodology) pro vertikální frézku. Výsledkem je stanovení výpočtového modelu pro SEC (22).

$$SEC = \frac{P_{cut}}{60\eta MRR} \quad (23)$$

$$\eta = f(n, M_t, v_f, F_{feed}) = f(v_c, D, F_t) \quad (24)$$

Kde M_t je krouticí moment vřetene při frézování, F_{feed} je posuvová síla. Pokud je průměr nástroje D určitý, potom je n funkcí řezné síly v_c . Účinnost η může být řešena polynommickou aproximací druhého řádu, která interaguje s nezávislými proměnnými, jako například přirozené logaritmy pracovních parametrů obráběcího stroje.

2.5.3 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 mohou být detailně rozebrány. Jedním ze způsobů je překlad NC kódu na technologické parametry [83]. Výpočetní model pro spotřebu energie je pak možné vyjádřit rovnicí (25).

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P_{aY} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{SY} dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{dY} dt + \int_{t_0}^{t_3} P_{run} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{cut} dt \quad (25)$$

Kde P_{aY} , P_{SY} a P_{dY}

Reprezentují výkon posuvové osy Y během zrychlení, zpomalení a rovnoměrné rychlosti. P_{run} a P_{cut} představují výkon vřetene během chodu naprázdno a při obrábění. t_0t_1 , t_1t_2 , t_2t_3 a t_0t_3 jsou časovými intervaly připadajícími pro danou operaci.

Jiná studie publikována Liu [84] stanovuje model výkonu hlavního pohonného systému s ohledem na mechanickou a elektrickou část hlavního pohonného systému. Zjednodušený integrální model leza vyjádřit rovnicí (26).

$$E = \int_0^{t_1} P_{in}(t)dt + P_0t_2 + (P_0t_3 + \int_0^{t_3} P_\alpha[P_{cut}(t)] dt + \int_0^{t_3} P_{cut}(t)dt \quad (26)$$

$$P_\alpha = \alpha_1 P_{cut}(t) + \alpha_2 P_{cut}(t)^2 \quad (27)$$

Kde t_1 , t_2 a t_3 odpovídají startu cyklu, chodu naprázdno a obráběcímu procesu. $P_{in}(t)$ je vstupní výkon pro hlavní pohonný systém, P_α je funkcí P_{cut} reprezentující ztráty výkonu způsobené mechanickým a elektrickým zatížením (27), které je možné získat kvadratickou funkcí (26). α_1 a α_2 jsou další ztrátové koeficienty a mohou být získány numericky.

Dalším možným přístupem je východisko z předpokladu, že každý funkční modul – subsystém obráběcího stroje je reprezentován jedním základním akčním elementem [85]. Podle tohoto předpokladu je možné vypočítat energetickou spotřebu sloučením dílčích akčních členů, které jsou definovány svým výkonem.

$$P = P_{SO} + P_L + P_{CC} + P_{CFS} + P_{sp} + (P_X + P_Y + P_Z) + P_{TS} + P_{TC} + P_{cut} \quad (28)$$

$$P_{cut} = (1 + \alpha)F_{vc} \quad (29)$$

Kde P_{SO} , P_{CFS} , P_{CC} a P_L reprezentují základní moduly jako výkon napájení, výkon chlazení, výkon dopravníku třísek a výkon osvětlení. P_{sp} , P_X , P_Y a P_Z jsou výkony vřetene a posuvových os X, Y a Z. P_{TS} a P_{TC} reprezentují výkon zásobníku a výměníku nástrojů. F_{vc} je řezná síla, která bývá dávana do souvislosti s koeficientem α , který představuje přídavný ztrátový koeficient. U tohoto typu modelu je výsledek silně závislý na ztrátovém koeficientu, který je nutné získat množstvím experimentálně zjištěných dat, což vyžaduje značnou databázi popisující chování jednotlivých strojů během technologického procesu.

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 využití postupy pro dosažení výsledku, který se očekává od navrhovaného postupu predikce spotřeby elektrické energie obráběcího stroje ve fázi vývoje.

4.1 Způsob měření spotřeby elektrické energie na obráběcích strojích [4]

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 [92]. Pro stanovení postupu měření na pohonech stroje je proto nezbytné celou problematiku teoreticky popsat.

4.1.1 Fundamentální teoretická východiska

Každý elektrický spotřebič při napájení odebírá ze sítě okamžitý výkon, rovný

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (30)$$

Kde $u(t)$ je okamžitá hodnota napětí a $i(t)$ je okamžitá hodnota proudu.

Činný výkon, který koná práci (ať se podílí na elektromagnetické přeměně energie, nebo se ztrátami mění v teplo) je pro periodické průběhy napětí a proudu definován jako střední hodnota okamžitého výkonu za jednu periodu, tedy

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (31)$$

Činný výkon je proto totožný se středním výkonem. Fyzikální smysl mají pro energetické přeměny proto pouze pojmy okamžitý výkon, střední výkon a činný výkon. Jiné (často užívané) pojmy (efektivní výkon, okamžitý činný výkon) jsou fyzikálně nesmyslné. Po dosazení rovnice (30) do rovnice (31) lze určit obecný vztah pro činný výkon jako

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (32)$$

Z rovnice (32) je jednoznačně zřejmé, že měření činného výkonu vždy vyžaduje měření napětí a proudu a určení periody měřených veličin.

4.1.2 Výkony při harmonickém napájecím napětí při lineární zátěži

Případ výkonu při harmonickém napájení na lineární zátěži se vztahuje na všechny spotřebiče instalované na obráběcích stroji, které jsou přes rozvaděč napájeny přímo ze sítě.

Jestliže přivedeme na lineární zátěž harmonické napětí, definované jako

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t, \quad (33)$$

kde U_m je amplituda napětí, bude lineární zátěží procházet proud (34)

$$i = I_m \cdot (\sin \omega t - \varphi), \quad (34)$$

kde I_m je amplituda proudu a φ je fázový posun mezi napětím a proudem (v našem případě je proud zpožděn za napětím o úhel φ , typické chování pro všechna zařízení, založená na elektromechanické přeměně energie s využitím zákona elektromagnetické indukce).

Po dosazení do rovnice (32) dostaneme

$$p = U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U \cdot I \cos \varphi - U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi), \quad (35)$$

kde $U = U_m/\sqrt{2}$ a $I = I_m/\sqrt{2}$ jsou efektivní hodnoty harmonického napětí a proudu. První člen na pravé straně rovnice představuje stálou složku okamžitého výkonu, druhý člen představuje kmitavou složku s dvojnásobným kmitočtem oproti vstupujícím obvodovým veličinám.

Protože střední hodnota kmitavé složky je rovna nule, dostaneme po dosazení do rovnice (32) pro činný výkon na jednofázovém spotřebiči vztah:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (36)$$

což znamená, že činný výkon je roven stálé složce okamžitého výkonu. Veličina $\cos \varphi$ se nazývá účinník.

V energetických zařízeních je vždy usilováno o hodnotu účinníku blízkou jedné, neboť tím je zajištěno jejich plné energetické vyřízení. Vhodnou výkonovou charakteristikou především energetických zařízení je zdánlivý výkon definovaný jako:

$$S = U \cdot I \quad (37)$$

Zdánlivý výkon je maximální možnou hodnotou činného výkonu.

Veličina, rovná druhé odmocnině rozdílu druhých mocnin zdánlivého výkonu a činného výkonu, je poté definována jako jalový výkon Q :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (38)$$

Z hlediska ekodesignu výrobních strojů je důležité, že dodavatel elektrické energie (distributor) přivádí ke spotřebiteli (provozovateli stroje) celý zdánlivý výkon, ale spotřebitel platí pouze za spotřebovaný činný výkon. Ztráty v distribuční soustavě způsobené přenosem jalového výkonu by pak šly k tíži dodavatele elektrické energie, proto dodavatel smluvně zavazuje odběratele k odběru elektrické energie s účinníkem blízkým jedné. Ztráty způsobené přenosem jalového výkonu navíc působí i v rámci rozvodů ve výrobním podniku, zejména proto, že fakturační elektroměr je zpravidla umístěn na hlavním přívodu a ke kompenzaci dochází i na hlavním přívodu. Bez dodatečných opatření (kompenzace účinníku) se lze tomuto požadavku u neregulovaných pohonů přiblížit správným dimenzováním výkonu motorů - konkrétně jejich provozováním co nejblíže k jejich nominálnímu pracovnímu bodu.

Pro výkony souměrných trojfázových spotřebičů při napájení souměrnou soustavou napětí, definovanou jako

$$\begin{aligned} u_U(t) &= U_m \cdot \sin \omega t \\ u_V(t) &= U_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_W(t) &= U_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (39)$$

budou výkony určeny součtem výkonů všech tří fází:

$$\begin{aligned}
P &= 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \\
S &= 3 \cdot U_f \cdot I_f \\
Q &= 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi
\end{aligned} \tag{40}$$

kde index „f“ znamená, že se jedná o fázové veličiny.

Pro spojení spotřebiče do hvězdy platí, že

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f \tag{41}$$

a pro spojení do trojúhelníku platí, že

$$I = \sqrt{3} \cdot I_f \tag{42}$$

kde U a I jsou sdružené veličiny.

S využitím sdružených veličin jsou výkony trojfázového harmonického proudu pro obě spojení spotřebiče definovány jako:

$$\begin{aligned}
P &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \\
S &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \\
Q &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi
\end{aligned} \tag{43}$$

Vidíme, že v případě harmonických obvodových veličin lze výkony určit ze sdružených napětí a proudů (je k nim vždy přístup na přírodních fázových vodičích). Pro další úvahy je důležitá skutečnost, že fázový posun φ je úhel mezi fázovými veličinami a to zejména v případech, kdy jsou výkony stanovovány přímo z okamžitých hodnot napětí a proudů.

4.1.3 Výkony při harmonickém napájecím napětí na nelineární zátěži

Tento případ se vztahuje na napájení usměrňovače, jehož výstupem je společný stejnosměrný meziobvod měničů kmitočtu všech regulovaných pohonů.

Zde předpokládáme, že napájecí fázové napětí má harmonický tvar a ve shodě se vztahem (33) je definováno jako

$$u = U_{1m} \cdot \sin \omega_1 t \tag{44}$$

kde U_{1m} je amplituda a ω_1 je úhlový kmitočet fázového napětí.

V případě nelineární zátěže musí být odebíraný proud sice periodický, ale neharmonický, takže jej můžeme rozložit do Fourierovy řady. Bude tedy obsahovat kromě základní harmonické složky s amplitudou I_{1m} a úhlovým kmitočtem ω_1 vyšší harmonické složky a případně i stejnosměrnou složku I_{av} . Okamžitou hodnotu fázového proudu pak můžeme vyjádřit rovnicí

$$i(t) = I_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \cdot \sin(n\omega_1 t - \varphi_n), \tag{45}$$

kde přirozené číslo n určuje řád harmonické složky a φ_n je fázový posun mezi harmonickým napětím a n -tou harmonickou proudem.

Dosadíme-li rovnice (39) a (40) do rovnice (32), dostaneme vztah (46).

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_{m1} I_{av} \cdot \sin \omega_1 t \cdot dt + \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} U_{m1} I_{m1} \cdot \sin \omega_1 t \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) dt +$$

$$+ \frac{1}{T_1} \sum_{n=2}^{\infty} \int_0^{T_1} U_{m1} I_{mn} \cdot \sin \omega_1 t \cdot \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) dt \quad (46)$$

Je zřejmé, že první a třetí člen na pravé straně rovnice (44) jsou rovny nule, protože integrál funkce $\sin x$ je roven vždy nule, je-li integrační interval celistvým násobkem periody.

Činný výkon je pak roven:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (47)$$

Vidíme, že činný výkon je přenášen jen první harmonickou proudem I_{m1} a na jeho přenosu se nepodílí ani jeho stejnosměrná složka I_{mav} , ani jeho vyšší harmonické s amplitudami $I_{m2}, I_{m3}, \dots, I_{mn}$.

Ve shodě s rovnicí (40) můžeme pro souměrné trojfázové napájecí napětí a souměrnou trojfázovou zátěž pak standardně definovat činný výkon a pro 1. harmonickou a její jalový i zdánlivý výkon definovat:

$$P_1 = 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \cos \varphi_1$$

$$S_1 = 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \quad (48)$$

$$Q_1 = 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \sin \varphi_1$$

Tento přístup však není pro řešení praktických úloh vhodný, protože všechna zařízení je z důvodu specifikace Jouleových (činných) ztrát potřeba proudově dimenzovat na celkovou efektivní hodnotu proudu. Z předchozího je zřejmé, že vždy platí:

$$I \geq I_1 \quad (49)$$

a tedy při napájení usměrňovačů je tato nerovnost velmi výrazná, je potřeba přiváděný zdánlivý výkon definovat s využitím celkové efektivní hodnoty:

$$S = 3 \cdot U \cdot I. \quad (50)$$

Z rovnosti energetických (např. tepelných) účinků neharmonického proudu a jeho celkové efektivní hodnoty plyne:

$$I^2 = I_{av}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2. \quad (51)$$

Dosazením rovnice (51) do rovnice (50) dostaneme po úpravě, že

$$S^2 = 3^2 \cdot U^2 \cdot I_1^2 + 3^2 \cdot U^2 \cdot \left(I_{av}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right) = S_1^2 + D^2, \quad (52)$$

kde D je tzv. deformační výkon.

Protože činný výkon je přenášen pouze první harmonickou proudem I_1 , je celkový činný výkon P roven P_1 , a pro celkový účinník platí (53).

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + S_1^2 + D^2}} = \frac{3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{3 \cdot U \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi_1 \leq 1 \quad (53)$$

Vidíme, že při harmonickém napětí a proudu (viz kap. 5.3.1), se hodnota celkového účinníku shoduje s hodnotou cosinu úhlu fázového posunu mezi napětím a proudem, poté se účinník označuje jako $\cos \varphi$.

Z hlediska ekodesignu výrobních strojů je důležité optimalizovat spotřebu elektrické energie tak, aby byl celkový účinník λ co nejbližší jedné.

Dalším jevem, který je z hlediska ekodesignu výrobních strojů nutné zkoumat, je problematika elektromagnetické kompatibility (EMC). Tato problematika je řešena Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC) a vydanými EN ČSN normami. Důležitými kritérii při posuzování kvality spotřebičů z hlediska EMC je nejen celkový účinník λ , ale i činitel zkreslení k_z , definovaný jako

$$k_z = \frac{\sqrt{I_{av}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (54)$$

nebo

$$k_z = \frac{\sqrt{I_{av}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} \quad (55)$$

Rovnice (54) udává při stejném zkreslení proudu větší hodnoty, a proto se užívá v příslušných normách. Takto je posuzována nízkofrekvenční oblast do kmitočtu 2.5 kHz.

Problémy však způsobují i vysoké harmonické fázových proudů (ověřuje se pásmo od 150 kHz do 30 MHz), které svým působením na vnitřní impedanci napájecí sítě deformují křivku napájecího napětí a způsobují rádiové rušení.

4.1.4 Činný výkon zdroje konstantního napětí

Problematika činného výkonu zdroje konstantního napětí se týká všech měničů kmitočtu se stejnosměrným napětíovým meziobvodem, tedy prakticky všech řízených pohonů výrobních strojů.

Je-li napětí meziobvodu konstantní:

$$u(t) = U_0 = konst \quad (56)$$

bude

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \cdot i(t) dt = U_0 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = U_0 \cdot I_{av} \quad (57)$$

To znamená, že činný výkon dodávaný stejnosměrným obvodem do střídače je úměrný střední hodnotě proudu, nikoliv hodnotě efektivní. Při zkoumání energetických poměrů na meziobvodu je třeba ověřit a zda platí rovnice (56), tedy zda je splněna podmínka $U_0 = konst$.

4.1.5 Výkony při neharmonickém napájecím napětí na nelineární zátěži

U všech servomotorů řízených frekvenčními měniči je nutné stanovit výkony při neharmonickém napájecím napětí při nelineární zátěži.

Jak plyne z výše uvedených rovnic (44) a (45), lze periodické neharmonické napětí (stejně jako proud) rozložit do Fourierovy řady, která v obecném případě obsahuje stejnosměrnou složku a nekonečnou řadu harmonických funkcí:

$$u(t) = U_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t - \psi_{Un}), \quad (58)$$

kde U_{av} je velikost stejnosměrné složky, U_{mn} je amplituda n -té složky, přirozené číslo $n = 1, 2, 3, \dots, x$ určuje řád harmonické, ω_1 je úhlový kmitočet první harmonické a ψ_{Un} je fázový posun n -té harmonické oproti vztažné hodnotě $\psi_{U1} = 0$.

Bez ohledu na to, zda je zátěž lineární či nelineární, bude jí odebíraný proud rovněž neharmonický, takže jej můžeme definovat rovnicí (59) obdobnou rovnici (58), tedy

$$i(t) = I_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t - \psi_{1n}), \quad (59)$$

kde ψ_{1n} je fázový posun n -té harmonické oproti stejné vztažné hodnotě $\psi_{U1} = 0$.

Po dosazení rovnic (58) a (59) do rovnice (30) dostaneme pro činný výkon vztah:

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \left[U_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_{Un}) \right] \cdot \left[I_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega_1 t + \psi_{1n}) \right] \cdot dt \quad (60)$$

Po roznásobení vznikne na pravé straně rovnice součet stejnosměrné složky a nekonečného počtu integrálů čtyř typů, jmenovitě:

$$Int_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{av} \cdot I_{av} \cdot dt = U_{av} \cdot I_{av} \quad (61)$$

$$Int_k = \frac{1}{T} \int_0^T U_{av} \cdot I_{mk} \cdot \sin(k\omega_1 t + \psi_{1k}) dt = 0 \quad (62)$$

pro všechna k , kde $k = 1, 2, \dots, n$ je řád příslušného harmonického proudu,

$$Int_l = \frac{1}{T} \int_0^T I_{av} \cdot U_{ml} \cdot \sin(l\omega_1 t + \psi_{1l}) dt = 0 \quad (63)$$

pro všechna l , kde $l = 1, 2, \dots, n$ je řád příslušné harmonické napětí,

$$Int_{k,l} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{ml} \cdot \sin(l\omega_1 t + \psi_{1l}) \cdot I_{mk} \cdot \sin(k\omega_1 t + \psi_{1k}) dt = 0 \quad (64)$$

pro všechna $k \neq l$, a konečně

$$Int_{k,l} = \frac{1}{2} U_{ml} \cdot I_{mk} \cdot \cos(\psi_{1l} - \psi_{1k}) dt = U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (65)$$

pro všechna $k = l = n$, kde n je řád harmonické napětí a současně proudu.

Zde U_n a I_n jsou efektivní hodnoty napětí a proudu a φ_n je fázový posun n -té harmonické proudu vůči n -té harmonické napětí. Platnost rovnic (62) a (63) je zřejmá na první pohled, platnost rovnice (64) plyne z vlastností ortogonálních funkcí. Činný výkon v tomto případě tedy bude

$$P = U_{av} \cdot I_{av} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (66)$$

Pro tepelné účinky periodického proudu na rezistor R (z této představy vychází definice efektivní hodnoty) lze psát, že

$$I_{av} = \frac{U_{av}}{R}, \quad I_n = \frac{U_n}{R} \text{ a současně } \varphi_n = 0, \text{ tedy } \cos \varphi_n = 1. \quad (67)$$

Potom můžeme činný výkon vyjádřit jako:

$$P = \frac{U_{av}^2}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R} = \frac{U^2}{R} . \quad (68)$$

Z uvedeného plynou vztahy pro efektivní hodnoty celého spektra napětí resp. proudu jako

$$U = \sqrt{U_{av}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} , \text{ resp. } I = \sqrt{I_{av}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (69)$$

Efektivní hodnotu napětí můžeme sice změřit klasickým přístrojem (např. elektromagnetickým voltmetrem) bez ohledu na charakter zátěže, ale tato hodnota definuje činný výkon – viz rovnice (39) – pouze pro lineární rezistor. Pro zátěž obecného charakteru nelze z efektivní hodnoty napětí činný výkon určit, je tedy nutné použít buď rovnici (30) nebo (66) a o tom, kterou rovnici použijeme, rozhoduje pouze jednoduchost/složitost výpočtu v konkrétní aplikaci.

Jak již bylo řečeno výše, typickým případem zátěže obecného charakteru je na obráběcích strojích napájení servomotorů tranzistorovými střídači, které pracují v režimu sinusové pulsní šířkové modulace (sinusové PWM). Zde je napájecí napětí tvořeno vysokofrekvenčními pravoúhlými pulsy s proměnnou střídou a fázový proud má harmonický tvar se superponovanou pilovitou vysokofrekvenční složkou (tzv. kvazisinusový proud). Protože trojfázové servomotory představují souměrnou zátěž, stejnosměrné složky zde neexistují a užitečné jsou pouze 1. harmonické napětí a proudu, které vytvářejí využitelný mechanický moment na hřídeli motoru. Všechny ostatní harmonické složky způsobují parazitní pulsační momenty, jejichž důsledkem je nerovnoměrnost chodu (chvění) hřídele. Protože střední hodnota pulsačních momentů je za periodu první harmonické rovna nule, je jejich využitelný mechanický výkon rovněž nulový, tato energie v elektromechanické soustavě vyvolává nežádoucí účinky (např. zvýšené namáhání převodovek) a vždy se mění v teplo. Všechny vyšší harmonické složky dále způsobují přídavné hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy, které se rovněž v motoru mění v teplo. Servomotor tedy přeměňuje na užitečný mechanický výkon pouze 1. harmonickou složku napětí a proudu a je konstruován pro harmonické veličiny. Jeho štítkový výkon je udáván pro harmonické napájení.

V souladu s rovnicemi (48) a (66) musí pro celkový činný příkon trojfázového motoru platit, že

$$P = 3 \cdot \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_f(t) \cdot i_f(t) \cdot dt = 3 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (70)$$

Část tohoto příkonu se přemění na *užitečný mechanický výkon 1. harmonické* a zbytek tvoří ztrátový výkon, který se v elektromechanické soustavě *přemění na teplo*. V souladu s výše uvedeným musí tedy platit, že

$$\begin{aligned} P_1 &= 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \cos \varphi_1 \\ S_1 &= 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \\ Q_1 &= 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \sin \varphi_1 \\ P_{1mech} &= 3 \cdot U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \eta_{mot} \end{aligned} \quad (71)$$

kde η_{mot} je účinnost servomotoru v aktuálním pracovním bodě. Uvedené rovnice jsou kromě dalších vlastností důležité pro dimenzování servopohonu. Je důležité si uvědomit, že elektromagnetický návrh servomotoru předpokládá harmonické napájení. Magnetický tok

statoru je určen efektivní hodnotou 1. harmonické napětí U_{f1} a při kvazisinusovém proudu je maximální hodnota magnetické indukce $B_{\max}$ rovněž určena pouze první harmonickou napětí U_{f1} , přičemž všechny vyšší harmonické způsobují přídatné hysterezní ztráty a nemají vliv na hodnotu $B_{\max}$. Vinutí je dimenzováno na efektivní hodnotu 1. harmonické proudu I_{f1} , ale superponované pilovité zvlnění mírně zvyšuje celkovou efektivní hodnotu fázového proudu I_f vzhledem k efektivní hodnotě první harmonické I_1 .

Za tohoto předpokladu bude rozdíl mezi zdánlivým výkonem definovaným rovnicí (71) a zdánlivým výkonem určeným z celkové efektivní hodnoty proudu malý a:

$$S = 3 \cdot U_{f1} \cdot I_f \quad [\text{VA}] \quad (72)$$

zatímco nabízející se definice zdánlivého výkonu

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I_f \quad [\text{VA}] \quad (73)$$

nemá žádnou informační hodnotu, protože celková efektivní hodnota napětí U_f je výrazně větší, než efektivní hodnota 1. harmonické U_{f1} .

4.1.6 Popis měřicího zařízení PMDB-01

Pro přesné měření výkonu, respektive toku energie ve třífázové síti je třeba znát všechna fázová napětí a jim příslušné fázové proudy. Je možné měřit sdružené hodnoty a tuto skutečnost následně zohlednit při výpočtech. Obecně lze měření zjednodušit měřením pouze ve dvou fázích, vyžaduje-li však měřený objekt pětivodičové připojení s nulovým vodičem, potom může být měření chybné. Měření fázových napětí přináší výhodu společného potenciálu nulové svorky pro všechny napěťové měřicí vstupy.

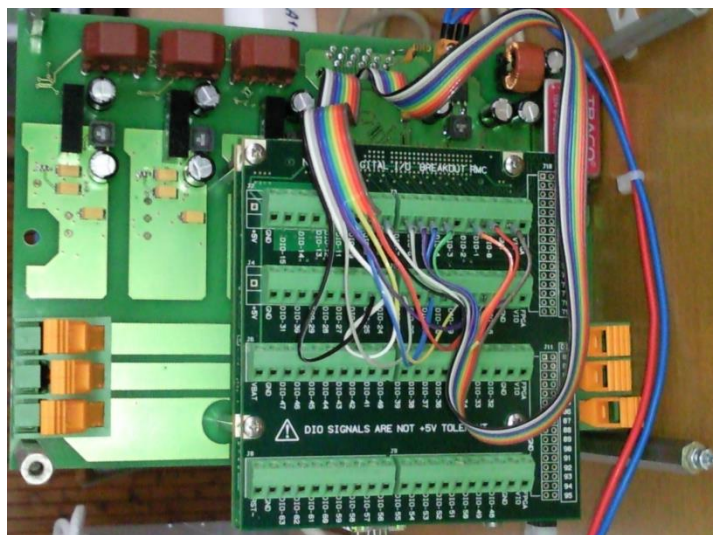
Z důvodů bezpečnosti měřicího zařízení a minimalizace problémů s rušením jsou všechny měřicí vstupy galvanicky odděleny od napájecího zdroje i od výpočetního systému, který zpracovává naměřená data. Proudové vstupy jsou galvanicky odděleny díky použití snímačů s Hallovou sondou. Tyto snímače umožňují dosažení přesnosti měření v řádu desetin procenta a šířky pásma měření až 200 kHz. Napěťové měřicí vstupy snižují velikost měřených fázových napětí přesnými odporovými bočníky. Galvanické oddělení je pak zajištěno oddělovači digitálních SPI datových sběrnic, po kterých jsou naměřená data přenášena do jednodeskového průmyslového počítače NI sbRIO.

Signály z proudových snímačů i bočníků snímajících napětí jsou filtrovány aktivními filtry a následně přivedeny na vstupy analogově-digitálních (A/D) převodníků. Filtry potlačují kmitočty nad zhruba 70 kHz, které jsou rušením měření. A/D převodníky umožňují dosáhnout minimální vzorkovací periody až 2 μs , tedy vzorkovacího kmitočtu až 500 kHz. Díky oversamplingu je možné zvýšit rozlišení A/D převodu. Použité A/D převodníky převádí měřený signál na 16-ti bitové datové slovo, které je následně přeneseno po SPI sběrnici do jednodeskového průmyslového počítače NI sbRIO.

Měřicí vstupy jsou chráněny varistory proti přepětí. Celá deska měření výkonu je napájena ze zdroje stejnosměrného napětí 24 V a je chráněna proti případnému přepólování napájecího napětí i proti případnému přepětí. Rozsah povoleného napájecího napětí je od 9 do 33 V. Jištění je provedeno standardní tavnou pojistkou 1 AF 5x20 mm. Měřicí deska zajišťuje

i napájení jednodeskového průmyslového počítače NI sbRIO. Všechny napájecí napětí na měřicí desce jsou osazeny EMC filtry pro zamezení šíření rušivých signálů.

Svorky pro připojení sítě i měřeného stroje jsou pérové s možností připojení kabelů o průřezu 0,5 až 16 mm². Maximální proud procházející každou ze svorek je 75 A. Volbou různých snímačů fázových proudů je možné měřit proudy do 25 A, 50 A a případně i více ampérů. Napěťové vstupy jsou dimenzovány na maximum 900 V. [13], [15]



Obr. 5 Pohled na PMDB-01 ze strany připevnění sbRIO 9606 [15]

Aby bylo možné obdržet dostatečně přesná simulovaná data, je nutné nasimulovaný technologický proces srovnat s reálným případem. Pro relevantní měření spotřeby elektrické energie je nutné, aby měřicí přístroj splňoval následující kritéria:

- možný dlouhodobý provoz,
- možnost sběru a záznamu naměřených dat,
- měření během definovaného časového intervalu nebo určených časových úseků,
- možnost srovnávat naměřené hodnoty s naměřenými hodnotami týkajícími se funkce stroje,
- Ochrana proti elektromagnetickým interferencím v měřeném stroji.

Pro splnění těchto požadavků byl jako měřicí přístroj vybrán přístroj PMDB-01 vyvinutý v rámci projektu FR-TI3/655 – Ekodesign v konstrukci obráběcích strojů. Měření probíhá jak na patě stroje, tak přímo mezi frekvenčním měničem a motorem lineární osy (resp. rotační osy) nebo motorem vřetene. Tím lze dosáhnout komplexního pohledu na spotřebu měřeného stroje. Lze porovnávat dílčí výsledky jednotlivých posuvových os a vřetene s naměřenými výsledky na patě stroje. Zde je patrný vliv periferních zařízení, která se přímo nepodílí na primární funkci stroje, ale jsou důležité pro dosažení požadované přesnosti obrábění, kvality povrchu, dosažení bezpečnosti práce, nebo jsou důležité pro samotný chod stroje.

Princip wattmetru je založen na mechatronickém přístupu na model base designu s využitím V-cyklu.

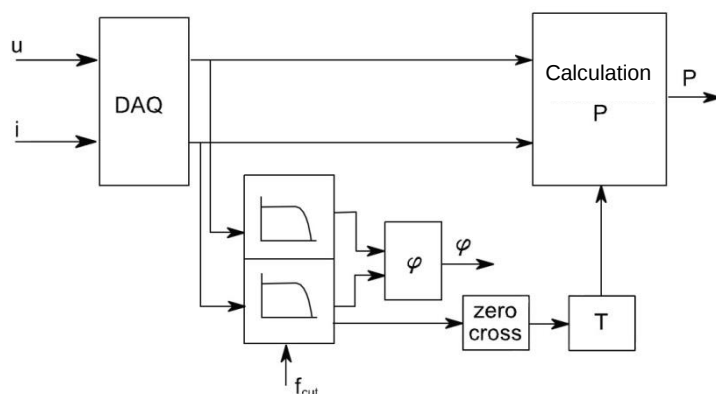
Pro vývoj wattmetru vzorku byla zvolena platforma CompactRIO firmy National Instruments s ohledem na její zkušenosti s vývojem předchozích projektů. Platformu tvoří real-time počítač spojený s FPGA obvodem, který obsluhuje jednotlivé připojené periférie.

Vyvinutý software je proveden ve vývojovém prostředí NI LabVIEW, které umožňuje vývoj software pro FPGA, pro real-time počítač i pro PC, které může komunikovat s real-time počítačem.

Největší výhodou této platformy je použití FPGA, které umožňuje paralelně obsluhovat připojené periférie včetně jejich synchronizace a zároveň umožňuje provádět paralelně některé výpočty, čímž se významně snižuje zatížení real-time počítače. Pro realizaci prototypu je použito modulu sbRIO, který je OEM řešením platformy CompactRIO. Perifériemi wattmetru jsou 3 měření napětí, 3 měření proudu a komunikační modul.

Měřicí zařízení je koncipováno z následujících komponentů:

- Napěťový modul
- Proudové senzory
- Zařízení pro sběr dat
- Software



Obr. 6 Schéma zařízení pro měření spotřeby elektrické energie obráběcího stroje [15]

Základní části měřicího zařízení jsou ukázány na Obr. 6. DAQ blok je zahrnut do zařízení z důvodu souběžného periodického vzorkování napětí a proudu. Signál je poté přenášen přes filtry do bloku, kde je spočítán účinník a činný výkon. Dále je v měřicím systému zařazen systém PLL (Phase-Locked Loop) pro výpočet korekce a dopočet přechodu přes nulovou hodnotu. Okamžitá hodnota výkonu a fázového posunu jsou následně numericky integrovány. Celý systém je navržen tak, aby odpovídal rovnici (74), definující výpočet činného výkonu:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (74)$$

kde T je perioda dodávaného napětí, $u(t)$ je aktuální hodnota napětí v čase t , $i(t)$ je aktuální hodnota proudu v čase t . Vezmeme-li v potaz, že zatížení je lineární a dodávané napětí je harmonické, tato rovnice může být následovně zjednodušena na:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (75)$$

V oblasti obráběcích strojů je možné toto měřicí zařízení zapojit ve čtyřech možných variantách měření:

- **Měření zařízení, která přímo využívají elektrickou energii dodávanou ze sítě.**
Pokud se jedná o tento typ zařízení, lze předpokládat, že jsou napájeny harmonickým napětím a časový průběh proudu je taktéž harmonický, nebo téměř harmonický. Zde mohou být použity měřicí přístroje určené pro 50/60 Hz. Problémem této metody může být deformace harmonického napětí způsobená nelineární zátěží, jako v případě použití frekvenčních měničů.
- **Měření výstupního napětí usměrňovače, který je určen pro řízení jednotlivých servopohonů.** Usměrňovač dodávající energii je často používán jako neřízený (diodový můstek). U náročnějších aplikací je upraven pro rekuperaci s tranzistorovým můstkem s možností sinusové PWM. Diodový můstek je schopen vracet elektrickou energii zpět do sítě v případě brzdění servomotorů. Proto je nutné mezi usměrňovač a zdroj elektrické energie začlenit filtr, který pouští napětí ve fázi s dodávaným napětím. Pro měření je možné použít i měřicí přístroje určené pro 50/60 Hz, které ale představují vyšší nejistotu měření než je jejich nominální hodnota nebo než přístroje určené pro měření vyšších frekvenčních pásem.
- **Měření zaměřené na měření elektrické energie dodávané servomotorům měniči frekvence.** Zde je nutné určit požadovanou hodnotu napětí, které je modulováno sinusovou PWM s přesně definovanou spínací frekvencí. Pro tento typ měření je nutné použít zařízení s větším frekvenčním rozsahem. Vzorkovací frekvence musí být alespoň 10x vyšší než je spínací frekvence tranzistorů měniče, což představuje cca 5kHz.
- **Měření spočívá v měření spotřeby elektrické energie ve stejnosměrném obvodu.** V tomto případě je napětí stejnosměrné a jeho průměrná hodnota zůstává téměř stejná. Změna napětí je pouze způsobena rekuperací energie z pohonu zpět do napájecí sítě. Očekávaný časový průběh proudu stejnosměrným obvodem může být charakterizován jako série pulsů o vysoké frekvenci, a proto je nutné použít měřicí přístroje s velkým frekvenčním pásmem.



Obr. 7 Ukázka zapojení wattmetrické soustavy

4.2 Možnosti kategorizace obráběcích strojů z hlediska ekodesignu

Obráběcí stroje jsou ve výrobních podnicích dominantními energetickými spotřebiči. Vzhledem k výrobním kapacitám je používáním těchto energetických spotřebičů dosaženo poměrně velké spotřeby elektrické energie. V rámci Evropské unie došlo k regulaci spotřeby elektrické energie u všech energetických spotřebičů zvyšujícími se požadavky na jejich účinnost. Tato regulace se nevyhnula ani požadavkům kladeným na výrobní stroje [90]. Výrobní stroje jsou zastoupeny poměrně širokým spektrem možných typů, které se v praxi využívají a slouží především k přetváření polotovaru nebo odebrání materiálu z polotovaru. Při práci musí stroj vykonat nemalou mechanickou energii vynaloženou na samotný proces přetváření polotovaru a na rozběh, chod a zajištění potřebných funkcí, které jsou nutné pro správný a bezpečný provoz. V rámci oboru obráběcích strojů se tak pohybují příkony užívaných zařízení od stovek wattů po stovky kilowattů. Aby bylo možné porovnávat popřípadě regulovat jejich energetickou náročnost je nutné stroje kategorizovat především podle účelu, ke kterému slouží; podle konstrukčního uspořádání; podle velikosti a případně podle dalších kritérií.

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 dizertační práce, vhodné zabývat se detailněji kategorizací oblasti obráběcích strojů, obsažení všech výrobních strojů v návrhu metody by se však vymykalo rozsahu této práce.

