ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dělící CNC centrum pro obrábění dřeva, dřevodesek a lamina

Praha, 2018 František Hrouda

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce. Veškeré zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze, dne ……. Podpis: ..…….

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval rodičům za podporu při studiu, přítelkyni za jazykové korekce a motivační podporu a dále pak vedoucímu práce, panu Ing. Martinu Nečasovi MSc. Ph.D. za odborné vedení a ochotu při poskytování rad, připomínek a vstřícnost během konzultací.

Anotační list

Jméno autora:	František Hrouda
Název bakalářské práce:	Dělící CNC centrum pro obrábění dřeva, dřevodesek a lamina
Anglický název:	Cuting CNC center for wood, chipbosrd and lamino machinig
Akademický rok:	2017/2018
Obor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor mechaniky a mechatroniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Martin Nečas MSc. Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 43 počet obrázků: 19 počet tabulek: 14 počet rovnic: 15
Klíčová slova:	dělení dřeva, dělící centra, pilové kotouče
Keywords:	wood cutting, cutting centers, saw blades
Anotace:	Cílem práce je seznámení s možnostmi současných dělících CNC center. Na základě těchto informací vytvoření koncepčních návrhů nových dělících center, která budou plně automatizovatelná a konkurenceschopná. Vytvoření modelu popisující chování pohonu pilového kotouče v závislosti na odporových silách působících na kotouč.

Abstract: The goal of this work is to get acquainted with the possibilities of current CNC cutting centers. Based on these informations, the creation of conceptual designs for new dividing centers, which will be fully automated and competitive. Creating a model describing the behavior of the saw blade drive depending on the resistance forces acting on the blade.

Obsah

Prohlášení 2
Anotační list 4
1 Úvod 7
2 Cíle práce 7
3 Dřevo 8
3.1 Materiály na bázi dřeva 8
3.2. Vlastnosti 9
4 Dělení dřeva 10
4.1 Pilové kotouče 11
4.1.1 Volba kotouče 11
4.1.2 Počet zubů 11
5 CNC dělící centra 13
5.1 Šířka ostří 14
5.2 Pilový hřídel 15
5.3 Příruba kotouče 15
5.4 Úběr 16
5.5 Rychlosti pilových kotoučů 17
6 Současná CNC dělící centra 18
6.1 Stroje předních evropských firem 18
6.1.1 Biesse 18
6.1.2 Homag 20
6.1.3 SCM 21
6.1.4 Felder 22
6.1.5 Holz-her 24
6.1.6 Panhans 25
6.2 Porovnání strojů 26
7 Koncepty strojů 27
7.1 Dělící konzolové centrum 27
7.2 Dvoukotoučové centrum 28
7.3 Vertikální dělící centrum 29
8 Praktická část 30
8.1 Dynamický model 31
8.2. Simulační model 34
8.2 Simulační výsledky 34
9 Závěr 39

1 Úvod

Dřevo bylo vždy materiálem hojně využívaným ve stavebnictví jako konstrukce či jako krytí stěn a střech, v truhlářském odvětví při výrobě nábytku a mnoha dalších komodit. Náhradou dřeva jsou materiály na jeho bázi. Dělení velkých desek je první operací, která předchází dalšímu zpracování. Dělení musí být přesné, rychlé a efektivní.

2 Cíle práce

Cílem práce je stanovit základní pojmy v oblasti dělení dřeva a seznámit se s principem fungování CNC dělících center. Dalším cílem je srovnat společné a odlišné parametry dělících center od předních výrobců. V další části práce budou na základě znalosti současných možností těchto strojů vytvořeny návrhy plně automatizovaných a konkurenceschopných dělících CNC center. V poslední části práce bude provedena matematická simulace vlivů odporových sil materiálu na pohon pilového kotouče.

3 Dřevo

Dřevo je přírodní materiál, který je velmi oblíbený pro svůj přirozený vzhled. Rozlišujeme dřevo stromů jehličnatých a listnatých. Mezi jehličnaté dřeviny patří smrk, borovice, tis, modřín, jedle a další. Dřeviny listnaté jsou buk, dub, lípa, jasan, akát, ovocné stromy, javor atd. Hustota dřeva je závislá nejen na typu dřeva, ale i na obsahu vody. V následující tabulce 1 jsou hustoty některých dřevin.[1]

dřevo (do 650 kg/m³)	ρ (kg/m³) typické	čerstvé	suché	dosušené	rozpětí
smrk	455	-	-	-	440-470
topol	470	-	-	-	0-500
lípa	480	-	-	-	410-553
borovice lesní	515	700	520	510	490-543
jedle	515	-	-	-	430-560
olše	525	-	-	-	523-530
douglaska	535	910	570	550	502-970
jalovec obecný	550	-	-	-	-
jilm habrolistý	560	-	-	-	-
kaštanovník setý	563	-	-	-	-
modřín	570	-		-	550-590
ořech	590	-	-	-	500-680
bříza	610	940	600	590	550-673
třešeň ptačí	610	-	-	-	603-610
javor klen	630	980	660	530	610-660
jasan	640	920	720	620	560-720

dřevo (od 650 kg/m³)	ρ (kg/m³) typické	čerstvé	suché	dosušené	rozpětí
švestka	660	-		-	560-760
jabloň	670	-	-	-	-
hrušeň	670	-	-	-	600-740
borovice černá	670	900	670	590	-
buk lesní	670	990	720	570	620-720
dub letní	680	1000	760	660	600-760
jilm vaz, horský	680	-	-	-	-
ořech (vlašák)	685	-	-	-	673-700
mahagon	700	-	-	-	-
jeřáb	7 2	-	-	-	-
habr	770	1080	820	720	720-820
akát	780	-	-	-	761-800
tis červený	800	970-1100	800	-	640-940
dub cer	850	1110	850	730	-
dřín	850	-	-	-	-
jeřáb muk	875	1020-1210	734-1020	-	-
zimolez obecný	900	-	-	-	-
zimostráz vždyzelený	950	-	-	-	
ebe cejlonský	1000	-	-	-	-

Tabulka 1 Hustoty dřevin[1]

Tvrdost dřeva je dána jeho typem. Podle tvrdosti dělíme dřeviny na tvrdé a měkké, přičemž měkké jsou většinou dřeviny jehličnaté a tvrdými dřevinami jsou listnaté stromy.

3.1 Materiály na bázi dřeva

Böhm a kol. [2] uvádějí, že materiály na bázi dřeva se vyrábí ze surového nebo z odpadního dřevěného materiálu. Vyrábí se lepením, lisováním nebo jejich kombinací. Hlavní snahou je využít výhod dřeva jako jsou izolační vlastnosti, dobrá obrobitelnost a nízké výrobní náklady. Vlastnosti dřeva jsou závislé na směru vláken, ze kterých je složeno. U materiálů na bázi dřeva se dají vlastnosti ve směrech přímo určit již při jeho výrobě.

[1] BAŘTIPÁN, Emil, Leoš. *Dřevo dělení dřeva-Dřevo jehličnatých dřevin-Dřevo listnatých dřevin-Hustota dřeva* [online]. 2016 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://docplayer.cz/17385607-Evo-leni-d-eva-d-evo-jehli-natych-d-evin-d-evo-listnatych-d-evin-hustota-d-eva.html

[2] BÖHM, Martin., REISNER, Jan a BOMBA Jan. *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

Podle Kašpárkové[3] se překližka vyrábí lepením velkého množství vrstev. Vlákna jednotlivých vrstev dřeva se na sebe lepí v kolmém směru. Používá se měkké dřevo na její jádro a tvrdé pro její vnější vrstvy.

Dalším materiálem je laťovka. Je složená z latí měkkého dřeva, na které se přilepí dýha z dřeva tvrdého.

Hodně používaným materiálem je dřevotříska. Dřevotříska se vyrábí lepením dřevěných třísek za vysokého tlaku a teploty. Může mít povrchovou vrstvu z dýhy či laminátu.

Odpady dřeva jsou používány pro výrobu sololitu či hobry.

3.2. Vlastnosti

Mezi fyzikální vlastnosti dřeva patří vlhkost, která výrazně ovlivňuje i další vlastnosti. Při zvyšování obsahu vody dřevo bobtná a zvětšuje svůj objem. Při vysychání se obsah vody snižuje a dřevo svůj objem zmenšuje.[4]

Hustota, která je na vlhkosti velmi závislá, kolísá pro dřevo syrové (80 % vlhkosti) mezi 800 až 1100 Kg/m3 a dřeva vysušená (13 % vlhkosti) mezi 480 až 800Kg/m3.

Vysušené dřevo má výborné tepelné vlastnosti a při několikanásobně menší tloušťce má stejnou tepelnou vodivost jako cihlová zeď.

Akustické vlastnosti dřeva jsou využívány při výrobě hudebních nástrojů, nebo při izolování a odhlučňování místností.

