



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ OBRÁBĚCÍHO PROCESU

OPTIMALIZATION OF OPERATING COSTS MACHINING OF PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARKÉTA DOSTÁLOVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.

BRNO 2013

Zadání

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá operačními výrobními náklady v procesu obrábění a jejich následnou optimalizací. V první části jsou specifikovány jednotlivé nákladové položky, které vstupují do procesu obrábění. Tyto položky jsou dále kvantifikovány, z čehož jsou získány celkové operační náklady. Dále je popsána optimalizace operačních výrobních nákladů podle kritérií minimálních výrobních nákladů a maximální výrobnosti. Praktická část práce se zabývá následnou aplikací jednotlivých kritérií na konkrétních příkladech. K práci je přiložené CD s programovými přílohami. Cílem práce je nalezení optimální kombinace řezné rychlosti, trvanlivosti řezného nástroje a volby technologie obrábění tak, aby zvolené kritérium platilo.

Klíčová slova

Obráběcí proces, operační výrobní náklady, trvanlivost řezného nástroje, řezná rychlost, optimalizace

ABSTRACT

This work deals with operating production costs in machining process and further optimization. In the first chapter, individual costs items which are related to machining process are specified. These cost items are quantified and total production costs are acquired. Optimization of operation production costs are described for criterion of minimal production costs and criterion of maximal productivity are described in next chapter. Practical part of this work is focused to apply each individual criterion in practical example. There is CD with programs attached to this work. The goal is to find optimal combination of cutting speed, sufficient life time of cutting tool and suitable cutting technology so that chosen criterion can be acceptable.

Key words

Machining process, operating production costs, life time of cutting tool, cutting speed, optimization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOSTÁLOVÁ, M. *Optimalizace operačních nákladů obráběcího procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 120 s., 4 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace operačních nákladů obráběcího procesu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

14.5.2013

Datum

Bc. Markéta Dostálová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Prokopovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 SPECIFIKACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ	11
1.1 Náklady na jednotkovou práci	11
1.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu	12
1.3 Náklady na materiál	12
1.4 Režijní náklady	12
2 KVANTIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ	16
2.1. Náklady na jednotkovou práci	16
2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci	18
2.1.2 Náklady na jednotkovou vedlejší práci	27
2.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu	28
2.2.1 Opatření, trvanlivost břitů nástroje a životnost	29
2.2.2 Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost	43
2.3 Náklady na materiál	48
2.3.1 Norma spotřeby materiálu	49
2.3.2 Stupeň využití materiálu	51
2.4 Celkové operační náklady	52
3 OPTIMALIZACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ PRO ZVOLENÁ KRITÉRIA	53
3.1 Index produktivity obrábění	53
3.2 Nákladová návratnost	59
3.3 Kritické výrobní množství	60
3.3.1 Kritické výrobní množství rovno kritické výrobní dávce	64
3.3.2 Případy řešení kritického výrobního množství	66
3.4 Optimalizace řezné rychlosti	67
3.4.1 Optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních výrobních nákladů	67
3.4.2 Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti	69
3.5 Kritérium optimálnosti z hlediska úběru materiálu	70
4 PRAKTICKÁ APLIKACE OPTIMALIZACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ	72
4.1 Výpočet indexu produktivity obrábění	72
4.2 Výpočet nákladové návratnosti	84

4.3 Výpočet kritického výrobního množství.....	87
4.3.1 Kritické výrobní množství rovno kritické výrobní dávce	88
4.3.2 Konkretizovaný případ řešení kritického výrobního množství	92
4.4 Optimalizace operačních nákladů.....	95
4.4.1 Optimalizace operační nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů	96
4.4.2 Optimalizace operační nákladů pro kritérium maximální výrobnosti ...	101
DISKUZE.....	108
ZÁVĚR	109
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	110
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	113
SEZNAM PŘÍLOH.....	120

ÚVOD

Každý výrobní podnik by měl identifikovat svoje operační výrobní náklady co nejpřesněji, aby se výrobní proces zdokonalil a odstranily se zbytečné činnosti, které by zabraňovaly růstu podniku. [1]

Operační výrobní náklady jsou jednou z nejvýznamnějších položek pro pracovníky v oddělení TPV (technické přípravy výroby) a podnik samotný. Tyto náklady není jednoduché zobecnit, proto se vztahují na obrábění jedné konkrétní součásti, v jedné konkrétní operaci. Realizace výrobku je závislá na mnoha faktorech. Tvar a složitost, jeho výchozí rozměry, druh polotovaru výrobku (výkovek, odlitek, přířez apod.), materiál obrobku a jeho obrobitelnost, rozměrové i geometrické tolerance, materiál a geometrie nástroje, stav bříty při výměně nástroje, dobu obrábění daným břítem, řezné podmínky a mnoho dalších faktorů mají vliv na výrobní proces. [1]

Výrobní proces je ovlivněn především stanovením počtu a pořadí operací, stanovením pracovních podmínek (obrábění na sucho, s emulzí apod.), specifikací potřebného strojového parku (potřebné stroje a vybavení) a kvalifikační třídou pracovníků. Je nutno vynaložit různé množství vynaložené práce na přetvoření polotovaru na koncový výrobek, a také je potřeba stanovit technickoekonomické parametry, do kterých patří normy spotřeby času a další. S tímto souvisí správné a podrobné stanovení nákladů, analýza jednotlivých možných řešení, vypracování několika variant výrobního procesu, podrobné simulace (dnes se v expandujících firmách využívají běžně), následně výběr optimální varianty a výroba. [1]

Tato práce je zaměřena především na identifikaci operačních nákladů, kvantifikaci operačních nákladů a jejich optimalizaci z různých hledisek. Dále jsou uvedena kritéria, podle kterých lze realizovat posouzení operačních nákladů.

Optimalizace obráběcího procesu je jednou z nejdůležitějších oblastí ekonomiky podniků, která umožňuje vylepšit výrobní proces jako takový. Optimalizací lze dosáhnout snížení výrobních nákladů, zvýšení produktivity výroby, zvýšení využití strojů atd.

Produktivitu a hospodárnost obrábění lze kvantifikovat stupněm dosažení co největšího efektu výroby z daných výrobních možností. [1]

V dnešní době se využívá vícekritériální optimalizace, která bere v úvahu mnoho omezení. Omezení mohou být dána například maximálním přípustným krouticím momentem, výkonem na vřetení, maximální drsností povrchu a přesností obrobeného povrchu, řezivostí bříty nástroje, tuhostí soustavy stroj - nástroj – obrobek a další. Pro takovéto řešení se využívá lineárního programování, metoda simplex nebo různé počítačové programy (statgraphics).

Cílem optimalizace operačních nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů nebo pro kritérium maximální výrobnosti je získání nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby bylo dané kritérium splněno.

Nalezení nejvhodnější kombinace určitých podmínek vyžaduje nalezení minima dané funkce.

Do výrobního procesu vstupuje mnoho faktorů, které mají vliv na určení optimální hodnoty trvanlivosti, řezné rychlosti a délky (obráběné plochy).

V dnešní době je stále větší pozornost věnována optimalizaci obráběcího procesu a operačním nákladům, proto aby se dosáhlo co možná nejefektivnějšího výrobního procesu.

Efektivita výrobního procesu je dána mnoha faktory, do kterých patří například technologičnost konstrukce, určení vhodného obráběcího stroje, volba polotovaru a další.

V minulosti byla optimalizace obráběcího procesu poněkud podceňována, a často se ekonomické problémy řešily zejména investicemi. [2]

1 SPECIFIKACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ

Ve strojírenské výrobě tvoří náklady na obrábění významnou část výrobních nákladů. Pro nastavení správného výrobního procesu je důležité určit faktory, které vstupují do výrobního procesu, protože jednotlivé faktory mají vliv na cenu výrobní operace. [3]

V této kapitole jsou identifikovány jednotlivé náklady a jejich faktory ovlivňující proces výroby.

Celkové operační náklady (obr. 1.1) jsou součtem všech dílčích operačních nákladů, do kterých patří mnoho složek.



Obr. 1.1 Celkové operační náklady a jejich členění

1.1 Náklady na jednotkovou práci

Náklady na jednotkovou práci jsou náklady vztažené na výrobu jednoho kusu dané součásti. Tyto náklady se dělí na náklady na jednotku strojní práce a náklady na jednotku vedlejší práce.

Náklady na jednotku strojní práce jsou závislé především na jednotkovém strojním času. Jednotkový strojní čas závisí na posuvové rychlosti při obrábění, počtu záběru ostří a délce obráběné součásti. Délka součásti je zvětšena o velikost náběhu a případně přeběhu.

Dalším důležitým faktorem jsou náklady na minutu strojní práce. Náklady na minutu práce se liší podle toho, na jakém stroji se bude proces obrábění uskutečňovat. Je zásadním rozdílem, jestli se při výrobě součásti pracuje na konvenčním stroji nebo CNC. Do této kategorie nákladů patří samozřejmě odpisy, náklady na údržbu stroje a náklady na energie.

Obecně se výpočet nákladů na jednotkovou strojní práci vyjádří z několika časů, do kterých patří čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci t_{A121} (činnosti, které vykonává pracovník během automatického chodu stroje, např. pozorování obráběcího cyklu, kontrola předchozího kusu, kontrolní měření), čas jednotkové práce strojně ruční t_{A131} (čas kdy hlavní řezný pohyb vykonává stroj a činnosti, které vykonává pracovník ručně) a čas jednotkové strojní práce t_{AS} .

Náklady na jednotku vedlejší práce souvisí s upínáním a odepínáním obrobku, upínáním a odepínáním nástroje, seřizováním nástroje do správné polohy,

měřením součástí. Tyto činnosti vyjadřuje čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci t_{A111} . Dále do této skupiny patří čas jednotkové práce nepravidelný t_{A102} (čas obsluhy, který se vyskytuje nepravidelně, např. seřízení opotřeбенých nástrojů a jejich výměna).

1.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu

Náklady na monolitní nástroje, které se přeastřují, zahrnují ve svém výpočtu náklady na přeastřování. Při použití VBD jsou náklady na jeden břit dány především cenou destičky.

Volba nástroje je velmi důležitá s ohledem na počet kusů, který bude tento nástroj schopen obrobit na jednu trvanlivost, tedy na jedno naostření až do konce své životnosti, která je součtem všech trvanlivostí.

Dalším důležitým faktorem pro výměnu nástroje je opotřebení, které způsobuje nepřesnost výroby a tudíž zmetky, v horším případě dojde ke zničení nástroje a poškození stroje.

1.3 Náklady na materiál

K výpočtu nákladů na materiál se využívá norma spotřeby materiálu. Materiál je jeden z nejdůležitějších činitelů pro zhotovení dané součásti. Při volbě materiálu polotovaru (v konstrukční přípravě) se zohledňuje velikosti přídavek pro obrábění, popřípadě na dělení materiálu. Čím jsou přídávky na obrábění větší, tím bude více odpadu (ztrát), které se projeví tím, že vyrobená součást bude dražší.

1.4 Režijní náklady

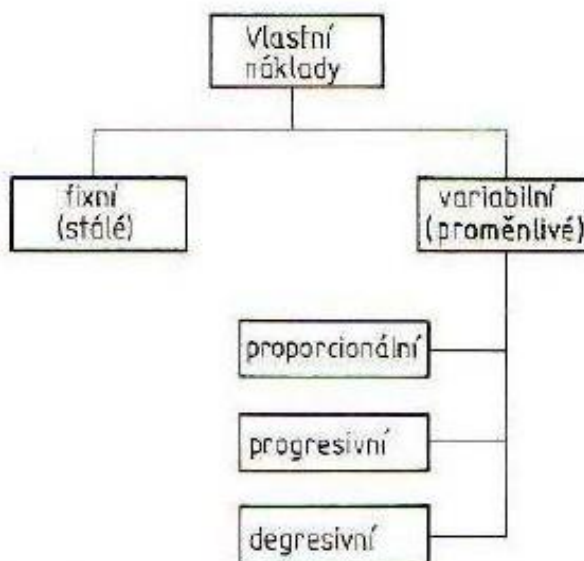
Na náklady se pohlíží z mnoha různých hledisek. Z hlediska rozkladu nákladů je důležitá analýza (střediskových) nákladů v podniku. Střediskové náklady jsou takové, které jsou spojeny s činností střediska a příliš se nemění v závislosti na využití dané kapacity a změnách v sortimentu vyráběných výrobků. Tyto náklady nejsou zcela konstantní. Aby bylo možné je lépe vyhodnocovat, je důležité se podívat na tuto problematiku z pohledu, jak se změny náklady při změně využití obrobených součástí. [2]

Z tohoto hlediska se člení režijní náklady na fixní (odpisy, mzdy technickohospodářských pracovníků, náklady na vytápění, osvětlení), které se nemění při kolísání výroby a variabilní (spotřeba materiálu, mzdy výrobních pracovníků), které jsou úměrné počtu vyrobených výrobků. [2, 4]

Po tomto zohlednění se členění režijních nákladů rozděluje do čtyř skupin: [2]

- přímé fixní,
- přímé variabilní,
- režijní (nepřímé) fixní,
- režijní (nepřímé) variabilní.

Rozdělení fixních a variabilních režijních nákladů (obr. 1.2) a průběh těchto nákladů (obr. 1.3).



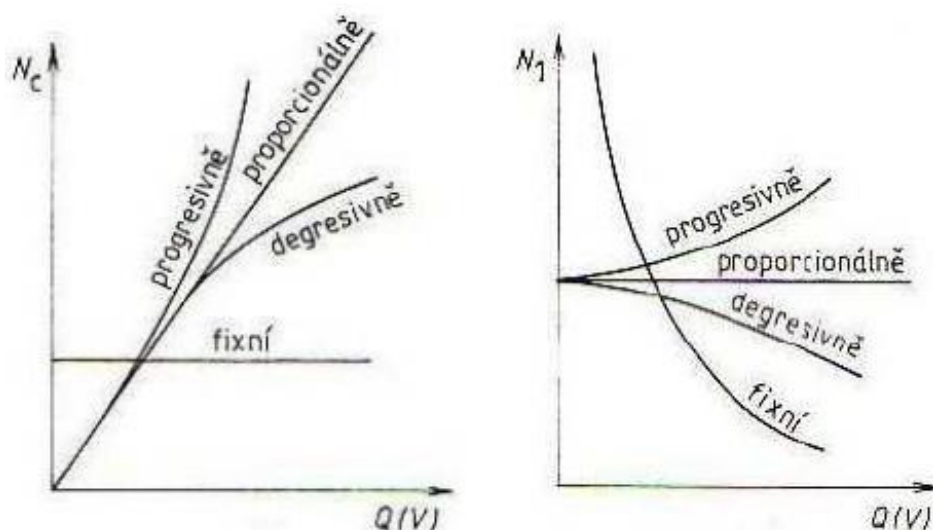
Obr. 1.2 Dělení nákladů na změnách výroby [4]

Pozn. Vlastní náklady jsou myšleny jako režijní náklady.

Variabilní (proměnné) náklady se mění s objemem produkce (jednicový materiál, jednicové mzdy): [5]

- proporcionální jsou přímo úměrné růstu výroby (zdražování energií, nástroje),
- progresivní růst způsoben tím, že nákladová položka roste rychleji než objem produkce,
- degresivní průběh způsoben pomalejším růstem nákladové položky než je objem produkce (snižování úvěrů).

Fixní (stálé náklady) se nemění s objemem aktivity (nájemné, úroky u úvěrů, odpisy strojů podle času). Tyto náklady se mění skokem při změně výrobní kapacity. [5]



Obr. 1.3 Trendy průběhů nákladů na jednotku výroby a průběh celkových nákladů na počtu kusů [4]

N_c [Kč] – celkové operační náklady
 N_j [Kč] - náklady na jednotku výroby
 Q [-] - počet kusů

Celkové operační náklady lze rozdělit podle jejich příslušnosti k produkovaným výkonům na přímé a nepřímé (režijní). [2]

Přímé náklady (přímý materiál, přímé mzdy, přímé nářadí) jsou ty, které se přímo přiřadí k danému výkonu (výrobku, službě). [2]

Za režijní náklady jsou označeny takové, které jsou společné pro více výkonů a nelze je jednoznačně přiřadit. Režijní náklady se často označují jako střediskové režijní náklady. Pro zlepšení ekonomických propočtů a optimalizace je zapotřebí podrobnějšího rozboru těchto nákladů. [2]

V podnicích se mohou vyskytovat určité rozdíly, zpravidla však k těmto režijním nákladům patří následující položky. [2]

Režijní materiál - Je veškerý spotřebovaný materiál, který nemá přímý vztah k materiálu výrobku. Tedy nejčastěji mazivo, technologické kapaliny (řezné kapaliny), ochranné pomůcky a další.

Nástroje a nářadí – Přípravky a nástroje, společné a univerzální nářadí nepatřící do hmotného investičního majetku, které nejsou určeny, jako speciální vybavení pro daný výrobek mají v tomto případě charakter přímého nákladu k danému výrobku.

Odpisy nehmotného a hmotného investičního majetku

Režijní mzdy - Mzdy režijních pracovníků, někdy také i mzdy všech pracovníků středisek, ve kterých jsou pracovníci placeni podle hodinového tarifu bez ohledu na množství odvedené práce.

Sociální a zdravotní pojištění - Je to procentní přírážka (pevná) k vyplaceným režijním mzdám.

Energie a plyny - Jedné se o plyny na svařování, pokud nejsou už zahrnuty v jiných položkách. Do nákladů na energie patří elektřina, zemní plyn a další.

Opravy a údržba - Obvykle nejsou tyto náklady vztaženy k jednotlivým obráběcím strojům.

Náklady prostoru - Náklady na plochu m^2 nebo na m^3 . Jsou dvě možnosti:

- **Pokud je prostor najat a není vlastní:** Nájemné, plus zvlášť další placené služby (teplo, energie, úklid).
- **Pokud je prostor vlastní:** Náklady na budovu (daň z nemovitosti, pojistné, údržba, opravy), společné energie, osvětlení, voda, teplo, náklady speciálního vybavení (dopravníky, jeřáby).

Nájemné (leasing) - Platby za pronajaté stroje a zařízení společného charakteru.

Ostatní služby - Náklady dalších nevýrobních a výrobních režijních služeb.

Školení a vzdělávání - Povinné kvalifikační kurzy (náklady na ně).

Odpad - Náklady na likvidaci odpadu (řezných kapalin)

Ostatní - Náklady na reklamace, režijní cestovné, náklady na zmetky a podobně.

2 KVANTIFIKACE SLOŽEK OPERAČNÍCH NÁKLADŮ

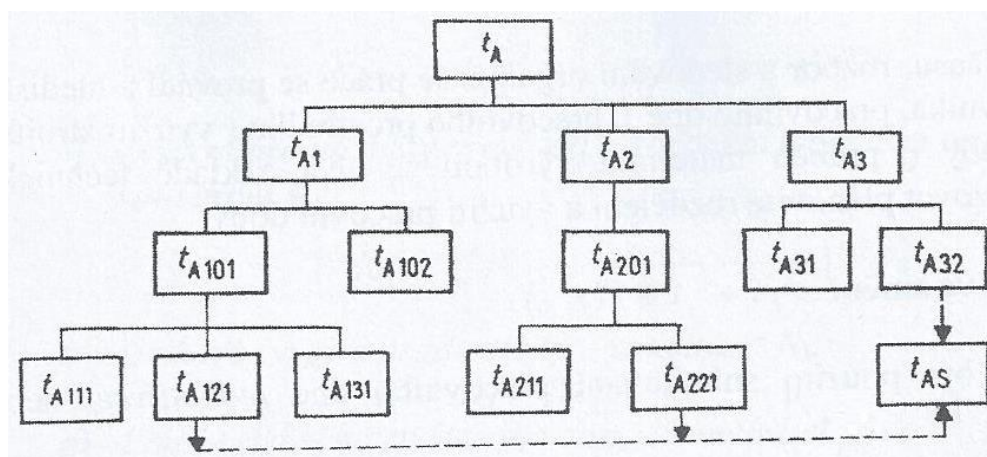
Operační náklady procesu obrábění se vyjádří na obrobení jednoho kusu dané součásti, přičemž základní složky jsou vztaženy k nákladům na strojní práci, vedlejší práci, na nástroj a jeho výměnu a k nákladům na materiál. Obecný postup je dále konkretizován na výrobu součásti, kdy je jedna plocha obráběna jedním nástrojem. [6]

2.1. Náklady na jednotkovou práci

Náklady na práci se dělí na náklady na strojní práci a náklady na vedlejší práci.

Při určování nákladů na práci je předpokládána jednostrojová obsluha.

Při kvantifikaci nákladů na práci se vychází z jednotkového času. Jednotkový čas t_A je čas potřebný pro zpracování každé jednotky produkce (ks, t, m, m^3). Je to čas činnosti i nečinnosti. Výpočet jednotkového času je dán vztahem (2.1), který vychází ze schématického obrázku (obr. 2.1). V uvedeném obrázku (obr. 2.1) jednotlivé symboly vyjadřují: [4, 7, 8]



Obr. 2.1 Typové schéma jednotkového času [7]

kde: t_A [min]	-	jednotkový čas
t_{A1} [min]	-	čas jednotkové práce
t_{A101} [min]	-	čas jednotkové práce pravidelné (pravidelně u každého obráběného kusu)
t_{A102} [min]	-	čas jednotkové práce nepravidelný (čas obsluhy, který se vyskytuje nepravidelně a zajišťuje průběh technologické operace, například seřízení opotřebovaných nástrojů a jejich výměna)
t_{A111} [min]	-	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci (upínání a odepínání obrobku, měření, obsluha stroje apod.)
t_{A121} [min]	-	čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci

		(činnosti, které vykonává pracovník během automatického chodu stroje, například pozorování obráběcího cyklu, kontrola předchozího kusu, kontrolní měření apod.)
t_{A131} [min]	-	čas jednotkové práce strojně ruční je čas kdy hlavní řezný pohyb vykonává stroj (rotace obrobku) a činnosti, které vykonává pracovník ručně (přísuv do řezu při soustružení)
t_{A2} [min]	-	jednotkový čas obecně nutných přestávek v operaci (čas na oddech u namáhavých prací, a podobně)
t_{A201} [min]	-	jednotkový čas obecně nutných přestávek (oddech)
t_{A211} [min]	-	jednotkový čas obecně nutných přestávek za klidu stroje (je nutná plná účast dělníka na provádění práce, není automatický chod stroje)
t_{A221} [min]	-	jednotkový čas obecně nutných přestávek za chodu stroje (čas, který pracovník může využít k oddechu a aktivnímu pozorování, protože je zde zabezpečen automatický chod stroje)
t_{A3} [min]	-	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek v (čas na ukončení cyklu stroje apod.)
t_{A31} [min]	-	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za klidu stroje (čas, kdy pracovník čeká např. na dovoz materiálu jeřábem)
t_{A32} [min]	-	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za chodu stroje (čas na ukončení pracovního cyklu stroje apod. a je závislý na počtu vyráběných jednic)
t_{AS} [min]	-	jednotkový strojní čas v operaci (zahrnuje všechny technologické časy, které jsou potřebné k uskutečnění procesu obrábění a jsou vykonávány automatickým chodem stroje)

Jednotkový čas je dán vztahem (2.1):

$$t_A = t_{A1} + t_{A2} + t_{A3} \quad (2.1)$$

Náklady na jednotkovou práci:

$$N_{Ap} = N_{ASp} + N_{AVp} \quad (2.2)$$

kde:	N_{Ap} [Kč]	-	náklady na jednotkovou práci
	N_{ASp} [Kč]	-	náklady na jednotkovou strojní práci
	N_{AVp} [Kč]	-	náklady na jednotkovou vedlejší práci

2.1.1 Náklady na jednotkovou strojní práci

Náklady na strojní práci jsou vyjádřeny jako součin nákladů na minutu strojní práce a jednotkového strojního času. Jednotkový strojní čas je přibližně stejně velký jako skutečný čas jednotkové strojní práce. Ve výsledku se náklady na strojní práci (2.3) výrazně neliší od skutečných nákladů na jednotkovou strojní práci (2.7).

Jednotkový strojní čas je čas potřebný pro obrobení jednoho kusu dané součásti. [6]

Obecně náklady na strojní práci a jednotkový strojní čas se vypočítá podle vztahu (2.3), (2.4). [6]

$$N_{Sp} = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad (2.3)$$

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad (2.4)$$

kde:	N_{Sp} [Kč]	-	náklady na strojní práci
	t_{AS} [min]	-	jednotkový strojní čas
	N_{sm} [Kč]	-	náklady na minutu strojní práce
	L [mm]	-	dráha nástroje ve směru posuvu
	v_f [mm.min ⁻¹]	-	posuvová rychlost

Při určení skutečných hodnot jednotkové strojní práce a nákladů na strojní práci se vychází z jednotkového času t_A . V této úvaze se nebude počítat s t_{A3} a t_{A2} , protože velikost těchto složek je ve většině případů zanedbatelná.

Tedy z této úvahy je vztah pro výpočet jednotkového času t_A : [8]

$$t_A = t_{A111} + t_{A121} + t_{A131} \quad (2.5)$$

Čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci t_{A121} v podstatě koresponduje, s jednotkovým strojním časem t_{AS} .

Dále pak vztah pro skutečný čas jednotkové strojní práce t_{ASp} je:

$$t_{ASp} = t_{A121} + t_{A131} + t_{AS} \quad (2.6)$$

kde:	t_{A111} [min]	-	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci (upínání a odepínání obrobku, měření, obsluha stroje apod.)
	t_{A121} [min]	-	čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci (činnosti, které vykonává pracovník během automatického chodu stroje, například pozorování obráběcího cyklu, kontrola předchozího kusu, kontrolní měření apod.)
	t_{A131} [min]	-	čas jednotkové práce strojně ruční je čas kdy hlavní

řezný pohyb vykonává stroj (rotace obrobku) a činnosti, které vykonává pracovník ručně (přísuv do řezu při soustružení)

t_{ASp} [min] - čas jednotkové strojní práce

t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas v operaci (zahrnuje všechny technologické časy, které jsou potřebné k uskutečnění procesu obrábění a jsou vykonávány automatickým chodem stroje)

Obecně platí, že $t_{ASp} > t_{AS}$.

Výpočet skutečných nákladů na jednotkovou strojní práci N_{ASp} :

$$N_{ASp} = t_{ASp} \cdot N_{sm} \quad (2.7)$$

kde: N_{ASp} [Kč] - náklady na jednotkovou strojní práci

t_{ASp} [min] - čas jednotkové strojní práce

N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce

Náklady na minutu strojní práce:

Náklady na minutu strojní práce N_{sm} se vyjádří pomocí hodinového režijního paušálu: [2]

$$N_{sm} = k_c \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \quad (2.8)$$

kde: N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce

k_c [-] - přírážka času směnového (8 až 10%)

M_o [Kč] - hodinové mzdové náklady na operátora

HRP_{SP} [Kč] - hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)

N_{hs} [Kč] - náklady na provoz stroje za hodinu

Hodinové náklady na provoz stroje N_{hs} : [2]

$$N_{hs} = O_s \cdot k_{us} + C_E \quad (2.9)$$

kde: O_s [Kč] - odpis stroje za hodinu

k_{us} [-] - koeficient oprav a údržby stroje

C_E [Kč] - cena spotřebovaných energií za hodinu

Odpis stroje za hodinu: [2]

$$O_s = \frac{C_{si}}{Z_s \cdot CFS_{EFPL} \cdot SM \cdot k_{vs}} \quad (2.10)$$

kde: C_{si} [Kč] - cena stroje plus náklady na instalaci stroje
 Z_s [rok] - životnost stroje
 CFS_{EFPL} [hod] - roční časový fond stroje při jedné směně
 SM [-] - směnnost
 k_{vs} [-] - koeficient časového využití stroje

Koeficient časového využití stroje je stanoven z dlouhodobého průměru, popřípadě z předpokladu o vytížení stroje. Pro různé typy výrob jsou přibližné hodnoty těchto koeficientů uvedeny v tabulce (tab. 2.1). Hodnoty uvedené v tabulce se mohou lišit od skutečných hodnot v podnicích. Koeficient časového využití stroje se významně podílí na výrobních nákladech. [2]

Koeficient oprav a údržby stroje k_{us} je dán podílem součtu předpokládané částky na opravy stroje a ceny stroje (údržbou stroje za dobu jeho životnosti a ceny stroje). [2]

Tab. 2.1. Koeficient časového využití stroje [2]

Druh výroby	k_{vs}
Hromadná a velkosériová výroba	0,8
Programově řízené stroje, obráběcí centra	0,65 až 0,75
Konvenční malosériová výroba	0,50 až 0,65

Jednotkový strojní čas je jednou z nejvýznamnějších složek, pro výpočet času jednotkové strojní práce a tedy i nákladů na jednotkovou strojní práci.

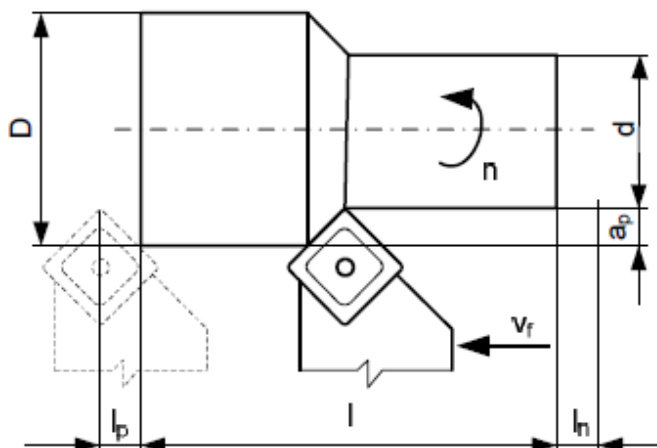
Stanovení jednotkového strojního času pro vybrané obráběcí operace

➤ Jednotkový strojní čas pro soustružení

U soustružení je nutné rozlišit jednotkový strojní čas pro plochy válcové, čelní a tvarové.

Soustružení válcové plochy

Soustružení válcové plochy je zobrazeno na (obr. 2.2)



Obr. 2.2 Vyjádření dráhy nástroje ve směru posuvu při obrábění válcové plochy přímým uběracím nožem [1]

Výpočet jednotkového strojního času válcové plochy se získá ze vztahů (2.11), (2.12) a (2.4) pro i počet odebíraných třísek vztah (2.13): [6, 7]

$$L = l_n + l + l_p \quad (2.11)$$

$$n = \frac{10^3 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (2.12)$$

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D \cdot i}{10^3 \cdot f \cdot v_c} \quad (2.13)$$

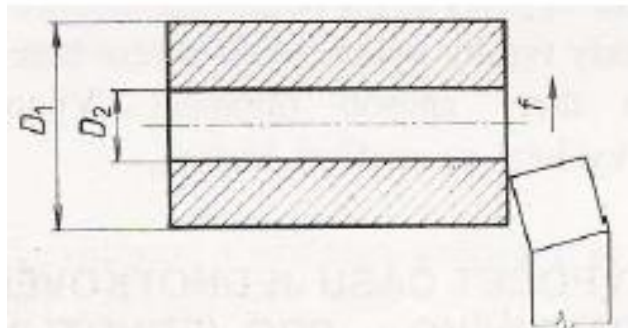
kde:	L [mm]	-	dráha nástroje ve směru posuvu
	l_n [mm]	-	délka náběhu
	l [mm]	-	obráběná délka
	l_p [mm]	-	délka přeběhu
	n [min^{-1}]	-	otáčky
	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	řezná rychlost
	D [mm]	-	průměr obrobku
	t_{AS} [min]	-	jednotkový strojní čas
	i [-]	-	počet záběrů
	v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	-	posuvová rychlost
	f [mm]	-	posuv na otáčku

Soustružení čelní plochy

Prakticky je možno soustružit čelní plochu při konstantních otáčkách nebo při konstantní řezné rychlosti.

a) Konstantní otáčky obrobku

Při tomto způsobu se mění řezná rychlost v závislosti na průměru (obr. 2.3). Pro i počet záběrů je jednotkový strojní čas vyjádřen vztahem (2.14). [4, 6]



Obr. 2.3 Soustružení čelní plochy při konstantních otáčkách [4]

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot i}{2 \cdot n \cdot f} = \frac{[(D_1 + 2 \cdot l_n) - (D_2 + 2 \cdot l_p)] \cdot i}{2 \cdot n \cdot f} \quad (2.14)$$

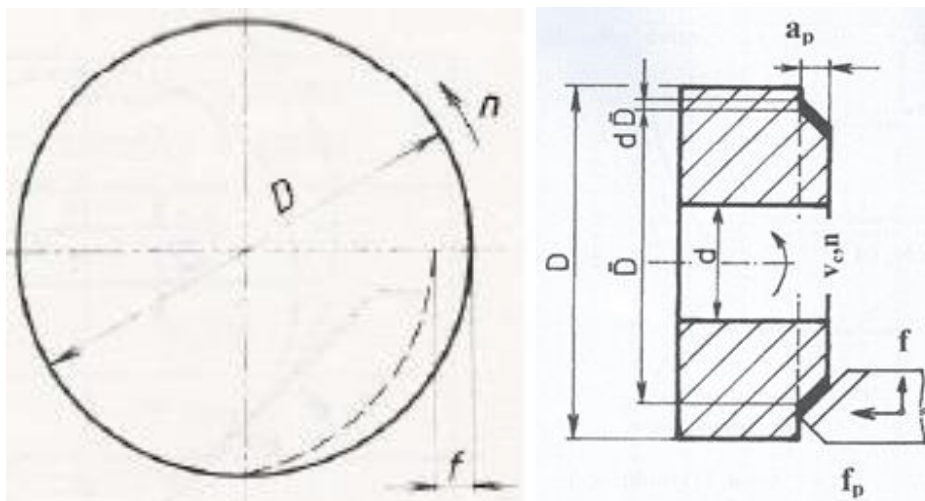
kde: D_1 [mm] - maximální průměr

D_2 [mm] - minimální průměr

Při upichovacích operacích nebo při zarovnání čel v celém průměru se neuvažuje malý průměr D_2 , proto $D_2 = 0$.

b) Konstantní řezná rychlost

Jednotkový strojní čas vychází z přibližné délky Archimédovy spirály. Tato spirála odpovídá dráze nože na čelní ploše (obr. 2.4). [4, 7]



Obr. 2.4 Soustružení čelní válcové plochy konstantní řeznou rychlostí [4, 7]

Jelikož je jednotkový strojní čas závislý na ujeté dráze nástroje, je potřeba vybrat na čelní ploše element průměru $\bar{D}$ a poté je možno určit element jednotkového strojního času dt_{AS} k obrobení plochy (2.15). [7]

$$dt_{AS} = \frac{d\bar{D}}{2 \cdot f \cdot n} = \frac{\bar{D}d\bar{D}}{2} \cdot \frac{\pi}{10^3 \cdot v_c \cdot f} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \cdot \bar{D} \cdot d\bar{D} \quad (2.15)$$

Pro obdržení celkového času t_{AS} soustružení čelní plochy je nutno vztah pro element jednotkového strojního času (2.15) integrovat od průměru D do průměru d (2.16). [7]

$$t_{AS} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \int_d^D \bar{D} \cdot d\bar{D} = \frac{\pi}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \left[\frac{\bar{D}^2}{2} \right]_d^D = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad (2.16)$$

kde: dt_{AS} [min] - element jednotkového strojního času

$d\bar{D}$ [mm] - element obráběného průměru

Při srovnání jednotkového strojního času pro oba způsoby obdržíme jednodušší vztah (2.17): [7]

$$\frac{t_{ASn}}{t_{ASv}} = \frac{\frac{\pi \cdot D \cdot (D - d)}{2 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f}}{\frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4 \cdot f \cdot 10^3 \cdot v_c}} = \frac{2 \cdot D \cdot (D - d)}{(D - d) \cdot (D + d)} = \frac{2 \cdot D}{D + d} \quad (2.17)$$

Při upichování nebo soustružení celého čela, kdy $d = 0$ pak platí vztah (2.18): [7]

$$t_{ASn} = 2 \cdot t_{ASv} \quad (2.18)$$

kde: t_{ASn} [min] - jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček

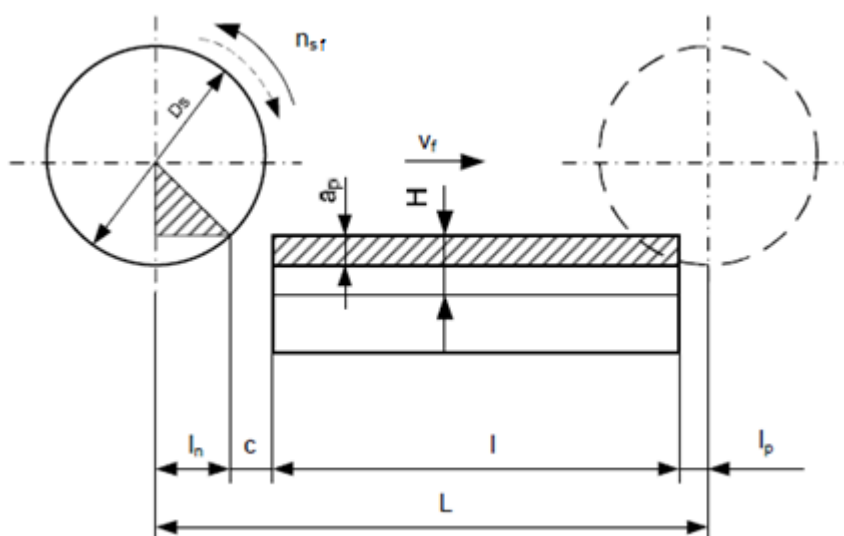
t_{ASv} [min] - jednotkový strojní čas při konstantní řezné rychlosti

➤ **Jednotkový strojní čas pro frézování**

Frézování se provádí dvěma základními způsoby a to frézování čelem nástroje a obvodem nástroje. Každý z těchto způsobů má jiný způsob výpočtu jednotkového strojního času. Vztahy pro jednotlivé způsoby jsou vyjádřeny následovně:

Frézování obvodem

Je prováděno kotoučovou, tvarovou nebo frézovací hlavou. Obvodové frézování je zobrazeno na (obr. 2.5).