Byl proveden následující rozbor parametrů pro rozdělení obráběcích strojů podle následujících kritérií dle:

- účelu a typu obráběcího stroje
- konstrukčního uspořádání obráběcího stroje
- velikosti pracovního prostoru
- příkonu obráběcího stroje
- možného úběru materiálu
- velikosti a hmotnosti obrobku

4.2.1 Rozdělení dle účelu a typu obráběcího stroje

Prvotní a v podstatě základní rozdělení obráběcích strojů je provedeno dle účelu, k jakému byl stroj postaven. Tím například rozumíme, zda koná hlavní řezný pohyb nástroj či obrobek, popřípadě výrobní možnosti daného stroje. Z toho vyplývá možné rozdělení obráběcích strojů na:

- Soustruhy

- Frézky
- Vrtačky
- Brusky
- Vyvrtávačky
- Obrážečky
- Pily
- Multifunkční centra
- Jednouúčelové stroje

4.2.2 Rozdělení dle konstrukčního uspořádání obráběcího stroje

Každá z kategorií uvedených v předchozím odstavci zahrnuje možnosti dalšího členění podle jejich konstrukčního uspořádání či podle technologických možností, které stroj umožňuje. Konstrukční uspořádání pak předurčuje využití principu obrábění daného typu stroje podle toho, jak jsou konstrukčně vyřešeny jednotlivé hlavní nosné konstrukční uzly. Různou konfigurací je možné docílit jiné profilace. Dalším rozdělením se rozroste počet kategorií jednotlivých obráběcích strojů. Příkladem může být rozdělení do dalších kategorií u soustruhů:

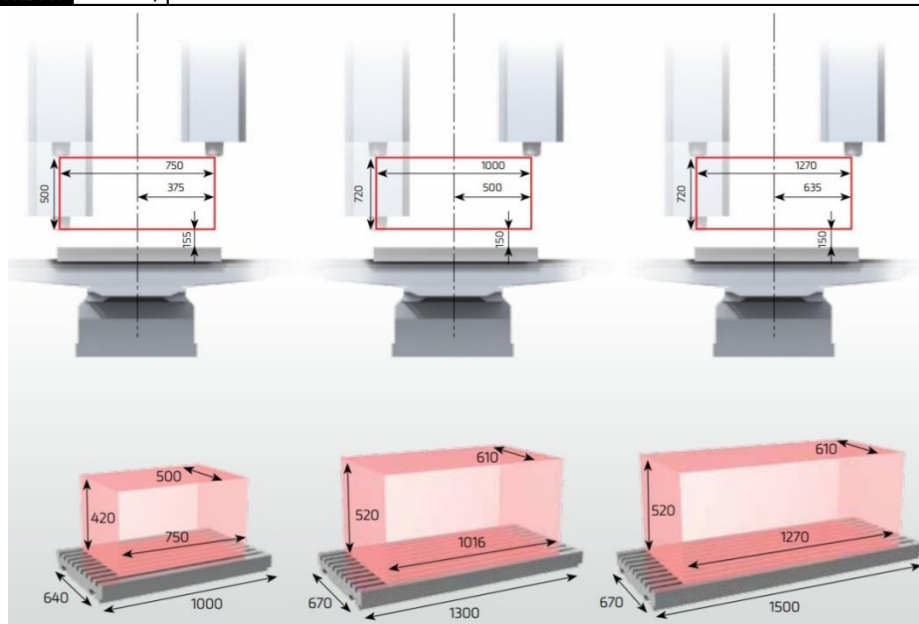
- Univerzální hrotové soustruhy
- Čelní soustruhy
- Svislé soustruhy
- Revolverové soustruhy
- Víceřetenové soustruhy
- Soustružnická centra
- Speciální soustruhy

4.2.3 Rozdělení dle velikosti pracovního prostoru

Obráběcí stroje vzhledem k účelu, k jakému byly navrženy a vyrobeny, se rovněž liší velikostí pracovního prostoru, což je udáváno délkami možného posuvu v jednotlivých osách. Vzhledem k velikostem typického obrobku musí být stroj dimenzován tak, aby mohl vykonávat technologické funkce v oblasti celého pracovního prostoru. S rostoucí velikostí pracovního prostoru nastává problém s dosažením přesnosti polohování v rámci pracovního prostoru a s dimenzováním nosných částí a pohonů tak, aby bylo možné s obrobkem dle požadovaných parametrů pohybovat hlediska bylo dosaženo potřebné dynamiky stroje a přesnosti polohování.

Dále je uvádím rozdělení obráběcích strojů podle velikosti pracovní plochy. Pracovní plochou se rozumí rovina kolmá k ose vřetene (například u frézek to bude rovina X-Y). Obráběcí stroje (OS) pak můžeme rozčlenit na:

- Malé – S (pracovní plocha $\geq 0,1\text{m}^2$)
- Střední – M ($0,1\text{m}^2 < \text{pracovní plocha} \leq 1\text{m}^2$)
- Velké – L (pracovní plocha $> 1\text{m}^2$). [31]



Obr. 8 Rozdělení OS dle velikosti pracovního prostoru [30]

4.2.4 Rozdělení dle příkonu obráběcího stroje

Příkon stroje je důležitý parametr z hlediska jeho instalace do provozu z vzhledem k dostatečnosti zdroje napájení. Výkony obráběcích strojů se pohybují od stovek wattů po stovky kilowattů. Hlavní podíl na výkonu stroje má převážně vřeteno, které zajišťuje hlavní řezný pohyb a tudíž je dominantním spotřebitelem elektrické energie stroje. Spotřebovávaný aktuální výkon vřetene je závislý na technologických parametrech obrábění, což jsou otáčky, posuv na zub a řezná rychlost. V nemalé míře se na celkovém aktuálním výkonu podílí i posuvové osy, které vykonávají vedlejší řezné pohyby. Aktuální výkon posuvových os je závislý zejména na jejich rychlosti, zrychlení a zatížení. Může nastat i případ, kdy během obrábění mají vyšší spotřebu než vřeteno právě posuvové osy, a to především pokud bude vysoká hmotnost obrobku a malý úběr třísky. Rozdělení dle výkonu je mimo morfologické rozdělení dalším důležitým krokem ke správnému hodnocení obráběcích strojů.

4.2.5 Rozdělení dle možného úběru materiálu

Maximální možný úběr materiálu je výkonovým parametrem, podle kterého je možné opět dále rozčlenit obráběcí stroje. Tento parametr je především závislý na výkonu vřetene a posuvových os, ale také na tuhosti celého stroje. Tuhost je důležitá z hlediska zachování stability obráběcího procesu. Stroj může tedy výkonově stačit i na náročnější technologickou operaci, ale z pohledu tuhosti není možné docílit této technologické operace tak, aby nedocházelo k nadměrným vibracím, které mají nežádoucí vliv na jakost povrchu a přesnosti.

4.2.6 Rozdělení z hlediska velikosti a hmotnosti obrobku

Dalším parametrem charakterizujícím obráběcí stroj je velikost a maximální hmotnost obrobku. Maximální rozměry obrobku přímo souvisí s velikostí pracovního prostoru stroje, nicméně velikost pracovního prostoru stroje je udávána pouze v konfiguraci bez upnutého nástroje. To znamená, že maximální velikost obrobku bude vždy menší a to v závislosti na délce a průměru použitého nástroje. Dalším limitujícím parametrem je nutnost zajištění vedlejších operací nutných pro obráběcí proces, což může taktéž ovlivnit velikost maximálního možného obrobku. Příkladem takové vedlejší operace je například výměna nástroje při nasazení výměníku s otočným a vysouvacím ramenem.

Maximální hmotnost obrobku je dána dimenzováním posuvových os, se kterými přímo souvisí obrobek, tzn. osy, které přímo s obrobkem manipulují. Jedním z vlivů, které souvisí s maximální nosností posuvových os, je dimenzování vedení, které zajišťují lineární či rotační pohyb. Dalšími vlivy, které ovlivňují maximální možné zatížení, jsou zvolené pohony, které by měly být schopny zajistit potřebnou dynamiku soustavy. V případě překročení maximální nosnosti se může projevit zvýšené opotřebení vedení jednotlivých os a výpadky proudových chráničů motorů, které zabraňují nadměrnému přetěžování pohonů.

4.2.7 Analýza zátěže životního prostředí obráběcích strojů

Obráběcí stroj jako celek je složen z mnoha dílčích komponent, které se přímo, nepřímo nebo vůbec nepodílí na celkové účinnosti soustavy během životní fáze užívání, tedy období životního cyklu stroje v ostrém provozu. Ztráty se projevují mírou energie, která byla spotřebována, ale nebyla užitečně využita. Jednotlivé komponenty se v rámci životního cyklu můžou projevit na zatížení životního prostředí následovně:

- **Zátěž spojená s dobýváním a zpracováním surovin** – Jedná se o těžbu a zpracování surovin, ze kterých jsou vyrobeny polotovary určené pro výrobu stroje. Taková těžba a zpracování surovin je energeticky velice náročná. Z hlediska posuzování celého životního cyklu je tato zátěž velmi výrazná. Vezmeme-li v potaz, že mimo stroje s hybridními stavebními strukturami je použita pro stavbu obráběcích strojů hlavně ocel a litina, je zátěž vzniklá dobýváním a zpracováním surovin charakteristická značnými emisemi CO₂ a dalšími vedlejšími produkty poškozujícími životní prostředí. Redukce této zátěže je možné docílit topologickou optimalizací hlavních konstrukčních uzlů stroje za účelem minimalizace nutné hmoty pro jejich zhotovení a druhotným využitím jednotlivých surovin.
- **Zátěž vznikající během výroby a stavby stroje** – Během výroby je zátěž převážně spojena se spotřebou elektrické energie, která je nutná pro tavení, dělení, obrábění a broušení polotovarů, ze kterých jsou vyhotoveny jednotlivé konstrukční díly. Dále by se sem měla započítat i spotřeba olejů, řezných emulzí a dalších kapalin, které jsou pro výrobu a stavbu nezbytné. Zátěž životního prostředí těmito kapalinami se projevuje jejich odpařováním do ovzduší a vsakováním do půdy.
- **Zátěž vzniklá transportem a balením** – Vyrobený stroj je nutné zabalit a přepravit k zákazníkovi. Stroje se přepravují na vzdálenosti dosahující až desítky tisíc kilometrů. Mimo transport samotného stroje je třeba zahrnout i transport komponent použitých pro stavbu stroje k samotnému výrobcí. Redukce této zátěže je možné docílit volbou vhodného způsobu transportu k zákazníkovi, popřípadě nákupem komponent v blízkosti výrobce.
- **Zátěž vznikající samotnou funkcí stroje** – Dominantní zátěž v celém životním cyklu stroje. Tato zátěž je dána spotřebou elektrické energie vynaložené na realizaci primární funkce stroje a na funkce podpůrné. Náplní této dizertační práce je predikce spotřeby elektrické energie právě ve fázi užití stroje, bude téma rozvedeno dále
- **Zátěž spojená se spotřebním materiálem a údržbou** – Obráběcí stroje spotřebovávají během svého provozu množství materiálu, který je nutné průběžně doplňovat. Tím se především rozumí spotřeba řezných nástrojů, které se během řezného procesu opotřebovávají a v případě nešetrného zacházení častěji ničí. Dalším spotřebním materiálem je řezná a chladicí kapalina, používaná pro zlepšení parametrů řezného procesu. Těchto kapalin existuje více druhů dle druhu technologické operace.

Mezi ně se řadí například řezné emulze na bázi alkalických elektrolytů (soda, trietanolamin, popř. borax), hydrofilních mýdel, syntetické kapaliny na bázi polyglykolu a také řezné minerální oleje. Při používání těchto kapalin může docházet k úniku do atmosféry rozstříkem ve formě aerosolu, únikem do prostředí vsakováním do půdy, nebo v podobě par do atmosféry.

Z hlediska údržby je třeba doplňovat nebo vyměňovat i další provozní kapaliny, které přímo nesouvisí s řezným procesem, ale s bezproblémovým a dlouhodobým chodem stroje. Zde se mezi provozní kapaliny řadí různé převodové oleje, mazací oleje pro ložiska včetně a vodících ploch apod.

Vlivem opotřebení je během životnosti stroje nutné vyměnit i některé konstrukční prvky jako například ložiska, lineární vedení, kuličkové šrouby, motory atd. Tento stručný výčet je třeba zohlednit ve stanovení celkové bilance zátěže životního prostředí.

- **Zátěž recyklační a likvidační** – Každý stroj nezávisle na účelu jeho použití má omezenou životnost. V závislosti na způsobu používání stroje se mění i doba, během níž je stroj schopen vykovávat operace odpovídající jeho účelu.

Je patrné, že není možné na komponenty nahlížet pouze jedním způsobem. Komponenta, která je během používání velice energeticky úsporná nebo dosahuje vysoké účinnosti, v celkovém měřítku může mít vyšší zátěž na životní prostředí vlivem vysoké spotřeby prvotních surovin či dalších podpůrných materiálů pro výrobu. Může také být vyrobena z materiálu, který mimořádně škodí životnímu prostředí svojí výrobou, uvolňují se z ní škodlivé látky nebo není možné opětovné využití.

Dominantní zátěží z hlediska spotřeby elektrické energie, je fáze užívání a ostrého provozu stroje. A bude se jí tato práce zabývat detailněji dále.

4.3 Metody analýzy komponent obráběcího stroje

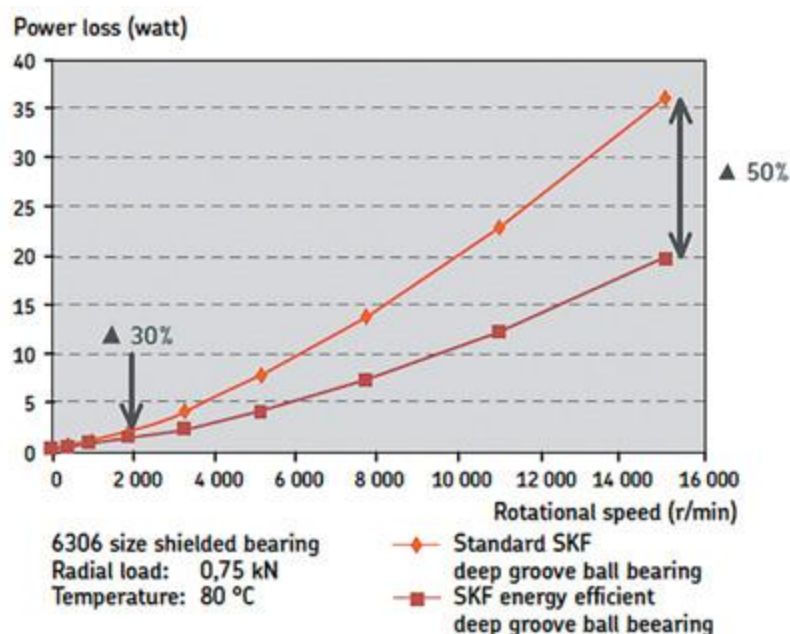
4.3.1 Analýza pasivních komponent

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. Jelikož jsou tyto komponenty často řazeny v kombinaci s jinými pasivními komponenty (kuličkový šroub, ložiska šroubu, valivé vedení) buď sériově, nebo paralelně, je obtížné jejich chování předpovědět i kvůli nedostatečným podkladům od výrobce komponent, který takovéto podklady standardně neuvádí. Z toho důvodu byly hodnoty ztrát získány experimentálně měřením na konkrétním zařízení, přičemž se analýzou a dopočtem získávala tzv. ztrátová funkce, která byla získána jako závislost velikosti koeficientu na posuvové rychlosti dané posuvové osy. Způsob získávání koeficientu ztrátové funkce lze shrnout do několika kroků:

- Změření aktuálního výkonu bez zatížení při různých posuvových rychlostech
- Získání průměrných hodnot aktuálního výkonu
- Srovnání reálného aktuálního výkonu a aktuálního výkonu bez pasivních ztrát

- Získání rovnice spojnice trendu hodnot koeficientů ztrátové funkce v závislosti na posuvové rychlosti mocninnou regresí

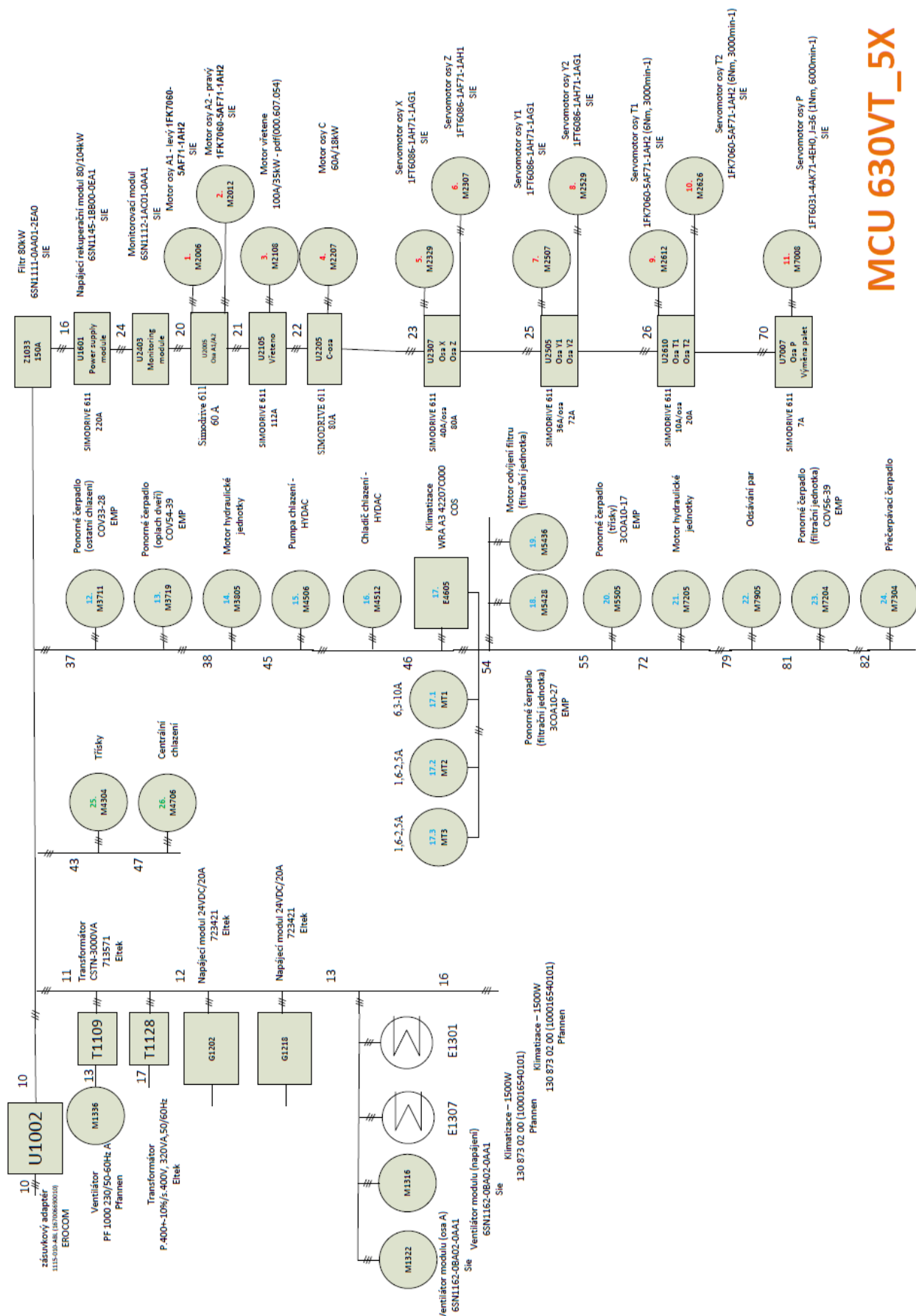
Tvar ztrátové funkce získané experimentálně je pak dosazen do řídicího matematického modelu, který přiřazuje každé posuvové ose velikost koeficientu, jež slouží jako násobitel reakční síly. Takto získaná síla pak působí jako odpor proti pohybu dané lineární osy rovnoběžně se směrem pohybu. Jako příklad nekonstantního průběhu ztrát v závislosti na posuvové rychlosti nebo na otáčkách může být doložen podklad firmy SKF na Obr. 9.



Obr. 9 Průběh energetických ztrát valivých ložisek v závislosti na otáčkách [7]

4.3.2 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. Jako příklad poslouží mapa spotřebičů uvedená na Obr. 10, která byla získána během řešení projektu FR-TI3/655 Ecodesign ve stavbě obráběcích strojů.



MCU 630VT_5X

Obr. 10 Mapa energetických spotřebičů stroje MCU 630VT [4]

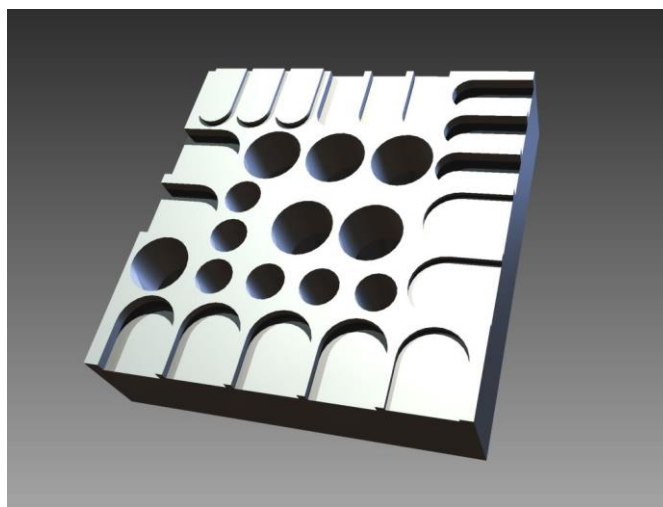
Tab. 1 Seznam a popis jednotlivých komponent stroje MCU 630VT [4]

Osa A1/A2	U2005			60A	Simodrive 611	
		1	M2006	3,3kW	1FK7060-5AF71-1AH2	
		2	M2012	3,3kW	1FK7060-5AF71-1AH2	
Vřeteno	U2105			112A	SIMODRIVE 611	
		3	M2108	100A/35kW	pdf(000.607.054)	D/Y
C-osa	U2205			80A	SIMODRIVE 611	
		4	M2207		60A/18kW	
Osa X/Z	U2307			40A/osa - 80A	SIMODRIVE 611	
		5	M2329	5,8kW	1FT6086-1AH71-1AG1	
		6	M2307	5,8kW	1FT6086-1AF71-1AH1	
Osa Y1/Y2	U2505			36A/osa - 72A	SIMODRIVE 611	
		7	M2507	5,8kW	1FT6086-1AH71-1AG1	
		8	M2529	5,8kW	1FT6086-1AH71-1AG1	
Osa T1/T2	U2610			10A/osa - 20A	SIMODRIVE 611	
		9	M2612	1,48kW	1FK7060-5AF71-1AH2	
		10	M2626	1,48kW	1FK7060-5AF71-1AH2	
Osa P	U7007			7A	SIMODRIVE 611	
		11	M7008	0,47kW	1FT6031-4AK71-4EH0	
Vnější chlazení		12	M3711	2,5-4A/0,8kW/2800min	COV33-28	
Oplach krytů		13	M3719	2,5-4A/2,55kW/2800min	COV54-39	
Hydraul. Agregát		14	M3805	2,5-4A/2,2kW		D/Y
Chlazení motoru vřetene		15	M4506	1,6-2,5A/1kW		
Chlazení motoru vřetene		16	M4512	2,5-4A/1,2kW		
Lednice Cosmotec		17	E4605	10A/6(13)kW	klimatizace - WRA A3 42207C000	
		17.1	MT1	6,3-10A		
		17.2	MT2	1,6-2,5A		
		17.3	MT3	1,6-2,5A		
Čerpadlo filtrační stanice		18	M5428	1-1,6A/0,32kW	3COA10-27	
Odvíjení filtru		19	M5436	0,4-0,63A/0,1kW		
čerpadlo dopravník třísek		20	M5505	1,1A/0,32kW	3COA10-17	
Hydraulika palety		21	M7205	6-10A/1,5kW		
Odsávání par		22	M7905	4-6,3A/2kW		
Čerpadlo filtrační stanice		23	M7204	6,1A/3,2kW/2800min	COV56-39	
čerpadlo přečerpávání		24	M7304	6,3A/3kW		
Dopravník třísek		25	M4304	1,1A/0,37kW		
Středové chlazení		26	M4706	6,3A/5kW		

Kvůli vyšší přehlednosti jsou všechny relevantní energetické spotřebiče vyneseny do tabulky (viz Tab. 1), kde jsou informace doplněny o všechna získaná data ohledně jejich příkonů, které se spolupodílejí na celkovém průběhu spotřeby elektrické energie. Zde se jedná pouze o přímé energetické spotřebiče, tedy komponenty, které přímo spotřebovávají elektrickou energii. Pasivní spotřebiče, které se projevují ve formě ztrát v jejich celkovém souhrnu, budou řešeny v následujících odstavcích. Tyto komponenty nejsou tedy přímými energetickými spotřebiči (není k nim přiveden zdroj elektrické energie), ale jsou nutné pro provoz stroje kvůli svým mechanickým vlastnostem, jako jsou například tuhost a odebrání určitého počtu stupňů volnosti mezi vstupním připojením a výstupním. Příkladem těchto pasivních spotřebičů jsou například ložiska či lineární vedení.

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. Jako příklad poslouží realizace experimentu výroby zkušebního obrobku dle normy JIS TS B 0024-1 [26]. Na Obr. 11 je axonometricky znázorněn tento obrobek sloužící pro posouzení energetické náročnosti jednotlivých technologických operací. Na tomto obrobku je možné experimentálně změřit dílčí technologické operace, které jsou typické pro frézky a frézovací centra. Cílem experimentu je porovnat naměřené hodnoty během různých technologických operací dané zkušebním obrobkem a dopočítaných hodnot výkonů vřetene u jednotlivých operací.



Obr. 11 Zkušební obrobek dle JISTS B 0024-1 [26]

Polotovarem obrobku je blok o rozměrech 95 x 95 x 30 mm z oceli C45 (12 050). Nejdříve se provede rovinné frézování frézou o ϕ 100 mm při různých posuvových rychlostech a s hloubkou záběru 0,5 a 1 mm. Poté se frézují drážky frézami o ϕ 10 mm a o ϕ 16 mm při různých posuvových rychlostech a s hloubkami záběru 1, 2 a 3 mm. Na závěr se vrtají díry o průměrech 10 a 16 mm při různých posuvových rychlostech.

Tab. 2 Srovnání měřených a dopočítaných aktuálních výkonů u různých technologických operací na zkušebním obrobku

Operace / nástroj	Hloubka záběru	Otáčky	Posuvová rychlost	Řezná rychlost	Posuv na zub	Výkon vřetene vypočítaný	Výkon vřetene změřený	Rozdíl výkonu	Procentuální rozdíl výkonu
	ap[mm]	n[RPM]	vf[mm/min]	vc[m/min]	fz[mm/ot]	Ps[W]	Psr[W]	ΔP[W]	ΔP[%]
Frézování Ø100mm VBD 9z	0,5	477	430	150	0,1	1250	3111	1861	59,8
	0,5	477	644	150	0,15	1690	3904	2214	56,7
	0,5	477	860	150	0,5	2100	4753	2653	55,8
	1	477	250	150	0,06	1660	4132	2472	59,8
	1	477	350	150	0,08	2140	5157	3017	58,5
	1	477	450	150	0,1	2580	6149	3569	58,0
Frézování Ø10mm HSS 4z	1	796	63	25	0,02	60	215	155	72,1
	1	796	127	25	0,04	100	290	190	65,5
	1	796	191	25	0,06	140	372	232	62,4
	2	796	63	25	0,02	120	223	103	46,2
	2	796	127	25	0,04	200	489	289	59,1
	2	796	191	25	0,06	270	584	314	53,8
	3	796	63	25	0,02	180	362	182	50,3
	3	796	127	25	0,04	300	599	299	49,9
	3	796	191	25	0,06	410	868	458	52,8
Frézování Ø16mm VBD 2z	1	2580	517	130	0,1	520	853	333	39,0
	1	2580	724	130	0,14	670	871	201	23,1
	1	2580	931	130	0,18	810	1223	413	33,8
	2	2580	517	130	0,1	1040	1429	389	27,2
	2	2580	724	130	0,14	1330	1718	388	22,6
	2	2580	931	130	0,18	1610	2002	392	19,6
	3	2580	517	130	0,1	1550	2070	520	25,1
	3	2580	724	130	0,14	2000	2583	583	22,6
	3	2580	931	130	0,18	2420	3070	650	21,2
Vrtání Ø10mm HSS	15	800	80	25	0,05	450	686	236	34,4
	15	800	95	25	0,06	510	884	374	42,3
	15	800	111	25	0,07	580	1044	464	44,4
	15	800	127	25	0,08	640	869	229	26,4
	15	800	143	25	0,09	700	1129	429	38,0
	15	800	160	25	0,1	760	1222	462	37,8
Vrtání Ø16mm HSS	15	500	30	25	0,03	490	548	58	10,6
	15	500	40	25	0,04	610	731	121	16,6
	15	500	50	25	0,05	720	923	203	22,0
	15	500	60	25	0,06	830	1018	188	18,5
	15	500	70	25	0,07	930	1160	230	19,8
	15	500	80	25	0,08	1030	1378	348	25,3

V tabulce Tab. 2 je provedeno shrnutí a rozbor jednotlivých technologických operací, které byly realizovány v rámci výroby zkušebního obrobku. Technologické parametry, které nejsou známy z jednotlivých nástrojů, byly dopočítány na základě empirických vztahů. Zejména důležitý je pro simulaci výkon na vřetení, který do jisté míry koresponduje s naměřeným výkonem. Naměřený výkon na stroji je ovlivněn ztrátami v celé soustavě a naměřený výkon musí být tedy vždy větší. O kolik je větší závisí na účinnosti motoru při daných podmínkách a na účinnosti mechanismů zajišťujících otáčivý pohyb vřetene. Výpočet příkonu motoru lze pak matematicky vyjádřit rovnicí (76). Další výpočty technologických parametrů jako řezná rychlost a posuv na zub jsou jednoznačně definovány ve strojírenských tabulkách, a proto zde nejsou uváděny. Pro výpočet výkonu se uvádí několik možností výpočtu, v této práci je uveden výpočet, který byl vybrán pro dopočet předpokládaného výkonu na motoru:

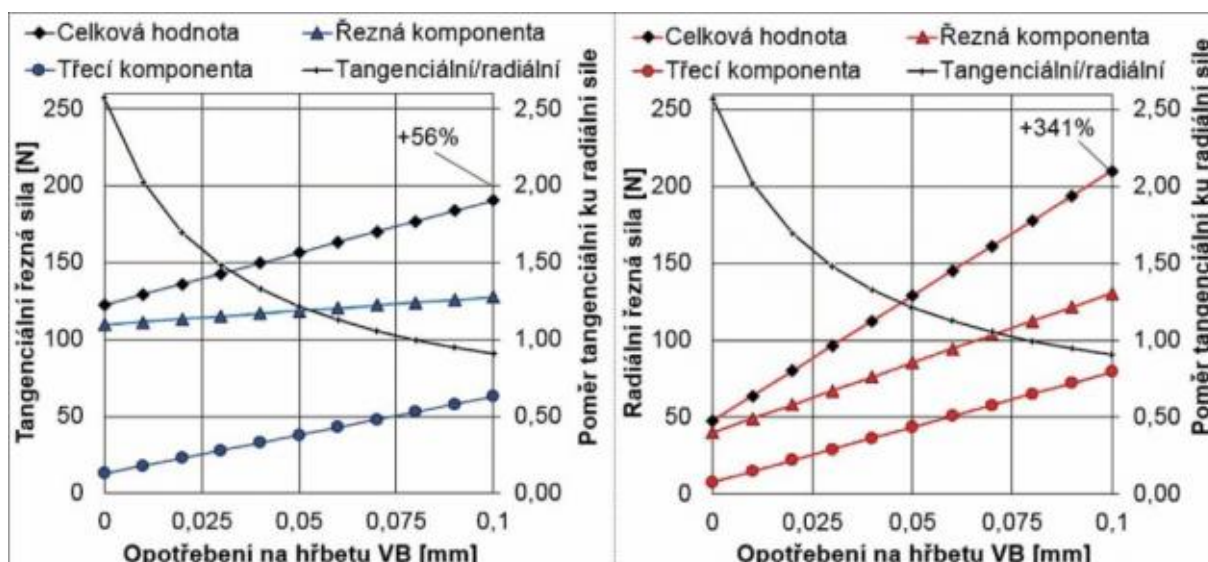
$$P_{mot} = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f \cdot k_c}{6 \cdot 10^7 \cdot \eta} [kW], \quad (76)$$

kde a_p představuje hloubku řezu, a_e šířku řezu, v_f posuvovou rychlost, k_c specifickou řeznou sílu, která je dále specifikována v rovnici (77) a η představuje účinnost systému.

$$k_c = \frac{1 - 0,01 \cdot \gamma_0}{h_m^{m_c}} \cdot k_{c1.1} [N/mm^2], \quad (77)$$

kde γ_0 představuje úhel čela břitů nástroje, h_m střední tloušťku třísky, m_c je koeficient nárůstu křivky k_c a $k_{c1.1}$ představuje specifickou řeznou sílu; m_c a $k_{c1.1}$ jsou tabulkové hodnoty koeficientů získané od výrobce nástrojů.

Srovnáním dopočítaných a změřených výkonů na motoru došlo ke značnému rozdílu mezi těmito hodnotami, které jsou vyjádřeny prostřednictvím rozdílové a procentuální chyby mezi naměřeným a dopočítanými daty. Chyba se pohybuje v rámci různých technologických operací v intervalu od 10,6 % do 72,1 %. V tomto případě se nejedná o trend, který je pouze posunutý o výchylku způsobenou neznámými jako například již zmiňovanou účinností, ale o ukázkou orientačních hodnot při srovnání se skutečností, která by vnášela do simulace značnou chybu. Pro dostatečnou přesnost simulace by pak bylo nutné experimentálně vyhodnotit technologické operace při rozdílných technologických podmínkách a zjistit zákonitosti platící obecně pro každou technologickou operaci. Je patrné, že tímto odhadem lze získat s jistotou mírou chyby a předpokladem předdimenzování podklady pro návrh motoru při použití neopotřebovaného nástroje. Pro účely simulace jsou tato data nevhodná. Pro řešení této problematiky se nabízí postup jinou metodou, jako je například analýza pomoci metody konečných prvků nebo vytvoření dostatečně velké databáze popisující závislosti řezných sil na posuvu, přísuvu do hloubky, řezné rychlosti a opotřebení nástroje, podobně jak je tomu na Obr. 12.



Obr. 12 Analýza řezných sil při frézování drážkovací frézou do materiálu 12 050.1 [5]

Předpověď velikosti potřebných řezných sil pro dané obrábění a z toho vyplývajícího příkonu motoru je problematikou, ke které je nutné přistupovat komplexně a zapojení predikce energetických ztrát při obrábění do této práce by značně přesahovalo rámec disertační práce. Predikce energetických ztrát během obrábění je navíc vhodná spíše než pro konstruktéry pro technology a programátory CNC strojů. Na trhu je dostupný dostatečně široký sortiment řezných nástrojů vhodných pro různé technologické operace, což neumožňuje samotným konstruktérům tuto složku energetického profilu nějak zásadně ovlivnit. Jediné, co je možné ovlivnit, je velikost výkonové špičky při rozběhu vřetene snížením nebo zvýšením momentu setrvačnosti a použitím účinnějších ložisek snížit valivé tření. Tato práce zaměřená na metodu predikce spotřeby obráběcích strojů nadále složku spotřebované energie na vřeteno a řezným procesem nezahrnuje, protože konstrukčním procesem lze ovlivnit spotřebu energie způsobenou posuvovými mechanismy.

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.

4.5.1 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. Program čte řádky zleva doprava, je tedy nutné zachovat pořadí obecného formátu bloku G-kódu.

Slovo		Slovo		Slovo		Slovo	
Adresa	Číslice	Adresa	Číslice	Adresa	Číslice	Adresa	Číslice
N 10		G 1		X 100		F 300	
Blok							

Obr. 13 Uspořádání adres G-kódu [21]

Obecně je formát bloku uspořádán do následující struktury:

N... G... X... Y... Z... F... S... T... D... M... H...