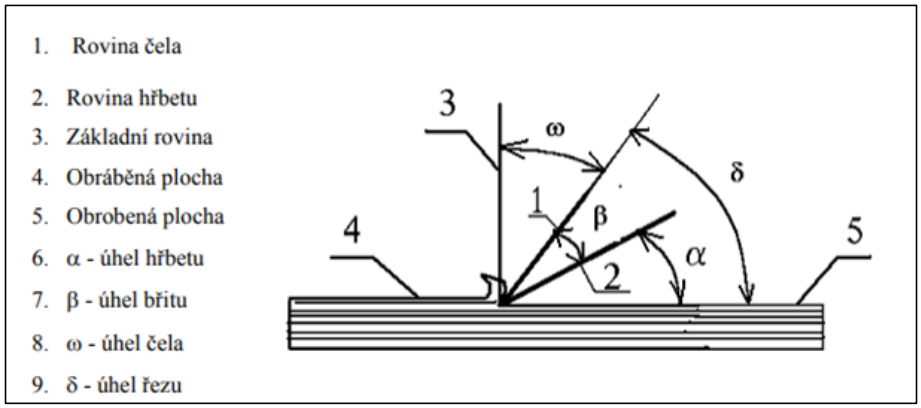
Mechanickými vlastnostmi dřeva jsou především pevnost a obrobitelnost. Díky své vláknité struktuře jsou tyto vlastnosti také závislé na směru. Dalším faktorem je druh dřeva, jeho vlhkost a stáří.

[3] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Dřevo a materiály na bázi dřeva* [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, 2012 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_I/VY_32_INOVACE_A-02-04.pdf
[4] MEZI STROMY. *Vlastnosti dřeva* [online]. 2016 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.mezistromy.cz/drevarstvi/vlastnosti-dreva/odborny#

4 Dělení dřeva

Nejčastějším způsobem dělení dřeva je řezání. Mezi další technologie patří dělení laserem, vodním paprskem, plazmou a jiné nekonvenční technologie.

Pecina[5] uvádí, že dělení se provádí řezným nástrojem, jehož funkční část je břit (ostří). Nástroje pro řezání můžeme dělit podle počtu jejich břitů. Nástroje s jedním břitem nejsou často využívány v průmyslovém řezání (nože, hoblíky, dláta). Vícebřité nástroje jako jsou frézy a pilové nástroje jsou pro průmyslové použití vhodnější. Pilové nástroje se vyrábí v podobě kotoučů, pásů, děrovek nebo listů.



Obrázek 1 Geometrie nástroje[5]

[5] PECINA, Josef a PECINA Pavel. *Materiály a technologie – dřevo* [online]. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity Katedra technické a informační výchovy 2007 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.ped.muni.cz/wtech/old2012/elearning/mtd.pdf

4.1 Pilové kotouče

Podle firmy Pilana[6] jsou pilové kotouče preferovány kvůli své vysoké řezné rychlosti (až 100m/s) snadné výměně a seřizování. Samotná výroba kotoučů není příliš složitá. Jedná se o plechový kotouč s otvorem pro upnutí. Zuby mohou být součástí kotouče, nebo jsou připájeny. Provádí se na nich tepelné a povrchové úpravy pro zlepšení vlastností. Pro snížení nebezpečí vyhnutí zubů nebo zničení kotouče při náhlém zastavení jsou některé pilové kotouče vybaveny expanzní rozpínací drážkou, která nadbytečné napětí utlumí.

Rozpínání vlivem odstředivých sil a vysokých teplot vyvolaných třením zabraňuje napínací kroužek. Tento prvek pomáhá udržet tvarovou stabilitu a zvyšovat tak přesnost řezání. Je umístěn ve 2/3 kotouče.

Do kotouče mohou být také vypáleny drážky, které se vyplní polyuretanovou hmotou, která výrazně snižuje hluk při řezání.

4.1.1 Volba kotouče

Základním parametrem kotouče je jeho průměr. Průměr je dán tloušťkou řezaného materiálu a maximálním možným průměrem, který je možné do stroje upnout. Od průměru se odvíjí počet zubů kotouče. Pro výpočet počtu zubů je možné použít následující rovnici (1).

Okomentoval(a): [C1]: Cislovani rovnic upravit do tvaru (1)

$$z = \frac{D \cdot \pi}{t}$$

Rovnice 1 Výpočet počtu zubů

D … průměr kotouče

t … rozteč zubů

4.1.2 Počet zubů

Počet zubů pilového kotouče je dán roztečí, kterou lze vypočíst podle rovnice (2) a jeho průměrem. Kvůli dosažení vhodných parametrů při řezání je nutné použít pilový kotouč s takovým počtem zubů, aby zaručil nejvyšší efektivitu práce pro danou řeznou rychlost a průměr kotouče. Při zvýšeném výkonu stroje, který pohání pilový kotouč, je možné používat

[6] PILANA. *Nástroje pro dělení materiálů Pilové kotouče [online]* 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://drevene-materialy.fld.czu.cz/nastroje

větší počet zubů, aby byla zachována efektivita práce. V řezu by měly být 2-3 zuby.

$$t = \frac{h \cdot 1{,}45}{k}$$

Rovnice 2 výpočet rozteče

h … výška řezaného materiálu

k … počet zubů v záběru

Firma Pilana[7] udává mezní řezné rychlosti pro pilové kotouče. Při jejich překročení může vlivem velkých odstředivých sil dojít k jejich zničení. Řezná rychlost, kterou lze vypočítat rovnicí (3), je dána průměrem kotouče a otáčkami.

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000}$$

Rovnice 3 Výpočet řezné rychlosti

D … průměr kotouče

n … otáčky

Doporučené otáčky [1/min]										
Ø D [mm]	Řezná rychlost v_c [m/sec]									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100	1910	3820	5730	7640	9550	11460	13370	15280	17190	19100
150	1270	2550	3820	5100	6370	7640	8920	10190	11500	12730
200	960	1910	2870	3820	4780	5730	6690	7640	8600	9550
250	760	1530	2290	3060	3820	4590	5350	6110	6880	7640
300	640	1270	1910	2550	3180	3820	4460	5100	5740	6370
350	550	1090	1640	2180	2730	3280	3820	4370	4900	5460
400	480	960	1430	1910	2390	2870	3340	3820	4300	4780
450	430	850	1270	1700	2120	2550	2970	3400	3820	4250
500	380	760	1150	1530	1910	2290	2680	3060	3440	3820
550	350	690	1040	1390	1740	2080	2430	2780	3120	3470
600	320	640	960	1270	1590	1910	2230	2550	2880	3180
650	290	590	880	1180	1470	1760	2060	2350	2640	2940
700	270	550	820	1090	1360	1640	1910	2180	2450	2730
750	250	510	760	1020	1270	1530	1780	2040	2290	2550
800	240	480	720	950	1190	1430	1670	1910	2150	2390

Tabulka 2 Doporučené otáčky pilových kotoučů[7]

[7] PILANA. *Nástroje pro dělení materiálů Pilové kotouče [online]* 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://drevene-materialy.fld.czu.cz/nastroje

Rychlost posuvu kotouče je dána rovnicí (4). Je dána počtem zubů, otáčkami a řezaným materiálem.

$$u = \frac{s_z \cdot n \cdot z}{1000}$$

Rovnice 4 výpočet rychlosti posuvu

s_z ... posuv na zub

Posuv na zub je dán obráběným materiálem viz tabulka 3.

Doporučené hodnoty posuvu na zub		
Materiál		**Posuv na zub s_z [mm/zub]**
Měkké dřevo	podélné řezání	0,2 – 0,3
	příčné řezání	0,1 – 0,2
Tvrdé dřevo		0,08 – 0,15
Dřevotříska		0,1 – 0,25
Překližka		0,05 – 0,12
Laminované desky		0,05 – 0,1
Neželezné kovy a plasty		0,02 – 0,05

Tabulka 3 Hodnoty posuvů na zub[8]

5 CNC dělící centra

Dělení velkých dřevěných a laminátových desek se nejčastěji provádí pomocí dělících CNC center. V těchto centrech jsou desky děleny pilovými kotouči. Podle zdroje firmy Pilanoa[8] samotnému dělení předchází předřez, který provede menší pilový kotouč. Předřez se provádí u materiálů, které již byly povrchově upraveny. Předřezový kotouč má opačný smysl otáčení než kotouč hlavní a nařezává materiál do hloubky maximálně 2 mm. Předřezový kotouč je širší než hlavní, aby nedošlo k otřepení řezné spáry. Rozdíl šířek mezi hlavním a předřezovým kotoučem se pohybuje mezi 0,1- 0,3 mm.

Při použití kotoučů velkých průměrů a dostatečně velkého příkonu je možné dělit více desek najednou. Problémem je zajištění toho, aby na sebe desky dokonale dolehly. Při řezání by mohlo dojít k jejich vzájemnému posunutí a nebylo by možné dosáhnout požadované přesnosti. Z toho důvodu jsou desky zajištěny v dané poloze pomocí hydraulických upínačů.