Obr 2.5 Zobrazení dráhy nástroje pro frézování obvodem [1]

Výpočet jednotkového strojního času t_{AS} a dráhy nástroje L je dán následujícími vztahy: [7]

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \cdot i \quad (2.19)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_{sf}}{10^3} \quad (2.20)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n_{sf} \quad (2.21)$$

$$L = l + l_n + l_p + c \quad (2.22)$$

$$l_n = \sqrt{H \cdot (D_s - H)} \quad (2.23)$$

$$i = \frac{H}{a_p} \quad (2.24)$$

Vzdálenost přeběhu l_p je 1 až 2 mm. [7]

Po dosazení jednotlivých vztahů (2.19) až (2.24) se získá výsledný vzorec pro jednotkový strojní čas obvodového frézování (2.25). [7]

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot (l_n + l + l_p + c)}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} \quad (2.25)$$

kde: D_s [mm] - průměr frézy
 c [mm] - bezpečnostní náběh 1 až 2
 v_c [m.min⁻¹] - řezná rychlost
 f_z [mm] - posuv nástroje na zub

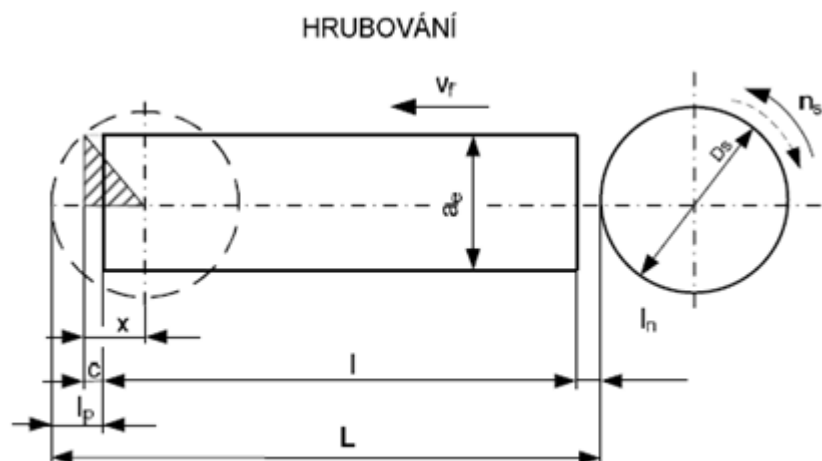
$z [-]$	-	počet zubů frézy
$v_f [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	-	posuvová rychlost
$H [\text{mm}]$	-	celkový přídavek na obrábění
$a_p [\text{mm}]$	-	hloubka záběru
$n_{sf} [\text{min}^{-1}]$	-	frekvence otáček frézy

Čelní frézování

Výpočet jednotkového strojního času pro čelní frézování je stejný jako při frézováním obvodovém, liší se pouze v délce náběhu l_n a délce přeběhu l_p .

a) Souměrné frézování

Pro souměrné čelní frézování nahrubo (obr. 2.6) se vychází ze vztahu (2.11).



Obr. 2.6 Souměrné frézování čelní frézou – hrubování [1]

$a_e [\text{mm}]$ – šířka frézované plochy

Délka náběhu $l_n = 2$ až 10 mm a bezpečnostní přeběh $c = 1$ až 2 mm . [7]

$$L = l_n + l + l_p \quad (2.11)$$

Délka přeběhu se pak určí ze vztahu (2.26). [7]

$$l_p = \frac{D_s}{2} - x + c = \frac{D_s}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_s^2 - a_e^2} + c \quad (2.26)$$

Hodnota x se určí z Pythagorovy věty: [7]

$$x = \frac{1}{2} \sqrt{D_s^2 - a_e^2} \quad (2.27)$$

Při hrubovacím frézování není potřeba přejíždět celou frézou obráběnou plochu.

U obrábění na čisto se projíždí celá obráběná plocha, a proto se délka přeběhu vypočítá podle vztahu (2.28). Hodnota c je totožná s předchozí hodnotou c jako u hrubování. Hodnota l_p se poté dosadí do vztahu (2.11).

Délka přeběhu: [7]

$$l_p = D_s + c \quad (2.28)$$

b) Nesouměrné frézování

Rozdíl mezi souměrným a nesouměrným frézování je ten, že u nesouměrného frézování (obr. 2.7) je osa nástroje vychýlena od osy nástroje o hodnotu e . Hodnoty c a l_n jsou totožné jako u frézování souměrného.

Přeběh nástroje při hrubování je dán vztahem (2.29) a poté se tento vztah dosadí do základního vzorce (2.11).

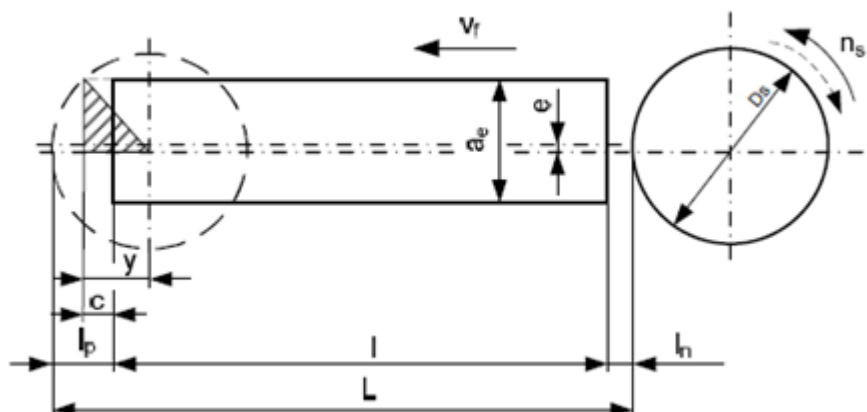
Přeběh při frézování nahrubo: [7]

$$l_p = \frac{D_s}{2} - y + c \quad (2.29)$$

Z Pythagorovy věty se získá hodnota y : [7]

$$y = \sqrt{\frac{D_s}{4} - \left(\frac{D_s}{2} - x\right)^2} \quad (2.30)$$

HRUBOVÁNÍ



Obr. 2.7 Zobrazení dráhy nástroje pro nesouměrné frézování – hrubování [1]

Při nesouměrném frézování obrábění načisto se délka přeběhu změní výpočtově na hodnotu: [7]

$$l_p = D_s + c \quad (2.31)$$

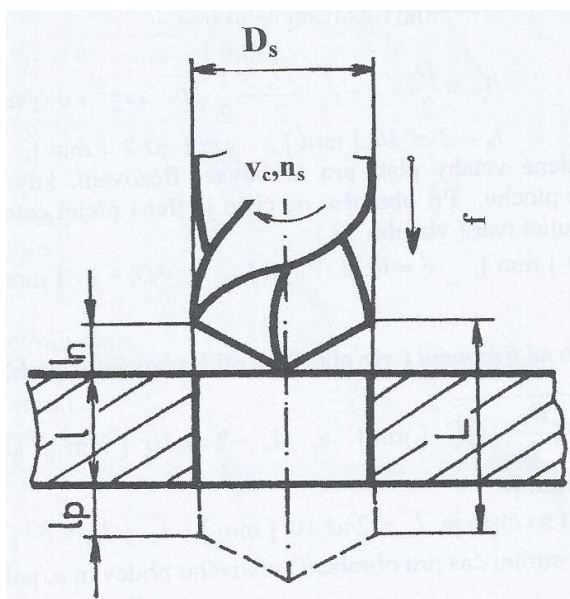
Jednotkový strojní čas pro obrobění celkového přídávku pro nesouměrné a souměrné čelní frézování je následující: [7]

$$t_{AS} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot L}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} = \frac{\pi \cdot D_s \cdot (l_n + l + l_p)}{10^3 \cdot v_c \cdot f_z \cdot z} \cdot \frac{H}{a_p} \quad (2.32)$$

Vztah (2.32) platí pro případ, že povrch se obrobí na jedno projetí $a_e \leq D_s$, pokud je povrch obroben na více projetí pak je potřeba tento vztah vynásobit počtem projetí.

➤ Jednotkový strojní čas pro vrtání

Vrtání je zobrazeno na (obr. 2.8).



Obr. 2.8 Zobrazení dráhy při vrtání díry [7]

Jednotkový strojní čas a délky náběhu a přeběhu pro vrtání se určí podle: [4, 7]

$$t_{AS} = \frac{L}{f \cdot n_s} = \frac{\pi \cdot (l + l_n + l_p)}{10^3 \cdot v_c \cdot f} \quad (2.33)$$

$$l_n = \frac{D_s}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{180 - \varepsilon_r}{2}\right) \approx \frac{D_s}{2} \cdot \operatorname{tg} \kappa_r \quad (2.34)$$

Délka přeběhu $l_p = 1$ až 2 mm, úhel špičky vrtáku je v rozmezí 118° až 120° , úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r \approx 30^\circ$. [7]

Pro neprůchozí díry a zahlubování je velikost přeběhu $l_p = 0$ mm.

Pro zahlubování, vyhrubování a vystružování je velikost náběhu $l_n = 1$ až 2 mm.

Pro řezání závitů je velikost náběhu l_n roven délce náběhového kužele závitníku v hodnotách $+1$ až 2 mm. [7]

2.1.2 Náklady na jednotkovou vedlejší práci

Do nákladů na vedlejší práci N_v patří měření součásti, upínání a odepínání obrobku. Z uvedených případů vyplývá, že vřeteno stroje je v klidu.

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} \quad (2.35)$$

$$t_{AVp} = t_{A111} + t_{A102} \quad (2.36)$$

kde: N_{AVp} [Kč] - náklady na jednotkovou vedlejší práci
 t_{AVp} [min] - čas jednotkové vedlejší práce

N_{vm} [Kč]	-	náklady na minutu vedlejší práce
t_{A111} [min]	-	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci (upínání a odepínání obrobku, měření, obsluha stroje apod.)
t_{A102} [min]	-	čas jednotkové práce nepravidelný (čas obsluhy, který se vyskytuje nepravidelně a zajišťuje průběh technologické operace, například seřízení opotřeбенých nástrojů a jejich výměna)

Náklady na minut vedlejší práce se přibližně rovnají nákladům na minutu strojní práce. Ve skutečnosti jsou náklady na strojní práci o něco vyšší. [6]

$$N_{vm} \approx N_{sm} \quad (2.37)$$

kde: N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce

2.2 Náklady na nástroj a jeho výměnu

Řezné podmínky, geometrie nástroje, řezné prostředí, materiál nástroje i obrobku a další faktory mají vliv na opotřebení nástroje a tím i náklady na nástroj a jeho výměnu.

Řezný nástroj je charakterizován řezivostí. Řezivost je vlastnost řezného materiálu, která vyjadřuje jeho vhodnost k řezání.

Obrobitelnost je vlastnost obráběného materiálu, která vyjadřuje jeho vhodnost k obrábění. Teoreticky existuje absolutní obrobitelnost, která zahrnuje fyzikální a chemické vlastnosti materiálu a pomocí jejich hodnot je určena vhodnost k obrábění. Kvůli obtížnému stanovení se absolutní obrobitelnost nepoužívá. V praxi se používá relativní obrobitelnost. Při této obrobitelnosti se zkoumá vhodnost materiálu k obrábění vzhledem k etalonu. Index obrobitelnosti se stanoví jako podíl parametrů zkoušeného materiálu (obrobku) k etalonu. Nejčastěji se používá kinetická obrobitelnost (podíl řezných rychlostí při stejné trvanlivosti), dynamická obrobitelnost (podíl řezných sil) a nakonec mikrogeometrická obrobitelnost (srovnání jakostí obrobených ploch). Etalon je nejčastěji využívaný materiál ze skupiny materiálů (Tab. 2.2). [6, 9]

Tab. 2.2 Členění skupin materiálů [9]

Skupina	Popis skupiny
a	Litiny
b	Oceli
c	Těžké neželezné kovy a jejich slitiny (Cu a jeho slitiny)
d	Lehké neželezné kovy a jejich slitiny (Al a jeho slitiny)

Náklady na nástroj a jeho výměnu jsou závislé především na trvanlivosti nástroje a řezných podmínkách.

Vztah (2.38) vyjadřuje náklady na nástroj a jeho výměnu N_{nv} . [6]

$$N_{nv} = f(N_T, Z_v) = N_T \cdot Z_v \quad (2.38)$$

$$Z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau \quad (2.39)$$

$$\tau = \frac{l}{L} \leq 1 \quad (2.40)$$

kde: N_T [Kč]	-	náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
Z_v [-]	-	počet výměn břitů nebo ostření nástroje, vztažený na obrobení jednoho kusu
T [min]	-	trvanlivost
τ [-]	-	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
l [mm]	-	délka obráběné součásti
L [mm]	-	dráha nástroje ve směru posuvu

2.2.1 Opotřebení, trvanlivost břitu nástroje a životnost

Trvanlivost břitu nástroje, životnost a opotřebení mají významný vliv na počet výměn nástroje a tedy i nákladech.

Opotřebení řezného nástroje

Všechny strojní součásti se v průběhu své funkční činnosti opotřebovávají. V průběhu procesu obrábění má relativní pohyb mezi nástrojem-obrobkem a nástrojem-třískou za následek vývin velkého množství tepla na čele a hřbetě nástroje. Toto teplo značně namáhá materiál nástroje.

Obrábění je v podstatě proces plastické deformace, která probíhá za extrémních podmínek (teplot, tlaků a deformačních rychlostí).

V průběhu řezného procesu je břit nástroje vystaven působení fyzikálních a chemických vlivů, jejímž důsledkem je změna tvaru nástroje a jakosti plochy.

Použité zdroje: [6, 9, 10, 11, 12, 13]

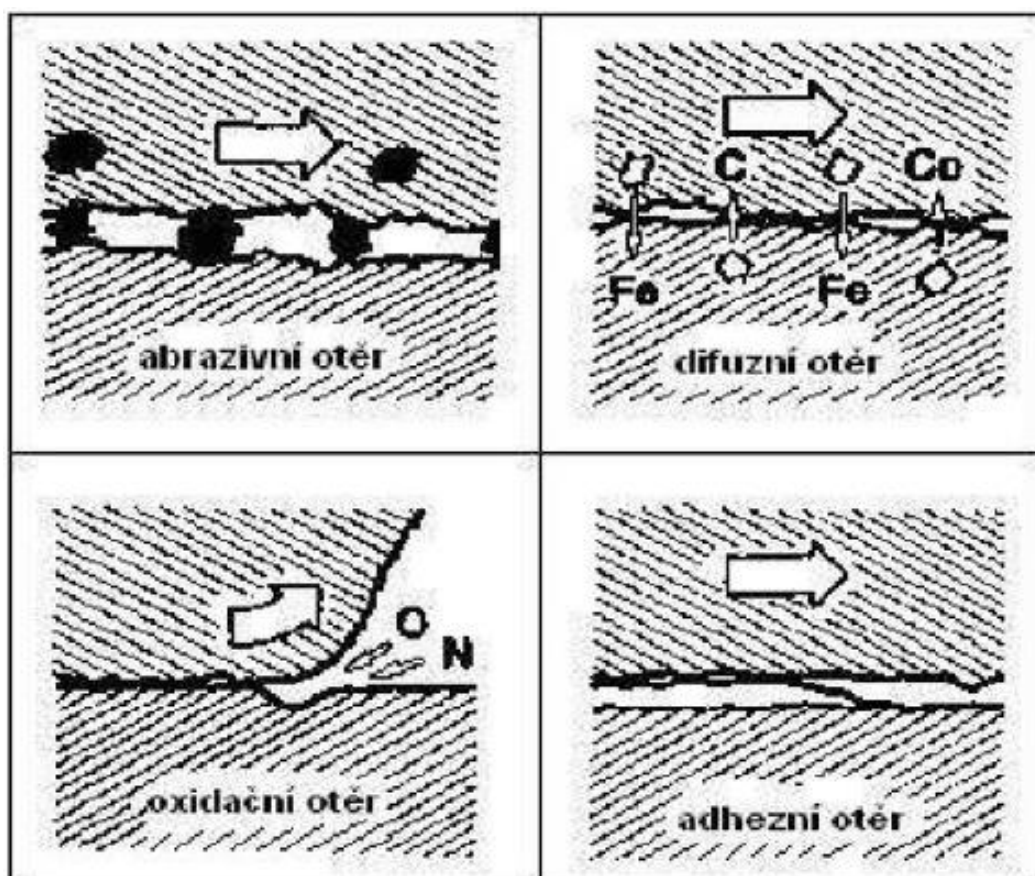
Základní mechanismy opotřebení nástroje:

- Abraze (obrušování) je způsobena mikročásticemi obráběného materiálu, které jsou tvrdší než určité složky materiálu břitu. K abrazi dochází nejčastěji u nástrojů z uhlíkové a HSS oceli a SK. Intenzita otěru závisí na velikosti abrazivních částic. (obr. 2.9)

- Adheze (adhezní otěr) se objevuje nejčastěji na čele nástroje a vzniká při nízkých teplotách. U tohoto opotřebení vzniká nejčastěji nárůstek mezi břitem nástroje a třískou, dále vznikají *mikro svary*. Příčinou je intenzivní místní plastická deformace materiálu nástroje a obrobku v místě styku. Na intenzitu tohoto otěru má vliv chemická příbuznost materiálu nástroje a třísky, pracovní prostředí a jeho chemická aktivita, řezné podmínky a teplota v místě styku. Tento jev se nejčastěji vyskytuje u uhlíkových a nástrojových ocelí.
- Difuze (difuzní otěr) vzniká působením chemických vlivů. Pro vznik a průběh difuzního opotřebení mají vliv chemická vlastnosti nástroje a jeho afinita k materiálu obrobku. Difuzní otěr dochází tehdy, když teplota v místě styku nástroje a třísky umožňuje průběh difuzních pochodů. Objevuje se při teplotách nad 680 °C při obrábění ocelí. Nejvíce k tomuto otěru dochází u SK.
- Oxidace je v podstatě způsobuje vznik chemických sloučenin v důsledku přítomnosti kyslíku v prostředí na povrchu nástroje.

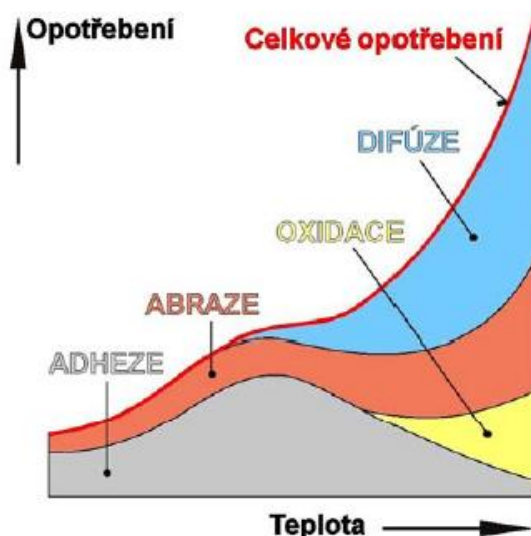
Adheze a abraze se řadí mezi fyzikální jevy, zatímco difuze a oxidace se řadí mezi jevy chemické.

Použité zdroje: [6, 9, 10, 12, 13]

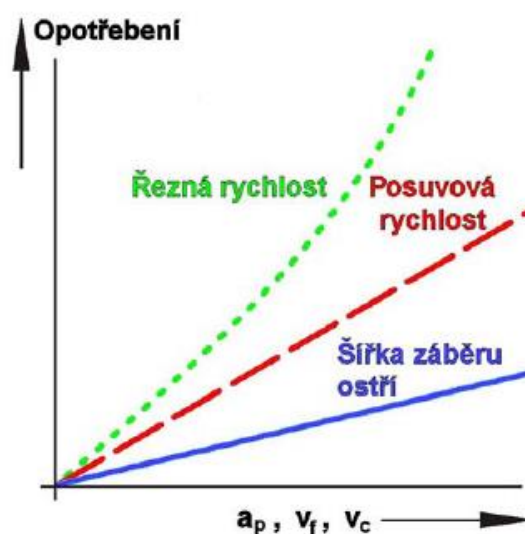


Obr. 2.9 Zobrazení základních mechanismů opotřebení [6]

Vliv řezných podmínek a teploty na opotřebení je zobrazen na obrázku (obr. 2.10) a (obr. 2.11).



Obr. 2.10 Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení [12]



Obr. 2.11 Trendy vlivů řezných podmínek na opotřebení [12]

Formy opotřebení

Opotřebení bříty nabývá různých forem v závislosti na technologických podmínkách. Jednotlivé formy jsou uvedeny v (tab. 2.3).

- Opotřebení hřbetu je jedním v nejčastějších způsobů opotřebení VBD. Vzniká na ploše hřbetu hlavního ostří, vedlejšího ostří a poloměru špičky v důsledku styku nástroje s materiálem obrobku v průběhu procesu obrábění. Toto opotřebení má abrazivní charakter. Příliš velké opotřebení má za následek nepřesnost rozměrů, zhoršení jakosti povrchu a zvyšující se tření, které vzniklo při změně geometrie bříty nástroje.
- Opotřebení čela ve tvaru žlábků je způsobeno difúzním opotřebením a abrazí. Úběr materiálu nástroje je způsoben tvrdými částicemi v materiálu obrobku. Difúze vzniká hlavně v místě styku s nejvyšší teplotou tedy v místě, kde je nástroj v kontaktu s třískou. Snížení tendence vzniku toho opotřebení lze dosáhnout tvrdostí za tepla a malou afinitou mezi materiály obrobku a bříty nástroje. Při obrábění měkčích materiálů je vzniklý výmol mělký a širší než u tvrdších obráběných materiálů, kde vzniká úzký a hluboký žlábek.
- Opotřebení hřbetu ve tvaru vrubu patří do skupiny adhezního a oxidačního opotřebení. V místě kontaktu bříty s bokem třísky vznikají vruby. Utváření třísky ovlivňuje opotřebení hřbetu.
- Plastická deformace bříty nastává, když teplota na hraně bříty dosáhne hodnoty, která způsobí plastický stav. K tomuto dochází u materiálů se špatnou teplotní vodivostí. Může vzniknout lavinové opotřebení ve svém nejnejpříznivějším důsledku.

- Křehké porušení břitu (křehký lom) nastává, je-li břit otupen na tolik, že při dalším obrábění dojde k vylomení části břitu, nebo v případě mikrotrhlin na čele nástroje.

Výrazný vliv má způsob zatěžování:

- tepelné rázy,
- mechanické rázy,
- změna průřezu třísek,
- přerušovaný řez.

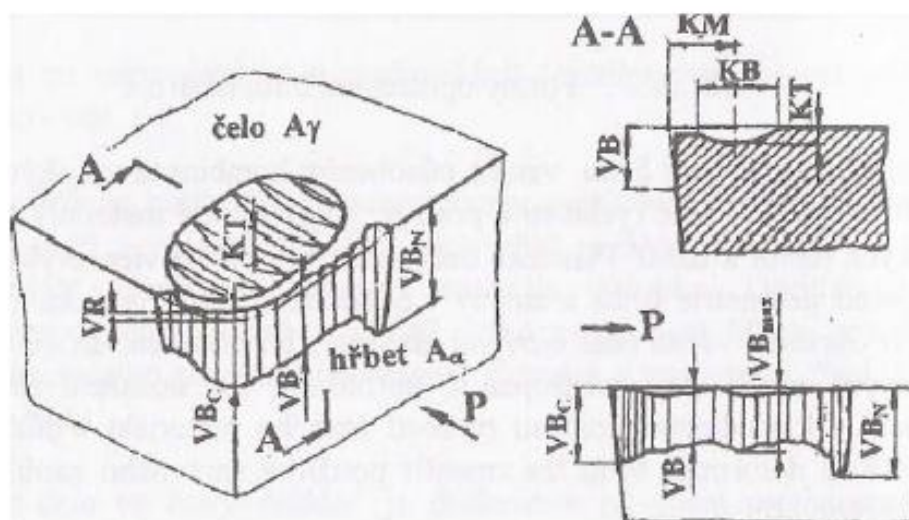
Použité zdroje: [6, 9, 10, 14]

Tab. 2.3 Formy opotřebení břitu nástroje [15]

Opotřebení hřbetu	
Žlábkové opotřebení na čele	
Tvorba nárůstku	
Vrubové opotřebení hlavního hřbetu	
Oxidační rýha na vedlejším hřbetu	
Plastická deformace břitu	
Hřebenovité trhliny	
Křehké porušování břitu	
Destrukce břitu	

Časový průběh opotřebení a kvantifikace opotřebení

Opotřebení bříty je významný parametr, který se kvantifikuje rozměrovými charakteristikami vztaženými k postupnému opotřebovávání bříty nástroje. Měřením na mikroskopických zařízeních a následným vyhodnocením se kvantifikují parametry opotřebení. Jednotlivé plochy kvantifikující míru opotřebení jsou zobrazeny na (obr. 2.12): [4, 6]



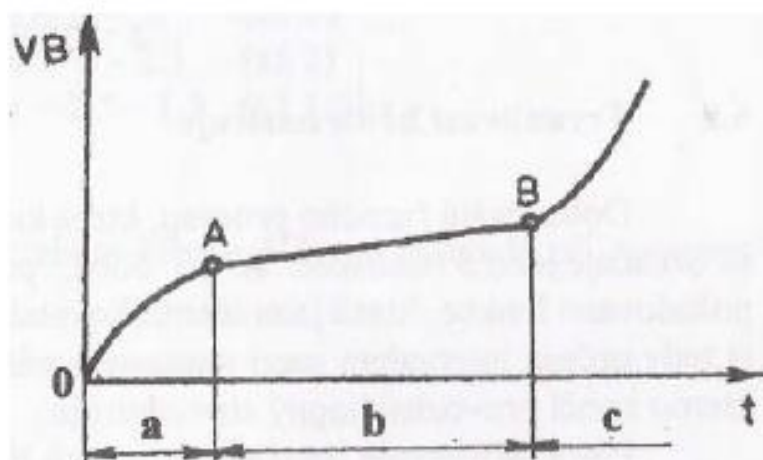
Obr. 2.12 Parametry opotřebení bříty a jeho označení [6]

kde:

VB	-	průměrné opotřebení hřbetu
VBC	-	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
VBN	-	vrubové opotřebení hřbetu
VB _{max}	-	maximální opotřebení hřbetu
KT	-	hloubka žlábků opotřebení čela
KB	-	šířka žlábků opotřebení čela
KM	-	poloha středu žlábků opotřebení čela
VR	-	radiální opotřebení špičky

Nový nebo přestříhaný nástroj, který je zapojený do procesu řezání se začíná opotřebovávat v důsledku rezného procesu. Opotřebení bříty se nejčastěji uvádí ve tvaru závislosti $VB=f(t)$, nebo $KT=f(t)$, protože konstrukce průběhových map A_α a A_γ je velmi náročný problém. V závislosti $VB=f(t)$, znamená t čas procesu řezání. [4, 6]

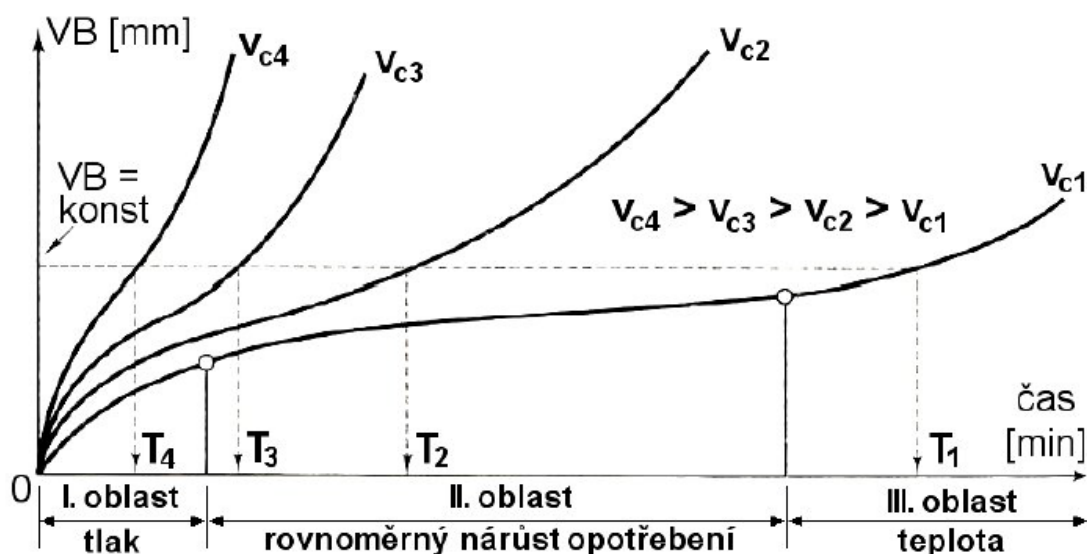
Obecný průběh závislosti $VB=f(t)$ znázorňuje obrázek (obr. 2.13).

Obr. 2.13 Průběh závislosti $VB=f(t)$ [6]

- a) oblast zrychleného záběhového opotřebení
 b) oblast lineárního opotřebení s konstantní intenzitou
 c) oblast zrychleného nadměrného opotřebení

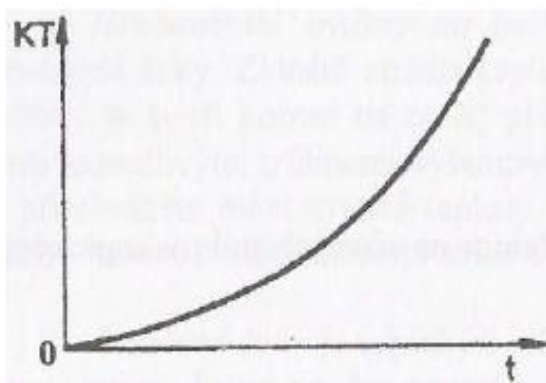
- Oblast zrychleného záběhového opotřebení je způsobena vysokým měrným tlakem na mikronerovnosti povrchu hřbetu, které byly způsobeny přeostržením nástroje, respektive při výrobě nástroje. [6, 9]
- Oblast lineárního opotřebení s konstantní intenzitou je způsobena nárůstem lineárního opotřebení (intenzita lineárního opotřebení je konstantní). [6, 9]
- Oblast zrychleného nadměrného opotřebení – zde nastává lavinové opotřebení. Zde dochází k výraznému poklesu tvrdosti a dosažení limitní teploty. [6, 9]

Opotřebení nabývá různých hodnot pro různé hodnoty řezné rychlosti. Vliv řezné rychlosti v závislosti $VB=f(t)$ znázorňuje obrázek (obr. 2.14).



Obr. 2.14 Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti [12]

Na obrázku (obr. 2.15) je zobrazen charakteristický průběh $KT=f(t)$, kde je značný nárůst opotřebení způsoben přestupem tepla do nástroje, za současného zvětšování plochy styku mezi třískou, kopírující žlábek a žlábkem. [6]



Obr. 2.15 Průběh závislosti $KT=f(t)$ [6]

Životnost nástroje je definována jako součet trvanlivostí nebo jako doba funkce nástroje od zařazení do činnosti až po jeho vyřazení. Vyřazení nástroje se provádí až po opotřebení všech břitů u VBD nebo odbroušení funkční části u přebroušovaných nástrojů. Životnost přebroušovaného nástroje znázorňuje vztah (2.41). [6, 9, 12]

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x+1) \cdot T = (x+1) \cdot C_T \cdot v_c^{-m} \quad (2.41)$$

- kde: T_i [min] - trvanlivost jednotlivých ostří destičky
 x [-] - počet možných ostření nástroje
 T [min] - trvanlivost nástroje (aritmetický průměr hodnot T_i)
 C_T [-] - konstanta
 m [-] - exponent z Taylorova vztahu

Pozn. Uvažuje se, že po každém ostření se trvanlivost mění v úzkém rozmezí (je to náhodná veličina, která může kolísat).

Životnost pro nástroj s mechanicky upínanými vyměnitelnými břitovými destičkami se stanoví: [12]

$$Z = \sum_{i=1}^q T_i = q \cdot T = q \cdot C_T \cdot v_c^{-m} \quad (2.42)$$

- kde: T_i [min] - trvanlivost jednotlivých ostří destičky
 q [-] - počet použitelných ostří destičky
 T [min] - trvanlivost nástroje (aritmetický průměr hodnot T_i)

$C_T [-]$	-	konstanta
$m [-]$	-	exponent z Taylorova vztahu

Trvanlivost je doba, po kterou je nástroj schopen splňovat požadované funkce, které jsou dány příslušnými parametry. Obecně je to interval mezi nasazením nástroje do řezného procesu po vznik poruchy, která ukončí provozuschopnost nástroje.

Poruchy nástroje mohou být náhlé (vylomení břitu) nebo postupné (opotřebení nástroje).

Z kritéria ukončení provozuschopnosti nástroje se můžou stanovit parametry opotřebení břitu nástroje, úchylka rozměru obrobené plochy, jakost povrchu, velikost řezné síly a další.

