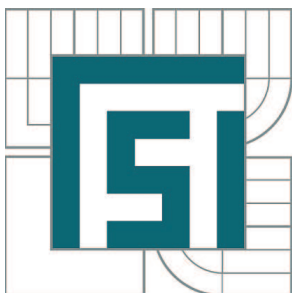


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE TECHNOLOGIE ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ

APLICATION OF TECHNOLOGY WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADIM SLOUKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radim Slouka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace technologie elektroerozivního drátového řezání

v anglickém jazyce:

Aplication of Technology Wire Electrical Discharge Machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace elektroerozivního drátového řezání v podmínkách středně velké strojírenské firmy.

Cíle diplomové práce:

Úvod

Základní princip nekonvenční metody drátové elektroeroze.

Možnosti využití drátové elektroerozivní technologie v podmínkách středně velké strojírenské firmy.

Technologie drátové elektroeroze pro typového představitele.

Kontrola přesnosti elektroerozivních drátových strojů.

Směry dalšího vývoje elektroerozivní technologie drátového řezání v podmínkách firmy.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Závěr

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 2.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na základní principy nekonvenční technologie elektroerozivního obrábění s důrazem na drátovou elektroerozi v podmínkách středně velké firmy. V rámci práce byla řešena výroba řemenice 75-8M-130, kontrola přesnosti elektroerozivních drátových strojů. Po seznámení se současným stavem elektroerozivního obrábění ve strojírenské firmě, byla navržena opatření pro zajištění a zvýšení přesnosti elektroerozivních drátových strojů.

Klíčová slova

Elektroeroze, technologie elektroerozivního obrábění, elektroerozivní řezání drátovou elektrodou, řemenice 75-8M-130, kontrola přesnosti elektroerozivních drátových strojů.

ABSTRACT

This master's thesis focuses on the basic principles of the non-conventional technology of electrical discharge machining (EDM) with an emphasis on wire-cut electrical discharge machining performed in a medium-sized company. The thesis deals with manufacture of a belt pulley 75-8M-130, and checks of accuracy of wire-cut EDM machines. Following the study of the current status of electrical discharge machining in the engineering company, measures for assurance and increase of accuracy of wire-cut EDM machines are proposed.

Key words

Electrical discharge machining, technology of electrical discharge machining, wire-cut electrical discharge machining, belt pulley 75-8M-130, checks of accuracy of wire-cut EDM machines.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOUKA, Radim. *Aplikace technologie elektroerozivního drátového řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 83 s., 10 příloh. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Aplikace technologie elektroerozivního drátového řezání vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod	8
1 DEFINOVÁNÍ CÍLŮ	9
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ.....	10
2.1 Historie elektroerozivního obrábění	10
2.2 Princip elektrické eroze	11
2.3 Časový průběh jednoho impulsu	13
2.4 Charakteristika výboje	15
2.4.1 Základní fyzikální charakteristiky výboje	16
2.4.2 Základní rozdělení elektrických výbojů	18
2.5 Zdroje elektrické energie – generátory	19
2.5.1 Závislé generátory	19
2.5.2 Polozávislé generátory	21
2.5.3 Nezávislé generátory	21
2.5.4 Generátory řízené CNC systémy	23
2.6 Dielektrikum	23
2.6.1 Vyplachování mezielektroodového prostoru	23
2.6.2 Druh dielektrika.....	25
2.7 Nástrojové elektrody.....	26
2.7.1 Vlastnosti materiálů používaných pro nástrojové elektrody	26
2.8 Aplikace elektroerozivního obrábění v průmyslové výrobě.....	28
3 ZÁKLADNÍ PRINCIP NEKONVENČNÍ METODY DRÁTOVÉ ELEKTROEROZE.....	29
3.1 Dielektrikum	29
3.2 Řezací dráty	30
3.3 Příslušenství elektroerozivních drátových strojů.....	32
3.4 Výrobci drátových řezaček	33
4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ DRÁTOVÉ ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE V PODMÍNKÁCH STŘEDNĚ VELKÉ STROJÍRENSKÉ FIRMY.....	34
4.1 Firma FERMAT CZ s.r.o.	36
5 TECHNOLOGIE DRÁTOVÉ ELEKTROEROZE PRO TYPOVÉHO PŘEDSTAVITELE	37
5.1 Popis obrobku „Řemenice 75-8M-130“	37
5.1.1 Vodorovná vyvrtávačka: WFT 13 CNC, WFT 13 R CNC, WF 13 CNC	39
5.1.2 Vodorovná vyvrtávačka: WRFT 130 CNC.....	39
5.1.3 Vodorovná vyvrtávačka: WRF 130 CNC	39
5.2 Základní rozměry řemenice 75-8M-130	40
5.3 Technologický postup výroby řemenice 75-8M-130.....	41
5.4 Tvorba NC programu.....	43
5.5 Výroba řemenice	46

5.5.1 Aktivní parametry obrábění	47
6 KONTROLA PŘESNOSTI ELEKTROEROZIVNÍCH DRÁTOVÝCH STROJŮ	52
6.1 Zkouška polohovací přesnosti přímým měřením na stroji.....	52
6.1.1 Postup měření.....	52
6.1.2 Podmínky měření	52
6.1.3 Použité měřicí přístroje	53
6.1.4 Charakteristické veličiny pro posuzování polohovací přesnosti	54
6.1.5 Naměřená a kompenzovaná data	57
6.1.6 Výsledky měření	61
6.2 Měření geometrie dle normy ISO 230 – 4 analýza kruhovitosti.....	61
6.2.1 Postup měření.....	61
6.2.2 Podmínky měření	62
6.2.3 Měřicí přístroj	62
6.2.4 Charakteristické typy grafů chyb.....	62
6.2.5 Výsledky měření	65
6.3 Seřízení souososti vodících hlav	68
6.3.1 Postup měření.....	68
6.3.2 Podmínky měření	68
6.3.3 Měřicí přístroj	68
7 SMĚRY DALŠÍHO VÝVOJE ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ V PODMÍNKÁCH FIRMY	69
8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	73
Závěr	77
Seznam použitých zdrojů	78
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	80
Seznam příloh	83

ÚVOD

Jedním z pilířů strojírenské technologie je metoda obrábění, která se využívá při výrobě hotových kusů a nebo nástrojů využívaných v jiných výrobních technologiích. Speciální oblastí technologie obrábění jsou nekonvenční metody obrábění, jejichž aplikace je především u materiálů charakterizovaných vysokou tvrdostí, pevností, houževnatostí atd. Mezi nekonvenční metody obrábění se řadí technologie s kratší historií, jako je například elektroerozivní obrábění.

Chce-li strojírenská firma být konkurenceschopnou na současném trhu, musí splnit veškeré požadavky zákazníka na výrobní přesnost za vysoké produktivity výroby. Mezi základní výhody technologie elektroerozivního obrábění patří zmíněné požadavky na výrobu. V polovině minulého století byl na trh uveden první sériově vyráběný elektroerozivní stroj. V současné době se jedná o velice rozšířenou technologii výroby. Každá konkurenceschopná nástrojárna musí vlastnit elektroerozivní obráběcí stroje. Elektroerozivní obrábění především přispělo k rozvoji výroby tvářecích a střižných nástrojů, které jsou vyráběny z těžkoobrobitelných materiálů.

Podstatou elektroerozivního obrábění je využívání pravidelně se opakujícího elektrického výboje, který vzniká při oddálení dvou vodivých materiálů ponořených v dielektriku. Při elektrickém výboji vzniká vysoká teplota, která obráběný materiál v malých vrstvách nejprve natavuje a následně částečně odpařuje nebo vytrhává.

Část této diplomové práce se zabývá výrobou hnací řemenice, se zaměřením na výrobu speciálního ozubení pomocí technologie elektroerozivního drátového obrábění. Řešená řemenice je součástí vřeteníku vodorovných vyvrtávaček, které vyrábí firma FERMAT CZ s.r.o. V další části je zpracována teorie elektroerozivního obrábění s návrhy na zlepšení provozu ve zmíněné firmě.

1 DEFINOVÁNÍ CÍLŮ

V rámci diplomové práce bude zpracován základní princip nekonvenční metody drátové elektroeroze a popsány možnosti využití drátové elektroerozivní technologie v podmínkách středně velké strojírenské firmy, s přihlédnutím na firmu FERMAT CZ s.r.o. Po obeznámení se stávajícím stavem elektroerozivní technologie drátového řezání v dané firmě budou vypracovány návrhy na zlepšení provozu. Dále je cílem této práce vytvoření technologie drátové elektroeroze pro typového představitele v podmínkách firmy FERMAT CZ s.r.o. a provedení kontroly přesnosti elektroerozivního drátového stroje.

2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění, mezinárodně označované pod zkratkou EDM (Electrical Discharge Machining), je nejrozšířenější nekonvenční metodu obrábění. Patří mezi elektrické metody obrábění, známé pod zkratkou EMO. Tyto metody k úběru materiálu využívají přímého působení elektrického proudu bez přeměny na mechanickou energii. [4]

2.1 Historie elektroerozivního obrábění

Základem elektroerozivního obrábění je fyzikální jev nazývaný elektroeroze. Základy elektroeroze položil roku 1768 anglický vědec Sir Joseph Priestley, který při studiu chování plynů zjistil, že na povrchu elektricky vodivých materiálů (kovů) vznikají krátery po elektrickém výboji. [1]

První poznatky elektrické eroze v technickém průmyslu byly sledovány a zkoumány při vývoji konstrukce kontaktních spínacích zařízení. Elektrická eroze měla za následek opotřebení kontaktních ploch spínačů. [1]

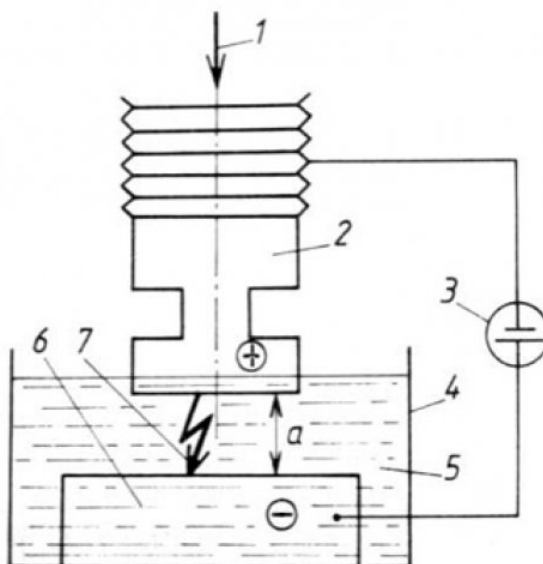
B. R. Lazarenko a jeho manželka N.I.Lazarenková jsou považováni za autory prvního technologického využití elektroeroze. Zabývali se výzkumem v letech 1938 – 1944. Roku 1943 vypracovali patent na základě výzkumu elektrických výbojů v závislosti na obrábění kovů, ve kterém definovali teoretické zákonitosti elektroeroze:

- elektrické erozi podléhají veškeré elektricky vodivé materiály,
- zmíněné materiály podléhají elektrické korozi, jak v plynném, tak v kapalném prostředí,
- správnou volbou pracovních parametrů a vhodným zapojením obvodu, lze docílit dvou různých druhů výboje:
 - nestacionární výboj (jiskra),
 - stacionární výboj (oblouk). [1, 2]

2.2 Princip elektrické eroze

Odebírání materiálu pomocí elektrického oblouku je poměrně složitý fyzikální jev. Obrábění probíhá mezi dvěma elektrodami, které nazýváme anoda a katoda. Elektrody jsou ponořeny do dielektrika (obr. 2.1). Dielektrikum je kapalina s velkým elektrickým odporem. Elektrický výboj vzniká přivedením napětí na obě elektrody. Velikost přivedeného napětí na elektrody je závislá na následujících faktorech:

- vzdálenosti mezi elektrodami,
- velikosti elektrického odporu dielektrika,
- znečištění dielektrika.



Obr. 2.1 Schéma elektroerozivního obrábění [6]

1 – posuv nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj, a – velikost pracovní mezery

Působením napěťového pole mezi elektrodami se dostanou do pohybu volné kladné a záporné ionty, které jsou postupně urychlovány, dokud nevznikne ionizovaný (vodivý) kanál. V tomto okamžiku mezi elektrodami protéká elektrický proud, který vytváří elektrický výboj. Výboj má za následek další srážky iontů a vznik plazmového pásma, které dosahuje teplot v rozmezí 3 000 – 12 000 °C. V oblasti plazmového pásma dochází k roztavení materiálu, částečnému odpaření materiálu a dielektrika. Při odpařování dielektrika vznikají plynové bubliny o vysokém tlaku. Po přerušení ionizovaného kanálu dojde k implozi

bublin vzniklých z dielektrika. Vzniklá imploze odstraňuje natavený materiál z kráteru, čímž napomáhá a urychluje obrábění materiálu. Odstraněný materiál následně tuhne v dielektriku a je odnášen ve formě kuliček.

Při opakovaných elektrických výbojích dochází mezi elektrodami k vzájemnému odebírání materiálu. Poměr odebraného materiálu je na jedné elektrodě v mnohem větší intenzitě než na druhé. Z tohoto důvodu používáme podmínku úspěšnost elektroerozivního obrábění (2.1), která nám zajišťuje relativní objemový úbytek materiálu na nástroji a obrobku.

Relativní objemový úbytek [2]:

$$\delta = \frac{V_N}{V_O} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Velikost relativního objemového úbytku lze ovlivnit změnou těchto podmínek při obrábění:

- volbou dielektrika,
- volbou materiálu nástroje vzhledem k materiálu obrobku,
- konstrukcí generátoru (četnost a charakter výbojů, polarita zapojení nástroje a obrobku).

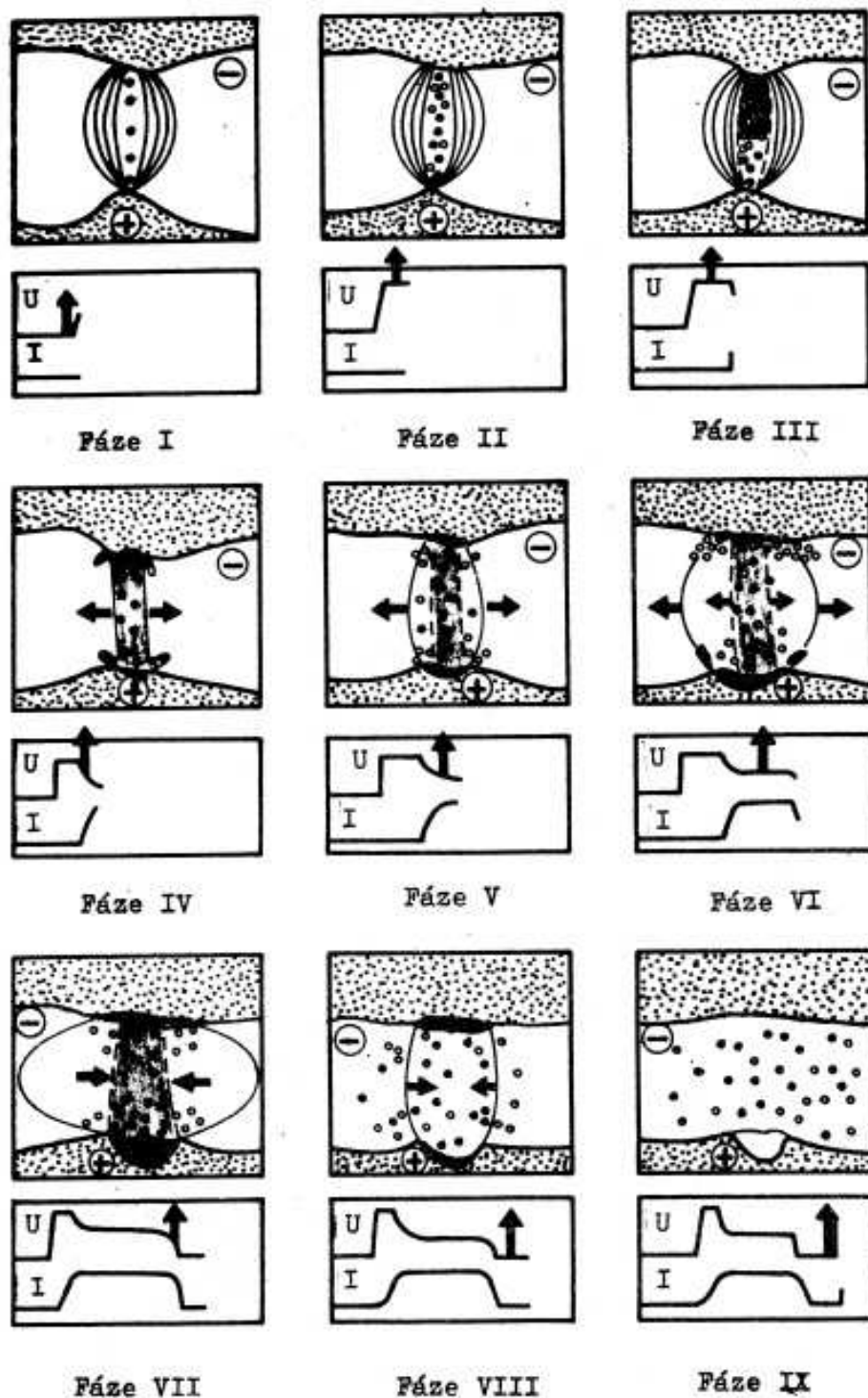
Délka impulsů nám určuje polaritu zapojení, neboli kterou elektrodu máme připojit na obrobek a nástroj. Na počátku výboje vždy převládá elektronová vodivost, která postupně přechází na iontovou vodivost. Tato skutečnost má za následek, že při kratších impulsech se generuje více energie na anodě. Při delších impulsech se více energie uvolňuje na katodě. Velikost úběru materiálu je závislá na velikosti energie výboje (2.2), neboli kde se generuje větší energie, tam dochází k intenzivnějšímu úběru materiálu. Z tohoto důvodu je obrobek při krátkých impulsech připojen na anodu, při delších impulsech na katodu. [2, 4]

2.3 Časový průběh jednoho impulsu

Jeden impuls výboje je rozdělen do devíti fází, které jsou znázorněny na obr. 2.2 i s průběhy napětí a proudu. Znázorněný průběh odpovídá výboji získaného z polovodičového generátoru.

- Fáze 1: Elektrické pole vzniká okamžitě po přiložení napětí na obě elektrody v místě nejmenší vzdálenosti mezi elektrodami. Napětí roste, proud zůstává nulový.
- Fáze 2: Počet izolovaných částic roste, dielektrikum postupně ztrácí izolační vlastnosti. Vytvářejí se můstky potřebné k zapálení výboje. Napětí dosáhlo maximální hodnoty, proud je stále nulový.
- Fáze 3: Dielektrikum se již nechová jako izolant. Z katody se začínají uvolňovat elektrony, které se srážejí s neutrálními částicemi a následně se tříští. Tím vznikají kladné a záporné ionty. Napětí klesá a proud roste.
- Fáze 4: Začíná se vytvářet vodivý kanál z plazmy. Klesá napětí a roste proud, což má za následek zvyšování teploty v místě výboje. Dochází k odpařování malých částí obrobku, dielektrika a elektrody.
- Fáze 5: Bubliny plynů, které vznikly odpařením dielektrika, mají tendenci expandovat, ale ionty přitahované vzniklým silným elektromagnetickým polem brání těmto bublinám expandovat. Vlivem nárazů částic dochází k velkému uvolnění tepelné energie. Napětí se ustaluje na zápalné hodnotě výboje, proud dosahuje maximální hodnoty.
- Fáze 6: Dochází k intenzivnímu tavení a odpařování. Materiál obrobku je držen tlakem bubliny na svém místě. Napětí, proud a tlak kapaliny je ustálen.
- Fáze 7: Napětí a proud klesají na nulu, čímž klesá teplota v místě výboje a dochází k implozi plynové bubliny, která vytrhává natavený materiál z obrobku (vliv kavitace).
- Fáze 8: Dielektrikum odvádí teplo z okolí nově vytvořeného kráteru a zabraňuje dalšímu šíření tepla do obrobku. Spaliny a odtržený materiál jsou odplavovány z místa kráteru dielektrikem. Napětí a proud zůstávají na nulové hodnotě.

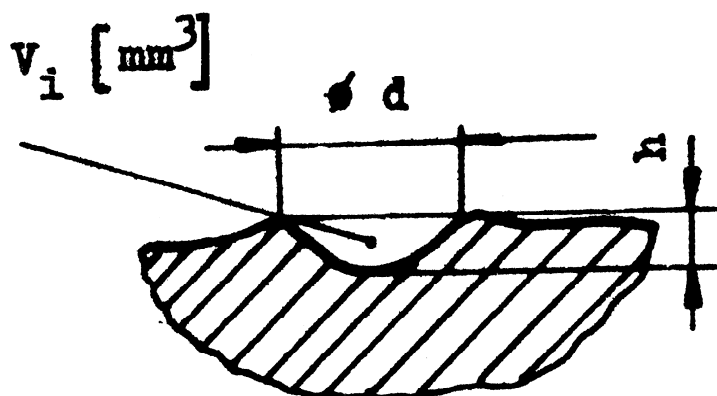
Fáze 9: Dielektrikum, které obsahuje spaliny s tuhnoucím odtrženým materiálem, je nahrazováno nový čistým dielektrikem. Zbývající volné ionty vytvářejí základ pro nový plazmový kanál. Napětí a proud nabývá nulových hodnot . [3]



Obr.2.2 Časový průběh jednoho impulsu [2]

2.4 Charakteristika výboje

Velikost a tvar kráteru závisí na množství přivedené energie a časové prodlevě výboje. Drsnost a přesnost obrobené plochy je přímo závislá na velikosti kráteru. Velikost kráteru je určena pomocí průměru d a hloubky h (obr. 2.3).



Obr. 2.3 Profil vzniklého kráteru [2]

Množství odebraného materiálu [2]:

$$V_i = K \cdot W_i \quad (2.2)$$

Z rovnice (2.2) vyplývá, že velikost odebraného materiálu je přímo úměrná velikosti energie jednotlivého výboje (2.3).

Energie jednotlivého výboje [2]:

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.3)$$

Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času nebo také objemový výkon obrábění (2.4) je roven součtu úbytku na obou elektrodách, velikostí energie a frekvence těchto výbojů.

Objemový výkon obrábění [2]:

$$Q_v = K \cdot f \cdot r \cdot \eta \cdot W_i = K \cdot f \cdot r \cdot \eta \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.4)$$

Z rovnice 2.4 vyplývá, že rychlost úběru materiálu lze ovlivnit změnou nastavení velikosti napětí, proudu, frekvence nebo periody výbojů.

2.4.1 Základní fyzikální charakteristiky výboje

- Doba zpoždění výboje t_d – čas mezi zapnutím generátoru a vznikem vodivého kanálu plazmy.
- Doba výboje t_e – časové údobí mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru.
- Doba impulzu t_i (2.5) – časový úsek od zapnutí do vypnutí generátoru.

Doba impulzu [2]:

$$t_i = t_d + t_e \quad (2.5)$$

- Doba pauzy t_o – časový úsek, kdy je vypnutý generátor.
- Perioda T (2.6) – časové údobí ohraničené zapálením oblouku a vypnutím generátoru.

Perioda [2]:

$$T = t_i + t_o \quad (2.6)$$

- Napětí na prázdno U_z – napětí při zapnutí generátoru.
- Pracovní proud výboje I – maximální proud během výboje.
- Střední vybíjecí napětí U_e (2.7) – střední hodnota napětí od zapálení výboje po vypnutí generátoru.