[8] PILANA. *Nástroje pro dělení materiálů Pilové kotouče [online]* 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://drevene-materialy.fld.czu.cz/nastroje

yp zubů	Průměr kotouče v mm									
	1016	1067	1118	1168	1219	1270	1321	1372	1422	1524
	Počet zubů									
2-112	44	46	48	50	54	56	-	-	-	-
F	-	-	42	44	46	48	50	52	54	-
B	-	-	34	38	42	42	44	44	48	-
3	-	-	40	42	46	48	50	50	50	-
3-1/2	-	-	38	40	42	44	46	48	50	52
D	-	-	-	-	36	36	36	40	40	44
4-1/2	-	-	-	-	38	40	40	44	44	44

Tabulka 4 Počty zubů v závislosti na typu a průměru kotouče[9]

5.1 Šířka ostří

Lunstrum[9] říká, že ostří zubů musí být dost široká, aby jimi vytvořená cesta byla dostatečně prostorná na to, aby jí prošel pilový kotouč bez zbytečného kontaktu s řezaným dřevem. Nadbytečným kontaktem vzniká tření, díky kterému dochází k ohřívání kotouče a tím k jeho rozpínání. Toto může způsobit problémy při řezání a výrazně snižuje jeho přesnost.

Pro měkčí dřeva je obecně vhodné širší ostří zubů než pro tvrdá dřeva, a to kvůli jejich pružnější struktuře. Platí, že tvrdá dřeva se řežou lépe než měkká. Výjimky tvoří dřevo lípy a topolu, která také vyžadují širší řez.

Dalším případem, kdy je nutné použít širší ostří zubů je řezání za krajních podmínek, kdy je pilový kotouč velmi namáhán, a to při řezání většího počtu desek naráz. Dalším případem je použití typu zubů s velkou roztečí. Nadměrné napětí musíme kompenzovat mohutnějšími a většími zuby.

[9] LUNSTRUM, Staford, J. C*ircular sawmills and their efficient operation s.16. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

5.2 Pilový hřídel

Podle Lunstruma[10] pilový hřídel přenáší výkon z motoru na pilový kotouč. Pilový hřídel musí být dimenzován tak, aby byl schopný přenést požadovaný výkon a otáčky na pilový kotouč. Přenos musí být hladký a bez vibrací. Jakékoli vibrace a chvění na hřídeli se výrazně projeví na obvodu kotouče a snižují tak přesnost řezu a může dojít až k poškození zubů či kotouče. Hřídel musí být dostatečně tuhá, aby byla schopna vydržet rázy od motoru i od pilového kotouče v záběru. Největší zatížení nastává, když je pilový kotouč zatížen natolik, že se v řezaném materiálu náhle zastaví.

Průměr pilového hřídele je dán požadovaným přenášeným výkonem a otáčkami, viz. tabulka 5.

Otáčky pilového hřídel v ot/min				Průměr pilového hřídele v mm
400	500	600	700	
Výkon v KW				
32-54	40-67	48-81	57-94	11,1-50,8
43-72	54-90	65-108	75-126	17,5-50,8
57-94	71-118	84-141	98-165	23,8-50,8
90-151	113-189	136-226	158-264	11,1-76,2
136-227	170-283	204-340	238-397	23,8-76,2

Tabulka 5 Průměry pilového hřídele v závislosti na otáčkách a přenášeném výkonu[10]

5.3 Příruba kotouče

Lunstrum[11] uvádí že pro plynulý a účinný chod pilového kotouče se používají dvě identické příruby ve kterých je kotouč upevněn. Příruby musí být tak velké, aby poskytovaly dostatečnou podporu kotouči.

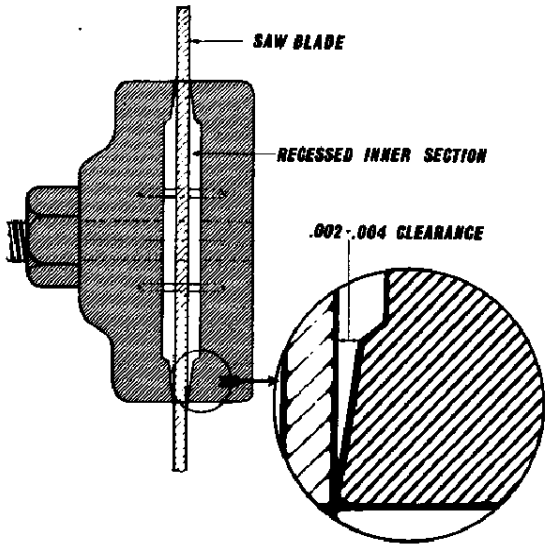
Průměr kotouče v mm	Průměr příruby v mm
1219-1372	152
1422-1524	178
Nad 1524	203

Tabulka 6 Průměr příruby v závislosti na průměru kotouče[11]

[10] LUNSTRUM, Staford, J. *Circular sawmills and their efficient operation s.17-18. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

[11] LUNSTRUM, Staford, J. *Circular sawmills and their efficient operation s.19-20. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

Většina přírub je tvarována tak, že je v kontaktu s kotoučem jen jejich vnější mezikruží široké 19-22 mm.



Obrázek 2 Spoj příruba a kotouč[12]

5.4 Úběr

Úběr označuje Lunsrum[12] jako vzdálenost, o kterou se musí pohnout obrobek, než další zub vejde do řezu. Úběr je dán obvodovou rychlostí kotouče a rychlostí posuvu. Hodnota úběru udává velikost potřebného výkonu. Velikost úběru je pro měkká dřeva 8,03 mm a pro dřeva tvrdá 2,54 mm. Pokud by velikost úběru překročila hodnotu 8,03 mm, výrazně by se zhoršila kvalita řezaného povrchu, protože by začalo docházet k trhání dřeva. Při příliš velkém úběru by došlo k přeplnění zubové mezery třískou a mohlo by dojít i k zastavení kotouče. Tento jev má na pohon i na řeznou jednotku negativní vliv. Zuby většinou nejsou dimenzovány na nadměrné napětí spojené s příliš velkým úběrem a mohlo by tak dojít k jejích vylomení.

[12] LUNSTRUM, Staford, J. *Circular sawmills and their efficient operation s.26-28. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

5.5 Rychlosti pilových kotoučů

Lunstrum[13] dělí běžné obvodové rychlosti podle typu dřeva. Pro tvrdá dřeva se obvodová rychlost pohybuje mezi 2438 m/min až 2743 m/min, pro dřeva měkká mezi 3048 m/min až 3353 m/min. Pro dané průměry kotoučů a obvodové rychlosti jsou otáčky uvedeny v následující tabulce 8.

Průměr kotouče v mm	Obvodová rychlost kotouče v m/min					
	1829	2134	2438	2743	3048	3353
	Otáčky v ot/min					
200	2911	3396	3880	4366	4851	5336
250	2329	2717	3104	3492	3881	4269
300	1941	2264	2587	2910	3234	3558
350	1663	1941	2217	2495	2772	3049
400	1455	1698	1940	2183	2426	2668
450	1294	1509	1725	1940	2156	2372
500	1164	1359	1552	1746	1940	2135
550	1059	1235	1411	1587	1764	1941
600	970	1132	1293	1455	1617	1779
650	832	970	1109	1247	1386	1525
700	2911	3396	3880	4366	4851	5336

Tabulka 7 Otáčky dané průměrem a obvodovou rychlostí[13] upraveno

[13] LUNSTRUM, Staford, J. C*ircular sawmills and their efficient operation s.29. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

6 Současná CNC dělící centra

V současnosti je na trhu velké množství dělících center od mnoha výrobců. V této části práce budou zpracovány informace a parametry uváděné samotnými výrobci na jejich internetových stránkách. Zpracované informace budou upraveny do tabulek. Stroje jednotlivých výrobců budou porovnány a budou vypsány jejich společné a odlišné vlastnosti.

6.1 Stroje předních evropských firem

Postupně budou zpracována data jednotlivých evropských výrobců, nabízejících na trhu CNC obráběcí centra.

První zjišťovaný parametr je výška zdvihu, která určuje maximální možnou tloušťku řezaného materiálu a také maximální průměr pilového kotouče.

Dalším parametrem je délka, která udává maximální velikost řezané desky a téměř odpovídá zástavbovým rozměrům stroje.

Důležitým údajem je maximální rychlost posuvu pilového agregátu, který velmi ovlivňuje efektivitu se kterou celé dělící centrum pracuje.

Čtvrtým údajem je příkon hlavního pilového kotouče. S rostoucím zdvihem musí nutně růst hodnota příkonu, aby byl motor schopný kompenzovat odporové síly, které při řezání vznikají.

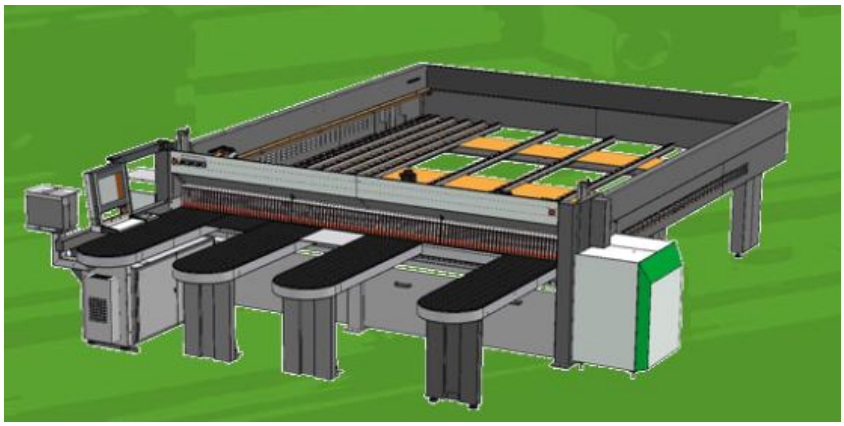
Posledním údajem jsou minutové otáčky. Tento údaj se u některých porovnávaných firem nepodařilo zjistit.