Trvanlivost nástroje je závislá na metodě obrábění, řezných podmínkách, vlastnostech obráběného materiálu. Největší vliv z řezných podmínek má řezná rychlost. [6, 9, 12]

Trvanlivost se vyjádří obecně z T - v_c závislosti Taylorova vztahu (2.43): [6, 9, 12]

$$T = f(v_c) = C_T \cdot v_c^{-m} = \frac{C_T}{v_c^m} \quad (2.43)$$

kde: $C_T [-]$	-	konstanta
$v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	-	řezná rychlost
$m [-]$	-	exponent z Taylorova vztahu

Tento zápis je nepraktický, jelikož $C_T = 10^9 \div 10^{13}$, proto se uvádí vztah (2.44). [9, 12]

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad (2.44)$$

kde: $C_v [-]$	-	konstanta ($C_v = C_T^{1/m}$, velikost konstanty řádově je C_v $10^2 \div 10^3$)
----------------	---	--

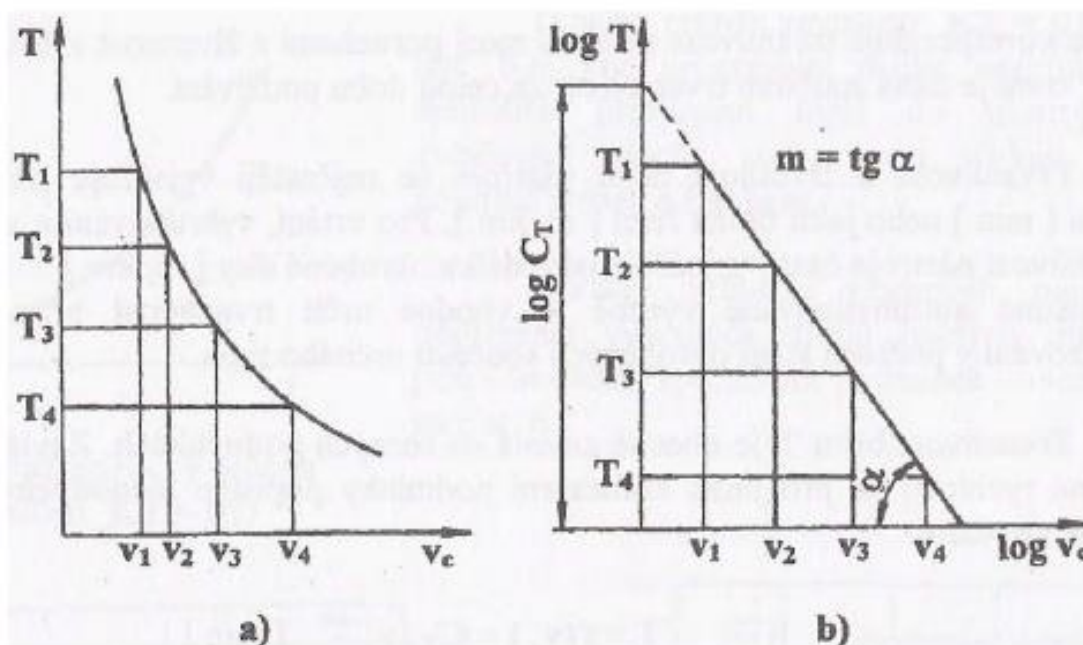
Vztah mezi konstantami C_v a C_T je podle (2.45): [13]

$$C_v = C_T^{1/m} \quad (2.45)$$

Velikost exponentu m charakterizuje vlastnosti řezného materiálu: [6, 9]

- NO (nástrojové oceli) $m = 10 \div 8$ (až 6)
- RO (rychlořezné oceli) $m = 8 \div 5$ (až 3)
- SK (slinuté karbidy) $m = 5 \div 2,5$ (až 2)
- ŘK (řezné keramika) $m = 2,5 \div 1,5$ (až 1,2)

Při zvolených řezných rychlostech se stanoví trvanlivost bříty pro kritické opotřebení VB_k . Zobrazení zvolených rychlostí je na obrázku (obr. 2.16).



Obr. 2.16 Průběh závislosti $T=f(v_c)$ [6]

a) lineární souřadnice

b) logaritmické souřadnice

Z obrázku (obr. 2.16) je zřejmé, že Taylorův vztah lze odvodit z rovnice přímky zapsané ve směnicovém tvaru (2.46). [9]

$$y = ax + b$$

$$\log T = \operatorname{tg} \alpha \cdot \log v_c + \log C_T \quad (2.46)$$

$$T = v_c^{-m} \cdot C_T$$

Podmínkami platnosti uvedených obecných vztahů $T-v_c$ závislosti jsou: [16]

- hloubka záběru ostří $a_p = \text{konst}$,
- posuv na otáčku $f = \text{konst}$,
- opotřebení $VB = \text{konst}$,
- chlazení, mazání, stroje, stav polotovaru a další = konst.

V praktickém životě se uplatňuje upravený Taylorův vztah, kde je zahrnut posuv, hloubka řezu a stanovená trvanlivost (2.47) místo obecného vztahu (2.43) a (2.44). [16]

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \quad (2.47)$$

kde: v_{cT} [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] - řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost

$C_{VT} [-]$	-	konstanta pro stanovenou trvanlivost
$a_p [mm]$	-	šířka záběru
$f [mm]$	-	posuv na otáčku
$x_v [-]$	-	exponent
$y_v [-]$	-	exponent

Upravený Taylorův vztah (2.47) lze dále zobecnit tak, že se vezme v úvahu opotřebení, trvanlivost a řada dalších konstant (multiplikačních). [16]

$$v_{cT} = \frac{C_{v1} \cdot VB^n}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} \cdot \prod_{i=1}^n K_{vci} \quad (2.48)$$

kde:

$$\prod_{i=1}^n K_{vci} = k_{vc1} \cdot k_{vc2} \cdot k_{vc3} \cdot \dots \cdot k_{vcn} \quad (2.49)$$

Jednotlivé koeficienty představují vliv stavu polotovaru, druhu řezu, třídy obrobitelnosti, fyzického stavu stroje, řezného prostředí, geometrie nástroje a další vlivy. [16]

Optimální trvanlivost břitu nástroje při minimálních výrobních nákladech

Tato varianta trvanlivosti se počítá v případě, je-li požadované vyrábět při nejnižších výrobních nákladech na jeden vyrobený kus.

Výpočet vychází z celkových operačních nákladů na obrobení jednoho kusu: [16, 17]

$$N_c = N_s + N_{nv} + N_v \quad (2.50)$$

Pro obecný výpočet se vztah (2.50) pro celkové operační náklady vyjádří následovně: [6, 18]

$$N_c = f(T) = K_{TN1} \cdot T^{\frac{1}{m}} + N_v + K_{TN2} \cdot N_T \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (2.51)$$

kde: $N_c [Kč]$	-	celkové operační náklady
$N_s [Kč]$	-	náklady na strojní práci
$N_{nv} [Kč]$	-	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus
$N_v [Kč]$	-	náklady na vedlejší práci

Jednotlivé složky celkových operačních nákladů jsou vyjádřeny obecně a jejich konstanty jsou uvedeny pro výpočet podélného soustružení válcové plochy.

Náklady na strojní práci N_s po dosazení za (2.3) a (2.13): [6]

$$N_s = K_{TN1} \cdot T^{\frac{1}{m}} \quad (2.52)$$

kde:

$$K_{TN1} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot N_{sm}}{f \cdot 10^3 \cdot C_T^{\frac{1}{m}}} \quad (2.53)$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu se stanoví ze vztahů (2.38), (2.39), (2.40) a (2.13): [6]

$$N_{nv} = K_{TN2} \cdot T^{\left(\frac{1}{m-1}\right)} \quad (2.54)$$

kde:

$$K_{TN2} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \tau}{f \cdot 10^3 \cdot C_T^{\frac{1}{m}}} \quad (2.55)$$

Po dosazení jednotlivých složek do základního vztahu (2.50) se provede derivace podle proměnné T a položením dané derivace rovno nule se získá hodnota optimální trvanlivosti řezného nástroje pod kritéria minimálních výrobních nákladů. [6, 18]

$$N_c = N_s + N_{nv} + N_v \quad (2.50)$$

$$N_c = f(T) = K_{TN1} \cdot T^{\frac{1}{m}} + N_v + K_{TN2} \cdot N_T \cdot T^{\left(\frac{1}{m-1}\right)} \quad (2.51)$$

$$\frac{dN_c}{dT} = K_{TN1} \cdot \frac{1}{m} \cdot T^{\frac{1}{m}-1} + 0 + K_{TN2} \cdot N_T \cdot \left(\frac{1}{m-1}\right) \cdot T^{\left(\frac{1}{m-1}-1\right)} = 0 \quad (2.56)$$

Po úpravě a dosazení konstant je optimální trvanlivost bříty nástroje pro kritérium minimálních výrobních nákladů: [6, 18]

$$T_{optN} = \frac{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T}{N_{sm}} \quad (2.57)$$

- kde:
- m [-] - exponent z Taylorova vztahu
 - τ [-] - poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
 - N_T [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
 - N_{sm} [Kč] - náklady na minutu strojní práce

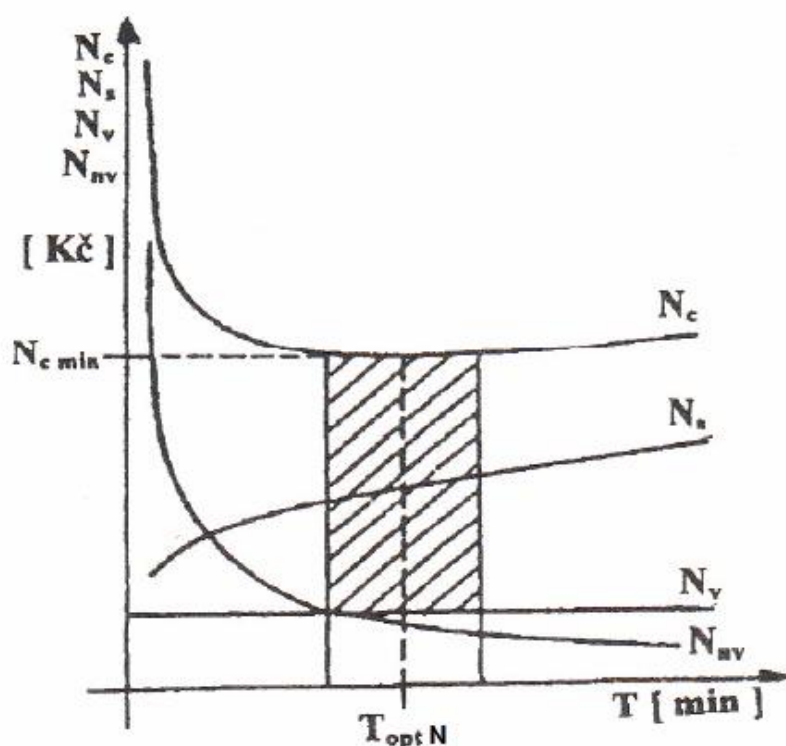
Častěji se vztah pro optimální trvanlivost bříty nástroje pro kritérium minimálních výrobních nákladů vyjadřuje pomocí nákladů na hodinu strojní práce. [6, 16, 17]

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{N_{hs}} \tau \cdot (m-1) \quad (2.58)$$

- kde:
- N_T [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost

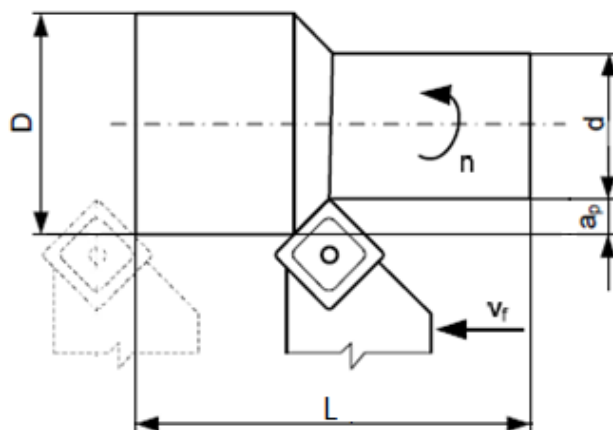
- τ [-] - poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
 m [-] - exponent z Taylorova vztahu
 N_{hs} [Kč] - náklady na provoz stroje za hodinu

Na obrázku (obr. 2.17) jsou zobrazeny jednotlivé náklady v závislosti na trvanlivosti. Z tohoto obrázku je vidět, že při snižujících se nákladech na nástroj a jeho výměnu a zvyšujících se nákladů na strojní práci, lze dosáhnout optimální hodnoty operačních výrobních nákladů v závislosti na trvanlivosti.



Obr. 2.17 Obecný průběh závislostí $N_c, N_s, N_v, N_{nv} = f(T)$ a identifikace $T_{opt N}$ [17]

Přepočet optimální trvanlivosti pro kritérium minimálních výrobních nákladů (2.58) na relativní dráhu nástroje vůči obrobku při soustružení (obr. 2.18).



Obr. 2.18 Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu [1]

Čas vlastního obráběcího procesu t_{oP} pro soustružení vnější válcové plochy se vyjádří (2.59) podobně jako jednotkový strojní čas, přičemž se délka náběhu a přeběhu neuvažuje.

$$t_{oP} = \frac{L}{v_f} \quad (2.59)$$

Za předpokladu rovnosti optimální trvanlivosti a času obráběcího procesu (2.60) se stanoví optimální (relativní) dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu (2.62):

$$T_{optN} = t_{oP} \quad (2.60)$$

$$\frac{60 \cdot N_T}{N_{hs}} \cdot \tau \cdot (m-1) = \frac{L}{v_f} \quad (2.61)$$

$$\frac{60 \cdot N_T \cdot \tau \cdot (m-1) \cdot v_f}{N_{hs}} = L_{optN} \quad (2.62)$$

kde: t_{oP} [min] - čas obráběcího procesu
 L_{optN} [mm] - optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium minimálních výrobních nákladů

Optimální trvanlivost břitu nástroje při maximální výrobě

U tohoto kritéria se požaduje, aby (operační) čas jednotkové práce t_{A0} (2.63) potřebný k vyrobení jednoho kusu součástky byl co nejkratší, a zároveň se požaduje dosažení maximální výrobnosti. V tomto případě nejde o získání minimálních nákladů.

Operační čas jednotkové práce pro optimalizaci nákladů při maximální výrobě: [6, 16, 17, 18]

$$t_{A0} = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.63)$$

kde: t_{A0} [min] - operační čas jednotkové práce
 t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas
 t_{AV} [min] - jednotkový vedlejší čas
 t_{AX} [min] - čas jednotkové nepravidelné obsluhy (je totožný s t_{A102})
 Q_T [-] - počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje

Pro obecné řešení se základní vztah (2.63) pro operační čas jednotkové práce upraví:

$$t_{A0} = f(T) = K_{TV} \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_{AV} + K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \quad (2.64)$$

Jednotlivé složky operačního času jednotkové práce jsou vyjádřeny obecně a jejich konstanta je vyjádřena pro soustružení válcové plochy.

Čas na nástroj a jeho výměnu pro soustružení válcové plochy: [6, 16, 18]

$$t_N = \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.65)$$

$$Q_T = \frac{T}{\tau \cdot t_{AS}} = \frac{10^3 \cdot f \cdot C_T^{\frac{1}{m}}}{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D} \cdot T^{\left(1 - \frac{1}{m}\right)} \quad (2.66)$$

$$\frac{t_{AX}}{Q_T} = \frac{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot t_{AX}}{10^3 \cdot f \cdot C_T^{\frac{1}{m}}} \cdot T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)} \quad (2.67)$$

Obecný vztah pro čas na nástroj a jeho výměnu (2.68): [6, 16]

$$\frac{t_{AX}}{Q_T} = K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)} \quad (2.68)$$

Optimální trvanlivost břitu nástroje pro kritérium maximální výrobnosti vychází ze vztahu (2.63). Tento vztah se vyjádří jako funkce trvanlivosti T, provede se matematická operace derivace a položí se rovno nule. Jednotkový vedlejší čas se chová při derivaci jako konstanta, proto je roven nule.

$$t_{A0} = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.63)$$

$$t_{A0} = f(T) = K_{TV} \cdot T^{\frac{1}{m}} + t_{AV} + K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)} \quad (2.64)$$

kde:

$$K_{TV} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{f \cdot 10^3 \cdot C_T^{\frac{1}{m}}} \quad (2.69)$$

$$\frac{dt_{A0}}{dT} = \frac{1}{m} K_{TV} \cdot T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)} + 0 + \left(\frac{1}{m} - 1\right) \cdot K_{TV} \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot T^{\left(\frac{1}{m} - 2\right)} = 0 \quad (2.70)$$

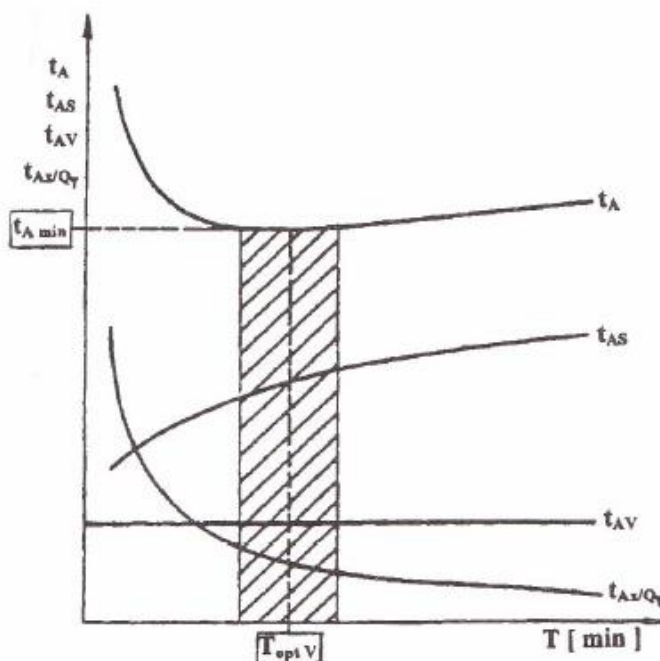
Po úpravě funkce $t_{A0}=f(T)$ se získá vztah pro optimální trvanlivost při maximální výrobnosti: [16, 17, 18]

$$T_{optV} = (m - 1) \cdot \tau \cdot t_{AX} \quad (2.71)$$

- kde: m [-] - exponent z Taylorova vztahu
 τ [-] - poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy
 t_{AX} [min] - čas jednotkové nepravidelné obsluhy

Obrázek (obr. 2.19) vyjadřuje grafické znázornění operačních časů v závislosti na trvanlivosti.

Při snižujícím se času nepravidelné obsluhy (resp. počtu kusů za jednu trvanlivost nástroje) a zvyšujícím se jednotkovém strojním času lze dosáhnout optimální trvanlivost nástroje pro kritérium maximální výrobnosti.



Obr. 2.19 Obecný průběh závislostí t_A , t_{AS} , t_{AV} , $t_{AX}/Q_T = f(T)$ a identifikace T_{optV} [17]

Optimální (relativní) dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro soustružení vnější válcové plochy pro kritérium maximální výrobnosti L_{optV} (2.74) se stanoví obdobně jako pro kritérium minimálních výrobních nákladů.

$$T_{optV} = t_{oP} \quad (2.72)$$

$$(m-1) \cdot \tau \cdot t_{AX} = \frac{L}{V_f} \quad (2.73)$$

$$(m-1) \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot V_f = L_{optV} \quad (2.74)$$

kde: t_{oP} [min] - čas obráběcího procesu
 L_{optV} [mm] - optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium maximální výrobnosti

2.2.2 Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost

Náklady na nástroj jsou součtem složek nákladů na jednu trvanlivost nástroje a jeho výměnu (2.75). Náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost břitu lze vyjádřit pro různé nástroje různými způsoby (viz. dále). [19]

Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost N_T :

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} \quad (2.75)$$

kde: N_{Tn} [Kč] - náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost

N_{Tv} [Kč] - náklady na jednu výměnu nástroje

Náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost

Náklady na provoz nástroje se vztahují na jednu trvanlivost řezného nástroje. Jsou to takové náklady, které jsou závislé na době, po kterou nástroj dokáže pracovat s danou přesností (trvanlivostí) než je potřeba jej vyměnit za nový.

a) Náklady na celistvý nástroj, který se přeostrňuje

Náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeostrňuje, znázorňuje následující vztah: [20]

$$N_{1pno} = \frac{C_{pn} + z_o \cdot N_o}{z_o \cdot T} \quad (2.76)$$

kde: N_{1pno} [Kč.min⁻¹]- náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeostrňuje

C_{pn} [Kč] - cena pořízení nástroje

z_o [-] - počet možných přeostržení nástroje

N_o [Kč] - náklady na závislé na počtu ostření nástroje

T [min] - trvanlivost nástroje

Náklady na nástroj vztažené na jednu trvanlivost pro celistvé nástroje: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_n - C_{zn}}{z_o + 1} + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (2.77)$$

kde: N_{Tn} [Kč] - náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu

C_n [Kč] - cena nástroje

C_{zn} [Kč] - zbytková cena nástroje

z_o [-] - počet možných přeostržení nástroje

t_{os} [min] - čas ostření nástroje

k_c [-] - přírážka času směnového (8 až 10%)

M_{os} [Kč] - mzdové náklady na ostříče za hodinu

HRP_{os} [Kč] - režijní paušál ostřírny za hodinu

Z tohoto vztahu (2.77) po úpravě je výsledný vztah pro celistvý nástroj, který se přeostrňuje: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_n - C_{zn}}{Z_o + 1} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{60} \right) \cdot \frac{Z_o}{Z_o + 1} \quad (2.78)$$

kde:	N_{Tn} [Kč/ks]	-	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu, při obrobení jedné součásti
	C_n [Kč]	-	cena nástroje
	C_{zn} [Kč]	-	zbytková cena nástroje
	Z_o [-]	-	počet možných přeostržení nástroje
	t_{AS} [min]	-	jednotkový strojní čas
	T [min]	-	trvanlivost nástroje
	t_{os} [min]	-	čas ostření nástroje
	k_c [-]	-	přirážka času směnového (8 až 10%)
	M_{os} [Kč]	-	mzdové náklady na ostříče za hodinu
	HRP_{os} [Kč]	-	režijní paušál ostřírny za hodinu

b) Náklady na nástroj s VBD

Náklady na jednu minutu provozu nástroje s jedním břitem vyjadřuje tento vztah: [20]

$$N_{1pn} = \frac{C_{pn}}{T} \quad (2.79)$$

kde:	N_{1pn} [Kč.min ⁻¹]	-	náklady na jednu minutu provozu nástroje
	C_{pn} [Kč]	-	cena pořízení nástroje
	T [min]	-	trvanlivost nástroje

U toho výpočtu je předpoklad, že na VBD je pouze jeden břit, přičemž vstupními hodnotami pro výpočet je cena pořízení nového nástroje a jeho trvanlivost.

Za předpokladu, že nástroj má více břitů je pak vztah na výpočet jedné minuty provozu nástroje: [20]

$$N_{1pnv} = \frac{C_{pn}}{Z_b \cdot T} \quad (2.80)$$

kde:	N_{1pnv} [Kč.min ⁻¹]	-	náklady na jednu minutu provozu nástroje s více břity
	C_{pn} [Kč]	-	cena pořízení nástroje
	Z_b [-]	-	počet břitů na destičce

T [min] - trvanlivost nástroje

Náklady na nástroj s VBD, které se nepřeostřují, znázorňuje následující vztah: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{Z_u} \quad (2.81)$$

kde: C_d [Kč] - cena břitové destičky
 Z_d [-] - počet břitových destiček na nástroji
 Z_b [-] - počet břitů na destičce
 S_b [-] - součinitel využití břitových destiček
 k_{ut} [-] - koeficient údržby tělesa nástroje
 C_{tn} [Kč] - cena tělesa nástroje
 Z_u [-] - předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje

Z předchozích vztahů se pak výsledný vztah pro výpočet nákladů na provoz nástroje vztažených na jednu trvanlivost pro výrobu jedné součásti se vypočítá: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{Z_u} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \quad (2.82)$$

kde: N_{Tn} [Kč/ks] - náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu, při obrobení jedné součásti
 C_d [Kč] - cena břitové destičky
 Z_d [-] - počet břitových destiček na nástroji
 Z_b [-] - počet břitů na destičce
 S_b [-] - součinitel využití břitových destiček
 t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas
 T [min] - trvanlivost nástroje
 k_{ut} [-] - koeficient údržby tělesa nástroje
 C_{tn} [Kč] - cena tělesa nástroje
 Z_u [-] - předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje

Přibližné hodnoty konstant tohoto vztahu udává tabulka (tab. 2.4).

Jedná se o statistické údaje. Součinitel využití břitových destiček je ovlivněn technologickou kázní, poškozením nového břitu, který není v záběru odcházející třískou, křehkými lomy destiček, apod. Počet upnutí je dán náhodným poškozením tělesa nástroje, koeficient údržby tělesa nástroje zahrnuje náhradní díly nástroje. [2]

Tab. 2.4 Tabulka konstant pro vztah (2.82) a další [2]

Podmínky obrábění	z_u	s_b	k_{ut}
Lehké	400 až 600	0,95	0,05
Střední	200 až 400	0,90	0,025
Těžké	200	0,80	0,40
Velmi těžké	100	0,70	0,60

c) Náklady na nástroj s VBD, který se přestřuje

Pokud je možno břitovou destičku z hlediska geometrie přestřovat (ve velmi speciálních případech) a není povlakovaná je vztah pro její přestření následující: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d \cdot z_o}{z_b \cdot s_b \cdot (z_o + 1)} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{100} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (2.83)$$

Po úpravě jsou náklady na provoz nástroje (VBD, který se přestřuje) vztažené na jednu trvanlivost, při obrobení jedné součásti: [2]

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d \cdot z_o}{z_b \cdot s_b \cdot (z_o + 1)} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} \cdot \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau + t_{os} \cdot k_c \cdot \left(\frac{M_{os}}{60} + \frac{HRP_{os}}{100} \right) \cdot \frac{z_o}{z_o + 1} \quad (2.84)$$

kde: N_{Tn} [Kč/ks] - náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost břitu, při obrobení jedné součásti

z_d [-] - počet břitových destiček na nástroji

z_o [-] - počet možných přestření nástroje

z_b [-] - počet břitů na destičce

C_d [Kč] - cena břitové destičky

C_{tn} [Kč] - cena tělesa nástroje

M_{os} [Kč] - mzdové náklady na ostříče za hodinu

HRP_{os} [Kč] - režijní paušál ostřírny za hodinu

t_{os} [min] - čas ostření nástroje

k_c [-] - přírážka času směnového (8 až 10%)

M_{os} [Kč] - mzdové náklady na ostříče za hodinu

HRP_{os} [Kč] - režijní paušál ostřírny za hodinu

T [min] - trvanlivost nástroje

t_{AS} [min] - jednotkový strojní čas

Náklady na výměnu nástroje

Náklady na výměnu nástroje se skládají z nákladů na výměnu nástroje za minutu a času potřebného na jeho výměnu. Náklady na výměnu nástroje se také mohou vyjádřit pomocí hodinového režijního paušálu (2.86). [2]

$$N_{TV} = t_{vn} \cdot N_{vnm} \quad (2.85)$$

kde: N_{TV} [Kč] - náklady na jednu výměnu nástroje
 t_{vn} [min] - čas na výměnu nástroje
 N_{vnm} [Kč] - náklady na výměnu nástroje za minutu

$$N_{vnm} = k_c \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{O_s}{60} \quad (2.86)$$

kde: k_c [-] - přírážka času směnového (8 až 10%)
 M_s [Kč] - mzdové náklady na seřizovače za hodinu
 HRP_{SP} [Kč] - hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)
 O_s [Kč] - odpis stroje za hodinu

2.3 Náklady na materiál

Až 50% celkových výrobních nákladů tvoří u většiny výrobků cena materiálu a proto je rozhodující ve struktuře výrobních nákladů. Z tohoto hlediska je důležité hospodárně využívat materiál. [7]

Náklady na materiál vztažené na jeden polotovar je dán vztahem (2.87): [8, 19]

$$N_{mat} = N_m \cdot C_{mat} - z_m \cdot C_{vžš} \quad (2.87)$$

kde: N_{mat} [Kč] - náklady na materiál vztažené na jeden polotovar
 N_m [kg] - norma spotřeby materiálu
 C_{mat} [Kč] - cena materiálu za kilogram
 z_m [kg] - celkové jednotkové ztráty materiálu při výrobě součástí obráběním
 $C_{vžš}$ [Kč] - cena výkupu železného šrotu za kilogram

Normy spotřeby materiálu se využívají zejména k výpočtu výrobních nákladů a ke stanovení materiálně technického zásobování. Normu spotřeby materiálu lze stanovit pomocí dvou metod. Norma spotřeby materiálu se stanoví na základě statistických záznamů o spotřebě materiálu při výrobě tvarově podobných součástek nebo s pomocí metody, která vychází z propočtu jednotlivých částí tzv. rozborově propočtová metoda. [7, 19]

2.3.1 Norma spotřeby materiálu

Norma spotřeby materiálu je podkladem pro stanovení plánu materiálně technického zásobování a pro výpočet výrobních nákladů. [7]

Norma spotřeby materiálu z přířezu

Polotovary z tyčového materiálu (přířezy) se získávají dělením na pilkách, soustruzích a dalších zařízeních.

Norma spotřeby materiálu přířezu: [7, 8]

$$N_m = Q_s + Z_m \quad (2.88)$$

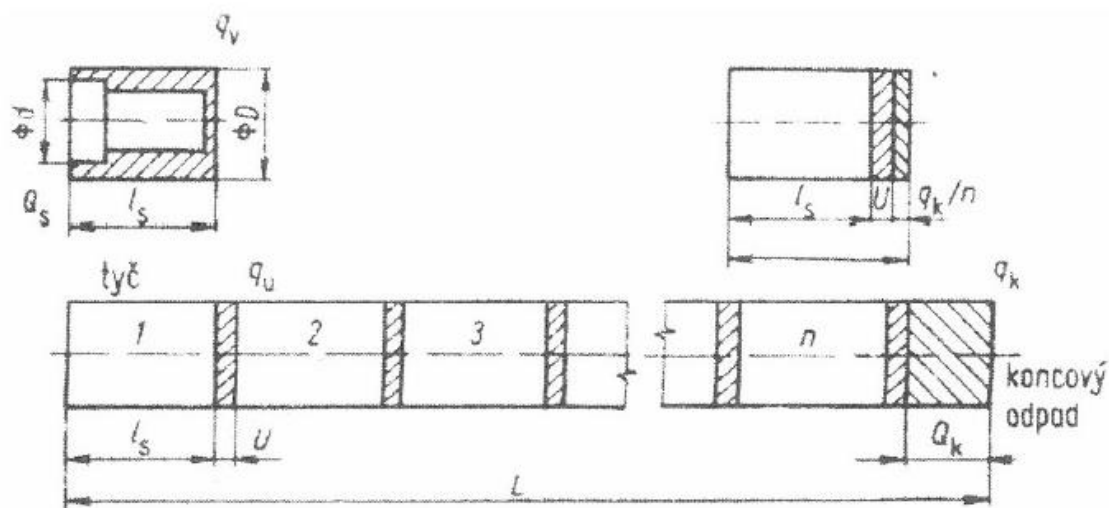
kde: Q_s [kg] - čistá jednotková hmotnost součástky
 Z_m [kg] - celkové jednotkové ztráty při výrobě součásti obráběním

Celkové ztráty při výrobě součásti obrábění jsou popsány vztahem (2.89): [7, 8]

$$Z_m = q_o + q_u + q_k \quad (2.89)$$

kde: q_o [kg] - jednotkové ztráty vzniklé obráběním polotovaru
 q_u [kg] - jednotkové ztráty vzniklé dělením tyčového materiálu
 q_k [kg] - jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče

Obrázek (obr. 2.20) zobrazuje ztráty materiálu polotovaru z přířezu tyče.



Obr. 2.20 Ztráty materiálu polotovaru z přířezu tyče [7]

Ztráty vzniklé z konce tyče: [7, 19]

$$q_k = \frac{Q_k}{n_p} \quad (2.90)$$

kde: Q_k [kg] - jednotková hmotnost nevyužitého konce tyče
 n_p [ks] - počet přířezů z tyčového materiálu

Ztráty vzniklé obráběním: [7, 8]

$$q_o = Q_p - Q_s \quad (2.91)$$

kde: Q_p [kg] - jednotková hmotnost polotovaru
 Q_o [kg] - jednotková hmotnost hotové součástky

Počet přířezů z tyčového materiálu je celé číslo, které se počítá ze vztahu (2.92). [19]

$$n_p = \frac{L_T}{l_s + U_c} \quad (2.92)$$

kde: n_p [ks] - počet přířezů z tyčového materiálu
 L_T [mm] - celková délka děleného tyčového materiálu
 l_s [mm] - délka polotovaru
 U_c [mm] - šířka řezného nástroje

Norma spotřeby materiálu pro zápustkové výkovky

Výchozí materiál pro kování se získá dělením tyčí kruhového nebo obdélníkového průřezu.

Hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu: [7, 8]

$$Q_c = Q_v + q_{op} + q_v \quad (2.93)$$

kde: Q_c [kg] - hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
 Q_v [kg] - jednotková hmotnost výkovku
 q_{op} [kg] - jednotkové ztráty opalem při ohřevu
 q_v [kg] - jednotkový odpad materiálu z výronku

Hodnoty q_{op} a q_v jsou: [7, 8]

- ztráta opalem $q_{op} = 2,5$ až $3,0\%$ Q_v ,
- ztráta materiálu z výronku q_v :
 - pro hmotnosti 1 až 5 kg je výronek maximálně 20% Q_v ,
 - pro hmotnosti větší jak 5 kg je výronek maximálně 15% Q_v .