Střední vybíjecí napětí [2]:

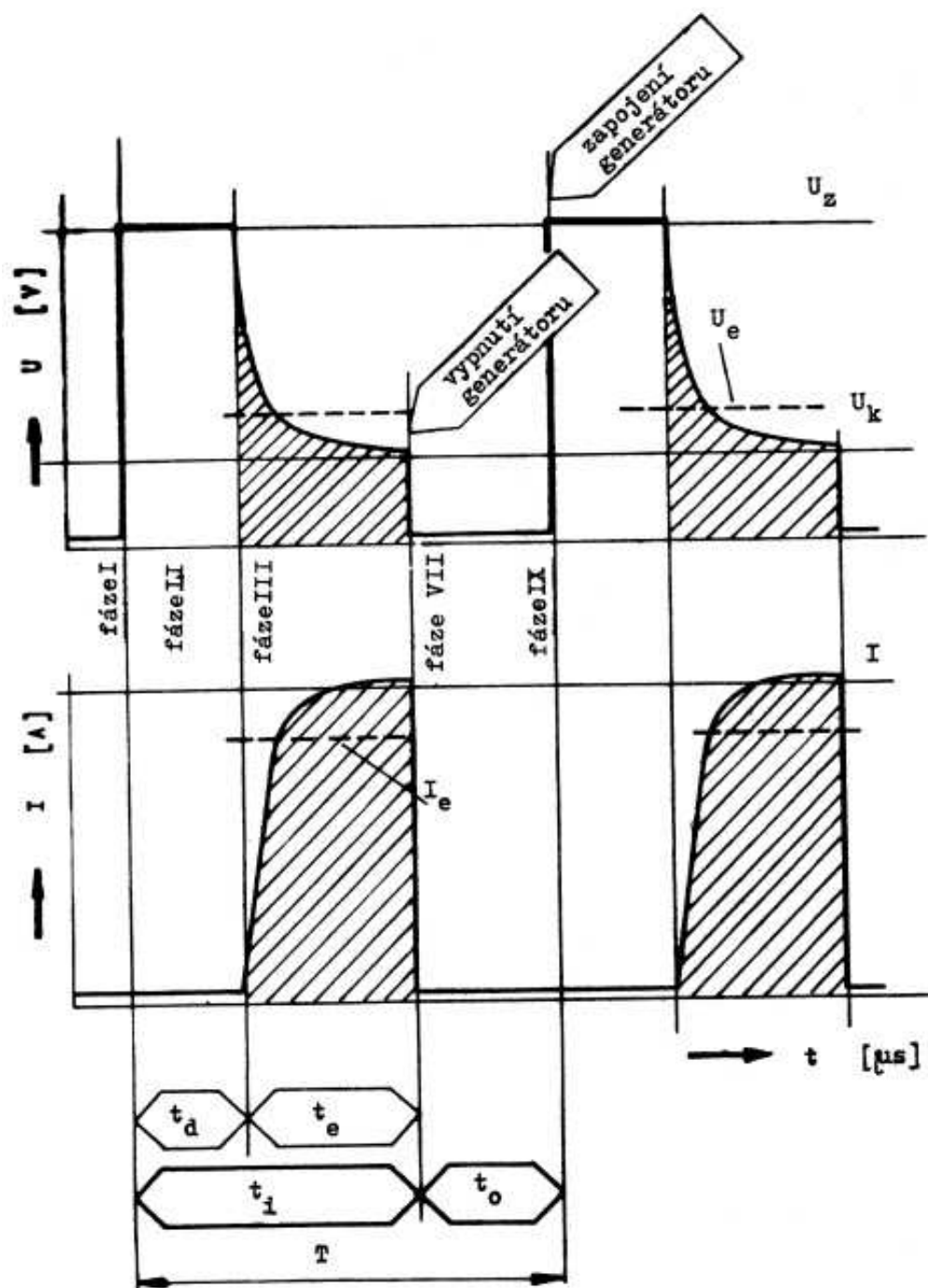
$$U_e = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} u(t) dt \quad (2.7)$$

- Střední vybíjecí proud I_e (2.8) – střední hodnota napětí od zapálení výboje po vypnutí generátoru.

Střední vybíjecí proud [2]:

$$I_e = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} i(t) dt \quad (2.8)$$

Zmíněné charakteristiky jsou zobrazeny na obr. 2.4. V uvedeném obrázku jsou znázorněny dva grafy. První graf závislosti napětí na čase a druhý graf závislosti proudu na čase pro dva elektrické výboje. Dále v grafu jsou zaznamenány určité fáze výboje a okamžiky zapnutí a vypnutí generátoru.



Obr. 2.4 Časový průběh výboje polovodičového generátoru [2]

Časové využití periody výboje (2.9) je rovno časovému úseku zapnutého generátoru poděleného dobou jednoho výboje. Udává zřetelnější pohled na časový průběh výboje než předcházející charakteristiky t_i , t_o a T . [2]

Využití periody [2]:

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_o + t_i} \quad (2.9)$$

2.4.2 Základní rozdělení elektrických výbojů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, je možné odlišným nastavením pracovních parametrů získat dva různé elektrické výboje – stacionární a nestacionární. Tyto výboje se liší dobou dodání energie do místa výboje obr. 2.5.

Stacionární výboj (jiskra)

Stacionární výboje se používají pro obrábění menších úběrů materiálu, jsou specifické krátkou dobu impulsu a nízkými hodnotami využití impulsu. Frekvence impulsů naopak dosahuje vysokých hodnot. Převládá především elektronová vodivost, kdy k většímu úběru materiálu dochází na anodě. Proudová hustota a teplota v plazmovém kanále dosahuje vyšších hodnot než nestacionární výboje.

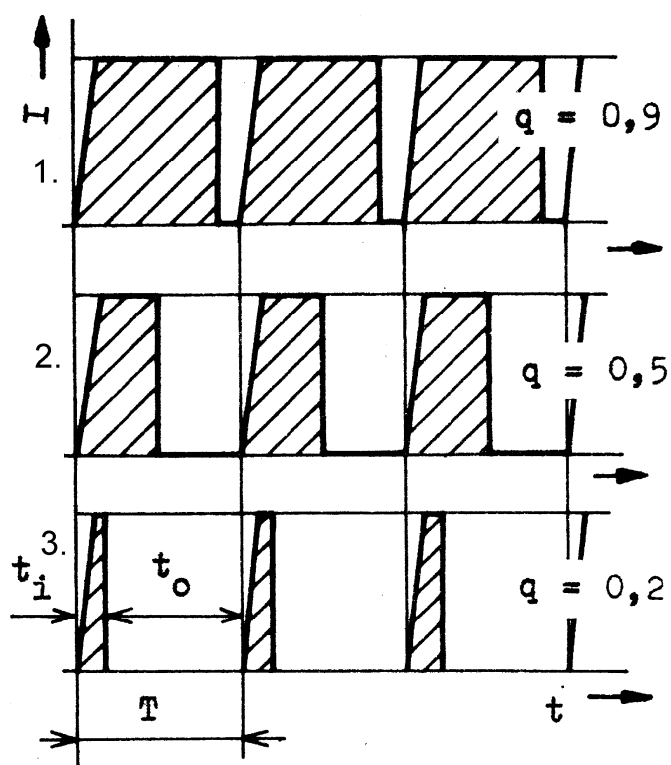
Nestacionární výboj (oblouk)

Nestacionární výboje se využívají pro hrubování. Doba impulsů a hodnoty časového využití periody výboje dosahují vyšších hodnot než stacionární výboje, proto hodnoty energie jednotlivých výbojů nabývají větších hodnot.

Tab. 2.1 Porovnání stacionárního a nestacionárního výboje [5]

Druh výboje	Stacionární výboj	Nestacionární výboj
Teplota v plazmovém kanále [°C]	12^4	3 300 – 3 600
Doba impulsů [s]	$10^{-6} - 10^{-4}$	$> 10^{-4}$
Časové využití periody výboje [-]	0,03 – 0,2	0,2 – 1
Hustota proudu [$A \cdot mm^{-2}$]	10^6	$10^2 - 10^4$
Energie jednotlivého výboje [J]	$10^{-5} - 10^{-1}$	10^2
Ve výbojovém kanále převládá	elektronová vodivost	iontová vodivost

Na obr. 2.5 je znázorněn graf závislosti proudu na čase, ve kterém jsou umístěny tři odlišné výboje. O nestacionární výboj se jedná v prvním a druhém případě, v případě třetím se jedná o stacionární výboj.



Obr. 2.5 Časový průběh stacionárních a nestacionárních výbojů [2]

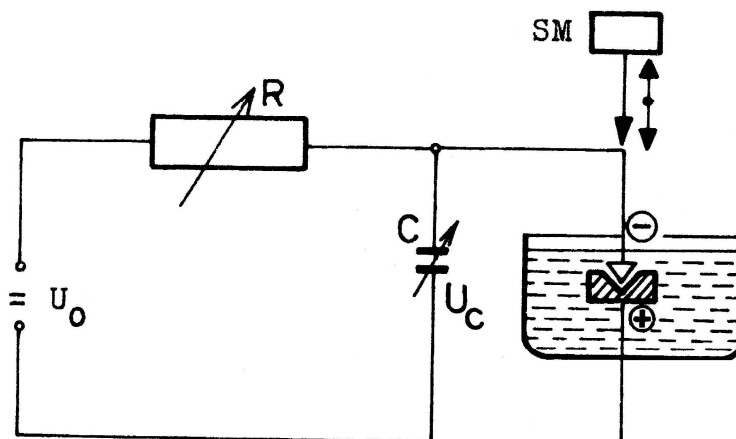
2.5 Zdroje elektrické energie – generátory

Aby bylo možné vytvořit výboj, je nutné přivést na nástrojovou elektrodou a obrobek elektrický impuls o určité frekvenci. Každý elektrický impuls je charakterizován napětím, proudem a tvarem. Jednotlivé impulsy se vytvářejí v generátoru. Existují různá zapojení a konstrukce generátorů.

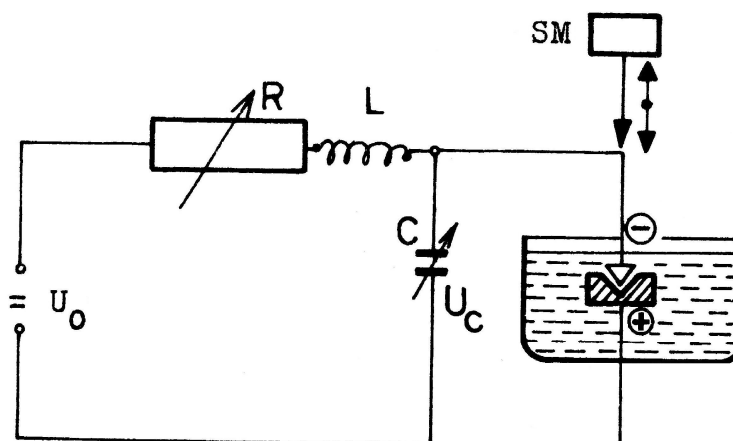
2.5.1 Závislé generátory

Jedná se o nejstarší generátory. Jejich pracovní činnost spočívá v opakovaném nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Nabíjení je prováděno ze zdroje stejnosměrného napětí. Vybíjení nastává, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Závislé generátory se nazývají proto, že jsou závislé na poměrech v jiskřišti. Vytvářejí velmi krátké výboje $t_i = 10^{-4} \div 10^{-7}$. Výhodami těchto generátorů je jednoduchost a spolehlivost. Mezi nevýhody patří malá regulace tvaru a

frekvence výbojů, malé množství odebíraného materiálu, velké opotřebení materiálu na nástrojové elektrodě způsobené změnou polarit v průběhu jednotlivých impulsů. Používaly se dva typy RC (obr. 2.6) a RCL (obr. 2.7). Při přidání indukčnosti v nabíjecím obvodu se dosáhlo ustálení nabíjecího proudu a tím zvětšení jak frekvence, tak výkonu. [2]



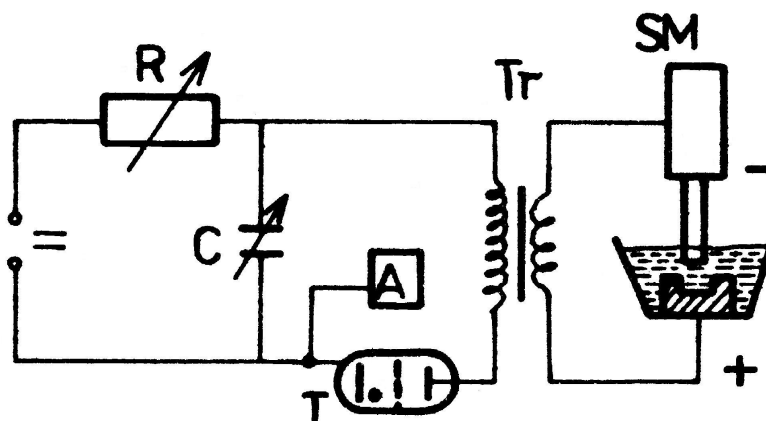
Obr. 2.6 Schéma závislého generátoru – RC [2]



Obr. 2.7 Schéma závislého generátoru – RCL [2]

2.5.2 Polozávislé generátory

Vznikly postupným zdokonalování závislých generátorů. Využívají tyratronu jako přerušovacího prvku. Hlavní vlastností polozávislých generátorů (obr. 2.8) je pravidelnost impulsů. Výkon je menší než u závislých generátorů současně s nižší závislostí na charakteru vybíjecí štěrby.[2]



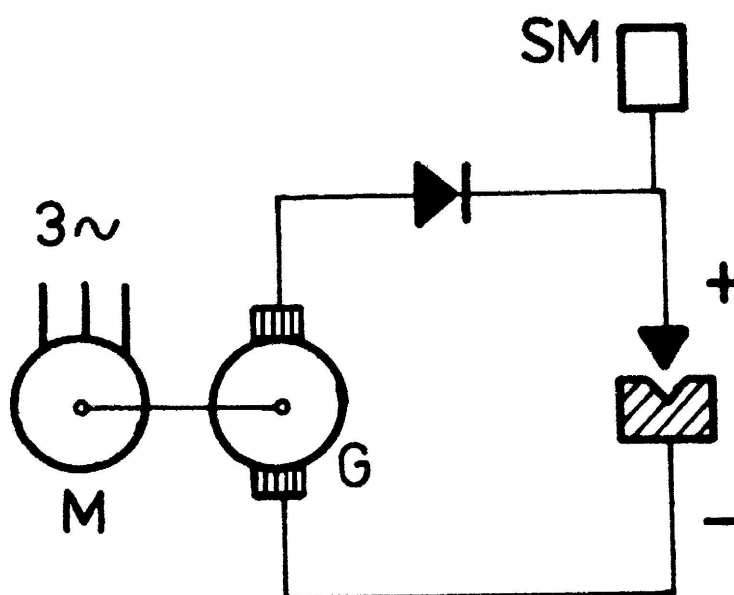
Obr. 2.8 Schéma polozávislého generátoru [2]

2.5.3 Nezávislé generátory

Charakteristickými znaky těchto generátorů jsou delší doba trvání impulsu, nižší pracovní napětí a opačná polarita výbojů. Nezávislé generátory se dělí na dvě skupiny: mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové a na tranzistorové širokorozsahové generátory.

Mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové

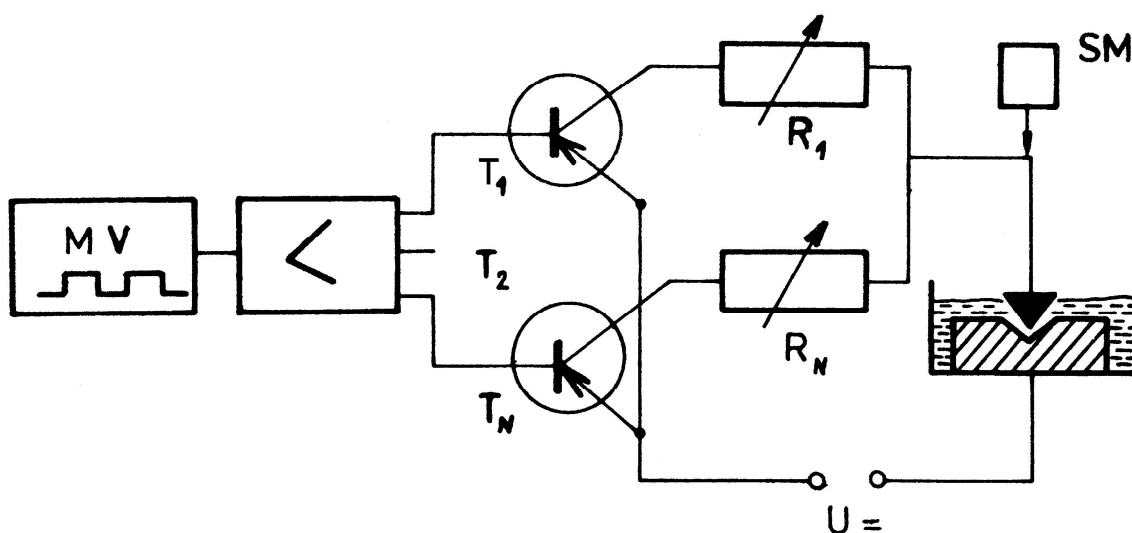
Roztočením dynama asynchronním motorem vznikají elektrické impulzy. Vyznačují se velkými úběry materiálu (až $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$), velikou hlučností a obtížnou regulací frekvence. Dají se použít pouze pro hrubování. Při obrábění na čisto je potřeba dokončovací generátor. Schéma generátoru je znázorněno na obr. 2.9. [2]



Obr. 2.9 Schéma kolektorového generátoru [2]

Tranzistorové širokorozsahové generátory (obr. 2.10)

Umožňují velký rozsah nastavení parametrů elektrických impulsů. Dovedou obrábět více elektrodami současně. Podstatně snižují opotřebení na nástrojové elektrodě. Oproti předcházejícím generátorům mají vyšší produktivitu a přesnost výroby. [2]



Obr. 2.10 Schéma tranzistorového generátoru [2]

2.5.4 Generátory řízené CNC systémy

V současné době se využívají pouze generátory řízené CNC systémy. Tyto systémy reagují na nastalou situaci během obrábění, upravují parametry obrábění tak, aby byly dodrženy stejné podmínky obrábění v každém okamžiku. Pro zadání technologie obrábění se používají tzv. aktivní parametry obrábění. Zavedením generátorů s CNC systémy se zvýšila přesnost a produktivita obrábění, snížilo opotřebení nástrojové elektrody a zjednodušilo nastavení technologie obrábění.

2.6 Dielektrikum

Dielektrikum je kapalina, která vytváří pracovní prostor elektroerozivnímu obrábění. Má značný vliv na elektroerozivní proces, proto je nutné pečlivě se věnovat jeho volbě, aby splňovalo kladené požadavky. Mezi hlavní požadavky kladené na dielektrikum patří dostatečný elektrický odpor (dielektrické vlastnosti), aby po průrazu mohl vzniknout elektrický výboj. Další vlastností je dobrá smáčivost a malá viskozita, zajišťující rychlé obnovení izolace po ukončení výboje. Musí mít dostatečně vysoký bod hoření, protože v místě výboje vzniká vysoké teplo, které ohřívá dielektrikum a elektrody. Bod hoření u dielektrika by měl být vyšší než 60 °C. Obvykle se používají dielektrika s bodem hoření 60 – 120 °C. Slouží k ochlazování elektrod a obrobených mikročástic. Zabraňuje šíření tepla od obrobku, čímž zabraňuje zvětšování tepelně ovlivněné oblasti. Dielektrikum musí být chemicky neutrální, aby zamezovalo vzniku koroze, a snadno vyrobitelné s nízkými pořizovacími náklady. Při obrábění nesmí vznikat jedovaté plyny, výpary a nepříjemný zápach. Dielektrikum musí zajistit dobrý odvod zplodin z místa odběru materiálu. [1]

2.6.1 Vyplachování mezelektrodového prostoru

Vyplachováním se nazývá přívod dielektrika mezi elektrody a následné odnášení částic odebraného materiálu z pracovního prostoru. Existuje několik základních konstrukčních uspořádání:

- Vnější vyplachování - obr. 2.6 a)

Jedná se o nejčastěji používanou metodu, v případě hlubších dutin je vhodné použít v kombinaci s pulzním vyplachováním. [5]

- Vnitřní tlakové vyplachování - obr. 2.6 b)

Dielektrikum je přiváděno vnitřním otvorem v nástrojové elektrodě přímo do pracovního prostoru, kde odnáší částičky odebraného materiálu po bocích elektrody. Částičky obrobeného materiálu vytvářejí nežádoucí výboje na boku dutiny, čímž zhoršují kvalitu vytvořeného povrchu. [5]

- Vyplachování odsáváním - obr. 2.6 c); d)

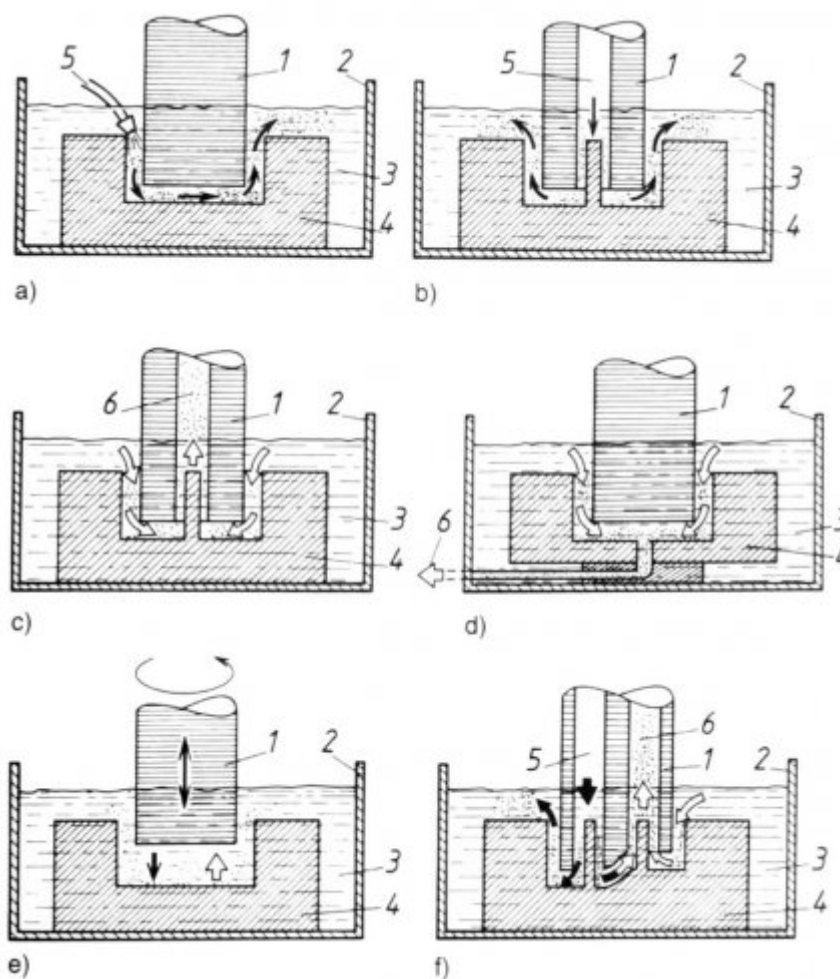
Odsávání dielektrika je možné řešit otvorem v nástrojové elektrodě nebo otvorem v obrobku. Tato metoda vyplachování zaručuje velmi dobrou tvarovou přesnost obráběné plochy. [5]

- Pulzní vyplachování - obr. 2.6 e)

Používá se pro výrobu hlubokých dutin. Dochází k přerušení procesu na 0,15 až 10 s. Současně dochází k oddálení nástroje od obrobku na vzdálenost 0,02 – 10 mm. V některých případech je doprovázeno i otočením nástrojové elektrody. Generátor je zapnut až po optimálním nastavení nástroje. [5]

- Kombinované vyplachování - obr. 2.6 f)

Jedná se o kombinaci vnitřního tlakového a odsávacího vyplachování. Tato metoda se používá pro hloubení tvarově náročných dutin. [5]



Obr. 1.6 Metody vyplachování [6]

1 – nástrojová elektroda, 2 – pracovní vana, 3 – dielektrikum, 4 – obrobek,
5 – přívod dielektrika, 6 – odsávání dielektrika

2.6.2 Druh dielektrika

Nejčastěji používané dielektrikum pro drátové řezání je deionizovaná destilovaná voda. Má nízkou elektrickou vodivost, dobrou smáčivost a viskozitu. Z hlediska požární a hygienické bezpečnosti má velice dobré vlastnosti. Nevýhodou tohoto dielektrika je, že způsobuje korozi. Pro elektroerozivní hloubení dutin se používají petroleje, lehké strojní nebo transformátorové oleje. Ve výjimečných případech se používají další dielektrika: speciální kapaliny, vodní sklo a různé solné roztoky. Speciální dielektrika se vyznačují tím, že neobsahují anorganické složky na rozdíl od klasických olejů. [3]

2.7 Nástrojové elektrody

Náklady na nástrojové elektrody představují podstatnou část z celkových výrobních nákladů, které v sobě zahrnují náklady na materiál, výrobu, údržbu a obnovu opotřeбенých ploch elektrody. Proto je velice nutné zvážit, z jakého materiálu se bude nástrojová elektroda vyrábět, a zvolit vhodnou technologii výroby.