Hodnoty v závorkách jsou navýšené parametry, které někteří výrobci u svých strojů nabízejí.

6.1.1 Biesse

Firma Biesse[14] je výrobcem velkého množství dřevoobráběcích strojů. Nabízí varianty CNC dělících center s různou řeznou délkou a šířkou. Desky jsou s velkou přesností posouvány šoupátky. V přední části jsou stoly s valivými elementy pro snadnou manipulaci desek. Posouvání nařezaných desek obstarává obsluha. Varianty WNA mohou díky zarážkám řezat desky pod různými úhly.

[14] BIESSE. *Numerical control beam saw* [online]. 2015 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.biessecdn.com/media/files/258_Biesse_Cat_SelcoSK4_Eng_Lr.pdf vlastní zpracování



Obrázek 3 Dělící CNC centrum Selco[15]

Série	Selco WN 2	Selco SK 4	Selco WN 6	Selco WN 7	Selco WNA 6	Selco WNA 7	Selco WNA 8
Výška zdvihu [mm]	60	75 (90)	95 (123)	107 (152)	95 (123)	127 (152)	177 (192)
Délka [mm]	3200 (4500)	5240 (6340)	5350 (6650)	7070 (8470)	4720	5460 (6140)	4500 (5900)
Rychlost posuvu [m/min]	80	120	140	140	140	185	160
Příkon [KW]	5,5	7,5-9 (11-13,2)	15-17,3 (18,5-21,3)	18,5-21,3 (22-26)	15-17 (18,5-21,3)	18,5-21,3 (22-26)	30 (37)

Tabulka 8 Parametry strojů firmy Biesse[16]

[15] BIESSE. *Numerical control beam saw* [online]. 2015 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.biessecdn.com/media/files/258_Biesse_Cat_SelcoSK4_Eng_Lr.pdf

[16] BIESSE. *Numerical control beam saw* [online]. 2015 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.biessecdn.com/media/files/258_Biesse_Cat_SelcoSK4_Eng_Lr.pdf vlastní zpracování

6.1.2 Homag

Firma Homag[17] vyrábí stroje pro dělení i tvarování dřeva a dřevotřísky. Koncept dělícího centra je stejný jako u firmy Biesse, liší se pouze parametry uvedenými v tabulce. Pro transport nařezaných desek je opět nutná obsluha.

Obrázek 4 Dělící CNC centrum firmy Homag[18]

Série	B130	B180	B200	B300	B400	B500	B600
Výška zdvihu [mm]	60	95	60 (80)	80 (95)	110 (125)	150 (170)	190
Délka [mm]	3200	3200 (3800)	3200 (4300)	3200 (5600)	3200 (5600)	3200 (6500)	3200 (5600)
Rychlost posuvu [m/min]	60	80 (120)	80 (120)	130 (150)	130 (150)	130 (150)	130(150)
Příkon [KW]	5,5 (7,5)	13,5 (15)	7,5 (9,2)	11 (18)	13,5 (18)	18 (42)	36 (42)

Tabulka 9 Parametry strojů firmy Homag[19]

[17] HOMAG. *Panel dividing saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.homag.com/en/products/cutting/ Vlastní zpracování

[18] HOMAG. *Panel dividing saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.homag.com/en/products/cutting/

[19] HOMAG. *Panel dividing saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.homag.com/en/products/cutting/ vlastní zpracování

6.1.3 SCM

Firma SCM[20] vyrábí Dělící centra pod prodejním názvem Gabbiani v mnoha variantách. Stroje jsou určeny pro dělení desek z dřevotřísky, některé i pro dělení lamina. Výška zdvihu, délka řezu, příkon a rychlost posuvu jsou podobné jako u strojů firem Biesse a Homag. Pro snadnou manipulaci desek je určen prostor s valivými elementy.

Obrázek 5 Dělící CNC centrum Gabbiani s[21]

[20] SCM. *Beam saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.scmgroup.com/en_GB/scmwood/products/beam-saws.c907 Vlastní zpracování

[21] SCM. *Beam saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.scmgroup.com/en_GB/scmwood/products/beam-saws.c907

Série	Gabbiani g 3	Gabbiani g 2	Gabbiani st	Gabbiani pt	Gabbiani s	Gabbiani p
Výška zdvihu [mm]	130 (165)	115 (128)	115	70	95 (115)	55 (70)
Délka [mm]	3200 (4500)	3200 (4500)	3200 (4500)	3300 (4300)	3200 (4500)	3300 (4500)
Max.Rychlost posuvu [m/min]	170	150 (170)	135 (150)	100	60 (135, 150)	60(100)
Příkon [KW]	18-22 (30-37)	7,5 (11-15-18)	9 (11-15-18)	7 (9)	7	7 (9)
Otáčky čepele [1/min)	3500 (2950)	-	3900 (630	4600 (6300)	3900 (6300)	4600 (6300)

Tabulka 10 Parametry strojů firmy SCM[22]

6.1.4 Felder

Firma Felder[23] nabízí velké množství dřevoobráběcích strojů jako jsou různé druhy frézek, brusek podavačů, ale i dělících strojů. Dělící centrum nabízí pod názvem Format. Koncept stroje je stejný jako u předešlých firem. Dělící prostor, zdvih, příkon a rychlost posuvu nedosahují takových hodnot jako stoje stroje firmy Biesse nebo SCM. Nezbytnou součástí je obsluha, která manipuluje s nařezanými deskami.

[22] SCM. *Beam saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.scmgroup.com/en_GB/scmwood/products/beam-saws.c907 Vlastní zpracování

[23] FELDER. *Industry panel saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.felder-group.com/fg-en/products/industry-panel-saws.html Vlastní zpracování

Obrázek 6 Dělící CNC centrum Kappa automatic 100[24]

Série	Kappa automatic 100	Kappa automatic 80	Kappa automatic classic
Výška zdvihu [mm]	100	80	68
Délka [mm]	3200 (3800, 4300)	3200 (4300)	3200 (4300)
Max.Rychlost posuvu [m/min]	100	100	40
Příkon [KW]	9 (13,5)	9 (13,5)	7,5
Otáčky čepele [1/min)	2000 (6000)	2000 (6000)	

Tabulka 11 Parametry strojů firmy Felder[25]

[24] FELDER. *Industry panel saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.felder-group.com/fg-en/products/industry-panel-saws.html
[25] FELDER. *Industry panel saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.felder-group.com/fg-en/products/industry-panel-saws.html Vlastní zpracování

6.1.5 Holz-her

Tectra od firmy Holz-her[26] je dělící centrum, které firma vyrábí v mnoha provedeních. Varianty mohou mít zvýšený příkon kotoučů nebo vyšší rychlost posuvu. Koncept stroje zůstává stejný jako u předešlých výrobců.

Obrázek 7 Dělící CNC centrum Tectra[27]

Série	Tectra 6120 classic	Tectra 6120 power	Tectra 6120 dynamic	Zentrex 6220 classic	Zentrex 6220 Power	Zentrex 6220 dynamic
Výška zdvihu [mm]	82	95	95	105	130	130
Délka [mm]	4400	4400	4400	4300	5900	6250
Max.Rychlost posuvu [m/min]	70	130	100	150	150	150
Příkon hl kotouče [KW]	7,5	11	11	18	21	25

Tabulka 12 Parametry strojů firmy Holz-her[28]

[26] HOLZ-HER. *Beam saw and horizontal panel saw: High-performance panel cutting technology by HOLZ-HER* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.weinig.com/en/panel-processing/horizontal-panel-cutting-saws.html Vlastní zpracování

[27] HOLZ-HER. *Beam saw and horizontal panel saw: High-performance panel cutting technology by HOLZ-HER* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.weinig.com/en/panel-processing/horizontal-panel-cutting-saws.html

[28] HOLZ-HER. *Beam saw and horizontal panel saw: High-performance panel cutting technology by HOLZ-HER* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.weinig.com/en/panel-processing/horizontal-panel-cutting-saws.html Vlastní zpracování

6.1.6 Panhans

Firma Panhans[29] je výrobce dřevoobráběcích a dělících strojů. CNC dělící centra této firmy se liší příkonem pilového kotouče a maximální velikostí a tloušťkou řezaných desek. Koncept stroje je stejný jako u ostatních firem. Manipulace s nařezanými deskami je opět zajištěna obsluhou.