Norma spotřeby materiálu pro výkovek: [7, 8]

$$N_m = Q_c + q_u + q_k \quad (2.94)$$

kde: N_m [kg] - norma spotřeby materiálu
 Q_c [kg] - hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
 q_u [kg] - jednotkové ztráty vzniklé dělením tyčového materiálu

q_k [kg] - jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče

Normy spotřeby materiálu pro odlitky

Při výpočtu normy spotřeby materiálu u odlitků je důležité dávat pozor při rozlišování jednotlivých ztrát, aby se nezapočítali některé ztráty, které do výpočtu nepatří. Jedná se o ztráty materiálu znečištěného struskou, rozstříkem, vratný odpad (vtoky, zmetky) a další ztráty. [7, 8]

Norma spotřeby materiálu u odlitků: [7, 8]

$$N_{mo} = Q_p + q_{prop} + q_{\epsilon} \quad (2.95)$$

kde: N_{mo} [kg] - norma spotřeby materiálu u odlitku
 Q_p [kg] - jednotková hmotnost polotovaru
 q_{prop} [kg] - jednotkové ztráty materiálu propalem
 q_{ϵ} [kg] - jednotkové ztráty materiálu při broušení odlitku

2.3.2 Stupeň využití materiálu

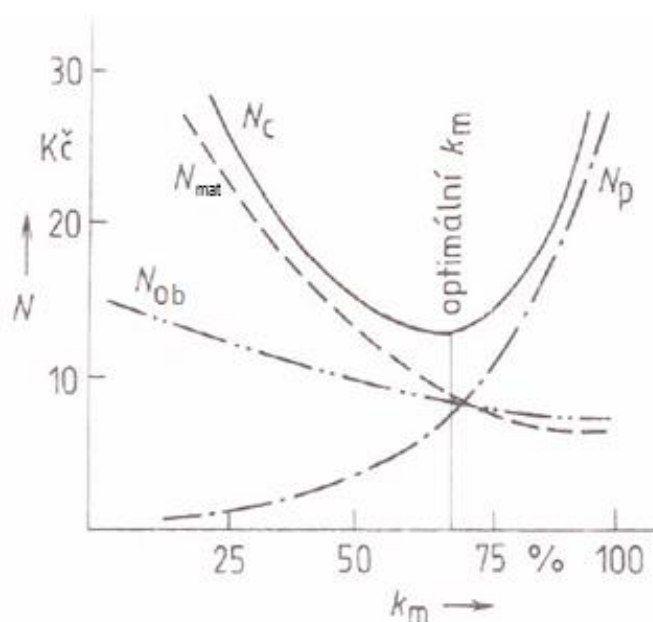
Správná volba polotovaru podstatně ovlivňuje velikost výrobních nákladů při výrobě součástí. Stupeň využití materiálu při obrábění se pohybuje v rozmezí od 0,4 do 0,8. Podle tohoto stupně se posuzuje celková pracnost výrobku. Blíží-li se koeficient využití materiálu jedné, znamená to, že množství odebraných třísek je malé a tedy pracnost výrobku je malá. Obecně můžeme říci, že čím je vyšší stupeň využití materiálu, tím je nižší pracnost a vyšší produktivita při výrobě. [7]

Stupeň využití materiálu: [7, 8]

$$k_m = \frac{Q_s}{N_m} \quad (2.96)$$

Kde: k_m [-] - stupeň využití materiálu
 Q_s [kg] - čistá jednotková hmotnost součásti
 N_m [kg] - norma spotřeby materiálu

Na obrázku (obr. 2.21) je zobrazen optimální stupeň využití materiálu v závislosti na jednotlivých nákladech. Podle tohoto diagramu lze říci, že čím vyšší stupeň využití materiálu k_m , tím více klesají náklady na polotovar a na obrábění tohoto polotovaru. Úspor na obrábění a materiál se dosáhne tak, že polotovar je například odlitek, výkovek, svařenec. Do nákladů na obrábění patří náklady na obrobení funkčních a tvarových ploch. [7, 19]



Obr. 2.21 Závislost výrobních nákladů na stupni využití materiálu [7]

N_c [Kč] – celkové operační náklady
 N_{ob} [Kč] – náklady na obrábění
 N_p [Kč] – náklady na výrobu polotovaru
 N_{mat} [Kč] – náklady na materiál
 k_m [-] – stupeň využití materiálu

Na základě analýzy obrázku (obr. 2.21) lze doporučit nerovnici (2.97). Tato nerovnice udává, že nákladové úspory na materiál musí být menší než náklady na zhotovení polotovaru. [7]

$$(U_m - U_o) \geq (N_{pn} - N_{ps}) \quad (2.97)$$

kde: U_m [Kč] - úspory v nákladech na materiál
 U_o [Kč] - úspory v nákladech při obrábění polotovaru
 N_{pn} [Kč] - náklady na zhotovení nového polotovaru
 N_{ps} [Kč] - náklady na zhotovení stávajícího polotovaru

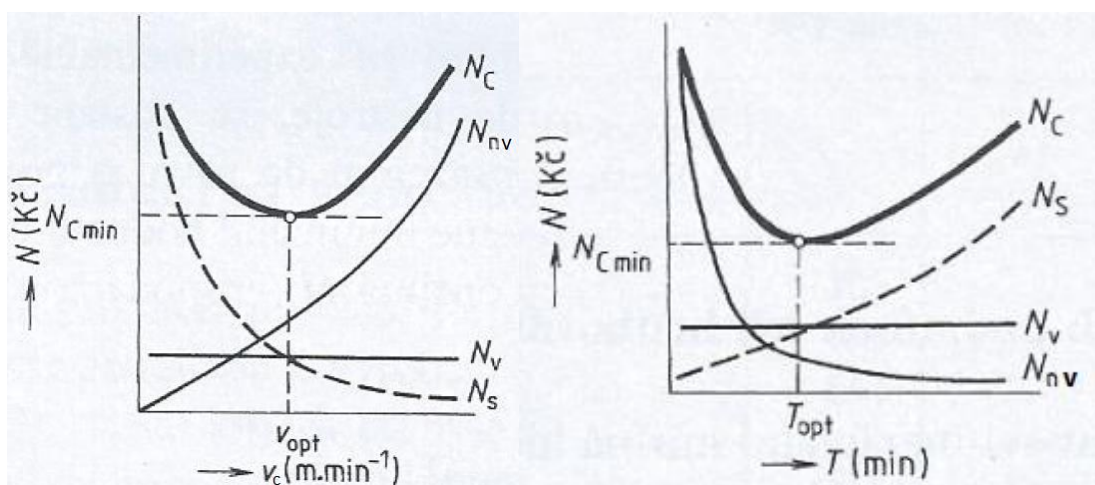
2.4 Celkové operační náklady

Celkové operační náklady (obr. 2.22) obráběcího procesu se stanoví jako součet dílčích složek stanovených k řeznému nástroji a stroji [12]. Slouží k řešení minimálních nákladů pro různá kritéria a získání optimálních řezných podmínek.

$$N_c = N_s + N_v + N_{nv} \quad (2.50)$$

kde: N_c [Kč] - celkové operační náklady
 N_s [Kč] - náklady na strojní práci
 N_v [Kč] - náklady na vedlejší práci

N_{nv} [Kč] - náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus



Obr. 2.22 Závislost nákladů na řezné rychlosti (vlevo) a závislost nákladů na trvanlivosti ostří nástroje (vpravo) [21]

3 OPTIMALIZACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ PRO ZVOLENÁ KRITÉRIA

Optimalizace se provádí tak, že z několika skupin (v každé skupině jsou 2 varianty) variant způsobu výroby součásti je vybrána ta výhodnější varianta. Jednotlivé výhodnější varianty se mezi sebou dále porovnávají a následně je z nich vybrána ta nejvýhodnější varianta, která odpovídá daným požadavkům.

Pro toto rozhodování existuje mnoho kritérií, které se používají pro porovnání jednotlivých variant způsobu výroby.

V rámci práce se řeší jen uvedená kritéria:

- *index produktivity obrábění,*
- *nákladová návratnost,*
- *kritické výrobní množství,*
- *minimálních výrobních nákladů,*
- *maximální výrobnosti.*

3.1 Index produktivity obrábění

Zvyšování produktivity obrábění je jedním z kritérií, které lze pro optimalizaci použít.

Toto kritérium se řeší pro jednu součást nebo pro skupinu technologicky a konstrukčně podobných součástí.

Podle indexu produktivity obrábění se určí výhodnost jednotlivých variant způsobu výroby. Toto kritérium nezávisí na nákladech a proto má omezené použití.

Podmínky pro zvýšení produktivity práce jsou dány: [7, 8, 22]

- snížením pracnosti výroby, kterou je možno vyjádřit koeficientem produktivity obrábění;
- snížením účasti dělníka na činnosti stroje, které je možno vyjádřit pomocí koeficientu vícestrojové obsluhy.

Index zvýšení produktivity obrábění: [7, 8, 22]

$$i_p = 100 \cdot k_{po} \cdot k_{vo} \quad (3.1)$$

kde: i_p [%] - index zvýšení produktivity obrábění
 k_{po} [-] - koeficient produktivity obrábění
 k_{vo} [-] - koeficient vícestrojové obsluhy

Koeficient produktivity obrábění je dán vztahem: [8]

$$k_{po} = \frac{p_{dv2}}{p_{dv1}} \quad (3.2)$$

kde: k_{po} [-] - koeficient produktivity obrábění
 p_{dv} [ks] - počet obrobených výrobních dávek za rok nasazení technologických prostředků (stroje, nástroje) při variantě 1,2

Počet obrobených výrobních dávek: [8]

$$p_{dv} = \frac{60 \cdot F}{d_v \cdot t_{AC} + t_{BC}} \quad (3.3)$$

Po následném dosazení vztahu (3.3) do vztahu (3.2) se získá konečný vztah pro výpočet koeficientu produktivity obrábění: [8]

$$k_{po} = \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \quad (3.4)$$

kde: k_{po} [-] - koeficient produktivity obrábění
 d_v [ks] - výrobní dávka
 $t_{AC1,2}$ [min] - čas jednotkový s podílem času směnového při variantě 1,2
 $t_{BC1,2}$ [min] - čas dávkový s podílem času směnového při variantě 1,2
 $F_{1,2}$ [hod] - efektivní časový fond pracoviště za rok při variantě 1,2

V (tab. 3.1) jsou uvedeny orientační hodnoty efektivního časového fondu.

Zhodnocení variant podle velikosti koeficientu k_{po} : [8]

- $k_{po} < 1$ varianta 2 se pro dané kritérium zamítá,
- $k_{po} = 1$ varianty 1 a 2 jsou pro dané kritérium rovnocenné,
- $k_{po} > 1$ varianta 2 je pro dané kritérium výhodná.

Tab. 3.1 Maximální hodnoty efektivního časového fondu [19]

Jednosměnný provoz	2040 hod/rok
Dvousměnný provoz	3920 hod/rok
Třisměnný provoz	5700 hod/rok

Zvýšení produktivity obrábění je závislé na časovém využití strojů, technologických prostředků a také na růstu hodinové produktivity. Hodinová produktivita určuje, kolik kusů dané součásti se vyrobí za jednu hodinu.

Lze říci, že předchozí vztahy porovnávají technologické a technické možnosti stroje a jejich funkční vybavenost, ale zahrnují i otázky související s organizací práce a pracovníkem. [7, 8, 22]

Koeficient vícestrojové obsluhy slouží k orientačnímu přiblížení, protože se při jeho určení nezohledňují náklady.

Koeficient vícestrojové obsluhy k_{vo} : [8]

$$k_{vo} = \frac{t_{dv1}}{t_{dv2}} \quad (3.5)$$

$$t_{dv1,2} = t_{AC1,2} \cdot d_v + t_{BC1,2} \quad (3.6)$$

$$t_{AC2} = \frac{t_{AC1}}{n_s} \quad (3.7)$$

$$t_{BC2} = n_s \cdot t_{BC1} \quad (3.8)$$

$$k_{vo} = \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s} \right) \cdot t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \quad (3.9)$$

kde: k_{vo} [-] - koeficient vícestrojové obsluhy
 $t_{dv1,2}$ [min] - čas obrobění jedné výrobní dávky při variantě 1,2
 t_{AC} [min] - čas jednotkový s podílem času směnového
 d_v [ks] - výrobní dávka

- t_{BC} [min] - čas dávkový s podílem času směnového
- n_s [ks] - počet současně obsluhovaných strojů při výrobě daného sortimentu součástí

Zhodnocení variant podle koeficientu k_{v0} : [8]

- $k_{v0} < 1$ varianta 2 se zamítá,
- $k_{v0} = 1$ varianty jsou rovnocenné,
- $k_{v0} > 1$ varianta 2 je výhodnější.

Po dosazení koeficientu produktivity obrábění (3.4) a koeficientu vícestrojové obsluhy (3.9) je vztah pro index zvýšení produktivity obrábění:

$$i_p = 100 \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \quad (3.10)$$

Tento vztah (3.10) se dále upraví tak, že se dosadí vztahy (3.7) a (3.8):

$$t_{AC2} = \frac{t_{AC1}}{n_s} \quad (3.7)$$

$$t_{BC2} = n_s \cdot t_{BC1} \quad (3.8)$$

$$i_p = 100 \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \quad (3.11)$$

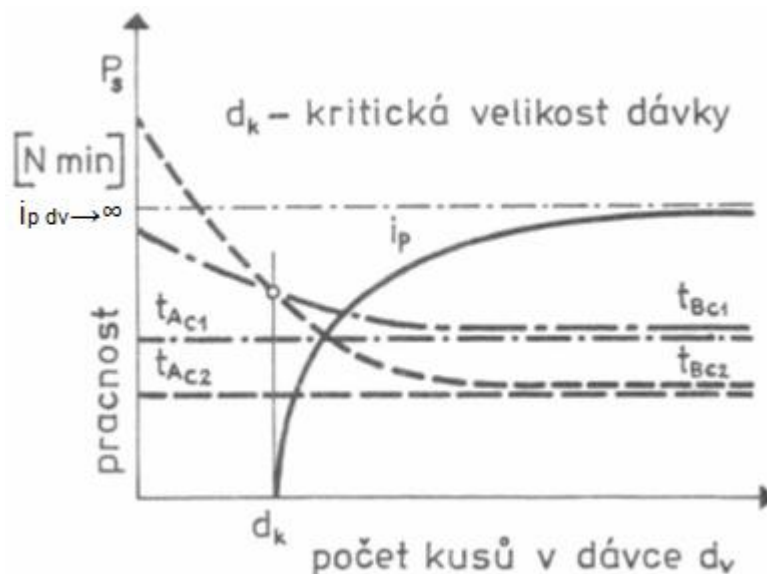
Index produktivity obrábění po konečné úpravě (3.12) platí za následujících předpokladů:

- použití jednoho druhu stroje (např. univerzální hrotový soustruh),
- počet současně obsluhovaných strojů při vícestrojové obsluze (index 2) $n_s > 1$,
- platí vztah (3.7) a (3.8).

$$i_p = 100 \cdot \frac{(d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1})^2}{(d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2})^2} \cdot \frac{F_2}{F_1} \quad (3.12)$$

Při zavedení technologicky vyspělejší varianty v závislosti na výrobní dávce lze sledovat z uvedených vztahů změny produktivity obrábění v závislosti na počtu kusů v dávce. V případě, kdy zavedením nové metody dochází ke zvýšení dávkového času a snížení času jednotkového, lze vyšších přírůstků produktivity obrábění dosáhnout až při vyšších dávkách. Velikost výrobní dávky je závislá na poměru jednotkového a dávkového času jednotlivých technologických variant. S rostoucí výrobní dávkou klesá podíl dávkového času na jeden kus (obr. 3.1). Z tohoto důvodu je výhodné zavádět nový stroj od určité hodnoty dávky, která se nazývá kritická (3.21) a (3.22). [7, 22]

Jednotkový čas s podílem času směnového nezávisí na výrobní dávce.



Obr. 3.1 Vliv jednotkového a dávkového času na růst produktivity [7]

Jednotkový čas s podílem času dávkového a směnového je ve své podstatě pracnost P_s na jeden kus a je vyjádřen vztahem (3.13), v grafické podobě je znázorněn rovnosou hyperbolou.

Jednotkový čas s podílem času dávkového a směnového: [8]

$$t_{ABC1,2} = t_{AC1,2} + \frac{t_{BC1,2}}{d_v} \quad (3.13)$$

kde: $t_{ABC1,2}$ [min] - jednotkový čas s podílem času dávkového a směnového pro variantu 1,2

Ve vztahu (3.13) je čas t_{AC} a t_{BC} stanoven pomocí přírážky času směnového k_C , která nabývá hodnot 8 až 10%. Čas t_{AC} a t_{BC} je násobek přírážky času směnového a času jednotkového t_A nebo času dávkového t_B . [8]

Do jednotkového času s podílem času směnového t_{AC} a dávkového času s podílem času směnového t_{BC} patří činnosti, které souvisí s daným časem t_A nebo t_B . Pomocí přírážky k_C se zahrnou činnosti, které patří do směny pracoviště (úklid pracoviště, příprava pracoviště a další). [8]

Křivka indexu produktivity roste po určitou hodnotu (obr. 3.1) a poté se přibližuje k přímce rovnoběžné s osou x. Pomocí limitního počtu lze tuto rovnoběžku stanovit tak, že rovnici indexu produktivity (3.10) vypočítáme jako limitu, kdy výrobní se výrobní dávka blíží k nekonečnu ($d_v \rightarrow \infty$).

$$\lim_{d_v \rightarrow \infty} \left(100 \cdot \left(\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \right) \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \left(\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s} \right) t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \right) \right) \quad (3.14)$$

Limitu je nutno vydělit výrobní dávkou, pro zjištění hodnot, které vypadnou. Pro dané řešení se úplatní pravidlo: $\frac{1}{\infty} = 0$.

$$\lim_{d_v \rightarrow \infty} \left(100 \cdot \left(\frac{\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v}}{\frac{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}}{d_v}} \right) \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \left(\frac{\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s} \right) t_{AC1} + \frac{n_s \cdot t_{BC1}}{d_v}} \right) \right) \quad (3.15)$$

$$i_{p \, dv \rightarrow \infty} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{AC1}}{t_{AC2}} \cdot \frac{t_{AC1}}{\left(\frac{1}{n_s} \right) \cdot t_{AC1}} \quad (3.16)$$

Po úpravě je pak výsledný vztah pro výpočet indexu produktivity za předpokladu, že výrobní dávka se blíží k nekonečnu ($dv \rightarrow \infty$), to znamená, že dávka je velmi vysoká hodnota.

$$i_{p \, dv \rightarrow \infty} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{AC1}^2}{t_{AC2} \cdot t_{AC1} \cdot \left(\frac{1}{n_s} \right)} \quad (3.17)$$

Opačným případem řešení je řešení dané limity tak, že výrobní dávka se blíží nule ($dv \rightarrow 0$). Jde o získání hodnoty, kdy křivka indexu produktivity protíná osu y.

$$\lim_{d_v \rightarrow 0} \left(100 \cdot \left(\frac{\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v}}{\frac{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}}{d_v}} \right) \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \left(\frac{\frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s} \right) t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \right) \right) \quad (3.18)$$

Při tomto způsobu je možno dosadit za $d_v=0$

$$i_{p \, dv \rightarrow 0} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{BC1}}{t_{BC2}} \cdot \frac{t_{BC1}}{n_s \cdot t_{BC1}} \quad (3.19)$$

Po úpravě (3.18) je výsledný vztah pro index produktivity obrábění za předpokladu, že výrobní dávka je velmi malá hodnota ($dv \rightarrow 0$):

$$i_{p \, dv \rightarrow 0} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{BC1}^2}{n_s \cdot t_{BC1} \cdot t_{BC2}} \quad (3.20)$$

Uvedení nového stroje do výroby je výhodné od určité velikosti dávky, proto se stanoví velikost kritické výrobní dávky.

Kritická velikost dávky pro případ $t_{BC2} \cdot F_1 > t_{BC1} \cdot F_1$ a $t_{AC1} \cdot F_2 > t_{AC2} \cdot F_2$: [8]

$$d_k = \frac{t_{BC2} \cdot F_1 - t_{BC1} \cdot F_2}{t_{AC1} \cdot F_2 - t_{AC2} \cdot F_1} \quad (3.21)$$

kde: d_k [ks] - kritická velikost výrobní dávky
 $t_{BC1,2}$ [min] - čas dávkový s podílem času směnového
 $F_{1,2}$ [hod] - efektivní časový fond pracoviště za rok při variantě 1,2
 $t_{AC1,2}$ [min] - čas jednotkový s podílem času směnového při variantě 1,2

Kritická velikost dávky pro případ $F_1 = F_2$, $t_{BC2} > t_{BC1}$ a $t_{AC1} > t_{AC2}$: [8]

$$d_k = \frac{t_{BC2} - t_{BC1}}{t_{AC1} - t_{AC2}} \quad (3.22)$$

$$t_{AC} = t_A \cdot k_c \quad (3.23)$$

$$t_{BC} = t_B \cdot k_c \quad (3.24)$$

kde: d_k [ks] - kritická velikost výrobní dávky
 $t_{BC1,2}$ [min] - čas dávkový s podílem času směnového při variantě 1,2
 $t_{AC1,2}$ [min] - čas jednotkový s podílem času směnového při variantě 1,2
 t_A [min] - jednotkový čas
 k_c [-] - přírážka času směnového (8 až 10%)
 t_B [min] - čas dávkový

Konkretizovaný příklad obrázku (obr. 3.1) je uveden v kapitole 4.1.

3.2 Nákladová návratnost

Návratnost jednorázově vložených investic ve vztahu k dosaženým úsporám vyjadřuje nákladová návratnost. [7, 8, 22]

$$U_n = \frac{I - C_s}{U_{nr}} \quad (3.25)$$

kde: U_n [roky] - ukazatel nákladové návratnosti
 I [Kč] - investiční náklady
 C_s [Kč] - prodejní cena vyřazených strojů
 U_{nr} [Kč] - roční úspory nákladů

Roční úspory nákladů při srovnání variant: [7, 22]

$$U_{nr} = \frac{60.F_2}{t_{AC2} + \frac{t_{BC2}}{d_v} \cdot u_j} \quad (3.26)$$

Po dosazení vztahu (3.26) do vztahu (3.25) se zjistí matematická závislost mezi investicemi a velikostí výrobní dávky.

$$U_n = \frac{I - C_s}{U_{nr}} = \frac{I - C_s}{\frac{60.F_2}{t_{AC2} + \frac{t_{BC2}}{d_v} \cdot u_j}} = \frac{(I - C_s) \cdot (d_v \cdot t_{AC} + t_{BC} \cdot u_j)}{60.F \cdot d_v} \quad (3.27)$$

Po roznásobení závorek a úpravě je pak konečný vztah pro ukazatel nákladové návratnosti (3.28):

$$U_n = \frac{t_{AC} \cdot (I - C_s)}{60.F} + \frac{t_{BC} \cdot (I - C_s)}{60.F \cdot d_v} \cdot u_j \quad (3.28)$$

Z matematického hlediska, po zjištění přesného matematického popisu se vztah (3.28) upraví do obecného tvaru (3.29).

$$U_n = k_1 + k_2 \cdot u_j \quad (3.29)$$

kde:

$$k_1 = \frac{t_{AC} \cdot (I - C_s)}{60.F} \quad (3.30)$$

$$k_2 = \frac{t_{BC} \cdot (I - C_s)}{60.F \cdot d_v} \quad (3.31)$$

Jak je viditelné podle (3.29) jedná se o rovnici přímky, posunutou o hodnotu k_1 a konstanta k_2 udává její směrnici.

3.3 Kritické výrobní množství

Hospodárnost různých technologických variant (výrobních strojů a zařízení) se posuzují podle výrobních nákladů a také se porovnávají jednotlivé varianty v těch položkách, které se mění.

Tyto položky jsou následující: [7, 8, 22]

- přímý materiál (jednotkový),
- přímé mzdy výrobních pracovníků,
- provozní režie:
 - mzdy režijních dělníků,
 - energie, voda, palivo,
 - opravy strojů a dalšího zařízení,

- odpisy strojů a dalšího zařízení,

- náklady na vadné kusy (zmetky),
- údržba nářadí v podniku.

S rostoucím stupněm mechanizace a automatizace vzrůstá význam nákladových položek, které přímo souvisí s činností strojů a zařízení. Tyto položky se určí přímou metodou podle normy spotřeby (materiálu, práce, a další) na základě technicko-ekonomických parametrů, nebo nepřímo z režijních nákladů na jednotku pomocí procentuální přírážky ke zvolené základně. [7, 8, 22]

Z hlediska hospodárnosti jednotlivých variant výroby se náklady rozlišují podle závislosti na vyráběném množství výrobků na dále uvedené položky. [7, 8, 22]

- **Náklady na jeden kus závislé** (variabilní) **na výrobním množství N_z .**

Do této skupiny patří přímé mzdy výrobní dělníků, přímý materiál, a další.

$$N_z = N_{pm} + N_{mAC} + N_{psAC} + \dots \quad (3.32)$$

- kde: N_z [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
- N_{pm} [Kč] - náklady na přímý materiál
- N_{mAC} [Kč] - náklady na přímé mzdy a provozní režii za čas t_{AC}
- N_{psAC} [Kč] - náklady na provoz stroje za čas t_{AC}

Náklady na přímý materiál: [8]

$$N_{pm} = N_m \cdot c_m - Z_m \cdot c_o \quad (3.33)$$

- kde: N_{pm} [Kč] - náklady na přímý materiál
- N_m [kg] - norma spotřeby materiálu
- c_m [Kč] - cena materiálu
- Z_m [kg] - celková ztráta materiálu vztažená na jednotku
- c_o [Kč] - cena jednoho kilogramu odpadu

Náklady na přímé mzdy a provozní režii: [8]

$$N_{mAC} = \frac{t_{AC}}{60} \left(1 + \frac{R}{100} \right) \cdot M_{tAC} \quad (3.34)$$

- kde: N_{mAC} [Kč] - náklady na přímé mzdy a provozní režii za čas t_{AC}
- t_{AC} [min] - jednotkový čas s podílem času směnového
- R [Kč] - provozní režie mimo nákladů na provoz stroje
- M_{tAC} [Kč] - mzdový tarif pro čas t_{AC} za hodinu

Náklady na provoz stroje za čas t_{AC} : [8]

$$N_{psAC} = \frac{t_{AC}}{60} \cdot N_{hs} \quad (3.35)$$

kde: N_{psAC} [Kč] - náklady na provoz stroje za čas t_{AC}
 t_{AC} [min] - jednotkový čas s podílem času směnového
 N_{hs} [Kč] - náklady na provoz stroje za hodinu

➤ **Náklady nezávislé (fixní) na počtu kusů v dávce N_{nd} .**

Tyto náklady je potřeba jednorázově vynaložit na určitou práci spojenou s přípravou a zakončením při výrobě dávky součástí (mzdy seřizovačů s režii, a podobně). [7, 8, 22]

$$N_{nd} = N_{mBC} + N_{psBC} + \dots \quad (3.36)$$

kde: N_{nd} [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 N_{mBC} [Kč] - náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie
 N_{psBC} [Kč] - náklady na provoz stroje za čas t_{BC}

Náklady na přímé mzdy a provozní režii pro dávkový čas s podílem času směnového: [8]

$$N_{mBC} = \frac{t_{BC}}{60} \left(1 + \frac{R}{100} \right) \cdot M_{tBC} \quad (3.37)$$

kde: N_{mBC} [Kč] - náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie
 t_{BC} [min] - dávkový čas s podílem času směnového
 R [Kč] - provozní režie mimo nákladů na provoz stroje
 M_{tBC} [Kč] - mzdový tarif pro čas t_{BC} za hodinu

Náklady na provoz stroje za čas t_{BC} : [8]

$$N_{psBC} = \frac{t_{BC}}{60} \cdot N_{hs} \quad (3.38)$$

kde: N_{psBC} [Kč] - náklady na provoz stroje za čas t_{BC}
 N_{hs} [Kč] - náklady na provoz stroje za hodinu
 t_{BC} [min] - dávkový čas s podílem času směnového

Pozn. Náklady na provoz stroje za hodinu – stejné jak u N_{psAC} , protože rozdíly jsou zanedbatelné.

➤ **Náklady nezávislé (fixní) na výrobním množství N_{nQ} .**

Pod tímto jsou myšleny investice na stroje, speciální nářadí a pomůcky, které se musí pořídit nezávisle na počtu vyráběných kusů. [7, 8, 22]

Na základě uvedené úvahy se výrobní náklady na celkové výrobní množství vyjádří následovně: [7, 8, 22]

$$VN_Q = N_{nQ} + \left(N_z + \frac{N_{nd}}{d_v} \right) \cdot Q \quad (3.39)$$

kde: VN_Q [Kč]	-	výrobní náklady na výrobní množství
N_{nQ} [Kč/rok]	-	náklady nezávislé na výrobním množství
N_z [Kč]	-	náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
N_{nd} [Kč]	-	náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
d_v [ks]	-	velikost výrobní dávky
Q [ks]	-	výrobní množství

Obecné vyjádření úspor na jednotku: [8]

$$u_j = \frac{VN_{Q1} - VN_{Q2}}{Q} \quad (3.40)$$

kde: u_j [Kč]	-	úspory na jednotku výroby
$VN_{Q1,2}$ [Kč]	-	výrobní náklady na výrobní množství pro variantu 1,2
Q [ks]	-	výrobní množství

Roční úspory nákladů při srovnání variant: [7, 22]

$$U_{nr} = \frac{60 \cdot F_2}{t_{AC2} + \frac{t_{BC2}}{d_v} \cdot u_j} \quad (3.26)$$

kde: U_{nr} [Kč]	-	roční úspory nákladů
F_2 [hod]	-	efektivní časový fond pracoviště za rok varianty 2
t_{AC2} [min/kus]	-	čas jednotkový s podílem času směnového technologicky vyspělejší varianty
t_{BC2} [min]	-	čas dávkový s podílem času směnového na dávku technologicky vyspělejší varianty
d_v [ks]	-	velikost výrobní dávky
u_j [Kč]	-	úspory na jednotku výroby

Kritické výrobní množství lze řešit dvěma způsoby:

- kritické výrobní množství pro zjednodušené podmínky,
- kritické výrobní množství pro obecné podmínky.

3.3.1 Kritické výrobní množství pro zjednodušené podmínky

Obecně se při výpočtu kritického výrobního množství může měnit několik technologických činitelů (stroje, nástroje). Za určitých zjednodušených podmínek (stejně stroje, mění se nástroje a naopak) je možné vzít kritickou výrobní dávku jako kritické výrobní množství ($Q_k = d_k$).

Variantu srovnání dvou nebo více obráběcích strojů bez použití speciálního nářadí znázorňuje obrázek (obr. 3.2). [7, 8, 22]

Pro předpoklad porovnání výrobních nákladů je předpoklad: [8]

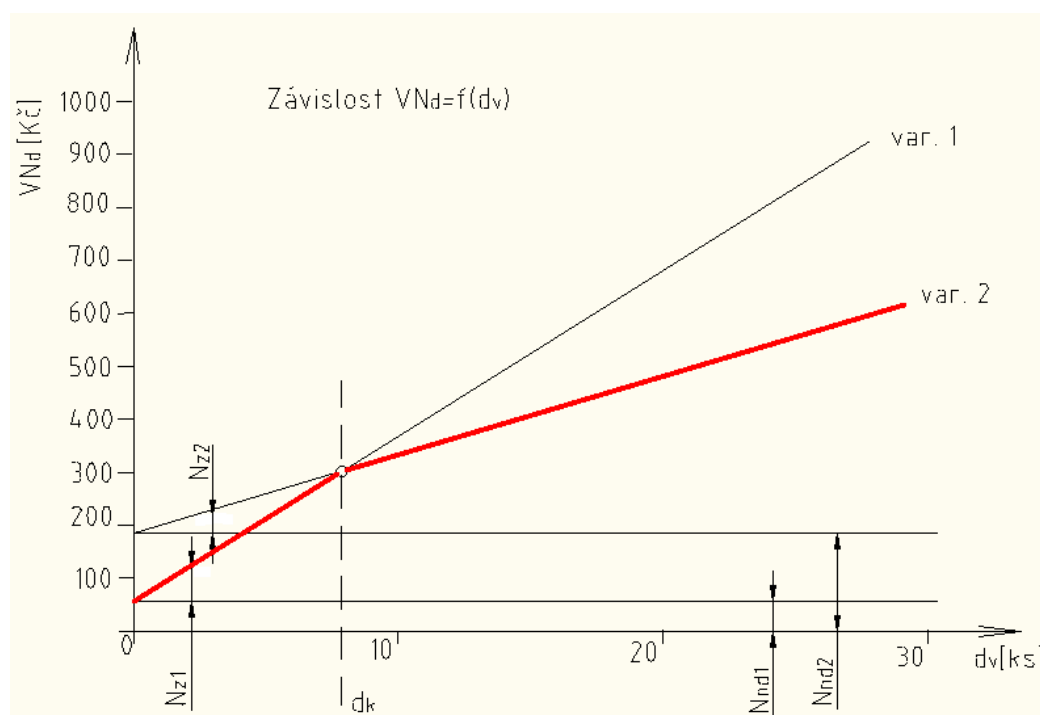
$$N_{nQ1} = N_{nQ2} = 0, d_{v1} = d_{v2} = d_v, Q = d_v$$

Celkové výrobní náklady na dávku: [7, 8, 22]

$$VN_d = N_{nd} + d_v \cdot N_z \quad (3.41)$$

- kde: VN_d [Kč] - celkové výrobní náklady na výrobní dávku
 N_{nd} [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 d_v [ks] - velikost výrobní dávky
 N_z [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství

Závislost výrobních nákladů na dávce znázorňuje (obr. 3.2).



Obr. 3.2 Závislost výrobních nákladů na výrobní dávce [8]

Kritická výrobní dávka se vypočítá z podmínky $VN_{dv1}=VN_{dv2}=VN_{dv}$ a velikost dávek je pro obě varianty stejná: [7, 8, 22]

$$d_K = \frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{N_{z1} - N_{z2}} \quad (3.42)$$

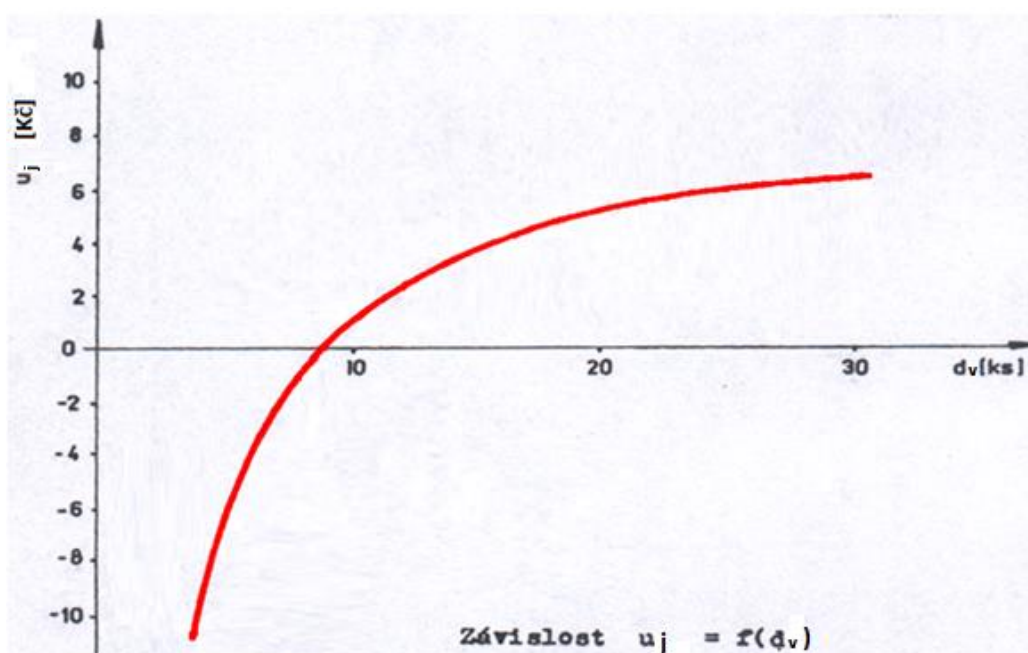
- kde: d_K [ks] - kritická velikost výrobní dávky
 $N_{nd1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce pro obě varianty
 $N_{z1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství pro obě varianty

Úspory na jednotku výroby při dané dávce: [7, 8, 22]

$$u_j = N_{z1} - N_{z2} - \frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{d_v} \quad (3.43)$$

- kde: u_j [Kč] - úspory na jednotku výroby
 $N_{z1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
 $N_{nd1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 d_v [ks] - velikost výrobní dávky

Úspory na jednotku výroby v závislosti na dávce jsou znázorněny na obrázku (obr. 3.3). Hodnoty pod číslem nula jsou ztráty a hodnoty nad číslem nula jsou úspory. S rostoucím počtem kusů v dávce rostou úspory.



Obr. 3.3 Závislost výrobní dávky na úsporách [8]

3.3.2 Kritické výrobní množství pro obecné podmínky

Srovnání dvou nebo více obráběcích strojů při použití speciálního nářadí má kritické výrobní množství následující postup řešení.

Opakovatelnost výroby se mění v určitém rozsahu, musí se tedy stanovit výrobní náklady v rozmezí velikosti dávky. [7, 22]

Z podmínky rovnosti výrobních nákladů na výrobní množství pro první a druhou variantu se vyjádří kritické výrobní množství. [8]

$$VN_{Q1}=VN_{Q2}, N_{nQ1} > 0, N_{nQ2} > 0, N_{nQ2} > N_{nQ1}, d_{v1} = d_{v2} = d_v$$

Kritické výrobní množství: [8]

$$Q_k = \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{(N_{z1} - N_{z2}) - \left(\frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{d_v} \right)} \quad (3.44)$$

- kde: Q_k [ks] - kritické výrobní množství
 $N_{nQ1,2}$ [Kč/rok]- náklady nezávislé na výrobním množství pro obě varianty
 $N_{z1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
 $N_{nd1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 d_v [ks] - velikost výrobní dávky

Úpory na jednotku výroby vyjádřené za předpokladu rovnosti výrobních dávek $d_{v1} = d_{v2} = d_v$: [8]

$$u_j = N_{z1} - N_{z2} - \frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{d_v} - \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{Q} \quad (3.45)$$

- kde: u_j [Kč] - úspory na jednotku výroby
 $N_{z1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
 $N_{nd1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 d_v [ks] - velikost výrobní dávky
 $N_{nQ1,2}$ [Kč/rok]- náklady nezávislé na výrobním množství pro obě varianty
 Q [ks] - výrobní množství

Z podmínky rovnosti výrobních nákladů na výrobní množství pro první a druhou variantu se vyjádří kritické výrobní množství. [8]

$$VN_{Q1}=VN_{Q2}, N_{nQ2} > N_{nQ1}, N_{z1} > N_{z2}, d_{v1} \neq d_{v2}$$

$$Q_k = \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{(N_{z1} - N_{z2}) - \left(\frac{N_{nd2}}{d_{v2}} - \frac{N_{nd1}}{d_{v1}} \right)} \quad (3.46)$$

- kde: Q_k [ks] - kritické výrobní množství
 $d_{v1,2}$ [ks] - velikost výrobní dávky pro variantu 1,2
 $N_{nQ1,2}$ [Kč/rok]- náklady nezávislé na výrobním množství pro obě varianty
 $N_{z1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
 $N_{nd1,2}$ [Kč] - náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
 Q [ks] - výrobní množství

Úpory na jednotku výroby vyjádřené za předpokladu nerovnosti výrobních dávek $d_{v1} \neq d_{v2}$: [8]

$$u_j = N_{z1} - N_{z2} - \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{Q} + \frac{N_{nd1}}{d_{v1}} - \frac{N_{nd2}}{d_{v2}} \quad (3.47)$$

3.4 Optimalizace řezné rychlosti

Řezná rychlost má významný vliv na opotřebení řezného nástroje a tedy i na velikost operačních výrobních nákladů.