Adresa.....Význam

N.....adresa čísla bloku

G.....podmínka dráhy

X, Y, Z.....informace o dráze

F.....posuv

S.....otáčky

T.....nástroj

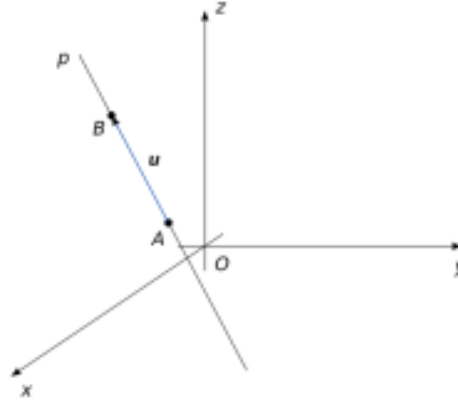
D.....korekční hodnoty nástroje

M.....doplňková funkce

H.....pomocná funkce

Nejdříve proběhne analýza všech bloků G-kódu tak, aby byla sestavena matice všech koncových bodů každého řádku funkce. Pro jednoduchost není zahrnuta adresa jednotlivých bloků, neboť překladač není uzpůsoben pro upozornění na chybu v kódu. Dále jsou podmínky dráhy nebo M funkce převedeny pomocí příkazu „cell2mat“ na číselky identifikující dané písmeno (například M odpovídá číslu 77 a G odpovídá 71 atd.). To je provedeno kvůli dalším operacím v MATLABu. Poté je možné identifikovat jednotlivé bloky podle významu. V tomto provedení je možné vytvářet lineární interpolace (G01), rychloposuv (G00), načtení nástroje z tabulky nástrojů (M06), zvolení otáček vřetene po a proti směru otáčení hodinových ručiček (M03 a M04), zastavení otáček vřetene (M05), posunutí pracovního souřadného systému (G54), zrušení pracovního souřadného systému (G53) a technologická časová prodleva (G04). Programováním dalších funkcí je možné tento sortiment značně rozšířit. V úvahu především vstupuje kruhová interpolace G02 a G03, které jsou užívány univerzálně. Při nasazení překladače na konkrétní stroj je dále nutné dodat veškeré subsystémy, které jsou programově spouštěny pomocí G-kódu.

Po identifikaci daného bloku dojde k výkonu daného požadavku na operaci. V případě G-funkce dojde k parametrickému přepočtu vytvořeného na základě výpočtů analytické geometrie v prostoru. U lineární interpolace a stejně tak u rychloposuvu jde o parametrické vyjádření přímky v prostoru.



Obr. 14 Parametrické vyjádření přímky [17]

Množinu koncových bodů můžeme vyjádřit jako dvourozměrný vektor, který obsahuje jejich x, y a z-ové souřadnice viz (78).

$$U = \begin{bmatrix} Ax & Ay & Az \\ Bx & By & Bz \end{bmatrix} \quad (78)$$

Se znalostí bodů můžeme vypočítat vektor posunutí mezi těmito body a parametrickým vyjádřením a můžeme spočítat i samotný parametr v (80) a (81). Odmocněním součtu čtverců jednotlivých složek vektoru posunutí dostaneme velikost posunutí. Parametr funguje jako násobitel dané složky vektoru posunutí, díky čemuž je možné spočítat velikost dané složky vektoru rychlosti a zrychlení. Výpočet posunutí a parametrů rychlosti a zrychlení jsou pak definovány následovně:

$$|\bar{u}| = \sqrt{(Bx - Ax)^2 + (By - Ay)^2 + (Bz - Az)^2} \quad (79)$$

$$PAR_v = \frac{v_{pož}}{|\bar{u}|} \quad (80)$$

$$PAR_a = \frac{a_{pož}}{|\bar{u}|} \quad (81)$$

Roznásobením dané složky vektoru a parametru dostáváme vektor rychlosti (82) a zrychlení (83) pro daný posuv z bodu A do bodu B definovaný v samotném G-kódu. Požadované zrychlení je stanoveno na základě vstupních hodnot. U experimentu č. 1 (viz kapitola 6.1) s lineární osou je možnost zrychlení ovlivnit přímo v ovládání pohonu, o obráběcích strojů je zrychlení definováno v systému, v kap. 6.2 měřeními ověřeno na hodnotu 2,0911m/s²

$$\bar{v} = ((Bx - Ax) \times PAR_v; (By - Ay) \times PAR_v; (Bz - Az) \times PAR_v) \quad (82)$$

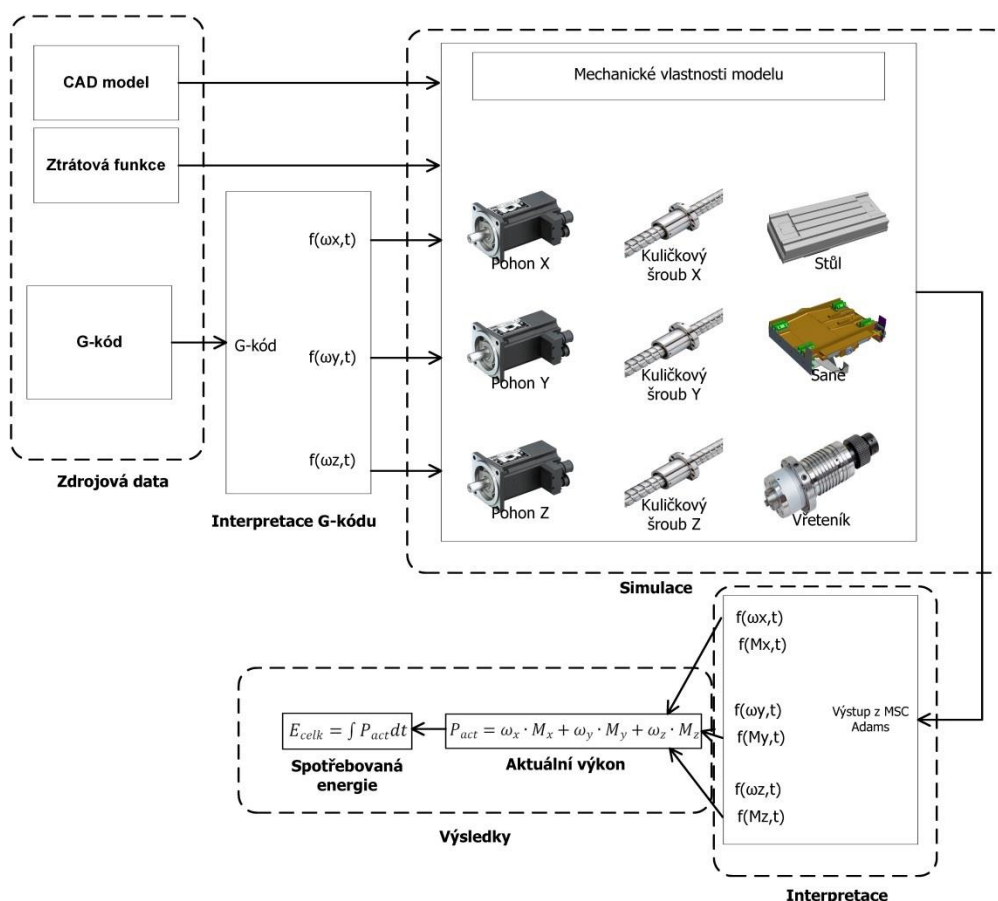
$$\bar{a} = ((Bx - Ax) \times PAR_a; (By - Ay) \times PAR_a; (Bz - Az) \times PAR_a) \quad (83)$$

Tímto způsobem získáváme 2 dvourozměrné vektory obsahující požadované rychlosti a zrychlení rozložené do složek dle souřadného systému. Zápis pak odpovídá posunutí z jednoho bodu do druhého dle vektoru koncových bodů U.

4.5.2 Řízení simulačního modelu

Na Obr. 15 je znázorněno blokové schéma simulace obráběcího stroje během technologického procesu. 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. Dále jsou načteny technologické parametry procesu, jmenovitě například: rychlosti posuvu, směr otáčení vřetene, číslo nástroje, posunutí souřadného systému atd. Na základě technologických parametrů a bodů, v nichž se má nástroj během cyklu nacházet, je pak dle požadovaného vzorkování vytvořena matice s průběhem úhlových rychlostí. Tato matice slouží jako vstupní proměnná do simulačního software MSC Adams, kde je na základě modelu provedena konfigurace tříosé CNC frézky s definovanými vazbami, geometrií a materiály. Matice úhlové rychlosti slouží jako řídicí proměnná ovlivňující rotaci kuličkových šroubů. Přes šroubový spoj jsou k jednotlivým kuličkovým šroubům připojeny odpovídající konstrukční uzly jako stůl, saně a vřeteník.

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.



Obr. 15 Blokové schéma simulačního modelu obráběcího stroje během technologického procesu

4.5.3 Multi body simulace

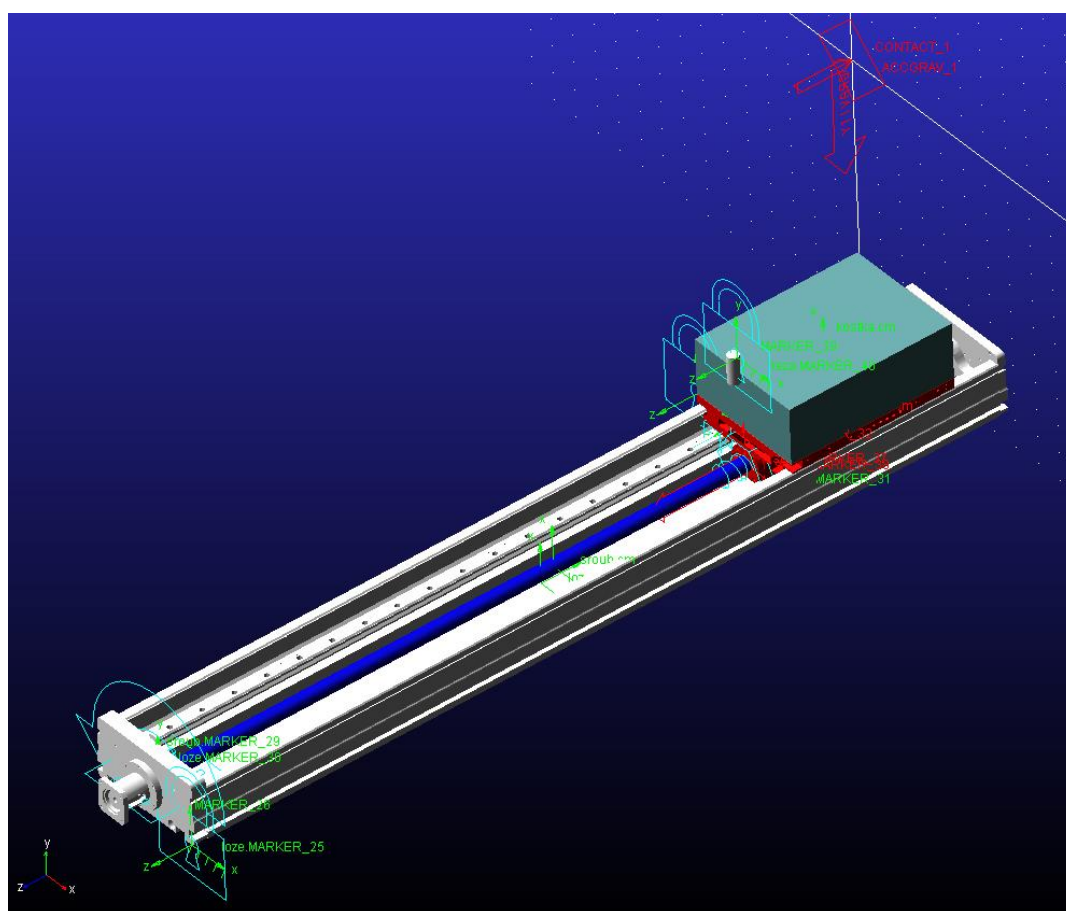
Jako fyzikální model slouží CAD model stroje, který je analyzován. Čím je kompletnější, tím simulace poskytne přesnější výsledek energetické náročnosti v rámci technologického procesu. Teoretický způsobu zpracování modelu viz kapitola 5.2.5 Zpracování CAD modelu. Vyexportované podsestavy ve formátu STP umístíme do prostředí MSC Adams.

Importované podsestavy je vhodné vkládat do programu v podobě SOLID, čímž je zajištěno, že je možné přiřazovat jednotlivým dílcům materiál, a tedy i dopočítat hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých komponent, což je nezbytnou podmínkou pro zjišťování energetické bilance stroje. V rámci tohoto softwaru je možné nechat hmotnosti a momenty setrvačnosti dopočítat na základě geometrie a definovaného materiálu nebo přímo zadat mechanické parametry komponent na základě jejich znalostí ručně. Umístění jednotlivých podstav v modelu může být zjednodušeno během přípravy modelu, a to tím způsobem, že se exportuje do STP modelu podsestava s totožným souřadným systémem, jaký má celková sestava stroje. Protože Adams umísťuje během importu modely tak, aby počátek importovaného modelu odpovídal počátku modelu v Adams, je možné si model nachystat do výchozího stavu a podsestavy se automaticky naskládají dle požadavku.

Dalším krokem pro přípravu fyzikálního modelu je přiřazení a nastavení vazeb pro jednotlivé dílce. V rámci podstav jsou jednotlivé díly (solids) spojeny pevnou vazbou, ale

v rámci modelu mají jednotlivé podsestavy (bodies) ve výchozím stavu 6 stupňů volnosti. Je tedy nutné fixně spojit základní nosnou strukturu stroje s pomyslným základovým dílem (ground). Tím je zajištěno, že hlavní nosná struktura bude ve své poloze. Správnou volbou a nastavením orientace posuvných vazeb pro lineární osy je dosaženo sestavení hlavních dílců. Otočnými vazbami se přidávají kuličkové šrouby (to záleží na konfiguraci pohonů). Velmi důležité je poté správně konfigurovat šroubovou vazbu mezi maticí kuličkového šroubu a šroubem samotným. Kde jde především o zadání odpovídajícího stoupání.

Pro řízení jednotlivých os je nezbytné nastavit jednotlivé pohyby (motions). Pohyby se přiřazují jednotlivým vazbám a konkrétně v případě konfigurace stroje s kuličkovými šrouby se pohyb přiřazuje rotační vazbě, která umožňuje šroubu právě jeden stupeň volnosti, a to otáčení kolem podélné osy šroubu. Do tohoto pohybu se dále definuje požadovaná vstupní veličina. V tomto případě je to úhlová rychlost kuličkového šroubu, která je získávána z časové parametrizace úhlové rychlosti v Matlab Simulink.



Obr. 16 Ukázka modelu v simulačním software

Kvůli propojení Matlab Simulink a MSC Adams je zapotřebí definovat vstupní výstupní proměnné neboli tzv. „State variable“. Ty slouží jako komunikační prostředek mezi těmito programy. Vstupní veličiny jsou zapisovány z vnějšího prostředí Matlab, pomocí nichž je simulace řízena. Výstupní proměnné jsou definovány příslušným měřením v MSC Adams neboli (measurement). Měření je možné přiřadit libovolným sledovatelným mechanickým veličinám a vztahuje se k vazbám, pohybům, silám a tělesům. U navrhovaného postupu je sledován krouticí moment, otáčky šroubu, aktuální mechanický výkon, posunutí apod.

Po správné konfiguraci je potřeba vygenerovat pomocí funkce „plant export“ skript pro Matlab, který umožňuje načíst požadované proměnné do programu. Postup přípravy fyzikálního modelu umožňující „multi-body“ simulaci opětovně přehledněji shrnutý zde:

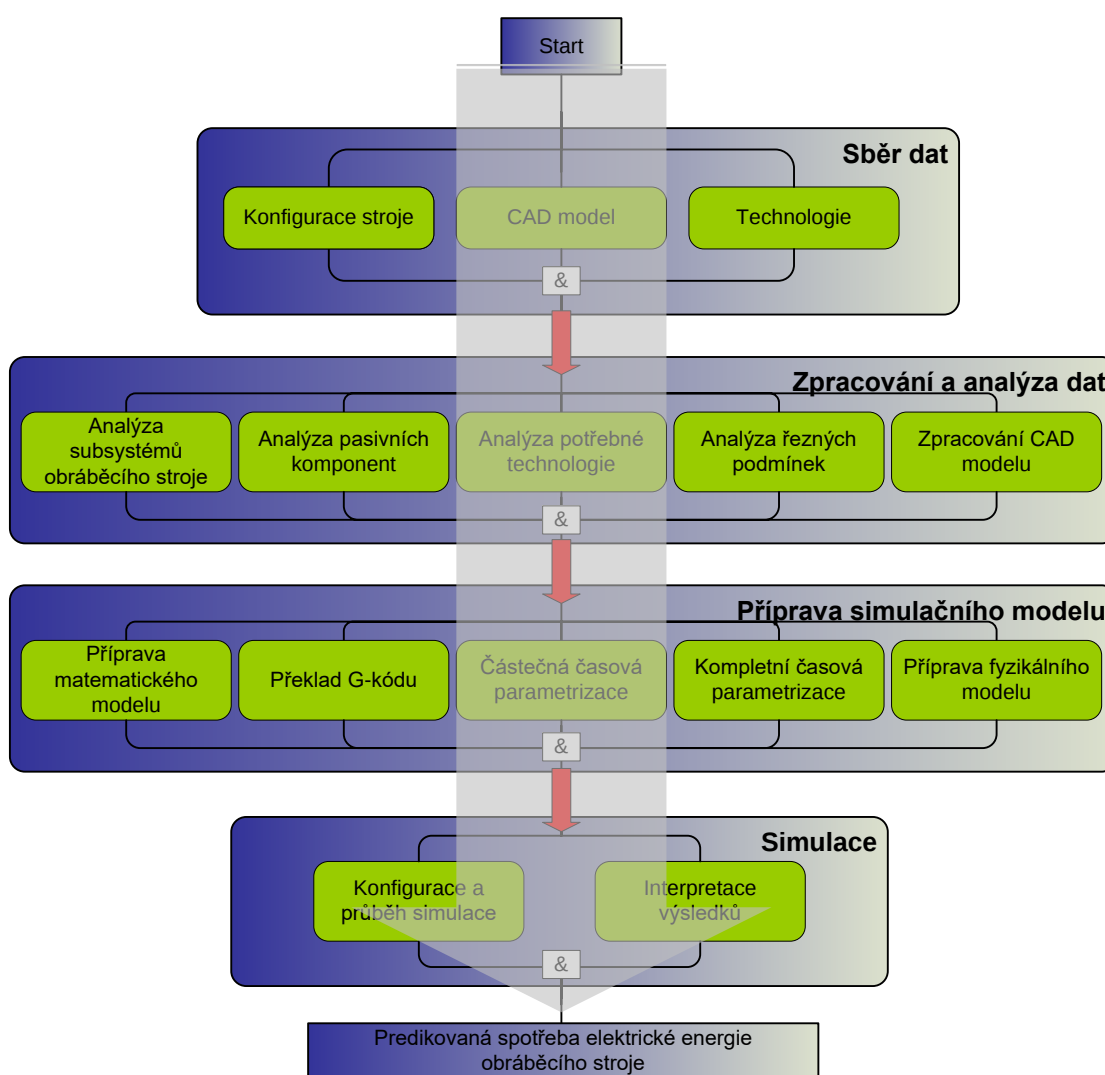
- 1) **Import podsestav z formátu STP.** Je nutné importovat modely jako těleso typu „solid“ tak, aby bylo možné tělesům přiřadit hmotnost, materiál nebo moment setrvačnosti. Modely podsestav jsou exportovány z CAD s totožným souřadným systémem, tedy není nutné v prostoru definovat umístění. Pro větší přehlednost je vhodné v rámci importu jednotlivé podsestavy pojmenovat.
- 2) **Definice materiálů, hmotností a momentů setrvačnosti.** Následujícím krokem je zadání definice jednotlivých materiálů (pokud jsou známy) do simulačního software. Je zde možnost všechny hodnoty zadat ručně, nebo jen ze seznamu vybrat materiál a přiřadit ho k danému dílci. Pozice těžiště, hmotnost a moment setrvačnosti je následně dopočítán.
- 3) **Tvorba vazeb modelu.** Jelikož se modely importují postupně, vazby definované v CAD software nejsou zachovány. Vazby definované v CAD softwaru v rámci podsestavy (kdy je podsestava importována jako celek) dochází k nahrazení použitých vazeb pouze pevnou vazbou a nelze s nimi dále pracovat. V rámci podsestav to nepředstavuje žádné komplikace. Mezi jednotlivými podsestavami je ale nutné vazby vytvořit. Nejprve začínáme zafixováním nosné části (lože) stroje vůči tělesu „ground“. To je provedeno vazbou „fix“, která odebere všechny stupně volnosti dané podsestavy. Dále postupujeme vytvořením příčných vazeb mezi dalšími podsestavami. V případě obráběcích strojů je obvykle vytvořena translační vazba mezi stolem a ložem, rotační vazba mezi šroubem a ložem a šroubová vazba mezi kuličkovým šroubem a posuvným stolem. Dále je nutné v šroubové vazbě definovat stoupání šroubu na jednu otáčku, což je provedeno definicí přímo v editaci parametrů dané šroubové vazby. Při tvorbě každé vazby je nutné vybrat referenční bod dané vazby a její orientaci.
- 4) **Definice proměnných.** Proměnné zajišťují komunikaci mezi řídicím a simulačním softwarem. Proměnné se definují funkcí „state variable“. Definovány jsou ty proměnné, které slouží jako vstup a výstup simulačního software. Při aplikaci na libovolnou lineární osu jsou vybrány vstupní proměnné úhlová rychlosti kuličkového šroubu, posuvová rychlost stolu a odporová síla. Výstupní proměnné pak definují krouticí moment na kuličkovém šroubu, úhlovou rychlost kuličkového šroubu a dopočítaný aktuální výkon na kuličkovém šroubu. Úhlovou rychlost a výkon není nutné přímo exportovat ze simulace, ale je tak činěno z důvodu následného snazšího zpracování dat. Čím více proměnných se nachází na výstupu ze simulačního software, tím je variabilita využití výsledků větší, ale dochází ke ztrátě přehlednosti dat v samotné simulaci.
- 5) **Nastavení vnějších sil.** Aby se soustava v simulačním softwaru mohla uvést do pohybu, je nutné definovat vnější síly, které budou se soustavou pohybovat. U zařízení na Obr. 16 je použit krouticí moment vyvolávající rotační pohyb, kdy jsou řízeny otáčky kuličkového šroubu na základě požadované úhlové rychlosti. Ta vstupuje do simulace v podobě vnější proměnné z řídicího software. Další vnější silou je právě síla pasivních odporů působící proti pohybu. Vstupním parametrem ze řídicího softwaru je

hodnota násobitele reakční normálové síly upínacího stolu. Síla, jež působí proti pohybu je pak definována jako součin násobitele a normálové síly, čímž je dosaženo proměnlivé velikosti této síly v závislosti na rychlosti posuvu. Vstupní parametr určuje orientaci síly tak, aby síla působila vždy proti směru pohybu a to pomocí příslušného znaménka.

- 6) **Nastavení sledovaných veličin.** Po aplikaci vazeb na měřicí stand, je nutné definovat proměnné, které chceme sledovat. Sledované proměnné je možné pomocí funkce „measures“ v reálném čase sledovat a v řídicím softwaru následně zaznamenat jejich průběh. Název daného měření je pak nezbytné uvést jako proměnou do příslušných „state variables“, aby mohl být proveden export signálu do řídicího softwaru.
- 7) **Export ovládacích prvků fyzikálního modelu.** V momentě, kdy je fyzikální model připraven, jsou nadefinovány vazby a vstupní a je popřípadě i výstupní proměnné, je požadováno provést tzv. export ovládacích prvků. To se provede pomocí funkce „plant export“, kde se definují vstupy a výstupy simulace. Exportem dojde k vytvoření knihovny, která se následně načte v kontrolním softwaru. Knihovna definuje všechny parametry fyzikálního modelu včetně vazeb, těles, proměnných vstupních a výstupních hodnot.
- 8) **Načtení a spárování fyzikálního a matematického modelu.** Pro chod simulace je nadále nutné spárovat fyzikální a matematický model tak, aby společně fungovaly v reálném čase. Nejdříve je nutné do matematického modelu pomocí příkazu „adams_sys“ načíst blok subsystému Adams. Tento blok má definovaný počet vstupů a výstupů daný z předešle načtené knihovny. Blok pak znázorňuje funkci fyzikálního modelu a zároveň simulačního software a v rámci bloku subsystému je možné zvolit si interaktivní simulaci, kdy se otevře okno se simulačním software a je možné sledovat průběh simulace na fyzikálním modelu. To je vhodné zejména při hledání situací, při kterých se výsledek vymyká očekávaným hodnotám, což může být zapříčiněno chybou v definici. Další možností je volba tzv. „batch“ simulace, která je úspornější na výpočetní výkon počítače, protože výpočet probíhá v rámci procedur, které fungují na pozadí uživatelského rozhraní. Není zde možné kontrolovat průběh simulace, ale v případě dobře definovaného modelu dojde ke zkrácení simulačního času.

5 NÁVRH METODY PREDIKCE SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

Navrhovaná metoda určování spotřeby elektrické energie během fáze vývoje má za účel jednoduše shrnout všechny dostupné relevantní údaje o komponentech, které se přímo i nepřímo se podílejí na celkovém energetickém profilu stroje. Není cílem vytvářet složité matice definující chování celého stroje komplexně, ale spíše vytvořit jednoduše použitelnou metodu, která může být nasazena ve výrobním podniku bez nutnosti vytvářet pozice s vysokými požadavky na personální obsazení. Pomocí navrhované metody mohou konstruktéři kontrolovat průběh spotřeby elektrické energie stroje, během konání funkce, ke které je konstruován a bude vyroben. Na Obr. 17 je schematicky znázorněna metoda určující členění jednotlivých kroků, které je nutné absolvovat. Detailní postup, jakým byla metoda použita v rámci verifikačního a validačního experimentu je uveden na Obr. 63.



Obr. 17 Schéma metody predikce spotřeby elektrické energie během fáze vývoje

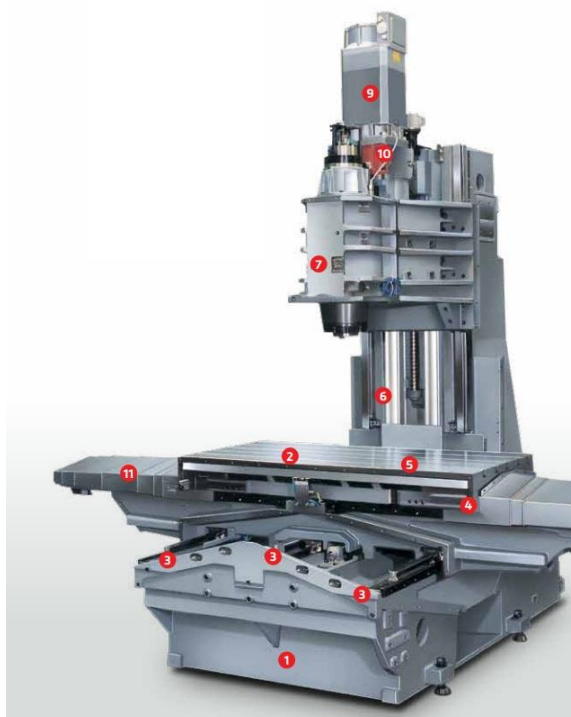
5.1 Sběr dat

Nejdůležitějším východiskem pro realizaci přesné simulace je získávání kompletního přehledu o tom, k jakému účelu bude stroj sloužit, z čeho se bude skládat a jak bude

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, periferií 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. Hodnocení je pak možné na základě celkového průběhu, kdy je možné postupně zlepšovat energetický profil zařízení výměnou komponent za vhodnější. Výsledným kompromisem mezi užitnými vlastnostmi, energetickým profilem a cenou pak je, zda se toto opatření vyplývající z analýzy uplatní nebo ne. Specifické požadavky na dané kategorie budou detailněji popsány v následujících odstavcích.

5.1.1 Konfigurace stroje

Pro prvotní představu je nutné získat co nejpřesnější informace o stroji podle přání zákazníka, popřípadě dle požadavků série, ve které je stroj vyráběn. Stroje stejné řady se od sebe ve svém nasazení můžou značně lišit právě konfigurací. Konkrétně je myšleno množství periferních zařízení, které jsou se strojem dodávány, jako volitelné příslušenství a nemusí tedy být u daného stroje použity. Modelová řada tedy vychází z prvotní koncepce nosných částí, základního příslušenství a osazené vřetenem. K základnímu konceptu stroje se přidávají další opce, dle přání zákazníka, které rozšiřují technologické možnosti samotného stroje. K tomuto rozšíření je pak nutné přihlížet i z pohledu energetické náročnosti, protože přídatná zařízení s sebou mohou přinášet i zvýšení energetické náročnosti, pokud jsou energetickými spotřebiči.



Obr. 18 Ukázka základních konstrukčních uzlů obráběcího stroje [30]

Na Obr. 18 je vidět základní koncept obráběcího stroje se základním příslušenstvím. Jsou zde ukázány jen nosné části, pohony jednotlivých os, vřeteno, krytování lineárních os, vedení lineárních os a ustavovací prvky. V této podobě stroj není distribuován. Chybí zde krytování

celého pracovního prostoru, rozvaděčová skříň s řídicím systémem a interface pro ovládání stroje operátorem. Veškeré běžné a zvláštní příslušenství (v tabulce jen subsystémy) poskytované ke stroji je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3 Shrnutí konfigurace obráběcího stroje

Subsystém OS	Proměnlivá X konstantní spotřeba	Přímý vliv na řezný proces	Možnost zahrnutí do simulačního modelu
Vřeteno	Proměnlivá	Ano	Ano
Osa X	Proměnlivá	Ano	Ano
Osa Y	Proměnlivá	Ano	Ano
Osa Z	Proměnlivá	Ano	Ano
Osa C	Proměnlivá	Ano	Ano
Vnější chlazení	Konstantní	Ano	Ano
Chlazení středem nástroje	Proměnlivá	Ano	Ano
Oplach pracovního prostoru	Konstantní	Ne	Ano
Osvětlení pracovního prostoru	Konstantní	Ne	Ne
Hydraulický agregát	Konstantní	Ne	Ne
Chlazení motoru vřetene	Konstantní	Ne	Ne
Výměník nástroje	Konstantní	Ne	Ano
Zásobník nástrojů	Konstantní	Ne	Ano
Výměník obrobků	Konstantní	Ne	Ano
Dopravník třísek	Konstantní	Ne	Ano
Filtrace chladicí kapaliny	Konstantní	Ne	Ne
Odsávání par	Konstantní	Ne	Ne

V Tab. 3 jsou shrnuty jednotlivé subsystémy obráběcího stroje, se kterými je možné se běžně setkat. V kroku konfigurace stroje vyvinuté metody je potřeba analyzovat, jakým způsobem se zapojují do technologického procesu. První sloupec tabulky označuje konkrétní subsystémy obráběcích strojů. Další sloupce tabulky popisující daný subsystém obráběcího stroje a jsou podkladem pro další kroky metody. Zda je časový průběh konstantní nebo proměnlivý je podklad pro krok popsáný v kapitole: 5.2.1.. Třetí sloupec shrnuje, zda má daný subsystém přímý vliv na řezný proces nebo zda vykonává pouze podpůrnou funkci. Poslední sloupec je důležitý z hlediska zahrnutí do simulačního modelu. V případě simulačního modelu uvedeného v této práci byly dále zpracovány jen ty komponenty, které je možné řídit pomocí G-kódu. K těmto položkám, jež vykazují pozitivní relevanci, je nutné přistupovat tak, aby je bylo možné zapracovat do matematického modelu. Je nutné znát bližší informace ohledně jejich chování při nasazení v technologickém procesu, i fakt, zda se z pohledu energetické náročnosti chovají konstantně nebo proměnlivě v závislosti na probíhající technologické

operaci. Pod konstantním chováním si můžeme představit příkladu: dopravník třísek, který jede po zapnutí konstantně a průběh aktuálního výkonu je tedy charakteristický zvýšenou hladinou, ale nedochází v rámci jeho funkce k znatelným změnám. Naopak proměnlivě se může chovat například středové chlazení nástroje v závislosti na průměru trysky na nástroji a na úrovni jejího znečištění, což se v celkovém průběhu výkonu stroje projevuje u rozdílných nástrojů různě a to podle množství a průměru trysek pro vnitřní chlazení nástroje. Jde o velikost hydraulické ztráty vzniklé prouděním řezného média skrz celou chladicí soustavu a nástroj. Vlastnosti jednotlivého základního i zvláštního příslušenství je nutné dále více do detailu analyzovat.

5.1.2 CAD model

Dalším výchozím informačním zdrojem pro analýzu je CAD model, který slouží jako podklad pro výrobní dokumentaci. V případě analýzy není vyžadován do detailu provedený model, neboť například u odlitků hlavních nosných struktur stroje se nachází množství zaoblených ploch a úkosů, které celkový výpočet během analýzy komplikují množstvím polygonů, které musí být dopočítávány a dochází k vysokým požadavkům na výpočetní výkon počítače. Od čehož se odvíjí délka simulace, která se může prodloužit až na několik dnů, což nelze považovat za přípustné, zvláště pokud se jedná o prodloužení simulace pro velký počet polygonů. Nejdůležitějšími parametry jsou zejména hmotnost dílců a jejich momenty setrvačnosti vztažené k ose otáčení. Z CAD modelu je pak patrné konstrukční řešení jednotlivých posuvových os, popřípadě i použitý princip vedení. I zde je nutné komunikovat s konstruktérem analyzovaného stroje.

5.1.3 Technologie

Z předešlého shromažďování dat již známe, v jaké konfiguraci se stroj bude nacházet, jakými subsystémy a periferiemi bude osazen a jak budou vypadat jeho jednotlivé díly. Technologie, kterou bude stroj využívat, je tak posledním důležitým aspektem podílejícím se na energetickém profilu obráběcího stroje. Technologií se rozumí typická aplikace daného stroje, u kterého bude simulována jeho budoucí spotřeba a technologické cykly využívány během jeho provozu. U stroje, u kterého se bude předpokládat univerzální použití (kusová a malosériová výroba) je obtížné aplikaci stanovit. Proto je vhodné využít normou stanovený obrobek využívající typického užití pro daný druh obráběcího stroje. U strojů s předpokládaným užším spektrem využití je možné uvažovat typický obrobek s danými technologickými operacemi, které jsou definovány G-kódem (ISO kódem) definujícím daný technologický cyklus, jinak opět užijeme typizovaný obrobek z normy [26]. Cyklus dále analyzujeme pro simulaci průběhu aktuálního výkonu.

5.2 Zpracování a analýza dat

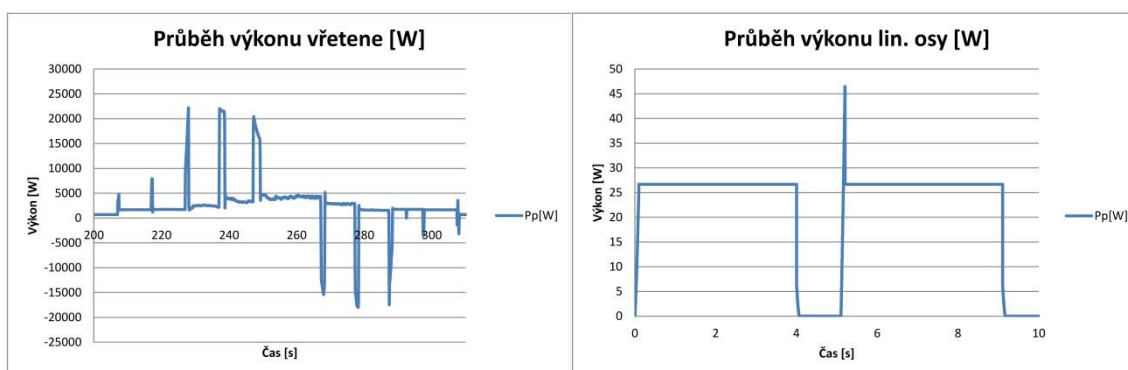
Po fázi sběru dat, kdy je vytvořen co nejvíce kompletní obraz o analyzovaném stroji ve fázi vývoje, je zapotřebí nasbíraná data o stroji analyzovat a vytvořit na základě těchto dat matematický a fyzikální model analyzovaného stroje a technologického cyklu. Cílem analýzy je zjistit údaje, které již budou 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.

5.2.1 Analýza subsystémů obráběcího stroje

Analýza subsystémů poskytne informaci o provozu jednotlivých spotřebičů („aktivních součástí stroje“). Jednotlivé komponenty se mohou v provozu chovat fixně nebo proměnlivě, jak bylo zmíněno v předešlé kapitole. Tato problematika zde byla vztažena především k periferním zařízením, které vykonávají spíše podpůrnou funkci během technologického procesu, a lze konstatovat, že jejich chování není proměnlivé. Pro zjednodušení simulace se budou periferní zařízení dále brát jako fixní energetické spotřebiče s konstantním aktuálním výkonem, což do důsledku znamená, že během jejich chodu bude nárůst spotřeby elektrické energie lineární a aktuální výkon (první derivace průběhu energie podle času) bude rovnoběžný s horizontální osou.

