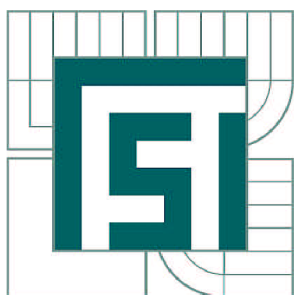


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ.

WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL BARTOŠ

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. Pavel Bartoš

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:

### **Elektroerozivní drátové řezání.**

v anglickém jazyce:

### **Wire Electrical Discharge Machining.**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití elektroerozivní technologie drátového řezání z hlediska požadavků na produktivitu a přesnost obrábění v podmínkách malé strojírenské firmy.

Cíle diplomové práce:

Obecný rozbor nekonvenční technologie elektroerozivního drátového řezání

Stávající stav a reálné možnosti technologie elektroerozivního drátového řezání ve firmě.

Řešení technologie vzorové součástky.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

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 19.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá rozborem technologie elektroerozivního drátového řezání a jejím cílem je zhodnocení stávajícího stavu a reálných možností elektroerozivního drátového řezání v malé strojírenské firmě. Dále se zabývá řešením technologie výroby vzorové součástky a následným ekonomickým vyhodnocením.

**Klíčová slova**

Elektroerozivní drátové řezání, nekonvenční technologie, dielektrikum, elektroeroze, elektrický výboj.

**ABSTRACT**

This work deals with analysis of EDM wire cutting technology and aims to assess the current situation and the real possibilities of EDM wire cutting usage in a small engineering company. Furthermore, it addresses manufacturing technology of a model component and the subsequent economic evaluation.

**Key words**

Wire electrical discharge machining, unconventional technologies, dielectric, electroerosion, electric discharge.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BARTOŠ, P. *Elektroerozivní drátové řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Elektroerozivní drátové řezání vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. 5. 2011

.....

Pavel Bartoš

## **Poděkování**

Na tomto místě děkuji Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a čas, který mi věnoval při vypracovávání mé diplomové práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT.....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD .....	9
1 OBECNÝ ROZBOR NEKONVEČNÍ TECHNOLOGIE	
ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ .....	11
1.1 Elektroerozivní drátové řezání .....	12
1.1.1 Charakteristika výbojů .....	14
1.1.2 Zdroje elektrické energie.....	18
1.1.3 Dielektrikum.....	22
1.1.4 Nástrojová elektroda (drát) .....	23
1.1.5 Dosahované parametry řezu .....	24
1.1.6 Technologie řezání .....	27
1.2 Elektroerozivní hloubení .....	31
1.2.1 Dielektrikum.....	32
1.2.2 Nástrojová elektroda.....	34
1.2.3 Technologie hloubení .....	35
1.3 Elektroerozivní řezání tvarovou drátovou elektrodou.....	37
2 STÁVAJÍCÍ STAV A REÁLNÉ MOŽNOSTI TECHNOLOGIE	
ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ VE FIRMĚ .....	39
2.1 Výrobní program firmy.....	39
2.2 Strojní zázemí firmy .....	40
2.3 Elektroerozivní drátová řezačka ve firmě.....	41
2.3.1 Parametry a umístění elektroerozivní drátové řezačky.....	41
2.3.2 Programovací systém Wire Cut .....	44
3 ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE VZOROVÉ SOUČÁSTKY .....	47
3.1 Popis a použití vybrané vzorové součástky.....	47
3.2 Programování řezané kontury.....	49
3.3 Technologie výroby protlačovací hubice .....	52

4	TECHNICKO - EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	54
4.1	Stanovení dílčích nákladů na výrobu vzorové součástky.....	55
4.1.1	Čas řezání kontury vzorové součástky .....	55
4.1.2	Náklady na hodinu provozu stroje .....	55
4.1.3	Náklady na výrobu polotovaru.....	58
4.2	Stanovení celkových nákladů na výrobu vzorové součástky.....	59
4.3	Vyhodnocení .....	60
	ZÁVĚR .....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
	SEZNAM PŘÍLOH .....	67