Pro určení optimální hodnoty řezné rychlosti se využije matematická funkce derivace.

3.4.1 Optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních výrobních nákladů

Pro výpočet optimální řezné rychlosti se operační výrobní náklady vyjádří jako funkce řezné rychlosti ($N_c = f(v_c)$). Výpočet vychází ze základního vztahu (2.50).

$$N_c = N_s + N_{nv} + N_v \quad (2.50)$$

Po úpravě pak obecný vztah pro zjištění derivace (3.48).

$$N_c = f(v_c) = K_1 \cdot v_c^{-1} + N_v + K_2 \cdot v_c^{(m-1)} \quad (3.48)$$

Po dosazení do vztahu (2.13) a (2.3) jsou náklady na strojní práci obecně (3.49) a konstanta pro soustružení válcové plochy (3.50): [16]

$$N_s = K_1 \cdot v_c^{-1} \quad (3.49)$$

kde:

$$K_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot N_{sm}}{f \cdot 10^3} \quad (3.50)$$

Obecně náklady na nástroj a jeho výměnu po dosazení do vztahů (2.13), (2.38), (2.39) a (2.40). [16]

$$N_{nv} = K_2 \cdot v_c^{m-1} \quad (3.51)$$

Kde konstanta pro soustružení válcové plochy je (3.52):

$$K_2 = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot N_T}{f \cdot 10^3 \cdot C_T} \quad (3.52)$$

Dosazením do základního vztahu (2.50), derivováním podle proměnné v_c a položením rovno nule se získá obecně optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních výrobních nákladů (3.54). [16]

$$N_c = N_s + N_{nv} + N_v \quad (2.50)$$

$$N_c = f(v_c) = K_1 \cdot v_c^{-1} + N_v + K_2 \cdot v_c^{(m-1)} \quad (3.48)$$

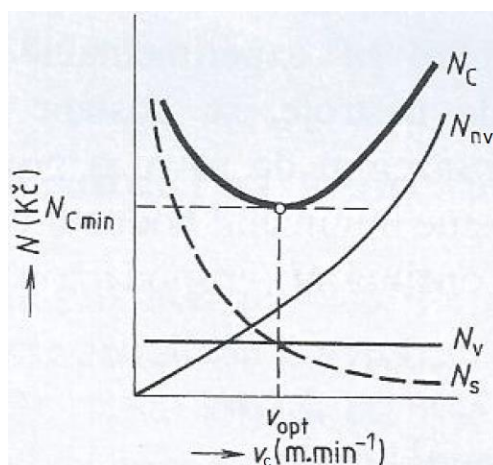
$$\frac{dN_c}{dv_c} = -K_1 \cdot v_c^{-2} + 0 + K_2 \cdot (m-1) \cdot v_c^{(m-2)} = 0 \quad (3.53)$$

$$v_{c_{optN}} = \left(\frac{K_1}{(m-1) \cdot K_2} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.54)$$

Optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních výrobních nákladů pro soustružení válcové plochy po dosazení konstant (3.55).

$$v_{c_{optN}} = \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.55)$$

Průběh operačních výrobních nákladů na řezné rychlosti je na (obr. 3.4). Je zřejmé, že celkové operační náklady jsou součtem jednotlivých složek a v minimu této funkce je znázorněna optimální řezná rychlost. S rostoucí řeznou rychlostí rostou náklady na nástroj a jeho výměnu.



Obr. 3.4 Závislost nákladů na řezné rychlosti [21]

3.4.2 Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti

U tohoto způsobu řešení se požaduje co nejkratší čas pro obrobení dané součástky. Jednotkový čas se vyjádří jako funkční závislost řezné rychlosti ($t_A = f(v_c)$).

Výchozí vztah pro řešení (2.63): [6, 16, 17, 18]

$$t_{A0} = t_{AS} + t_{AV} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.63)$$

Po úpravě obecného vztahu (2.63) pro derivaci:

$$t_{A0} = f(v_c) = K_3 \cdot v_c^{-1} + K_4 \cdot v_c^{(m-1)} + t_v \quad (3.56)$$

Obecné vyjádření jednotkového strojního času po dosazení za (2.13):

$$t_{AS} = K_3 \cdot v_c^{-1} \quad (3.57)$$

Kde konstanta K_3 je stanovena pro soustružení válcové plochy

$$K_3 = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{f \cdot 10^3} \quad (3.58)$$

Počet obrobených kusů během trvanlivosti Q_T :

$$Q_T = \frac{T}{\tau \cdot t_{AS}} = \frac{10^3 \cdot v_c \cdot f \cdot C_T}{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot v_c^m} \quad (3.59)$$

Čas na nástroj a jeho výměnu pro soustružení válcové plochy (3.60):

$$\frac{t_{AX}}{Q_T} = \frac{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot v_c^m \cdot t_{AX}}{10^3 \cdot v_c \cdot f \cdot C_T} \quad (3.60)$$

kde:

$$K_4 = \frac{\tau \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot t_{AX}}{10^3 \cdot f \cdot C_T} \quad (3.61)$$

Obečné vyjádření času na nástroj a jeho výměnu:

$$\frac{t_{AX}}{Q_T} = K_4 \cdot v_c^{(m-1)} \quad (3.62)$$

Po dosazení do základního vztahu (2.63) a položení první derivaci rovno nule se určí obecná optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti (3.63).

$$t_{A0} = t_{AS} + t_{Av} + \frac{t_{AX}}{Q_T} \quad (2.63)$$

$$t_{A0} = f(v_c) = K_3 \cdot v_c^{-1} + K_4 \cdot v_c^{(m-1)} + t_v \quad (3.56)$$

$$\frac{dt_{A0}}{dv_c} = -K_3 \cdot v_c^{-2} + K_4 \cdot (m-1) \cdot v_c^{(m-2)} + 0 = 0$$

$$K_3 = (m-1) \cdot K_4 \cdot v_c^m$$

$$v_c^m = \frac{K_3}{(m-1) \cdot K_4} = \frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)}$$

$$v_{c_{optV}} = \left(\frac{K_3}{(m-1) \cdot K_4} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.63)$$

Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti po dosazení jednotlivých konstant pro soustružení válcové plochy je pak (3.64):

$$v_{c_{optV}} = \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.64)$$

Ze vztahu (3.64) je viditelné, že optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti vůbec nezávisí na výrobních nákladech.

3.5 Optimalizace z hlediska úběru materiálu

Optimalizace z hlediska úběru materiálu se stanoví pro kritérium maximální produktivity a minimálních nákladů.

Pod pojmem úběr materiálu je uvažován objem materiálu (cm³) za dané časové období (např. min).

Obečný vztah pro úběr materiálu (3.65): [2]

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c \quad (3.65)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{10^3} \quad (2.20)$$

kde: U [cm³·min⁻¹] - úběr materiálu
 a_p [mm] - hloubka záběru

v_c [m.min ⁻¹]	-	řezná rychlost
f [mm]	-	posuv na otáčku
D [mm]	-	průměr obrobku (nebo nástroje)
n [min ⁻¹]	-	otáčky

Z toho po dosazení je úběr materiálu: [2]

$$U = 10^{-3} \cdot a_p \cdot f \cdot D \cdot n \quad (3.66)$$

Optimální úběr materiálu pro kritérium minimálních výrobních nákladů

Cílem je stanovit takový úběr materiálu, aby bylo splněno kritérium minimálních výrobních nákladů.

Pro dané kritérium se vypočítá optimální řezná rychlost a dosadí se do základního vztahu pro úběr materiálu (3.65).

$$v_{optN} = \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.55)$$

Po dosazení vztahu (3.55) do vztahu (3.65) je vztah pro splnění daného kritéria:

$$U_{optN} = a_p \cdot f \cdot \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.67)$$

Optimální úběr materiálu pro kritérium maximální výrobnosti

Pro kritérium maximální výrobnosti se úběr materiálu stanoví obdobným způsobem jako pro kritérium minimálních výrobních nákladů.

Optimální řezná rychlost (3.64):

$$v_{optV} = \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.64)$$

Po dosazení vztahu (3.64) do vztahu (3.65) je optimální úběr materiálu pro kritérium maximální výrobnosti:

$$U_{optV} = a_p \cdot f \cdot \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.68)$$

4 PRAKTICKÁ APLIKACE OPTIMALIZACE OPERAČNÍCH NÁKLADŮ

V této kapitole se aplikuje výše uvedená metodika pro dvě technologické varianty způsobu výroby.

Hodnoty výpočtů ukázkového příkladu jsou v tabulkách označeny žlutou barvou.

4.1 Výpočet indexu produktivity obrábění

Index produktivity obrábění určuje vhodnost použití nové technologicky vyspělejší varianty vzhledem k stávajícímu stavu. Stávající stav se označí indexem 1 a nový stav se označí indexem 2.

Pro výpočet a grafické vyjádření se použil software Microsoft Excel (příloha 1).

4.1.1 Index produktivity obrábění pro jednostrojovou obsluhu

Předpoklad pro posouzení vhodnosti technologických variant jednostrojové obsluhy:

- varianta 1 – univerzální hrotový soustruh,
- varianta 2 – revolverový soustruh,
- počet současně obsluhovaných strojů 1.

V tabulce (tab. 4.1) jsou uvedeny zadané hodnoty pro řešení indexu produktivity obrábění.

Tab. 4.1 Tabulka zadaných hodnot pro jednostrojovou obsluhu

Název hodnoty	Označení jednotka	Varianta	
		1.	2.
Výrobní dávka	d_v [ks]	40	
Čas jednotkový s podílem času směnového	t_{AC} [min]	18	12
Čas dávkový s podílem času směnového	t_{BC} [min]	45	120
Efektivní časový fond pracoviště za rok	F [hod]	3600	3400
Počet současně obsluhovaných strojů	n_s [ks]	1	1

Ze zadaných hodnot se stanoví koeficient produktivity obrábění, koeficient vícestrojové obsluhy, čas obrobení výrobní dávky, kritická velikost dávky, jednotkový čas s podílem času směnového a dávkového.

Ukázkový výpočet indexu produktivity obrábění

Koeficient produktivity obrábění se určí ze vztahu (3.4) následovně:

$$k_{po} = \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} = \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot 12 + 120} \cdot \frac{3400}{3600} = 1,204$$

Koeficient vícestrojové obsluhy se získá pomocí výrobní dávky a dalších činitelů podle (3.9).

$$k_{vo1} = \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) \cdot t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} = \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 18 + 1 \cdot 45} = 1$$

$$k_{vo2} = \frac{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) \cdot t_{AC2} + n_s \cdot t_{BC2}} = \frac{40 \cdot 12 + 120}{40 \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 12 + 1 \cdot 120} = 1$$

Index produktivity obrábění (3.1).

$$i_p = 100 \cdot k_{po} \cdot k_{vo} \quad (3.1)$$

Po dosazení za koeficient vícestrojové obsluhy (3.9) a koeficient produktivity obrábění (3.4) je pak index produktivity roven (3.10):

$$i_p = 100 \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) \cdot t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \quad (3.10)$$

$$i_p = 100 \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot 12 + 120} \cdot \frac{3400}{3600} \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 18 + 1 \cdot 45} = 120,42 \%$$

Z výsledku je zřejmé, že varianta 2 je výhodnější než varianta 1.

Kritická velikost dávky je podle vztahu (3.21)

$$d_k = \frac{t_{BC2} \cdot F_1 - t_{BC1} \cdot F_2}{t_{AC1} \cdot F_2 - t_{AC2} \cdot F_1} = \frac{120 \cdot 3600 - 45 \cdot 3400}{18 \cdot 3400 - 12 \cdot 3600} = 15,5 \text{ ks}$$

Jednotkový čas s podílem času směnového a dávkového pro variantu 1 a 2 ze vztahu (3.13)

$$t_{ABC1} = t_{AC1} + \frac{t_{BC1}}{d_{v1}} = 18 + \frac{45}{40} = 19,13 \text{ min}$$

$$t_{ABC2} = t_{AC2} + \frac{t_{BC2}}{d_{v2}} = 12 + \frac{120}{40} = 15 \text{ min}$$

Rovnice rovnoběžky s osou x podle (3.17), kdy je předpokládána velmi vysoká velikost dávky ($d_v \rightarrow \infty$).

$$i_{p \text{ } d_v \rightarrow \infty} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{AC1}^2}{t_{AC2} \cdot t_{AC1} \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right)} = 100 \cdot \frac{3400}{3600} \cdot \frac{18^2}{12 \cdot 18 \cdot \frac{1}{1}} = 141,67 \%$$

Průsečík na ose y (3.20) vychází z předpokladu velmi malé velikosti výrobní dávky ($d_v \rightarrow 0$):

$$i_{p\,dv \rightarrow 0} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{BC1}^2}{n_s \cdot t_{BC1} \cdot t_{BC2}} = 100 \cdot \frac{3400}{3600} \cdot \frac{45^2}{1.45 \cdot 120} = 35,42 \%$$

Čas pro obrobění dané dávky (3.6):

$$t_{dv1,2} = t_{AC1,2} \cdot d_v + t_{BC1,2} \quad (3.6)$$

$$t_{dv1} = t_{AC1} \cdot d_v + t_{BC1} = 18.40 + 45 = 765 \text{ min}$$

$$t_{dv2} = t_{AC2} \cdot d_v + t_{BC2} = 12.40 + 120 = 600 \text{ min}$$

V tabulce (tab. 4.2) jsou výstupní hodnoty pro zadané hodnoty.

Tab. 4.2 Tabulka vypočtených hodnot pro jednostrojovou obsluhu a velikost dávky 40 ks

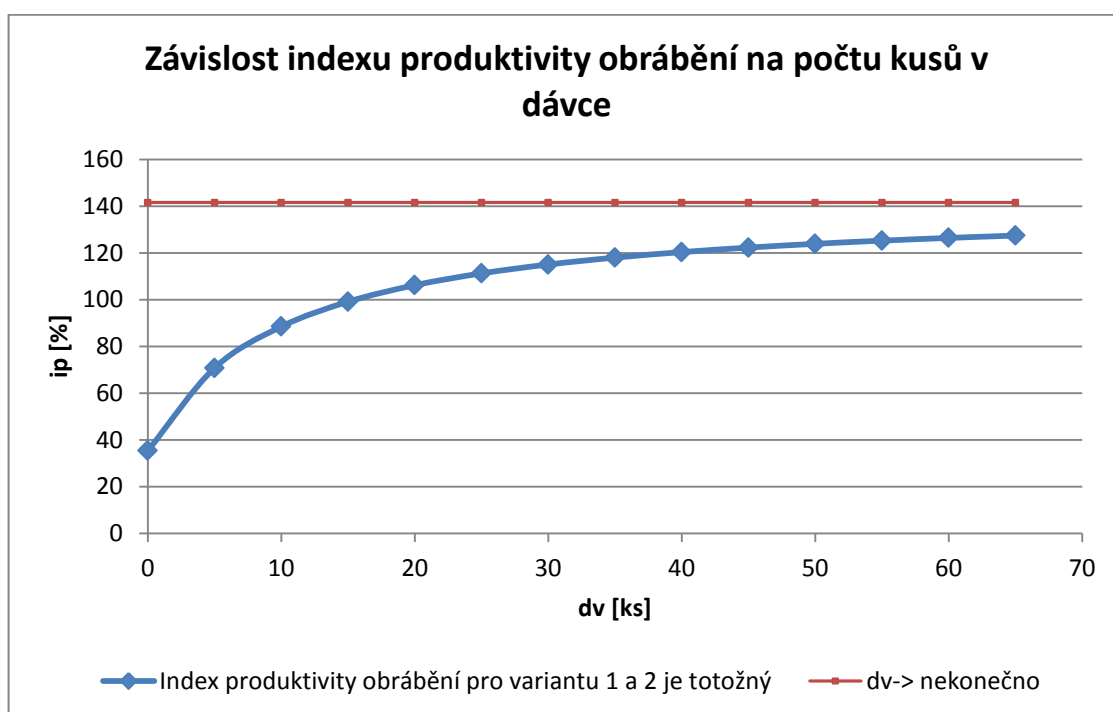
Název hodnoty	Označení	Varianta	
		1.	2.
Koeficient produktivity obrábění	kpo [-]	1,204	
Rozhodnutí o vhodnosti varianty podle kpo		varianta 2 je výhodná	
Čas obrobění vybrané výrobní dávky	tdv [min]	765	600
Koeficient vícestrojové obsluhy	kvo[-]	1,00	1,00
Rozhodnutí o vhodnosti variant	kvo[-]	varianta 1 je stejně výhodná jako varianta 2	
Kritická velikost dávky	dk [ks]	15,5	
Index produktivity obrábění	ip [%]	120,42	120,42
Index produktivity obrábění pro lim $dv \rightarrow \infty$	ip $dv \rightarrow \infty$ [%]	141,67	141,67
Index produktivity obrábění pro lim $dv \rightarrow 0$	ip $dv \rightarrow 0$ [%]	35,42	35,42

Z hodnot v tabulce (tab. 4.3) se vytvořili následující grafické závislosti.

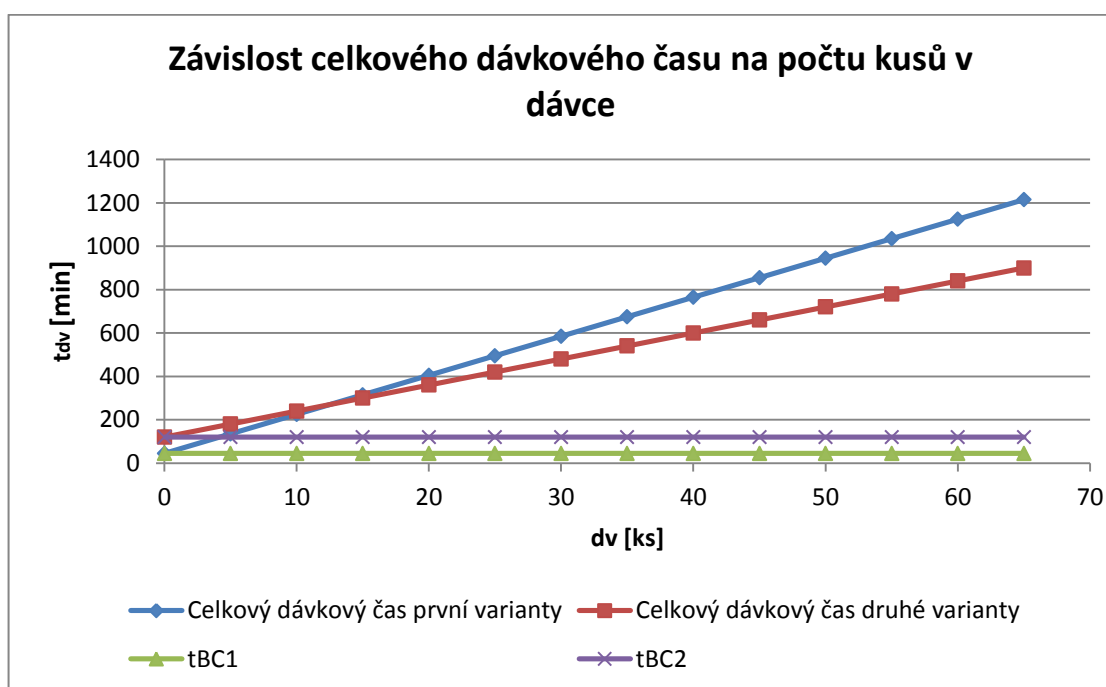
Tab. 4.3 Tabulka vypočtených hodnot indexu produktivity pro danou dávku

dávka [ks]		tdv1	tdv2	ip1	ip2	tABC1	tABC2
1.	2.	[min]	[min]	[%]	[%]	[min]	[min]
0	0	45	120	35,42	35,42	-	-
5	5	135	180	70,83	70,83	27,00	36,00
10	10	225	240	88,54	88,54	22,50	24,00
15	15	315	300	99,17	99,17	21,00	20,00
20	20	405	360	106,25	106,25	20,25	18,00
25	25	495	420	111,31	111,31	19,80	16,80

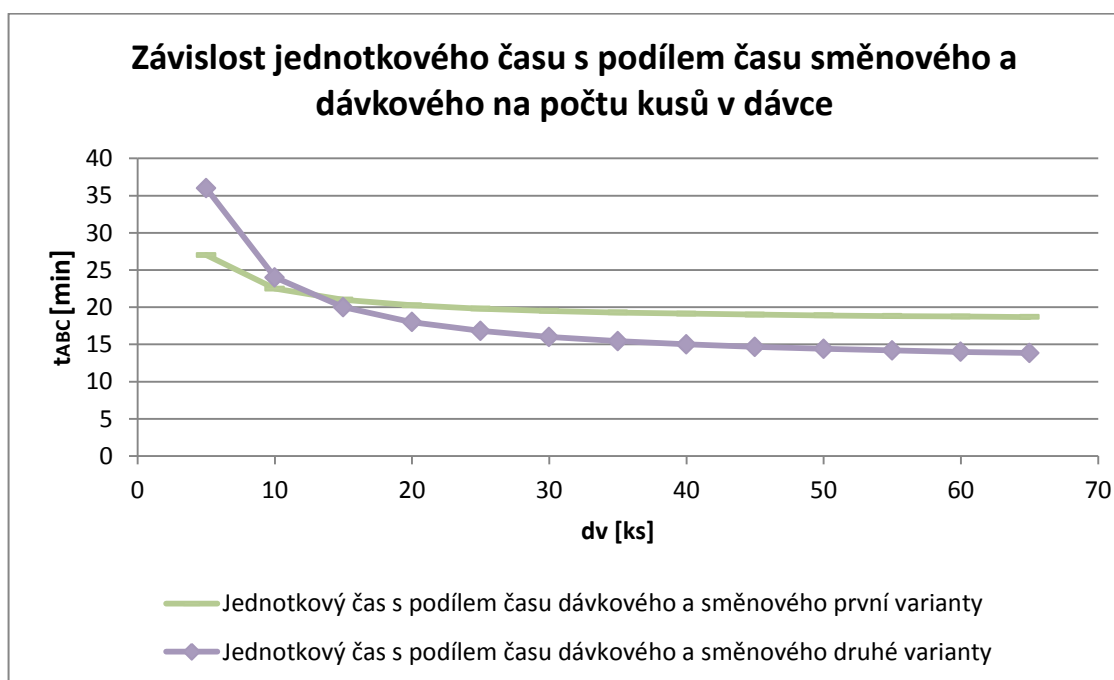
dávka [ks]		tdv1	tdv2	ip1	ip2	tABC1	tABC2
1.	2.	[min]	[min]	[%]	[%]	[min]	[min]
30	30	585	480	115,10	115,10	19,50	16,00
35	35	675	540	118,06	118,06	19,29	15,43
40	40	765	600	120,42	120,42	19,13	15,00
45	45	855	660	122,35	122,35	19,00	14,67
50	50	945	720	123,96	123,96	18,90	14,40
55	55	1035	780	125,32	125,32	18,82	14,18
60	60	1125	840	126,49	126,49	18,75	14,00
65	65	1215	900	127,50	127,50	18,69	13,85



Obr. 4.1 Průběh indexu produktivity obrábění na velikosti výrobní dávky



Obr. 4.2 Průběh dávkového času na velikosti výrobní dávky



Obr. 4.3 Průběh jednotkového času s podílem času směnového a dávkového na velikosti výrobní dávky

Z obrázku (obr. 4.1) je viditelné, že index produktivity roste s rostoucí velikostí výrobní dávky. Počátek indexu produktivity je v hodnotě 35,42 % a přibližuje se až k hodnotě 141,67 %.

Z tabulky (tab. 4.3), ale především z obrázků (obr. 4.2) a (obr. 4.3) je zřejmé, že vypočtená hodnota kritické velikosti výrobní dávky se shoduje s grafickým

vyjádřením. To znamená, že při výrobě 15-ti kusů dané součásti se vyplatí první varianta a od hodnoty 16-ti kusů a více dané součásti je vhodnější varianta 2.

4.1.2 Index produktivity obrábění pro vícestrojovou obsluhu

Předpoklad pro posouzení vhodnosti technologických variant vícestrojové obsluhy:

- 1. a 2. varianta: stroj - univerzální hrotový soustruh - pro obě varianty stejný časový fond;
- 3. a 4. varianta: stroj - revolverový soustruh - pro obě varianty stejný časový fond;
- počet současně obsluhovaných strojů pro:
 - 1. a 3. variantu je 1 stroj;
 - 2. a 4. variantu jsou 2 stroje.

Výpočet hodnot jednotkové času s podílem čas směnového (3.7) a dávkového času s podílem času směnového (3.8) pro různý počet strojů (n_s):

$$t_{AC2} = \frac{t_{AC1}}{n_{s2}} = \frac{18}{2} = 9 \text{ min}$$

$$t_{BC2} = n_{s2} \cdot t_{BC1} = 2 \cdot 45 = 90 \text{ min}$$

V tabulce (tab. 4.4) jsou uvedeny zadané hodnoty pro řešení indexu produktivity obrábění při vícestrojové obsluze.

Tab. 4.4 Tabulka zadaných hodnot pro vícestrojovou obsluhu

Název hodnoty	Označení	Varianta			
		1.	2.	3.	4.
Výrobní dávka	dv [ks]	40	40	40	40
Čas jednotkový s podílem času směnového	t _{AC} [min]	18	9	12	6
Čas dávkový s podílem času směnového	t _{BC} [min]	45	90	120	240
Efektivní časový fond pracoviště za rok	F [hod]	3600	3600	3400	3400
Počet současně obsluhovaných strojů	n _s [ks]	1	2	1	2

Výpočet se shoduje s postupem u řešení pro jednostrojovou obsluhu. Rozdíl je dosažen až při výpočtu koeficientu vícestrojové obsluhy, kdy je uvažován větší počet současně obsluhovaných strojů.

Ukázkový výpočet indexu produktivity obrábění pro variantu 1 a 2.

koeficient produktivity obrábění (3.4):

$$k_{po} = \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} = \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot 9 + 90} \cdot \frac{3600}{3600} = 1,7$$

Koeficient vícestrojové obsluhy pro revolverový soustruh podle (3.9).

$$k_{vo1} = \frac{d_{v1} \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_{v1} \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) \cdot t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} = \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 18 + 1 \cdot 45} = 1$$

$$k_{vo2} = \frac{d_{v2} \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_{v2} \cdot \left(\frac{1}{n_{s2}}\right) \cdot t_{AC1} + n_{s2} \cdot t_{BC1}} = \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 18 + 2 \cdot 45} = 1,7$$

Index produktivity obrábění pro revolverový soustruh (3.1)

$$i_{p2} = 100 \cdot k_{po} \cdot k_{vo2}$$

Po dosazení koeficientů je index produktivity obrábění (3.10):

$$i_p = 100 \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1}}{d_v \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right) \cdot t_{AC1} + n_s \cdot t_{BC1}} \quad (3.10)$$

$$i_{p1} = 100 \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot 9 + 90} \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 18 + 1 \cdot 45} = 170 \%$$

$$i_{p2} = 100 \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot 9 + 90} \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{40 \cdot 18 + 45}{40 \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot 18 + 2 \cdot 45} = 289 \%$$

Ověření správnosti vztahu (3.12):

$$i_{p2} = 100 \cdot \frac{(d_v \cdot t_{AC1} + t_{BC1})^2}{(d_v \cdot t_{AC2} + t_{BC2})^2} \cdot \frac{F_2}{F_1} = 100 \cdot \frac{(40 \cdot 18 + 45)^2}{(40 \cdot 9 + 90)^2} \cdot \frac{3600}{3600} = 289 \%$$

Z výsledku v tabulce (tab. 4.5) je zřejmé, že varianta 2 je výhodnější než varianta 1.

Určení hodnoty rovnoběžky s osou x podle (3.17) pro univerzální hrotový soustruh při jednostrojové obsluze za předpokladu $d_v \rightarrow \infty$:

$$i_{p \, dv \rightarrow \infty} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{AC1}^2}{t_{AC2} \cdot t_{AC1} \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right)} = 100 \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{18^2}{9 \cdot 18 \cdot \frac{1}{1}} = 200 \%$$

Průsečík na ose y (3.20) pro 1. Variantu za předpokladu $d_v \rightarrow 0$:

$$i_{p \, dv \rightarrow 0} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{BC1}^2}{n_s \cdot t_{BC1} \cdot t_{BC2}} = 100 \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{45^2}{1 \cdot 45 \cdot 90} = 50 \%$$

Obdobně se určí hodnota rovnoběžky a průsečíku pro 2. variantu.

$$i_{p\ dv \rightarrow \infty} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{AC1}^2}{t_{AC2} \cdot t_{AC1} \cdot \left(\frac{1}{n_s}\right)} = 100 \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{18^2}{9 \cdot 18 \cdot \frac{1}{2}} = 400 \%$$

$$i_{p\ dv \rightarrow 0} = 100 \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{t_{BC1}^2}{n_s \cdot t_{BC1} \cdot t_{BC2}} = 100 \cdot \frac{3600}{3600} \cdot \frac{45^2}{2 \cdot 45 \cdot 90} = 25 \%$$

Kritická velikost dávky pro zadaný případ podle vztahu (3.21)

$$d_k = \frac{t_{BC2} \cdot F_1 - t_{BC1} \cdot F_2}{t_{AC1} \cdot F_2 - t_{AC2} \cdot F_1} = \frac{90 \cdot 3600 - 45 \cdot 3600}{18 \cdot 3600 - 9 \cdot 3600} = 5 \text{ ks}$$

Čas pro obrobení zadané dávky pro obě varianty:

$$t_{dv1} = t_{AC1} \cdot d_v + t_{BC1} = 18 \cdot 40 + 45 = 765 \text{ min}$$

$$t_{dv2} = t_{AC2} \cdot d_v + t_{BC2} = 9 \cdot 40 + 90 = 450 \text{ min}$$

Tab. 4.5 Výstupní hodnoty pro vícestrojovou obsluhu pro velikost výrobní dávky 40 ks

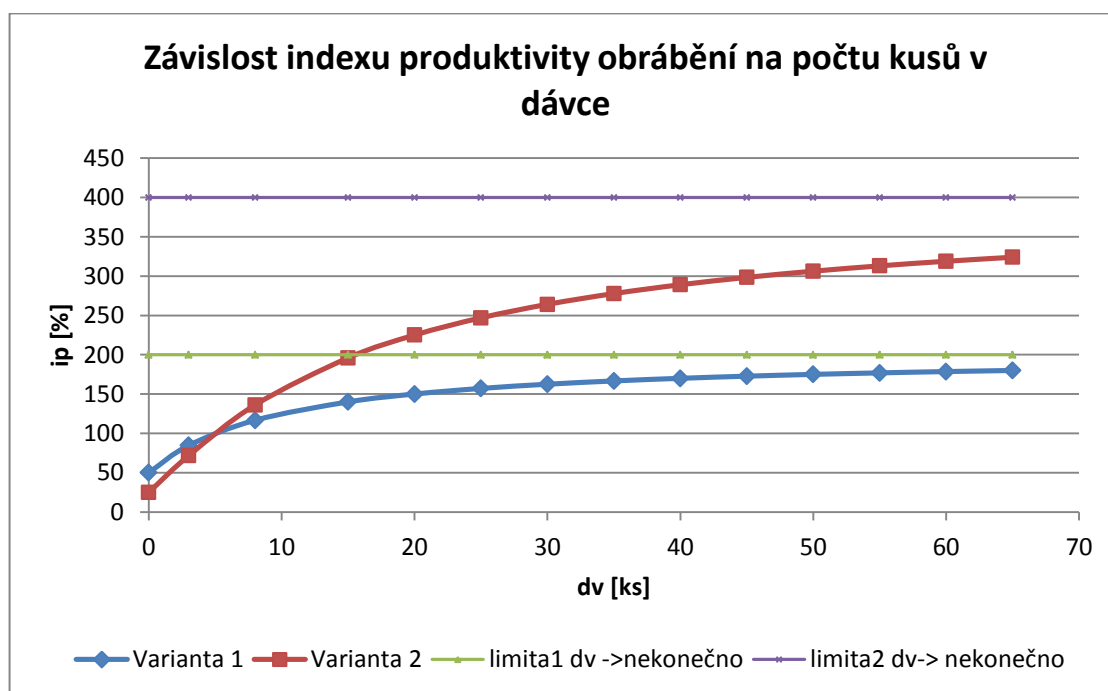
Název hodnoty	Označení	Varianta			
	jednotka	1.	2.	3.	4.
Koeficient produktivity obrábění	kpo [-]	1,70		1,25	
Vhodnost varianty podle kpo		varianta 2 je výhodná		varianta 4 je výhodná	
Rozhodnutí o vhodnosti variant		varianta 2 je výhodná			
Čas obrobení vybrané výrobní dávky	tdv [min]	765	450	600	480
Koeficient vícestrojové obsluhy	kvo[-]	1,00	1,70	1,00	1,25
Vhodnost varianty podle kvo		varianta 2 je výhodná		varianta 4 je výhodná	
Rozhodnutí o vhodnosti variant	kvo[-]	1,70	varianta 2		
Kritická velikost dávky	dk [ks]	5,0		20	
Index produktivity obrábění	ip [%]	170,00	289,00	125,00	156,25
Konečné zhodnocení výhodnosti	ip [%]	289,00	varianta 2		
Index produktivity obrábění pro lim $dv \rightarrow \infty$	ip $dv \rightarrow \infty$ [%]	200,00	400,00	200,00	400,00
Index produktivity obrábění pro lim $dv \rightarrow 0$	ip $dv \rightarrow 0$ [%]	50,00	25,00	50,00	25,00

Pomocí hodnot v tabulce (tab. 4.6.1) a (tab. 4.6.2) se vytvořili grafické závislosti

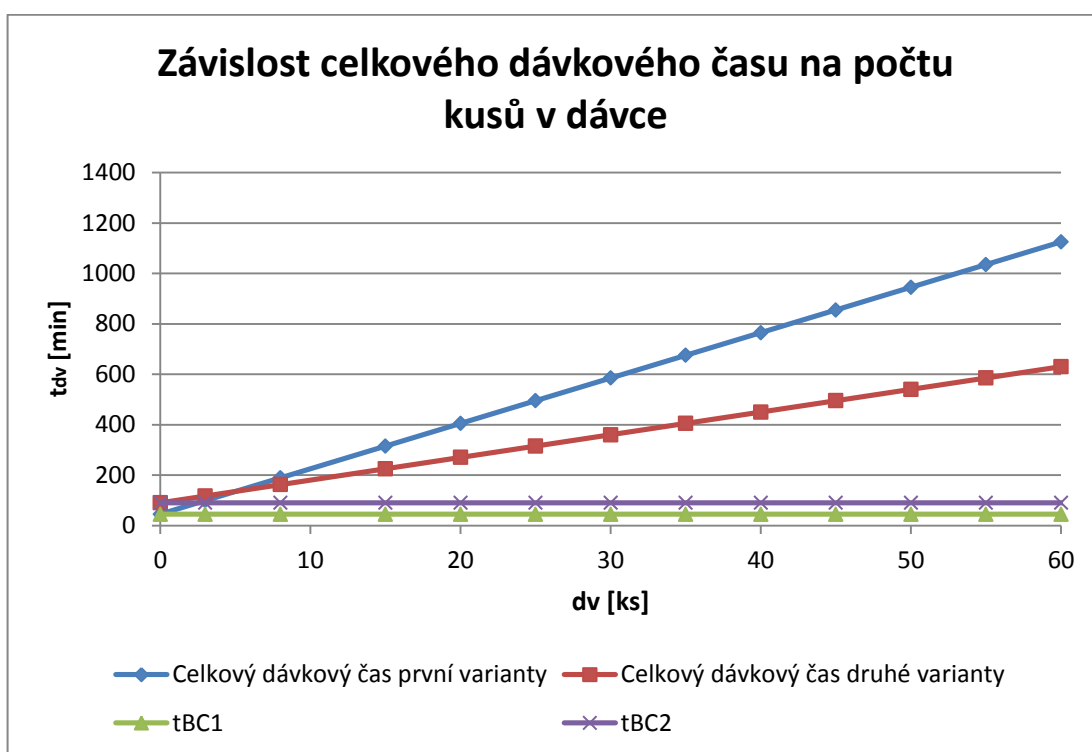
Tabulka a grafické závislosti pro univerzální hrotový soustruh při jednostrojové a vícestrojové obsluze.