Samotný stroj je pak nutné zmapovat právě z pohledu zapojených energetických spotřebičů a vytvořit si přehled o typech a příkonech jednotlivých komponent, tak aby bylo možné do simulace zakomponovat, pokud možno všechny spotřebiče. Pro názornost je již předem vhodné sestavit mapu energetických spotřebičů (viz kapitola: 4.3.2).

Hlavní konstrukční uzly, jako například vřeteno a pohony jednotlivých posuvových os, mají charakter proměnlivý. Dochází k změně trendu spotřeby elektrické energie, popřípadě ke změně jejich aktuálního výkonu na základě požadavků technologického procesu. Například na vřeteno jsou kladeny vysoké požadavky na dynamiku kvůli snížení času rozběhu na požadované otáčky. S tím souvisí i zvýšený špičkový výkon, který je nutný během rozběhu vřetene pro překonání setrvačných sil. Pokud by vřeteno bylo uloženo dokonale (bez tření), po skončení rozběhu na požadované otáčky už by nespotebovávalo žádnou energii, reálně ale dochází ke spotřebě energie nutné pro překonání valivého odporu ložisek a ke spotřebě energie dané samotnými ztrátami v ložiscích. Ložiska se taktéž nechovají konstantně při různých otáčkách a dochází tak k nárůstu spotřebovávané energie vzhledem k narůstajícím otáčkám vřetene. Pokud by se vzal v potaz i různý moment setrvačnosti řezných nástrojů (např. u frézek) a jejich stopek, dochází zde taktéž k nárůstu spotřebovávané energie během rozběhu. Zakomponováním řezného procesu dostáváme dalších mnoho proměnných, na kterých bude záležet spotřebovávaná energie a to jenom u vřetene, příkladem je závislost spotřeby a rychlosti otáčení vřete – viz Obr. 19. Zároveň je vidět, že například pro čerpadlo je spotřeba energie prakticky 0 nebo konstantní.

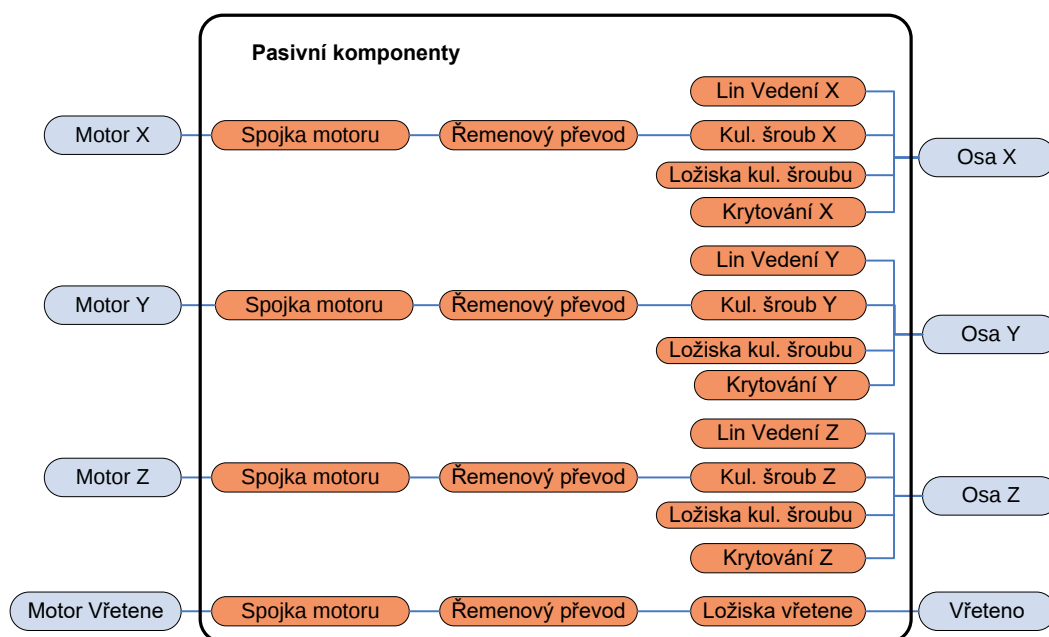


Obr. 19 Vlevo proměnlivá spotřeba energie při různých rychlostech vřetene, vpravo konstantní spotřeba čerpadla řezného média

5.2.2 Analýza pasivních komponent

Obráběcí stroj je souhrnem značného množství aktivních a pasivních komponent podílejících se přímo nebo nepřímo na energetickém profilu stroje. Analýza aktivních

komponent je již popsána v předchozí kapitole 5.2.1 Analýza subsystémů obráběcího stroje. Zde se zaměřím na komponenty nutné pro chod obráběcího stroje, které nejsou přímými spotřebiteli elektrické energie. Spotřeba elektrické energie se v případě těchto komponent projevuje nárůstem spotřeby elektrické energie u přímých spotřebičů, jako jsou například motory. Nárůst spotřeby je pak dán energií, která je nutná pro překonání odporu působícího proti pohybu dané komponenty, jako je setrvačnost a tření (popř. valivé tření). Těmito komponenty jsou například ložiska, lineární vedení a pohonné mechanismy, jako jsou kuličkové šrouby. Z důvodu kompletace matematického modelu je nutné provést výčet těchto komponent do blokového schématu a tabulky. Takových, kde bude uvedeno dostatečné množství informací charakterizujících klíčové vlastnosti komponent relevantních k simulaci energetického profilu stroje.



Obr. 20 Přehled pasivních komponent obráběcího stroje v návaznosti na subsystémy

Existuje celá řada faktorů působících na účinnost pohonných mechanismů, což jsou především: přesnost, předpětí, způsob zatížení, teplota, mazání a jejich provoz. Pro získání komplexního obrazu o energetické účinnosti pasivních komponent je nutné znát detailně jejich vlastnosti. V rámci simulace je nutné znát jejich charakteristiku závislosti ztrát na rychlosti, popřípadě na otáčkách. A poté je možné aplikovat míru ztrát do matematického modelu. Tuto charakteristiku není snadné získat, neboť ji výrobci běžně nezveřejňují. Závisí na stavu dané komponenty a na hmotnosti, se kterou se daná komponenta potýká. Tuto charakteristiku je tedy nutné získat experimentálně, nejlépe jako funkci dvou proměnných – rychlosti a hmotnosti.

5.2.3 Analýza potřebné technologie

Zejména stroje větších velikostí se v převážné míře vyrábí podle požadavků zákazníka tak, aby splňovaly kritéria na ně kladené. Vstupním požadavkem na výrobce může být například výkres součásti, která se má na daném stroji vyrábět. Často to pro výrobce znamená dodání kompletní technologie pro výrobu daného dílu dle výkresové dokumentace. Je nutné vytvořit komplexní návrh obráběcího stroje s veškerými periferními zařízeními, přípravky pro upnutí obrobku a s připraveným obráběcím programem (NC kódem). Pro simulaci spotřeby

elektrické energie je toto zároveň ideální případ, protože je znám typický obrobek, za jehož účelem byl stroj postaven. Z toho plyne možnost simulovat výrobu tohoto pomocí dostupného NC kódu, ze kterého je patrné kdy a za jakých podmínek bude využíváno jednotlivých energetických spotřebičů stroje přímo a nepřímo se podílejících na technologickém procesu. Na základě analýzy tohoto NC kódu je nutné vyhodnotit, co všechno se bude na výrobě typického obrobku podílet a které periferní subsystémy budou nasazeny. Díky tomu je možné dostat dobrý obraz o průběhu spotřeby elektrické energie.

5.2.4 Analýza řezných podmínek

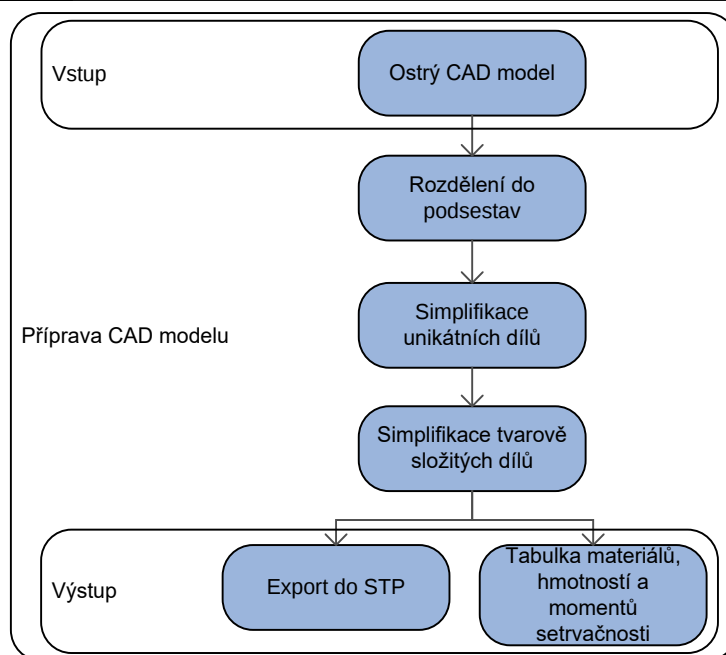
Na základě požadavků od zákazníka ohledně dostupných technologií daného stroje, kdy jsou stroje vybaveny požadovanými periferními zařízeními, včetně atd., je dále možné navrhnout CNC kód, který bude využit během primární funkce obrábění, pro kterou byl stroj vyroben. Na základě tohoto CNC kódu je nadále možné analyzovat řezné podmínky, které budou uplatněny během technologického procesu. Definici technologických parametrů je možné vyčíst ze samotného CNC kódu, kdy se tyto parametry udávají pomocí M-funkcí. Zejména je důležitá znalost řezné rychlosti, rychlosti posuvu, posuvu na otáčku nebo posuvu na zub.

U soustruhů je dokonce možné aktivovat konstantní řeznou rychlost, kdy se zadává přímo řezná rychlost v m/min a posuv na otáčku, tedy je možné v určitém rozsahu obrábět s konstantní řeznou rychlostí. Úskalí tohoto řešení je v momentu, kdy se břit nástroje blíží k ose rotace obrobku a otáčky se limitně blíží nekonečnu. Samotný úběr materiálu do hloubky je možné zjistit pomocí analýzy drah nástroje, tedy se jedná o relativní posun v jednotlivých osách vzhledem k předchozímu záběru nástroje. Toto je největší úskalí této metody, neboť je nutné parametricky stanovit geometrii obrobku a pomocí teoretické kolize analyzovat úběr materiálu. Z toho důvodu je nutné vytvořit databázi nástrojů, které budou použity pro danou technologickou operaci tak, aby bylo možné dopočítávat koncový bod nástroje. Dále je nutné správně nadefinovat polotovar, ze kterého bude koncový výrobek vytvořen. Zejména je nutné znát jeho materiálové charakteristiky, ze kterých se odvodí patřičné konstanty do empirických vzorců.

Energetické ztráty vzniklé vlivem obráběcího procesu se dají dále kategorizovat do užitečné práce, kterou stroj vynaloží na úběr materiálu, a tepla, které samotným řezným procesem vzniká. Pro stanovení energetické náročnosti řezného procesu je nutné znát dobře geometrii nástroje, což ale vždy nezaručí přesnost simulace, protože se zde projevuje vliv opotřebení nástroje. Samotné opotřebení nástroje má vliv na narůstající energetickou ztrátu a na vliv jakosti povrchu, popřípadě výsledné přesnosti obrobku. Pro zjednodušení celé simulace je tedy vhodné uvažovat s dokonalým nástrojem, který nepodléhá opotřebení, jinak by komplexní pohled na celou problematiku zabral značné množství neznámých proměnných.

5.2.5 Zpracování CAD modelu

CAD model je obvykle nutné před simulací zjednodušit. Finální CAD model obráběcího stroje může obsahovat desítky tisíc unikátních dílů, které znesnadňují užití modelu při simulaci. Z toho důvodu je nutné model značně trivializovat, což obsahuje sjednocení některých komponent a nahrazení složitých tvarových ploch za jednodušší. Důsledkem této trivializace může být potenciální snížení nebo zvýšení hmotnosti jednotlivých dílců. Postup tohoto zjednodušení je uveden na Obr. 21.



Obr. 21 Postup zpracování CAD modelu

Jednotlivé, podrobněji popsané, kroky z Obr. 21:

- **Rozdělení do podsestav**, obsahuje integraci nebo úplné odstranění pro simulaci nepodstatných komponent, které výpočet značně komplikují. Odstranění takových komponent z modelu má za důsledek snížení hmotnosti o znatelný díl a tedy je lepší jej integrovat jako součást hlavních konstrukčních uzlů. Stejně tak je nutné postupovat v rámci ostatních komponent, jež jsou připevněny k hlavním konstrukčním uzlům podílejícím se na technologickém procesu, ale vykonávající pouze podpůrnou funkci (nepodílí se na vyvozování pohybu a na celkové účinnosti jinak než svojí hmotností). Pro jednoduchost je v rámci simulace nejvhodnější pracovat s podsestavami, vytvořenými z CAD modelu potlačením jednotlivých komponent tak, aby byla jako jedna podsestava vyexportována do STP modelu pouze daná část komponent připevněných k dané posuvové ose. Tím lze zjednodušit model tak, že je možné v simulačním programu operovat pouze s několika zásadními podsestavami.
- **Simplifikace unikátních dílů**. Simplifikací se nerozumí pouhé odstranění například spojovacího materiálu, ale spíše jeho integrace do samotného modelu většího konstrukčního celku. Jednou z možností je vytvořit součást, která bude zahrnovat i jednotlivé části spojovacího materiálu. Tím se ale celkově zkomplikuje model dané součásti a dojde k nárůstu počtu polygonů. To by mělo za následek zvýšení náročnosti celkové simulace bez zjevného přínosu. Další možností je úplné odstranění ploch určených pro spojovací materiál a jejich vyplnění materiálem samotného dílce. Jedná se ale o nárůst chyby výpočtu hmotnosti daného dílu, nicméně v rámci hmotnosti hlavních dílů, k nimž by se tento materiál přidával, by znamenal jen velmi malou změnu, a tudíž by se dalo tuto chybu zanedbat.

Obě dvě tyto metody s sebou nesou úskalí v podobě nehomogenity materiálů a jejich rozdílných hustot (přidělení jiného materiálu danému spojovacímu materiálu – například litina x ocel, popřípadě ocel x hliník).

- **Simplifikace tvarově složitých dílů.** Pro zjednodušení simulace je nutné zjednodušit jednotlivé díly snižováním počtu polygonů. Tím se zejména rozumí odstranění úkosů a zaoblení, které zatěžují výkon počítače, ale které na celkovou podobu výsledků simulace nemají značný vliv. Může ale dojít k chybě odstraněním zaoblených a zešikmených ploch.
- **Podoba výstupu CAD modelu.** Po absolvování předchozích kroků je CAD model připraven pro použití v předložené metodě. CAD model pak musí být rozdělen do více podsestav, které se importují do simulačního softwaru MSC Adams jako jednotlivá tuhá tělesa. Formát CAD modelu musí být kompatibilní se simulačním softwarem, preferovaný je výstup ve formátu STEP. Jednotlivé podsestavy jsou zbaveny všech zbytečných komponent, které přímo nesouvisí s energetickou náročností stroje a pouze zvyšují požadavek na výpočetní výkon simulace. Díly jednotlivých podsestav pak musí být (pokud je to nutné) zjednodušeny tak, aby bylo dosaženo co nejmenšího počtu polygonů.

5.3 Příprava simulačního modelu

5.3.1 Příprava matematického modelu

Cílem tvorby matematického 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. Účelem matematického modelu je dodat podklad pro simulační program tak, aby v každém okamžiku definovaném vzorkováním simulace byly definované parametry a aby bylo možné obdržet údaje o sledovaných veličinách se stejnou vzorkovací frekvencí.

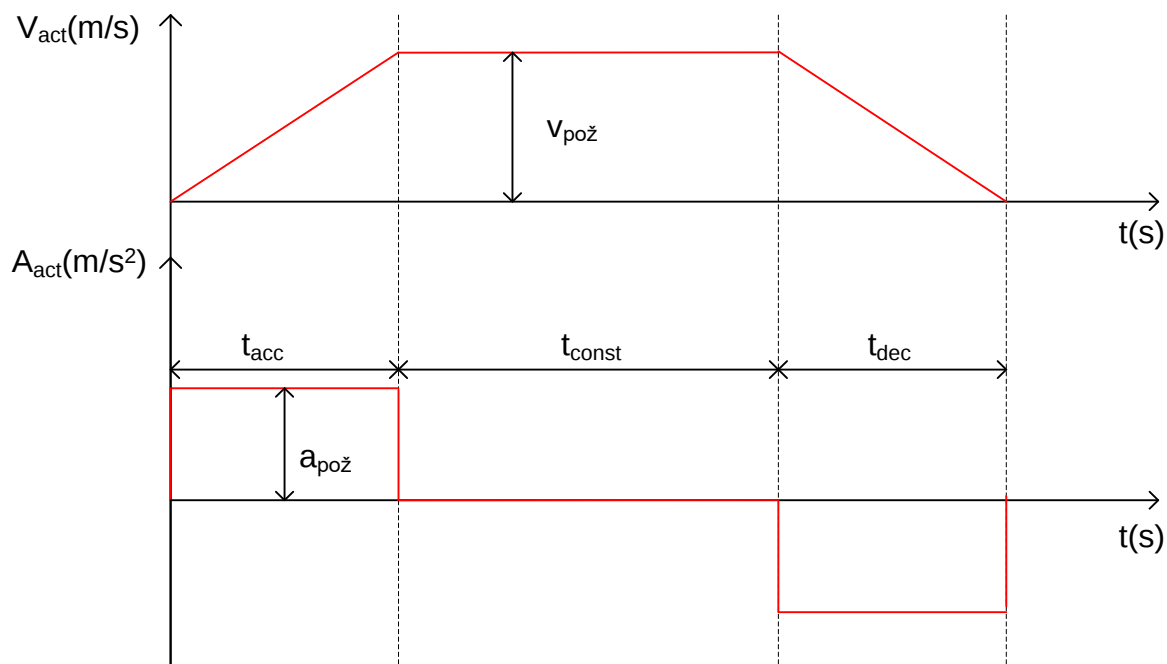
5.3.2 Překlad G-kódu

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. Způsob překlada G-kódu je blíže vysvětlen v kapitole: 4.5.1. Tento krok metody tedy zahrnuje podrobnou analýzu strojového kódu, podle kterého se bude odvíjet technologický cyklus. Samotný překladač má omezenou funkci, ale programováním dalších modulů je možné jeho funkce rozšířit podle potřeby daného stroje. Ty závisí na periferních zařízeních spojených s obráběcím strojem, která je možné ovládat pomocí G-kódu.

5.3.3 Částečná časová parametrizace G-kódu

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.



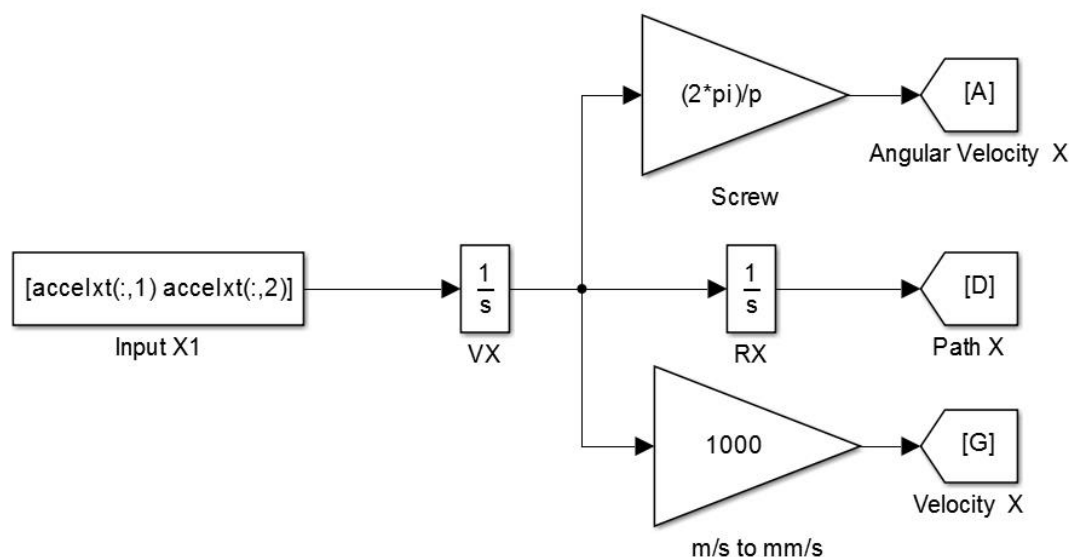
Obr. 22 Časový průběh posuvové rychlosti a zrychlení

Pro správnou časovou parametrizaci pohybů jednotlivých posuvových os je třeba stanovit časové úseky jednotlivých dílčích posuvů, viz Obr. 22, na čas potřebný na zrychlení soustavy (t_{acc}) do požadované rychlosti ($v_{pož}$) dané adresou F v G-kódu zrychlením ($a_{pož}$). Dále se soustava pohybuje rovnoměrným pohybem po určitou dobu (t_{const}) až do momentu ($t_{acc} + t_{const}$), kdy bude soustava brzdit stejným zrychlením ($a_{pož}$), ale s opačným znaménkem po stejnou dobu jako zrychlení ($t_{acc} = t_{dec}$).

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, tedy skoková změna z $a_{pož}$ na 0 apod. V prostředí Matlab Simulink je částečná časová parametrizace dopočítána dle schématu na Obr. 22.

5.3.4 Komplettní časová parametrizace G-kódu

Z důvodu možnosti řízení simulace je nutné vytvořit tzv. komplettní 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. Aktivací blokového schématu v Matlab Simulink je možné pouze zadáním změn s patřičným časovým údajem získat úplnou časovou parametrizaci a zároveň i komplettní průběh sledovaných veličin v rámci měřicího intervalu v požadované vzorkovací frekvenci.



Obr. 23 Schéma řízení osy X v Matlab Simulink

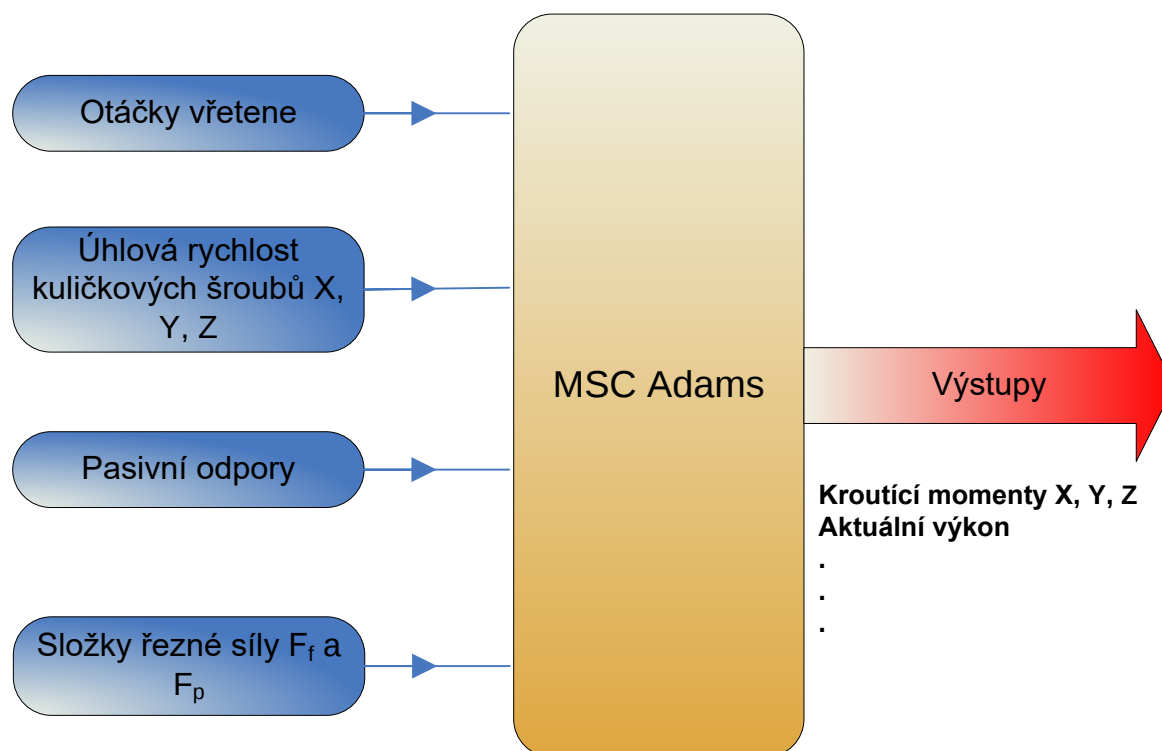
Dle výše uvedeného schématu na Obr. 23 jsou vstupními hodnotami první a druhý sloupec vektoru zrychlení osy X, kdy prvním sloupcem je čas a druhým samotné požadované zrychlení v čase. Průchodem přes první integrátor VX dostáváme okamžitou rychlost. Průchodem přes druhý integrátor dostáváme posunutí v aktuálním časovém okamžiku. Násobitelem rychlosti, kde je jedním ze vstupních parametrů stoupání závitu kuličkového šroubu P, dostaneme okamžitou úhlovou rychlost kuličkového šroubu dané osy. Přepočtem na mm/s dostáváme okamžitou posuvovou rychlost dané lineární osy. Tři výstupní parametry dále poslouží pro řízení simulace mezi Matlab a MSC Adams.

5.3.5 Příprava fyzikálního modelu v MSC Adams

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 rezných parametrů při zachování stability rezného 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 takového 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.

Jak bylo výše zmíněno v kapitole Analýza pasivních komponent, je potřeba brát v potaz celou řadu v sérii uspořádaných komponent s pasivními ztrátami. Pro zjednodušení nastavování těchto parametrů je přidána další vstupní proměnná, která bere v potaz pasivní odpory a do fyzikálního modelu vstupuje ve formě síly působící proti směru pohybu, která se v soustavě za daných parametrů projeví ve formě zvýšeného mechanického výkonu potřebného pro chod soustavy. U valivých ložisek, nebo u valivých lineárních vedení se bude

jednat o funkci dvou proměnných, závislost rychlosti a zatížení. U takto navržené vstupní proměnné je možné postihnout vliv všech pasivních komponent, jejichž funkcí je vytvářena síla, která působí proti směru dané lineární osy. Tak lze i výpočetně generovat řeznou sílu závislou na technologických parametrech, která se taktéž projevuje při celkovém průběhu aktuálního výkonu.



Obr. 24 Vstupy a výstupy subsystému MSC Adams

Pro složky řezné síly existuje i možnost, kdy není nutné zahrnovat do samotné simulace jako vstup do MSC Adams subsystému, ale je možné použít pouze empirických vzorců a aktuální mechanický výkon řezného procesu a jeho složky lze přidávat do výstupního signálu s triggerem vycházejícím z nastavení kontaktu mezi nástrojem a obrobkem ve fyzikálním modelu. To se provede nastavením hranice, kterou musí kontaktní síla překonat, aby byl průběh výkonu řezného procesu aktivován. Pro dokonalejší průběh je nutné parametricky upravovat geometrii obrobku tak, aby bylo patrnější, kdy dochází k přímé interakci nástroje a obrobku.

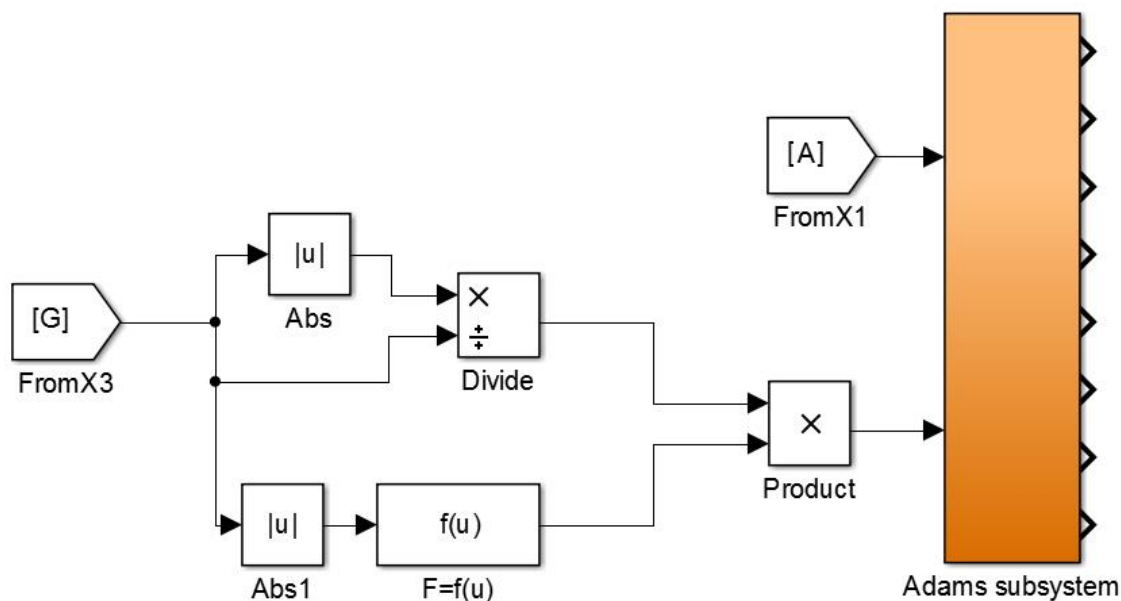
Správně zvolené a konfigurované vstupy a výstupy jsou základem pro dostatečně přesnou simulaci, která poskytne energetický profil obráběcího stroje.

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. 25 Blokové schéma dopočtu pasivních odporů

Zpracování signálu jdoucího z časové parametrizace G-kódu probíhá podle schématu uvedeného na Obr. 25. Do tohoto schématu vstupuje signál [G] ze schématu uvedeném na Obr. 23, 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.

Vstupem nezobrazeným na výše uvedeném obrázku Obr. 25 je signálový vstup úhlové rychlosti kuličkového šroubu, který vychází z časové parametrizace G-kódu, uvedeného na Obr. 23. Ten již není nutné zpracovávat a v nezměněné podobě vstupuje do subsystému.

V případě zakomponování vřetene a dalších posuvových os se rozšíří řada vstupů do subsystému.

Výstupy ze simulačního softwaru (výstupy z bloku subsystému Adams) lze libovolně konfigurovat tak, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. Z bloku subsystému vystupují data v závislosti na čase, která dohromady vytváří průběh sledovaných veličin jako například: krouticí moment na kuličkovém šroubu, úhlová rychlost kuličkového šroubu, kontaktní síla, posuvová rychlost, posunutí a odporová síla. Z výstupních signálů je možné získat požadované sledované veličiny, což jsou aktuální výkon a spotřebovaná energie. Pomocí dalších přepočtů je možné získat i veličiny jako ztrátový výkon a užitečný výkon, kde ztrátový výkon bude výkon nutný pro překonání pasivních odporů a užitečný výkon bude výkon nutný pro uvedení soustavy do chodu, tedy překonání setrvačnosti jednotlivých dílců a překonání řezných odporů. To může být pro konstruktéry dalším hodnotným podkladem pro optimalizaci konstrukce stroje. Integrací těchto dvou výkonů dostaneme energii spotřebovanou na překonávání pasivních ztrát stroje a energii spotřebovanou na řezný proces a na rozběh setrvačných hmot.

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 měřícím 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.

6.1.1 Popis měřícího standu

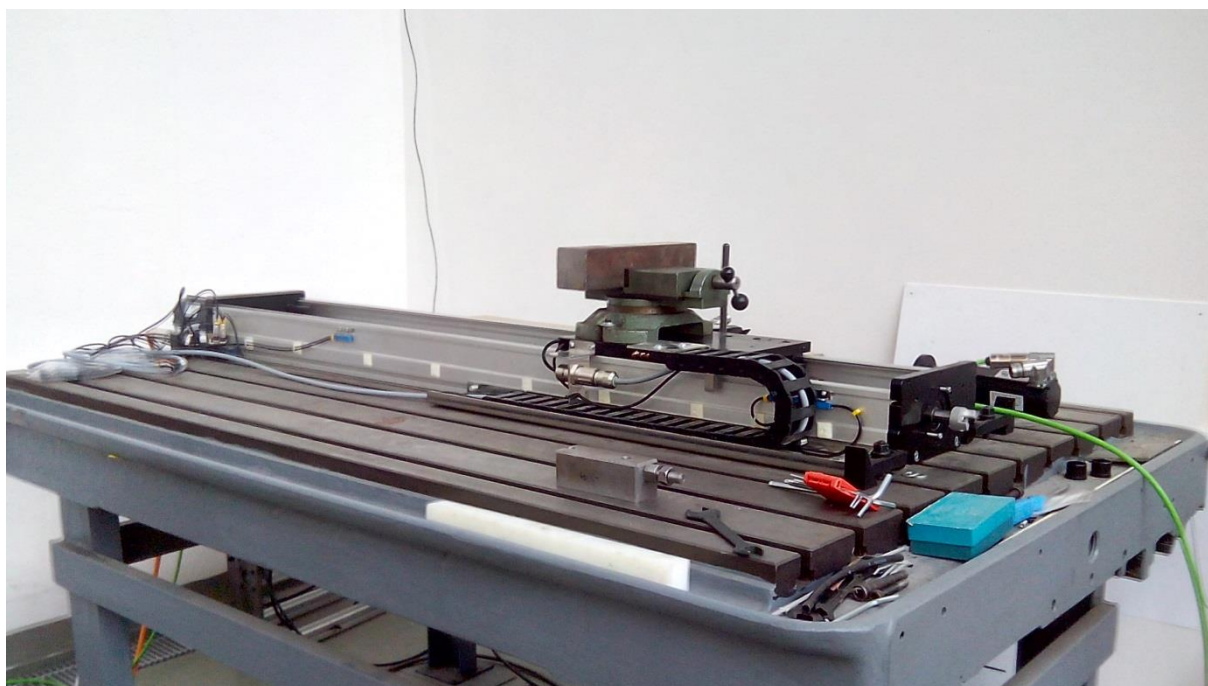
Nosná část standu je tvořena extrudovaným profilem ze slitiny hliníku. K nosné části jsou přišroubovány desky, ke kterým jsou připevněny příruby motorů a domečky ložisek kuličkového šroubu [14]. Uložení kuličkového šroubu je provedeno na jeho obou koncích, přičemž na jednom konci je uložení radiálně axiální a na druhém konci je kuličkový šroub uložen pouze v radiálním kuličkovém ložisku, které se může v domečku pohybovat axiálně. A to z důvodu zamezení vzpěrné deformace šroubu vzniklé vlivem teplotního zatížení soustavy kuličkový šroub – matice a ložisek, vzniklého během své funkce. Kuličkový šroub je o průměru 20 mm a stoupání 10 mm a s motorem (motory) je spojen pomocí bezvůlových spojek. Lineární vedení HGH20CA od firmy Hiwin slouží pro zajištění lineárního pohybu stolu. Samotné lineární vedení je v bezvůlovém provedení.

Odměřování polohy je zde možné realizovat hned třemi možnými způsoby. Jedním je nepřímé odměřování pomocí encoderů v synchronních servomotorech. Dále je možné využít přímého magnetického inkrementálního odměřování, které je součástí lineárního vedení. Vodicí lišta je přišroubována k nosné části ze spodní strany a z horní strany je lišta opatřena magnetickým páskem. Magnetická sonda odměřování je součástí vozíku lineárního vedení. Dalším způsobem je přímé absolutní optické odměřování, které je realizováno páskem s maskou a sondou. Pásek je připevněn v drážce k tomu určené a sonda je připevněna ke stolu. Stand je řízen a poháněn elektronikou firmy Beckhoff. Zde jsou použity frekvenční měniče umožňující pohánět různé konfigurace pohonů tohoto standu. Frekvenční měniče taktéž umožňují rekuperaci elektrické energie.



Obr. 26 Měřicí stand firmy HIWIN

Pracoviště pro experiment ověřování spotřeby elektrické energie je umístěno v laboratořích ÚVSSR. Lineární měřicí stand je umístěn na upínacím stole s T-drážkami. Pomocí přílohek je stand připevněn ke stolu, aby nedocházelo k jeho nechtěnému pohybu. Na upínacím stole lineárního měřicího standu je přišroubován strojní svěrák, do něhož je možné upínat různá břemena. Pro účely měření bylo použito břemeno z hutního polotovaru 60x60mm různých délek, přičemž jednotlivá břemena a svěrák byly před měřením zváženy, aby bylo možné jejich hmotnost zadat do simulace. Vedle tohoto pracoviště je umístěn stůl s rámem, k němuž je připevněn frekvenční měnič a PLC umožňující řízení chodu motoru.