Obrázek 8 Dělící CNC centrum firmy Panhans[30]

Série	Euro5 spec	Euro star spec	V12 beam saw	S45 spec
Výška zdvihu [mm]	82	110	82	70
Délka [mm]	3200 (4200)	3200 (4200, 5800)	3200	3200 (4200)
Max.Rychlost posuvu [m/min]	80	80		40
Příkon [KW]	11	15	11	7,5
Otáčky čepele [1/min)	5780	5500	5700	6800

Tabulka 13 Parametry strojů firmy Panhans[24]

[29] PANHANS. *Panel Beam Saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.panhans.co.uk/New%20beamsaws.htm Vlastní zpracování
[30] PANHANS. *Panel Beam Saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.panhans.co.uk/New%20beamsaws.htm

6.2 Porovnání strojů

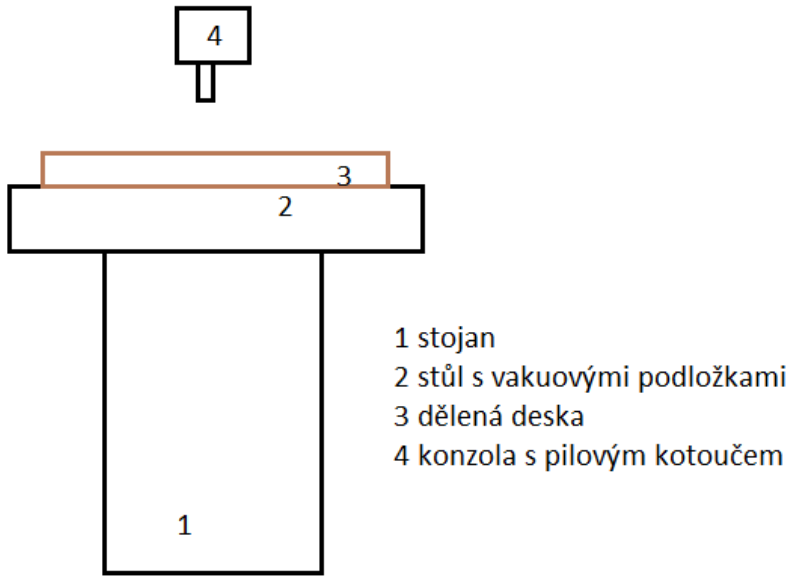
Všechny porovnávané stroje mají společný princip. Deska z laminátu, dřeva či dřevotřísky je dopravena do řezného prostoru. Některá dělící centra mají ve své výbavě i systém pro dopravování desek ze skladovacího prostoru ve formě jeřábů a pneumatických ramen. V tomto prostoru je deska dopravena do nulové pozice pomocí šoupátek a zarážek. Z této pozice je deska vysunuta na pilovou dráhu o danou velikost. Na desku dolehne dráha pro odsávání třísek a předřezový a pilový kotouč provedou rozdělení. Další manipulaci provádí obsluha, která desku vyjme, nebo jí opět posune do řezného prostoru pro další dělení. Pro snadnou manipulaci jsou stoly vybaveny valivými elementy.

Rozdíly jsou nejvíce patrné na parametrech uvedených v tabulce. Největší stroje mají řeznou délku až 6500 mm a výšku zdvihu až 192 mm. Pro dělení takto tlustých desek, případně více desek na sobě, je nutný velký příkon pilového kotouče, který je až 185 KW. Maximální rychlost posuvu kotouče je 185 m/min. Všech těchto nejvyšších hodnot dosahují stroje firmy Biesse.

7 Koncepty strojů

7.1 Dělící konzolové centrum

Dělící konzolové centrum je stroj na principu otočného stolu, nad kterým se ve svislém směru pohybuje řezná dráha s pilovým kotoučem. Na tento stůl je materiál dopravován pomocí robotických ramen a přidržován pomocí vakuových podložek, které by bylo možné pod drahou kotouče zasouvat, aby nedošlo k jejich poškození. V případě dělení většího počtu desek by muselo být jejich přidržení zajištěno pneumatickými upínkami, které by se pohybovali v drahách a přizpůsobily svou polohu velikosti dělené desky. Řezná dráha by mohla kromě svislého pohybu vykonávat ještě pohyb v souřadnici x nebo y. Tím by bylo zajištěno dělení desek příčné i podélné. Otočný stůl by umožňoval i řezání pod libovolným úhlem. Veškerou manipulaci děleného materiálu by zajišťovala robotická ramena.



Obrázek 9 Schéma konceptu konzolového dělícího centra[31]

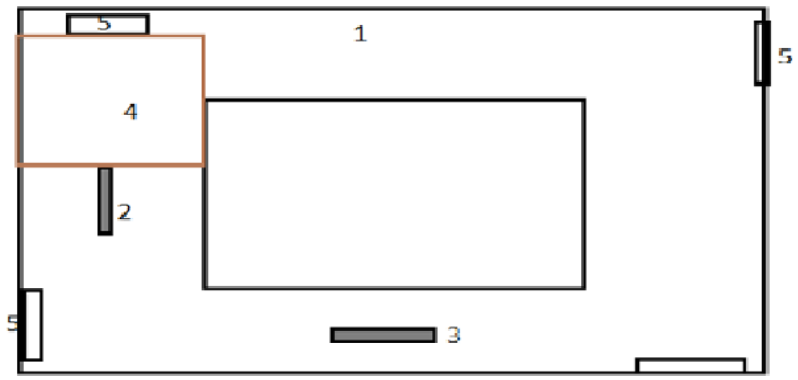
Aby tento koncept mohl být automatizován, musela by být zajištěna dobrá synchronizace mezi podáváním materiálu a samotným dělícím procesem.

[31] Vlastní zpracování

Dělení většího počtu desek by velmi zvýšilo produktivitu tohoto centra. Jeho výhodami jsou schopnost řezat více desek naráz, ve všech směrech, a rovněž pod úhly. Nevýhodou jsou rozměry, které by musely být větší než rozměry dělené desky.

7.2 Dvoukotoučové centrum

Dvoukotoučové centrum je stroj, který by pro dělení využíval výsuvný pilový kotouč. Pro podélné řezání by byl určen jeden a pro příčné druhý. Proti kotouči by byli desky posouvány šoupátky. Desky rozdělené podélně by byly posunuty o přesnou vzdálenost a pomocí šoupátek příčných přitlačeny k druhému kotouči. Možnost dělení většího počtu desek závisí na velikosti pilového kotouče a na jeho příkonu. Celá linka by byla složena do čtverce, takže by bylo možné provádět více podélných a příčných řezů na jedné desce. Desky, které by nebyly určeny k dalšímu dělení by z řezného prostoru vysunuty šoupátkem na dopravník.



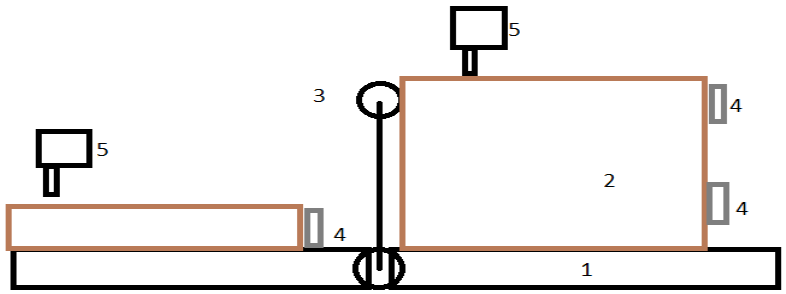
Obrázek 10 Schéma konceptu dvoukotoučového centra[32]

Tento koncept dělícího centra je plně automatizovatelný. Dělení je možné v obou směrech a při zajištění vzájemného posunutí desek vůči sobě, pomocí bočních zarážek, by bylo možné řezat větší počet desek naráz. Stejně jako u předešlého návrhu je velkou nevýhodou velikost zástavbového prostoru, která v tomto případě je ještě větší.

[32] Vlastní zpracování

7.3 Vertikální dělící centrum

Vertikální dělící centrum je nakloněná stěna, na kterou jsou desky pokládány robotickým ramenem s přísavkami. Desky jsou svisle děleny kotoučem. Obrobky jsou posunuty a pomocí zarážek položeny na dráhu druhého kotouče. Zbylá neobrobená deska je posouvána do řezu šoupátky. Při vetší délce dráhy by mohlo být řezání téměř kontinuální. Pro řezání většího množství desek naráz, by musely být desky neustále přidržovány, aby nedošlo k jejich vzájemnému posunutí. Také před posunutím do řezu by muselo dojít k jejich zarovnání do přesné polohy.