## ÚVOD

Elektrickou energii zná lidstvo již více než 200 let, kdy italský lékař a fyzik Luigi Galvani (1737 – 1798) při svých pokusech s žábami zjistil, že při doteku skalpelu se končetiny žáby opakovaně rozechvívají. Galvani svůj objev podrobně studoval a nazval ho živočišnou elektřinou. Na Galvaniho výzkumy navazoval další Italský fyzik Alessandro Volta (1745 - 1827), který v roce 1799 objevil první elektrochemický zdroj elektrické energie, dnes známý jako galvanický článek [7].

Od doby Galvaniho pokusů se lidstvo posunulo značně kupředu a elektrická energie se stala nedílnou součástí všech lidských činností. Elektřina však nemá jen blahodárné účinky. Při jejím využití v praxi se projevují i její negativní vlivy, jež pro nás mohou být nežádoucí. Jeden z příkladů jsou kontakty spínačů, které se při určité době používání rozrušují, až dojde k jejich úplné degradaci. Příčinou tohoto jevu je elektrický výboj, vznikající při oddálení kontaktů spínače [4; 7].

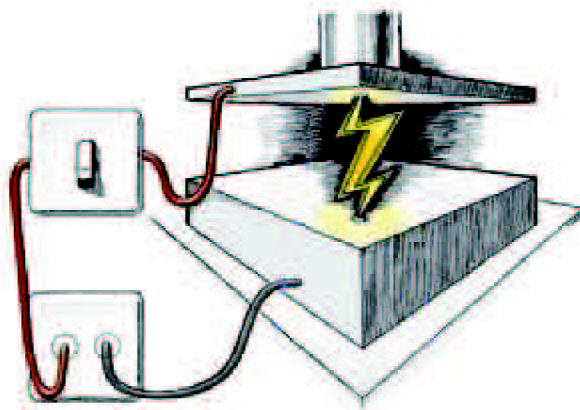
Touto skutečností se v roce 1938 podrobně zabývali sovětsí výzkumní pracovníci manželé Lazarenkovi. Z důvodu eliminace vlivu okolní atmosféry své pokusy se spínači prováděli v kapalině. Při mnohonásobném zapínání a rozpojování kontaktů si všimli, že menší kontakt vnikl do většího, přičemž tvar otvoru byl přesným negativem menšího kontaktu. Na základě tohoto experimentu vyvodili Lazarenkovi závěr, že za určitých podmínek lze velmi přesně obrábět libovolně tvrdé, vodivé materiály a tím položili základ metody elektrojiskrového obrábění [4; 21].

Tato metoda lze přirovnat k miniaturní bouřce, jež je tvořena množstvím kontrolovaných výbojů mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. Tyto výboje způsobují vznik tzv. mikrokráterů, což má za následek řízený úběr materiálu [3].

Nejzajímavější na objevu elektroeroze je skutečnost, že zdánlivě nežádoucí jev způsobující opalování kontaktů elektrickým výbojem, se ihned

po jeho důkladném vědeckém prozkoumání a vysvětlení postavil do služeb techniky [21].

Elektroeroze našla své uplatnění především ve strojírenství, kde se řadí mezi významné zástupce speciálních technologií obrábění. Mimo jiné ji lze využít i při drátovém řezání, kterým se bude tato diplomová práce podrobně zabývat [3].



Obr. 1.1 Podstata elektroerozivního obrábění [3]

## **1 OBECNÝ ROZBOR NEKONVEČNÍ TECHNOLOGIE ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ**

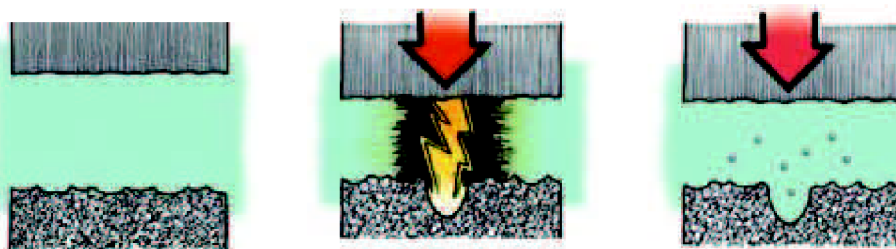
Nekonvenční technologie využívají při obrábění fyzikálních nebo chemických principů úběru materiálu, při nichž nevznikají klasické třísky, jako je tomu u obrábění reznými nástroji, nýbrž jde většinou o bezsilové působení obráběcího nástroje na obrobek [1; 2].