Obr. 27 Experimentální pracoviště pro měření elektrické spotřeby lineárního standu

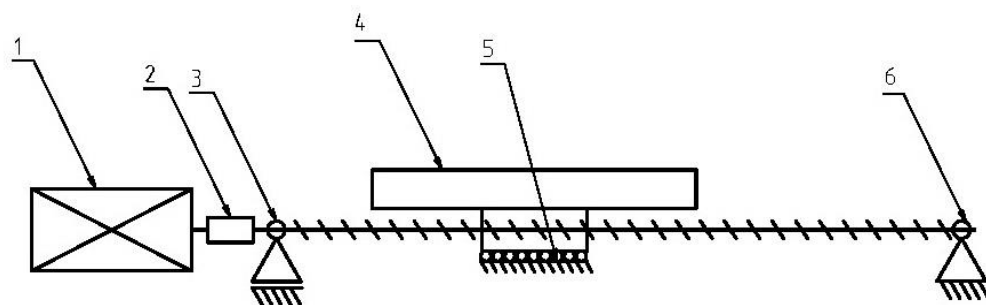
6.1.2 Určování spotřeby elektrické energie lineárního měřicího standu

1. Sběr dat

Pro realizaci simulace byly nasbírány podrobné údaje sloužící jako vstupní hodnoty a podmínky pro následnou analýzu, přípravu modelu a simulaci.

– Konfigurace stroje

Jedná se o jednoduchý lineární stand, popsáný v přechozí kapitole. Schematicky je rozveden lineární měřicí stand na obrázku Obr. 28, kde lze vidět: 1 – AC synchronní servomotor, 2 – Hřídelová spojka, 3 – Ložiskový domek, 4 – Upínací deska, 5 – Matice kuličkového šroubu, 6 – Ložiskový domek



Obr. 28 Schéma lineárního měřicího standu,

– CAD model

Přesný CAD model byl dodán firmou HIWIN, která je zároveň výrobcem tohoto lineárního měřicího standu. CAD model byl dodán ve formě standardizovaného formátu pro reprezentaci a výměnu dat (STEP). Model je ve formě celkové sestavy včetně normalizovaných dílů a bylo tedy nezbytné model dále upravit a připravit jednotlivé podsestavy vstupující do simulace

– Technologie

Vybraný měřicí stand neslouží jako obráběcí stroj, proto se nepředpokládají zvláštní požadavky na technologii. Jedná se pouze o testovací zařízení vzniklé za účelem srovnávání měření přesnosti pomocí různých druhů odměřování a porovnání využití zdvojeného pohonu vůči jednoduchému pohonu. Technologické parametry oproti obráběcím strojům umožňují měřit zatížení při různých dynamických parametrech. -Je možné měřit při různých zrychleních soustavy, což ve srovnání s obráběcími stroji není možné bez zásahu do řídicího systému stroje. To je využito v následujících simulacích a měřeních. K zpřesnění simulace, což umožní snazší užívání metody.

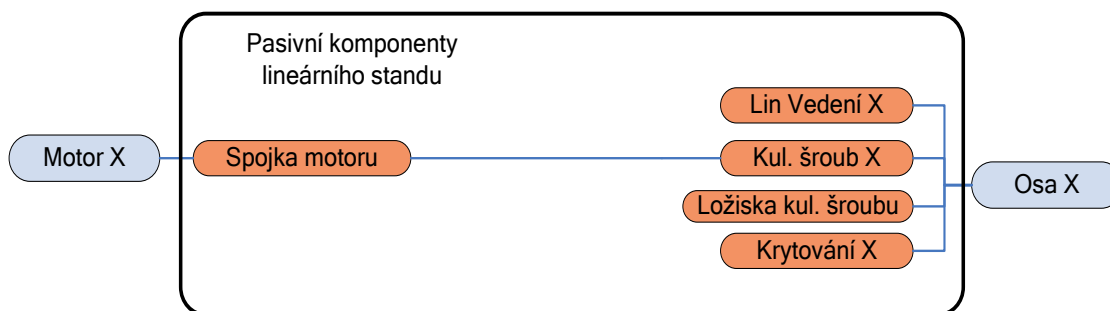
2. Analýza dat

– Analýza subsystémů stroje

V rámci použití měřicího standu není možné mluvit o subsystémech obráběcího stroje, protože zde není připojeno žádné periferní zařízení fungující jako přímý spotřebič elektrické energie.

– 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. Schéma na Obr. 29 dle návrhu metody.



Obr. 29 Schéma pasivních komponent lineárního standu v návaznosti na subsystémy

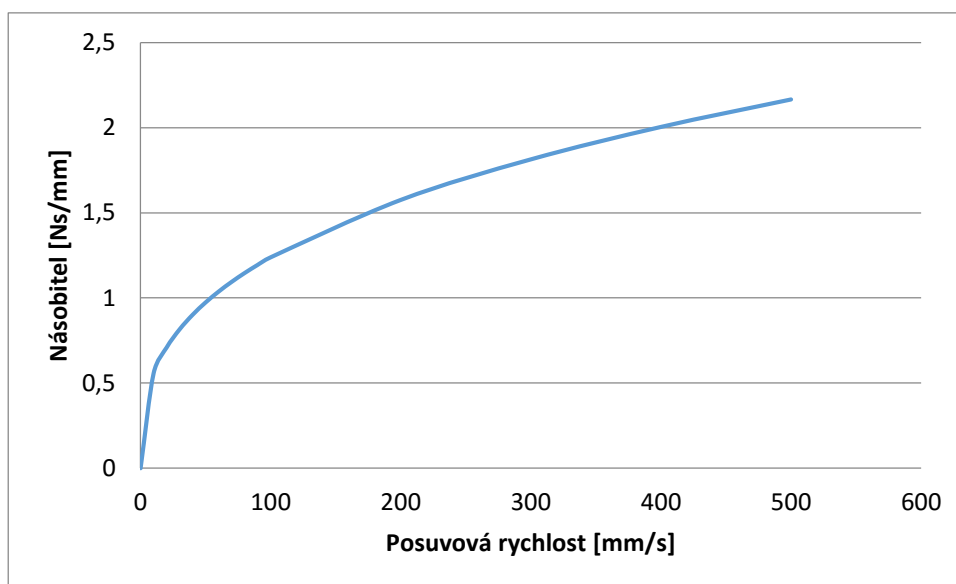
V první fázi měření není možné přesně stanovit podíly ztrát jednotlivých komponent, ale je možné vyjádřit soustavu jako celek. Cílem je získat funkci, jejíž tvar je definován mocninnou funkcí a proměnnou bude úhlová rychlost, tedy závislost posuvové rychlosti na velikosti násobitele ztrát. Postup získání 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. Zrychlení a zpomalení soustavy má za následek výkonové špičky (peaky), jejichž velikost a přesnost závisí na vzorkování, neboť se jedná o krátkodobé děje. S nastavenou vzorkovací periodou 50 ms je možné, že nedojde k záznamu maximální hodnoty dané výkonové špičky.
- **Srovnání reálného aktuálního výkonu a aktuálního výkonu bez pasivních ztrát.** 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:

$$y = 0,2505 \cdot x^{0,3471} \quad (84)$$

Průběh této funkce je znázorněn na Obr. 30.



Obr. 30 Průběh násobitele v závislosti na posuvové rychlosti

- Analýza potřebné technologie

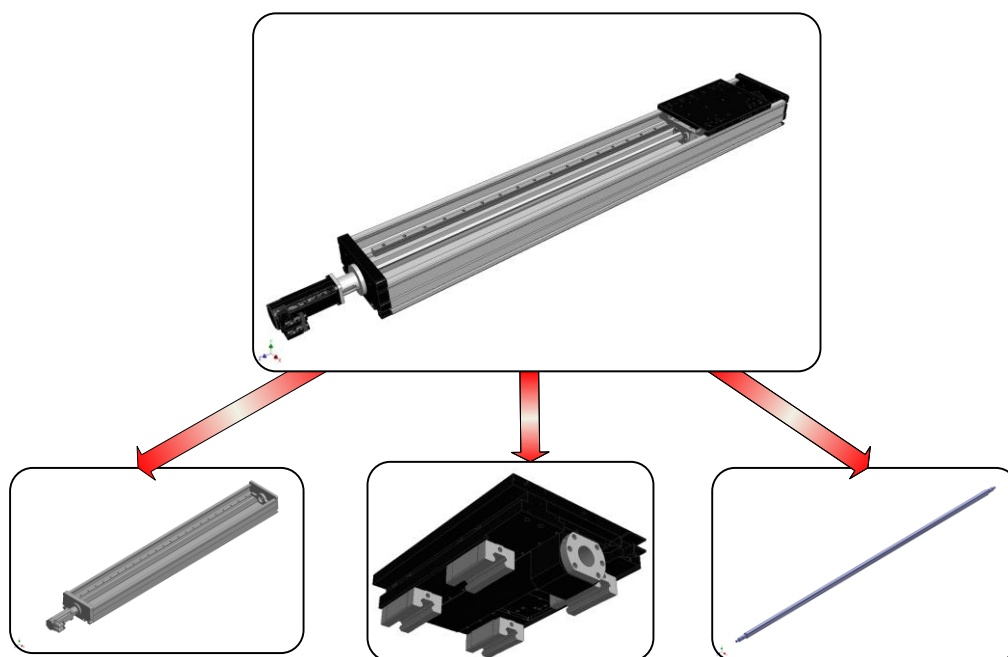
Součástí analýzy je u standardních obráběcích strojů rozbor G-kódu a nasazení různých nestandardních technologií, nicméně v případě lineárního měřicího standu se nedá hovořit o typických technologických operacích. Jedná se pouze o získání experimentálních dat pro srovnání reálného modelu se simulací. 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.** Konkrétně měření při 0 kg, 17,336 kg a 22,711 kg. Zátěž byla realizována přišroubováním strojního svěráku, ve kterém se měnily břemena. Zátěž 0 kg reprezentuje situaci, kdy stůl jede naprázdno bez svěráku.
- **Měření při různých zrychleních.** Konkrétně 1000 mm/s², 2000 mm/s² a 3500 mm/s². Poslední zmíněné zrychlení je maximální pro danou soustavu a zatížení. Při větším zrychlení již dochází k vypínání pohonného systému proudovou ochranou.
- **Různé posuvové rychlosti.** Použity byly rychlosti 100mm/s, 200mm/s, 300mm/s, 400mm/s, a 500mm/s, což odpovídá rychlosti rychloposuvu u následně měřeného stroje MCV 750 Quick.

Pro řízení měření není možné použít G-kód, protože u softwarového rozhraní chybí překladač tohoto kódu a jednotlivé kroky je nutné spínat ručně. Existuje pouze možnost nastavení prodlevy mezi dvěma pohyby tak, aby bylo možné počkat, až se hodnota ustálí blízko nuly a mít tedy patrný každý krok měření. Pro řízení simulace je již nutné sestavit G-kód definující jednotlivé kroky simulace. Jedná se o posuvy lineární interpolací v jedné ose. Součástí G-kódu musí být nastavení časových prodlev mezi jednotlivými kroky tak, aby odpovídaly sledu měření. G-kód byl sestaven.

- Analýza rezných podmínek

- V případě této aplikace nelze hovořit o obrábění, a proto není možné analyzovat řezné podmínky.
- **Příprava CAD modelu**
- V této fázi analýzy je nezbytné připravit získaný CAD model pro simulaci. Úpravu je možné provést v jakémkoliv CAD modeláři umožňující export do formátu STP nebo dalších libovolných univerzálních formátů. V tomto případě se jedná o poměrně jednoduchý model a samotný stand není tvořen tvarově složitými díly. Jedná se převážně o obrobky z hutních polotovarů a jednotlivé plochy jsou obráběné, což má za důsledek menší počet polygonů než v případě komplexních modelů obráběcích strojů tvořených masivními odlitky se žebrováním a množstvím úkosů popřípadě rádiů. Není tedy nutné provádět výše zmíněné simplifikace množství unikátních dílů, jako například spojovacího materiálu, nebo simplifikaci tvarově složitých dílů jako v případě zmíněných odlitků. Jedinou nutnou úpravou bude rozdělení do podsestav, které budou reprezentovat jednotlivé díly, které vůči sobě konají lineární nebo rotační pohyb.
 - Úprava CAD modelu byla provedena v softwaru Autodesk Inventor, který umožňuje poměrně přehledné rozdělení a exportování do podsestav. Při tomto rozdělení a exportu bylo nutné brát na vědomí pozici souřadného systému, který musí být totožný u všech podsestav. Tím bylo následně docíleno jednoduššího importu do simulačního softwaru a to tak, že se vykopírují jednotlivé díly podsestavy, které vytvoří jeden funkční celek. Všechny dílčí podsestavy se navzájem spojí vazbami tak, aby se nacházely ve výchozí poloze, v jaké bude začínat simulace. Poté jsou funkcí „suppress“ potlačeny všechny ostatní podsestavy a daný celek je exportován do formátu STP. Takto se provede u všech podsestav, čímž jsou připraveny pro import do simulačního software.



Obr. 31 Schématické znázornění rozdělení do funkčních celků

3. Příprava modelu

Po analýze a přípravě dat je již možné sestavovat model daného stroje. V případě tohoto zařízení je třeba řídit pouze jednu posuvovou osu a simulovat průběh krouticího momentu, který musí mít kuličkový šroub během své funkce. Tím je možné pomocí dalších výpočtů získat průběh aktuálního výkonu a spotřebované elektrické energie.

– Příprava matematického modelu

Matematický model je hlavní řídicí strukturou celé simulace. Vychází z prvotní analýzy, neboť je potřeba ujasnit, co všechno bude řízeno. Některé periferní zařízení stroje není nutné řídit G-kódem, protože vstupují do celkové spotřeby elektrické energie, buď na základě pokynu řídicího systému, nebo jsou v provozu během momentu, kdy je stroj zapnut. Tyto periferie vytváří tzv. „basic load“, neboli konstantní spotřebu, kterou má stroj nezávisle na technologickém procesu. V případě lineárního standu basic load nevystupuje nebo je ve velmi malé - nedetekovatelné míře. To znamená, že do měření nezahrnujeme spotřebu samotného frekvenčního měniče ani řídicího systému samotného standu.

Z hlediska řízení je potřeba mít možnost řídit pouze jednu osu. Vstupní proměnnou pak bude částečně časově parametrizovaný průběh zrychlení posuvové osy. Postupnou integrací dostáváme další nezbytné údaje, jako je posuvová rychlost, úhlová rychlost kuličkového šroubu a posunutí.

– Překlad G-kódu

Po matematickém modelu byl napsán G-kód definující dráhu stolu lineárního standu v simulaci. Zde je požadavkem polohování pouze v jedné ose, kdy dojde ke změně polohy o 400 mm v různých posuvových rychlostech. V předchozím textu již bylo poznamenáno, že posuvové rychlosti byly zadány během měření a zadávání do PLC v mm/s. U G-kódu se zadává posuvová rychlost podle technologického požadavku jako mm/otáčku nástroje, mm/zub nástroje a poměrně často v mm/min. Jelikož nemáme u měřicího standu použít žádný nástroj pro třískové obrábění, zadáváme velikost posuvu v mm/min. Samotný G-kód v rámci tohoto experimentu má pak následující podobu:

```
G01 X400 Y0 Z0 F6000
G04 T1
G01 X0 Y0 Z0 F6000
G04 T1
G01 X400 Y0 Z0 F12000
G04 T1
G01 X0 Y0 Z0 F12000
G04 T1
G01 X400 Y0 Z0 F18000
G04 T1
G01 X0 Y0 Z0 F18000
G04 T1
G01 X400 Y0 Z0 F24000
```

G04 T1

G01 X0 Y0 Z0 F24000

G04 T1

G01 X400 Y0 Z0 F30000

G04 T1

G01 X0 Y0 Z0 F30000

G04 T1

Uvedený G-kód má poměrně jednoduchou strukturu popisující chování jednoosého manipulátoru, kdy je použito lineárních interpolací G01 k přesunu stolku na absolutní hodnotu 400 mm a zpět na 0. Y a Z-ové souřadnice standardně v tomto případě uvádět nemusíme, ale díky nedokonalosti překladače je nutné tyto souřadnice doplnit, aby nedošlo k chybnému načtení koncových bodů. Stejně tak je u každé lineární interpolace uvedena hodnota posuvové rychlosti, což taktéž není u CNC strojů nutné, pokud nevyžadujeme změnu této rychlosti. Blok G04 pak slouží pro nastavení časové prodlevy mezi jednotlivými kroky tak, aby odpovídaly nastavení měření a pro odlišení jednotlivých kroků.

Výsledkem plynoucím z překladače G-kódu je načtení jednotlivých operací (lineární interpolace, rychloposuv, prodleva, atd.) a sestavení matice jednotlivých koncových bodů, v nichž se bude upínací deska lineárního standu pohybovat. V tomto případě se bude deska pohybovat mezi dvěma body. Dále dojde k načtení požadovaných rychlostí vyplývajících z adresy uvedené v G-kódu pod písmenem F.

– Částečná časová parametrizace

Poté, co dojde k načtení všech potřebných údajů z překladače G-kódu, je nutné údaje částečně časově parametrizovat. Cílem je získat matici (dvourozměrný vektor), která poskytne údaje vstupující do matematického modelu a týkající se všech potřebných dějů a veličin, které řídí celou simulaci. Matice má pak tvar časové posloupnosti, kdy je v prvním sloupci uveden časový údaj požadované změny daného řídicího parametru a v dalších sloupcích je jeho hodnota. V případě, že u některých parametrů nedochází ke změně, zůstává hodnota parametru stejná. Tímto způsobem lze řídit simulaci v matematickém modelu tak, že v požadovaném časovém sledu dochází ke vstupu hodnoty daného parametru. Výsledkem částečné časové parametrizace je pak řídicí matice.

– Kompletní časová parametrizace

Částečná časová parametrizace poskytuje matematickému modelu informace o změnách daných parametrů v čase. Pro průchodu řídicí matice matematickým modelem dojde k úplné časové parametrizaci. To znamená, že každému časovému bodu simulace jsou přiřazeny konkrétní hodnoty řídicích veličin simulace. Dle měřicí soustavy je nastavena vzorkovací perioda na 50 ms.

– Příprava fyzikálního modelu

Postup pro vytvoření fyzikálního modelu vychází z metody uvedené v předešlých kapitolách. V případě měřicího standu je postup jednodušší, zejména z důvodu menšího počtu navzájem se pohybujících dílců.

Vstupy jsou dílčí modely jednotlivých podsestav, znalost konstrukčních prvků, jako například průměr a stoupání kuličkového šroubu, znalost materiálů, ze kterých jsou dílce stanu vyrobeny a vstupní a výstupní proměnné, které je nutné definovat pro komunikaci mezi řídicím a simulačním softwarem.

4. Simulace

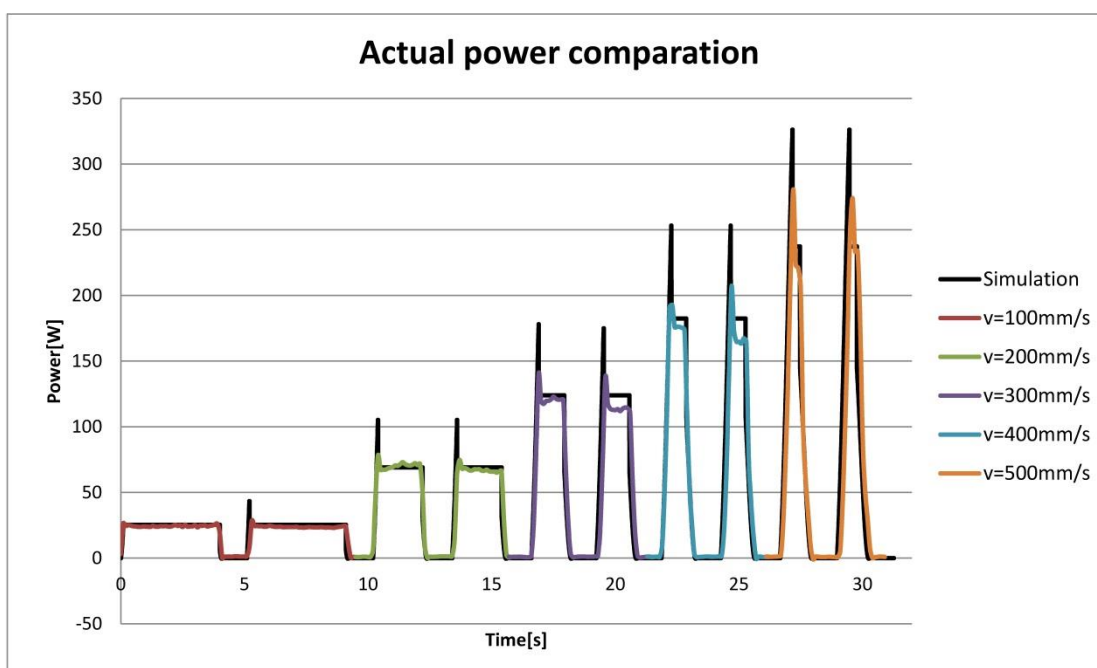
V momentu, kdy je již připraven matematický model, vygenerována řídicí matice, připravený fyzikální model a načtené knihovny do řídicího software je možné zahájit samotnou simulaci. Předtím je ale nutné nakonfigurovat výstupy ze simulačního softwaru tak, aby nám poskytly údaje, které budou relevantní pro daný experiment. Pro přehlednost je vhodné se vyvarovat vedlejších výsledků, které nejsou relevantní k požadavku na zjištění průběhu spotřeby elektrické energie a aktuálního výkonu.

5. Interpretace výsledků simulace a jejich srovnání s měřením lineárního stanu

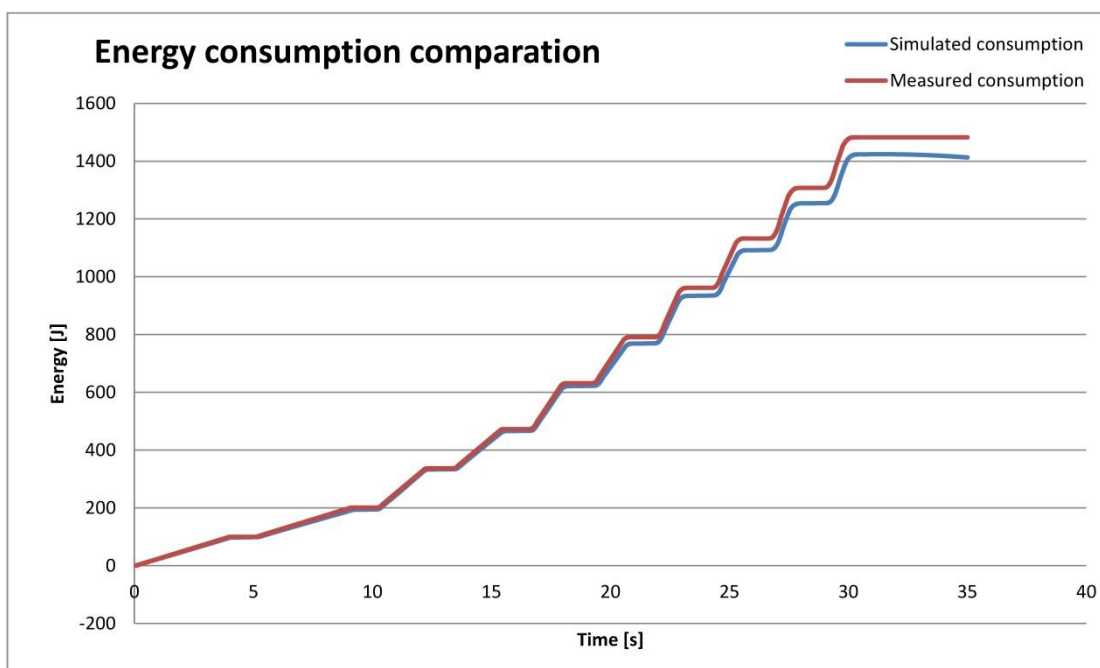
V rámci ověřování simulace bylo provedeno měření při různých posuvových rychlostech a zatíženích. Měření proběhlo při zatíženích upínacího stolu 0 kg, 17,336 kg a 22,711 kg a při posuvových rychlostech 100, 200, 300, 400 a 500 mm/s. Výstupem je srovnání průběhů aktuálního výkonu naměřených a simulovaných 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.

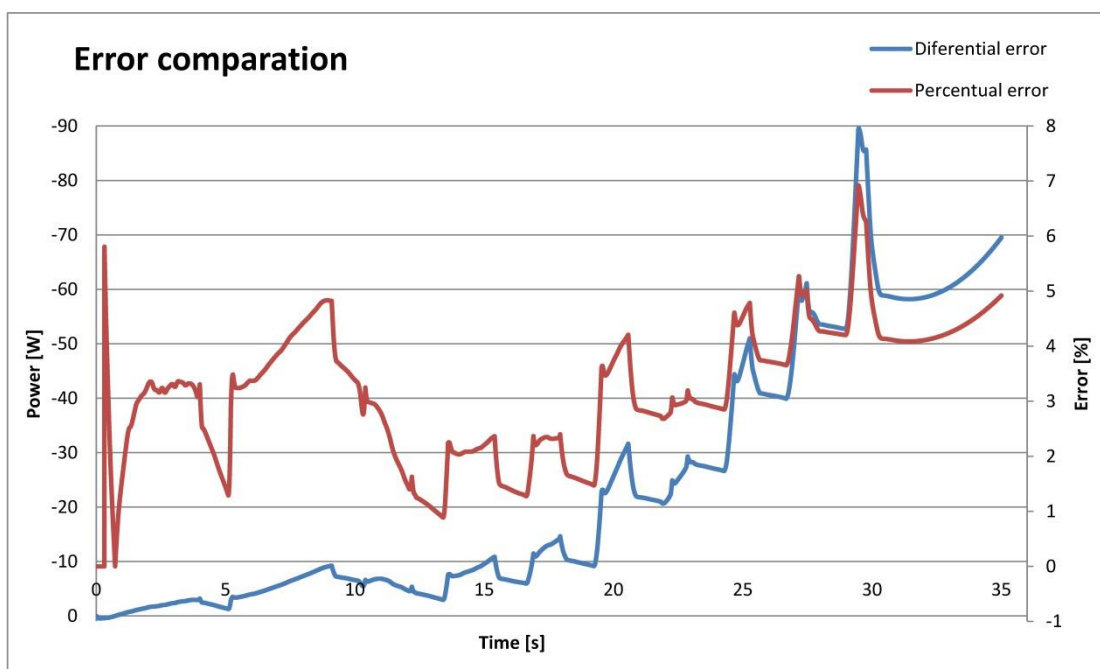
Výsledky jsou shrnuty v následujících grafech. V první části jsou zobrazeny výsledky měření při nulovém zatížení upínacího stolu Obr. 32, Obr. 33 a Obr. 34, kdy pohonné mechanismy jsou zatěžovány pouze hmotností stolu a komponent k němu připevněných.



Obr. 32 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=0$ kg

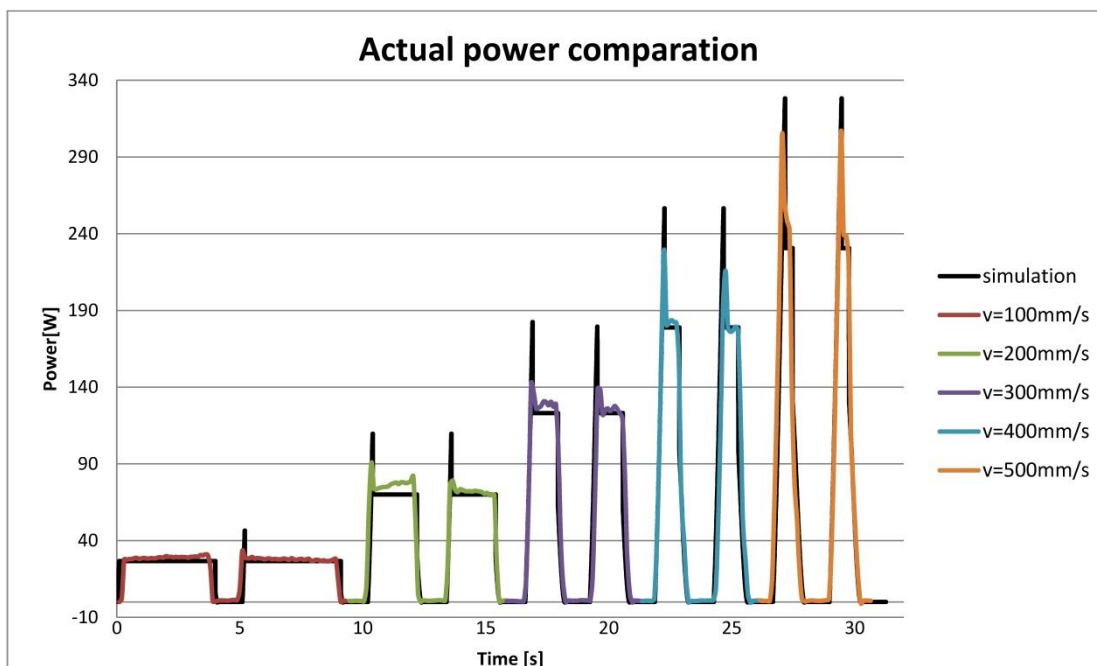


Obr. 33 Srovnání simulované a měřené energie při $m=0$ kg

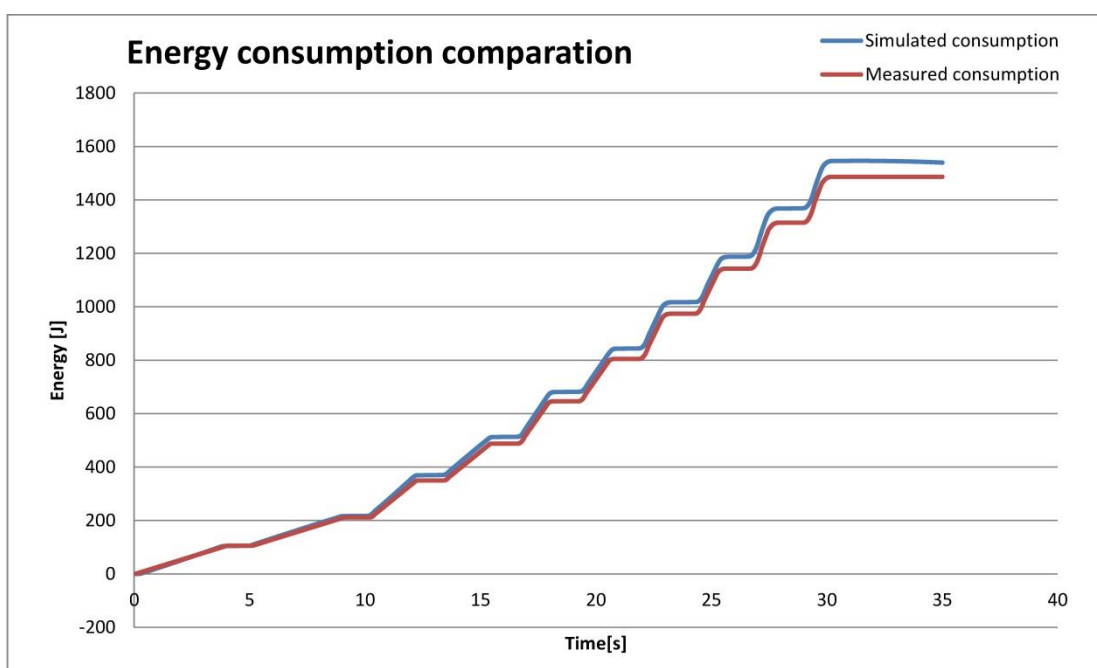


Obr. 34 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=0$ kg

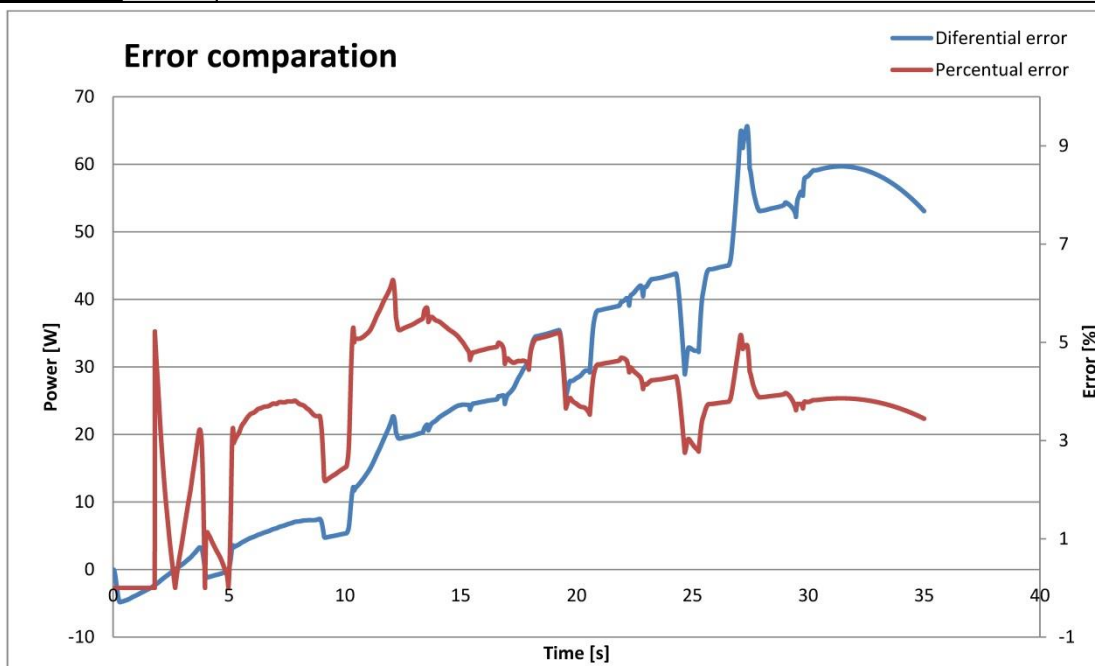
Dalším krokem bylo měření a simulace se zatížením 17,336 kg. Výsledné průběhy aktuálního výkonu, spotřeby energie a chyby jsou zobrazeny na Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37. Stejně jako u předešlého měření je patrná větší odchylka u výkonových špiček, které jsou hůře predikovatelné, ale v rámci porovnání simulace a měření je odchylka do 10%.