Tab. 4.6.1 Tabulka vypočtených hodnot indexu produktivity pro vícestrojovou obsluhu

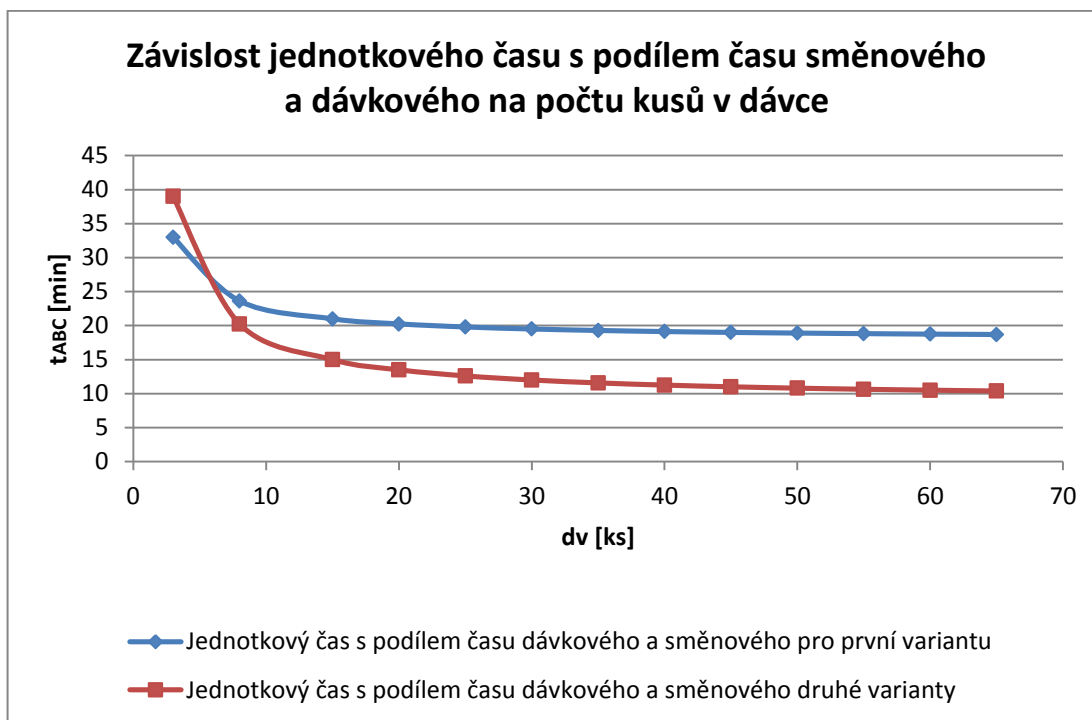
dávka [ks]		tdv1	tdv2	ip1	ip2	tABC1	tABC2
1.	2.	[min]	[min]	[%]	[%]	[min]	[min]
0	0	45	90	50,00	25,00	-	-
3	3	99	117	84,62	71,60	33,00	39,00
8	8	189	162	116,67	136,11	23,63	20,25
15	15	315	225	140,00	196,00	21,00	15,00
20	20	405	270	150,00	225,00	20,25	13,50
25	25	495	315	157,14	246,94	19,80	12,60
30	30	585	360	162,50	264,06	19,50	12,00
35	35	675	405	166,67	277,78	19,29	11,57
40	40	765	450	170,00	289,00	19,13	11,25
45	45	855	495	172,73	298,35	19,00	11,00
50	50	945	540	175,00	306,25	18,90	10,80
55	55	1035	585	176,92	313,02	18,82	10,64
60	60	1125	630	178,57	318,88	18,75	10,50
65	65	1215	675	180,00	324,00	18,69	10,38



Obr. 4.4 Průběh indexu produktivity obrábění na velikosti výrobní dávky obou variant



Obr. 4.5 Závislost dávkového času na počtu kusů v dávce (detail)



Obr. 4.6 Závislost jednotkového času s podílem času směnového a dávkového na počtu kusů v dávce pro univerzální hrotový soustruh

Především z tabulky (tab. 4.6.1) a obrázku (obr. 4.4) je viditelné, že s rostoucí dávkou roste index produktivity obrábění u jednotlivých variant různě, přičemž u varianty 2 rychleji. Produktivita obrábění varianty první je výhodná do hodnoty

kritické dávky 5 kusů. Při hodnotě 6 kusů je produktivnější varianta druhá, která využívá revolverový soustruh.

Na obrázku (obr. 4.4) je zobrazen průběh indexu produktivity obrábění pro obě varianty. První variantě odpovídá graf začínající v hodnotě 50 a přibližující se až k přímce hodnoty 200. Druhá varianta začíná od velikosti 25 a protíná graf první varianty při velikosti výrobní dávky 5 ks. Dále tento průběh roste až po přiblížení se k rovnoběžce ve vzdálenosti 400.

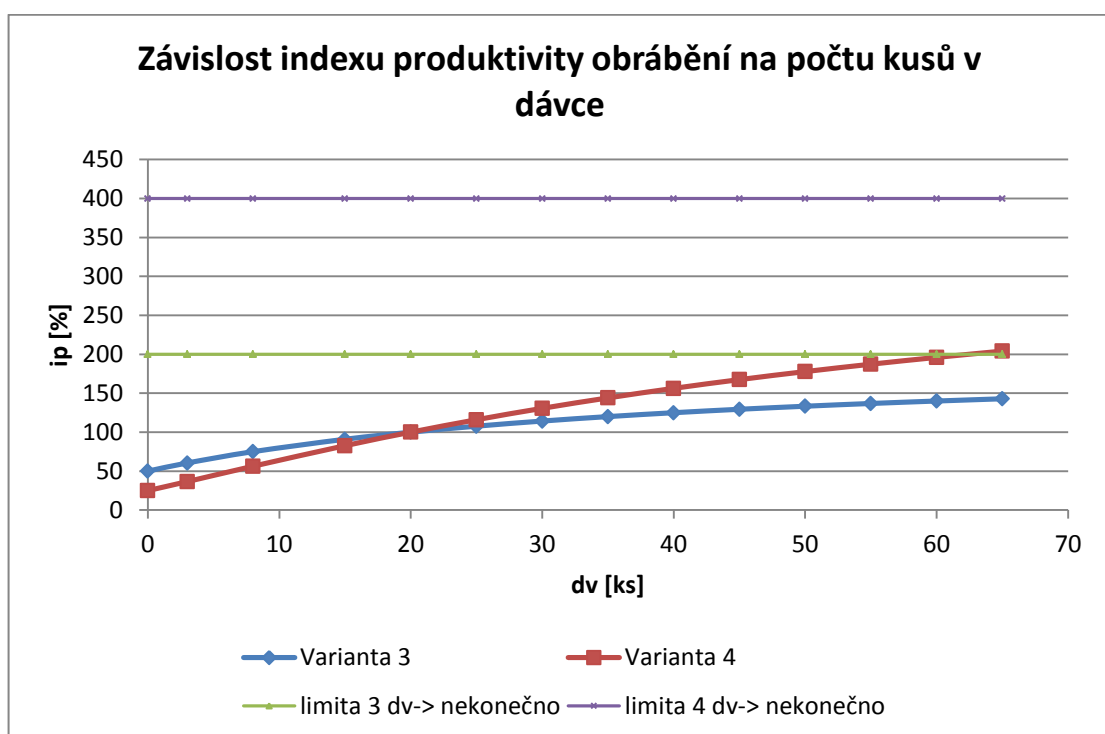
Obrázek (obr. 4.5) znázorňuje čas potřebný k obrobení dané výrobní dávky pro jednotlivé varianty. Průsečík udává výhodnost dané varianty.

Závislost jednotkového času s podílem času směnového a dávkového na výrobní dávce (obr. 4.6) potvrzuje, že vypočtené hodnota kritické výrobní dávky je opravdu kritická.

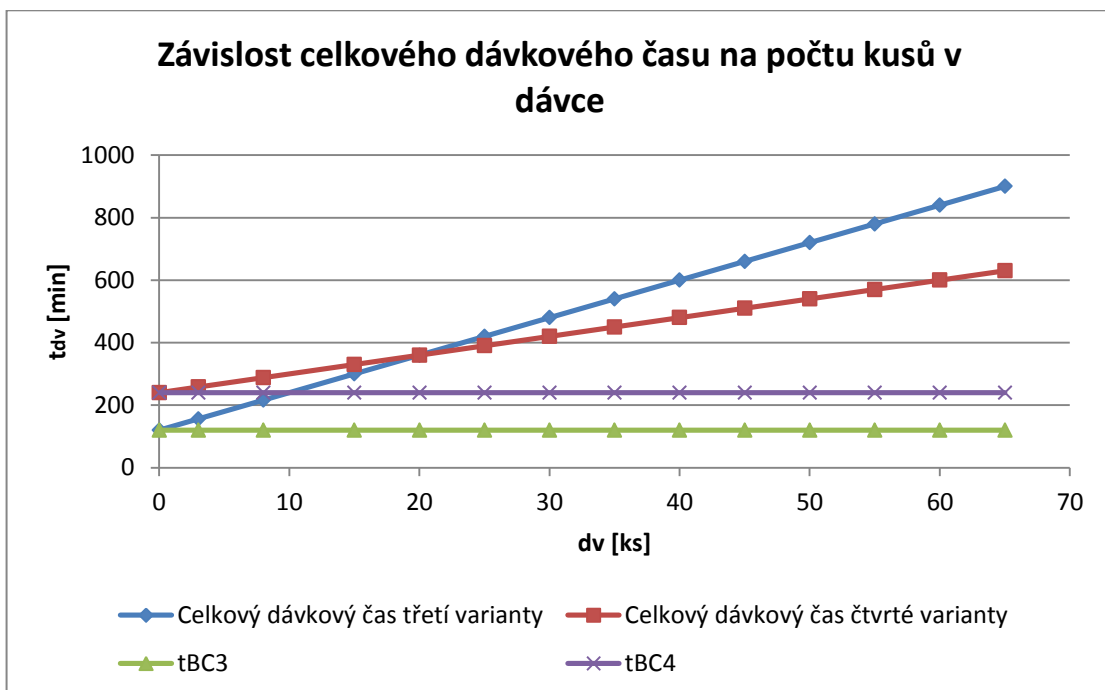
Tabulka a grafické závislosti pro revolverový soustruh při jednostrojové a vícestrojové obsluze.

Tab. 4.6.2 Tabulka vypočtených hodnot indexu produktivity pro vícestrojovou obsluhu

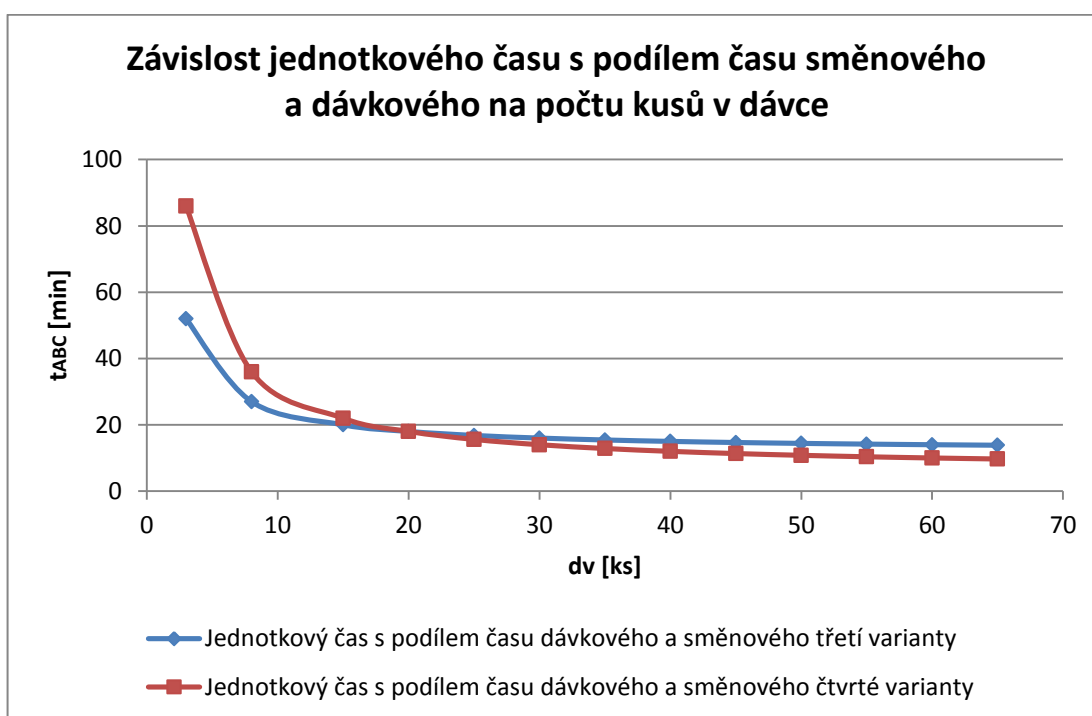
dávka [ks]		tdv3	tdv4	ip3	ip4	tABC3	tABC4
3.	4.	[min]	[min]	[%]	[%]	[min]	[min]
0	0	120	240	50,00	25,00	-	-
3	3	156	258	60,47	36,56	52,00	86,00
8	8	216	288	75,00	56,25	27,00	36,00
15	15	300	330	90,91	82,64	20,00	22,00
20	20	360	360	100,00	100,00	18,00	18,00
25	25	420	390	107,69	115,98	16,80	15,60
30	30	480	420	114,29	130,61	16,00	14,00
35	35	540	450	120,00	144,00	15,43	12,86
40	40	600	480	125,00	156,25	15,00	12,00
45	45	660	510	129,41	167,47	14,67	11,33
50	50	720	540	133,33	177,78	14,40	10,80
55	55	780	570	136,84	187,26	14,18	10,36
60	60	840	600	140,00	196,00	14,00	10,00
65	65	900	630	142,86	204,08	13,85	9,69



Obr. 4.7 Závislost indexu produktivity na počtu kusů v dávce pro revolverový soustruh při jednostržové a dvoustržové obsluze



Obr. 4.8 Průběh dávkového času na počtu kusů v dávce



Obr. 4.9 Průběh jednotkového času s podílem času směnového a dávkového na počtu kusů v dávce pro revolverový soustruh

Z tabulky (tab. 4.6.2) a obrázku (obr. 4.7) je zřejmé, jak se mění index produktivity při využití dvoustrojové obsluhy. Jednostrojová obsluha pro revolverový soustruh je výhodná do hodnoty 20 ks, která je hraniční pro rozhodování o vhodnosti dvoustrojové obsluhy.

Obrázek (obr. 4.8) udává čas potřebný k obrobení dané výrobní dávky. Průsečík obou variant potvrzuje výhodnost jedné varianty od druhé v hodnotě 20 ks.

Průběh jednotkového času s podílem času směnového a dávkového na počtu kusů v dávce (obr. 4.9) znázorňuje, jak se mění průběh tohoto času při jednostrojové a dvoustrojové obsluze.

4.2 Výpočet nákladové návratnosti

Ukazatel nákladové návratnosti v podstatě vyjadřuje, za jak dlouho se daná vložená investice vrátí při určité hodnotě úspor. Pro výpočet a grafické vyjádření se použil software MS Excel (příloha 2).

Předpokládá se koupě nového stroje na místo starých strojů:

- varianta 1 – univerzální hrotový soustruh,
- varianta 2 – revolverový soustruh,
- varianta 3 – poloautomatický soustruh,
- varianta 4 – obráběcí CNC centrum.

V tabulce (tab. 4.7) jsou zadané a vypočtené hodnoty za předpokladu, že prodejní cena vyřazených strojů je zanedbatelně malá, tedy $C_s \rightarrow 0$.

Všechny zadané hodnoty se určily odhadem.

Jednotlivé metody se počítají vzhledem k variantě 1.

Předpoklad pro odhad hodnot je:

- $t_{AC1} > t_{AC2} > t_{AC3} > t_{AC4}$,
- $t_{BC1} < t_{BC2} < t_{BC3} < t_{BC4}$,
- stejné časové fondy,
- různá velikost výrobní dávky,
- třísměnný provoz.

Tab. 4.7 Tabulka zadaných a vypočtených hodnot pro určení nákladové návratnosti

Název hodnoty	Označení	Varianta			
		1.	2.	3.	4.
Investiční náklady	I [Kč]	220000	580000	1400000	2650000
Prodejní cena vyřazených strojů	C _s [Kč]	0	0	0	0
Efektivní časový fond pracoviště za rok	F [hod]	5700	5700	5700	5700
Čas jednotkový s podílem času směnového	t _{AC} [min]	6,00	2,70	1,30	0,87
Čas dávkový s podílem času směnového	t _{BC} [min]	30	50	80	105
Velikost výrobní dávky	dv [ks]	500	550	680	1050
Úspory na jednotku výroby	uj [Kč/j]	0,00	0,14	1,00	1,40
Roční úspory nákladů	Unr [Kč]	57000	126072	241245	338614
Ukazatel nákladové návratnosti	Un [roky]	3,86	4,60	5,80	7,83

Roční úspory nákladů při srovnání variant (3.26) pro variantu 4:

$$U_{nr} = \frac{60 \cdot F_2}{t_{AC2} + \frac{t_{BC2}}{d_v} \cdot u_j} = \frac{60 \cdot 5700}{0,87 + \frac{105}{1050} \cdot 1,4} = 338614 \text{ Kč}$$

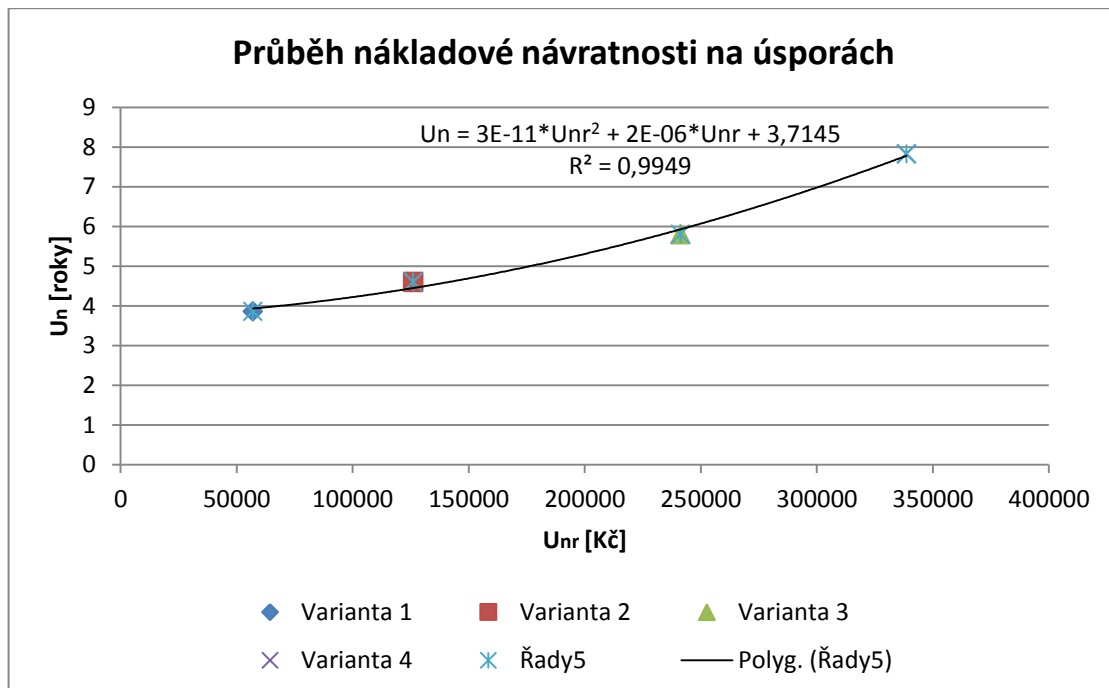
Ze zadaných hodnot se vypočítá ukazatel nákladové návratnosti U_n podle vztahu (3.28).

$$U_n = \frac{t_{AC} \cdot (I - C_s)}{60 \cdot F} + \frac{t_{BC} \cdot (I - C_s)}{60 \cdot F \cdot d_v} \cdot u_j$$

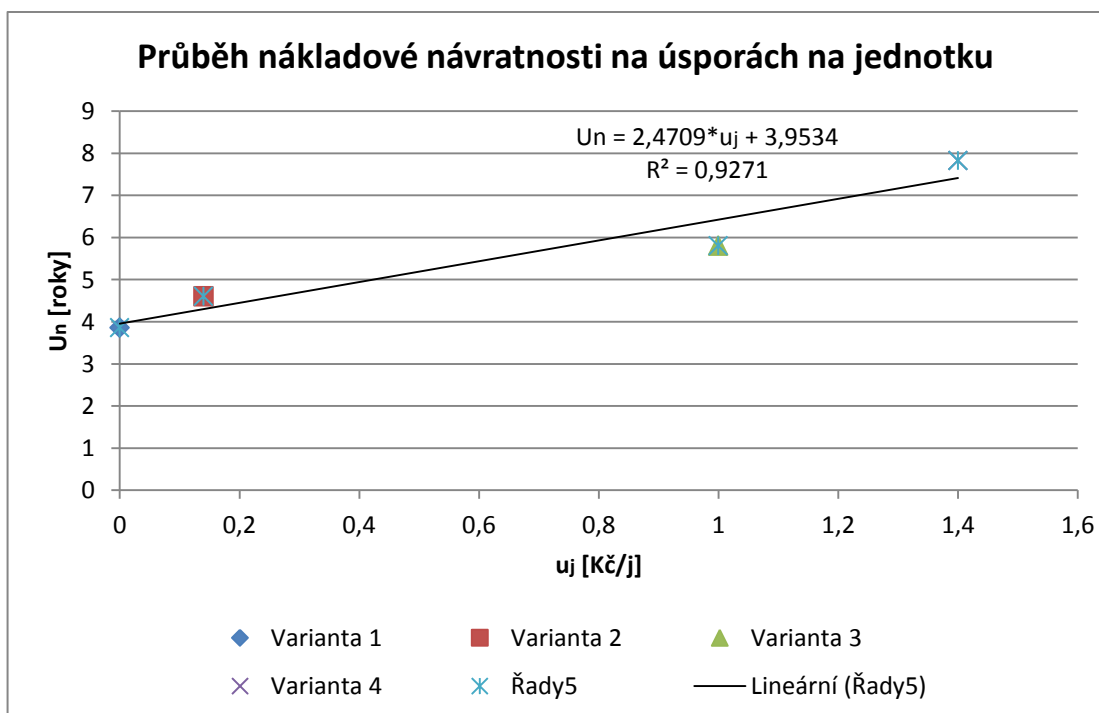
$$U_n = \frac{0,87 \cdot (2650000 - 0)}{60 \cdot 5700} + \frac{105 \cdot (2650000 - 0)}{60 \cdot 5700 \cdot 1050} \cdot 1,4 = 7,83 \text{ let}$$

Vložená investice na koupi nového CNC obráběcího centra se vrátí během 7,83 let.

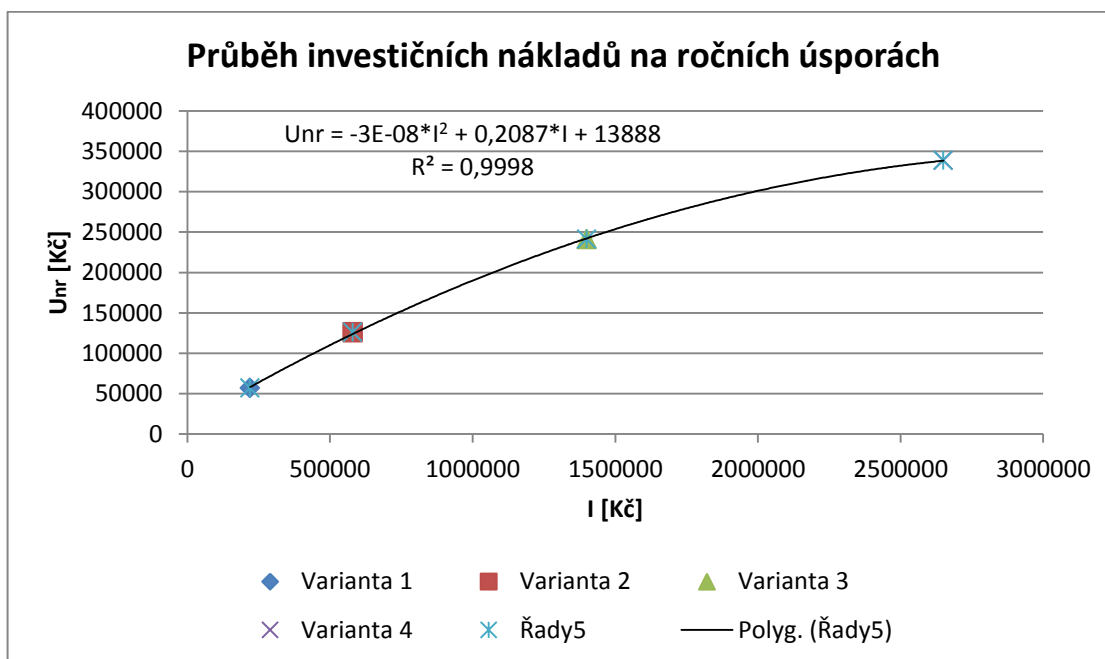
Na obrázku (obr. 4.10) jsou vyneseny jednotlivé varianty koupi nového stroje.



Obr. 4.10 Závislost nákladové návratnosti na úsporách



Obr. 4.11 Průběh nákladové návratnosti na úsporách na jednotku



Obr. 4.12 Průběh investičních nákladů na ročních úsporách

Z grafu (obr. 4.10) a (obr. 4.11) je viditelné, že pro každou variantu je různá nákladová návratnost, která závisí na ceně daného zařízení, ceně vyřazených strojů a úsporách.

Pomocí grafické závislosti nákladové návratnosti na úsporách (obr. 4.10) se jednoduše zjistí, jaká musí být roční úspory nákladů, aby se vložená investice vrátila v co nejkratší době.

Vynesenými body (obr. 4.10) se proložila spojnice trendu a získala se rovnice polynomu druhého stupně se spolehlivostí 0,9949.

Na obrázku (obr. 4.11) je stanovena závislost mezi úsporami na jednotu a ukazatelem nákladové návratnosti, která má přímkový tvar. Spojnice trendu je proložena se spolehlivostí 0,9271.

Z průběhu investičních nákladů na úsporách (obr. 4.12) je viditelné, jak s rostoucími investičními náklady rostou roční úspory nákladů.

4.3 Výpočet kritického výrobního množství

Kritické výrobní množství slouží k určení hospodárného použití jednotlivých variant výroby. Kritériem této optimalizace jsou náklady na určité množství nebo dávku daných obrobků. Pro grafické vyjádření a výpočet se využil software MS Excel (příloha 3).

4.3.1 Kritické výrobní množství pro zjednodušené podmínky

Pro výpočet je uvažováno:

- varianta 1 – univerzální hrotový soustruh,
- varianta 2 – revolverový soustruh,
- je uvažováno kritérium minimálních výrobních nákladů,
- velikosti výrobních dávek jsou stejné $d_{v1} = d_{v2} = d_v = Q$,
- pro žádnou variantu nebude použito speciální vybavení $\Rightarrow N_{nQ} = 0$.

V tabulce (tab. 4.8) jsou uvedeny zadané hodnoty pro řešení kritického výrobního množství, které je rovno kritické výrobní dávce. Pro výpočet a grafické vyjádření byl použit software Microsoft Excel.

Tab. 4.8 Tabulka zadaných hodnot pro $d_{v1} = d_{v2} = d_v = Q$

Název hodnoty	Označení	Varianta	
		1.	2.
Náklady na přímý materiál	N_{pm} [Kč]	70	70
Jednotkový čas s podílem času směnového	t_{AC} [min]	20	14
Provozní režie	R [%]	380	460
Mzdový tarif pro čas t_{AC} za hodinu	M_{tAC} [Kč]	70	98
Náklady na hodinu provozu stroje	N_{hs} [Kč]	880	980
Dávkový čas s podílem času směnového	t_{BC} [min]	65	100
Mzdový tarif pro čas t_{BC} za hodinu	M_{tBC} [Kč]	90	180

Kritická výrobní dávka se určí z nákladů nezávislých na výrobním množství, nákladů na jeden kus závislých na výrobním množství a nákladů na jeden kus nezávisle na počtu kusů ve výrobní dávce.

Náklady na přímé mzdy a provozní režii N_{mAC} pro obě varianty se stanoví ze vztahu (3.34):

$$N_{mAC1} = \frac{t_{AC1}}{60} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{100}\right) \cdot M_{tAC1} = \frac{20}{60} \cdot \left(1 + \frac{380}{100}\right) \cdot 70 = 112 \text{ Kč}$$

$$N_{mAC2} = \frac{t_{AC2}}{60} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{100}\right) \cdot M_{tAC2} = \frac{14}{60} \cdot \left(1 + \frac{460}{100}\right) \cdot 98 = 128,05 \text{ Kč}$$

Poslední neznámou složkou pro výpočet nákladů závislých na výrobním množství jsou náklady na provoz stroje za daný čas t_{AC} , které se stanoví podle (3.35):

$$N_{psAC1} = \frac{t_{AC1}}{60} \cdot N_{hs1} = \frac{20}{60} \cdot 880 = 293,33 \text{ Kč}$$

$$N_{psAC2} = \frac{t_{AC2}}{60} \cdot N_{hs2} = \frac{14}{60} \cdot 980 = 228,67 \text{ Kč}$$

Po dosazení do vzorce (3.32) dostaneme:

$$N_{z1} = N_{pm1} + N_{mAC1} + N_{psAC1} = 70 + 112 + 293,33 = 475,33 \text{ Kč}$$

$$N_{z2} = N_{pm2} + N_{mAC2} + N_{psAC2} = 70 + 128,05 + 228,67 = 426,72 \text{ Kč}$$

Náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie závisí na dávkovém čase s podílem času směnového, provozní režii a mzdovém tarifu pro čas t_{BC} .

$$N_{mBC1} = \frac{t_{BC1}}{60} \left(1 + \frac{R_1}{100} \right) \cdot M_{tBC1} = \frac{65}{60} \cdot \left(1 + \frac{380}{100} \right) \cdot 90 = 468 \text{ Kč}$$

$$N_{mBC2} = \frac{t_{BC2}}{60} \left(1 + \frac{R_2}{100} \right) \cdot M_{tBC2} = \frac{100}{60} \cdot \left(1 + \frac{460}{100} \right) \cdot 180 = 1680 \text{ Kč}$$

Náklady na provoz stroje za daný čas t_{BC} jsou stanoveny z času t_{BC} a nákladů na hodinu provozu stroje pomocí vztahu (3.38):

$$N_{psBC1} = \frac{t_{BC1}}{60} \cdot N_{hs1} = \frac{65}{60} \cdot 880 = 953,33 \text{ Kč}$$

$$N_{psBC2} = \frac{t_{BC2}}{60} \cdot N_{hs2} = \frac{100}{60} \cdot 980 = 1633,33 \text{ Kč}$$

Z tohoto pak náklady nezávislé na počtu kusů v dávce podle (3.36):

$$N_{nd1} = N_{mBC1} + N_{psBC1} = 468 + 953,33 = 1421,33 \text{ Kč}$$

$$N_{nd2} = N_{mBC2} + N_{psBC2} = 1680 + 1633,33 = 3313,33 \text{ Kč}$$

Výrobní náklady na celkové výrobní množství pro hodnotu velikosti výrobní dávky 40ks pro obě varianty podle vztahu (3.39):

$$VN_Q = N_{nQ} + \left(N_z + \frac{N_{nd}}{d_v} \right) \cdot Q \quad (3.39)$$

Z toho po úpravě $d_{v1} = d_{v2} = d_v = Q$.

$$VN_d = N_{nd} + N_z \cdot d_v$$

$$VN_{d1} = N_{nd1} + N_{z1} \cdot d_{v1} = 1421,33 + 475,33 \cdot 40 = 20434,7 \text{ Kč}$$

$$VN_{d2} = N_{nd2} + N_{z2} \cdot d_{v2} = 3313,33 + 426,72 \cdot 40 = 20382,1 \text{ Kč}$$

Pro výpočet byl uvažován počet kusů v dávce $d_v = 40$ ks.

Kritické výrobní množství je rovno kritické velikosti výrobní dávky pro dané předpoklady a varianty. Toto množství se stanoví podle vzorce (3.42):

$$d_k = \frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{N_{z1} - N_{z2}} = \frac{3313,33 - 1421,33}{475,33 - 426,72} = 38,92 \text{ ks}$$

Úpory na jednotku výroby vyjádřené za předpokladu rovnosti výrobních dávek $d_{v1}=d_{v2}=d_v$:

$$u_j = N_{z1} - N_{z2} - \frac{N_{nd2} - N_{nd1}}{d_v} = 475,33 - 426,72 - \frac{3313,33 - 1421,33}{40} = 1,31 \text{ Kč}$$

V tabulce (tab. 4.9) jsou uvedeny výstupní hodnoty získané řešením jednotlivých vztahů.