Vlastnosti, které musí splňovat nástrojová elektroda:

- dobrou elektrickou vodivost,
- dobrou tepelnou vodivost a kapacitu,
- vysoký bod varu a tání,
- dobrou obrobitelnost,
- malou roztažnost,
- stálost tvarů,
- odolnost proti elektrické erozi,
- dostačující mechanickou pevnost.

Materiály používané na nástrojové elektrody:

- kovové – měď, wolfram, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a mědi, mosaz,
 - nekovové – grafit,
- kombinované – kompozice grafitu a mědi. [1]

2.7.1 Vlastnosti materiálů používaných pro nástrojové elektrody

Měď – vhodná pro dokončování, dobře odolná proti erozivnímu opotřeбенí, používá se hlavně u drátového řezání. [1]

Wolfram – používá se pro speciální účely, hloubení malých otvorů do průměru 0,2 mm. [1]

Slitina wolframu a mědi, wolframu a stříbra – určena pro speciální účely, hloubení úzkých otvorů a drážek, v místech špatného proudění dielektrika, cenově náročný materiál. [1]

Mosaz – dobrá obrobitelnost, rychlejší opotřebení elektrod v porovnání s mědí a grafitem, používá se pro hloubení úzkých otvorů. [1]

Grafit – nejpoužívanější materiál, dobře obrobitelný s vysokou teplotou tavení. [1]

V tab. 2.2 jsou uvedeny různé kombinace materiálů s posouzením rychlosti opotřebení elektrody a kvality obrobené plochy. V tab. 2.3 jsou zmíněny fyzikální vlastnosti vybraných materiálů. Wolfram má vysoký bod tavení i bod varu, měď vyniká dobrou vodivostí jak elektrickou, tak tepelnou. Velice důležité je zvolit správný materiál nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu.

Tab. 2.2 Volba materiálu elektrody vzhledem k obráběnému materiálu [5]

Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Opotřebení elektrody
Mosaz	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké
Mosaz	Měď	H D	Dobrá Dobrá	Přiměřené Přiměřené
Mosaz	Titan	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké
Měď	Hliník	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé
Měď	Mosaz	H D	Dobrá Dobrá	Přiměřené Přiměřené
Měď	Litina	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé
Měď	Grafit	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené
Měď	Korozivzdorná ocel	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené
Měď	Wolfram – karbid	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké
Měď – wolfram	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé
Slitina mědi	Wolfram – karbid	H D	Dobrá Dobrá	Střední Střední
Grafit	Litina	H D	Dobrá Dobrá	Malé Střední
Grafit	Měď	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené
Grafit	Rychlořezná ocel	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené
Grafit	Korozivzdorná ocel	H D	Střední Střední	Střední Střední
Grafit	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé
Grafit	Wolfram – karbid	H D	Střední Střední	Velké Velké

Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů [1]

Materiál	Bod tavení [°C]	Bod varu [°C]	Tepelná vodivost [%]	Elektrická vodivost [%]	Pevnost [N/mm ²]	Modul pružnosti [N/mm ² ·10 ³]
Grafit	≈ 3 000	> 4 000	30,3	70,1	34	5,9
Měď	1 000	2 580	94,3	96,5	241	124
Wolfram	3 390	> 5 930	29,6	48,1	41,3	351
Železo	1 535	> 2 800	16,2	16,2	275	186

2.8 Aplikace elektroerozivního obrábění v průmyslové výrobě

- elektroerozivní hloubení dutin,
- elektroerozivní řezání drátovou elektrodou,
- elektroerozivní leštění povrchu,
- elektroerozivní mikroděrování,
- elektrokontaktní obrábění.

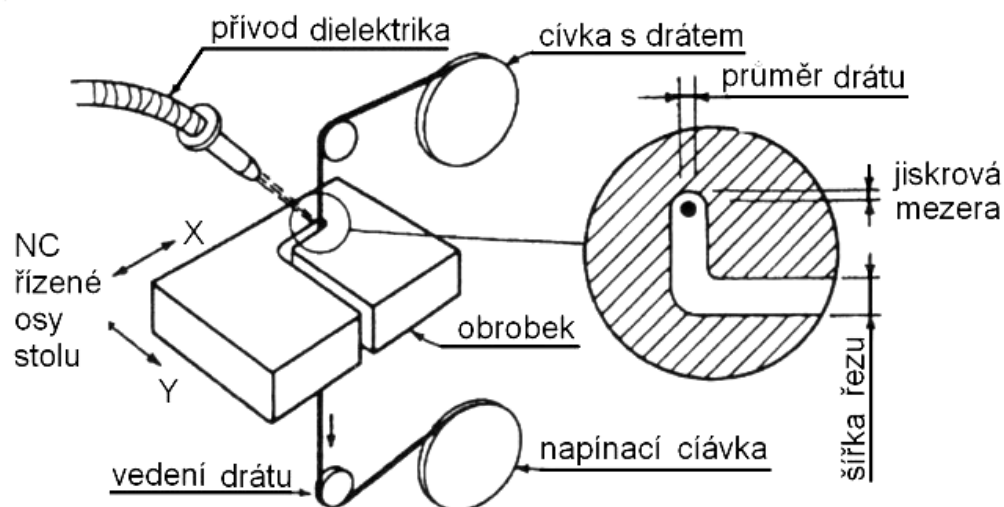
3 ZÁKLADNÍ PRINCIP NEKONVENČNÍ METODY DRÁTOVÉ ELEKTROEROZE

Elektroerozivní drátové řezání (obr. 3.1) je mezinárodně označované jako Wire Electrical Discharge Machining - WEDM. Jedná se o produktivní metodu vzhledem k ostatním technologiím elektroerozivního obrábění. V dnešní době je již velmi rozšířenou technologií. Je využívána tam, kde jsou vysoké požadavky na tvarovou a rozměrovou přesnost. Při drátovém řezání je podmínkou, že výsledný tvar musí být průchozí.

Zavedením WEDM došlo k výraznému pokroku ve výrobě střížných a lisovacích nástrojů. Odpadly problémy u výroby tvarově složitých otvorů. Zvýšila se rychlost výroby střížných nástrojů. Moderní stroje jsou schopny dosáhnout objemového výkonu obrábění $Q_v = 500 \text{ mm}^3/\text{min}$. Technologie elektroerozivního řezání drátovou elektrodou se využívá převážně v kusové a malosériové výrobě.

3.1 Dielektrikum

Deionizovaná destilovaná voda je nejčastěji používaným dielektrikem u elektroerozivních drátových strojů. Při obrábění malých součástí, kde je kladen důraz na kvalitu povrchu, se deionizovaná destilovaná voda nahrazuje olejem. Řezáním v oleji se dosahuje vyšší kvality obrobené plochy. Velikou výhodou řezání v oleji je, že součást nám nerezaví během řezání, které může trvat desítky hodin. Produktivita řezání v oleji je srovnatelná s produktivitou řezání v deionizované destilované vodě. Elektroerozivní drátové stroje využívající olej jako dielektrikum nejsou vybaveny filtry, přesto náklady na provoz a údržbu jsou v porovnání s deionizovanou destilovanou vodou vyšší. Drátové řezačky využívající olejová dielektrika musí být vybaveny hasičským zařízením.



Obr. 3.1 Princip elektroerozivního řezání [1]

3.2 Řezací dráty

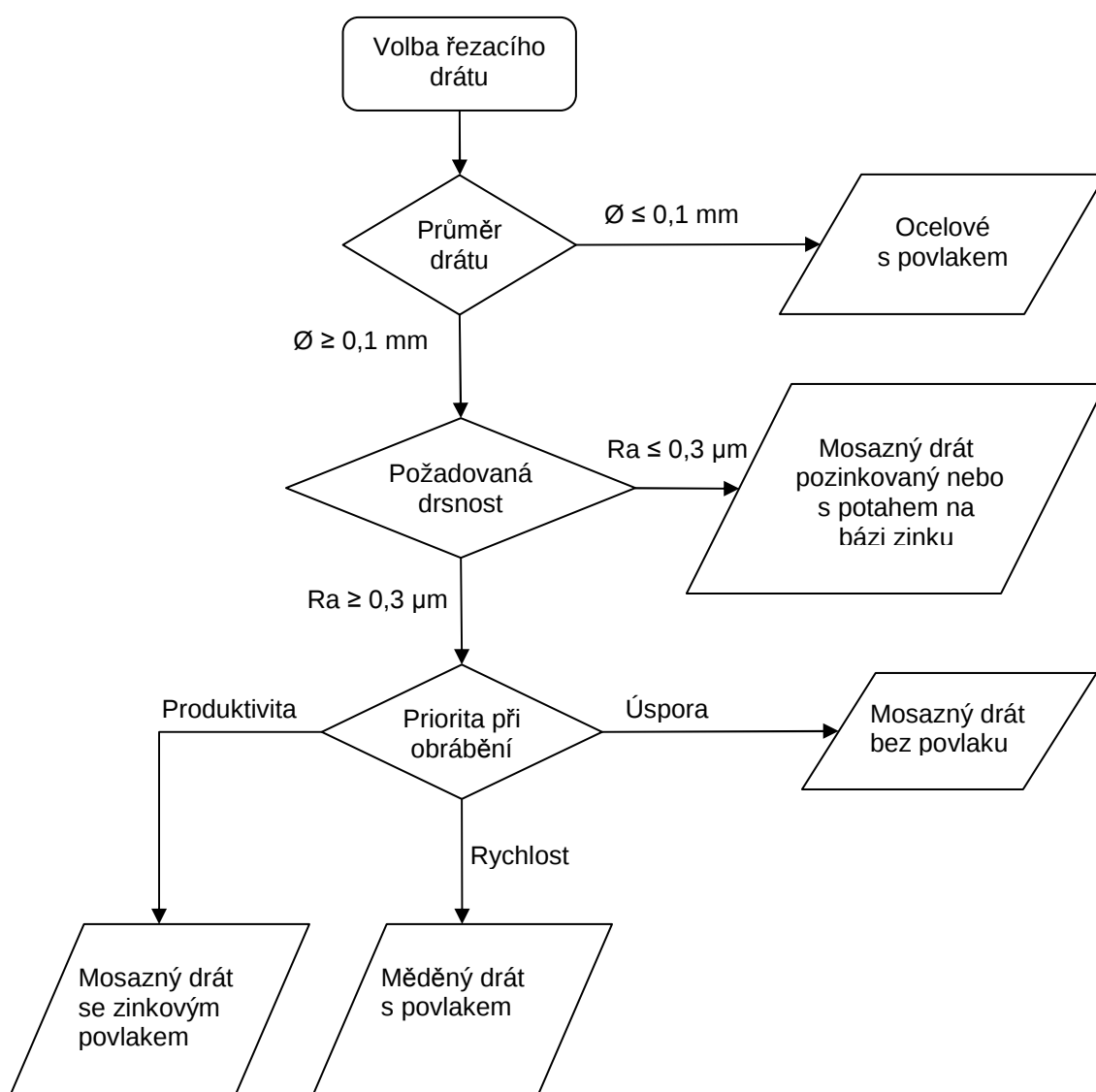
Nástrojovou elektrodou je tenký drát o průměru $0,02 \div 0,3$ mm. Průměr drátu má vliv na rychlost obrábění a kvalitu obrobené plochy. Čím větší průměr drátu se použije, tím vyšší hodnoty rychlosti se dosahují. Obráceně to funguje u kvality obrobené plochy. Pro přesnější obrábění je zapotřebí volit menší průměr drátu. Nejčastěji se používá drát o průměru 0,25 mm. Při použití tohoto drátu jsou dosahovány velmi dobré výsledky rychlosti řezu a drsnosti povrchu.

Řezací dráty pro WEDM se vyrábí:

- mosazné,
- mosazné s povlakem,
- měděné s povlakem,
- ocelové s povlakem.

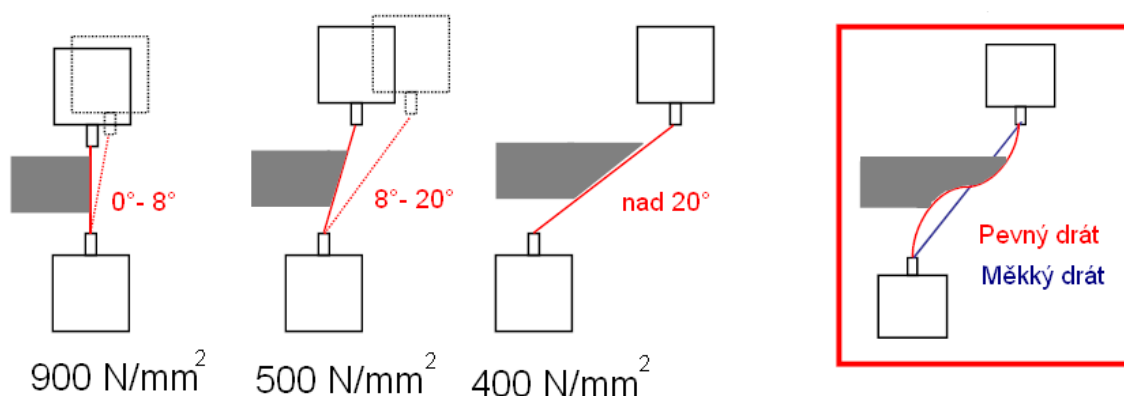
Mosazný drát je základním drátem pro drátové řezačky. Je vhodný pro uživatele, kteří se nezaměřují na produktivitu výroby, ale vyžadují dobrou kvalitu obrobené plochy. Mosazné dráty bez povlaku patří k levným drátům, proto jsou velmi oblíbené a patří k nejprodávanějším. Mezi mosazné dráty s povlakem patří mosazné dráty: s potahem na bázi zinku, pozinkované, se zinkovým povlakem získaným difúzním žíháním a legované zinkem s zinkovým povlakem. Zinkový povlak u měděných drátů se získává difúzním žíháním. Díky vysoké elektrické

vodivosti, která je v porovnání s dráty s mosazným jádrem třikrát až čtyřikrát vyšší, dosahují vysokých řezných rychlostí až 500 mm²/min. Používají se pro rychlé obrábění s nižšími nároky na přesnost výroby. Jemné dráty o průměru 0,02 až 0,1 mm se vyrábějí s ocelovým jádrem a speciálním zinkovým povlakem. Mají velmi vysokou mez pevnosti v tahu. Tyto dráty se používají ve speciálních případech, především na výrobu malých součástí a otvorů. Dosahují vysoké přesnosti obrobené plochy, ale za nízké produktivity. Na obr. 3.2 je vývojový diagram volby vhodného řezacího drátu vzhledem k průměru drátu, požadované drsnosti a priority při obrábění.[9]



Obr. 3.2 Vývojový diagram volby řezného drátu [10]

Důležitým hlediskem při výběru řezacího drátu pro obrábění pod úhlem, tedy obrábění kuželových a šikmých ploch, je velikost pevnosti v tahu řezacího drátu (viz. obr. 3.3). Dráty s vyšší pevností vytvářejí mezi vodítky tvar S při vzájemném vyosení vodících hlav, což způsobuje chybu při obrábění. Při obrábění kolmých a mírně šikmých řezů se používá drát s pevností v tahu 900 N/mm^2 , pro středně šikmé řezy ($8^\circ - 20^\circ$) drát s pevností v tahu 500 N/mm^2 a na velmi šikmé řezy se doporučují dráty, které mají pevnost v tahu 400 N/mm^2 . [9]



Obr. 3.3 Vliv pevnosti drátu na velikosti úhlu řezu [9]

3.3 Příslušenství elektroerozivních drátových strojů

V současné době se přestávají vyrábět elektroerozivní drátové stroje se zařízením pro automatické vrtání startovacích otvorů. Z důvodů vyšší produktivity výroby je zařízení pro vrtání startovacích otvorů řešeno jako samostatný stroj v blízkosti drátovky. Vodící hlavy jsou důležitou součástí stroje. Zajišťují přesné vedení řezného drátu pomocí diamantových vodítek a vyplachování v místě řezu. Přívaděče umístěné v hlavě přenášejí proudové napětí vytvořené v generátoru na drátovou elektrodu. Vodící hlavy jsou vybaveny automatickým navlékáním řezacího drátu. Navlékání drátu je prováděno za sucha nebo vodním paprskem. Pokud během obrábění dojde k přerušení drátu, spolehlivě navlékne drát v místě přerušení bez nutnosti vypuštění dielektrika. Vodící hlavy jsou dvojího provedení: pevné a výkyvné. Výkyvné hlavy zajišťují lepší vedení drátu při řezání šikmých a kuželových ploch, mohou řezat pod úhlem 45° . Nevýhodou těchto hlav je složitější konstrukce, řízení a seřízení. V současné době se preferují pevné hlavy spolu s novým softwarem, který dovede zajistit přesné vedení drátu při řezání

šikmých nebo kuželových ploch. Správné napnutí drátu je zajištěno systémem kladek (obr. 3.4), který je řízen elektronickým regulačním systémem.



Obr. 3.4 Systém vedení a napínání drátu

3.4 Výrobci drátových řezaček

První stroje tohoto typu byly uvedeny na trh roku 1954 dvěma švýcarskými společnostmi Agie a Charmilles. V roce 1969 Agie představila světu první sériově vyráběnou drátovou řezačku řízenou pomocí NC. Agie Holding Ltd. a Charmilles Technologies SA se spojily roku 1996 a vytvořily firmu AgieCharmilles Group, která se stala světovou jedničkou ve vývoji a výrobě EDM strojů. V současné době je v České republice používáno okolo 1000 EDM strojů od firmy AgieCharmilles Group, čímž se řadí k největším dodavatelům EDM strojů. (11)

Jistou specifikací českého trhu oproti světovému je velké rozšíření japonské firmy Fanuc, která byla založena roku 1955 jako dceřiná společnost firmy Fujitsu. S postupným rozšiřováním technologie WEDM se počet výrobců WEDM strojů a příslušenství začal zvyšovat. Mezi další výrobce WEDM strojů patří: Excetek, Sodick, Mitsubishi, Exeron, Ona, Makino, Japax a další.

4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ DRÁTOVÉ ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE V PODMÍNKÁCH STŘEDNĚ VELKÉ STROJÍRENSKÉ FIRMY

Jak již bylo dříve zmíněno, technologie WEDM je v současné době rozšířenou technologií, která je především vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu.

WEDM technologie se v praxi využívá při:

- výrobě střížných nástrojů,
- výrobě forem,
- výrobě měřidel,
- výrobě jemných součástí do implantabilních stimulátorů,
- výrobě součástí pro automobilový průmysl,
- výrobě součástí pro závodní auta (např. F1),
- výrobě součástí pro hodinářský průmysl,
- výrobě součástí pro kosmický průmysl,
- dalších odvětvích např. výroba ozubení a tvarově složitých ploch.

Výhody technologie WEDM oproti konvenčním metodám:

- nízké náklady na nástroj,
- obrobiteľnosť materiálů s vysokou tvrdostí,
- při obrábění nevznikají klasické řezné síly,
- jednoduché upnutí obrobku,
- nedochází k deformaci měkkých materiálů při obrábění,
- vysoká přesnost při obrábění,
- obrábění po tepelném zpracování,
- vysoká produktivita.

Možnost obrábět součást po tepelném zpracování, kdy dochází k objemovým a rozměrovým změnám součásti, je velikou výhodou této technologie. Pokud by se součást obrobila a následně by na ní proběhlo tepelné zpracování, mohlo by dojít k výskytu mikrotrhlin na povrchu součásti. Pokud je součást obrobena až po tepelném zpracování, nedochází ke vzniku mikrotrhlin,

což má za následek zvýšení životnosti vyrobené součástky. V případě WEDM strojů se jedná o poloautomaty nebo automaty s vícestrojovou obsluhou. Automaty jsou vybaveny přídatným manipulačním zařízením a v určitých případech se používají i na sériovou výrobu, kdy tvoří část linky (obr. 4.1). Činnost obsluhy je u automatů především kontrolní. U poloautomatů navíc zajišťují upínání a vyndávání součásti z obráběcího prostoru.



Obr. 4.1 Elektroerozivní řezačka V 650 S + 3R + frézovací centrum [14]

Zmíněné výhody jsou obecně platné pro všechny druhy firem. Pro podmínky středně velké firmy platí navíc následující výhody, které přináší WEDM technologie. První výhodou je snížení počtu strojů potřebných na vyrobení dané součásti se stejnou přesností. Tato skutečnost má za následek menší náklady na provoz strojů, obsluhu, snížení pracovních ploch, odpadají prostory pro meziprodukty a plochy dopravních cest. Během elektroerozivního drátového řezání dochází k minimálnímu úběru materiálu, a tedy se snižují náklady na třískové hospodářství.

Dobrým řešením se ukázalo umísťovat WEDM stroje do oddělených prostorů mimo hlavní halu. Tyto prostory by měly být vybaveny klimatizačními jednotkami, umístěny v dostatečné vzdálenosti od prašného prostředí a strojů s velkými vibracemi. Jedná se hlavně o zásady pro zajištění přesného a bezporuchového provozu WEDM strojů.

4.1 Firma FERMAT CZ s.r.o.

Následující cíle diplomové práce: technologie drátové elektroeroze pro typového představitele, kontrola přesnosti elektroerozivních drátových strojů a směry dalšího vývoje elektroerozivní technologie drátového řezání v podmínkách středně velké firmy byly řešeny v podmínkách firmy FERMAT CZ.

Firma FERMAT CZ byla založena v roce 1993 jako obchodní a montážní firma zabývající se výkupem použitých strojů a prodejem použitých kovoobráběcích a tvářecích strojů. Díky poptávce po CNC strojích a úspěšném rozvoji se firma rozhodla investovat do výroby vlastních strojů (vodorovných vyvrtávaček). V současné době se společnost řadí mezi přední dodavatele jak použitých, tak nových kovoobráběcích a tvářecích strojů. Jedná se především o vodorovné vyvrtávačky, vertikální soustruhy, brousící stroje a modernizované lisy včetně lisovacích linek. [12]

Firma FERMAT CZ v Brně vlastní čtyři elektroerozivní drátové stroje od tchajwanské firmy Excetek. Tři stroje jsou typu V 650 (obr. 4.2). Jedná se o nejprodávanější stroj od firmy Excetek, který je možno koupit s generátorem ve třech různých provedeních. Čtvrtý stroj je typu V 1280 /Speciál (obr. 4.3), patří mezi největší WEDM stroje, které se sériově vyrábějí. Na rozdíl od klasické V 1280 má zvětšený objem nádrže na dielektrikum. Parametry obou typů strojů jsou v příloze 1. [13]



Obr. 4.2 Elektroerozivní řezačka
V 650 [15]



Obr. 4.3 Elektroerozivní řezačka
V 1280 /Speciál

5 TECHNOLOGIE DRÁTOVÉ ELEKTROEROZE PRO TYPOVÉHO PŘEDSTAVITELE

5.1 Popis obrobku „Řemenice 75-8M-130“

Technologie drátové elektroeroze byla provedena na řemenici 75-8M-130 (obr. 5.1). Jedná se o hnací řemenici, která slouží k pohonu vřeteníku vodorovných vyvrtávaček WF 13 CNC, WFT 13 CNC, WFT 13 R CNC, WRFT 130 CNC a WRF 130 CNC vyráběných firmou FERMAT CZ s.r.o. Výrobní výkres řemenice je v příloze 9 a výkres sestavy vřeteníku v příloze 10. K přenosu energie z hnací řemenice je použito tří zubových řemenů PowerGrip GT3 –1760 – 8MGT3 o šířce 30 mm. V příloze 6 a 7 je uveden výpočet řemenu na maximální přenášený výkon a na maximální otáčky.