Obr. 35 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=17,336\text{ kg}$

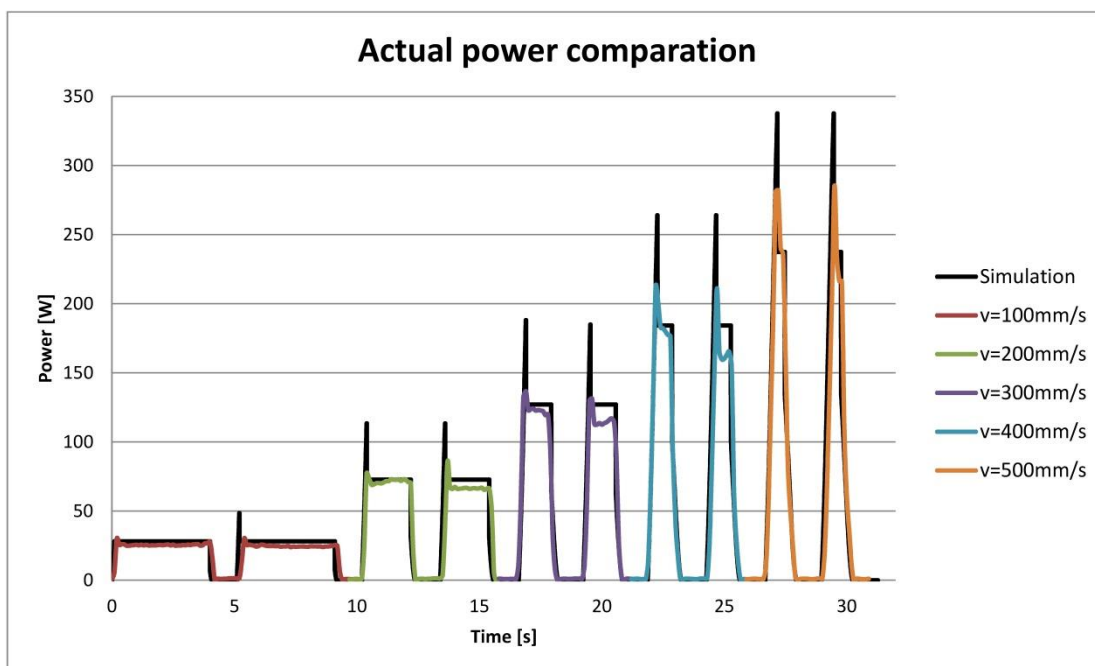


Obr. 36 Srovnání simulované a měřené energie při $m=17,336\text{ kg}$

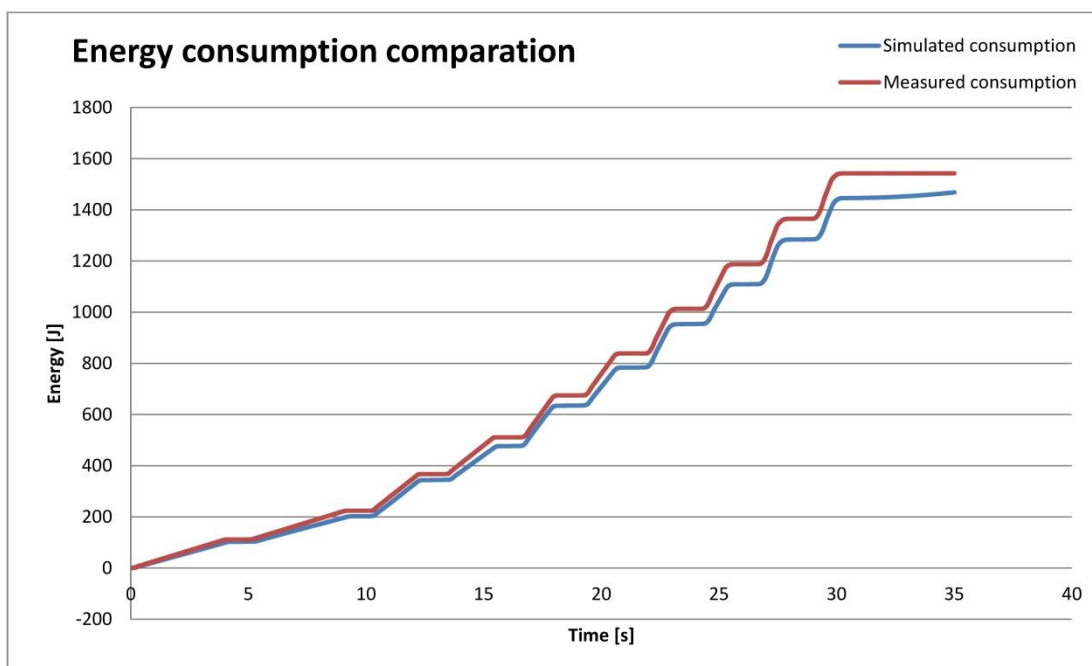


Obr. 37 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=17,336$ kg

Při srovnávání měřených a simulovaných dat byla dodržena odchylka do 10%. Diferenciální a procentuální chyba je počítána z dat aktuálního výkonu, kde se chyba projevuje více než při srovnání záznamu energie, kde by měla odchylka tvar pozvolna stoupající křivky kvůli kumulativní chybě projevující se v tomto případě. Posledním verifikačním cyklem byla realizace experimentu při zatížení stolu 22,711 kg. Výsledné průběhy aktuálního výkonu, spotřebované energie a chyby jsou zobrazeny na Obr. 38, Obr. 39 a Obr. 40.



Obr. 38 Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=22,711$ kg



Obr. 39 Srovnání simulované a měřené energie při $m=22,711$ kg



Obr. 40 Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=22,711$ kg

V rámci realizovaného experimentu byla provedena série měření, která vedla k první verifikaci metody pro vyhodnocování energetické náročnosti u mechanismů obráběcích strojů. V případě tohoto experimentu se jednalo o posuvové mechanismy, které se podílí na řezném procesu, v modelovém případě, kdy je série měření prováděna na standu simulující lineární posuvovou osu. Lineární osa byla zatěžována pouze břemenem, které demonstruje zatížení od obrobku a samotný řezný proces není do simulace zahrnut.

Tab. 4 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

V simulaci a experimentu je především kladen důraz na kvantifikaci odporové síly působící proti směru pohybu, který je vyvolán méně než stoprocentní účinností převodních mechanismů pro lineární vratný pohyb, což vytváří nenulový krouticí moment kuličkového šroubu při rovnoměrném pohybu. Výsledky a shrnutí experimentu jsou provedeny v grafech na Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34, Obr. 35, Obr. 36, Obr. 37, Obr. 38, Obr. 39 a v Obr. 40 a v tabulce Tab. 4 shrnující přesnost 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.

Dalším možný vývoj této metody je vhodný aplikovat na víceosé obráběcí stroje, což výrazně rozšíří možnost využití. Nezbytným prvkem, který by měl být řešen v rámci docílení komplexnosti této metody je vliv řezného procesu na okamžitý patní výkon stroje a zahrnutí periferních zařízení do simulace.

6.2 Validační experiment na stroji MCV 750 Quick

Dalším krokem ve verifikaci 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.

Demonstračním modelem je tříosá CNC frézka se sériovým kinematickým uspořádáním. Charakteristikami zařízení MCV 754 Quick jsou:

- Řada MCV je postavena na nosném rámu ve tvaru C. Uspořádání a tvar odlitků nosného rámu strojů je optimalizováno s ohledem na požadavek na vysokou tuhost a stabilitu
- Pro zajištění lineárních posuvů je použito valivých lineárních vedení, které zajišťují vysokou pracovní přesnost.
- Pro polohování je využito přímého odměřování, které částečně eliminuje nepřesnosti vzniklé vlivem oteplení pohonného mechanismu.

- Jako pohonné mechanismy jsou využity kuličkové šrouby poháněné synchronním servopohonem.
- Pracovní prostor má rozsah 750 x 550 x 500 mm
- Výkon vřetene 9 kW

6.2.1 Určování spotřeby elektrické energie stroje MCV 754 Quick

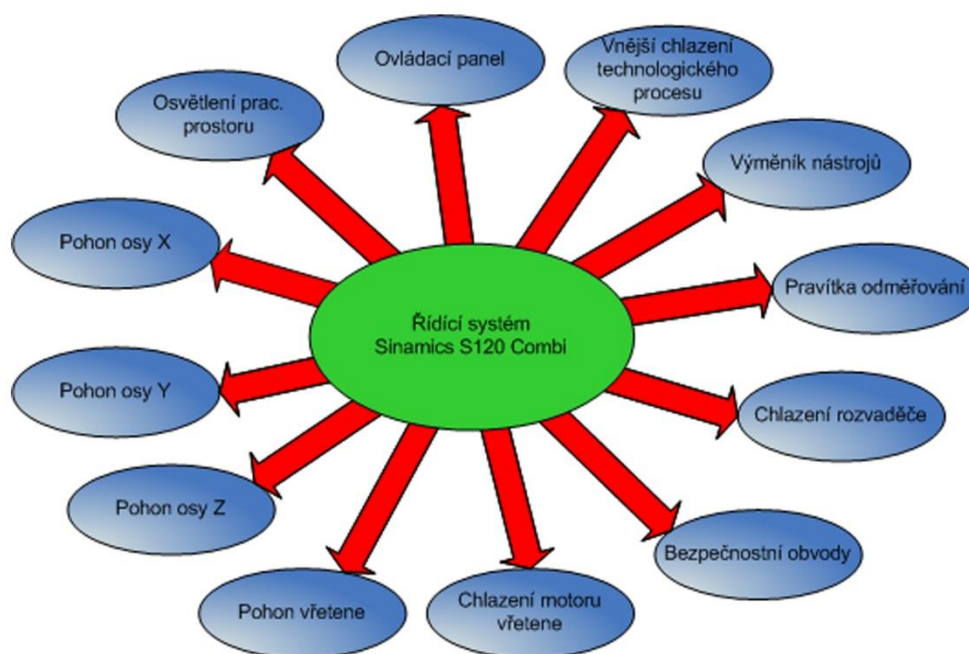
Během simulovaného určování spotřeby elektrické energie stroje MCV 754 Quick bylo postupováno dle na schématu metody uvedeného na Obr. 17. Postupuje se opět ve čtyřech úrovních, kdy je na začátku nutné nashromáždit veškerá data, která poslouží k zpřesnění simulace.

1. Sběr dat

Při shromažďování poznatků o stroji se vycházelo z poskytnutých údajů od výrobce a z manuálu dodaného ke stroji.

– Konfigurace stroje

Stroj je ve standardní konfiguraci, pomocí které lze vykonávat základní technologické operace ve třech osách. Pomocí CNC řídicího systému Sinumerik lze realizovat tzv. 2,5D obrábění. Rozšíření stroje o otočný a naklápěcí stůl není součástí tohoto stroje. V terminologii popisující charakter obráběcího stroje lze stroj označit jako: O (obrobek)-X-Y-Z-S (vřeteno)-T(nástroj). Jedná se o zařízení se sériovou kinematikou. Řada strojů MCV je postavena na nosném rámu ve tvaru C. Dále vše odpovídá vlastnostem vyjmenovaným obecně v charakteristice zařízení v kapitole 6.2.



Obr. 41 Schématické rozložení spotřebičů OS

Jednotlivé dominantní energetické spotřebiče v obráběcím stroji (OS) MCV 754 Quick, které je možné do simulace zahrnout jsou zobrazeny na Obr. 41. V rámci plánovaného experimentu bude brán zřetel na skupiny spotřebičů, které se budou

přímo podílet na spotřebě elektrické energie během experimentu, tedy během měření spotřeby pohybu posuvových os při různých rychlostech. Z celkového schématu tedy odpadají skupiny:

Výměník nástrojů – z důvodu nevyužití výměníku

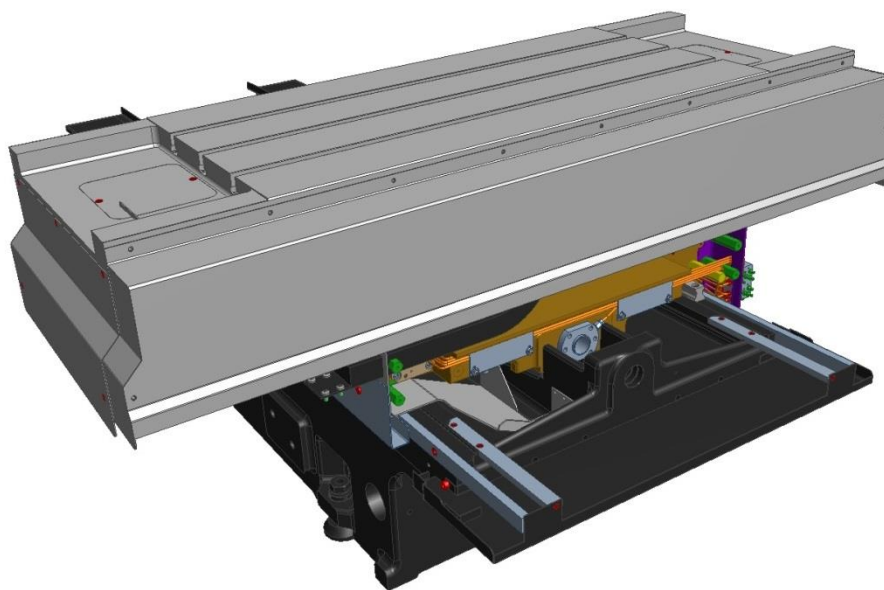
Pohon a chlazení vřetene – nedochází k obrábění

Vnější chlazení technologického procesu – není nutné chladit technologický proces, který probíhá

Simulace je zaměřena na spotřebu elektrické energie posuvových os pod různým zatížením.

– CAD model

Podklady pro simulaci v podobě CAD modelu byly dodány výrobcem stroje. Samotný CAD model byl dodán ve velmi detailním provedení, proto bylo nutné tento model dále zjednodušit pro účely následné simulace viz zásady uvedené v kap. 5.1.2. CAD model je členěn do logických celků jednotlivých podsestav, které lze aplikovat jako nezávislé celky, které vůči sobě konají pohyb dle požadavků technologického procesu. Detailní CAD model viz Obr. 42.



Obr. 42 CAD model křížového stolu MCV 754 Quick

– Technologie

Jedná se o stroj, jehož posuvové osy tvoří sériový kinematický řetězec. Technologické možnosti stroje odpovídají parametrům strojů obdobného typu. Posuvové osy dosahují rychloposuvu až 30 m/min a vřeteno 10000 ot/min. Pomocí CNC řízení je možné realizovat 2,5D obrábění, protože součástí stroje není otočný stůl ani kolébka. Jedná o stroj univerzálního charakteru, kde není žádný typický obrobek, jehož zpracování je primárním účelem tohoto zařízení. Pro měření bylo využito obrobku, uvedeného v normách pro vyhodnocení energetické náročnosti frézek.

Stroj dále nabízí možnosti automatického měření korekcí nástroje a obrobkovou sondu. Softwarově stroj umožňuje volumetrické kompenzace v prostoru. Novým modulem je funkce měření spotřeby elektrické energie, která je zabudována přímo ve stroji. Marketingově je označován jako CTRL+E(nergy), podle spouštěcí kombinace kláves ovládacího panelu.

2. Zpracování a analýza dat

– Analýza subsystémů obráběcího stroje

Na základě hrubého rozdělení jednotlivých subsystémů je bylo nutné stanovit komponenty, které mají konstantní a proměnlivý průběh výkonu, který se projevuje na celkovém energetickém profilu stroje.

Řídicí systém – má proměnlivou hodnotu výkonu, ale vzhledem k výkonům, které jsou na stroji měřeny, se jedná o zanedbatelnou změnu a z hlediska simulace bude uvažován jako konstantní.

Ovládací panel – řadíme mezi spotřebiče s konstantním průběhem, protože naměřené výchylky jsou taktéž zanedbatelné

Osvětlení pracovního prostoru – je realizováno světelným zdrojem, který nepřipouští zesilování nebo tlumení. Jedná se tedy o spotřebič s konstantním průběhem.

Pravítka odměřování – odměřování samotné má velmi malý odběr a zároveň můžeme hovořit o konstantním průběhu díky nízkým změnám během pohybu posuvových os. Hlavní podíl na spotřebě mají pravítka ve stlačeném vzduchu (používá se, aby se nezanášely nečistotami). Pravítka uvažujeme jako spotřebič s konstantním průběhem.

Chlazení rozvaděče - aktivuje se po zapnutí stroje hlavním vypínačem a je v chodu po celou dobu, kdy je stroj zapnut. Průběh jeho výkonu je z hlediska rozlišení konstantní.

Bezpečnostní obvody – podobně jako chlazení rozvaděče jsou bezpečnostní obvody aktivovány po zapnutí stroje. Fungují ve více úrovních podle nastavení bezpečnostního klíče. Při různých úrovních chodu stroje je aktivována daná úroveň těchto bezpečnostních obvodů. Během provozu technologického procesu je aktivována nejvyšší úroveň, která zabraňuje některým zásahům uživatele tak, aby nedošlo k poranění obsluhy nebo zbytečnému poškození stroje. V simulaci je tento subsystém započítán, ale vzhledem k velmi malým příkonům nebude mít velký vliv na celkový průběh výkonu stroje jako celku.

Pohony os XYZ – celková simulace je postavena především na predikci průběhů těchto subsystémů. Jedná se o subsystém s proměnlivým průběhem výkonu. Závisí především na posuvové rychlosti a na zatížení jednotlivých konstrukčních uzlů. Samotné „buzení“ motorů, které jsou momentálně v klidu má konstantní charakter a změna je patrná až při zrychleném a rovnoměrném pohybu. Pohonům posuvových os bude věnován největší prostor.

Pohon vřetene a jeho chlazení – stejně jako u posuvových os se jedná o subsystémy s proměnlivým výkonovým profilem závislým na otáčkách a technologické operaci. Vřeteno je jedním z dominantních spotřebičů v rámci

obráběcích strojů, nicméně v rámci simulace nebude vřeten zahrnuto, jelikož se simuluje pouze průběh výkonů při funkci posuvových os.

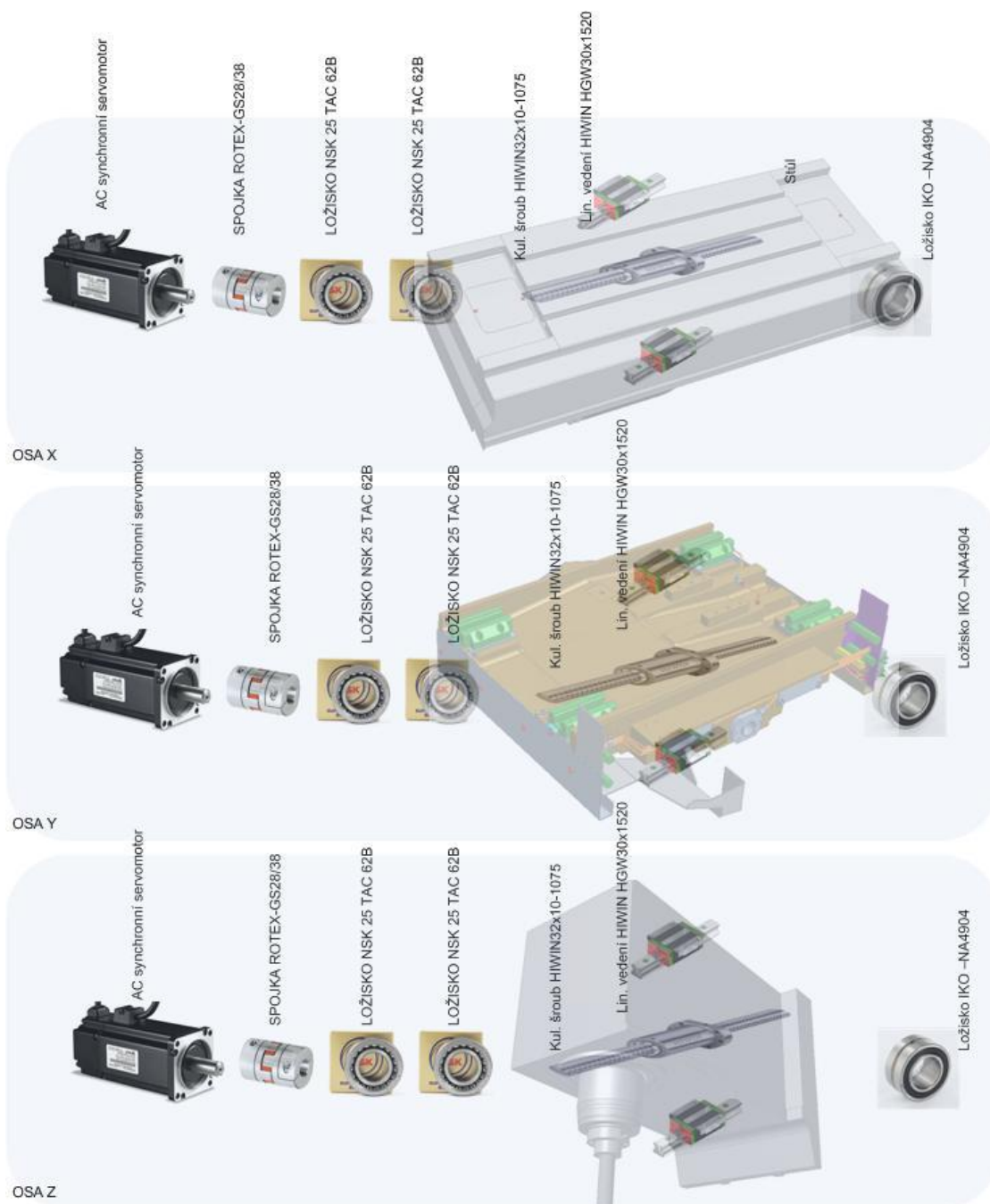
Výměník nástrojů – je zvláštní případ kombinace subsystému s konstantní a proměnlivou spotřebou. Závisí především na nástroji a času, během kterého dojde k najetí nástroje do lůžka výměníku. Samotná výměna pak nemá konstantní průběh výkonu. Jedná o cyklicky se opakující operaci a je možné operaci nahradit konstantou, která vyvolá stejnou změnu spotřeby energie.

Chlazení řezného procesu – v případě stroje MCV 754 Quick není instalováno čerpadlo chladicí kapaliny s proměnlivými otáčkami, mluvíme tedy o spotřebiči s konstantním průběhem odebíraného výkonu. Míra výkonu se liší podle regulace průtoku manuální pákou. Během řezného procesu by nemělo docházet k nastavování průtoku obsluhou, jelikož se nastavovací páka nachází za krytem pracovního prostoru, který je po dobu technologické operace zamčen elektrickým zámkem.

U obráběcích strojů, které chápeme jako soubor energetických spotřebičů, rozumíme pojmem „basic load“ konstantní hladinu výkonu odebíraného ze sítě v momentu, kdy je stroj zapnut, a motory posuvových os jsou nabuzeny. Mezi subsystémy vytvářející tento basic load řadíme: řídicí systém, bezpečnostní obvody, chlazení rozvaděče, pravitka odměřování, osvětlení, ovládací panel a nabuzené motory posuvových os. Pro stroj MCV 754 Quick je hodnota basic load rovna 691W.

– Analýza pasivních komponent

Uspořádání komponent posuvových os vychází z klasické koncepce přímého pohonu a sériově řazených komponent. Stroj je navržen tak, aby případné servisní zásahy byly co nejjednodušší, proto jsou mnohé komponenty jednotlivých posuvových os totožné s jinou posuvovou osou. Pohon jednotlivých os je řešen soustavou kuličkový šroub – matice, kde je kuličkový šroub uchycen na obou stranách, přičemž na straně u motoru je uložen ve dvou radiálně-axiálních ložiscích a na druhé straně je uložen v radiálním ložisku umožňujícím axiální posun šroubu pro potlačení vzpěrné deformace vzniklé rozpínáním šroubu vlivem teplotních dilatací šroubu. Motor je vždy umístěn v ose s kuličkovým šroubem. Přenos krouticího momentu zajišťuje bezvúlová spojka. Z tohoto uspořádání vyplývá násobný projev dílčích účinností jednotlivých komponent, což je nutné zohlednit při simulaci. Uspořádání komponent v jednotlivých osách je zobrazeno na Obr. 43.



Obr. 43 Schématické znázornění rozmístění komponent posuvových os MCV 754 Quick

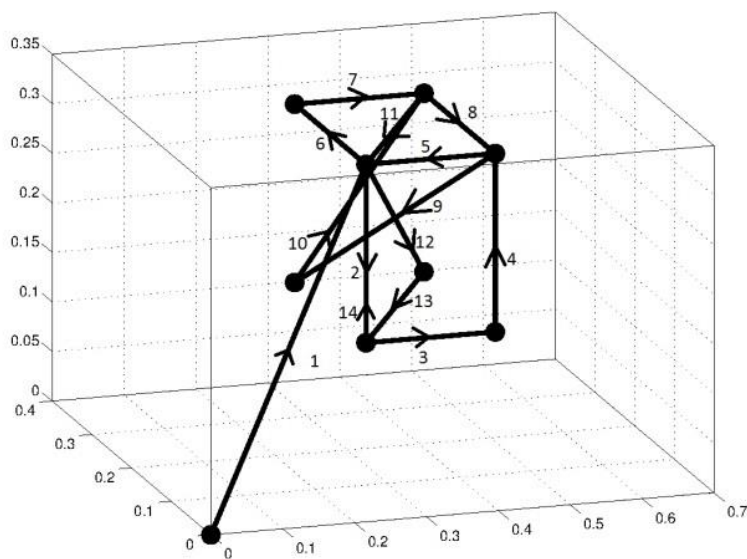
K detailní analýze všech pasivních komponent je nutné znát podrobné informace od výrobců daných komponent, které výrobci běžně neposkytují, jak již bylo zmíněno. Způsoby zjištění energetických profilů dílčích komponent jsou tedy závislé na dodaných informacích od výrobce nebo na měření během nasazení na stroj. Jelikož jsou u všech posuvových os použity komponenty stejného typu lišící se jen v délkách, můžeme předpokládat, že změřením a analýzou jedné posuvové osy získáme podklady zohledňující i ostatní posuvové osy. Je nutné přihlídnout k odlišným hmotnostem a momentům setrvačnosti soustavy, kterou pohonný mechanismus zajišťuje. Výsledky by se ale neměly příliš lišit.

Do simulace pak bude podobně jako v předchozím experimentu vstupovat proměnná závislá na funkci, která definuje míru ztrátového výkonu v závislosti na posuvové rychlosti. Způsob, jakým byla tato funkce získána je totožný se způsobem uvedeným v předchozím experimentu. Do simulace budou takovéto proměnné vstupovat celkem 3, a to kvůli rozdílným velikostem posuvových os v rámci technologického procesu.

– **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 je cyklem používaným pro měření spotřeby elektrické energie u frézovacích center, vychází z normy TS B 0024-1 [26], a je zaznamenán na obrázku. Šipky ukazují směr pohybu v daném okamžiku, čísla ukazují posloupnost jednotlivých polohovacích operací. Cyklus je zaměřen pouze pro polohovací operace. Trajektorie nástroje odpovídá pomyslné krychli o délce strany 180 mm. Tato trajektorie je postupně dosahována při různých posuvových rychlostech. U tohoto experimentálního měření bylo dosahováno rychlostí 1000, 3000, 15000 a 30000 mm/min. Jedná se o rychlosti využívané u standardních frézovacích operací a HSC i rychlost 30000 mm/min odpovídá rychloposuvu stroje MCV 750 Quick.



Obr. 44 Dráhy nástroje během technologického procesu

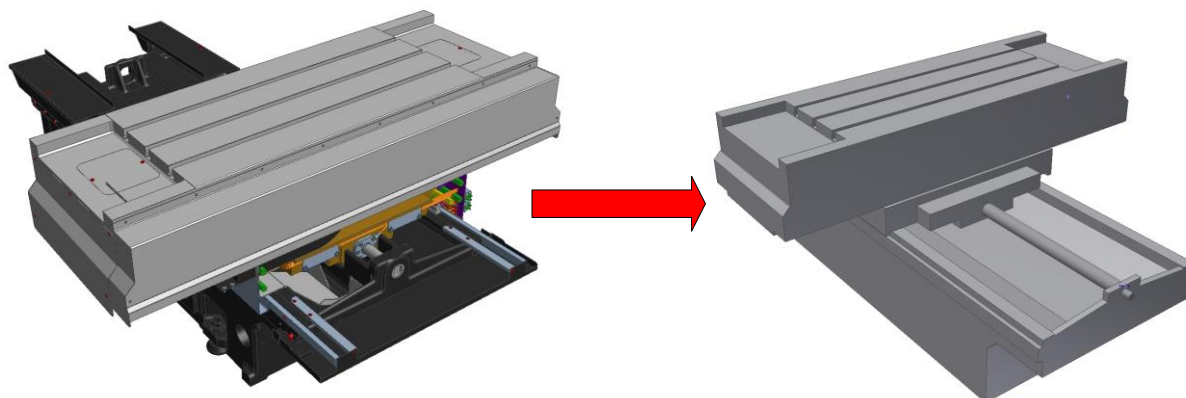
– **Analýza řezných podmínek**

Podobně jako u předchozího experimentu nebude docházet k obrábění, proto nebude řezný proces analyzován.

– **Příprava CAD modelu**

CAD model byl dodán výrobcem v detailním provedení, a proto byl model zjednodušen a převzata byla pouze obálka stroje, viz Obr. 45, a mechanické

parametry jako například hmotnosti a momenty setrvačnosti. Výčet vlastností je uveden na Obr. 46.



Obr. 45 Příklad zjednodušení křížového stolu frézky

Výpis fyzikálních vlastností vřeteně	Výpis fyzikálních vlastností vřeteníku	Výpis fyzikálních vlastností saní
objem= 0,003 hmotnost= 26,157	hustota= 7200,000000 kg/m ³	hustota= 7200,000000 kg/m ³
Vzhledem k souřadnicovému systému Globální.	objem= 0,023913 m ³ hmotnost= 172,171999 kg Obsah plochy= 2,149839 m ²	objem= 0,011403 m ³ hmotnost= 82,098114 kg Obsah plochy= 1,375129 m ²
Těžiště: X= -0,195 Y= -12,149 Z= 0,047	Vzhledem k Globální souřadnicový systém : Těžiště : X= 0,322712 mm Y= -224,408091 mm Z= 231,444616 mm	Vzhledem k Globální souřadnicový systém : Těžiště : X= 16,163655 mm Y= 285,709397 mm Z= 75,294153 mm
Hmotný střed objemu: X= -0,195 Y= -12,154 Z= 0,047	Hmotný střed objemu : X= 0,322712 mm Y= -224,408091 mm Z= 231,444616 mm	Hmotný střed objemu : X= 16,163655 mm Y= 285,709397 mm Z= 75,294153 mm
Hlavní momenty setrvačnosti: Ixx= 0,210 Iyy= 0,064 Izz= 0,209	Hlavní momenty setrvačnosti : Ixx= 26,602216 kg-m ² Iyy= 13,209013 kg-m ² Izz= 17,589790 kg-m ² Ixy= -0,032063 kg-m ² Ixz= -0,006960 kg-m ² Iyz= -8,969133 kg-m ²	Hlavní momenty setrvačnosti : Ixx= 10,064389 kg-m ² Iyy= 5,241505 kg-m ² Izz= 14,295445 kg-m ² Ixy= 0,431800 kg-m ² Ixz= 0,126727 kg-m ² Iyz= 1,782068 kg-m ²
Orientace hlavních os: 1= 0,98 0,00 0,20 2= -0,20 0,00 0,98 3= 0,00 -1,00 0,00	Orientace hlavních os : X= 0,093505; 0,005789; 0,995602 Y= 0,995610; 0,003600; 0,093527 Z= -0,004126; 0,999977 ;-0,005427	Orientace hlavních os : X= -0,005672 ;-0,005555 ;0,999968 Y= -0,028398 ;0,999582 ;0,005392 Z= -0,999581 ;-0,028367 ;-0,005827
Vzhledem k hlavním osám	Vzhledem k hlavním osám :	Vzhledem k hlavním osám :
Hlavní momenty setrvačnosti: I1= 0,206 I2= 0,205 I3= 0,064	Hlavní momenty setrvačnosti : I1= 8,921381 kg-m ² I2= 8,707347 kg-m ² I3= 3,986098 kg-m ²	Hlavní momenty setrvačnosti : I1= 7,572578 kg-m ² I2= 4,756034 kg-m ² I3= 2,895650 kg-m ²
Poloměry setrvačnosti: K1= 88,709 K2= 88,622 K3= 49,653	Poloměry setrvačnosti : Rx= 227,632774 mm Ry= 224,885606 mm Rz= 152,157277 mm	Poloměry setrvačnosti : Rx= 303,707350 mm Ry= 240,688810 mm Rz= 187,804687 mm

Obr. 46 Příklad mechanických vlastností použitých pro simulaci

Po zjednodušení dílců je opět třeba vytvořit patřičné podsestavy tak, aby tvořily základní bloky obráběcího stroje. Stroj byl tedy rozdělen do podsestav lože, saně, stůl, stojan, vřeteník a jednotlivých pohonných mechanismů. Vše pak bylo exportováno do stp formátu se zachovaným původním souřadným systémem, aby byl import do simulačního

software jednodušší a bez nutnosti umístit vůči sobě jednotlivé bloky do požadované polohy.

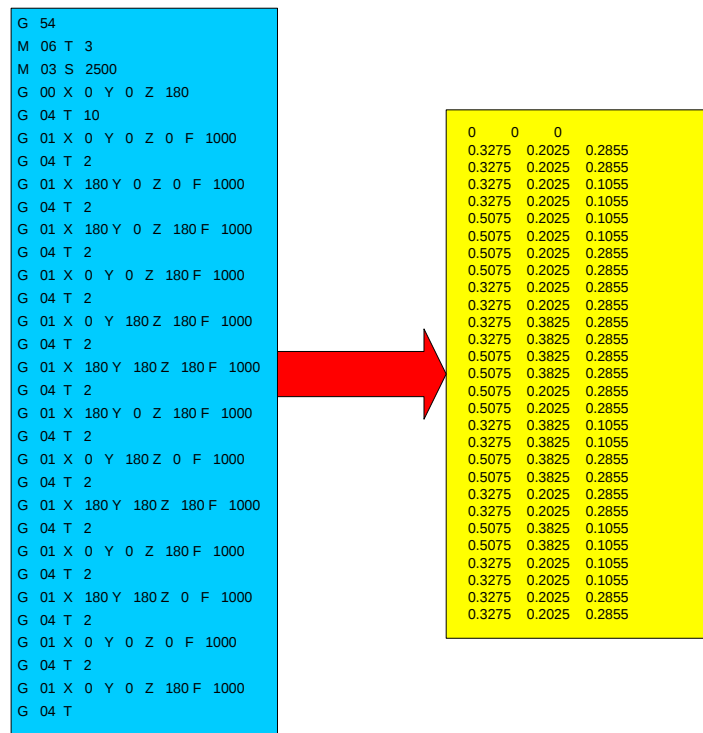
3. Příprava modelu

– Příprava matematického modelu

Matematický model, jak již bylo popsáno, funguje v několika na sebe navazujících úrovních. Prvním z nich je částečná časová parametrizace G-kódu, ze kterého vystupují údaje v podobě časového bodu a hodnoty zrychlení v tomto bodě. Dále se zde nachází úroveň úplné časové parametrizace sestávající se z řídicí struktury a ztrátové struktury, která ovlivňuje průběh výkonů a spotřebované energie. Na úplnou časovou parametrizaci navazuje samotná simulace ve fyzickém modelu prostřednictvím jiného software, se kterým je řídicí software spárován a vyhodnocovací část, pomocí které je možné interpretovat výsledky. V případě této simulace je již nutné počítat s tzv. složkou „basic load“, která se podílí na celkovém energetickém profilu stroje konstantní hodnotou 691W. Oproti předchozímu experimentu je zde nutné uvažovat o pohybu ve třech na sobě nezávislých osách a o kombinovaném pohybu více os najednou. Součástí tohoto matematického modelu není řezný proces ani vyšší než lineární interpolace. Kombinací posuvů ve více osách se ukáže správnost nastavení náročnosti jednotlivých os. Matematický model je tedy nutné připravit pro všechny posuvové osy. Příkladem je uveden model pro posuvovou osu X na Obr. 49 pro kompletní časovou parametrizaci, kde právě blok parametrizace je definován vzorci (85), (86) a (87).

– Překladač G-kódu

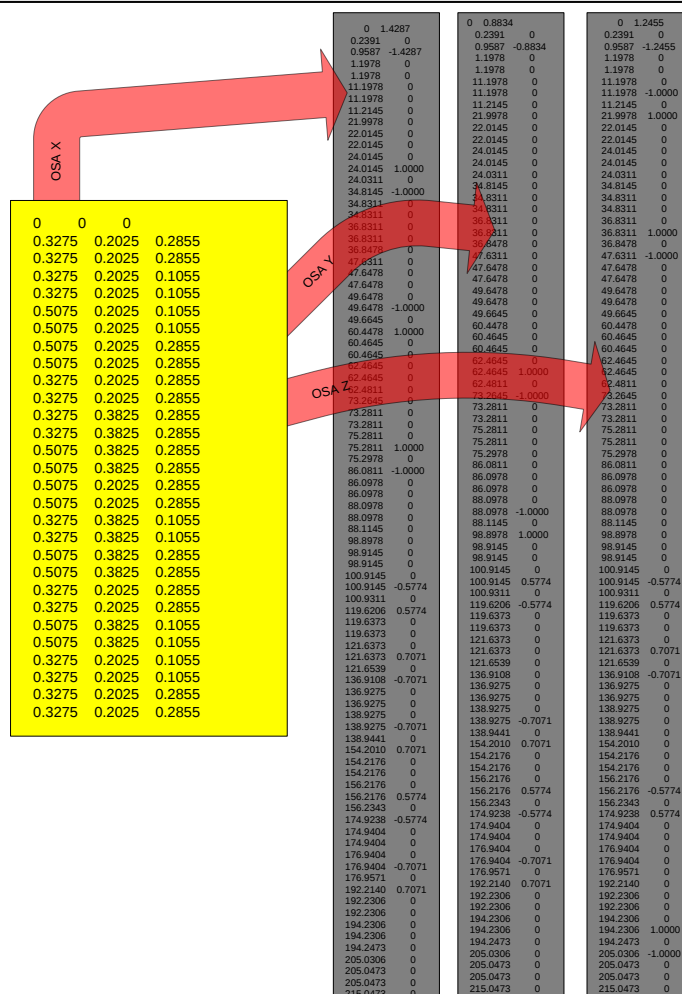
Překlad G-kódu je stejný jako u předchozího experimentu, jediným rozdílem je využití trojrozměrného pohybu s užitím lineárních interpolací. Výstupem z překladače G-kódu je matice bodů, v nichž se nástroj během technologického procesu nachází. To opět slouží jako podklad pro částečnou časovou parametrizaci.