1 dopravník
2 dělený materiál
3 pokladač desek
4 šoupátka
5 dělící kotouč

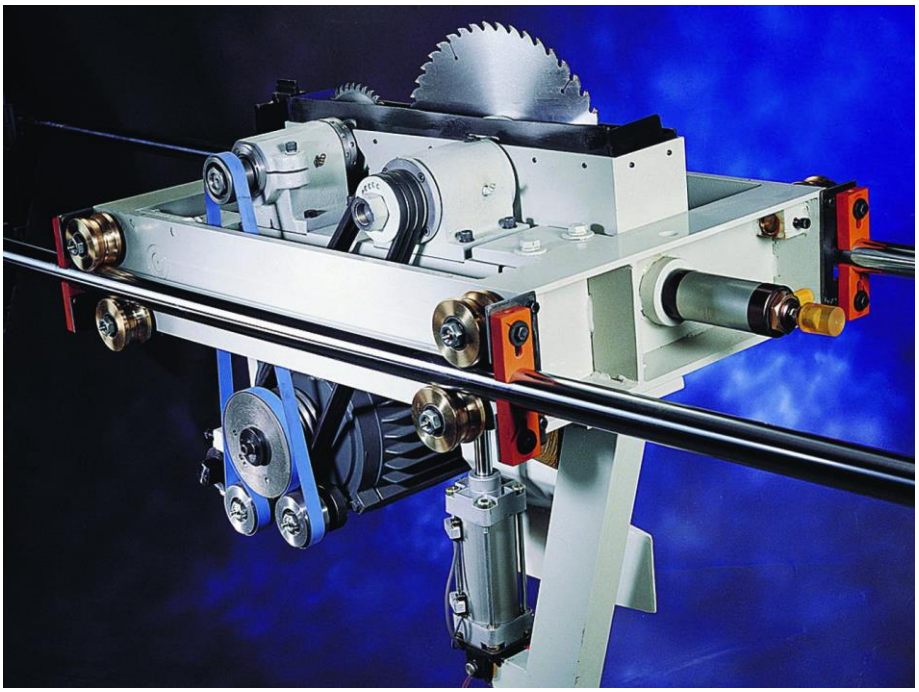
Obrázek 11 Schéma konceptu vertikálního dělícího centra[33]

Oproti předešlým konceptům je tento koncipován na výšku a tím výrazně snižuje svůj zástavbový prostor. U tohoto návrhu není k manipulaci s deskami potřeba obsluha. Všechny posuvy a přemisťování materiálu zajišťují robotická ramena a šoupátka. Dělení více na sobě položených desek je možné a zvyšuje se tím produktivita stroje.

[33] Vlastní zpracování

8 Praktická část

V praktické části práce bude vytvořen matematický model pohonu pilového kotouče. Na obrázku 12[34] je vidět, že výkon a otáčky z motoru jsou na pilový kotouč přenášeny klínovým řemenem. Rozdílný průměr řemenic motoru a kotouče zajistí takový převod, aby na kotouči byly požadované otáčky a kroutící moment. Veličiny, které mají index 1 jsou na straně pohonu. Veličiny na straně pilového kotouče mají index 2.

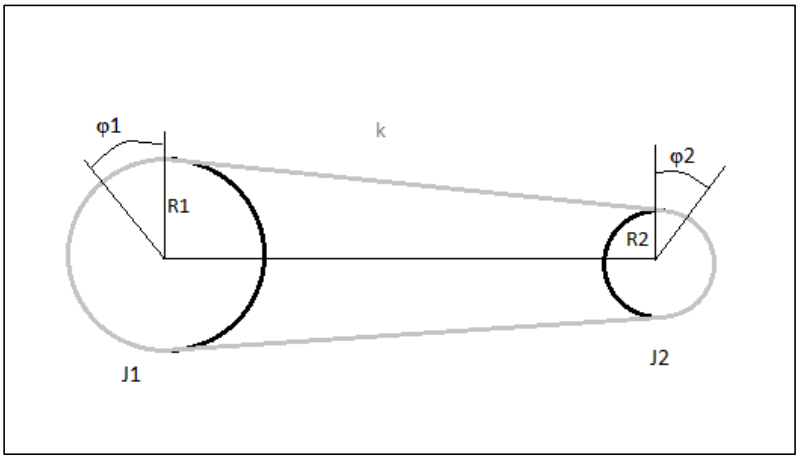


Obrázek 12 detail pohonu hlavního kotouče

[34] OAV. Beam saw [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.oavequipment.com/en/product-139024/Beam-Saw-OPS-8-10-12.html

8.1 Dynamický model

Soustava pohonu a pilového kotouče je zobrazena na Obr. 13. Soustava modeluje pohon a pilový kotouč, navzájem spojené pružným klínovým řemenem. Aby bylo možné jednoduše zjistit vlastní frekvenci kmitání řemenu, uvažuje se tlumení v základním modelu jako nulové.



Obrázek 13 Schéma systému

Rovnice (5) a (6) popisují systém pohonu spojeného s kotoučem řemenem, který má nulové tlumení.

$$J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = k \cdot \varphi_2 \cdot R_1 - k \cdot \varphi_1 \cdot R_1$$

Rovnice 5 Dynamika řemenice motoru

$$J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = k \cdot \varphi_1 \cdot R_2 - k \cdot \varphi_2 \cdot R_2$$

Rovnice 6 Dynamika řemenice kotouče

Z rovnic (5) a (6) lze sestavit matici (7) homogenní soustavy rovnic.

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \cdot k & -R_1 \cdot k \\ -R_2 \cdot k & R_2 \cdot k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rovnice 7 Matice soustavy

Pro tuto soustavu rovnic lze předpokládat, že řešení (8) bude mít exponenciální tvar.

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{i \cdot \Omega \cdot t}$$

Rovnice 8 Řešení soustavy rovnic

Reálná část řešení bude nulová (jedná se o netlumenou soustavu). Dosazením do rovnice (7) vznikne rovnice (9), ze které lze určit vlastní úhlové frekvence soustavy.

$$\begin{bmatrix} R_1 \cdot k - \Omega^2 \cdot J_1 & -R_1 \cdot k \\ -R_2 \cdot k & R_2 \cdot k - J_2 \cdot \Omega^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{01} \\ \varphi_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Rovnice 9 Výpočet vlastní úhlové frekvence

Frekvenční determinant soustavy musí být roven nule (soustava rovnic má nenulové triviální řešení). Toto tvrzení vyjadřuje rovnice (10)

$$(R_1 \cdot k - \Omega^2 \cdot J_1) \cdot (R_2 \cdot k - \Omega^2 \cdot J_2) - R_1 \cdot R_2 \cdot k^2 = 0$$

Rovnice 10 Determinant soustavy roven nule

Roznásobení a vytknutím vznikne rovnice (11), ze které lze vyjádřit hodnoty vlastních úhlových rychlostí.

$$\Omega^2 [\cdot (\Omega^2 \cdot J_1 \cdot J_2 - k \cdot (R_2 \cdot J_1 + R_1 \cdot J_2)] = 0$$

Rovnice 11

Rovnice má dvě řešení (12) a (13). První řešení je rovno nule a odpovídá skutečnosti, že kotouče převodu umožnují jeden volný stupeň pohybu. Druhé řešení je dáno parametry řemenic a tuhostí řemenu a určuje „vnitřní“ kmitání systému.

$$\Omega_{10} = 0$$

Rovnice 12 První řešení

$$\Omega_{20} = \sqrt{\frac{k \cdot (R_2 \cdot J_1 + R_1 \cdot J_2)}{J_1 \cdot J_2}}$$

Rovnice 13 Druhé řešení

Hodnota vlastní frekvence kmitání bude zohledněna při stanovení konstanty zesílení rychlostního regulátoru.

Celkový systém s tuhostí a tlumení lze maticově zapsat rovnicí (14). Jedná se o nehomogenní soustavu rovnic.

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} R_1 & -R_2 \\ -R_1 & R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} R_1 & -R_2 \\ -R_1 & R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_m \\ M_D \end{bmatrix}$$

Rovnice 14 Soustava rovnic systému

Kde J_1 je celkový moment setrvačnosti řemenice, včetně momentu setrvačnosti motoru

J_2 je moment setrvačnosti řemenice pilového kotouče

$\ddot{\varphi}_1$ je úhlové zrychlení motoru

$\ddot{\varphi}_2$ je úhlové zrychlení pilového kotouče

R_1 je poloměr řemenice motoru

R_2 je poloměr řemenice pilového kotouče

$\dot{\varphi}_1$ je úhlová rychlost motoru

$\dot{\varphi}_2$ je úhlová rychlost pilového kotouče

φ_1 je úhel natočení motoru

φ_2 *je úhel natočení pilového kotouče*

b je tlumení řemenu

k je tuhost řemenu

M_m je silový moment motoru

M_D je silový moment vznikající řezáním materiálu

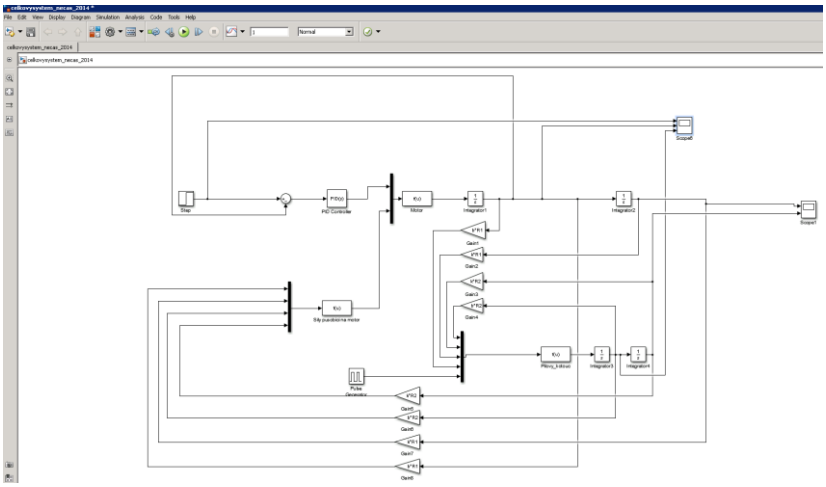
Dynamika soustavy je dále ovlivněna pomocí P regulátoru rychlosti, který je popsán rovnicí (15) ve které je akční zásah roven rozdílu žádané a aktuální úhlové rychlosti násobené parametrem zesílení k.