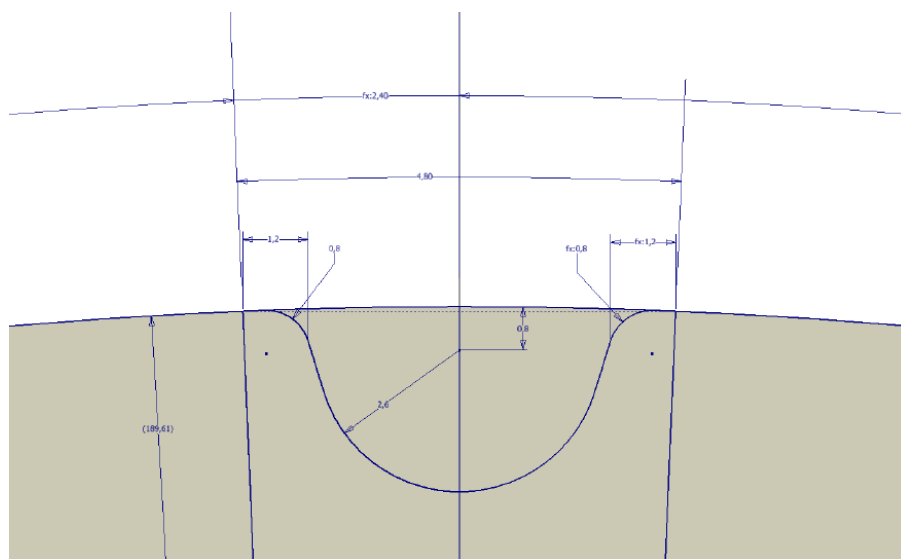


Obr. 5.1 3D model řemenice 75-8M-130 s dělicími kroužky řemenice a bočnicemi

Tvar zubu na řemenici (obr. 5.2) je upraven podle deformovaného tvaru zubu na řemenu. K deformaci zubu dochází napnutím řemenu při provozu. Tvar zubu řemenice je upraven podle vztahu (5.1), kdy vypočtený hlavový průměr řemenice je zmenšen o opravný koeficient. Velikost opravného koeficientu je dodána přímo od výrobce řemenů.

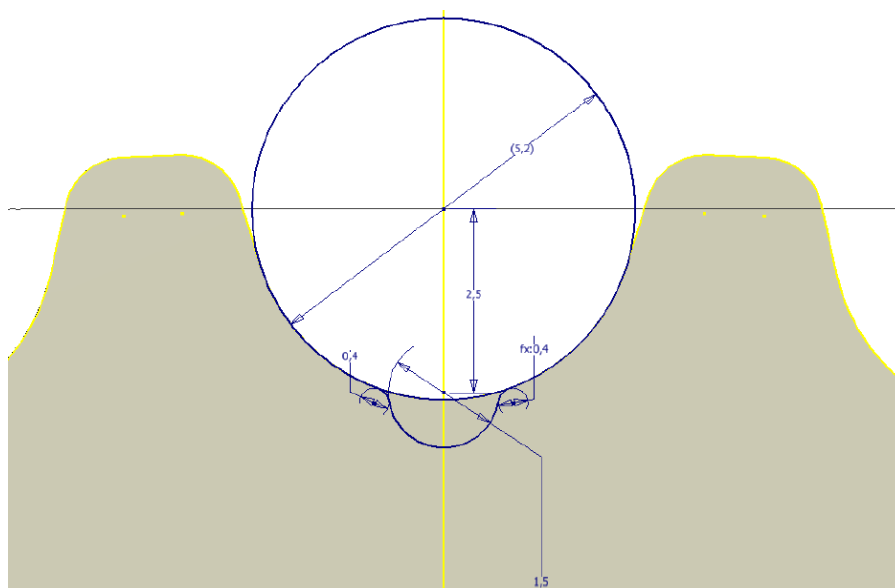
Hlavový průměr ozubení na řemenici:

$$d_{as} = d_{av} - 1,38 \quad (5.1)$$



Obr. 5.2 Tvar zubu řemenice 75-8M-130

Další specifikací tvaru zubové mezery je odlehčení v patě zubu (obr. 5.3). Odlehčení slouží k odvedení vzduchu ze zubové mezery v okamžiku, kdy dosedá řemen na řemenici. Pokud by odlehčení nebylo provedeno, docházelo by k příčnému ohybu řemenu vlivem tlaku uzavřeného vzduchu mezi zuby řemenu a zubovými mezerami řemenice. Vzniklý příčný průhyb řemenu by snižoval velikost funkční šířky řemene, což by mělo za následek snížení nominálního výkonu řemenu.



Obr. 5.3 Odlehčení paty zubu řemenice 75-8M-130

5.1.1 Vodorovná vyvrtávačka: WFT 13 CNC, WFT 13 R CNC, WF 13 CNC

WFT 13 CNC a WFT 13 RCNC se řadí mezi stolové frézovací a vyvrtávací stroje. Deskové provedení je vyráběno pod označení WF 13 CNC. Heidenhaim iTNC 530 nebo Fanuc 31i zajišťují souvislé řízení systému. Zmíněné stroje mohou obrábět rozměrné součásti do hmotnosti 15 tun. Jsou určeny pro přesné souřadnicové vyvrtávání, vrtání a frézování středně velkých deskových i skříňových obrobků. [17]

5.1.2 Vodorovná vyvrtávačka: WRFT 130 CNC

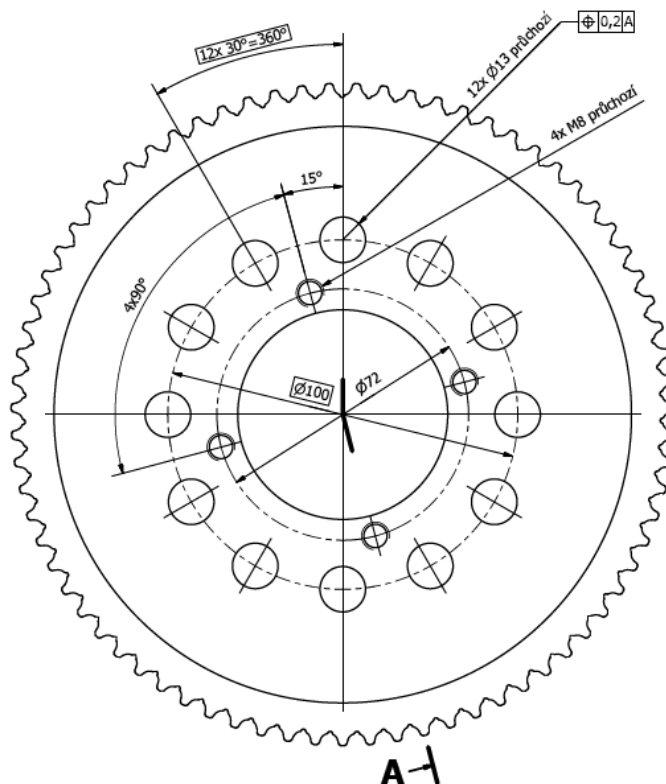
WFT 130 CNC je vodorovná vyvrtávačka stolového typu vyráběná firmou FERMAT CZ s.r.o. Jedná se o univerzální frézovací a vyvrtávací stroj s výsuvným smýkadlem a pracovním vřetenem, nebo bez výsuvu smýkadla. Tento stroj je určen pro obrábění rozměrných dílců. Dokáže produktivně obrábět při zachování vysoké kvality opracování. Používá řídicí systémy Heidenhaim iTNC 530, Siemens Sinumeric 840D a Fanuc 31i. Standardní vybavení stroje je řízeno pomocí 6 os (X, Y, Z, V, W, B). Podle druhu příslušenství se může počet os rozšířit. [16]

5.1.3 Vodorovná vyvrtávačka: WRF 130 CNC

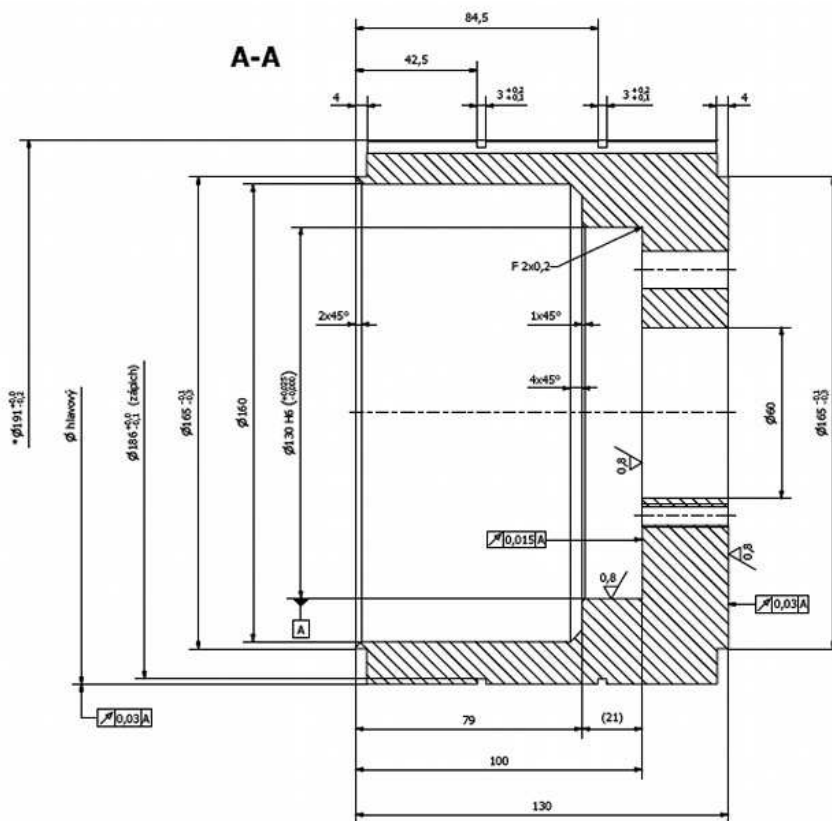
WRF 130 CNC je vodorovná vyvrtávačka deskového typu s výsuvným smýkadlem i pracovním vřetenem. Dodává se s řídicím systémem Heidenhaim iTNC 530, Siemens Sinumeric 840D nebo Fanuc 31i, který zajišťuje souvislé řízení ve 4 osách (X, Y, Z, W). Přidáním dalšího příslušenství stroje může se počet os navýšit např. přidáním otočného stolu (osa B) s vodorovným přestavením v jedné ose (osa V). [18]

Pro všechny zmíněné stroje je základním znakem stavebnicová koncepce, která umožňuje variabilitu při sestavování stroje dle potřeb zákazníka s možností přidání dalšího příslušenství.

5.2 Základní rozměry řemenice 75-8M-130



Obr. 5.4 Schématický výkres řemenice 75-8M-130



Obr. 5.5 Řez A-A řemenic 75-8M-130

Tab. 5.1 Výrobní postup řemenice – část 1

VÝROBNÍ POSTUP						
Název dílce:	Celkem kusů:	Výrobní dávka:				
Řemenice 75-8M-130	1	1				
Číslo výkresu:	Materiál:	Rozměr polotovaru:				
2 12 30 8614	11 523.0	D _p	195	L _p	135	
Pol.	Popis práce:					
1	Řezat materiál ø195 na délku 135 mm.					
Pás.pila 05967						
2	Soustružit tvar řemenice dle výkresu s přídavkem 0,36 na brus u rozměrů přesnějších jak IT 8; ø191 ^{+0,00/-0,2} soustružit na 194 ^{+0,1/-0,1} ; ostatní rozměry hotově.					
AUTOMATICKÝ SOUSTRUH SF 65/3000 CNC 44453						
3	Kontrolovat součást po soustružení.					
OTK 09863						
4	Sílu 130 mm brousit s min. úběrem hotově na Ra 0,8.					
BRUSKA ROVINNÁ BRH 40B 05616						
5	Otvor ø13 průchozí (12x) vrtat a odjehlit hotově; závit M8 průchozí (4x) vrtat, zahloubit a řezat hotově.					
OBRÁBĚCÍ CENTRUM VMC 1000 CNC 44861						
6	Kontrolovat po vrtání.					
OTK 09863						
7	Osazení ø130 H6/(21) včetně čela do hl. 100 mm brousit hotově na Ra 0,8; házivost 0,03 mm nepřekročit!					
BRUSKA UNIVERZÁLNÍ BUB 50/1500 05535						
8	Kontrolovat po broušení.					
OTK 09863						

Tab. 5.2 Výrobní postup řemenice – část 2

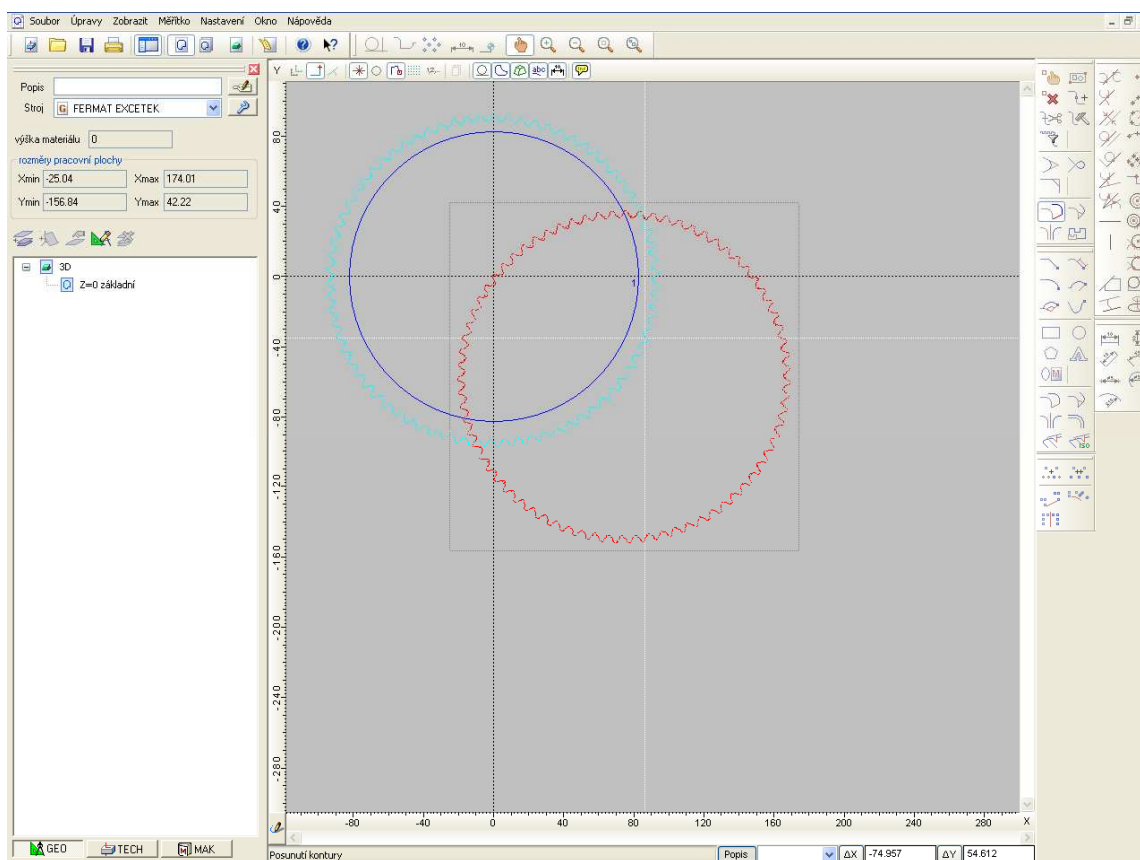
Pol.	Popis práce:
9	Tvar zubů řezat hotově.
ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÁ ŘEZAČKA EXCETEK V 650 CNC 95957	
10	Kontrolovat po řezání ozubení.
OTK 09863	
11	Nalisovat bočnice; nasadit kroužek řemenice dělící (2x), svařit, svar zabrousit.
Ručně 09421	
12	Bočnice temovat nerozebíratelně hotově.
SOUSTRUH HROTOVÝ UNIVERZÁLNÍ SV 18RA/750 04124	
13	Kontrolovat po temování - celková kontrola.
OTK 09863	

5.4 Tvorba NC programu

NC program by vytvořen na počítači ve firmě FERMAT CZ s.r.o. K vytvoření programu byl použit software KOVOPROG – Drátové řezání, verze 4.11.

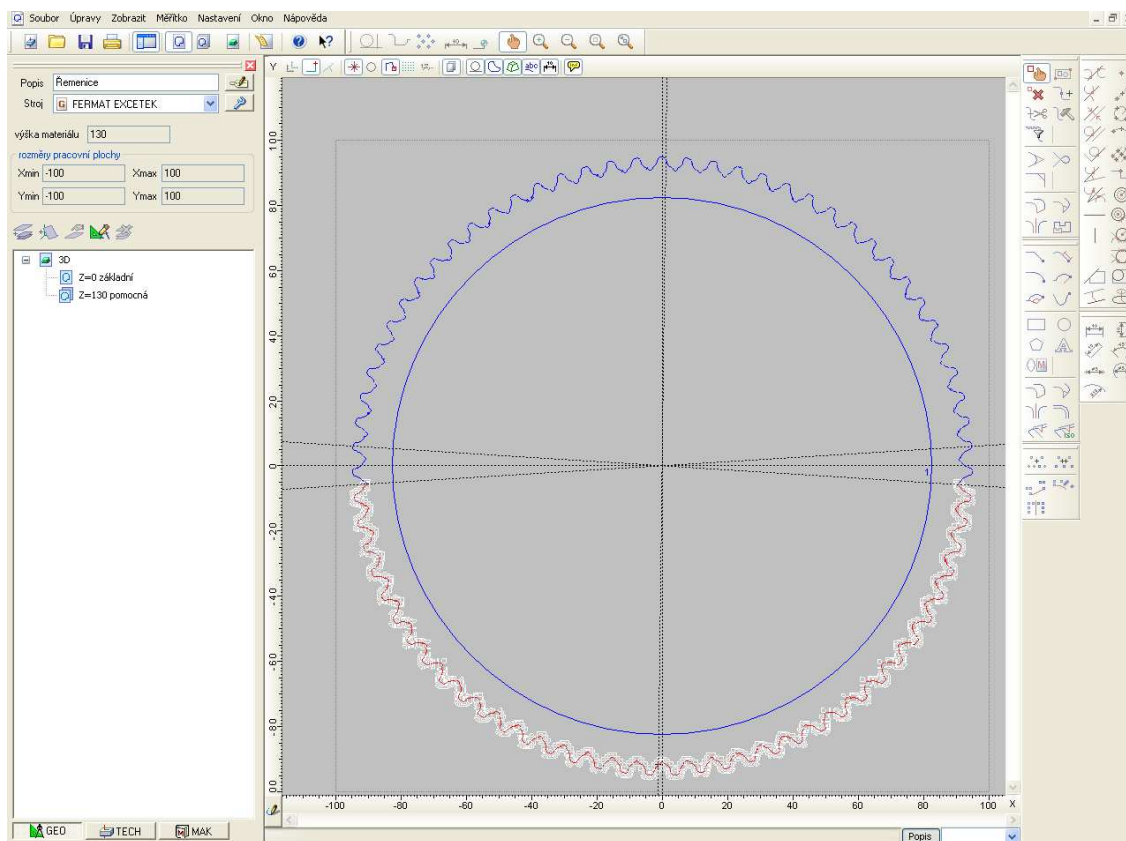
Konturu řezu lze vytvořit dvěma způsoby. První možností je nakreslit konturu přímo v programu KOVOPROG, nebo importovat konturu ze systému. Importovaný soubor, ve kterém je vytvořena kontura, musí být typu dxf. Tento typ souboru vytvářejí všechny CAD systémy na trhu.

Při vytváření NC programu se kontura ozubení řemenice importovala spolu s pomocnou kružnicí, která slouží k snadnějšímu určení středu kontury ozubení řemenice. Následuje posunutí středu kontury na střed souřadného systému (obr. 5.6). Tento krok není nutné uskutečnit, ale je vhodný pro následné vytvoření NC programu.



Obr. 4.6 Posunutí kontury na střed souřadného systému

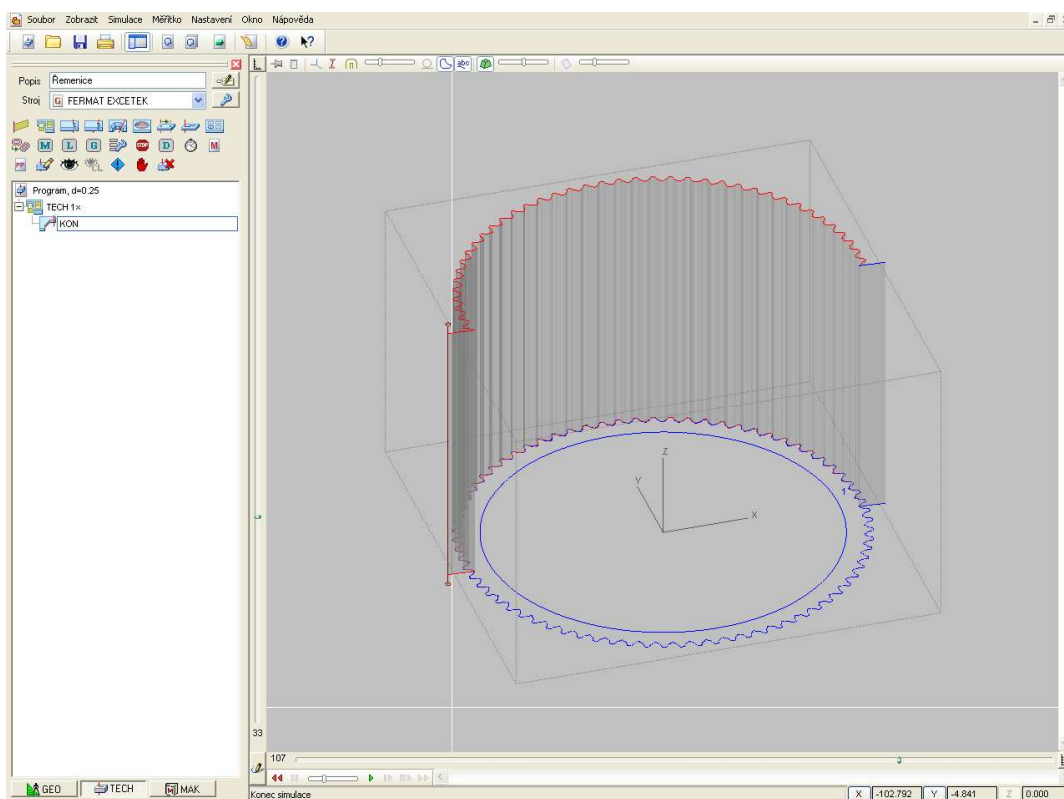
Na obr. 5.7 v levém horním okně se zadává výška materiálu, rozměry pracovní plochy a typ stroje, pro který bude generován NC program. Následuje rozdělení kontury (obr. 5.7) v místě vybrání paty zubu na dvě samostatné části. Technologie se bude řešit pro každou část kontury samostatně.