Obr. 47 Ukázka překladi G-kódu do matice bodů

– Částečná časová parametrizace

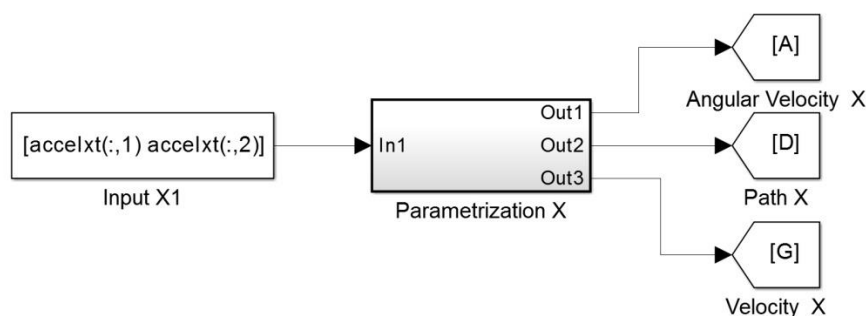
Výstupem částečné časové parametrizace jsou 3 dvourozměrné vektory popisující změny zrychlení jednotlivých os v čase. Dalším výstupem je celkový časový údaj popisující délku procesu. Překladač G-kódu funguje na základě čtení a analýzy strojového kódu, který je nutné spustit před samotnou simulací a úplnou časovou parametrizací. Částečná časová parametrizace pak opět poskytne řídicí matice pro jednotlivé posuvové osy. Příklad konkrétní časové parametrizace pro tento případ je ukázán na Obr. 48.



Obr. 48 Ukázka částečné časové parametrizace

– 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. 49.



Obr. 49 Řídicí část kompletní časové parametrizace osy X

Schéma řídicí části se skládá z jednoho vstupu, kdy proměnná $\text{accelxt}(:,1)$ udává čas simulace a $\text{accelxt}(:,2)$ požadované zrychlení v tomto čase. V pravé části jsou uvedeny výstupy. Blok „Parametrization“ je pak výpočetním blokem dopočítávajícím danou hodnotu výstupu v čase. Výstupy pak lze popsat následujícími pohybovými rovnicemi (85) pro úhlovou rychlost kuličkového šroubu, (86) pro posuvovou rychlost posuvové osy a (87) pro celkovou dráhu nástroje:

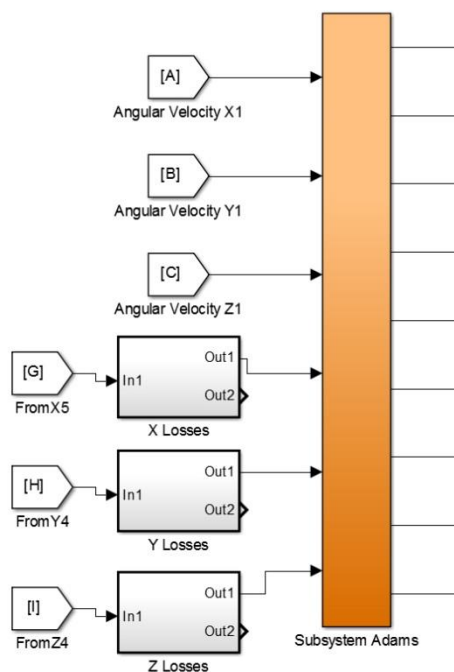
$$\omega_{XYZ} = \frac{2\pi}{P} \cdot \int a_{XYZ} dt [rad \cdot s^{-1}] \quad (85)$$

$$v_{p_{XYZ}} = 10^3 \cdot \int a_{XYZ} dt [mm \cdot s^{-1}] \quad (86)$$

$$l = \iint a_{XYZ} dt [m] \quad (87)$$

Kde je ω_{xyz} úhlová rychlost kuličkového šroubu, a_{xyz} je zrychlení dané posuvové osy, $v_{p_{xyz}}$ je posuvová rychlost a l je celková dráha nástroje. Kromě vstupních a výstupních veličin se zde nachází konstanta P , která charakterizuje stoupání kuličkového šroubu.

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.



Obr. 50 Schéma vstupních hodnot do simulace

Dalšími vstupy do simulace jsou hodnoty násobitelé reakční síly na lineární vedení jednotlivých posuvových os stroje, viz Obr. 50. 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. Subsystémy ztrátových funkcí („XYZ losses“) je možné vyjádřit následujícími rovnicemi:

$$f_x = \frac{1+|v_{p_x}|}{1+v_{p_x}} \cdot (-3 \cdot 10^{-9} \cdot |v_{p_x}|^2 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot |v_{p_x}| + 0,6502), \quad (88)$$

$$f_y = \frac{1+|v_{p_y}|}{1+v_{p_y}} \cdot (-3 \cdot 10^{-10} \cdot |v_{p_y}|^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot |v_{p_y}| + 0,5807), \quad (89)$$

$$f_z = \frac{1+|v_{p_z}|}{1+v_{p_z}} \cdot (-3 \cdot 10^{-8} \cdot |v_{p_z}|^2 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot |v_{p_z}| + 8,5655), \quad (90)$$

kde f_x , f_y a f_z jsou násobitele reakční síly. Pravá část rovnic před závorkou má za cíl vynásobit hodnotu funkce požadovaným znaménkem tak, aby síla působila proti směru pohybu. Ke složkám rychlosti v dané ose je přičten koeficient 1 proto, aby nedocházelo k dělení nulou. V závorkách je pak uvedena samotná rovnice ztrátové funkce, která byla empiricky zjištěna měřením a polynomicou interpolací druhého řádu. Způsob, jakým je dosaženo tvaru ztrátové funkce, je totožný s předchozím experimentem, prostřednictvím referenčního měření.

– Příprava fyzikálního modelu

Je nutné využít připravená data a aplikovat je v simulačním programu MSC Adams. Způsob definice fyzikálního modelu je totožný s předchozím experimentem, ale je nutné rozšíření o další 2 osy. Příprava fyzikálního modelu proběhla následovně:

Import podsestav z formátu STP

Všechny připravené podsestavy byly importovány z formátu STEP jako těleso typu SOLID. Rozmístění dílců v prostoru je zajištěn vkládáním přes totožný souřadný systém. Podsestavy již byly v prostoru správně umístěny a orientovány a nebylo nutné definovat jejich polohu v prostoru.

Definice materiálů, hmotností a momentů setrvačnosti

Z připravených dat od výrobce a z CAD modelu byly dosazeny mechanické veličiny tak, aby se zjednodušená CAD data projevila jako původní detailní model. Definice materiálu nebyla nezbytná, protože by docházelo ke kolizi při dopočítávání hmotností, která by u zjednodušeného modelu nekorespondovala s ručně zadanými. Takto to bylo provedeno z důvodu znalosti hmotností a momentů setrvačnosti jednotlivých podsestav

Tvorba vazeb modelu

Lože stroje bylo přichyceno k nehybné základně, tzv. tělesu GROUND, pomocí fixní vazby. Stojan byl přichycen k loži pomocí stejné fixní vazby. Saně, vřeteník a pracovní stůl byly vázány pomocí translační vazby bez tření - vřeteník a saně přímo k nosným strukturám, stůl byl přichycen k saním. Pro

kuličkové šrouby byla použita rotační vazba k daným dílcům. K unášenému dílci bylo použito šroubové vazby, kde bylo definováno stoupání 10 mm.

Definice proměnných

Stavové proměnné, které určují chod simulace a zprostředkovávají komunikaci mezi softwary bylo nutné definovat, aby bylo možné nastavit další části fyzikálního modelu. Nejdříve byly definovány vstupní proměnné zahrnující úhlové rychlosti a násobitele reakční síly f . Následně byly definovány výstupní proměnné zahrnující krouticí momenty, kterým bylo následně přiřazeno patřičné real-time měření během simulace. Na závěr byly vytvořeny další pomocné výstupní proměnné nutné pro ladění simulace v podobě odporové síly působící proti směru pohybu.

Nastavení vnějších sil

Vnější síly byly rozděleny do dvou kategorií – pohyb a síla. Pohyby se vztahují k již vytvořeným vazbám. Vstupní veličinou je úhlová rychlost, která se vztahuje k otočné vazbě na příslušném kuličkovém šroubu. Tento pohyb vychází přímo ze vstupních veličin z řídicí struktury simulace. Je nutné nastavit okolnost, při níž bude konán rotační pohyb, a veličinu, která do simulace vstupuje je úhlová rychlost v rad/s.

Síly, které byly nastaveny v rámci tohoto fyzikálního modelu, se týkají odporu proti pohybu a vztahují se tedy k danému dílci a jejich orientace je rovnoběžná se směrem pohybu, který v rámci technologického cyklu koná. Směr působení by měl být vždy proti pohybu, což zajišťuje znaménko vstupní proměnné f_{xyz} . Definovaná síla je tedy součin naměřené reakční síly od vedení a tohoto násobitele.

Nastavení sledovaných veličin

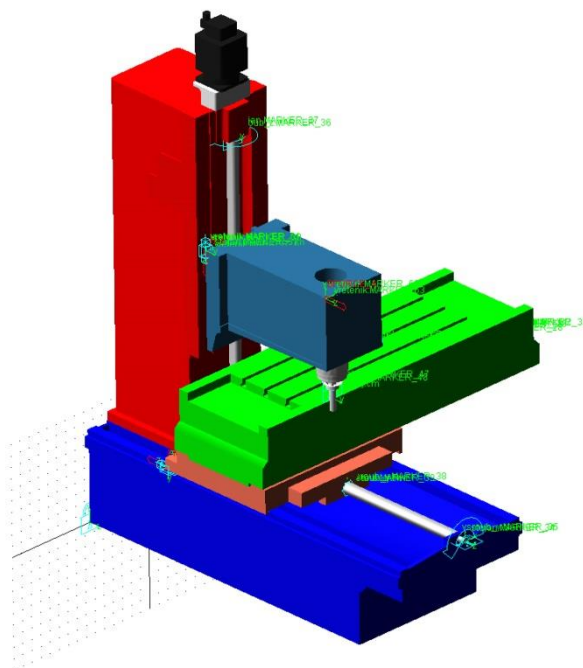
Jako výstup pro stanovení aktuálního výkonu a spotřebované energie poslouží měření krouticích momentů na kuličkovém šroubu, měřeného při rotačním pohybu. Jedná se tedy o krouticí moment, který je nutný pro překonání pasivní odporové síly jak během rozjezdu, tak během chodu při rovnoměrné rychlosti dané posuvové osy. Tato měření se zadají do sledovaných stavových proměnných sloužících jako výstup. Další měření jsou zaměřena na reakční sílu, která vstupuje jako jeden z parametrů při výpočtu pasivní odporové síly. Pomocnými měřeními jsou měření samotné pasivní odporové síly a zpětné měření úhlové rychlosti, která slouží taktéž jako výstup ze simulace pro zprehlednění celého průběhu simulace.

Export ovládacích prvků fyzikálního modelu

Export probíhá opět pomocí funkce PLANT EXPORT, kde se přímo vyberou vstupní a výstupní proměnné, a pak se vybere cílový software, se kterým simulační software komunikuje. V případě navržené metody se jedná o Matlab. Tím se vytvoří m-file, který si v řídicím softwaru načte již zmiňované vstupní a výstupní proměnné.

Načtení spárování fyzikálního a matematického modelu

Pro dokončení spárování řídicího a simulačního software je potřeba v řídicím software aktivovat vygenerovaný m-file a pomocí příkazu „adams-sys“ vytvořit subsystém symbolizující blok simulačního software, který je pak nutné zakomponovat do řídicího schématu.



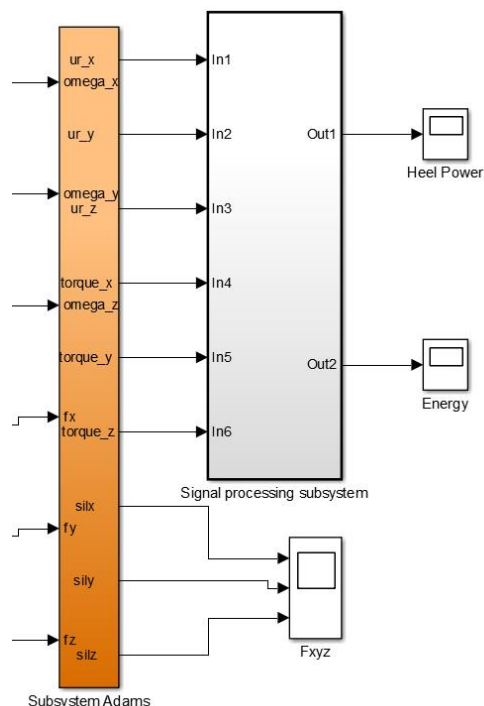
Obr. 51 Připravený model v simulačním software

4. Simulace

V momentu, kdy jsou veškerá vstupní data připravena, je nachystán matematický model a ten je připraven komunikovat se simulačním softwarem, je nezbytné provést ještě několik kroků proto, aby informace, které získáme prostřednictvím simulace, byly smysluplné a srovnatelné s reálnými naměřenými daty.

– 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. 52 Blokové schéma výstupních signálů simulace

Na Obr. 52 je znázorněné schéma zpracování signálů ze simulace. V subsystému zpracování signálu se přepočítávají dané mechanické veličiny na spotřebovávaný výkon a spotřebovanou energii. Funkce tohoto bloku je možné popsat následujícími rovnicemi (91) a (92):

$$P_{act} = \omega_x \cdot M_x + \omega_y \cdot M_y + \omega_z \cdot M_z [W] \quad (91)$$

$$E_{celk} = \int P_{act} dt [W \cdot s] \quad (92)$$

Výsledky je možné sledovat v reálném čase pomocí bloku „scope“ (označený jako Heel Power a Energy), který rovněž umožňuje zapisovat výsledné hodnoty do paměti. Ty je poté možné dále kopírovat a zpracovávat. Blok Fxyz slouží jako kontrolní prvek, kde se zobrazují průběhy pasivních odporových sil na jednotlivých posuvových osách.

– Příprava a nastavení simulace

Nastavení simulace zde spočívá v nastavení vzorkovací periody a délky trvání. Délka trvání simulace je odvozena od prvotního výpočtu částečné parametrizace G-kódu, kde je dopočítán čas, během kterého technologický cyklus proběhne. Vzorkování je nastaveno tak, aby bylo o řád detailnější než naměřená data, tedy měření proběhlo při vzorkování 50 ms a simulace při vzorkování 5 ms.

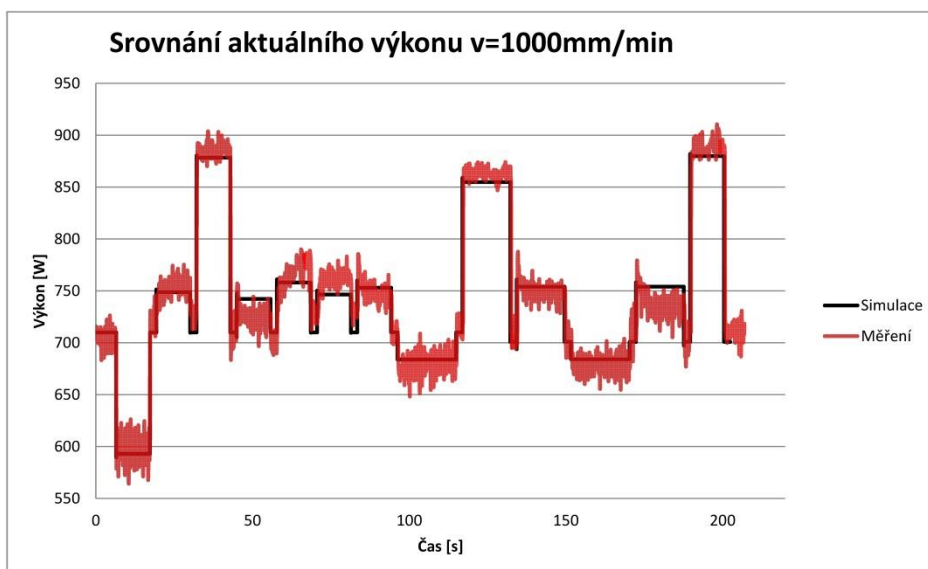
5. Interpretace výsledků a srovnání simulace s měřením stroje MCV 754 Quick

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 mm/s, $v = 3000$ mm/s a $v = 15000$ mm/s. Rychloposuv byl taktéž měřen, ale vzhledem ke krátké vzdálenosti posuvu nedochází k ustálení hodnoty aktuálního výkonu a průběh je charakterizován pouze výkonovými špičkami, které jsou těžko předvídatelné a v rámci jedné posuvové osy a totožného směru se různí. To je dáno pravděpodobně nedostatečným krokem vzorkování měřicího zařízení. Data v rámci jednotlivých posuvových rychlostí bylo opět nutné časově sladit, aby korespondoval čas prvního najetí stroje se simulací. Nesprávné časové sladění má za následek nárůst odchylky simulace od měření. Na zobrazených grafech jsou znázorněny průběhy simulovaného a měřeného výkonu při různých posuvových rychlostech, přičemž posloupnost jednotlivých posuvů je následující:

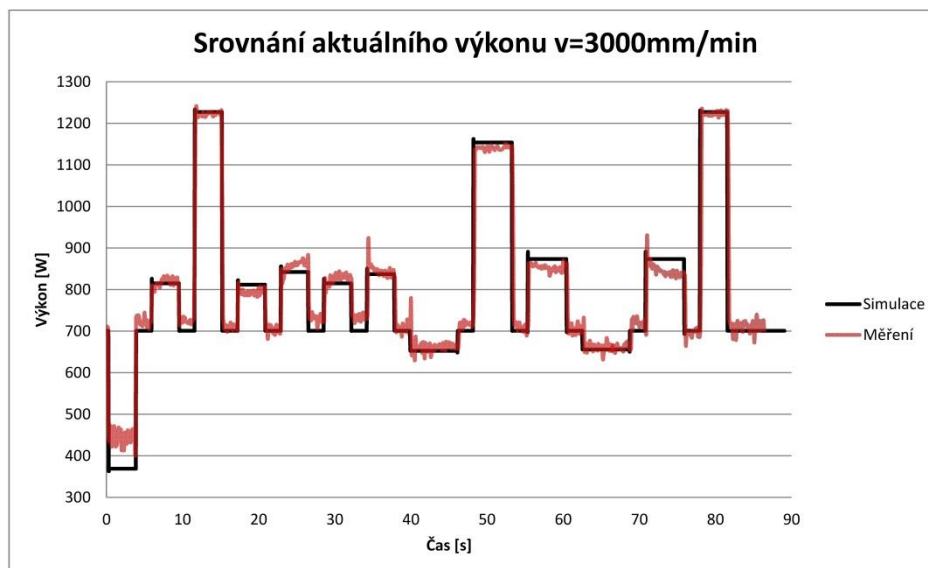
$-Z \rightarrow +X \rightarrow +Z \rightarrow -X \rightarrow +Y \rightarrow +X \rightarrow -Y \rightarrow -X + Y - Z \rightarrow +X + Z \rightarrow -X - Y$
 $\rightarrow +X + Y - Z \rightarrow -X - Y \rightarrow +Z$

Kladná a záporná znaménka značí směr pohybu podle souřadného systému stroje. Jednotlivé kroky oddělené symbolem $\rightarrow$ značí aktivaci posuvové osy, nebo jejich kombinaci podle orientace uvedené znaménkem.



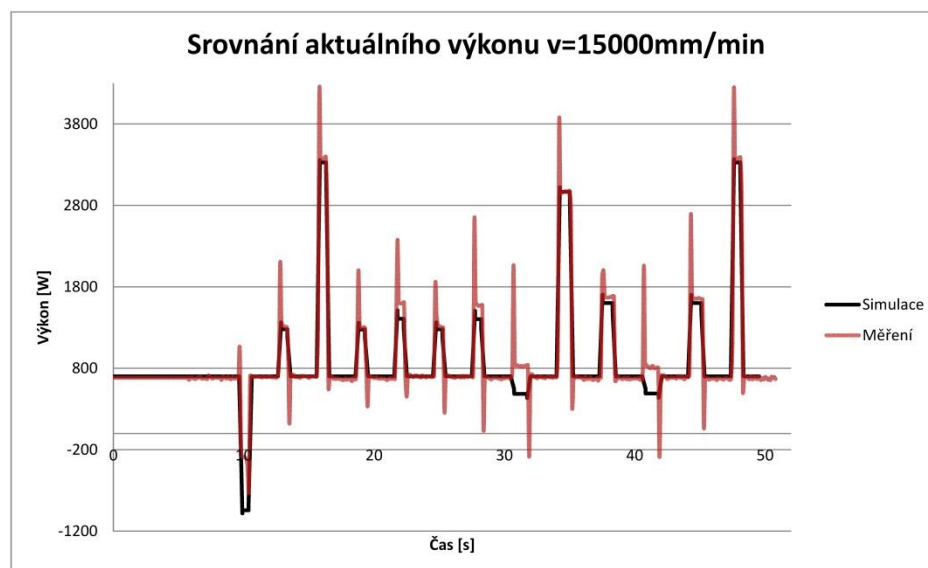
Obr. 53 Srovnání měřených a simulovaných dat výkonu při 1000 mm/s

Průběh měřeného a simulovaného aktuálního výkonu během nejnižší posuvové rychlosti je ukázán na obrázku Obr. 53, zobrazeném výše. Měření oproti simulaci se liší zejména v rozkmitu okolo průměrné hodnoty spotřeby v daném okamžiku při aktivaci dané posuvové osy. Díky poměrně malému rozsahu maximální a minimální hodnoty (přibližně 200 W) je v tomto grafu patrnější odchylka mezi reálným měřením a simulací. Větší výchylka může být způsobena rušením či drobnými výchylkami v rozvodné síti. Problematická část je zejména při aktivaci záporného směru osy Z, při které dochází částečně k rekuperaci, zde není patrná, protože posuvová rychlost je poměrně malá a projev nepřesnosti v tomto momentu dané charakteristiky je tedy zanedbatelný.



Obr. 54 Srovnání měřených a simulovaných dat výkonu při 3000 mm/s

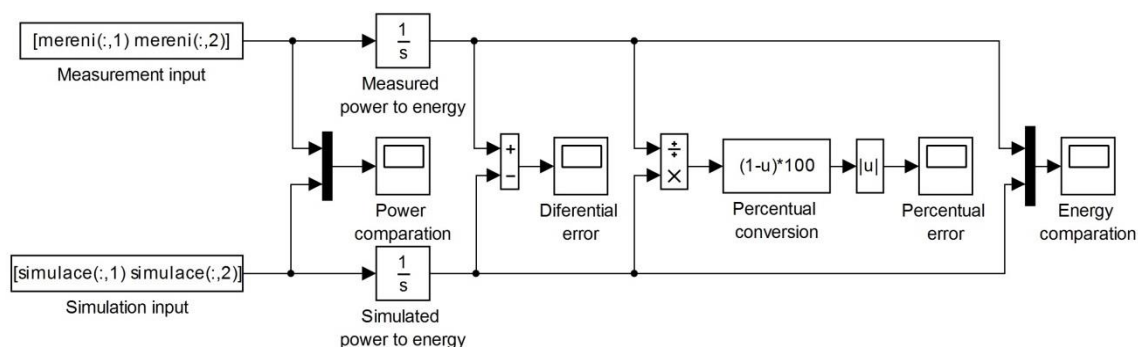
Při srovnávání průběhu aktuálního výkonu při posuvové rychlosti 3000 mm/s se simulací Obr. 54 je již méně patrný vliv rozkmitu naměřených hodnot okolo průměrné hodnoty výkonu v daném momentu. Větší vliv má v tomto srovnání výkonu naměřených dat a simulovaných v problematickém úseku při pohybu v záporném směru osy Z. Rozdíl mezi naměřenými a simulovanými hodnotami může tedy být způsoben spotřebou výkonu nutného pro buzení motorů a pro samotné brzdění osy, která se pohybuje ve stejném směru jako tíhové zrychlení.



Obr. 55 Srovnání měřených a simulovaných dat výkonu při 15000 mm/s

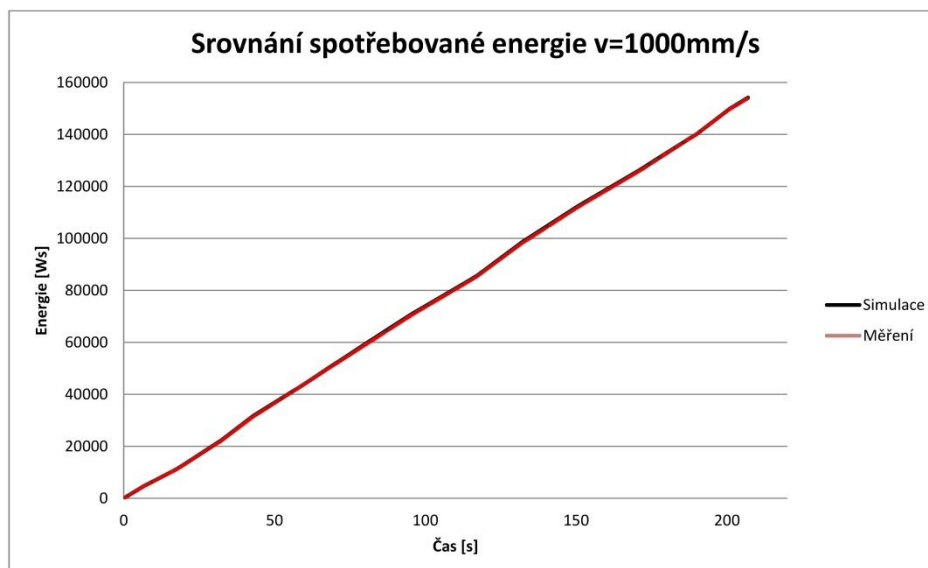
Srovnáním měření a simulace při vyšší posuvové rychlosti Obr. 55 je již zanedbatelný vliv rozkmitu hodnot jednotlivých měření a parnější vliv rozdílu při aktivaci záporného směru osy z. Dalším rozdílem mezi simulací a měřením jsou výkonové špičky, které několikanásobně převyšují špičky simulované. Jelikož se jedná o krátkodobé děje, projev těchto výkonových špiček je taktéž v celkovém energetickém profilu, který je zobrazen následovně, téměř zanedbatelný.

Po časové synchronizaci je opět možné data načíst do prostředí výpočetního programu Matlab a přes nastavbu Simulink provést srovnání a dopočet potřebných dat. Výsledkem tohoto postupu budou grafy průběhů spotřebované energie, procentuální a diferenciální chyby. Na blokovém schématu Obr. 56 jsou patrné dva vstupy a čtyři výstupy. Vstupy znázorňují časově synchronizované průběhy naměřeného a simulovaného aktuálního výkonu. Výstupy jsou v podobě bloku označovaného jako „Scope“, ve kterém je možné nastavení záznamu dat do tabulky. Jedním výstupem je srovnání aktuálního výkonu, což je pouze kontrolní dopočet. Pro zpracování dat je nutné dle rovnice pro výpočet energie integrovat průběhy aktuálních výkonů. Dalším výstupem je diferenciální chyba, která má za cíl porovnat naměřenou a simulovanou spotřebu energie, jejich průběhy jsou zobrazeny následovně. Procentuální chyba vyjadřuje procentuální odchylku simulace od reálných naměřených dat v absolutní hodnotě. Posledním výstupem je srovnání naměřené a simulované spotřeby energie. To vychází právě z integrace průběhů výkonů. Měřením lze také získat přímo spotřebu elektrické energie, ale z důvodu zjednodušení časové synchronizace je spotřebovaná energie dopočítávána. V samotné měřící aparatuře dochází k podobnému zpracování dat jako v tomto případě, tedy průběhy by měly být totožné. Jediný rozdíl je časový a počáteční offset, který je způsoben časovými prodlevami během měření při zapnutí stroji.



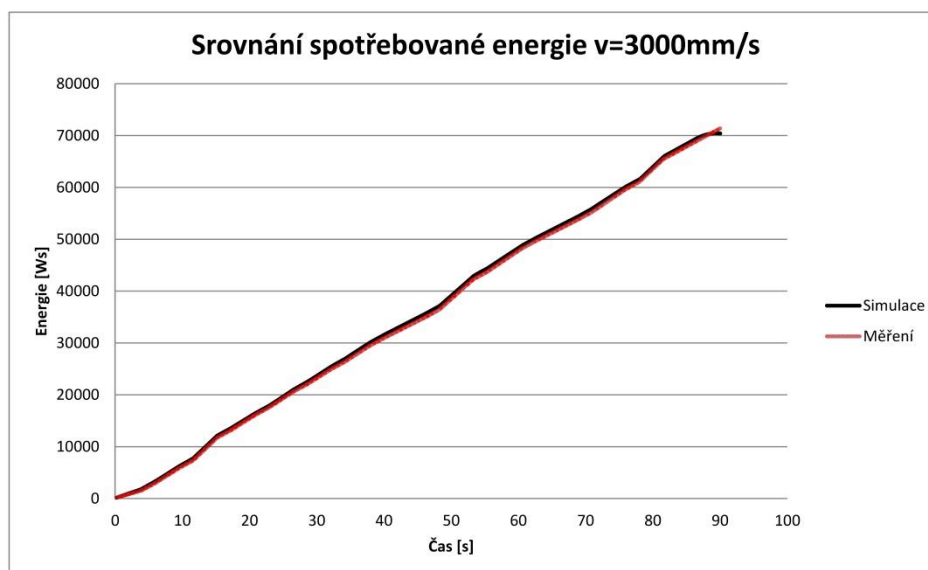
Obr. 56 Schéma srovnávání simulace a měření

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



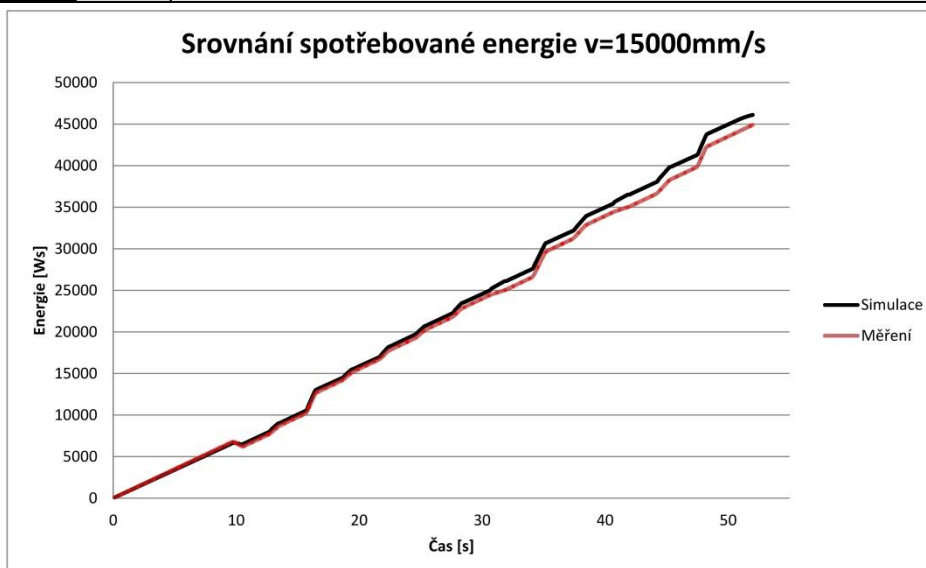
Obr. 57 Srovnání měřených a simulovaných dat spotřebované energie při 1000 mm/min

Během srovnávání energií při nejmenším posuvu 1000 mm/min Obr. 57 nedochází k výrazným odchylkám mezi simulací a měřením. Při tomto měření je technologický cyklus nejdelší (okolo 210 s) a i když jsou změny výkonů oproti ustálené hodnotě „Basic load“, nejmenší, díky dlouhé době procesu je celková spotřeba nejvyšší.



Obr. 58 Srovnání měřených a simulovaných dat spotřebované energie při 3000 mm/min

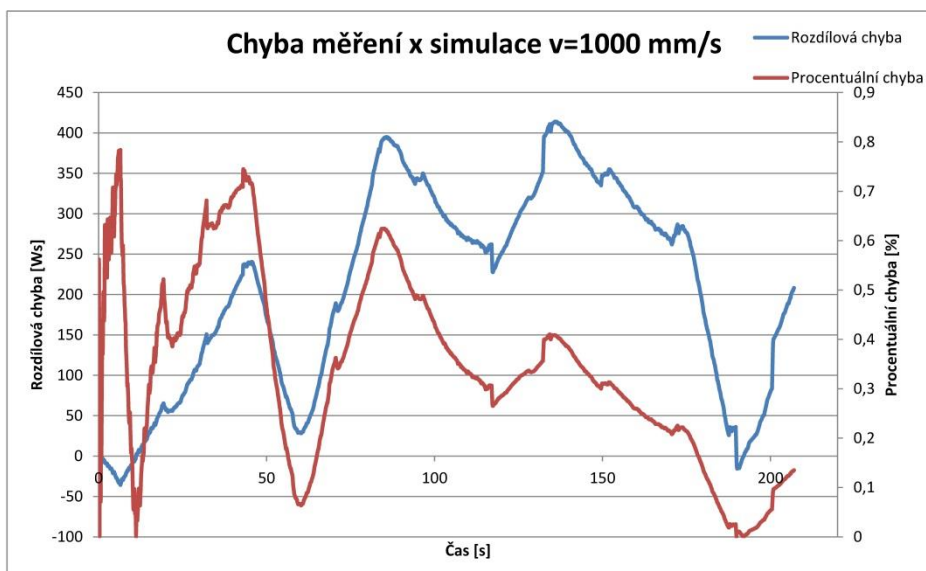
Srovnáním naměřené a simulované spotřeby energie při posuvu 3000 mm/min Obr. 58 jsou již patrnější odchylky. Je zde patrnější i strmější stoupání trendu spotřeby elektrické energie, což je způsobeno větší energetickou náročností technologického cyklu. Maximální rozdíl mezi simulací a měřením je 456 Ws, což je vzhledem k úhrnu 70 kW s téměř neznamenné.



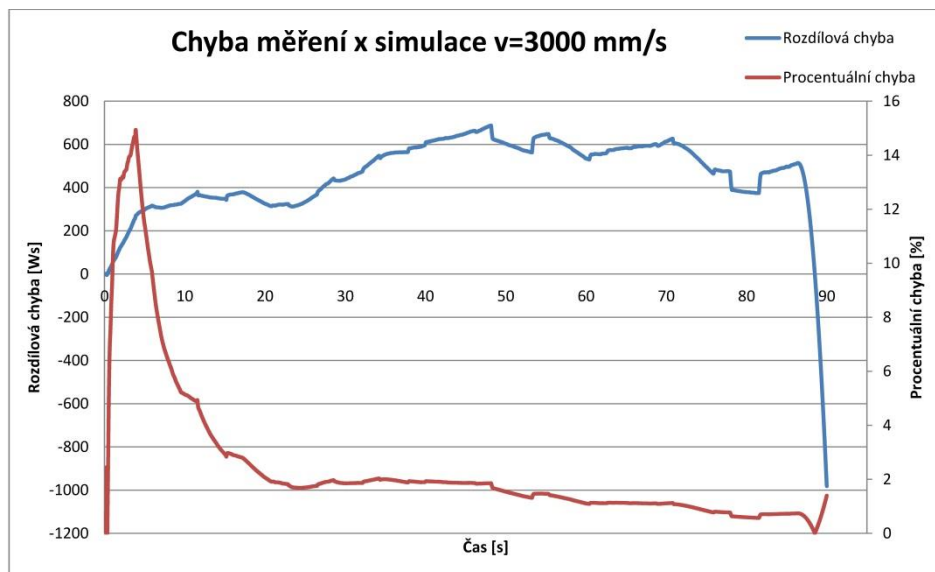
Obr. 59 Srovnání měřených a simulovaných dat spotřebované energie při 15000 mm/min

Odchytky jsou patrnější u nejvyšší srovnávané posuvové rychlosti Obr. 59, které se nakumulovaly především rozdílem při výkonových špicích uvedených v předchozích grafech a rozdílem při posuvu v záporném směru osy Z. I přes tento jev chyba mezi měřením a simulací dostala na hodnotu 1564 Ws, což je v daném časovém okamžiku 4,5% chyba.