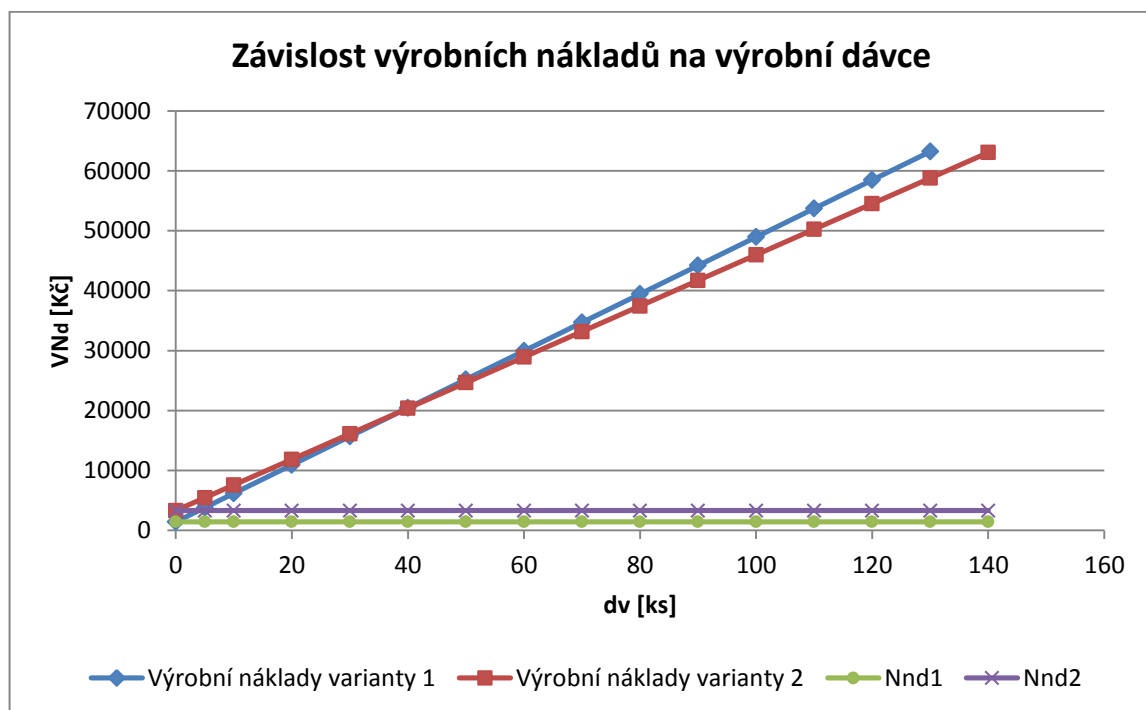
Tab. 4.9 Tabulka výstupních hodnot pro výrobní dávku 40ks

Název hodnoty	Označení jednotka	Varianta	
		1.	2.
Náklady na přímé mzdy a provozní režii	NmAC [Kč]	112	128,05
Náklady na provoz stroje za daný čas tAC	NpsAC [Kč]	293,33	228,67
Náklady závislé na výrobním množství	Nz [Kč]	475,33	426,72
Náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie	NmBC [Kč]	468	1680
Náklady na provoz stroje za daný čas tBC	NpsBC [Kč]	953,33	1633,33
Náklady nezávislé na počtu kusů v dávce	Nnd [Kč]	1421,33	3313,33
Výrobní náklady na výrobní dávku pro dv=40 ks	VNd [Kč]	20434,7	20382,1
Kritická výrobní dávka	dk [ks]	38,92	

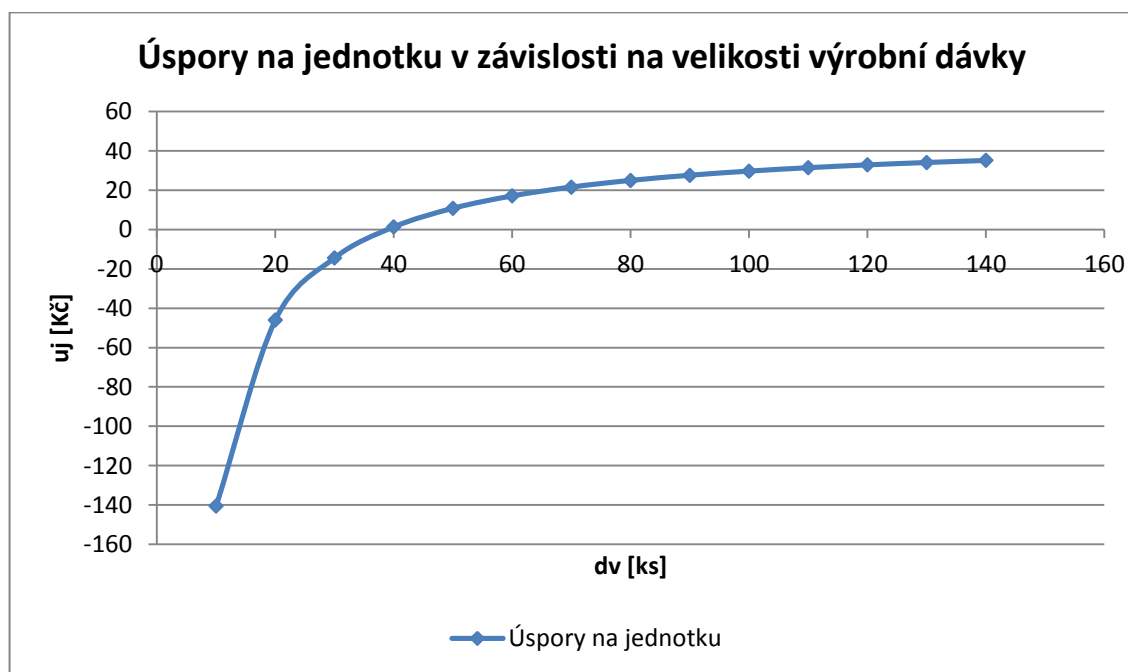
Pomocí hodnot v tabulce (tab. 4.10) se vytvořili jednotlivé grafické závislosti.

Tab. 4.10 Tabulka vypočtených hodnot pro danou velikost dávky

dávka [ks]		VNd1	VNd2	uj	Nnd1	Nnd2
1.	2.	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
0	0	1421,33	3313,33	-	1421,33	3313,33
5	5	3798,00	5446,93	-329,79	1421,33	3313,33
10	10	6174,67	7580,53	-140,59	1421,33	3313,33
20	20	10928,00	11847,73	-45,99	1421,33	3313,33
30	30	15681,33	16114,93	-14,45	1421,33	3313,33
40	40	20434,67	20382,13	1,31	1421,33	3313,33
50	50	25188,00	24649,33	10,77	1421,33	3313,33
60	60	29941,33	28916,53	17,08	1421,33	3313,33
70	70	34694,67	33183,73	21,58	1421,33	3313,33
80	80	39448,00	37450,93	24,96	1421,33	3313,33
90	90	44201,33	41718,13	27,59	1421,33	3313,33
100	100	48954,67	45985,33	29,69	1421,33	3313,33
110	110	53708,00	50252,53	31,41	1421,33	3313,33
120	120	58461,33	54519,73	32,85	1421,33	3313,33
130	130	63214,67	58786,93	34,06	1421,33	3313,33
140	140	67968,00	63054,13	35,10	1421,33	3313,33



Obr. 4.13 Průběh výrobních nákladů jednotlivých variant v závislosti na velikosti výrobní dávky



Obr. 4.14 Průběh úspor na jednotku výroby v závislosti na výrobní dávce

Z obrázků (obr. 4.13), ale také z tabulky (tab. 4.10) je viditelné, že varianta jedna s použitím univerzálního hrotového soustruhu je výhodná do 38 vyrobených kusů. Varianta dvě, která využívá revolverový soustruh je výhodná při počtu 39 kusů

v závislosti na výrobních nákladech. Nákladové křivky mají lineárně rostoucí průběh.

Náklady nezávislé na výrobním množství jsou konstantní, tedy nezávisí na velikosti výrobní dávky.

Na obrázku (obr. 4.14) je znázorněn průběh úspor na jednotku výroby v závislosti na výrobní dávce. Průsečík s osou, na které je vynesena velikost výrobní dávky zobrazuje od kolika vyrobených kusů je výroba výhodná. Výhodnost, tedy úspory na jednotku výroby určují hodnoty nad osou výrobní dávky. Hodnoty pod touto osou jsou ztráty.

4.3.2 Kritické výrobní množství pro obecné podmínky

Pro výpočet je uvažováno:

- varianta 1 – univerzální hrotový soustruh,
- varianta 2 – revolverový soustruh,
- je uvažováno kritérium minimálních výrobních nákladů,
- velikosti výrobních dávek jsou stejné $d_{v1} \neq d_{v2} \neq Q$,
- pro obě varianty bude použito speciální vybavení $\Rightarrow N_{nQ} \neq 0$.

Zadané hodnoty pro výpočet kritického výrobního množství jsou uvedeny v tabulce (tab. 4.11).

Tab. 4.11 Zadané hodnoty pro nerovnost výrobních dávek

Název hodnoty	Označení jednotka	Varianta	
		1.	2.
Náklady na přímý materiál	N_{pm} [Kč]	70	70
Jednotkový čas s podílem času směnového	t_{AC} [min]	20	14
Provozní režie	R [%]	380	460
Mzdový tarif pro čas t_{AC} za hodinu	M_{tAC} [Kč]	70	98
Náklady na hodinu provozu stroje	N_{hs} [Kč]	880	980
Dávkový čas s podílem času směnového	t_{BC} [min]	65	100
Mzdový tarif pro čas t_{BC} za hodinu	M_{tBC} [Kč]	90	180
Náklady nezávislé na počtu kusů v dávce	N_{nQ} [Kč]	3000	11000
Výrobní dávka	d_v [Ks]	100	150

Stejným způsobem jak v kapitole 4.3.1 se stanoví náklady závislé na výrobním množství, náklady nezávislé na počtu kusů v dávce a jejich složky. Tabulka (tab. 4.12) udává výstupní hodnoty.

Tab. 4.12 Výstupní hodnoty pro výrobní množství

Název hodnoty	Označení	Varianta	
		1.	2.
Náklady na přímé mzdy a provozní režii	NmAC [Kč]	112	128,05
Náklady na provoz stroje za daný čas tAC	NpsAC [Kč]	293,33	228,67
Náklady závislé na výrobním množství	Nz [Kč]	475,33	426,72
Náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie	NmBC [Kč]	468	1680
Náklady na provoz stroje za daný čas tBC	NpsBC [Kč]	953,33	1633,33
Náklady nezávislé na počtu kusů v dávce	Nnd [Kč]	1421,33	3313,33
Výrobní náklady na výrobní množství pro Q=200 ks	VNq [Kč]	100909,33	100761,78
Kritické výrobní množství	Q _k [ks]	196,38	

Kritické výrobní množství pro daný případ dle (3.46):

$$Q_k = \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{(N_{z1} - N_{z2}) - \left(\frac{N_{nd2}}{d_{v2}} - \frac{N_{nd1}}{d_{v1}} \right)}$$

$$Q_k = \frac{11000 - 3000}{(475,33 - 426,33) - \left(\frac{3313,33}{150} - \frac{1421,33}{100} \right)} = 196,38 \text{ ks}$$

Úpory na jednotku výroby pro výrobní množství 200 ks (3.47).

$$u_j = N_{z1} - N_{z2} - \frac{N_{nQ2} - N_{nQ1}}{Q} + \frac{N_{nd1}}{d_{v1}} - \frac{N_{nd2}}{d_{v2}}$$

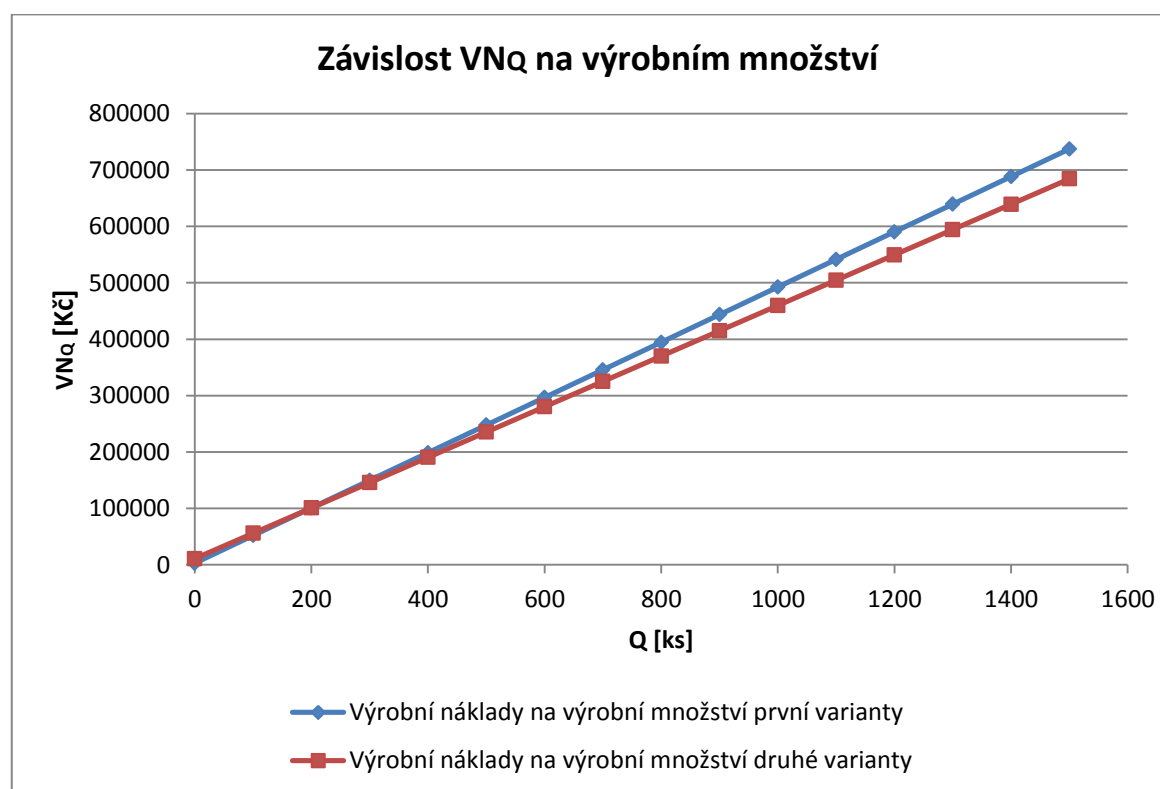
$$u_j = 475,33 - 426,72 - \frac{11000 - 3000}{200} + \frac{1421,33}{100} - \frac{3313,33}{150} = 0,74 \text{ Kč}$$

Grafické závislosti vytvořeny pomocí tabulky (tab. 4.13).

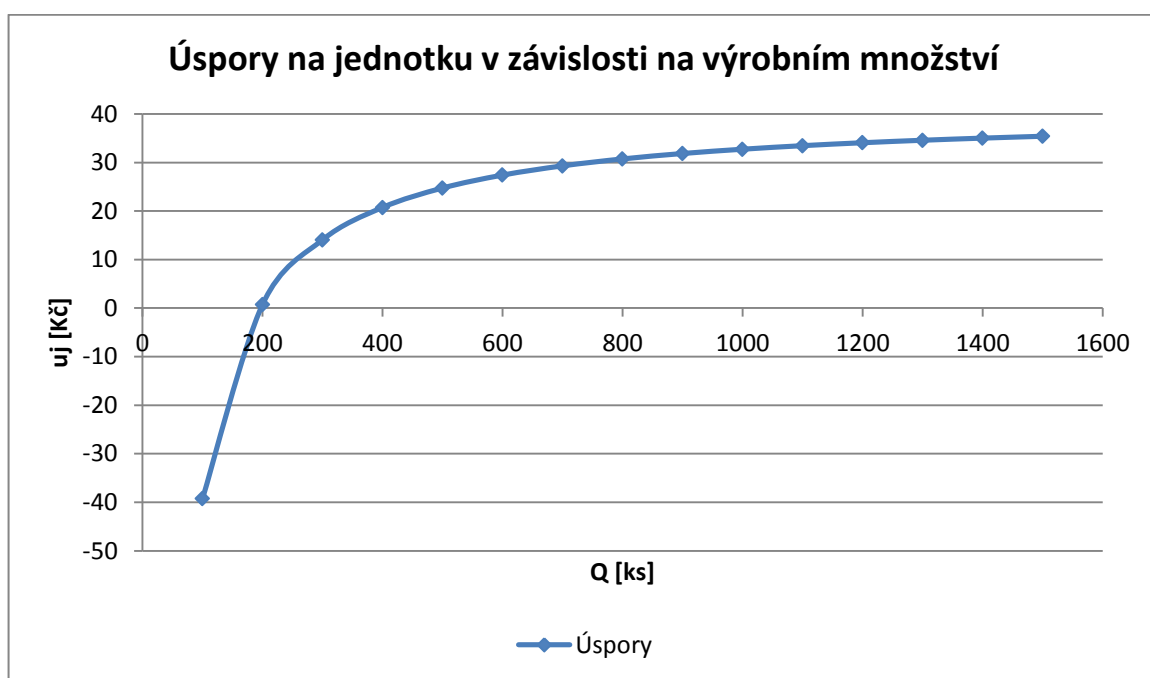
Tab. 4.13 Tabulka vypočtených hodnot pro grafické závislosti

Q [ks]		VNq1	VNq2	uj	Nnd1	Nnd2
1.	2.	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
0	0	3000,00	11000,00	-	1421,33	3313,33
100	100	51954,67	55880,89	-39,26	1421,33	3313,33
200	200	100909,33	100761,78	0,74	1421,33	3313,33
300	300	149864,00	145642,67	14,07	1421,33	3313,33
400	400	198818,67	190523,56	20,74	1421,33	3313,33
500	500	247773,33	235404,44	24,74	1421,33	3313,33
600	600	296728,00	280285,33	27,40	1421,33	3313,33
700	700	345682,67	325166,22	29,31	1421,33	3313,33
800	800	394637,33	370047,11	30,74	1421,33	3313,33
900	900	443592,00	414928,00	31,85	1421,33	3313,33

Q [ks]		VN _{Q1}	VN _{Q2}	u _j	Nnd1	Nnd2
1.	2.	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
1000	1000	492546,67	459808,89	32,74	1421,33	3313,33
1100	1100	541501,33	504689,78	33,47	1421,33	3313,33
1200	1200	590456,00	549570,67	34,07	1421,33	3313,33
1300	1300	639410,67	594451,56	34,58	1421,33	3313,33
1400	1400	688365,33	639332,44	35,02	1421,33	3313,33
1500	1500	737320,00	684213,33	35,40	1421,33	3313,33



Obr. 4.15 Průběh výrobních nákladů dávky na výrobním množství



Obr. 4.16 Průběh úspor na výrobním množství

Z obrázku (obr. 4.15) je zřejmé, že výrobní náklady dávky na výrobním množství jsou lineárně rostoucí funkcí. Tyto náklady se protínají v hodnotě 196,38 ks to znamená, že od 197 ks je varianta druhá výhodnější oproti první.

Průběh úspor (obr. 4.16) znázorňuje ztráty a zisk pro dané hodnoty výrobního množství. Hodnoty pod osou výrobního množství jsou ztráty a hodnoty nad touto osou jsou ziskové. Pro zadaný případ dochází k zisku od výrobního množství 197ks.

4.4 Optimalizace operačních nákladů

Tato kapitola se zabývá konkretizovanou aplikací optimalizace operačních nákladů podle dvou základních kritérií:

- minimálních výrobních nákladů,
- maximální produktivity.

Cílem výpočtu optimalizace operačních nákladů je nalezení nejvhodnější kombinace trvanlivosti a řezné rychlosti tak, aby zvolené kritérium platilo. Vypočtené hodnoty se porovnají s grafickým vyjádřením a posoudí se správnost výpočtu.

Pro výpočet a grafické vyjádření se využil software MS Excel (příloha 4).

4.4.1 Optimalizace operační nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů

Cílem této části optimalizace je nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby zadaná součást byla vyrobena co nejlevněji. To znamená nalezení minimální hodnoty operačních nákladů.

Postup výpočtu je takový, že se stanoví optimální řezná rychlost, optimální hodnota trvanlivosti a zjistí se jednotkový strojní čas. Posledním bodem je stanovení operačních nákladů a jejich grafické znázornění.

Pro výpočet je uvažováno a zadáno:

- pro výpočet není uvažována cena držáku nástroje (vydrží mnohem déle než VBD),
- obrábění se provede na CNC obráběcím centru,
- soustružení probíhá při konstantní řezné rychlosti ($v_c = \text{konst.}$),
- nástroj: VBD ze SK typu P20 (složení WC+TiC+Co) – CNMG 120408N-UP (SUMITOMO AC25 NUP) [14, 23, 24],
- materiál obrobku: ocel 12 050.1,
- tyč kruhová válcovaná za tepla o průměru 60 mm a délky 3 m,
- přířez před-hrubován na průměr 55,5 mm a délky 70 mm,
- náklady na provoz stroje za hodinu: $N_{hs} = 780 \text{ Kč}$,
- náklady na minutu strojní práce: $N_{sm} = \frac{N_{hs}}{60} = \frac{780}{60} = 13 \text{ Kč}$,
- náklady na minutu vedlejší práce: $N_{vm} = 4 \text{ Kč}$,
- čas jednotkové vedlejší práce: $t_{AVp} = 3 \text{ min}$,
- hodnoty t_{A111} , t_{A121} a t_{A131} jsou zanedbatelně malé $= 0$,
- jednotkový čas nepravidelné obsluhy: $t_{AX} = t_{A102} = t_{vn} = 3 \text{ min}$,
- délka náběhu a přeběhu: $l_n, l_p = 3 \text{ mm}$,
- konstanta m z Taylorova vztahu pro materiál 12 050.1 [22]: $m = 6,57$,
- konstanta C_v z Taylorova vztahu pro materiál 12 050.1 [22]: $C_v = 405$
z toho konstanta $C_T = 1,35 \cdot 10^{17}$,
- posuv na otáčku: $f = 0,22 \text{ mm}$,
- náklady na výměnu nástroje za minutu $N_{vnm} = 3 \text{ Kč}$,
- přibližná cena břitové destičky $C_d = 80 \text{ Kč}$,
- počet břitových destiček na nástroje $z_d = 1$,
- počet břitů na destičce $z_b = 2$,
- součinitel využití břitových destiček $s_b = 0,9$,

- počet záběrů: $i = 1$,
- je splněn předpoklad, že N_{vm} a N_{vnm} nejsou výrazně různé,
- hloubka záběru $a_p = 0,25$ mm.



Obr. 4.17 VBD firmy Sumitomo CNMG 120408N-UP [25]

Na obrázku (obr. 4.17) je znázorněna uvažovaná destička, pro zadaný příklad soustružení válcové plochy.

Stanovení optimální řezné rychlosti:

Optimální řezná rychlost se vypočítá ze zadaných hodnot a vztahu (3.55):

$$v_{optN} = \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.55)$$

$$v_{optN} = \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{1,35 \cdot 10^{17} \cdot 13}{(6,57-1) \cdot 0,92 \cdot 53,44} \right)^{\frac{1}{6,57}} = 254,63 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

Optimální řezná rychlost je $254,63 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Stanovení optimální trvanlivosti:

Optimální trvanlivost pro kritérium minimálních výrobních nákladů podle (2.58) a zadaných hodnot:

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{N_{hs}} \tau \cdot (m-1) \quad (2.58)$$

$$T_{optN} = \frac{60.N_T}{N_{hs}} \tau \cdot (m-1) = \frac{60.53,44}{780} \cdot 0,92 \cdot (6,57-1) = 21,09 \text{ min}$$

Optimální hodnota trvanlivosti břitu nástroje je 21,09 min.

Po přepočtu na optimální relativní dráhu nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium minimálních výrobních nákladů (2.62).

$$\frac{60.N_T \cdot \tau \cdot (m-1) \cdot v_f}{N_{hs}} = L_{optN} \quad (2.62)$$

$$v_{optN} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{optN}}{10^3} \quad (2.20)$$

Ze vztahu (2.20) otáčky:

$$n_{optN} = \frac{254,63 \cdot 10^3}{\pi \cdot 55} = 1473,66 \text{ min}^{-1}$$

Po dosazení do vztahu (2.62):

$$L_{optN} = \frac{60.53,44 \cdot 0,92 \cdot (6,57-1) \cdot 1473,66 \cdot 0,22}{780} = 6837,97 \text{ mm}$$

Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu dosahuje hodnoty 6837,97 mm.

Optimální úběr materiálu:

Stanovení optimálního úběru materiálu pro dané kritérium (3.67)

$$U_{optN} = a_p \cdot f \cdot \left(\frac{C_T \cdot N_{sm}}{(m-1) \cdot \tau \cdot N_T} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{0,25}{10} \cdot \frac{0,22}{10} \cdot \left(\frac{1,35201 \cdot 10^{17} \cdot 13}{(6,57-1) \cdot 0,92 \cdot 53,44} \right)^{\frac{1}{6,57}} = 0,140 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Úběr materiálu pro dané kritérium je $0,140 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Ukázkový výpočet se provede pro optimální hodnotu řezné rychlosti a trvanlivosti.

Součinitel poměru skutečného času (délky obráběné součásti a celkové délky součásti) τ pro zadaný případ (2.40):

$$\tau = \frac{l}{L} = \frac{70}{76} = 0,92$$

Jednotkový strojní čas pro zadanou soustruženou součást (2.13):

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D \cdot i}{10^3 \cdot f \cdot v_c} = \frac{(3 + 70 + 3) \cdot \pi \cdot 55 \cdot 1}{10^3 \cdot 0,22 \cdot 254,63} = 0,2344 \text{ min}$$

Výpočet operačních nákladů dané součásti pro kritérium minimálních výrobních nákladů:

Náklady na (jednotkovou) strojní práci (2.3) z předpokladu nákladů na minutu strojní práce $N_{sm} = 13$ Kč:

$$N_{Sp} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 0,2344 \cdot 13 = 3,05 \text{ Kč}$$

Náklady na (jednotkovou) vedlejší práci podle (2.35):

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3,4 = 12 \text{ Kč}$$

Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost (2.75):

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} = 44,44 + 9 = 53,44 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj s VBD (2.81):

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot Z_d}{Z_b \cdot S_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{Z_u} = \frac{80 \cdot 1}{2,0 \cdot 9} + 0 = 44,44 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje (2.85):

$$N_{Tv} = t_{vn} \cdot N_{vnm} = 3,3 = 9 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu ze vztahu (2.38):

$$N_{nv} = N_T \cdot Z_v = 53,44 \cdot 0,0102 = 0,55 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů nástroje vztažené na obrobení jednoho kusu (2.39):

$$Z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau = \frac{0,2344}{21,09} \cdot 0,92 = 0,0102$$

Operační náklady pro výrobu zadané součásti po dosazení výše uvedených složek jsou náklady pro kritérium minimálních výrobních nákladů (2.50):

$$N_c = N_{Sp} + N_{nv} + N_{AVp} = 3,05 + 0,55 + 12 = 15,6 \text{ Kč / ks}$$

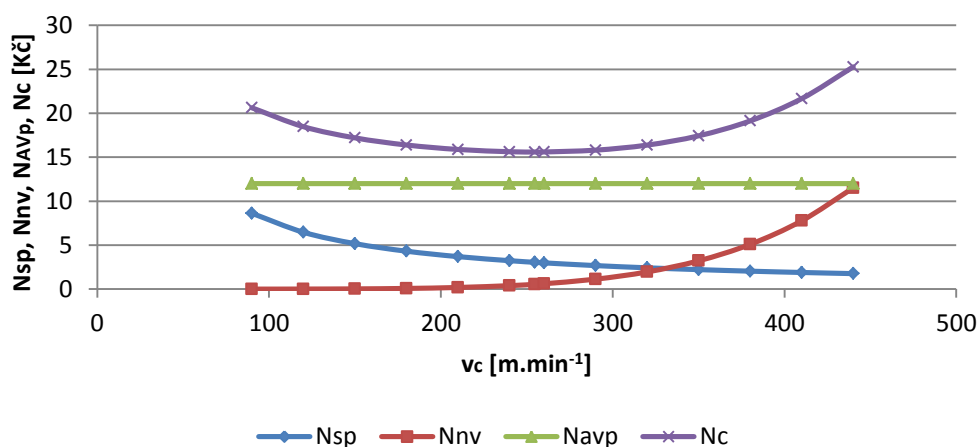
Tabulka (tab. 4.14) a následné grafy (obr. 4.18) a (obr. 4.19) se vygenerovali pomocí MS Excel. Označené hodnoty v tabulce jsou rovny optimálním hodnotám.

Tab. 4.14 Závislost operačních nákladů na řezné rychlosti, popřípadě trvanlivosti

N _{sp} [Kč]	N _{nv} [Kč]	N _{AVp} [Kč]	N _c [Kč]	v _c [m/min]	T [min]
8,62	0,00	12	20,62	90	19570,69
6,47	0,01	12	18,47	120	2956,37
5,17	0,03	12	17,20	150	682,43
4,31	0,08	12	16,39	180	205,99
3,70	0,19	12	15,88	210	74,82
3,23	0,39	12	15,63	240	31,12
3,05	0,55	12	15,59	254,63	21,09

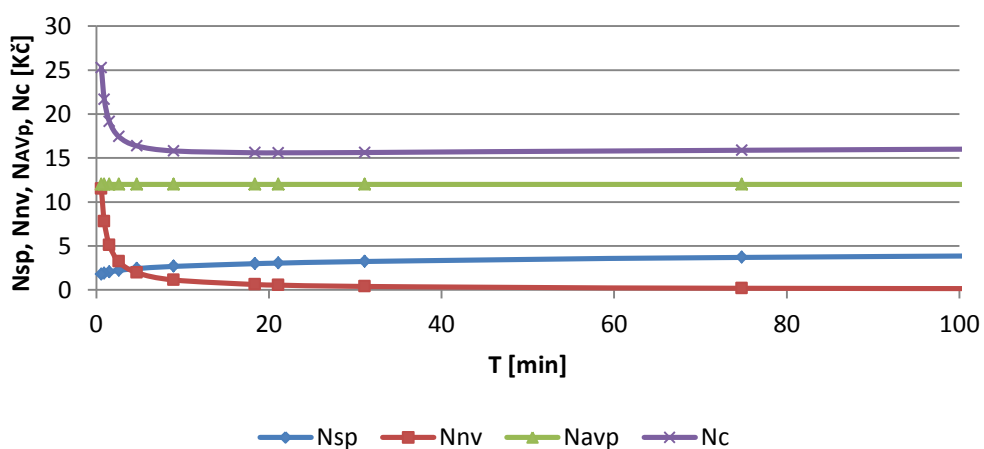
Nsp [Kč]	Nnv [Kč]	NAVp [Kč]	Nc [Kč]	vc [m/min]	T [min]
2,98	0,61	12	15,60	260	18,39
2,68	1,13	12	15,80	290	8,97
2,42	1,95	12	16,38	320	4,70
2,22	3,22	12	17,43	350	2,61
2,04	5,09	12	19,13	380	1,52
1,89	7,77	12	21,66	410	0,92
1,76	11,51	12	25,28	440	0,58

Průběh operační nákladů v závislosti na řezné rychlosti



Obr. 4.18 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti

Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti



Obr. 4.19 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti

Z tabulky (tab. 4.14), ale hlavně z obrázků (obr. 4.18) a (obr. 4.19) je viditelné, že vypočtené hodnoty řezné rychlosti $v_{\text{coptN}} = 254,63 \text{ m.min}^{-1}$ a trvanlivosti $T_{\text{opt}} = 21,09 \text{ min}$ jsou skutečně optimální pro dosažení minimálních nákladů, které činí $N_c = 15,6 \text{ Kč/ks}$. Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu dosahuje hodnoty $6837,97 \text{ mm}$ při trvanlivosti $21,09 \text{ minut}$. Úběr materiálu pro dané kritérium je $0,140 \text{ cm}^3.\text{min}^{-1}$.

4.4.2 Optimalizace operační nákladů pro kritérium maximální výrobnosti

Cílem této části optimalizace je nalezení nejvhodnější kombinace řezné rychlosti a trvanlivosti tak, aby zadaná součást byla vyrobena co nejrychleji. To znamená i nalezení minimální hodnoty operačního času, aby byla splněna podmínka maximální výrobnosti.

Postup výpočtu je takový, že se stanoví optimální řezná rychlost, optimální hodnota trvanlivosti, zjistí se jednotkový strojní čas a vynesou se závislosti na časech. Posledním bodem je stanovení operačních nákladů a jejich grafické znázornění.

Pro výpočet je uvažováno a zadáno:

Zadané hodnoty se shodují se zadanými hodnotami v kapitole 4.4.1 Optimalizace operačních nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů.

Stanovení optimální řezné rychlosti:

Optimální řezná rychlost se vypočítá ze zadaných hodnot a vztahu (3.64):

$$v_{\text{coptV}} = \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3.64)$$

$$v_{\text{coptV}} = \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{AX} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{1,35 \cdot 10^{17}}{0,92 \cdot 3 \cdot (6,57-1)} \right)^{\frac{1}{6,57}} = 267,14 \text{ m.min}^{-1}$$

Optimální řezná rychlost při maximální výrobnosti je $267,14 \text{ m.min}^{-1}$.

Stanovení optimální trvanlivosti:

Optimální trvanlivost pro kritérium maximální výrobnosti podle (2.71) a zadaných hodnot:

$$T_{\text{optV}} = (m-1) \cdot \tau \cdot t_{AX} = (6,57-1) \cdot 0,92 \cdot 3 = 15,39 \text{ min}$$

Optimální hodnota trvanlivosti bříty nástroje je $15,39 \text{ min}$.

Po přepočtu na optimální relativní dráhu nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium maximální výrobnosti (2.74).

$$(m-1) \cdot \tau \cdot t_{AX} \cdot v_f = L_{\text{optV}} \quad (2.74)$$

$$v_{\text{optV}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\text{optV}}}{10^3} \quad (2.20)$$

Ze vztahu (2.20) otáčky:

$$n_{\text{optV}} = \frac{267,14 \cdot 10^3}{\pi \cdot 55} = 1546,06 \text{ min}^{-1}$$

Po dosazení do vztahu (2.74):

$$L_{\text{optV}} = (6,57 - 1) \cdot 0,92 \cdot 3 \cdot 0,22 \cdot 1546,06 = 5235 \text{ mm}$$

Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro zadané kritérium dosahuje hodnoty 5235mm.

Optimální úběr materiálu:

Stanovení optimálního úběru materiálu pro dané kritérium (3.68)

$$U_{\text{optV}} = a_p \cdot f \cdot \left(\frac{C_T}{\tau \cdot t_{\text{AX}} \cdot (m-1)} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{0,25}{10} \cdot \frac{0,22}{10} \cdot \left(\frac{1,35201 \cdot 10^{17}}{0,92 \cdot 3 \cdot (6,57-1)} \right)^{\frac{1}{6,57}} = 0,147 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Úběr materiálu pro dané kritérium je $0,147 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Ukázkový výpočet se provede pro optimální hodnotu řezné rychlosti a trvanlivosti.

Součinitel poměru skutečného času (délky obráběné součásti a celkové délky součásti) τ pro zadaný případ (2.40):

$$\tau = \frac{l}{L} = \frac{70}{76} = 0,92$$

Jednotkový strojní čas pro zadanou soustruženou součást (2.13):

$$t_{\text{AS}} = \frac{L}{v_f} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot \pi \cdot D \cdot i}{10^3 \cdot f \cdot v_c} = \frac{(3 + 70 + 3) \cdot \pi \cdot 55 \cdot 1}{10^3 \cdot 0,22 \cdot 267,14} = 0,2234 \text{ min}$$

Strojní čas pro zadaný případ je roven hodnotě 0,2234 min.

Čas jednotkové vedlejší práce je dán $t_{\text{AVp}} = 3 \text{ min}$.

Jednotkový čas nepravidelné obsluhy: $t_{\text{AX}} = 3 \text{ min}$.