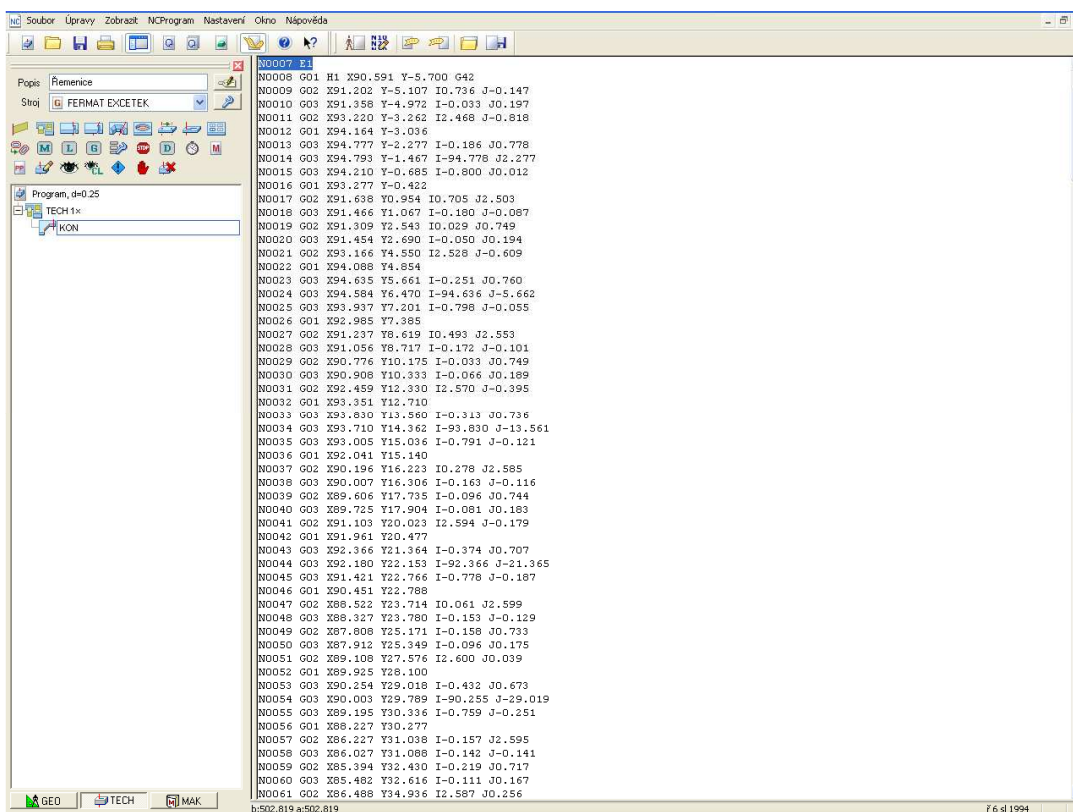
Obr. 5.7 Rozdělení kontury na dvě části

Po připravení kontury se přechází do prostředí pro tvorbu technologie. Zde se zadává průměr drátu, výška materiálu, číslo programu, počet řezů, délka můstku, odstranění můstku, volba korekcí, volba prodlev, druh najetí a vyjetí. Po zadání definice technologie se určí nájezdový bod a následně vytvoří najetí a vyjetí pro první část kontury. Jak je nastavena technologie, následuje spuštění simulace (obr. 5.8) pro ověření správného nastavení zvolené technologie. Pokud simulace proběhla bez problému, vytvoří se NC program (obr. 5.9), který je následně uložen. Pro druhou část kontury je postup zadání technologie, simulace a vytvoření NC programu stejný. Jedinou změnou je otočení druhé části kontury o 180° kolem po čátku souřadného systému, protože součást po obrobení první části kontury se musí otočit o 180°, aby bylo možné obrobit druhou část ozubení.

Vytvořený NC program je uveden v příloze 5. V příloze 2 až 4 jsou uvedeny ISO kódy pro elektroerozivní drátové řezání a adresová slova.



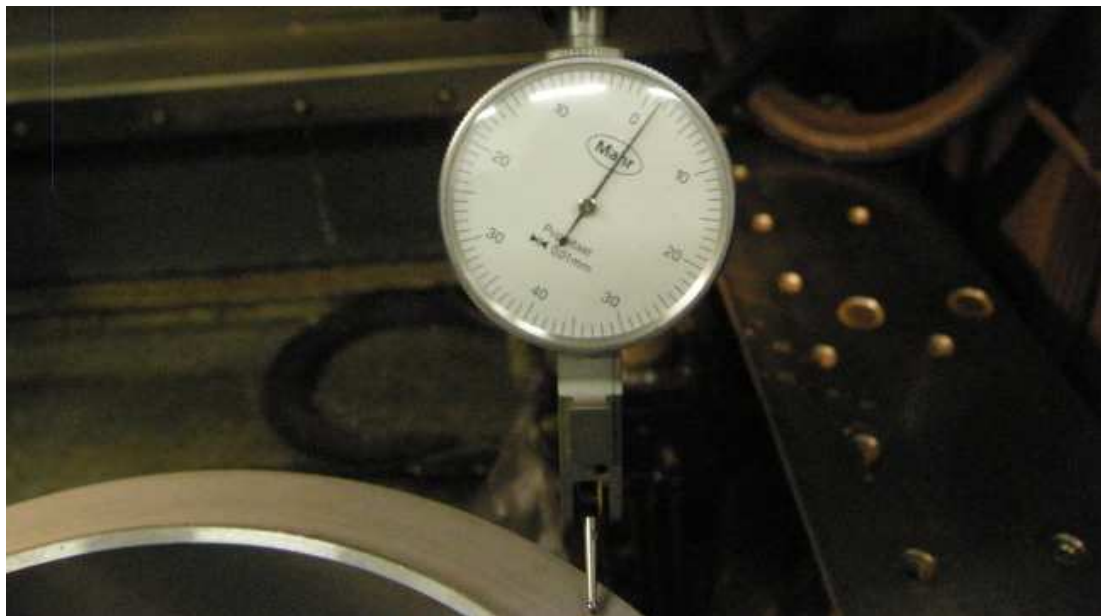
Obr. 5.8 3D simulace elektroerozivního drátového řezání první části kontury



Obr. 5.9 Vytvoření NC programu

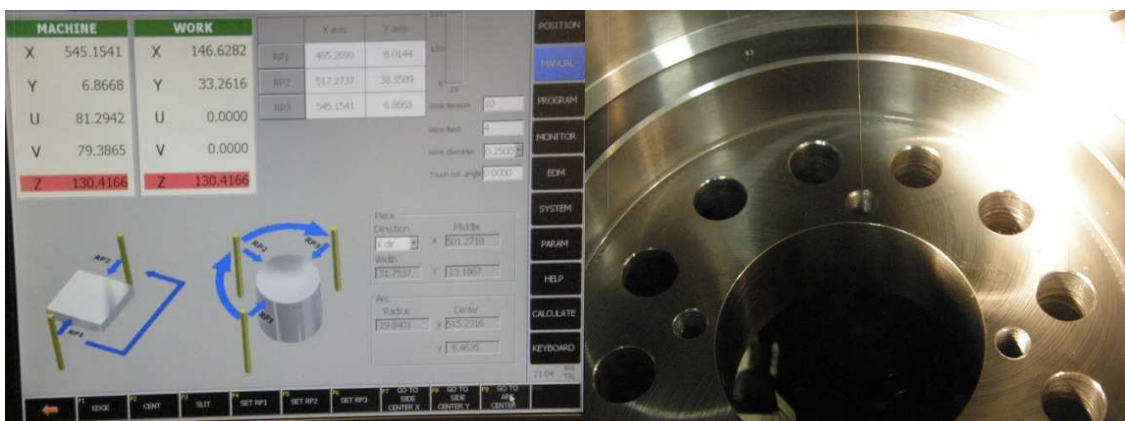
5.5 Výroba řemenice

Ozubení řemenice se obrábí na elektroerozivním drátovém stroji V 650 S od firmy Excetek. Upnutí řemenice je provedeno jedním šroubem M8x60 ISO 4762. Po upnutí součásti následuje kontrola kolmosti součásti. Pro kontrolu je používán číselníkový úchylkoměr (obr. 5.10), který je uchycen k horní vodící hlavě.



Obr. 5.10 Kontrola upnutí řemenice pomocí číselníkového úchylkoměru

Pokud je součást správně upnuta, následuje určení středu řemenice za pomoci programu, který je součástí řídicího systému drátové řezačky. Na obr. 5.11 v levé části je vyfocena obrazovka se zmíněným programem. V pravé části obrázku je vyfoceno vlastní odměřování na součástce. Před odměřováním součástky je zapotřebí zadat určité parametry: napnutí a průměr drátu, posuv, v případě šikmých ploch úhel natočení drátu. Aby bylo možné určit střed součásti, je zapotřebí změřit tři body na průchozím otvoru součásti. V daném případě se jedná o otvor s průměrem šedesát milimetrů. Souřadnice jednotlivých bodů se zjišťují dotykem řezacího drátu a součásti. Při měření je součást i řezací drát pod malým napětím, při dotyku dojde ke spojení elektrického obvodu a odečtení souřadnic. Po odměření souřadnic tří bodů program vypočítá střed součásti a ručně se zadá do řídicího systému.



Obr. 5.11 Zjišťování středu řemenice

Následuje načtení daného NC programu z paměti. Většina NC programů se vytváří na samostatném PC, lehčí programy lze vytvořit přímo na stroji. Dále se zadávají podmínky pro WEDM technologii:

- materiál obráběné součásti,
- tloušťka materiálu,
- průměr řezacího drátu,
- počet řezů,
- rychlost obrábění.

Dalším krokem je nastavení aktivních parametrů EDM technologie. Zadávání aktivních parametrů do softwaru elektroerozivního drátového stroje pro danou technologii je znázorněno na obr. 5.13.

5.5.1 Aktivní parametry obrábění

Číslo parametru obrábění - NO

Dostupný rozsah od 0 do 9999. Čísla 0 až 999 jsou využita pro operátory a čísla 1000 až 9999 jsou definována ve výrobním závodě a nelze je přepisovat. Každé číslo je přiřazeno k určité řezné podmínce. [19]

Režim pulzů – PM

Rozsah je od nuly do desíti. Pro hrubovací řez se nastavuje hodnota deset, při hrubování s jemným drátem o průměru menším než 0,1 mm se nastavuje režim pulzů na hodnotu devět. V případě dokončovacích řezů se

nastavuje hodnota v rozsahu jedna až osm. Všeobecně platí, čím nižší je hodnota PM, tím kvalitnější je obrobený povrch. [19]

Přerušení napětí – OV

Rozsah je mezi hodnotami nula až šestnáct. Nižší hodnoty se nastavují pro tenké a dobře vodivé materiály, například měď a železo. Vyšší hodnoty se nastavují pro silnější součásti nebo materiály s nízkou vodivostí. Velikost hodnoty čísla OV ovlivňuje velikost výkonu přiváděného do místa řezu. [19]

Čas zapnutí – ON

Specifikuje délku a intenzitu vyjiskřování. Tento parametr je závislý na velikosti nastavení parametru PM. Rozsah možného zadání hodnot je nula až dvacet čtyři. Při zadání vyšších hodnot se zvětšuje délka a intenzita vyjiskřování, což má za následek zvýšení rychlosti obrábění. V případě hrubování může dojít k přetržení drátu, nebo při dokončování je zhoršena kvalita povrchu. [19]

Čas vypnutí vyjiskřování – OFF

Zadávaný rozsah hodnot je od čtyř do padesáti. Určuje dobu prodlevy mezi jednotlivými výboji. Stejně jako v předcházejícím případě je ovlivněn parametrem PM. Čím vyšší je hodnota parametru, tím vyšší jsou jednotlivé prodlevy, tedy nižší rychlost a výkon obrábění a snížení možnosti přetržení drátu. [19]

Čas zapnutí vyjiskřování obloukem – AON

Rozsah zadávaných hodnot je v intervalu jedna až deset. Čím vyšší hodnota se zadá, tím vyšší výkon je přiváděn z generátoru do místa řezu. Zvyšuje se pravděpodobnost přetržení drátu a zhoršení drsnosti obrobeného povrchu. Nastavení neplatí v případě, že parametr PM je nastaven v rozmezí hodnot jedna až osm. [19]

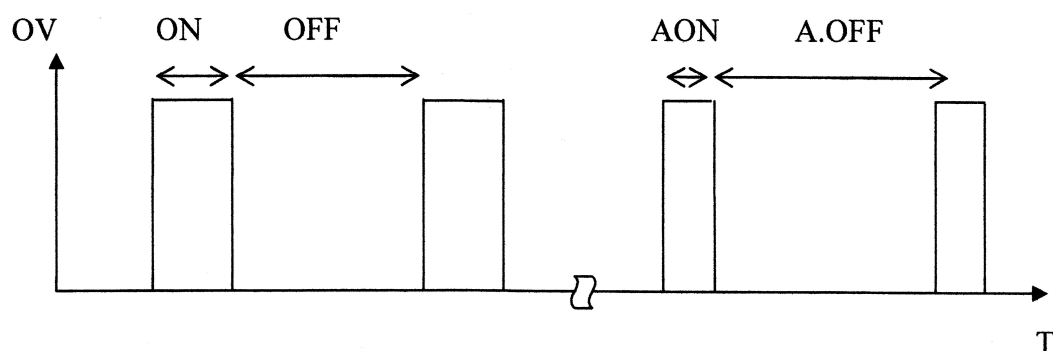
Čas vypnutí vyjiskřování obloukem – AOFF

V případě hrubovacího řezu, kde drát často vyjíždí a najíždí do materiálu, nebo dokončovacího řezu se zadávají vyšší hodnoty daného parametru. Vyšší hodnoty snižují výkon přiváděný generátorem, ale zlepšují kvalitu obrobeného povrchu a zamezují trhání drátu. Pokud je na parametru PM nastavena hodnota od jedné do osmi, tak dané nastavení neplatí. [19]

Aktivní parametry ON, AON, OFF a AOFF jsou znázorněny v grafu závislosti přerušení napětí na čase (viz. obr. 5.12).

Řízení serva – SM

Nastavení probíhá pomocí ISO kódů G94/G95 nebo M90/M91.



Obr. 5.12 Graf závislosti přerušení napětí na čase [19]

Napětí serva – SV

Nastavením parametru napětí serva určujeme horní limit pro obráběcí napětí. Rozsah zadávaných hodnot je od šestnácti do devadesáti voltů. [19]

Odezva serva – SC

Zadávaný rozsah hodnot je od nuly do devadesáti devíti. Obecně platí, čím vyšší hodnota se zadá, tím rychlejší je obrábění i větší pravděpodobnost přetržení drátu. [19]

Napnutí řezacího drátu – WT

Rozsah zadávaných hodnot je jedna až dvacet. Velikost napnutí drátu je důležitý parametr vzhledem k přesnosti obrobené plochy. Při řezání svislých ploch se zadávají vyšší hodnoty, aby se co nejvíce eliminovaly vibrace drátu. Při řezání kuželových a šikmých ploch se využívají nižší hodnoty napnutí drátu, aby nedocházelo k přetržení drátu především u hrubovacích operací. V tab. 5.3 jsou znázorněny hodnoty aktivního parametru WT spolu s velikostí napnutí drátu. [19]

Tab. 5.3 Volba stanovených hodnot napnutí řezacího drátu [19]

WT [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Napnutí [g]	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
WT [-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Napnutí [g]	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200

Odvíjení řezacího drátu – WF

Rozsah nastavení hodnot je od jedné do dvaceti. Odvíjení řezacího drátu určuje rychlost odvíjení drátu z cívky. Velikost rychlosti odvíjení drátu je závislá na výšce obráběné součásti. Čím je vyšší obráběná součást, tím větší hodnota rychlosti odvíjení řezacího drátu se zadává (z důvodu opotřebení drátu). Tabulka 5.4 uvádí skutečnou rychlost odvíjení řezacího drátu vzhledem k zadanému parametru. [19]

Tab. 5.4 Hodnoty pro odvíjení řezacího drátu [19]

WF [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rychlost [m/min]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
WF [-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Rychlost [m/min]	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

Tlak vody – WA

Hodnoty je možné zadávat v rozmezí jedna až osm. Parametr WA určuje množství přivedeného dielektrika do místa řezu a následný výplach. Zadáváním vyšších hodnot se zvyšuje tlak vody vycházející z trysek umístěných ve vodících hlavách. Při volbě nastavení tlaku vody se volí kompromis mezi rychlostí obrábění (vyšší hodnoty WA) a přesností (nižší hodnoty WA). [19]

Rychlost posuvu – FEED

Určuje rychlost pochybu drátu ve směru řezu. Hodnoty se zadávají v jednotkách mm/min. Pro zadání maximální rychlosti obrábění 50 mm/min se používá ISO kód G95 nebo M90. V případě nastavení stálé rychlosti obrábění se využívá ISO kódu G94 nebo M91. [19]

Procentuální hodnota rychlosti posuvu – %

Rychlost obrábění se řídí podle vzorce (5.2), kdy je rovna rychlosti posuvu násobenou procentuální hodnotou rychlosti posuvu. [19]

Rychlost obrábění:

$$v = v_F \cdot v_{F\%} \quad (5.2)$$

Každý výrobce drátových řezaček má své vlastní aktivní parametry EDM technologie. Zadání stejných hodnot aktivních parametrů na dvou různých řezačkách by vedlo k nastavení odlišné technologie pro řezání. Uvedené aktivní parametry jsou určeny pro stroj V 650 S od firmy EXCETEK. V tab. 5.5 jsou uvedeny použité aktivní parametry technologie pro výrobu řemenice 75-8M-130. Hodnoty aktivních parametrů byly zvoleny po konzultaci s obsluhou stroje.

Tab. 5.5 Zvolené aktivní parametry

Aktivní parametr	Zadaná hodnota	Aktivní parametr	Zadaná hodnota
NO	0001	SV	38
PM	10	WT	10
OV	14	WF	4
ON	11	%	100
OFF	9	FEED	0,5
AON	7	SM	M90
AOFF	8	SC	13

6 KONTROLA PŘESNOSTI ELEKTROEROZIVNÍCH DRÁTOVÝCH STROJŮ

Kontrola přesnosti byla provedena na elektroerozivní drátové řezačce V 650 od firmy EXCETEK. Všechna měření proběhli ve firmě FERMAT. Přesnost stroje byla zajištěna třemi měřeními:

- zkouška polohovací přesnosti přímým měřením na stroji,
- měření geometrie dle normy ISO 230 – 4 analýza kruhovitosti,
- seřízení souososti vodících hlav.

6.1 Zkouška polohovací přesnosti přímým měřením na stroji

6.1.1 Postup měření

Měření je prováděno pouze na nezatíženém stroji. Při měření je stroj programován tak, aby se měřená část stroje pohybovala v určené ose na přesně daných bodech, které jsou od sebe stejně vzdáleny. V každém bodě musí měřená část stroje zůstat v klidu dostatečně dlouho, aby mohla být dosažená skutečná poloha změřena a zaznamenána. Stroj je dále programován tak, aby se velikost posuvu mezi jednotlivými body měření vykonávala stejnou rychlostí (v daném případě 1 000 mm/min). Při měření stroje, který má rozsah řízených os do 2 000 mm, musí se zajistit nejméně pět měřících poloh na vzdálenosti jednoho metru. Do každé zadané polohy musí být najeto v obou směrech pohybu z důvodu zajištění stanovené opakovatelnosti. Poloha, ve které dochází ke změně smyslu pohybu měřené součásti, je zvolena tak, aby se zajistilo normální chování stroje (dosažení dohodnuté rychlosti posuvu). Měřený signál je zaznamenáván a vyhodnocován počítačem.

6.1.2 Podmínky měření

Teplota prostředí v okolí stroje se při měření musí pohybovat v rozmezí od 18 do 22 °C, přičemž se snažíme co nejvíc přiblížit hodnotě 20 °C. Měřený stroj musí být v daném prostředí dostatečně dlouho, aby bylo před měřením zajištěno ustálení teploty. Měřicí přístroj a měřený stroj musí být dostatečně chráněný před vnějšími vlivy, např. průvanem, tepelnými zdroji, vibracemi atd. Před započítáním měření musí být stroj kompletně smontován a plně funkční.

6.1.3 Použité měřicí přístroje

Laserová hlavice Renishaw XL – 80 (obr. 6.1), kompenzační jednotka Renishaw XC – 80 (obr. 6.2), optika Kombo Kit (obr. 6.1), kalibrační software – Laser XL. Kompenzační jednotka je vybavena čidly pro měření (obr. 6.2):

- atmosférického tlaku,
- vlhkosti vzduchu,
- teploty vzduchu,
- teploty materiálu.



Obr. 5.1 Laserová hlavice Renishaw XL – 80 a optika Kombo Kit



Obr. 5.2 Kompenzační jednotka Renishaw XC – 80 a teplotní čidlo

6.1.4 Charakteristické veličiny pro posuzování polohovací přesnosti

Vratné rozpětí – U_j

Vratné rozpětí U_j (6.1) je systematická odchylka, která představuje ve zvolené ose rozdíl středních hodnot (6.2, 6.3). Dané hodnoty jsou měřeny v obou pojezdových směrech pro každou zvolenou polohu. Maximální vratné rozpětí $U_{\max}$ (6.4) je největší dosažené vratné rozpětí v celém měřeném úseku. Střední vratné rozpětí je aritmetická střední hodnota vratných rozpětí všech změřených poloh na zvolené zkušební ose. [20]

Vratné rozpětí v místě x_j [20]:

$$U_j = \left| \overline{x_j}^{\uparrow} - \overline{x_j}^{\downarrow} \right| \quad (6.1)$$

Střední hodnota jednotlivých změřených hodnot v místě x_j v kladném směru najíždění [20]:

$$\overline{x_j}^{\uparrow} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\uparrow} \quad (6.2)$$

Střední hodnota jednotlivých změřených hodnot v místě x_j v záporném směru najíždění [20]:

$$\overline{x_j}^{\downarrow} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}^{\downarrow} \quad (6.3)$$

Maximální vratné rozpětí [20]:

$$U_{\max} = U_{j_{\max}} \quad (6.4)$$

Šířka polohového rozptylu – Ps

Šířka polohového rozptylu Ps (6.5) popisuje pro měřenou osu účinek nahodilých odchylek v každé měřené poloze. Udává se stanovenou statistickou pravděpodobností. Střední šířka polohového rozptylu je aritmetická střední hodnota všech šířek polohových rozptylů pro každou zjištěnou polohu na zvolené zkušební ose. Maximální šířka polohového rozptylu $Ps_{\max}$ (6.9) je největší dosažená šířka polohového rozptylu v celém měřeném úseku. [20]

Šířka polohového rozptylu v místě opakovatelnosti polohy x_j , jestliže $U_j=0$ [20]:

$$Ps_j = 6 \cdot \overline{s_j} \quad (6.5)$$

Střední standardní odchylka s_j naměřených hodnot v místě x_j [20]:

$$\overline{s_j} = \frac{s_j \downarrow + s_j \uparrow}{2} \quad (6.6)$$

Standardní odchylka jednotlivých měřených hodnot v místě x_j v kladném směru najíždění [20]:

$$s_j \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \uparrow - \overline{x_j} \uparrow)^2} \quad (6.7)$$

Standardní odchylka jednotlivých měřených hodnot v místě x_j v záporném směru najíždění [20]:

$$s_j \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} \downarrow - \overline{x_j} \downarrow)^2} \quad (6.8)$$

Maximální šířka polohového rozptylu [20]:

$$Ps_{\max} = Ps_j \quad (6.9)$$

Polohová nespolehlivost – P

Polohová nespolehlivost P (6.10) je celková odchylka zjištěná na měřené ose při respektování charakteristických veličin zjištěných v jednotlivých polohách z systematické odchylky (6.11), vratného rozpětí (6.1) a šířky polohového rozptylu (6.9). V polohové nespolehlivosti P jsou zahrnuty systematické i nahodilé odchylky. [20]

Polohová nespolehlivost [20]:

$$P = \left[\overline{x_j} + \frac{1}{2}(U_j + Ps_j) \right]_{\max} - \left[\overline{x_j} - \frac{1}{2}(U_j + Ps_j) \right]_{\min} \quad (6.10)$$

Systematická odchylka od požadované hodnoty v místě x_j [20]:

$$\overline{x_j} = \frac{\overline{x_j} \uparrow + \overline{x_j} \downarrow}{2} \quad (6.11)$$

Polohová odchylka – Pa

Polohová odchylka Pa (6.12) je systematická odchylka maximálních rozdílů středních hodnot ze všech měřených poloh v měřené ose. [20]

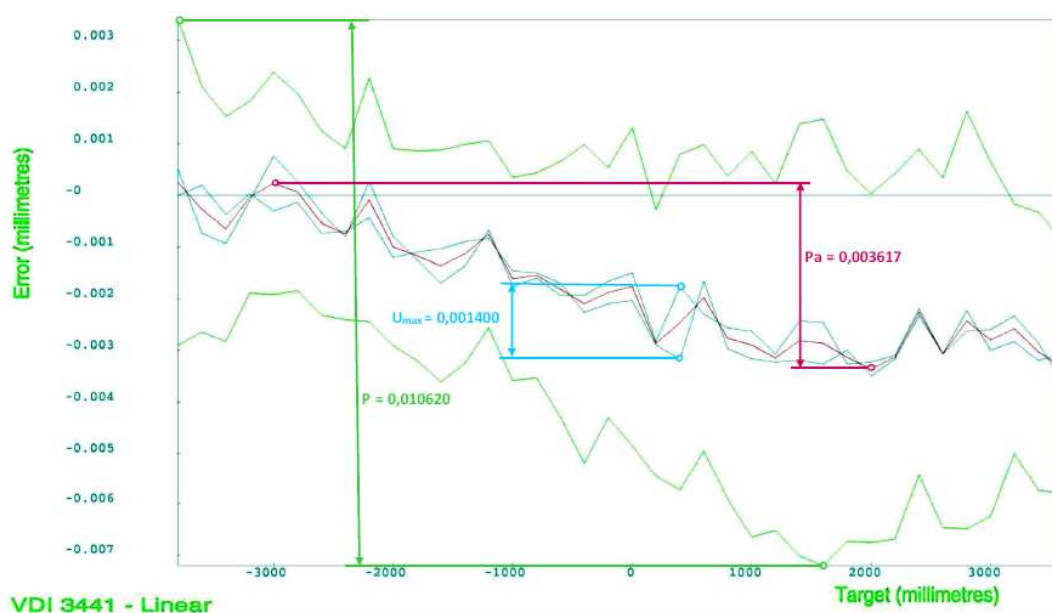
Polohová odchylka [20]:

$$Pa = \left| \overline{xj}_{\max} - \overline{xj}_{\min} \right| \quad (6.12)$$

V tab. 6.1 jsou zmíněny povolené tolerance při měření polohové nespolehlivosti podle německé normy VDI/DGQ 3441. Na obr. 6.3 je znázorněno odečtení charakteristických veličiny z výsledného grafu měření.