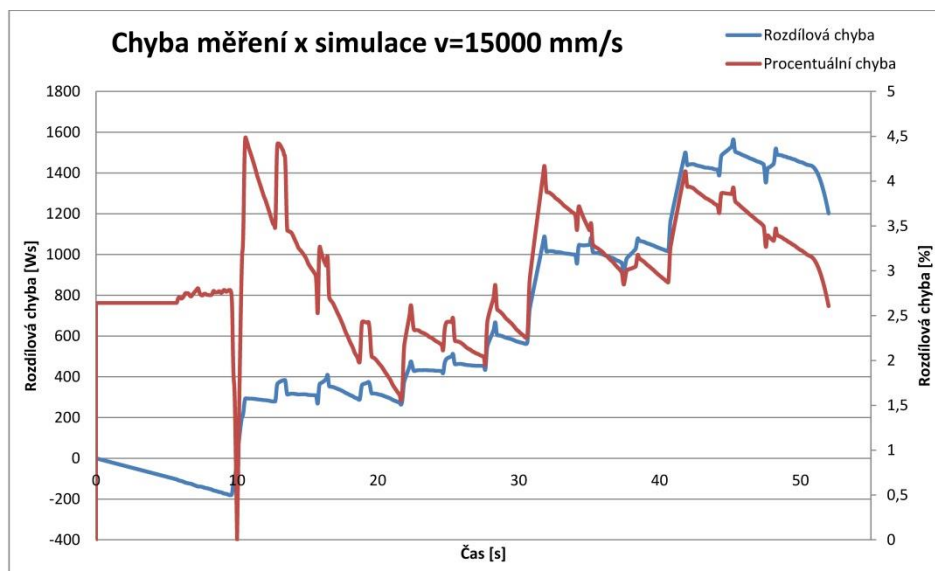
Posledním typem zjišťovaných charakteristik jsou průběhy diferenciální a procentuální chyby Obr. 60, Obr. 61, Obr. 62. Tím lze v každém časovém okamžiku technologického procesu porovnat, jak se liší simulace od skutečnosti.



Obr. 60 Průběh chyby měření a simulace při 1000 mm/min



Obr. 61 Průběh chyby měření a simulace při 3000 mm/min



Obr. 62 Průběh chyby měření a simulace při 15000 mm/min

Průběhy chyb, ukázané ve výše uvedených grafech, jsou číselně shrnuty v následující tabulce. Průběh a míra chyby je opět především závislá na přesnosti samotné simulace, na přesnosti měření a na časovém sladění simulovaných a měřených dat. To mohlo zapříčinit drobné odchylky, přičemž chyba může být reálně daleko menší. Je to způsobeno faktem, že samotné měření bylo prováděno kontinuálně a nebylo možné použít tzv. „trigger“, který by měření spustil v daný definovaný časový moment, ale měření bylo zapnuto po zapojení měřidel do sítě. Naměřená data pak bylo nutné oddělit a časově srovnat se simulací. Tím byla pravděpodobně vytvořena chyba při časovém sjednocování.

Uvedená tabulka Tab. 5 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. 5 Shrnutí chyby měření a simulace u stroje MCV 754 Quick

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

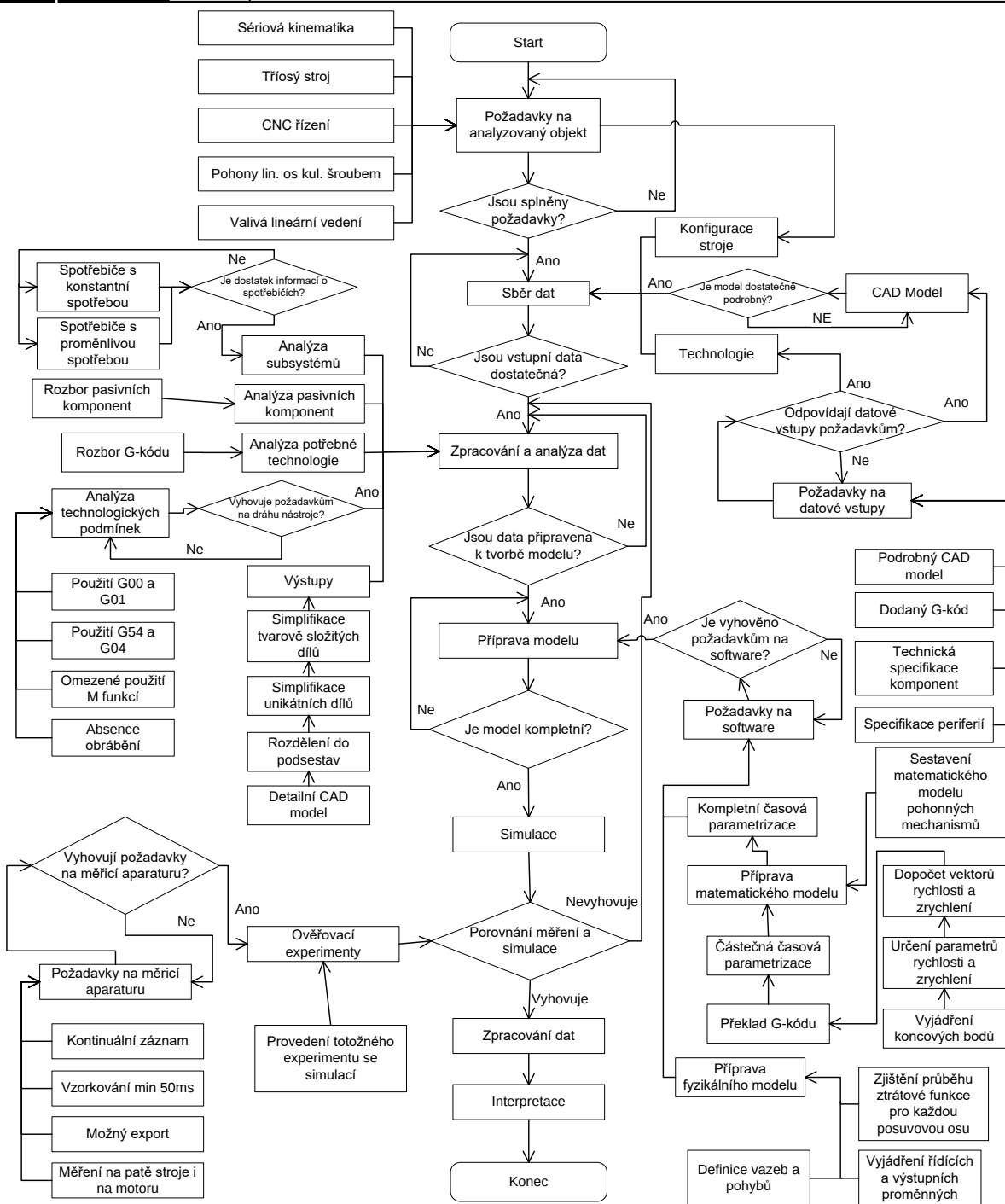
7 STANOVENÍ HRANIC POUŽITELNOSTI METODY

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. 63.

7.1 Požadavky na analyzovaný objekt

Měřeným objektem je míněn stroj, jehož analýzu provádíme. V současném provedení matematického modelu řízení je nutné pro správný rozbor energetického profilu nutně dodržet tyto požadavky:

- **Stroj se sériovou kinematikou.** V rámci modelu je uvažováno se strojem, jehož posuvové osy jsou uspořádány sériově. Paralelní kinematické struktury mohou být také použity, nutností by ale bylo sestavení pohybových rovnic a jejich implementace do matematického modelu řízení simulace.
- **Tříosý obráběcí stroj.** Verifikace metody probíhala na jednoosém standu a na tříosém obráběcím stroji. K tomuto účelu byl i sestaven matematický model. Další řízené osy jako otočný a sklopný stůl, nebo víceosá frézovací hlava nebyla uvažována.
- **Programově řízené osy.** Aby bylo možné srovnat simulovaná a naměřená data, je nutné docílit stejného průběhu technologických operací v závislosti na čase. Stroje s manuální aktivací posuvových os a bez možnosti lineárních interpolací není možné, co se týče jednotlivých aplikací přesně časově synchronizovat s časovým průběhem získaným na základě ISO kódu.
- **Pohon lineárních os kuličkovým šroubem.** Matematický model řízení přepočítává posuvovou rychlost na úhlovou rychlost kuličkového šroubu, což vstupuje i do simulace. Lineární motory nebyly uvažovány. Použití lineárních motorů by bylo možné taktéž použít, stejně tak by bylo možné využít pohonu pomocí ozubeného hřebene a pastorku, ale za nutnosti předefinování proměnných v simulačním softwaru.
- **Využití valivých lineárních vedení.** Hydrostatická a kluzná vedení mají rozdílný průběh ztrát vzhledem k posuvové rychlosti, což by vedlo k nutnosti jiného způsobu získávání tvaru ztrátových funkcí.



Obr. 63 Vývojový diagram metody predikce spotřeby elektrické energie zahrnující verifikaci

7.2 Požadavky na dráhu nástroje

Dráhy nástroje jsou omezeny na základní úkony. Zdokonalením překladače ISO kódu do částečně časově parametrizované matice by bylo možné realizovat i pokročilejší možnosti CNC obráběcích strojů.

- **Použití rychloposuvu a lineárních interpolací.** Pro řízení drah pohybu je v současném stavu nutné vyhnout se kruhovým a vyšším interpolacím.

- **Možnost využití příkazů G54 a G04.** Aby bylo možné oddělit patrným časovým úsekem jednotlivé technologické operace je možné použít příkaz pro časovou prodlevu G04. Pokud je požadavek na simulaci posuvových os v daném úseku pracovního prostoru stroje je možné využít posunutí nulového bodu obrobku G54 do požadovaného místa.
- **Omezené použití M funkcí.** Vzhledem k různým interpretacím M funkcí u různých obráběcích strojů je u překladače využito pouze základních funkcí, týkajících se smyslu otáčení vřetene.
- **Absence obráběcích operací.** Do simulace není zahrnut obráběcí proces, více o problematice obráběcího procesu je uvedeno v kapitole 5.2.4.

7.3 Požadavky na měřicí aparaturu

Měřicí aparatura musí mimo jiné splňovat určité předpoklady tak, aby bylo možné srovnat naměřená a simulovaná data:

- **Kontinuální měření se záznamem.** Technologický proces může obsahovat i delší časové úseky a je nutné naměřené hodnoty zaznamenávat. Pro účely srovnání se simulací je nutný záznam alespoň pro celkový výkon třífázového spotřebiče. Napětí, proudy a výkony na jednotlivých fázích jsou irelevantní, pokud jsou jednotlivé pohony třífázové. Dopočet průběhu energie není nutný, provádí se až při porovnání simulace a naměřených dat.
- **Vzorkování alespoň ve frekvenci 50 ms.** Není vhodné příliš časově podrobné vzorkování, kvůli následnému navýšení potřebného výpočetního výkonu. Pro krátkodobé děje je vhodné užít hodnotu vzorkování 50ms, což poskytne dostatečný náhled na průběhy výkonových špic při rozjezdech a brzdění. Zmiňovaná hodnota byla zjištěna z experimentálních měření a zpracování dat a jejich dostatečné podrobnosti u průběhu výkonů.
- **Export naměřených dat do interpreovatelné formy.** Pro dokončení technologického procesu by mělo být možné získat naměřená data, která je možné zpracovat v běžném výpočetním softwaru. Vhodnými formáty jsou CSV, XLS a TXT.
- **Možnost měření přímo na motoru.** Pro důkladnější analýzu spotřeby elektrické energie jednotlivých posuvových os je potřeba měřit spotřebu přímo na motoru dané posuvové osy. Tím je myšleno zapojení měřicí aparatury mezi frekvenční měnič a příslušný servomotor. Čímž je dosaženo odstranění vlivu dalších spotřebičů a pohonů na přesnost výsledku.
- **Možnost měření na patě stroje.** Vzhledem k požadavku zjištění spotřeby elektrické energie a stroje je nutné provést měření na patě stroje, kdy jsou zahrnuty veškeré spotřebiče elektrické energie.

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..

7.5 Požadavky na datové vstupy

Díky značnému rozsahu působnosti obráběcích strojů je kladen značný důraz na data, která by měla stroj charakterizovat a reprezentovat v simulaci průběhu technologického cyklu.

- **Podrobný CAD model.** Pro dostatečně přesnou simulaci je třeba mít parametrický model ze 3D CAD softwaru, bez kterého není možné metodu realizovat. Model by měl před zpracováním být co nejpodrobnější a dodaný v univerzálním CAD formátu (např. vhodný je STEP, nikoli skořepinový IGES).
- **Dodaný ISO (G-) kód typického obrobku.** ISO kód je nutné naformátovat s přihlédnutím na možnosti překladače tak, aby byly jednotlivé funkce a adresy od sebe odděleny tabulátorem. ISO kód by měl být dodán ve formátu textového souboru s příponou txt.
- **Technická specifikace klíčových komponent.** Pro správný dopočet momentů setrvačností, hmotností a pozic těžiště je nutné dodat specifikaci materiálů, z nichž se skládají základní konstrukční uzly. U nakupovaných komponent specifikace vlastností, které nemusí být zřejmé z CAD modelu, jako například stoupání závitu kuličkového šroubu.
- **Specifikace periferních zařízení.** Z hlediska průběhu energetického profilu jsou důležité specifikace periferních zařízení podílejících se přímo i nepřímo na řezný proces.

7.6 Požadavky na aplikaci metody již ve fázi vývoje stroje

Uvedená metoda predikce spotřeby elektrické energie obráběcího stroje se v rámci této práce opírá o referenční měření. Ty bylo nutné realizovat z důvodu získání neznámých parametrů. Tyto parametry je možné získat od výrobce komponent, ale standardně se odběrateli neposkytují.

- **Průběhy účinnosti motorů.** Synchronní servomotory, stejně jako všechny točivé elektrické stroje nemají v rámci svých provozních podmínek konstantní velikost jejich účinnosti. Tato účinnost především závisí na otáčkách a velikosti zátěže motoru. Znalostí těchto průběhů by bylo možné predikovat jejich spotřebu. Jedná se tedy o funkci dvou proměnných, pomocí níž by bylo možné po zadání parametrů přizpůsobit spotřebu stroje bez nutnosti referenčního měření.
- **Průběhy ztrát pohonných a posuvových mechanismů.** Podobně jako u motorů je nutné znát průběhy ztrát v závislosti na otáčkách, posuvové rychlosti a zátěži. Tyto průběhy je možné získávat experimentálně na vhodném měřicím standu a vytvořit databázi, kterou je možné následně využívat pro další vývojové koncepce.

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. 4. 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. 5. 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 [35], nebo pro vývoj energeticky úsporných obráběcích strojů dle normy ISO 14955 [27].

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 na metodu navazovat a rozšiřovat ji o další a detailnější analýzu subsystémů obráběcích strojů a o kompletaci funkce dopočtu řezných parametrů v rámci simulace. K tomuto tématu již 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] APOSTOLOS, Fysikopoulos, Papacharalampopoulos ALEXIOS, Pastras GEORGIOS, Stavropoulos PANAGIOTIS a Chrysosolouris GEORGE. Energy Efficiency of Manufacturing Processes. *Procedia CIRP: A Critical Review*. , 628-633. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.044.
- [4] HOLUB M., BLECHA R., HOUŠKA P., PAVLÍK J., HUZLÍK 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.
- [5] BORO VAN, Petr. Cesty ke zvýšení efektivnosti obráběcích strojů. *Technický týdeník* [online]. 2016 [cit. 2016-10-18]. ISSN 0040-1064. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju_34337.html
- [6] DAHMUS, Jeffrey B. a Timothy G. GUTOWSKI. An Environmental Analysis of Machining. *Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering*. 2004, , 643-652. DOI: 10.1115/IMECE2004-62600.
- [7] Emphasis On Innovation: Rolling Bearings In Mining & Mineral Processing. *Maintenance technology: The source for reliability solutions* [online]. Willowbrook, IL, 2016 [cit. 2016-10-18]. Dostupné z: <http://www.maintenancetechnology.com/2012/07/emphasis-on-innovation-rolling-bearings-in-mining-a-mineral-processing/>
- [8] GONZALEZ, Alaitz. *Machine Tool Utilisation Phase: Costs and Environmental Impacts with a Life Cycle View: Costs and Environmental Impacts with a Life Cycle View*. Stockholm, 2007.
- [9] GUO, Yansong, Joost R. DUFLOU, Jun QIAN, Hao TANG a Bert LAUWERS. An operation-mode based simulation approach to enhance the energy conservation of machine tools. *Journal of Cleaner Production: fejetony, které vycházely od roku 1997 na internetu na adrese http://svet.namodro.cz*. 1999, , 348-359. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.03.097.
- [10] GUTOWSKI, Timothy, Jeffrey DAHMUS a Alex THIRIEZ. Electrical energy requirements for manufacturing processes. *13th CIRP international conference on life cycle engineering*. , 623-638.
- [11] 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>
- [12] HAE-SUNG, Yoon, Kim EUN-SEOB, Kim MIN-SOO, Lee JANG-YEOB, Lee GYU-BONG a Ahn SUNG-HOON. Towards greener machine tools – A review

on energy saving strategies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* , 870-891.

- [13] HOLUB M., BLECHA R., HOUŠKA P., PAVLÍK J., HUZLÍK 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.* , 0-176.Brno 2012
- [14] HOLUB, M., R. HUZLÍK, P. BLECHA a F. BRADÁČ. SIMULATION OF LINEAR AXIS WITH BALL SCREW AND PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE. *MM Science Journal.* , 1-4.
- [15] HUZLÍK, R., P. BLECHA, A. VAŠÍČEK, P. HOUŠKA a M. HOLUB. Device for Measuring of Active Power and Energy at Machine Tools. *Mechatronics 2013.* 2014, , 503. DOI: 10.1007/978-3-319-02294-9_64.
- [16] KOLAR, Martin, Jiri VYROUBAL a Jan SMOLIK. Analytical approach to establishment of predictive models of power consumption of machine tools' auxiliary units. *Journal of Cleaner Production.* , 361-369.
- [17] KONČEL, Jan. Využití internetu ve výuce analytické geometrie na střední škole: Geometrie v prostoru - Parametrické vyjádření přímky. Praha, 2009. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce RNDr. Jarmila Robová, CSc.
- [18] 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.
- [19] MUNOZ, A.A. a P. SHENG. An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. *Journal of Materials Processing Technology.* , 736-758. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01764-R.
- [20] NARITA, Hirohisa, Hiroshi KAWAMURA, Takashi NORIHISA, Lian-yi CHEN, Hideo FUJIMOTO a Takao HASEBE. Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation. *JSME International Journal Series C.* , 1188-1195. DOI: 10.1299/jsmec.49.1188.
- [21] POLZER, Aleš. Akademie CNC obrábění. In: *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 2009 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-4_8539.html
- [22] SKOCZYNSKI, Wacław, Janusz MACZKA, Zbigniew WASIAK, Andrzej ROSZKOWSKI a PRES. ASSESMENT OF ENERGY CONSUMPTION BY MACHINE TOOLS. *Acta technica corviniensis: Bulletin of Negineering* [online]. 1. 2013, 4(1), 103-108 [cit. 2013-12-13].
- [23] VAN HEMEL, CAROLIEN G. What sustainable solutions do small and medium sized enterprises prefer? *Sustainable solutins: Developing products and services for the future.* 1995, , 188-202.
- [24] ZHOU, Lirong, Jianfeng LI, Fangyi LI, Qiang MENG, Jing LI a Xingshuo XU. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools. *Journal of Cleaner Production: a comprehensive literature review.* , 3721-3734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.093.
- [25] 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.

- [26] 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>
- [27] ISO 14955-1:2014. Machine tools: Environmental evaluation of machine tools. 1. Ženeva: International Organization for Standardization, 2012.
- [28] Drinking Water Report 1992. *Environmental Report 1992*. , 55-56.
- [29] 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
- [30] Kovosvit MAS. *MV Line: MAS Machine Tool* [online]. [cit. 2016-10-18].
- [31] HOLUB M., BLECHA R., HOUŠKA P., PAVLÍK J., HUZLÍK 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 třetí rok řešení projektu FR-TI3/655*. Brno, 2013.
- [32] Consumption of energy. *Eurostat: Statistics explained* [online]. EU: European Commission, 2017 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy
- [33] ZHAI, Qiang, Huajun CAO, Xiang ZHAO a Chris YUAN. Assessing application potential of clean energy supply for greenhouse gas emission mitigation: a case study on General Motors global manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 75, 11-19. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.072. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614003059>
- [34] DU, Yanbin, Qian YI, Congbo LI a Lan LIAO. Life cycle oriented low-carbon operation models of machinery manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*. 2015, 91, 145-157. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.12.028. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614013171>
- [35] 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>
- [36] 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>
- [37] 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>
- [38] 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>

- [39] 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>
- [40] 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>
- [41] 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>
- [42] 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>
- [43] 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>
- [44] 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>
- [45] 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>
- [46] DUFLOU, Joost R., John W. SUTHERLAND, David DORNFELD, Christoph HERRMANN, Jack JESWIET, Sami KARA, Michael HAUSCHILD a Karel KELLEN. 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>
- [47] 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>
- [48] 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>

- [49] QUARIGUASI FROTA NETO, J., G. WALTHER, J. BLOEMHOF, J.A.E.E. VAN NUNEN a T. SPENGLER. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. *European Journal of Operational Research*. 2009, **193**(3), 670-682. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.06.056. ISSN 03772217. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221707010302>
- [50] THIEDE, Sebastian. *Energy efficiency in manufacturing systems*. Aufl. 2012. S.l.: Springer, 2014. ISBN 978-364-2437-502.
- [51] LIU, F., WANG, L.Q., Liu, G.J., 2013. Content architecture and future trends of energy efficiency research on machining systems. *Jixie Gongcheng Xuebao* 49 (19),87-94
- [52] DRAGANESCU, F., M. GHEORGHE a C.V. DOICIN. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 141(1), 9-15. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00930-5. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602009305>
- [53] 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>
- [54] 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>
- [55] JIAO, Meng, Xu Hong GUO a Dong Dong WAN. Finite Element Analysis and Lightweight Research on the Bed of a Large Machine Tool Based on HyperWorks. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, **121-126**, 3294-3298. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.3294. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.121-126.3294>
- [56] 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>
- [57] WANNER, Alexander. Minimum-weight materials selection for limited available space. *Materials*. 2010, **31**(6), 2834-2839. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.12.052. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910000154>
- [58] ZHAO, Ling, Jianfeng MA, Ting WANG a Denghai XING. Lightweight Design of Mechanical Structures based on Structural Bionic Methodology. *Journal of Bionic Engineering*. 2010, **7**, S224-S231. DOI: 10.1016/S1672-6529(09)60239-0. ISSN 16726529. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1672652909602390>
- [59] ASHBY, M.F., Y.J.M. BRÉCHET, D. CEBON a L. SALVO. Selection strategies for materials and processes. *Materials*. 2004, **25**(1), 51-67. DOI: 10.1016/S0261-3069(03)00159-6. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306903001596>

- [60] TRIET, H H a K K AHN. Comparison and assessment of a hydraulic energy-saving system for hydrostatic drives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2011, **225**(1), 21-34. DOI: 10.1243/09596518JSCE1055. ISSN 0959-6518. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09596518JSCE1055>
- [61] BI, Z.M. a Lihui WANG. Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study. *Journal of Manufacturing Systems*. 2012, **31**(4), 420-428. DOI: 10.1016/j.jmsy.2012.07.002. ISSN 02786125. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027861251200043X>
- [62] 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/>
- [63] YANG, Xin, Zhenxiang ZENG, Ruidong WANG, Xueshan SUN a Houbing SONG. Bi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problem Considering Energy Consumption under Stochastic Processing Times. *PLOS ONE*. 2016-12-1, **11**(12), e0167427-. DOI: 10.1371/journal.pone.0167427. ISSN 1932-6203. Dostupné také z: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0167427>
- [64] FANG, Kan, Nelson UHAN, Fu ZHAO a John W. SUTHERLAND. A New Shop Scheduling Approach in Support of Sustainable Manufacturing. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, , 305. DOI: 10.1007/978-3-642-19692-8_53. ISBN 978-3-642-19691-1. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-19692-8_53
- [65] HE, Yan, Bo LIU, Xiaodong ZHANG, Huai GAO a Xuehui LIU. A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system. *Journal of Cleaner Production*. 2012, **23**(1), 167-174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.10.033. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652611004197>
- [66] BRUZZONE, A.A.G., D. ANGHINOLFI, M. PAOLUCCI a F. TONELLI. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: a mathematical model for flexible flow shops. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2012, **61**(1), 459-462. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.084. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612000868>
- [67] DAI, Min, Dunbing TANG, Adriana GIRET, Miguel A. SALIDO a W.D. LI. Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2013, **29**(5), 418-429. DOI: 10.1016/j.rcim.2013.04.001. ISSN 07365845. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584513000318>
- [68] TUO, Long, Lu DAI a Xiong CHEN. Scheduling of discrete manufacturing process for energy saving. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, **556-562**, 556-562. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.4248. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMM.556-562.4248>
- [69] 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>

- [70] BÄHRE, D., M. SWAT, P. STEUER a K. TRAPP. Energy Consumption: One Criterion for the Sustainable Design of Process Chains. *Sustainable Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, , 163. DOI: 10.1007/978-3-642-27290-5_25. ISBN 978-3-642-27289-9. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27290-5_25
- [71] 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>
- [72] 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
- [73] 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>
- [74] 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>
- [75] KARA, S. a W. LI. Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011, **60**(1), 37-40. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.018. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611000199>
- [76] LI, Lin, Jihong YAN a Zhongwen XING. Energy requirements evaluation of milling machines based on thermal equilibrium and empirical modelling. *Journal of Cleaner Production*. 2013, **52**, 113-121. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.039. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613001418>
- [77] DIAZ, Nancy, Elena REDELSHEIMER a David DORNFELD. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, , 263. DOI: 10.1007/978-3-642-19692-8_46. ISBN 978-3-642-19691-1. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-19692-8_46
- [78] NEWMAN, S.T., A. NASSEHI, R. IMANI-ASRAI a V. DHOKIA. Energy efficient process planning for CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012, **5**(2), 127-136. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.03.007. ISSN 17555817. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755581712000223>
- [79] BAYOUMI, A. E., G. YÜCESAN a D. V. HUTTON. On the closed form mechanistic modeling of milling: Specific cutting energy, torque, and power. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 1994, **3**(1), 151-158. DOI:

- 10.1007/BF02654511. ISSN 1059-9495. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02654511>
- [80] PRAMANIK, A., L.C. ZHANG a J.A. ARSECULARATNE. Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, **46**(14), 1795-1803. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.11.012. ISSN 08906955. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089069550500307X>
- [81] KISHAWY, H.A., S. KANNAN a M. BALAZINSKI. An Energy Based Analytical Force Model for Orthogonal Cutting of Metal Matrix Composites. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2004, **53**(1), 91-94. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60652-0. ISSN 00078506. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607606520>
- [82] CUPPINI, D., G. D'ERRICO a G. RUTELLI. Tool wear monitoring based on cutting power measurement. *Wear*. 1990, **139**(2), 303-311. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90052-C. ISSN 00431648. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/004316489090052C>
- [83] AVRAM, Oliver Ioan a Paul XIROUCHAKIS. Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. *Journal of Cleaner Production*. 2011, **19**(6-7), 699-711. DOI: 10.1016/j.jclepro.2010.10.010. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652610004014>
- [84] LIU, Fei. Multi-period Energy Model of Electro-mechanical Main Driving System during the Service Process of Machine Tools. *Journal of Mechanical Engineering*. 2012, **48**(21), 132-. DOI: 10.3901/JME.2012.21.132. ISSN 0577-6686. Dostupné také z: http://www.cjmenet.com/xuebaochinese/papers/allpaper/abstractall/zy2012_21_132.htm
- [85] LV, Jingxiang, Renzhong TANG a Shun JIA. Therblig-based energy supply modeling of computer numerical control machine tools. *Journal of Cleaner Production*. 2014, **65**, 168-177. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.09.055. ISSN 09596526. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652613006872>
- [86] 640/2009/ES: Nařízení Komise (ES) č. 640/2009 ze dne 22. července 2009 , kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign elektromotorů. In: . Brusel: Evropská komise, 2009, ročník 2009, číslo 640. Dostupné také z: <http://www.eurlex.cz/dokument.aspx?celex=32009R0640>
- [87] 245/2009/ES: kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2005/32/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign zářivek bez integrovaného předřadníku, vysoce intenzivních výbojek a předřadníků a svítidel, jež mohou sloužit k provozu těchto zářivek a výbojek. In: . Brusel: Evropská komise, 2009, ročník 2009, číslo 245. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0017:0044:CS:PDF>
- [88] 1194/2012/ES: kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign směrových světelných zdrojů, světelných zdrojů využívajících elektroluminiscenčních diod a souvisejících zařízení. In: . Brusel: Evropská komise, 2012, ročník 2012, číslo 1194. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:342:0001:0022:cs:PDF>

- [89] 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>
- [90] 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>
- [91] 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
- [92] ČSN EN 61000- 4 -1. Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 4-1: Zkušební a měřicí technika - Přehled o souboru IEC 61000- 4. 2. Praha: ÚNMZ, 2001.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Rozdělení technologického cyklu na ECS [25]	14
Obr. 2	Hranice systému technologického procesu obrábění [6]	15
Obr. 3	Hranice analýzy dopadů na životní prostředí během obrábění [19]	16
Obr. 4	Výkonový profil frézování na obráběcím stroji [24]	19
Obr. 5	Pohled na PMDB-01 ze strany připevnění sbRIO 9606 [15]	32
Obr. 6	Schéma zařízení pro měření spotřeby elektrické energie na obráběcím stroji	33
Obr. 7	Ukázka zapojení wattmetrické soustavy	34
Obr. 8	Rozdělení OS dle velikosti pracovního prostoru [30]	37
Obr. 9	Průběh energetických ztrát valivých ložisek v závislosti na otáčkách [7]	40
Obr. 10	Mapa energetických spotřebičů stroje MCU 630VT	41
Obr. 11	Zkušební obrobek dle JISTS B 0024-1 [26]	43
Obr. 12	Analýza řezných sil při frézování drážkovací frézou do materiálu 12 050.1 [5]	46
Obr. 13	Uspořádání adres G-kódu [21]	47
Obr. 14	Parametrické vyjádření přímky [17]	48
Obr. 15	Blokové schéma simulace obráběcího stroje během technologického procesu	50
Obr. 16	Ukázka modelu v simulačním software	51
Obr. 17	Schéma metody predikce spotřeby elektrické energie během fáze vývoje	54
Obr. 18	Ukázka základních konstrukčních uzlů obráběcího stroje [30]	55
Obr. 19	Vlevo proměnlivá spotřeba energie při různých rychlostech vřetene, vpravo konstantní spotřeba čerpadla řezného média	58
Obr. 20	Přehled pasivních komponent obráběcího stroje v návaznosti na subsystémy	59
Obr. 21	Postup přípravy CAD modelu	61
Obr. 22	Časový průběh posuvové rychlosti a zrychlení	63
Obr. 23	Schéma řízení osy X v Matlab Simulink	64
Obr. 24	Vstupy a výstupy subsystému MSC Adams	65
Obr. 25	Blokové schéma dopočtu pasivních odporů	66
Obr. 26	Měřicí stand firmy HIWIN	69
Obr. 27	Experimentální pracoviště pro měření elektrické spotřeby lineárního standu	69
Obr. 28	Schéma lineárního měřicího standu,	70
Obr. 29	Schéma pasivních komponent lineárního standu v návaznosti na subsystémy	71
Obr. 30	Průběh násobitele v závislosti na posuvové rychlosti	72
Obr. 31	Schématické znázornění rozdělení do funkčních celků	73
Obr. 32	Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=0$ kg	77
Obr. 33	Srovnání simulované a měřené energie při $m=0$ kg	77
Obr. 34	Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=0$ kg	77
Obr. 35	Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=17,336$ kg	78
Obr. 36	Srovnání simulované a měřené energie při $m=17,336$ kg	78
Obr. 37	Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=17,336$ kg	79
Obr. 38	Srovnání simulovaného a měřeného aktuálního výkonu při $m=22,711$ kg	79
Obr. 39	Srovnání simulované a měřené energie při $m=22,711$ kg	80
Obr. 40	Srovnání rozdílové a procentuální chyby simulace při $m=22,711$ kg	80
Obr. 41	Schématické rozložení spotřebičů OS	82
Obr. 42	CAD model křížového stolu MCV 754 Quick	83
Obr. 43	Schématické znázornění rozmístění komponent posuvových os MCV 754 Quick	86

Obr. 44	Dráhy nástroje během technologického procesu	87
Obr. 45	Příklad zjednodušení křížového stolu frézky	88
Obr. 46	Příklad mechanických vlastností použitých pro simulaci	88
Obr. 47	Ukázka překladu G-kódu do matice bodů	90
Obr. 48	Ukázka částečné časové parametrizace	91
Obr. 49	Řídící část kompletní časové parametrizace osy X	91
Obr. 50	Schéma vstupních hodnot do simulace	92
Obr. 51	Připravený model v simulačním software	95
Obr. 52	Výstupy simulace	96
Obr. 53	Průběh měření a simulace výkonu při 1000 mm/s	97
Obr. 54	Průběh měření a simulace výkonu při 3000 mm/s	98
Obr. 55	Průběh měření a simulace výkonu při 15000 mm/s	98
Obr. 56	Schéma srovnávání simulace a měření	99
Obr. 57	Průběh měření a simulace spotřebované energie při 1000 mm/min	100
Obr. 58	Průběh měření a simulace spotřebované energie při 3000 mm/min	100
Obr. 59	Průběh měření a simulace spotřebované energie při 15000 mm/min	101
Obr. 60	Průběh chyby při 1000 mm/min	101
Obr. 61	Průběh chyby při 3000 mm/min	102
Obr. 62	Průběh chyby při 15000 mm/min	102
Obr. 63	Vývojový diagram metody určení spotřeby elektrické energie včetně verifikace	105

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Seznam a popis jednotlivých komponent stroje MCU 630VT	42
Tab. 2	Srovnání měřených a dopočítaných aktuálních výkonů u různých technologických operací na zkušebním obrobku	44
Tab. 3	Shrnutí konfigurace obráběcího stroje	56
Tab. 4	Srovnání chyby měření a simulace u lineárního standu	81
Tab. 5	Shrnutí chyby měření a simulace u stroje MCV 754 Quick	103

12 SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ

- [1] TŮMA, Z.; TŮMA, J.; KNOFLÍČEK, R.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P. The process simulation using by virtual reality. Annals of DAAAM, 2013, roč. 24, č. 1, s. 137-143. ISSN: 2304-1382.
- [2] ZAHÁLKA, J.; TŮMA, J.; BRADÁČ, F. Determination and improvement of performance level of safety function of emergency stop for machinery. In Annals of DAAAM International 2013. Annals of DAAAM. 24. Vídeň: DAAAM International Vienna, 2013. s. 150-159. ISBN: 978-3-901509-97- 1. ISSN: 2304- 1382.
- [3] ZAHÁLKA, J.; TŮMA, J.; BRADÁČ, F. Determination and Improvement of Performance Level of Safety Function of Emergency Stop for Machinery. In Annals of DAAAM International 2013. Procedia Engineering. 24. Zadar: Procedia Engineering, 2014. s. 1242-1250. ISBN: 978-3-901509-97- 1. ISSN: 1877-7058.
- [4] ZAHÁLKA, J.; BRADÁČ, F.; TŮMA, J.; SYNEK, M. Assurance of Functional Safety in relation to Ecodesign of Machine Tools. In Mechatronics - Mechatronika (ME), 2014 16th International Conference on. Brno: IEEE, 2014. s. 494-498. ISBN: 978-80-214-4817- 9.
- [5] TŮMA, Z.; KNOFLÍČEK, R.; TŮMA, J.; BRADÁČ, F.; BLECHA, P. The Process Simulation Using by Virtual Reality. In Annals of DAAAM International 2013. Procedia Engineering. 24. Zadar: Procedia Engineering, 2014. s. 1015-1020. ISBN: 978-3-901509-97- 1. ISSN: 1877-7058.
- [6] TŮMA, J.; BLECHA, P.; ZAHÁLKA, J.; TŮMA, Z. Prediction method for electrical energy consumption of the machine tool in the usage stage. In Mechatronics - Mechatronika (ME), 2014 16th International Conference on. Brno: IEEE, 2014. s. 248-253. ISBN: 978-80-214-4817- 9.
- [7] ZAHÁLKA, J.; BRADÁČ, F.; TŮMA, J.; SYNEK, M. Issues with Determining of Mean Time to Dangerous Failure and Diagnostic Coverage in Safety Functions of Machine Tools. In Archive of EM2015. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland, 2016. s. 626-632. ISBN: 978-80-86246-42- 0. ISSN: 1662-7482.
- [8] TŮMA, J.; TŮMA, Z.; SYNEK, M. Verification of prediction method for energy consumption of machine tool feed axes. MM Science Journal, 2016, č. 1, s. 1634-1638. ISSN: 1803-1269.
- [9] TŮMA, Z.; KOTEK, L.; TŮMA, J.; BRADÁČ, F. APPLICATION OF VIRTUAL REALITY FOR VERIFICATION OF REAL WORKPLACE STATE. MM Science Journal, 2016, roč. 1, č. 1, s. 1487-1490. ISSN: 1803-1269.