$$M_m = \frac{k \cdot (\omega_{\check{z}} - \dot{\varphi}_1)}{J_1}$$

Rovnice 15 dynamika motoru

8.2. Simulační model

Simulace matematického modelu byla provedena v programu Matlab v prostředí Simulink. Celkové simulační schema realizující numerickou simulaci rovnic (14), (15) je zobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14 Schéma systému v prostředí Simulink

Síly působící na zuby v průběhu řezného procesu jsou v prvním přiblížení modelovány formou generátoru pulzních signálů. V sekci simulačních výsledků budou zachyceny reakce systému na skokovou změnu požadované úhlové rychlosti motoru při různých nastaveních parametrů systému.

8.2 Simulační výsledky

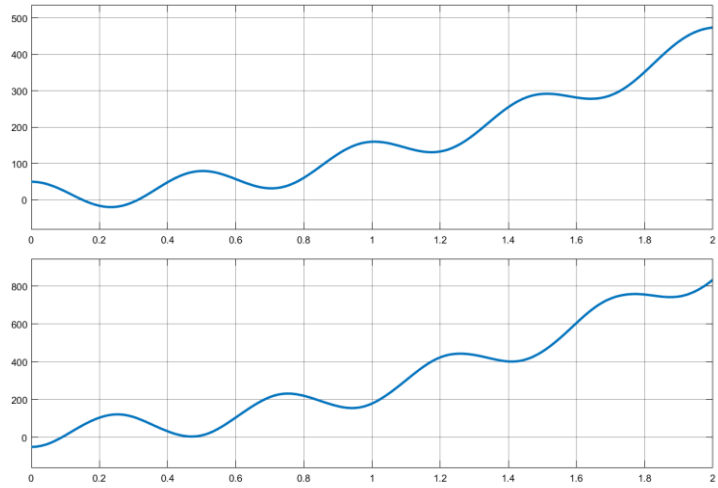
První simulace (15) měla za cíl ověřit správnost sestavení simulačního modelu, prostřednictvím simulačního ověření vlastní úhlové frekvence z rovnice (13). Počáteční natočení řemenice motoru + 50° a úhlové natočení řemenice pilového kotouče o −50°. Tlumení je rovno nule. Parametr zesílení rychlostního regulátoru k je nulový.

Pro výpočet vlastní frekvence netlumeného systému byl použit následující skript v programu Matlab.

```
%parametry

%poloměr řemenice motoru v m
R1=0.1;
%poloměr řemenice pilového kotouče v m
R2=0.05;
%tuhost řemenu v N*m
k=1e4;
%tlumení řemenu V N*m/s
b=0;
%moment setrvačnosti řemenice motoru v Kg*m2
J1=12;
%moment setrvačnosti řemenice pilového kotouče v Kg*m2
J2=6;

%vlastni frekvence netlumené soustavy
omega2 = sqrt ((J1*R2*k + J2*R1*k)/(J1*J2));
f = 1/(2*pi)*omega2

% symbolicky výpočet vlastních čísel;
syms k R1 R2 J1 J2

M = [J1 0; 0 J2];
K = k*[R1 -R1;-R2 R2];

lamda = eig(inv(M)*K)
```

Vypočtěná hodnota vlastní frekvence při zvolených parametrech je:

$$f = \ 2.0547\ Hz$$

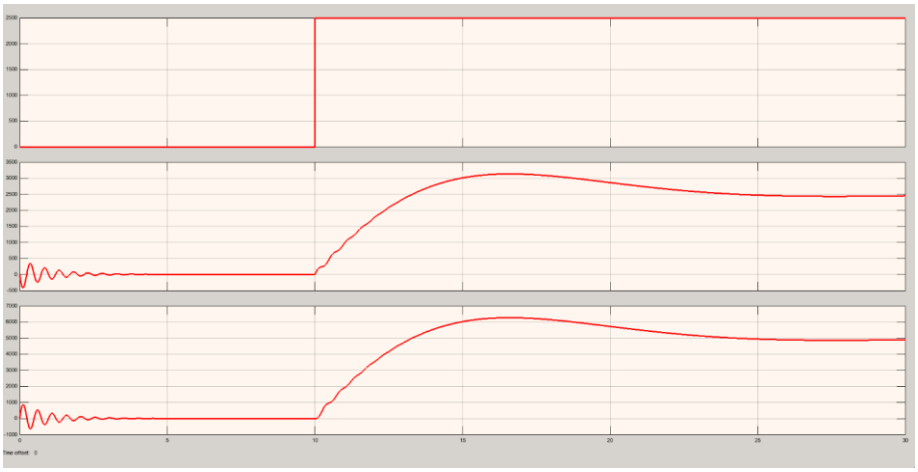


Obrázek 15 Vlastní kmity neregulovaného systému

Z grafu je vidět, že vlastní frekvence systému se shoduje s vypočtenou hodnotou.

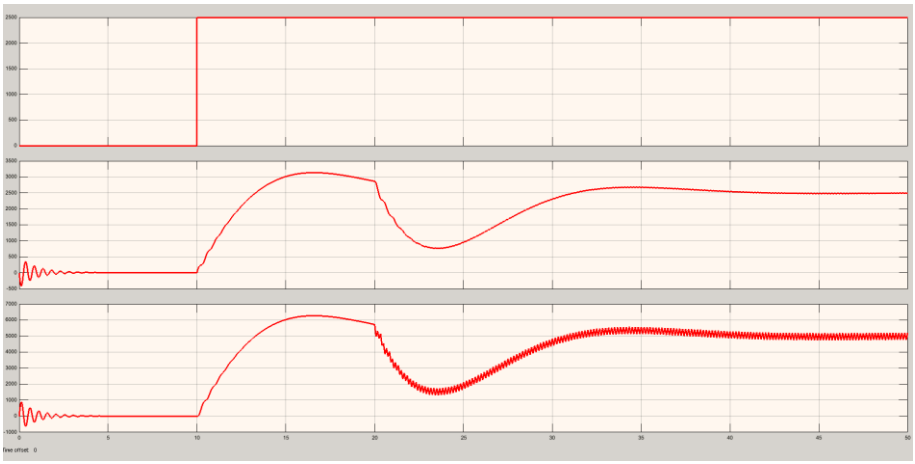
Další simulace (16) ilustruje reakci systému na vstupní skokovou změnu otáček. Počáteční zakmitávání systému je v důsledku je reakce na nenulové počáteční podmínky, po 10 sekundách je skokově změněna požadovaná úhlová rychlost motoru z 0 na 2500 rad/s. Pro lepší řízení je do schematu umístěn PI regulátor s P složkou = 10 a I složkou = 3. Složka I regulátoru zajišťuje, že statická regulační odchylka systému bude nulová a složka P regulátoru ovlivňuje rychlost reakce systému.

Z průběhů je patrné, že díky simulačnímu tlumení řemenu (b = 100 N*m/s) se kmitání vzniklé počátečním natočením řemenic po krátké době ustálí (v čase t=3s). V čase t=10s se hodnota požadovaných otáček skokově zvýší z 0rad/s a 2500rad/s. Úhlová rychlost řemenice 1 se v čase t > 20s ustálí na požadovaná hodnotě.



Obrázek 16 Reakce na skokovou změnu rychlosti

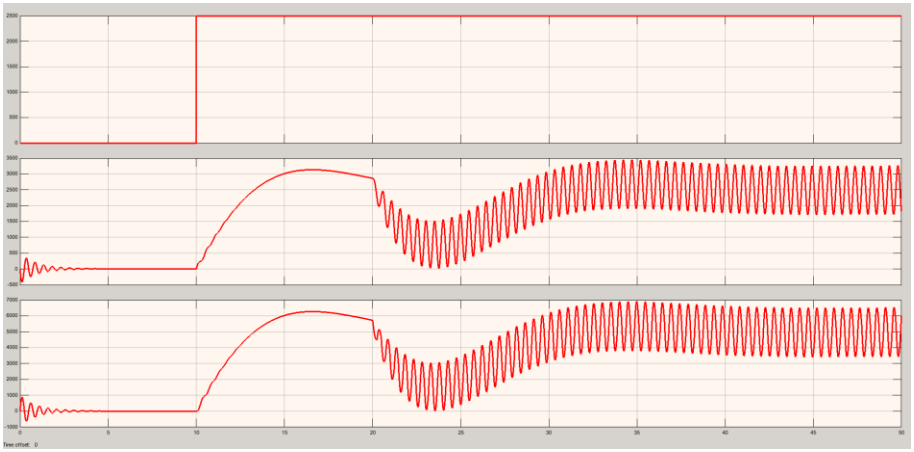
Simulace (17), (18) znázorňuje celkový systém s uvažováním působení reakční síly v důsledku řezného procesu materiálu. Tento proces je simulován formou skokových změn síly o amplitudě 60000rad/s a periodě 6 Hz. Silové pulzy začínají na systém působit v čase t = 20s.