Tab. 6.1 Povolené tolerance [20]

Standard v osách X/Y	Přesnost	
Polohová nespolehlivost P (X do 1 m)	15	µm
Maximální šířka polohového rozptylu P _{smax}	10	Nm
Maximální vratné rozpětí U _{max}	5	Nm
Polohová odchylka P _a	8	Nm



Obr. 6.3 Graf VDI 3441 po korekcích odměřování s charakteristickými veličinami

6.1.5 Naměřená a kompenzovaná data

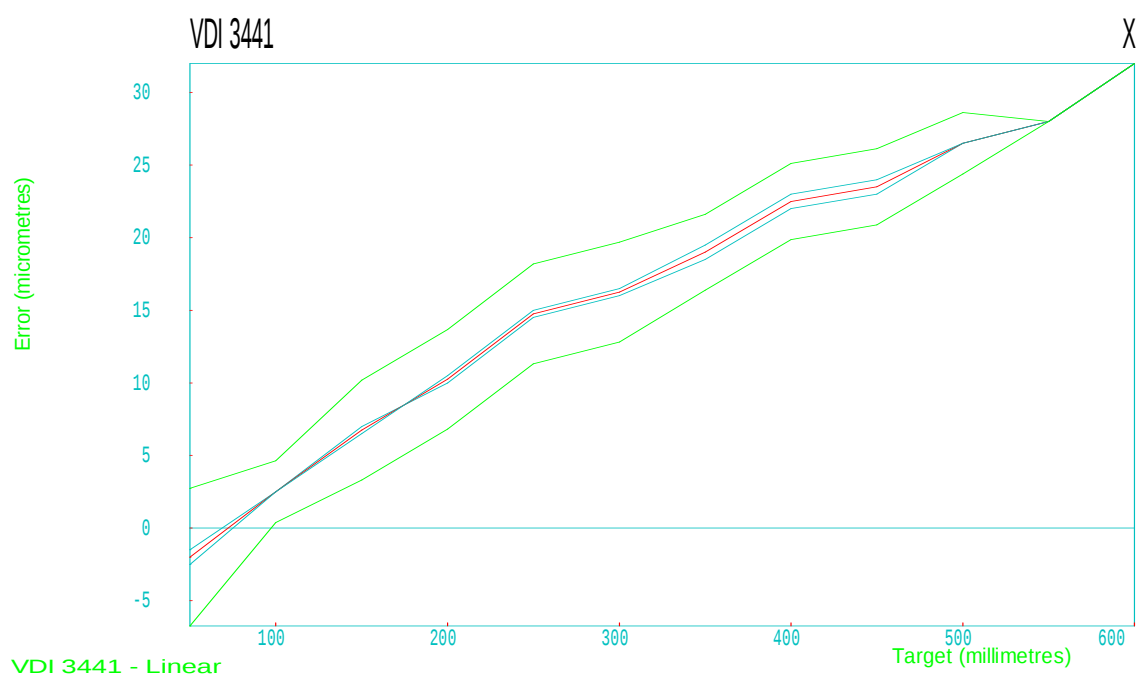
Zkouškou polohovací přesnosti přímým měřením se na stroji měřily osy X a Y. Veškerá naměřená a kompenzovaná data jsou zpracována v jednotlivých grafech. Výsledky z měření osy X a Y před kompenzací jsou uvedeny v obr. 6.4 pro osu X a obr. 6.7 pro osu Y. Výsledky, po provedení kompenzace na ose X a Y, jsou znázorněny pro osu X v obr. 6.5 a osu Y v obr. 6.8. Na obr. 6.6 a 6.9 jsou uvedeny trendy měření pro každou osu zvlášť. Podmínky prostředí během měření osy X jsou uvedeny v tab. 6.2, pro osu Y v tab. 6.3.

Tab. 6.2 Podmínky prostředí při měření osy X

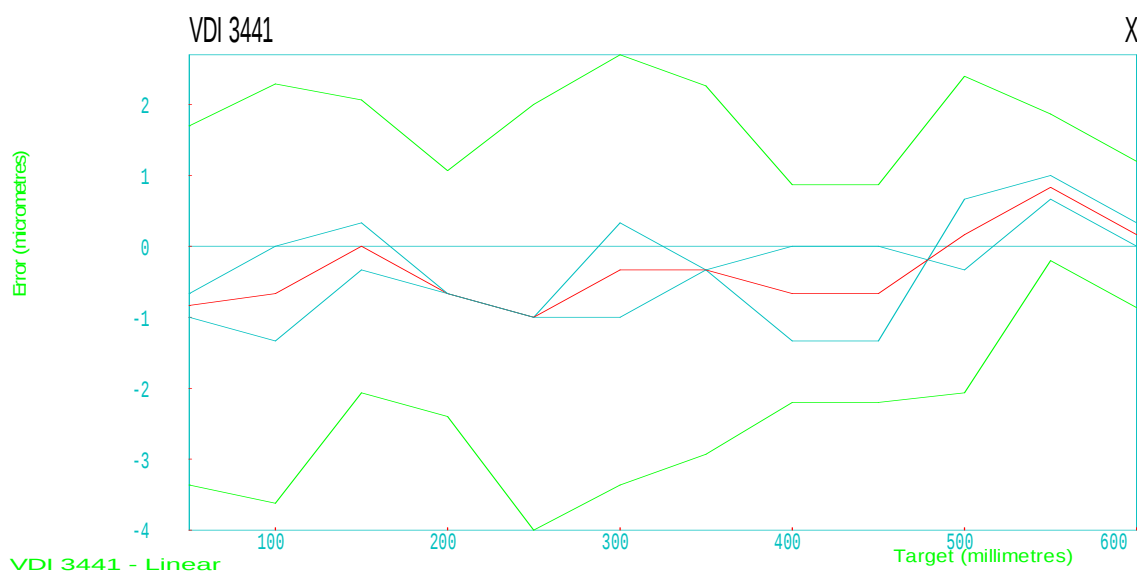
Data	Začátek měření	Konec měření	Jednotky
Datum	17:03	18:21	
Den	25.3.2011	25.3.2011	
Teplota vzduchu	21.36	21.30	[°C]
Atmosférický tlak	1009.2	1009.4	[mbar]
Vlhkost vzduchu	35.97	35.71	[%]
Teplota materiálu 1	18.85	18.84	[°C]
Teplota materiálu 2	18.77	18.78	[°C]
Koeficient roztažnosti	8.00	8.00	[ppm/°C]
Environment factor	0.3164149	0.31641445	[-]

Tab. 6.3 Podmínky prostředí při měření osy Y

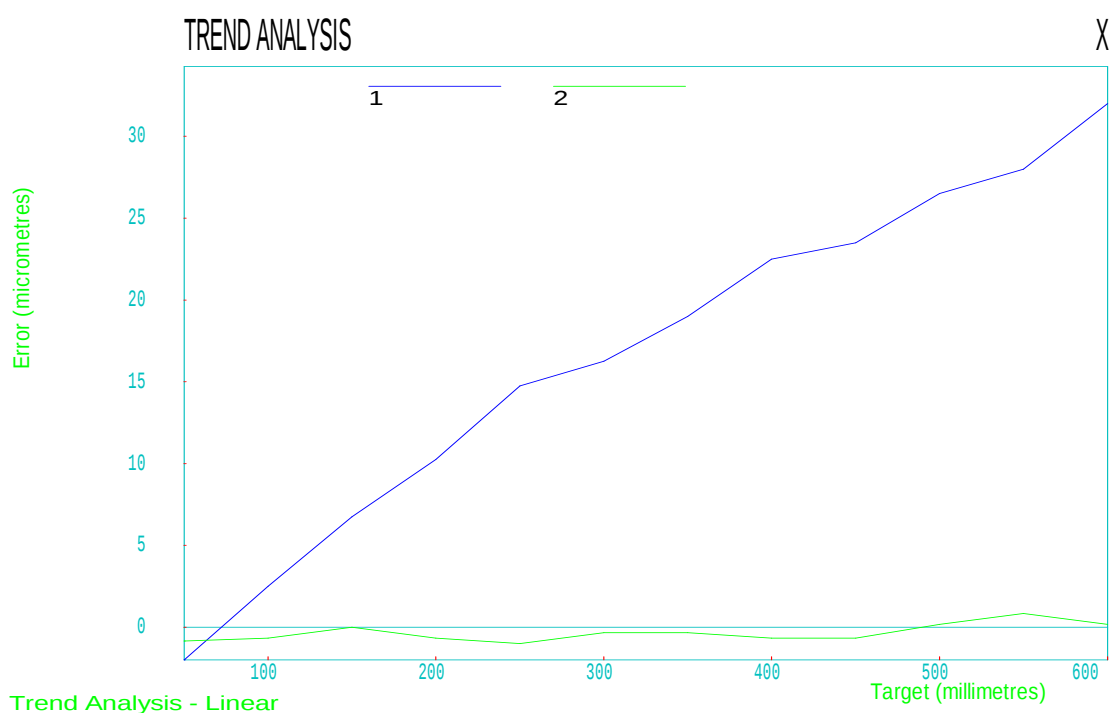
Data	Začátek měření	Konec měření	Jednotky
Datum	19:29	20:15	
Den	25.3.2011	25.3.2011	
Teplota vzduchu	21.33	21.39	[°C]
Atmosférický tlak	1007.4	1007.6	[mbar]
Vlhkost vzduchu	36.58	36.41	[%]
Teplota materiálu 1	18.56	18.59	[°C]
Teplota materiálu 2	18.62	18.66	[°C]
Koeficient roztažnosti	8.00	8.00	[ppm/°C]
Environment factor	0.31641520	0.31641513	[-]



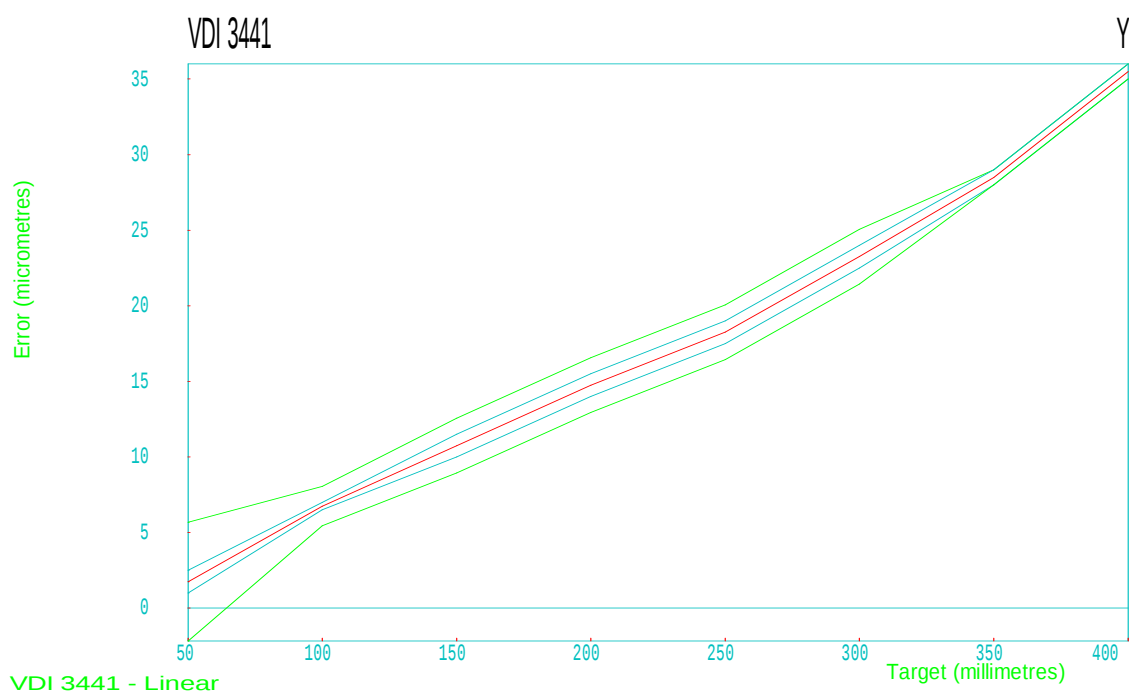
Obr. 6.4 Graf výsledku měření osy X před kompenzací podle normy VDI 3441



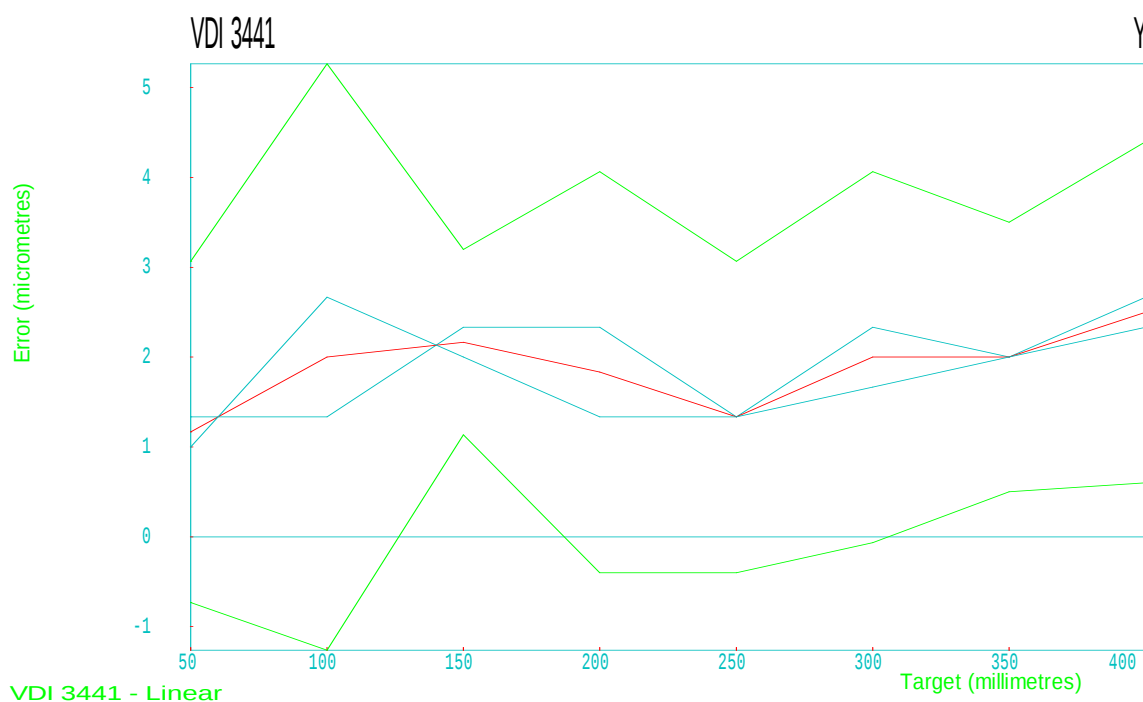
Obr. 6.5 Graf výsledku měření osy X po kompenzací podle normy VDI 3441



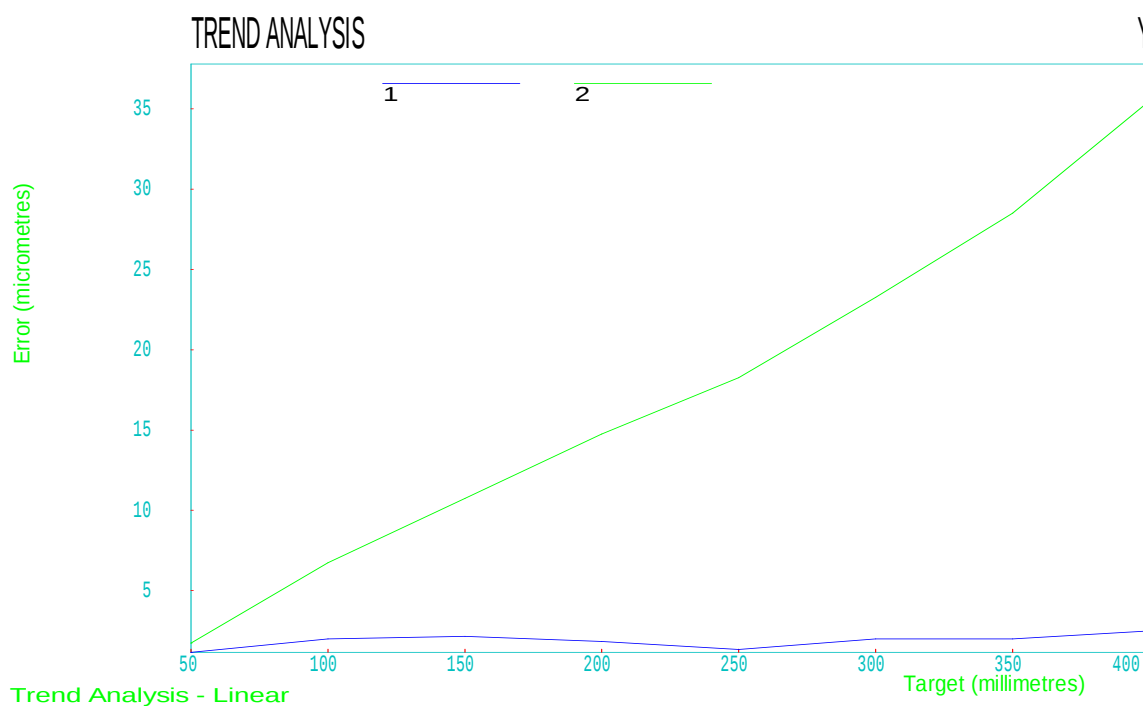
Obr. 6.6 Graf analýzy trendu pro měřenou osu X (1 před kompenzací, 2 po kompenzací)



Obr. 6.7 Graf výsledku měření osy Y před kompenzací podle normy VDI 3441



Obr. 6.8 Graf výsledku měření osy Y před kompenzací podle normy VDI 3441



Obr. 6.9 Graf analýzy trendu pro měřenou osu Y (1 před kompenzací, 2 po kompenzaci)

6.1.6 Výsledky měření

V rámci zkoušky polohovací přesnosti přímým měřením na stroji jsou výsledky měření (tab. 6.4) v osách X a Y získané jak před nastavením pravítek, tak i po jejich seřízení. Při provedení prvního měření bylo zjištěno, že dvě charakteristické veličiny – polohová nespolehlivost a polohová odchylka – nesplňují stanovená kritéria povolených tolerancí (tab. 6.1). Polohová nespolehlivost - P o 23,743 μm nesplnila dané rozmezí povolených tolerancí. V případě polohové odchylky byly naměřené hodnoty mimo povolené tolerance o 26 μm . Po seřízení osy X a Y jsou charakteristické veličiny v povolených tolerancích.

Tab. 6.4 Výsledky měření

Charakteristické veličiny	Osa X před kompenzací [μm]	Osa X po kompenzaci [μm]	Osa Y před kompenzací [μm]	Osa Y po kompenzaci [μm]
P	38,743	6,699	38,182	6,529
Pa	34,000	1,833	33,750	1,333
PS _{max}	8,485	6,000	6,364	5,196
U _{max}	1,421	1,333	1,500	1,342

6.2 Měření geometrie dle normy ISO 230 – 4 analýza kruhovitosti

6.2.1 Postup měření

Měření je prováděno vždy na nezátíženém stroji. Měření dat se provádí po směru nebo proti směru chodu hodinových ručiček na referenční kružnici definované středem a poloměrem $R = 150 \text{ mm}$. Teleskopická měřicí tyč s kulovými klouby je ke stroji připevněna pomocí dvou magnetických objímek. Jedna objímka je přichycena na loži stroje, druhá na suportu. Objímka na suportu se pohybuje po relativní kruhové dráze. Během měření je nepřetržitě zaznamenávána jakákoliv změna vzdálenosti mezi oběma konci teleskopické měřicí tyče. Měřený signál je zaznamenán a následně převeden na kruhový diagram, který je poté vyhodnocen počítačem. Pro určení kruhové hystereze jsou skutečné dráhy měřeny v nepřetržitém sledu pro různé rychlosti posuvu. Na stroji bylo provedeno měření kruhové interpolace v rovině XY uprostřed upínacího stolu.

6.2.2 Podmínky měření

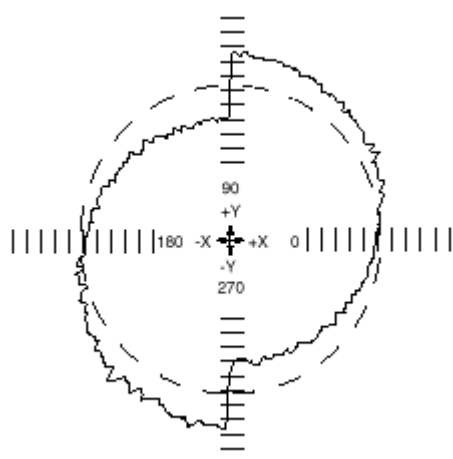
Podmínky měření z hlediska připravenosti stroje a odstranění nežádoucích vlivů jsou stejné jako v odstavci 6.1.2 Podmínky měření. V případě měření radiální úchylky musí být znám referenční rozměr teleskopické měřicí tyče. Nezbytností kruhové hystereze je změření obou skutečných drah ihned po sobě. První ve směru hodinových ručiček a druhé v protisměru hodinových ručiček.