Stanovení operačního času:

Operační čas jednotkové práce udává vztah (2.63)

$$t_{\text{A0}} = t_{\text{AS}} + t_{\text{AV}} + \frac{t_{\text{AX}}}{Q_T} = 0,2234 + 3 + \frac{3}{74,88} = 3,264 \text{ min}$$

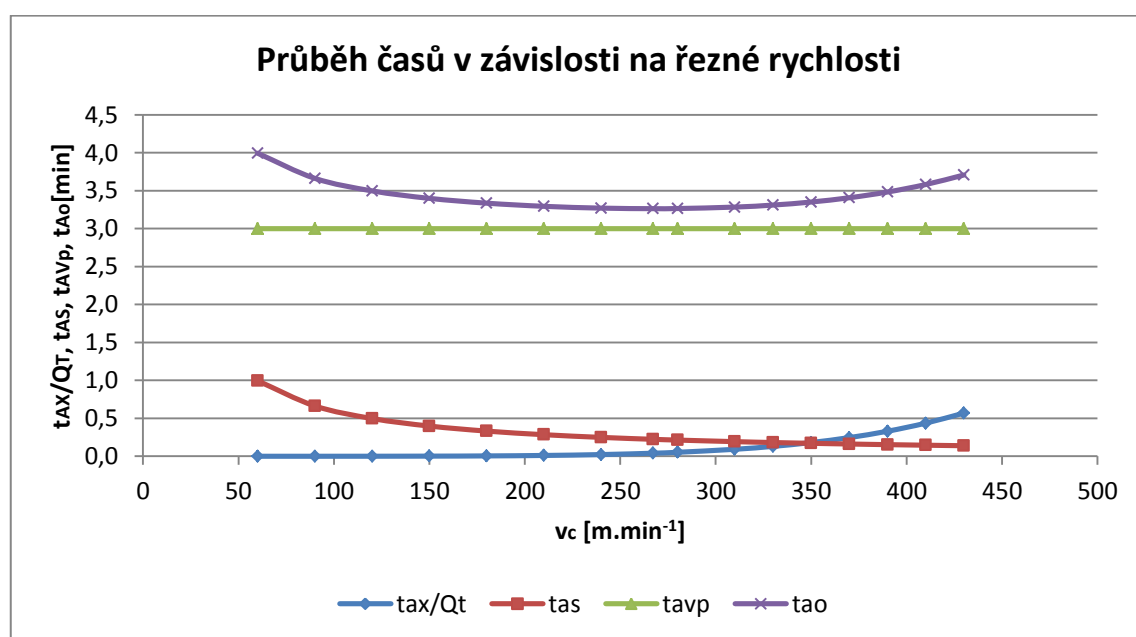
kde počet obrobených kusů za jednu trvanlivost je dán:

$$Q_T = \frac{T}{\tau \cdot t_{AS}} = \frac{15,39}{0,92 \cdot 0,2234} = 74,88$$

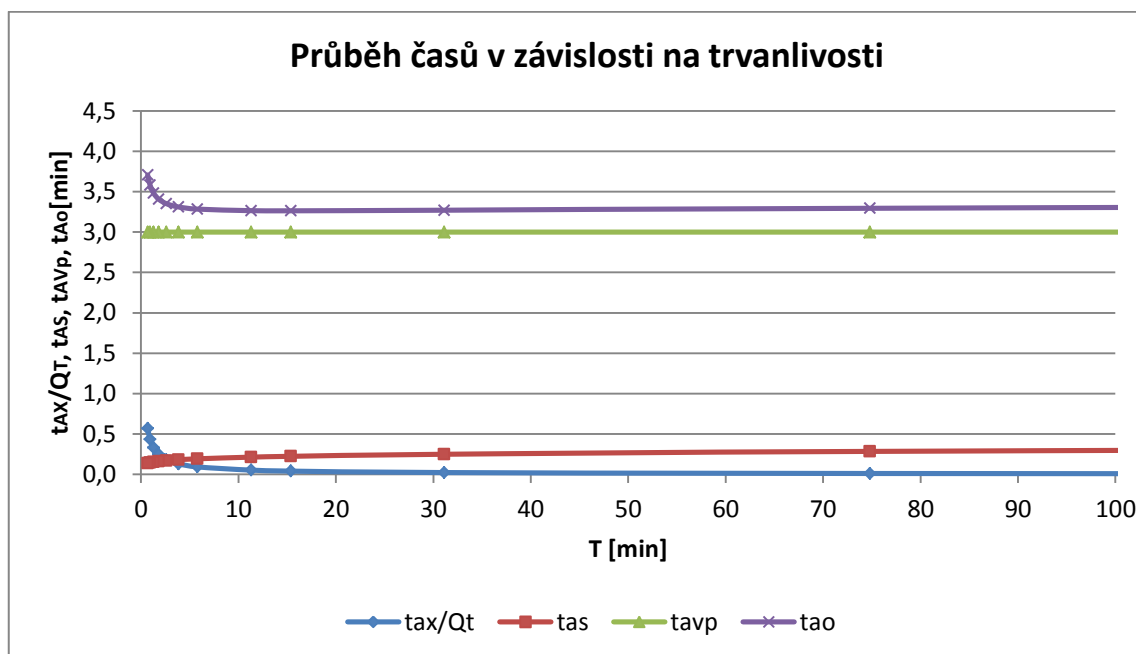
Tabulka (tab. 4.15) a následné grafy (obr. 4.20) a (obr. 4.21) se vygenerovali pomocí MS Excel. Označené hodnoty v tabulce jsou rovny optimálním hodnotám.

Tab. 4.15 Závislost časů na řezné rychlosti a trvanlivosti

t_{Ax}/Q_T [min]	t_{AS} [min]	t_{Avp} [min]	t_{Ao} [min]	v_c [m/min]	T [min]
0,000	0,995	3,00	3,995	60	280883,22
0,000	0,663	3,00	3,663	90	19570,69
0,000	0,497	3,00	3,498	120	2956,37
0,002	0,398	3,00	3,400	150	682,43
0,004	0,332	3,00	3,336	180	205,99
0,010	0,284	3,00	3,295	210	74,82
0,022	0,249	3,00	3,271	240	31,12
0,040	0,223	3,00	3,264	267,14	15,39
0,052	0,213	3,00	3,265	280	11,30
0,092	0,193	3,00	3,284	310	5,79
0,130	0,181	3,00	3,311	330	3,84
0,181	0,171	3,00	3,351	350	2,61
0,246	0,161	3,00	3,407	370	1,81
0,330	0,153	3,00	3,483	390	1,28
0,436	0,146	3,00	3,582	410	0,92
0,569	0,139	3,00	3,707	430	0,67



Obr. 4.20 Průběh časů v závislosti na řezné rychlosti



Obr. 4.21 Průběh časů v závislosti na trvanlivosti

Z tabulky (tab. 4.15) a z obrázků (obr. 4.20), (obr. 4.21) je viditelné, že vypočtené hodnoty řezné rychlosti $v_{\text{coptV}} = 267,14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a trvanlivosti $T_{\text{optV}} = 15,39 \text{ min}$ jsou skutečně optimální pro dosažení operačního času, který činí $t_{A0} = 3,264 \text{ min}$.

Pro zhodnocení průběhu nákladů na trvanlivosti a řezné rychlosti se určí jednotlivé hodnoty operačních nákladů.

Náklady na (jednotkovou) strojní práci (2.3) z předpokladu nákladů na minutu strojní práce $N_{sm} = 13 \text{ Kč}$:

$$N_{Sp} = t_{AS} \cdot N_{sm} = 0,2234 \cdot 13 = 2,905 \text{ Kč}$$

Náklady na (jednotkovou) vedlejší práci podle (2.35):

$$N_{AVp} = t_{AVp} \cdot N_{vm} = 3,4 = 12 \text{ Kč}$$

Náklady na břit nástroje a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost (2.75):

$$N_T = N_{Tn} + N_{Tv} = 44,44 + 9 = 53,44 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj s VBD (2.81):

$$N_{Tn} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{80,1}{2,0,9} + 0 = 44,44 \text{ Kč}$$

Náklady na výměnu nástroje (2.85):

$$N_{Tv} = t_{vn} \cdot N_{vnm} = 3,3 = 9 \text{ Kč}$$

Náklady na nástroj a jeho výměnu ze vztahu (2.38):

$$N_{nv} = N_T \cdot z_v = 53,44 \cdot 0,0133 = 0,715 \text{ Kč}$$

Počet výměn břitů nástroje vztažené na obrobení jednoho kusu (2.39):

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} \cdot \tau = \frac{0,2234}{15,39} \cdot 0,92 = 0,0133$$

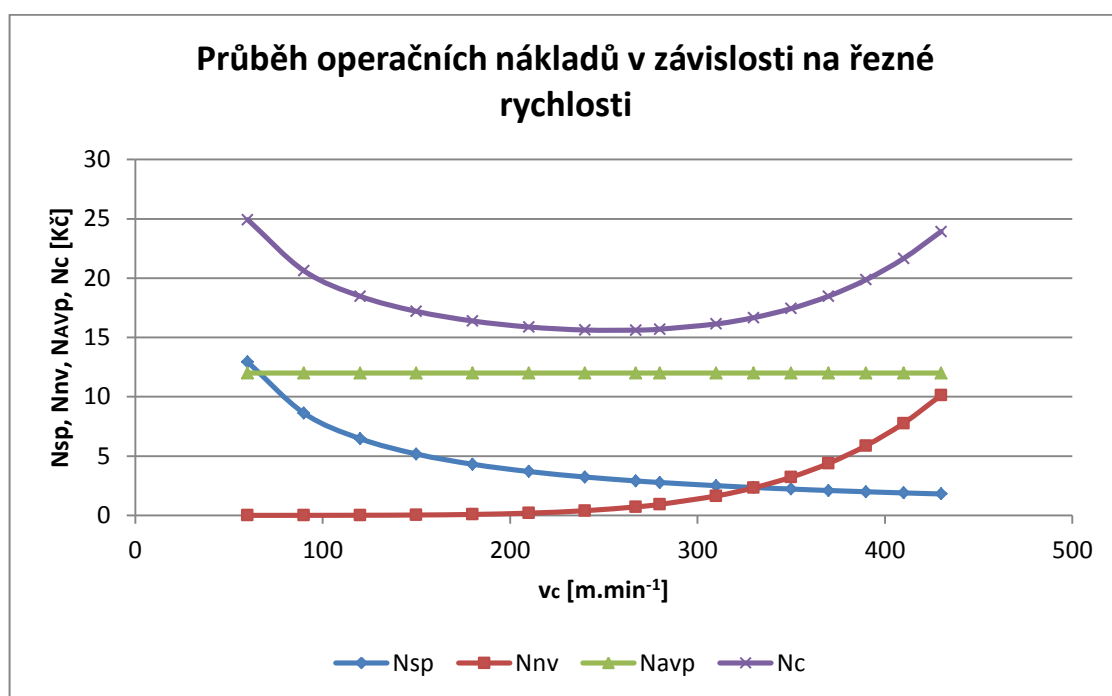
Operační náklady pro výrobu zadané součásti po dosazení výše uvedených složek jsou náklady pro kritérium maximální výrobnosti (2.50):

$$N_c = N_{Sp} + N_{nv} + N_{AVp} = 2,905 + 0,715 + 12 = 15,619 \text{ Kč / ks}$$

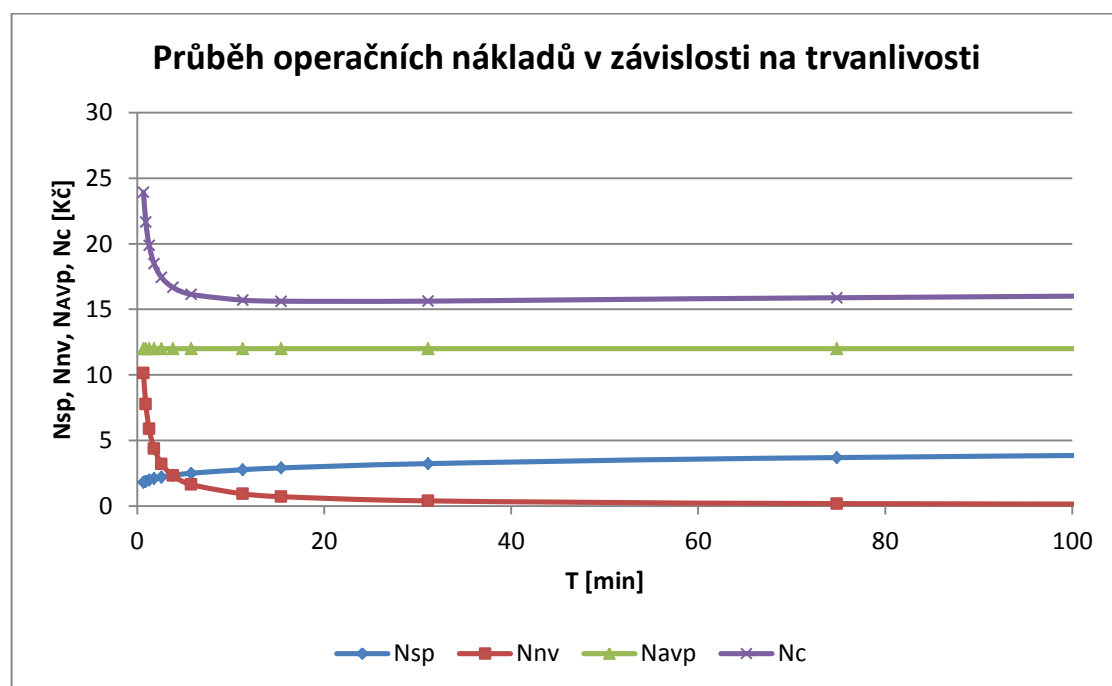
V tabulce (tab. 4.16) jsou jednotlivé hodnoty operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti a řezné rychlosti.

Tab. 4.16 Závislost nákladů na řezné rychlosti a trvanlivosti

N _{sp} [Kč]	N _{nv} [Kč]	N _{AVp} [Kč]	N _c [Kč]	v _c [m/min]	T [min]
12,933	0,000	12	24,933	60	280883,22
8,622	0,002	12	20,624	90	19570,69
6,466	0,008	12	18,475	120	2956,37
5,173	0,029	12	17,202	150	682,43
4,311	0,079	12	16,390	180	205,99
3,695	0,187	12	15,882	210	74,82
3,233	0,393	12	15,627	240	31,12
2,905	0,715	12	15,619	267,14	15,39
2,771	0,928	12	15,700	280	11,30
2,503	1,637	12	16,140	310	5,79
2,351	2,319	12	16,670	330	3,84
2,217	3,218	12	17,435	350	2,61
2,097	4,385	12	18,482	370	1,81
1,990	5,880	12	19,869	390	1,28
1,893	7,768	12	21,661	410	0,92
1,805	10,128	12	23,933	430	0,67



Obr. 4.22 Průběh operačních nákladů v závislosti na řezné rychlosti



Obr. 4.23 Průběh operačních nákladů v závislosti na trvanlivosti

Z tabulky (tab. 4.16) a grafů (obr. 4.22), (obr. 4.23) je viditelné, že s rostoucí řeznou rychlostí se snižuje trvanlivost břítu nástroje podle Taylorova vztahu. S rostoucí řeznou rychlostí rostou náklady na nástroj a jeho výměnu a naproti tomu se náklady na strojní práci snižují.

S klesající se trvanlivostí bříty nástroje rostou náklady na nástroj a jeho výměnu. Náklady na strojní práci mírně se mírně snižují s klesající trvanlivostí.

Relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium maximální výrobnosti dosahuje hodnoty 5235 mm při trvanlivosti 15,39 minut.

Úběr materiálu pro dané kritérium je $0,147 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Z tabulky (tab. 4.16), ale hlavně z obrázků (obr. 4.22) a (obr. 4.23) je viditelné, že vypočtené hodnoty řezné rychlosti $v_{\text{coptV}} = 267,14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a trvanlivosti $T_{\text{opt}} = 15,39 \text{ min}$ jsou skutečně optimální. Celkové operační náklady pro dosažení maximální výrobnosti činí $N_c = 15,619 \text{ Kč/ks}$.

DISKUZE

S rostoucí řeznou rychlostí klesá jednotkový strojní čas a trvanlivost řezného nástroje v důsledku jeho opotřebení také klesá. Náklady na strojní práci N_{sp} s rostoucí řeznou rychlostí klesají, protože jednotkový strojní čas obráběcího procesu klesá.

Náklady N_{nv} a čas na nástroj a jeho výměnu v důsledku růstu řezné rychlosti rostou z důvodu klesání trvanlivosti, což má za následek častější výměnu nástroje.

Při snižování řezné rychlosti získává proces obrábění opačného případu než při zvyšování řezné rychlosti. To znamená, že náklady na strojní práci a čas se zvyšují. Náklady na nástroj a jeho výměnu klesají v důsledku zvyšování trvanlivosti břitu a to má za následek snížení počtu výměn nástroje.

Z uvedeného důvodu je vhodné nalézt optimální hodnoty pro minimální náklady nebo maximální výrobnost.

Čas a náklady N_{avp} jednotkové vedlejší práce jsou konstantní. Vedlejší práce se realizuje především za klidu stroje, proto náklady ani čas nezávisí na řezné rychlosti ani trvanlivosti břitu nástroje.

Při porovnání obou kritérií je viditelné, že obě kritéria nabývají jiných hodnot nákladových položek, řezných podmínek a trvanlivosti. Pro snížení nákladových položek se navrhla následující řešení:

➤ **Náklady na strojní práci N_{sp} :**

- zvážit vhodnost polotovaru přířez, odlitek, výkovek - záleží na ceně, kvalitě a možnosti výroby
- volba výrobního zařízení – zvážit jeho optimálnost pro výrobu dané součásti. Jestli lze využít energeticky méně náročné zařízení, které by mělo za následek snížení nákladů na minutu strojní práce.
- snížení koeficientu oprav a údržby stroje, to znamená využití kvalitnějšího stroje

➤ **Náklady na jednotkovou vedlejší práci N_{avp} :**

- snížení časů na jednotkovou vedlejší práci - využití speciálních přípravků, úprava výrobních postupů (zvýšení kvality výrobků), zlepšení organizace výroby (tzv. metoda 5S, 6 sigma, kanban)

➤ **Náklady na nástroj a jeho výměnu N_{nv} :**

- optimalizace řezných podmínek pro zvolené kritérium
- volba nástrojového materiálu s vyšší odolností vůči opotřebení
- změna geometrie nástroje
- změna řezného prostředí

ZÁVĚR

V této práci jsou analyzovány jednotlivé složky výrobních nákladů v procesu obrábění a jejich optimalizace pomocí vybraných kritérií.

Jednotlivé složky celkových operačních výrobních nákladů se specifikovaly v první kapitole a dále se provedl jejich rozbor. Do těchto složek patří náklady na jednotkovou práci (strojní a vedlejší), na nástroj a jeho výměnu, na materiál a režijní. Na jednotlivé složky operačních nákladů má vliv mnoho faktorů, které se musí zohlednit při jejich optimalizaci a výrobě součástí.

Jednotkový strojní čas, opotřebení, trvanlivost bříty, polotovaru materiálu a jeho stupeň využití to vše mimo jiné má vliv na celkové operační náklady.

Index produktivity je jedním z kritérií pro optimalizaci výrobního procesu, i když s náklady přímo nesouvisí. Volba technologického prostředku (výrobního zařízení) se stanoví na základě indexu produktivity a velikosti výrobní dávky. Koeficient produktivity obrábění je jednou z nejdůležitějších složek indexu produktivity. Podnik jako takový se snaží navyšovat index produktivity proto, aby byl na trhu konkurence schopný.

Pro zjištění od kdy se vložená investice vrátí, se používá ukazatel nákladové návratnosti, který závisí na velikosti úspor na jeden kus.

Náklady (na přímý materiál, na přímé mzdy, na provoz stroje) závislé na výrobním množství, náklady nezávislé na počtu kusů v dávce (dávkové mzdy, náklady na jeden kus), náklady nezávislé na výrobním množství (výrobní náklady na výrobní množství) a mnoho dalšího má vliv na určení kritického výrobního množství. Pomocí kritického výrobního množství se posoudí technologické varianty v těch položkách, které se mění. Obecně se při obnově nebo navržení strojírenské výroby využívá několik technologických variant, které jsou čím dál tím efektivnější při určitém výrobním množství a výrobní dávce. Obecně jsou různé varianty výhodné pro různé velikosti výrobního množství a dávky.

Operační výrobní náklady se optimalizují podle kritéria minimálních výrobních nákladů a podle kritéria maximální produktivity. Pro obě kritéria je stanoven výpočet optimální řezné rychlosti, trvanlivosti, úběru materiálu a relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu.

Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální produktivity je přímo závislá na nákladech na minutu strojní práce a nákladech na břit nástroje a jeho výměnu vztaženou na jednu trvanlivost.

Optimální řezná rychlost pro kritérium maximální produktivity nezávisí na nákladech jak předchozí kritérium, ale je závislá na jednotkovém času nepravidelné obsluhy. U tohoto kritéria jde o maximální počet vyrobených kusů, tudíž jde o co možná nejmenší operační čas jednotkové práce.

Uvedené matematické formulace optimalizace operačních nákladů jsou jedny z mnoha dalších matematických formulací, do kterých patří vícekritériální optimalizace, metoda simplex, podle omezení (výkonem, krouticím momentem) a další.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KALNAŠI, R. *Ekonomická analýza obráběcího procesu. Diplomová práce.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 91 s. 16 příloh. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
2. MÁDL, J. a KVASNIČKA, I. *Optimalizace obráběcího procesu.* Praha: ČVUT. 1998. 168 s. ISBN 80-01-01864-6.
3. ŘEHOŘ, M. *Technicko-ekonomické hodnocení procesu obrábění. Strojírenská technologie: Časopis pro vědu, výzkum a výrobu [online].* červen 2012, roč. XVII, č.3 [vid. 2012-10-11]. ISSN 1211-4162. Dostupné z: <http://casopis.strojirenskatechnologie.cz/>
4. KŘÍŽÍK, R. a VÁVRA, P. *Strojírenská příručka 7. svazek.* 1.vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 1996. 212 s. ISBN 80-7183-024-0.
5. *Náklady – členění [online].* 16 s. vytvořeno 2007-10-26 [vid. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://web.ft.utb.cz/cs/docs/PE5 - Naklady, bod zvratu.pdf>
6. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění.* 2.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
7. ZEMČÍK, O. *Technologická příprava výroby.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
8. PROKOP, J. *Technologická příprava výroby. Přednáška.* Brno: VUT FSI, 2012. [cit. 2012-11-30].
9. CHLADIL, J. *Teorie obrábění. Přednáška.* Brno: VUT FSI. 2012. [cit. 2012-10-05].
10. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky.* Přel. M. KUDELA. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook.* ISBN 91-97 22 99-4-6.
11. PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214.
12. HUMÁR, A. *Technologie 1- Technologie obrábění – 1.část, Studijní opory pro magisterskou formu studia [online].* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003. 138 s. [vid. 2012-10-04]. Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/Technologie%20I/TI_TO-1cast.pdf
13. HUMÁR, A. et al. *Experimentální metody: Syllabus pro magisterský studijní program 23-01-T, Strojní inženýrství obor strojírenská technologie - obrábění - tváření, svařování - management, II. stupeň. 2. ročník magisterského studia [online].* Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2003. 83 s. [vid. 2012-10-04]. Dostupné z:

- http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody_cviceni_forejt_piska_humar_janicek.pdf
14. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Soustružení 2012*. Katalog společnosti Pramet Tools. Šumperk: Pramet Tools, s.r.o., 2012. 342 s.
 15. PAVELKA, R. *Analýza vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 110 s. 12 příloh. Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.
 16. FOREJT, M. a PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.
 17. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie výroby II: Řešené příklady* [online]. Zpracováno v rámci projektu studijních opor v kombinované formě bakalářského studia obor 23-07-7 strojírenská technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 63 s. [vid. 2012-11-02]. Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/TechnVyroby_II.pdf
 18. KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Speciální technologie obrábění: Řešené příklady* [online]. Učební texty vysokých škol. Zpracováno v rámci projektu studijních opor, obor 23-07-7 strojírenská technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 2003. 127 s. [vid. 2012-11-02]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/ust/Spectech.v.obr.pdf>
 19. RYBKA, L. *Ekonomická analýza výrobního procesu. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
 20. DRDA, D. *Technologické a ekonomické parametry řezného nástroje. Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 61 s. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
 21. HLUCHÝ, M. a HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2 – Koroze, základy obrábění, výrobní postupy, 2. díl*. 2.vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 2001. 176 s. ISBN 80-7183-245-6.
 22. VIGNER, M., Z. PŘIKRYL a kol. *Obrábění: Technický průvodce*, svazek 61. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 808 s. ISBN 04-250-84.
 23. HUMÁR Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1.vyd. Brno: Vydalo CCB spol. s r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
 24. *Sumitomo* [online]. 19 s. poslední revize 2008-10-20 [vid. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.mptools.in/MP-Metal%20Cutting%20Tools/Contents-Motherson/sumi-E-A.pdf>
 25. *x10 Sumitomo Carbide Inserts CNMG 120408N-UP H1090 EH10Z new*. Ebay. [online]. [vid. 2013-03-16]. Dostupné z: <http://www.ebay.com.au/itm/x10-SUMITOMO-CARBIDE-INSERTS-CNMG-120408N-UP-H1090-EH10Z-NEW->

[/251190849728?pt=UK_BOI_Metalworking_Milling_Welding_Metalworking_Supplies_ET&hash=item3a7c2430c0#ht_520wt_1271](#)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
NO	[-]	nástrojová ocel
RO	[-]	rychlořezná ocel
ŘK	[-]	řezná keramika
SK	[-]	slinutý karbid
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
C_d	[Kč]	cena břitové destičky
C_E	[Kč]	cena spotřebovaných energií za hodinu
CFS_{EFPL}	[hod]	roční časový fond stroje při jedné směně
C_{mat}	[Kč]	cena materiálu za kilogram
C_n	[Kč]	cena nástroje
C_{pn}	[Kč]	cena pořízení nástroje
C_s	[Kč]	prodejní cena vyřazených strojů
C_{si}	[Kč]	cena stroje plus náklady na instalaci stroje
C_T	[-]	konstanta
C_{tn}	[Kč]	cena tělesa nástroje
C_v	[-]	konstanta
C_{vT}	[-]	konstanta pro stanovenou trvanlivost
$C_{vžš}$	[Kč]	cena výkupu železného šrotu za kilogram
C_{zn}	[Kč]	zbytková cena nástroje
D	[mm]	průměr obrobku (nebo nástroje)
D_1	[mm]	maximální průměr
D_2	[mm]	minimální průměr
D_s	[mm]	průměr frézy
$F_{1,2}$	[hod]	efektivní časový fond pracoviště za rok při variantě 1,2
F_2	[hod]	efektivní časový fond pracoviště za rok varianty 2

H	[mm]	celkový přídavek na obrábění
HRP_{os}	[Kč]	režijní paušál ostřírny za hodinu
HRP_{SP}	[Kč]	hodinový režijní paušál (střediskových nákladů)
I	[Kč]	investiční náklady
KB	[mm]	šířka žlábků opotřebení čela
KM	[mm]	poloha středu žlábků opotřebení čela
KT	[mm]	hloubka žlábků opotřebení čela
L	[mm]	dráha nástroje ve směru posuvu
L_T	[mm]	celková délka tyčového materiálu
L_{optN}	[mm]	optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium minimálních výrobních nákladů
L_{optV}	[mm]	optimální relativní dráha nástroje vůči obrobku ve směru posuvu pro kritérium maximální výrobnosti
M_o	[Kč]	hodinové mzdové náklady na operátora
M_{os}	[Kč]	mzdové náklady na ostříče za hodinu
M_s	[Kč]	mzdové náklady na seřizovače za hodinu
M_{tAC}	[Kč]	mzdový tarif pro čas t_{AC} za hodinu
M_{tBC}	[Kč]	mzdový tarif pro čas t_{BC} za hodinu
N_{1pn}	[Kč.min ⁻¹]	náklady na jednu minutu provozu nástroje
N_{1pno}	[Kč.min ⁻¹]	náklady na jednu minutu provozu nástroje, který se přeastřuje
N_{1pnv}	[Kč.min ⁻¹]	náklady na jednu minutu provozu nástroje s více břity
N_{Ap}	[Kč]	náklady na jednotkovou práci
N_{ASp}	[Kč]	náklady na jednotkovou strojní práci
N_{AVp}	[Kč]	náklady na jednotkovou vedlejší práci
N_c	[Kč]	celkové operační náklady
N_{hs}	[Kč]	náklady na provoz stroje za hodinu
N_m	[kg]	norma spotřeby materiálu
N_{mAC}	[Kč]	náklady na přímé mzdy a provozní režii za čas t_{AC}
N_{mat}	[Kč]	náklady na materiál vztažené na jeden polotovar

N_{mBC}	[Kč]	náklady na dávkové mzdy včetně provozní režie
N_{mo}	[Kč]	norma spotřeby materiálu u odlitku
N_{nd}	[Kč]	náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce
$N_{nd1,2}$	[Kč]	náklady na jeden kus nezávislé na počtu kusů ve výrobní dávce pro obě varianty
N_{nQ}	[Kč/rok]	náklady nezávislé na výrobním množství
$N_{nQ1,2}$	[Kč/rok]	náklady nezávislé na výrobním množství pro obě varianty
N_{nv}	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jeden kus
N_o	[Kč]	náklady závislé na počtu ostření
N_{ob}	[Kč]	náklady na obrábění
N_p	[Kč]	náklady na výrobu polotovaru
N_{pm}	[Kč]	náklady na přímý materiál
N_{pn}	[Kč]	náklady na zhotovení nového polotovaru
N_{ps}	[Kč]	náklady na zhotovení stávajícího polotovaru
N_{psAC}	[Kč]	náklady na provoz stroje za čas t_{AC}
N_{psBC}	[Kč]	náklady na provoz stroje za čas t_{BC}
N_s	[Kč]	náklady na strojní práci
N_{sm}	[Kč]	náklady na minutu strojní práce
N_{sp}	[Kč]	náklady na strojní práci
N_T	[Kč]	náklady na nástroj a jeho výměnu vztažené na jednu trvanlivost
N_{Tn}	[Kč]	náklady na provoz nástroje vztažené na jednu trvanlivost
N_{Tv}	[Kč]	náklady na jednu výměnu nástroje
N_v	[Kč]	náklady na vedlejší práci
N_{vm}	[Kč]	náklady na minutu vedlejší práce
N_{vnm}	[Kč]	náklady na výměnu nástroje za minutu
N_z	[Kč]	náklady na jeden kus závislé na výrobním množství
$N_{z1,2}$	[Kč]	náklady na jeden kus závislé na výrobním množství pro obě varianty
O_s	[Kč]	odpis stroje za hodinu

Q	[ks]	výrobní množství
Q_c	[kg]	hmotnost materiálu vkládaného do pece k ohřevu
Q_k	[kg]	jednotková hmotnost nevyužitého konce tyče
Q_o	[kg]	jednotková hmotnost hotové součástky
Q_p	[kg]	jednotková hmotnost polotovaru
Q_s	[kg]	čistá jednotková hmotnost součástky
Q_T	[-]	počet kusů obrobených za jednu trvanlivost nástroje
Q_v	[kg]	jednotková hmotnost výkovku
R	[Kč]	provozní režie mimo nákladů na provoz stroje
SM	[-]	směnnost
T	[min]	trvanlivost nástroje
T_i	[min]	trvanlivost jednotlivých ostří destičky
U	[cm ³ .min ⁻¹]	úběr materiálu
U_c	[mm]	šířka řezného nástroje
U_m	[Kč]	úspory v nákladech na materiál
U_n	[roky]	ukazatel nákladové návratnosti
U_{nr}	[Kč]	roční úspory nákladů
U_o	[Kč]	úspory v nákladech při obrábění polotovaru
VB	[mm]	průměrné opotřebení hřbetu
VB_C	[mm]	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
VB_{max}	[mm]	maximální opotřebení hřbetu
VB_N	[mm]	vrubové opotřebení hřbetu
VN_d	[Kč]	celkové výrobní náklady na výrobní dávku
VN_Q	[Kč]	výrobní náklady na výrobní množství
VN_{Q1,2}	[Kč]	výrobní náklady na výrobní množství pro variantu 1,2
VR	[mm]	radiální opotřebení špičky
Z_m	[kg]	celková ztráta materiálu vztažená na jednotku
Z_s	[rok]	životnost stroje

q_k	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé z nevyužitého konce tyče
q_o	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé obráběním polotovaru
q_{op}	[kg]	jednotkové ztráty opalem při ohřevu
q_{prop}	[kg]	jednotkové ztráty materiálu propalem
q_u	[kg]	jednotkové ztráty vzniklé dělením tyčového materiálu
q_v	[kg]	jednotkový odpad materiálu z výronku
s_b	[-]	součinitel využití břitových destiček
t_A	[min]	jednotkový čas
t_{A1}	[min]	čas jednotkové práce
t_{A101}	[min]	čas jednotkové práce pravidelné
t_{A102}	[min]	čas jednotkové práce nepravidelný
t_{A111}	[min]	čas jednotkové práce za klidu stroje v operaci
t_{A121}	[min]	čas jednotkové práce za chodu stroje v operaci
t_{A131}	[min]	čas jednotkové práce strojně ruční
t_{A2}	[min]	jednotkový čas obecně nutných přestávek v operaci
t_{A201}	[min]	jednotkový čas obecně nutných přestávek
t_{A211}	[min]	jednotkový čas obecně nutných přestávek za klidu stroje
t_{A221}	[min]	jednotkový čas obecně nutných přestávek za chodu stroje
t_{A3}	[min]	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek
t_{A31}	[min]	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za klidu stroje
t_{A32}	[min]	jednotkový čas podmíněčně nutných přestávek za chodu stroje
$t_{ABC1,2}$	[min]	jednotkový čas s podílem času dávkového a směnového pro variantu 1,2
t_{AC}	[min]	jednotkový čas s podílem času směnového
$t_{AC1,2}$	[min]	jednotkový čas s podílem času směnového při variantě 1,2
t_{AC2}	[min]	jednotkový čas s podílem času směnového technologicky vyspělejší varianty

t_{Ao}	[min]	operační čas jednotkové práce
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
t_{ASn}	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní frekvenci otáček
t_{ASp}	[min]	čas jednotkové strojní práce
t_{ASv}	[min]	jednotkový strojní čas při konstantní řezné rychlosti
t_{AV}	[min]	jednotkový vedlejší čas
t_{AVp}	[min]	čas jednotkové vedlejší práce
t_{AX}	[min]	čas jednotkové nepravidelné obsluhy (totožný s t_{A102})
t_B	[min]	čas dávkový
t_{BC}	[min]	čas dávkový s podílem času směnového
$t_{BC1,2}$	[min]	čas dávkový s podílem času směnového při variantě 1,2
t_{BC2}	[min]	čas dávkový s podílem času směnového na dávku technologicky vyspělejší varianty
$t_{dv1,2}$	[min]	čas obrobení jedné výrobní dávky při variantě 1,2
t_{oP}	[min]	čas obráběcího procesu
t_{os}	[min]	čas ostření nástroje
t_{vn}	[min]	čas na výměnu nástroje
u_j	[Kč]	úspory na jednotku výroby
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_{coptN}	[m.min ⁻¹]	optimální řezná rychlost pro kritérium minimálních výrobních nákladů
v_{coptV}	[m.min ⁻¹]	optimální řezná rychlost pro kritérium maximální výrobnosti
v_{cT}	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost pro stanovenou trvanlivost
v_f	[mm.min ⁻¹]	posuvová rychlost
x	[-]	počet možných ostření nástroje
x_v	[-]	exponent
y_v	[-]	exponent
z	[-]	počet zubů frézy
z_b	[-]	počet břitů na destičce

z_d	[-]	počet břitových destiček na nástroji
z_m	[kg]	celkové jednotkové ztráty při výrobě součásti obráběním
z_o	[-]	počet možných přeostržení nástroje
z_u	[-]	předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje
z_v	[-]	počet výměn břitů nebo ostržení nástroje, vztažený na obrobení jednoho kusu
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
τ	[-]	poměr dráhy nástroje ve směru posuvu a délky obráběné plochy

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Vytvořený program v softwaru Microsoft Excel, který slouží pro výpočet indexu produktivity obrábění. Obsahuje příslušné tabulky a grafy.
- Příloha 2 Vytvořený program v softwaru Microsoft Excel, který slouží pro výpočet nákladové návratnosti. Obsahuje příslušné tabulky a grafy.
- Příloha 3 Vytvořený program v softwaru Microsoft Excel, který slouží pro výpočet kritické výrobní dávky a úspor na jednotku výroby. Obsahuje příslušné tabulky a grafy.
- Příloha 4 Vytvořený program v softwaru Microsoft Excel, který slouží pro výpočet optimalizace operačních nákladů pro kritérium minimálních výrobních nákladů a pro kritérium maximální produktivity. Obsahuje příslušné tabulky a grafy.