Obrázek 17 Simulace řezného procesu

Z grafu (17) je vidět, že vliv odporových sil se projeví na oba kotouče poklesem úhlové rychlosti ale pouze na řemenici kotouče se projeví pulzování úhlové rychlosti. Vliv pulzního signálu je utlumen řemenem a na řemenici motoru se pulzování úhlové rychlosti neprojeví.

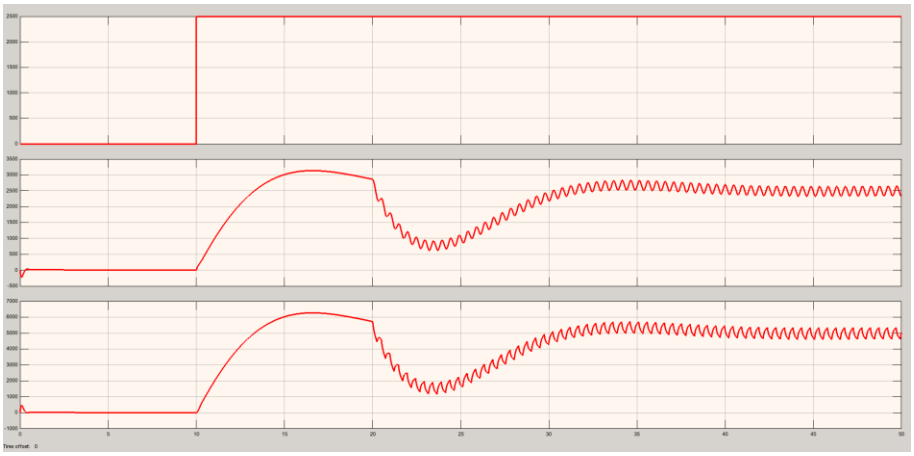
Při změně parametrů pulzního signálu dojde k razantní změně odezvy systému. Při periodě 1/2,0547s a amplitudě 60000rad/s dojde k rezonanci systému, protože frekvence budícího signálu je shodná s jeho vlastní frekvencí.



Obrázek 18 Simulace řezného procesu - rezonance

Rezonance systému způsobí, že kmitavý průběh úhlové rychlosti se projeví na řemenici pilového kotouče i motoru. Po dosažení času t = 50s se střední hodnota simulačních hodnot ustálí, stále však dochází k rezonanční výměně energie mezi jednotlivými řemenicemi reprezentované superponovanými harmonickými oscilacemi rychlosti.

Obrázek 19 ilustruje vliv tlumení na průběh simulace. Při 10x zvýšení parametru tlumení kmitavý průběh způsobený počátečním natočením řemenic se ustálí výrazně rychleji. Vliv pulzního signálu se stále projevuje na obou řemenicích, ale se sníženou amplitudou kmitů.



Obrázek 19 Vliv tlumení b = 1000 Nms^{-1}

9 Závěr

V kapitolách tři a čtyři byla provedena rešerše teorii dělení dřeva a materiálů na bázi dřeva. Samostatná kapitola pro dělení lamina nebyla vytvořena, protože její problematika je shodná s dělením dřeva.

V páté kapitole byla provedena rešerše deskových dělících center na dřevo a technologických parametrů při dělení pomocí těchto center.

Šestá kapitola obsahuje rešerší, zabývající se srovnáním současných dělících center a jejich porovnáním formou srovnávací tabulky. Z informací získaných z internetových stránek šesti evropských výrobců je vidět, že jednotlivé stroje mají vždy stejný koncept a odlišné parametry.

Koncepty strojů vypracované v rámci sedmé kapitoly této práce představují autorův přínos z hlediska možných řešení inovace dělících CNC center. Jako nejvýhodnější se z pohledu práce jeví třetí nabízené řešení – vertikální dělící centrum, a to díky malé zástavbové ploše a kontinuálnímu dělení desek.

V osmé kapitole byl úspěšně podle dynamického modelu vytvořen simulační model v prostředí Matlab/Simulink®. Grafy vytvořené na základě simulačního modelu odpovídají realisticky reakcím systému na vnější zásahy.

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hustoty dřevin[1] 8
Tabulka 2 Doporučené otáčky pilových kotoučů[7] 12
Tabulka 3 Hodnoty posuvů na zub[8] 13
Tabulka 5 Počty zubů v závislosti na typu a průměru kotouče[9] 14
Tabulka 5 Průměry pilového hřídele v závislosti na otáčkách a přenášeném výkonu[10] 15
Tabulka 6 Průměr příruby v závislosti na průměru kotouče[11] 15
Tabulka 8 Otáčky dané průměrem a obvodovou rychlostí[13] upraveno 17
Tabulka 9 Parametry strojů firmy Biesse 19
Tabulka 10 Parametry strojů firmy Homag 20
Tabulka 11 Parametry strojů firmy SCM 22
Tabulka 12 Parametry strojů firmy Felder 23
Tabulka 13 Parametry strojů firmy Holz-her 24
Tabulka 14 Parametry strojů firmy Panhans[24] 25

Seznam obrázků

Obrázek 1 Geometrie nástroje[5] 10
Obrázek 2 Spoj příruba a kotouč[12] 16
Obrázek 3 Dělící CNC centrum Selco 19
Obrázek 4 Dělící CNC centrum firmy Homag 20
Obrázek 5 Dělící CNC centrum Gabbiani s 21
Obrázek 6 Dělící CNC centrum Kappa automatic 100 23
Obrázek 7 Dělící CNC centrum Tectra 24
Obrázek 8 Dělící CNC centrum firmy Panhans 25
Obrázek 9 Schéma konceptu konzolového dělícího centra 27
Obrázek 10 Schéma konceptu dvoukotoučového centra 28
Obrázek 11 Schéma konceptu vertikálního dělícího centra 29
Obrázek 12 detail pohonu hlavního kotouče 30
Obrázek 13 Schéma systému 31
Obrázek 14 Schéma systému v prostředí Simulink 34
Obrázek 15 Vlastní kmity neregulovaného systému 36
Obrázek 16 Reakce na skokovou změnu rychlosti 37
Obrázek 17 Simulace řezného procesu 37
Obrázek 18 Simulace řezného procesu - rezonance 38
Obrázek 19 Vliv tlumení b = 1000 Nms^{-1} 39

Literatura

BAŘTIPÁN, Emil, Leoš. *Dřevo dělení dřeva-Dřevo jehličnatých dřevin-Dřevo listnatých dřevin-Hustota dřeva* [online]. 2016 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://docplayer.cz/17385607-Evo-leni-d-eva-d-evo-jehli-natych-d-evin-d-evo-listnatych-d-evin-hustota-d-eva.html

BÖHM, Martin., REISNER, Jan a BOMBA Jan. *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Dřevo a materiály na bázi dřeva* [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, 2012 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/Technologie_grafiky_I/VY_32_INOVACE_A-02-04.pdf

MEZI STROMY. *Vlastnosti dřeva* [online]. 2016 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.mezistromy.cz/drevarstvi/vlastnosti-dreva/odborny#

PECINA, Josef a PECINA Pavel. *Materiály a technologie – dřevo* [online]. Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity Katedra technické a informační výchovy 2007 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.ped.muni.cz/wtech/old2012/elearning/mtd.pdf

PILANA. *Nástroje pro dělení materiálů Pilové kotouče [online]* 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://drevene-materialy.fld.czu.cz/nastroje

LUNSTRUM, Staford, J. C*ircular sawmills and their efficient operation s.16-20, 26-29. Cleveland :* USDA Forest Service State and Private Forestry 1972

BIESSE. *Numerical control beam saw* [online]. 2015 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.biessecdn.com/media/files/258_Biesse_Cat_SelcoSK4_Eng_Lr.pdf

HOMAG. *Panel dividing saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.homag.com/en/products/cutting/

SCM. *Beam saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.scmgroup.com/en_GB/scmwood/products/beam-saws.c907

FELDER. *Industry panel saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.felder-group.com/fg-en/products/industry-panel-saws.html Vlastní zpracování

HOLZ-HER. *Beam saw and horizontal panel saw: High-performance panel cutting technology by HOLZ-HER* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z https://www.weinig.com/en/panel-processing/horizontal-panel-cutting-saws.html¨

PANHANS. *Panel Beam Saws* [online]. 2018 [cit. 8.8.2018]. Dostupné z http://www.panhans.co.uk/New%20beamsaws.htm