6.2.3 Měřicí přístroj

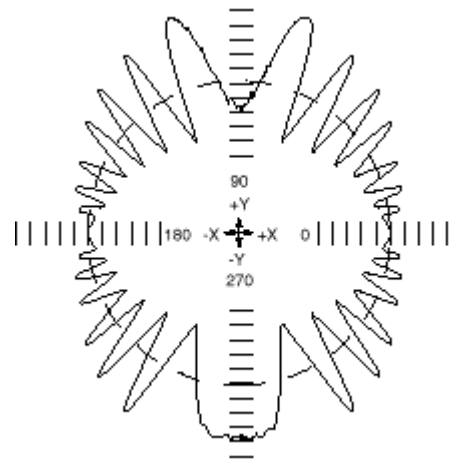
Ballbar QC – 10:	Sériové číslo Ballbaru	H50431
	Koeficient roztažnosti stroje	8:00 [ppm/°C]
	Nominální délka	150 [mm]
	Faktor měřítka	1,0002 [mm]

6.2.4 Charakteristické typy grafů chyb

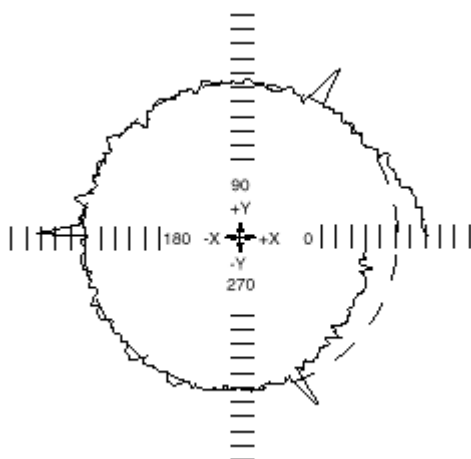
Tato část obsahuje všechny charakteristické typy grafů chyb, které mohou vzniknout při měření geometrie – analýzy kruhovitosti. Chybové grafy mohou vzniknout chybami stroje nebo chybami testu. Chyby stroje vznikají chybami nebo poruchami měřeného stroje. Chyby nebo poruchy vzniklé při měření a chyby měřicího systému nazýváme chybami testu. V následujících grafech (obr. 6.10, 6.11 a 6.12) jsou uvedeny jednotlivé chyby. Strojní chyby jsou označeny písmenem S a testové chyby písmenem T. [7]



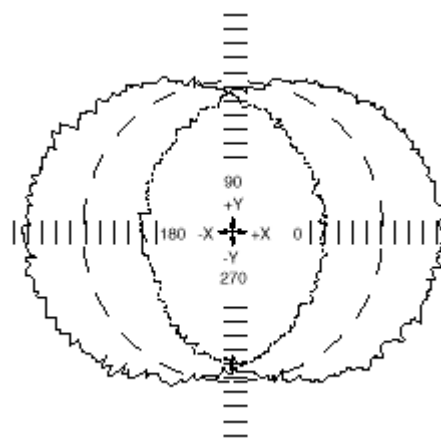
a) Axiální vůle (mrtvý chod) – S



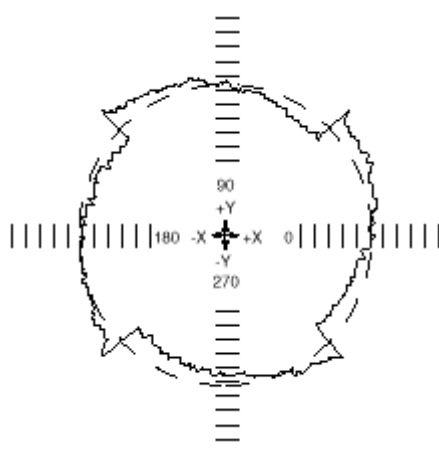
b) Cyklická chyba – S



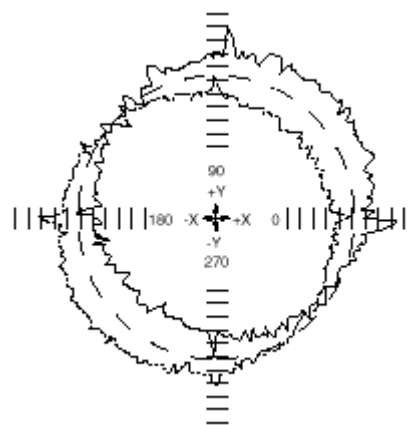
c) Spirálová chyba – T



d) Boční vůle (odchýlení) – S

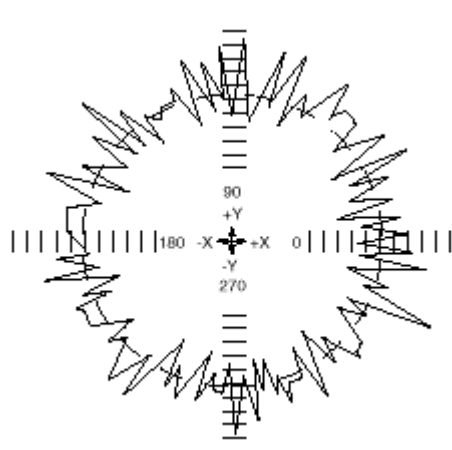


e) Záměna řídicí a řízené role – S

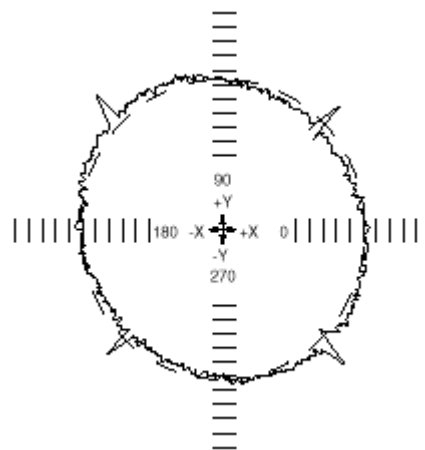


f) Posunutí středu – T

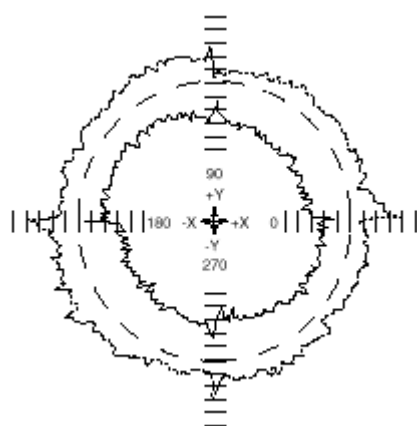
Obr. 6.10 Charakteristické typy grafů chyb - část 1. [7]



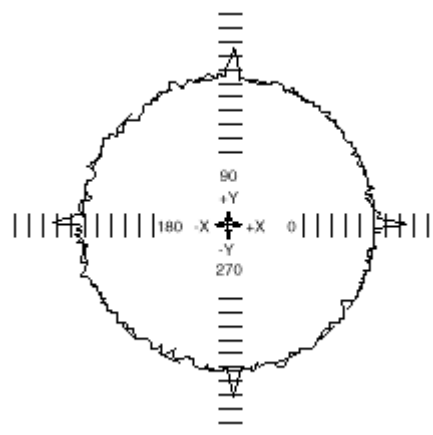
g) Přerušovaný graf – T



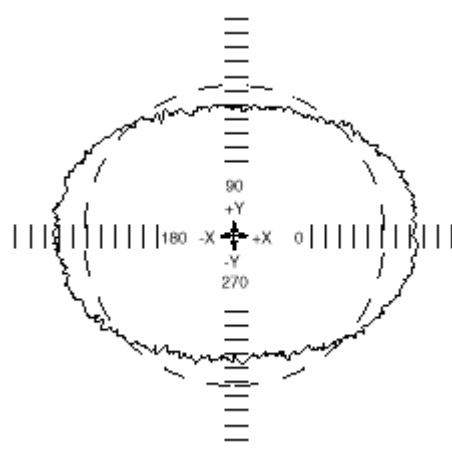
h) Pootočený graf – T



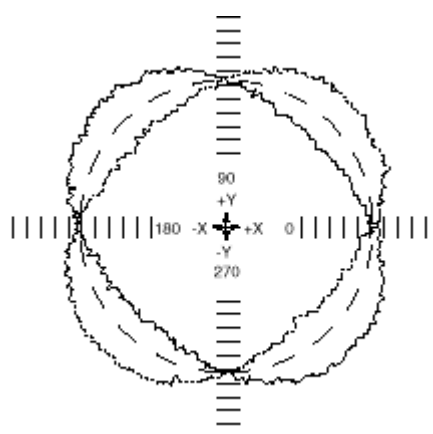
ch) Změna poměru – T



i) Reverzační šípíčky – S

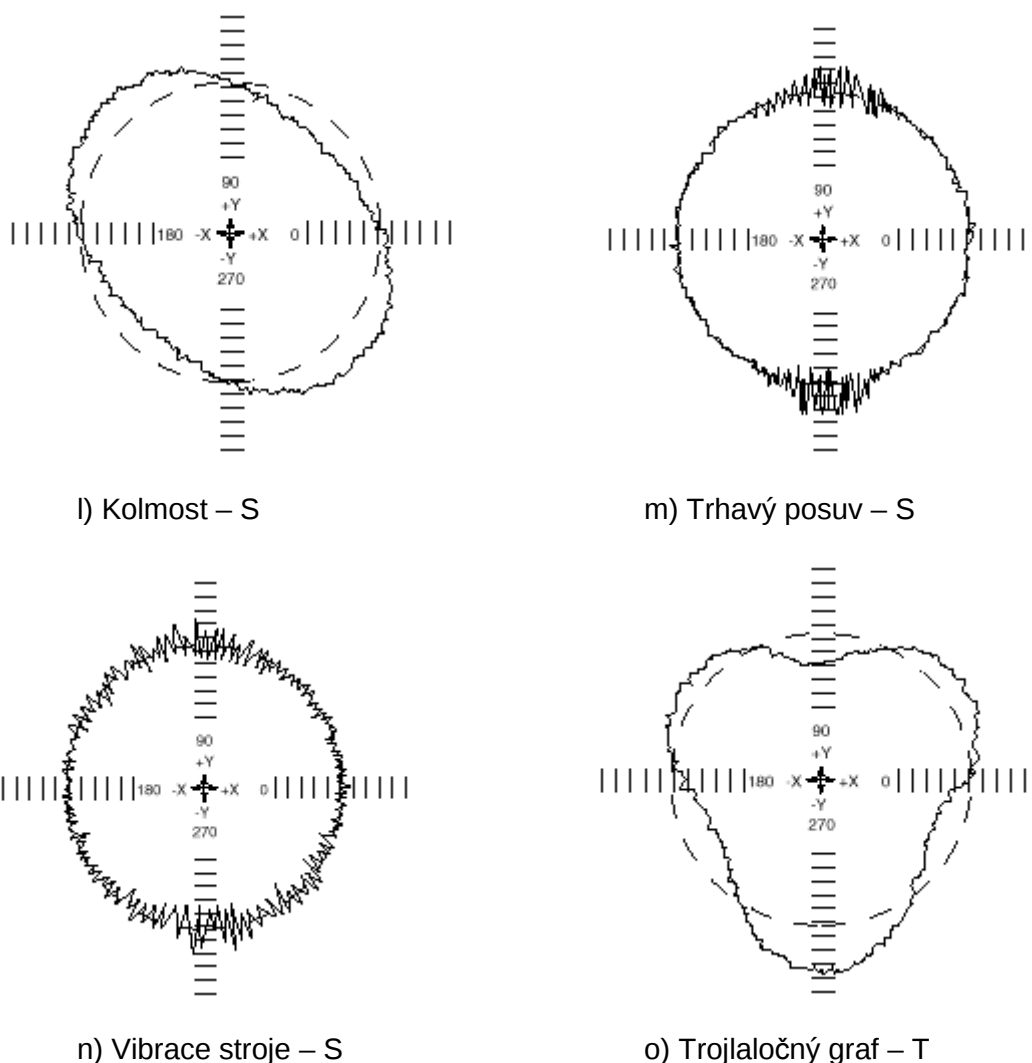


j) Chyba měřítka – S



k) Neshoda serva – S

Obr. 6.11 Charakteristické typy grafů chyb – část 2. [7]



Obr. 6.12 Charakteristické typy grafů chyb – část 3. [7]

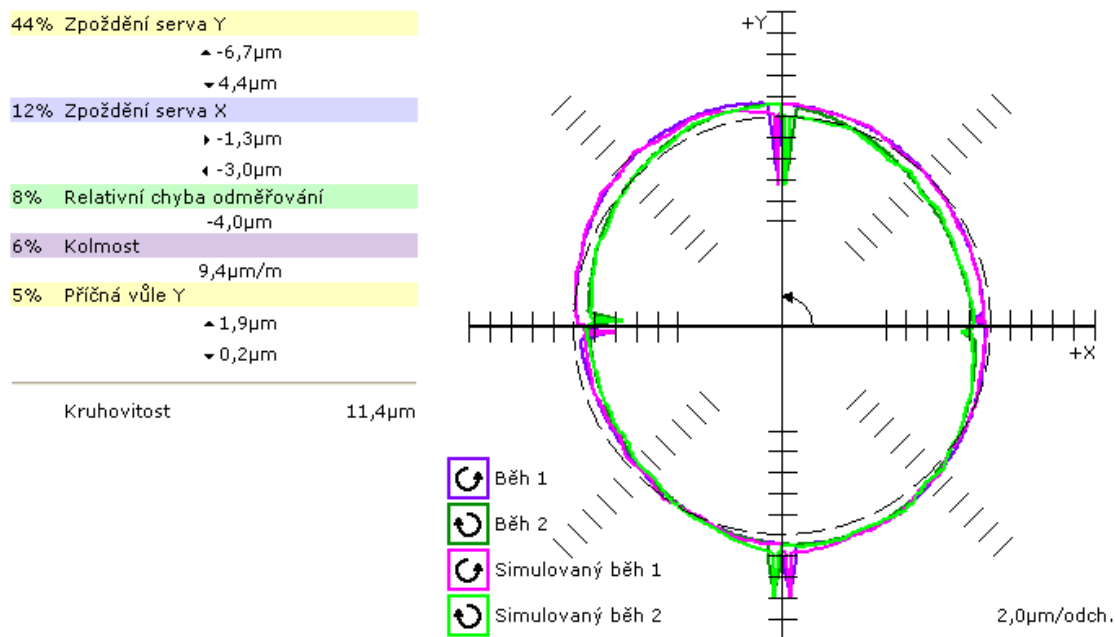
6.2.5 Výsledky měření

Při měření geometrie kruhovitosti byla dosažena uspokojivá hodnota kruhovitosti $11,4 \mu\text{m}$ (obr. 6.13). Vzhledem k dosažené hodnotě kruhovitosti stroj vyhovuje normě ISO 230-4. Výsledky měření ukazují, že největší procentuální podíl na chybě kruhovitosti má nedostatečné odladění zpoždění serva (obr. 6.11 i) v obou osách (především v ose Y). Při zpoždění serva, dochází-li k pohybu osy v jednom směru, po němž má nastat obrat a následný pohyb v opačném směru, může v místě obratu dojít ke chvilkovému zastavení místo plynulé změny chodu.

Existuje několik příčin vzniku zmíněného problému:

- Pohon osy vyvinul v místě obratu nepřiměřený krouticí moment, který při změně směru pohybu, a tedy i směru třecí síly způsobil chvilkové zablokování v místě obratu.
- Nedochozí včas ke kompenzaci axiální vůle stroje, což má z následků, že během prodlevy při vymezení axiální vůle dojde k zastavení osy.
- Zpoždění odezvy servosystému v místě změny směru způsobuje krátkou prodlevu ukončení pohybu v jednom směru a rozjetí v opačném směru.

Všechny charakteristické chyby, které byly zjištěny během měření geometrie kruhovitosti, jsou uvedeny v tab. 6.4, kde je zaznamenána velikost chyby v obou směrech, význam a podíl chyby na celkové kruhovitosti.



Obr. 6.13 Procentuální výsledky diagnostiky a graf testu

Tab. 6.4 Diagnostická tabulka

Chyba	Hodnota		Nezávislá kruhovitost		Význam chyby
Mrtvý chod X	► -0,2	◄ -0,5μm	0,5μm	(2%)	(9)
Mrtvý chod Y	▲ -1,1	▼ 0,9μm	1,1μm	(4%)	(6)
Zpoždění serva X	► -1,3	◄ -3,0μm	3,0μm	(12%)	(2)
Zpoždění serva Y	▲ -6,7	▼ 4,4μm	11,1μm	(44%)	(1)
Příčná vůle X	► 1,7	◄ -1,7μm	0,9μm	(3%)	(7)
Příčná vůle Y	▲ 1,9	▼ 0,2μm	1,3μm	(5%)	(5)
Amplituda cyklické chyby X	↑ 0,3	↓ 0,2μm	0,3μm	(1%)	(10)
Amplituda cyklické chyby Y	↑ 0,4	↓ 0,5μm	0,5μm	(2%)	(8)
Neshoda serva	0,01ms		0,2μm	(1%)	(12)
Kolmost	9,4μm/m		1,4μm	(6%)	(4)
Přímochařost X	0,6μm		0,3μm	(1%)	(11)
Přímochařost Y	-0,1μm		0,0μm	(0%)	(13)
Relativní chyba odměřování	-4,0μm		2,0μm	(8%)	(3)

6.3 Seřízení souososti vodících hlav

6.3.1 Postup měření

Při měření je stroj programován tak, aby se měřená část stroje pohybovala v určených osách. Cílem měření je dosáhnout souososti vodících hlav (osa U a V se musí rovnat nule), tedy zajištění vertikálního řezu. Měření je prováděno za pomoci seřizovacího zařízení (obr. 6.14), které je dodáno od výrobce měřeného stroje. Seřízení os U a V je provedeno přímo softwarem stroje. Měřený signál je zaznamenán pomocí dotyku mezi drátem a dvěma čidly, která jsou součástí seřizovacího zařízení.

6.3.2 Podmínky měření

Měření je prováděno pouze na nezatíženém stroji. Při měření se musí teplota prostředí v okolí stroje pohybovat v rozmezí od 18 do 22 °C. Měřicí přístroj a měřený stroj musí být dostatečně chráněny před vnějšími vlivy, např. průvanem, tepelnými zdroji, vibracemi atd.

6.3.3 Měřicí přístroj

EXCETEK W-EDM:

WIRE ALIGNMENT DEVICE

Lot:

EXT7302



Obr. 6.14 Seřazování souososti vodících hlav na stroji V 650 EXCETEK

7 SMĚRY DALŠÍHO VÝVOJE ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ V PODMÍNKÁCH FIRMY

Firma je vybavena čtyřmi elektroerozivními drátovými stroji od firmy EXCETEK. Tři stroje typu V 650 byly zakoupeny v roce 2007, čtvrtý stroj V 1280 /Speciál byl zakoupen o rok později. Zakoupené stroje plně vyhovují stávajícím podmínkám a požadavkům firmy na výrobu. Počet elektroerozivních drátových strojů z hlediska kapacitního využití jednotlivých strojů je dostačující a je naprosto zbytečné uvažovat o koupi nového obráběcího stroje.

První tři stroje jsou umístěny v oddělených a klimatizovaných prostorách, kde bylo provedeno měření teploty. Teplota byla měřena na rtuťovém teploměru, který byl umístěn v blízkosti strojů a zároveň chráněn před vnějšími vlivy. Teplota byla měřena každý všední den i během pracovních víkendů, vždy ve stanovených časových intervalech (6:00; 10:00; 14:00; 18:00 a 22:00). Časové intervaly byly stanoveny pro dvousměnný provoz. Měření teploty bylo provedeno od 8.3.2011 do 15.4.2011. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.1. a vyneseny v grafu teploty vzduchu v okolí elektroerozivních drátových strojů (obr. 7.1). Jednotlivé hodnoty teploty jsou znázorněny zelenými body. Červená čára vyznačuje vypočtený aritmetický průměr změřených hodnot teploty vzduchu (7.1). Dvě modré čáry znázorňují teplotní pásmo, ve kterém by se měla pohybovat teplota vzduchu v blízkosti stroje (18 až 22 °C).

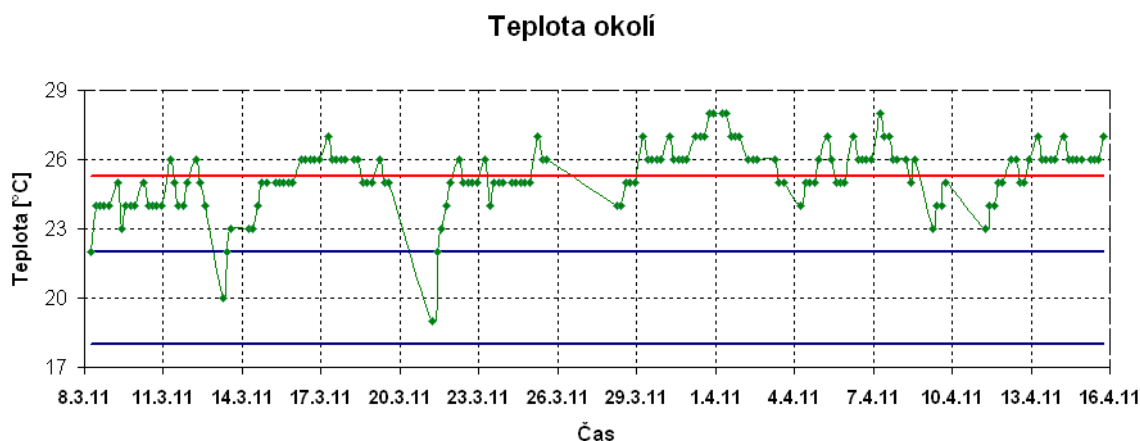
Aritmetický průměr všech změřených hodnot teploty vzduchu:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = 25,283 \quad (7.1)$$

Tab. 7.1 Změřené hodnoty teploty vzduchu

Den	Hodina	Teplota [°C]	Den	Hodina	Teplota [°C]	Den	Hodina	Teplota [°C]
8.3.2011	6:00	22	19.3.2011	14:00	25	3.4.2011	10:00	25
	10:00	24	21.3.2011	6:00	19		14:00	25
	14:00	24		10:00	22	4.4.2011	6:00	24
	18:00	24		14:00	23		10:00	25
	22:00	24		18:00	24		14:00	25
9.3.2011	6:00	25		22:00	25		18:00	25
	10:00	23	22.3.2011	6:00	26		22:00	26
	14:00	24		10:00	25	5.4.2011	6:00	27
	18:00	24		14:00	25		10:00	26
	22:00	24		18:00	25		14:00	25
10.3.2011	6:00	25		22:00	25		18:00	25
	10:00	24	23.3.2011	6:00	26		22:00	25
	14:00	24		10:00	24	6.4.2011	6:00	27
	18:00	24		14:00	25		10:00	26
	22:00	24		18:00	25		14:00	26
11.3.2011	6:00	26		22:00	25		18:00	26
	10:00	25	24.3.2011	6:00	25		22:00	26
	14:00	24		10:00	25	7.4.2011	6:00	28
	18:00	24		14:00	25		10:00	27
	22:00	25		18:00	25		14:00	27
12.3.2011	6:00	26		22:00	25		18:00	26
	10:00	25	25.3.2011	6:00	27		22:00	26
	14:00	24		10:00	26	8.4.2011	6:00	26
13.3.2011	6:00	20		14:00	26		10:00	25
	10:00	22	28.3.2011	6:00	24		14:00	26
	14:00	23		10:00	24	9.4.2011	6:00	23
14.3.2011	6:00	23		14:00	25		10:00	24
	10:00	23		18:00	25		14:00	24
	14:00	24		22:00	25		18:00	25
	18:00	25	29.3.2011	6:00	27	11.4.2011	6:00	23
	22:00	25		10:00	26		10:00	24
15.3.2011	6:00	25		14:00	26		14:00	24
	10:00	25		18:00	26		18:00	25
	14:00	25		22:00	26		22:00	25
	18:00	25	30.3.2011	6:00	27	12.4.2011	6:00	26
	22:00	25		10:00	26		10:00	26
16.3.2011	6:00	26		14:00	26		14:00	25
	10:00	26		18:00	26		18:00	25
	14:00	26	31.3.2011	22:00	26		22:00	26
	18:00	26		6:00	27	13.4.2011	6:00	27
	22:00	26		10:00	27		10:00	26
17.3.2011	6:00	27		14:00	27		14:00	26
	10:00	26		18:00	28		18:00	26
	14:00	26		22:00	28	14.4.2011	22:00	26
	18:00	26	1.4.2011	6:00	28		6:00	27
	22:00	26		10:00	28		10:00	26
18.3.2011	6:00	26		14:00	27		14:00	26
	10:00	26		18:00	27	15.4.2011	18:00	26
	14:00	25		22:00	27		22:00	26
	18:00	25	2.4.2011	6:00	26		6:00	26
	22:00	25		10:00	26		10:00	26
19.3.2011	6:00	26	3.4.2011	14:00	26		14:00	26
	10:00	25		6:00	26		18:00	27

Z grafu na obr. 7.1 vyplývá, že z celkových 159 měření byla pouze v pěti případech teplota okolí ve stanoveném rozmezí. Vzhledem k dosaženým výsledkům současné klimatizační zařízení kapacitně nedostačuje, a proto byly zpracovány tři varianty řešení na zlepšení stávajícího problému.



Obr. 7.1 Graf teploty vzduchu v okolí elektroerozivních drátových strojů

První variantou je zakoupení další klimatizační jednotky. Tato varianta je nejvhodnější pro dané podmínky. Vyznačuje se malými výkyvy a lehkou regulací teploty, zajišťuje čištění vzduchu. Nevýhodou zmíněné varianty jsou vysoké pořizovací náklady. Druhou variantou je instalace ventilátoru, který by zajišťoval odvod teplého vzduchu z výrobních prostor. Při použití ventilátoru dochází k horší regulaci teploty především v letních a zimních měsících. Tato varianta je cenově méně náročná než první. Poslední a finančně nejméně nákladnou variantou je instalace okna do venkovní zdi v prostoru u stropu. Poslední varianta je téměř neregulovatelná. Docházelo by k velkým výkyvům teplot, především v zimních měsících. Další nevýhodou při použití této varianty je téměř nemožné zajistit bezprašné prostředí, které dané stroje vyžadují. Ze třech navržených variant nejlépe vyhovuje klimatizační jednotka.

Vzhledem k zmíněným problémům s udržováním konstantní teploty v prostorech elektroerozivních drátových strojů navrhuji provést změření vlivu rozdílu teploty na přesnost obráběcích strojů a z dosažených výsledků vytvořit technologický předpis výroby, ve kterém by byly uvedené kompenzační hodnoty vzhledem k současné teplotě.

Umístění elektroerozivního drátového stroje V 1280 /Speciál v prostorách hlavní haly je z hlediska dané technologie zcela nevyhovující. Na stávajícím místě je stroj ponechán vnějším vlivům:

- velké výkyvy teploty,
- prašné prostředí,
- vibrace od vedlejšího stroje, jehož hlavní náplní jsou hrubovací operace.

Vzhledem k požadované přesnosti na vyráběné součásti navrhuji přemístění stroje do odděleného uzavřeného a klimatizovaného prostoru mimo hlavní halu v dostatečné vzdálenosti od strojů, které vytvářejí značné vibrace.

Je nutné zajištění pravidelného servisu a kontroly přesnosti elektroerozivních strojů. Kontrola přesnosti (viz. kapitola 6) by se měla provádět pravidelně po třech měsících. Z hlediska servisu je třeba zajistit pravidelné vyměňování náhradních dílů a spotřebního materiálu:

- vodítka (5 000 hod),
- přiváděče (200 – 250 hod),
- filtry (300 – 350 hod),
- pryskyřice (200 – 250 hod),
- olej (1,2 l/měs).

8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V této části diplomové práce jsou řešeny celkové náklady na provoz elektroerozivního drátového stroje ve firmě Fermat.

Elektroerozivní drátový stroj pracuje ve třisměnném provozu. V rovnici 8.1 je proveden výpočet předpokládaných provozních hodin stroje s přihlédnutím k odstavení stroje z důvodů poruchy nebo preventivní údržby. Firma Fermat vyrábí a zajišťuje servis obráběcích strojů, vzhledem k tomu je firma schopná zajistit si servis sama a za nižší hodinovou sazbu jak preventivní prohlídky, tak údržby po poruše (8.2).

Počet provozních hodin stroje za rok:

$$T_{pro} = (S_s \cdot T_s \cdot D_{rok} - T_u - T_p) \cdot T_{vs} = 4902,4[hod / rok] \quad (8.1)$$

Směnnost stroje	$S_s = 3$
Délka směny	$T_s = 8 \text{ hod}$
Počet pracovních dní v roce	$D_{rok} = 260 \text{ dní}$
Časový fond preventivní údržby	$T_u = 40 \text{ hod/rok}$
Předpokládaná doba údržby po poruše	$T_p = 72 \text{ hod/rok}$
Procentuální využití stroje	$T_{vs} = 80 \%$

Náklady na údržbu:

$$N_u = \frac{T_u \cdot S_u + T_p \cdot S_p}{T_{pro}} = 8[Kč / hod] \quad (8.2)$$

Hodinová sazba preventivní prohlídky	$S_u = 350 \text{ Kč/hod}$
Hodinová sazba údržby po poruše	$S_p = 350 \text{ Kč/hod}$

Obsluha stroje pracuje na dvousměnný provoz v osmihodinové pracovní době a obsluhuje současně čtyři elektroerozivní drátové stroje. Náklady na obsluhu jednoho stroje jsou vypočítány v rovnici 8.3.

Náklady na obsluhu stroje:

$$N_{os} = \frac{S_o \cdot T_s \cdot D_{rok} \cdot S_{os}}{N_s \cdot T_{pro}} = 59,4 [Kč / hod] \quad (8.3)$$

Hodinová sazba obsluhy stroje $S_{os} = 280 \text{ Kč/hod}$

Směnnost obsluhy stroje $S_o = 2$

Počet obsluhovaných strojů $N_s = 4$

Do výpočtu nákladů na provoz stroje (8.4) je zahrnuta spotřeba elektrického proudu, stlačeného vzduchu, oleje pro stlačený vzduch a dielektrika. Stlačený vzduch je odebírán z firemního rozvodu stlačeného vzduchu. Dielektrikum je deionizovaná destilovaná voda, která se získává filtrací pitné vody z vodovodního řádu.

Náklady na provoz stroje:

$$N_{ps} = P_s \cdot C_{kWh} + S_v \cdot C_{vz} + \frac{S_d \cdot C_d + N_o}{T_{pro}} = 69,3 [Kč / hod] \quad (8.4)$$

Příkon stroje $P_s = 13 \text{ kWh}$

Cena 1 kWh $C_{kWh} = 5 \text{ Kč/kWh}$

Spotřeba dielektrika $S_d = 1040 \text{ l/rok}$

Cena 1 l dielektrika $C_d = 1,3 \text{ Kč/l}$

Spotřeba stlačeného vzduchu $S_v = 1,6 \text{ m}^3/\text{hod}$

Cena 1 m³ stlačeného vzduchu $C_{vz} = 2,5 \text{ Kč/m}^3$

Náklady na olej pro stlačený vzduch $N_o = 100 \text{ Kč/rok}$

Ve výpočtu nákladů na náhradní díly a spotřební materiál (8.5) figurují vodítko, přivaděče, filtry na dielektrikum, dielektrická pryskyřice a doplňování oleje. Životnost jednoho přivaděče je určena z životnosti přivaděče v jednom kontaktním místě a celkového počtu kontaktních míst na jednom přivaděči. V daném případě se jedná o šestnáct možných míst z jedné strany přivaděče.

Náklady na náhradní díly a spotřební materiál:

$$N_{ndsm} = \frac{C_v \cdot N_v}{Z_v} + \frac{C_p \cdot N_p}{Z_p \cdot N_{km}} + \frac{C_f \cdot N_f}{Z_f} + \frac{C_{pr} \cdot M_{pr}}{Z_{pr}} + \frac{C_o \cdot S_{olej}}{T_{pro}} = 29,4 [Kč / hod] \quad (8.5)$$

Cena vodička	$C_v = 3000 \text{ Kč}$
Cena přiváděče	$C_p = 700 \text{ Kč}$
Cena filtru	$C_f = 1950 \text{ Kč}$
Cena pryskyřice	$C_{pr} = 106 \text{ Kč/l}$
Cena oleje	$C_o = 36 \text{ Kč/l}$
Počet vodiček	$N_v = 2$
Počet přiváděčů	$N_p = 2$
Počet filtrů	$N_f = 3$
Počet kontaktních míst na jednom přiváděči	$N_{km} = 32$
Množství pryskyřice	$M_{pr} = 15 \text{ l}$
Spotřeba oleje	$S_{olej} = 14,4 \text{ l/rok}$
Životnost vodička	$Z_v = 5\,000 \text{ hod}$
Životnost přiváděče v kontaktním místě	$Z_p = 250 \text{ hod}$
Životnost filtru	$Z_f = 250 \text{ hod}$
Životnost pryskyřice	$Z_{pr} = 350 \text{ hod}$

Náklady na řezací drát (8.6) jsou vypočítány z rychlosti odvíjení, průměru, hustoty, ceny nákupu a výkupu daného řezacího drátu. Všechny elektroerozivní drátové stroje jsou zakoupeny na leasing, který činí dvacet tisíc korun českých za měsíc. Výpočet nákladů za leasing na hodinu je uveden v rovnici 8.7.

Náklady na řezací drát:

$$N_{vd} = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot 10^6} \cdot f_{od} \cdot \rho \cdot (C_{drn} - C_{drv}) = 21,5 [Kč / hod] \quad (8.6)$$

Cena nákupu řezacího drátu	$C_{drn} = 220 \text{ Kč/kg}$
Cena výkupu řezacího drátu	$C_{drv} = 50 \text{ Kč/kg}$
Rychlost odvíjení řezacího drátu	$f_{od} = 5 \text{ m/min} = 300 \text{ m/hod}$
Průměr řezacího drátu	$d = 0,25 \text{ mm}$
Hustota řezacího drátu	$\rho = 8600 \text{ kg/m}^3$

Náklady na leasing:

$$N_l = \frac{L}{S_s \cdot T_s \cdot D_{mes}} = 39,7 [Kč / hod] \quad (8.7)$$

Leasing

L = 20000 Kč/měs

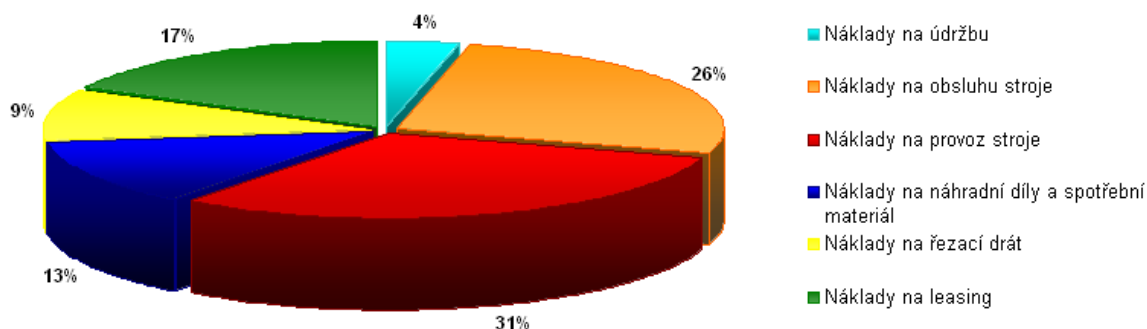
Počet pracovních dní v měsíci

D_{mes} = 21,6 dní

Celkové náklady na provoz stroje (8.8) se rovnají součtu nákladů na údržbu, obsluhu a provoz stroje, náhradní díly a spotřební materiál, řezací drát a leasing. Na obr. 8.1 je znázorněn výsečový graf s jednotlivými náklady a jejich procentuálním podílem na celkových nákladech provozu elektroerozivního drátového stroje. Největší podíl z celkových nákladů tvoří spotřeba elektrického proudu. Velice nízké jsou náklady na údržbu stroje, které se na celkových nákladech podílí pouze čtyřmi procenty. Důvodem takto nízkých nákladů na údržbu je, že firma veškeré údržby a seřizování strojů provádí sama. Druhou nejvyšší položkou z celkových nákladů tvoří obsluha stroje.

Celkové náklady na provoz stroje:

$$NC = N_{os} + N_u + N_{ps} + N_{ndsm} + N_{vd} + N_l = 227,3 [Kč / hod] \quad (8.8)$$



Obr. 8.1 Výsečový graf nákladů na provoz stroje

ZÁVĚR

Experimentální část diplomové práce byla řešena v podmínkách firmy FERMAT CZ s.r.o. Pro tuto firmu byl zpracován výrobní postup, vytvořen NC program spolu s technologií drátové elektroeroze k zadané řemenici 75-8M-130.

Před zahájením výroby uvedené řemenice byla provedena analýza kontroly přesnosti elektroerozivního drátového stroje. V rámci této kontroly byly zpracovány následující zkoušky: měření geometrie dle normy ISO 230 – 4 analýza kruhovitosti, seřízení souososti vodících hlav a zkouška polohovací přesnosti přímým měřením. Pouze při měření geometrie kruhovitosti odpovídaly dosažené výsledky dané normě. U zbývajících zkoušek byly provedeny kompenzace, které vedly k zajištění vyšší přesnosti stroje.

V části diplomové práce technicko-ekonomické vyhodnocení byl proveden výpočet celkových nákladů na provoz elektroerozivního drátového stroje. Na celkových nákladech se podílejí jednotlivé náklady na údržbu, obsluhu a provoz stroje, náhradní díly a spotřební materiál, řezací drát a leasing. Do výpočtu nebyly zahrnuty fixní náklady společnosti a její zisk.

Po seznámení s aktuálním stavem elektroerozivní drátové technologie v podmínkách firmy FERMAT CZ s.r.o., byla navržena doporučení na zlepšení provozu, například zakoupení další klimatizační jednotky a přemístění elektroerozivního drátového stroje V 1280 /Speciál. Zmíněné návrhy na zlepšení provozu přinesou zlepšení přesnosti a spolehlivosti výrobního procesu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. Vyd. 1. Košice : Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 0-8311-2595-0.
2. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění : Skriptum FSI ČVUT*. Vyd. 1. Praha : České vysoké učení technické, 1989. 122 s.
3. SLADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Vyd. 1. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
4. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. Vyd. 2. Plzeň : Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
5. ŘASA, Jaroslav; POKORNÝ, Přemysl; GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3. 2. díl : Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. Vyd. 2. Praha : Scientia, 2005. 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
6. ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. *Nekonvenční metody obrábění. MM Průmyslové spektrum* [online]. 19. 7. 2007, [cit. 2011-02-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
7. *Uživatelský manuál Software Ballbar 5HPS verze 5.06*. REMISHAW PLC. Brno, 2008
8. *Vodorovná vyvrtávačka desková : WRF 130 CNC*. Praha : FERMAT CZ, 2008. 19 s.
9. AGIE CHARMILLES. *Guillaume Destremau Technical Training in EDM Wire : zákaznická příručka*. [pdf]. 2009-02-25 [cit. 2011-03-21].
10. *Geprüfte Erodierdrähte*. Bern : Agie Charmilles SA, 2010. 8 s.
11. *GF AgieCharmilles - History : Historical Milestones 1861-2009* [online]. 2011 [cit. 2011-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.gfac.com/gfac/company/history.html>>.
12. *Fermatmachinery - Profil : Skupina Fermat* [online]. 2008 [cit. 2011-04-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.fermatmachinery.com/cs/1-profil/>>.
13. *S&K EDM systems s.r.o. : Elektroerozivní drátořezy* [online]. [cit. 2011-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.sk-edm.cz/stroje.php?katid=17>>.
14. *S&K EDM systems s.r.o. : Elektroerozivní drátořezy* [online]. [cit. 2011-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.sk-edm.cz/stroj-detail.php?id=39&katid=17>>.

15. *S&K EDM systems s.r.o. : Elektroerozivní drátořezy* [online]. [cit. 2011-04-07]. Dostupné z WWW:
<<http://www.sk-edm.cz/stroj-detail.php?id=20&katid=17>>.
16. Fermat Group. *Fermat / Vodorovné vyvrtávačky / Stolové provedení : WRFT 130 / 150 / 160 CNC* [online]. 2008 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z WWW:
<<http://www.fermatmachinery.com/cs/768-stolove-provedeni--wrft/>>.
17. Fermat Group. *Fermat / Vodorovné vyvrtávačky / Stolové provedení : WFT 12 / 13 CNC* [online]. 2008 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z WWW:
<<http://www.fermatmachinery.com/cs/775-stolove-provedeni--wft/>>.
18. Fermat Group. *Fermat / Vodorovné vyvrtávačky / Deskové provedení : WRF 130 / 150 / 160 CNC* [online]. 2008 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z WWW:
<<http://www.fermatmachinery.com/cs/767-deskove-provedeni--wrf/>>.
19. *EXCETEK Wire Cut EDM Machina : V Series Safty / Installation / Maintenance Manula*. 2007. 165 s.
20. VDI/VDQ 3441. *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen; Grundlagen*. Düsseldorf : Technical Division Production Technology and Manufacturing Methods, Březen 1977. 21 s. ICS 25.080.01.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
AOFF	-	čas vypnutí vyjiskřování obloukem
AON	-	čas zapnutí vyjiskřování obloukem
C_d	Kč/l	cena 1 litru dielektrika
C_{drn}	Kč/kg	cena nákupu řezacího drátu
C_{drv}	Kč/kg	cena výkupu řezacího drátu
C_f	Kč	cena filtru
C_{kWh}	Kč/kWh	cena 1 kWh
C_o	Kč/l	cena oleje
C_p	Kč	cena přiváděče
C_{pr}	Kč/l	cena pryskyřice
C_v	Kč	cena vodítka
C_{vz}	Kč/m ³	cena 1 m ³ stlačeného vzduchu
D_{mes}	den	počet pracovních dní v měsíci
D_{rok}	den	počet pracovních dní v roce
FEED	mm/min	rychlost posuvu
I	A	pracovní proud výboje
I_e	A	střední vybíjecí proud
K	-	součinitel úměrnosti pro anodu a katodu
L	Kč/měs	leasing
M_{pr}	l	množství pryskyřice
N_f	-	počet filtrů
N_{km}	-	počet kontaktních míst na jednom přiváděči
N_l	Kč/hod	náklady na leasing
N_{ndsm}	Kč/hod	náklady na náhradní díly a spotřební materiál
N_o	Kč/rok	náklady na olej pro stlačený vzduch
N_{os}	Kč/hod	náklady na obsluhu stroje
N_p	-	počet přiváděčů
N_{ps}	Kč/hod	náklady na provoz stroje
N_s	-	počet obsluhovaných strojů
N_u	Kč/hod	náklady na údržbu
N_v	-	počet vodítek
N_{vd}	Kč/hod	náklady na řezací drát
NC	Kč/hod	celkové náklady na provoz stroje
NO	-	číslo parametru obrábění
OFF	-	čas vypnutí vyjiskřování
ON	-	čas zapnutí
OV	-	přerušení napětí
P	μm	polohová nespolehlivost
P_s	kWh	příkon stroje
PM	-	režim pulzů
P_a	μm	polohová odchylka
P_{sj}	μm	šířka polohového rozptylu
$P_{s_{max}}$	μm	maximální šířka polohového rozptylu

S_d	l/rok	spotřeba dielektrika
S_o	-	směnnost obsluhy stroje
S_{olej}	l/rok	spotřeba oleje
S_{os}	Kč/hod	hodinová sazba obsluhy stroje
S_p	Kč/hod	hodinová sazba údržby po poruše
S_s	-	směnnost stroje
S_u	Kč/hod	hodinová sazba preventivní prohlídky
S_v	m ³ /hod	spotřeba stlačeného vzduchu
SC	-	odezva serva
SM	-	řízení serva
SV	V	napětí serva
T	μs	perioda výboje
$\bar{T}$	°C	aritmetický průměr změřených hodnot teploty vzduchu
T_i	°C	jednotlivá hodnota teploty
T_p	hod/rok	předpokládaná doba údržby po poruše
T_{pro}	hod/rok	počet provozních hodin stroje za rok
T_s	hod	délka směny
T_u	hod/rok	časový fond preventivní údržby
T_{vs}	%	procentuální využití stroje
U_e	V	střední vybíjecí napětí
U_j	μm	vratné rozpětí v místě xj
U_{max}	μm	maximální vratné rozpětí
U_z	V	napětí na prázdno
V_i	mm ³	množství odebraného materiálu
V_N	mm ³	objemový úbytek nástroje
V_O	mm ³	objemový úbytek obrobku
WA	-	tlak vody
WF	-	odvíjení řezacího drátu
WT	-	napnutí řezacího drátu
W_i	J	energie jednotlivého výboje
Z_f	hod	životnost filtru
Z_p	hod	životnost přiváděče v kontaktním místě
Z_{pr}	hod	životnost pryskyřice
Z_v	hod	životnost vodička
d	mm	průměr řezacího drátu
d_{as}	mm	skutečný průměr hlavové kružnice
d_{av}	mm	vypočtený průměr hlavové kružnice
f	s ⁻¹	frekvence výbojů
f_{od}	m/min	rychlost odvíjení řezacího drátu
i	A	proud
n	-	počet sčítaných hodnot
q	-	časové využití periody výboje
t_d	μs	doba zpoždění výboje
t_e	μs	doba výboje
t_i	μs	doba impulzu
t_o	μs	doba pauzy
u	V	napětí
xij	mm	jednotlivá hodnota i v místě xj

$x_{ij} \uparrow$	mm	jednotlivá hodnota i v místě x_j v kladném směru najíždění
$x_{ij} \downarrow$	mm	jednotlivá hodnota i v místě x_j v záporném směru najíždění
$\overline{x_j}$	μm	systematická odchylka od požadované hodnoty v místě x_j
$\overline{x_j} \uparrow$	μm	střední hodnota jednotlivých změřených hodnot v místě x_j v kladném směru najíždění
$\overline{x_j} \downarrow$	μm	střední hodnota jednotlivých změřených hodnot v místě x_j v záporném směru najíždění
$\overline{s_j}$	μm	střední standardní odchylka s_j naměřených hodnot v místě x_j
$s_j \uparrow$	μm	standardní odchylka jednotlivých měřených hodnot v místě x_j v kladném směru najíždění
$s_j \downarrow$	μm	standardní odchylka jednotlivých měřených hodnot v místě x_j v záporném směru najíždění
η	%	účinnost výboje
ρ	kg/m^3	hustota řezacího drátu
%	%	procentuální hodnota rychlosti posuvu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Parametry elektroerozivní řezačky V 650 a V 1280 /Speciál
Příloha 2	Adresová slova a jejich význam
Příloha 3	Seznam kódů G
Příloha 4	Seznam kódů M
Příloha 5	NC program
Příloha 6	Návrh řemenového převodu pro maximální otáčky
Příloha 7	Návrh řemenového převodu pro maximální výkon
Příloha 8	3D model vřeteníku
Příloha 9	Výkres řemenice 75-8M-130
Příloha 10	Výkres sestavy vřeteníku