**Fyzikální technologie obrábění můžeme rozdělit do čtyř skupin [1]:**

- obrábění elektrickým výbojem,
- obrábění chemické,
- obrábění paprskem koncentrované energie,
- mechanické procesy obrábění.

Až na mechanické procesy obrábění nezávisí obrobiteľnosť materiálu na jeho mechanických vlastnostech (tvrdost, pevnost, pružnosť, aj.), nýbrž je dána predovšetkým jeho tepelnou vodivosťou, elektrickou vodivosťou, teplotou tání, odolnosťou proti chemickej erozii, odolnosťou proti elektrickej erozii a v neposlední radě vzájemnou vazbou atomů a molekul [1; 2].

Elektroerozivní obrábění patří do skupiny obrábění elektrickým výbojem, známým pod zkratkou EDM (Electrical Discharge Machining). Jeho základem je elektroeroze, při které se vlivem vysoké koncentrace energie dosahuje úběru materiálu elektrickými výboji mezi anodou (nejčastěji ji tvoří obráběcí nástroj) a katodou (nejčastěji ji tvoří obrobek). Tímto způsobem se taví a odpařují mikroskopické částičky materiálu obrobku a díky jejich následnému vyplavení z prostoru obrábění, dochází k opracování obrobku do požadovaného tvaru či rozměru. Celý proces obrábění probíhá v prostředí dielektrika, což je kapalina s vysokým elektrickým odporem. Touto metodou lze opracovávat pouze materiály s elektrickou vodivostí, které podléhají zákonitostem elektroeroze [1; 2; 22].



a) oddálené elektrody      b) elektrický výboj      c) odpaření natavených částic

Obr. 1.2 Zjednodušený princip elektroeroze [3]

Vhodným zapojením a volbou pracovních parametrů elektrického obvodu lze dosáhnout stacionárního výboje (oblouku) nebo nestacionárního výboje (jiskry). Výboje probíhají mezi elektrodami ve vzdálenosti 5 až 100  $\mu\text{m}$  a jejich intenzita závisí především na zvolených parametrech elektrického obvodu, vzdálenosti mezi elektrodami, znečištění a vodivosti dielektrika [1; 2].

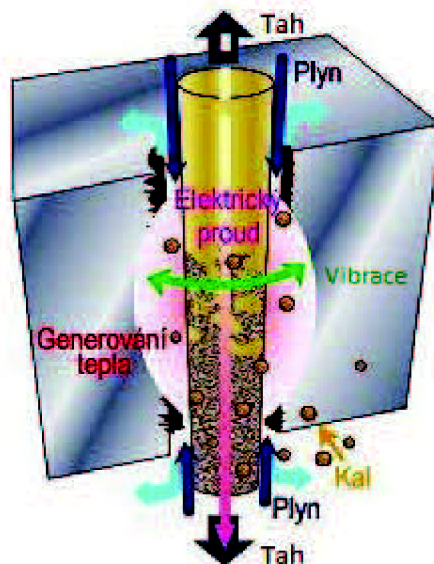
Největší výhodou této metody je, že ji lze použít i tam, kde všechny ostatní metody selhávají. Elektroerozivní obrábění se využívá při obrábění přesných, tvarově složitých součástí, z těžkoobrobitelných materiálů. Lze ho využít např. pro hloubení dutin záпустek, řezání náročných tvarů drátovou elektrodou, leštění povrchů, elektrokontaktní obrábění nebo také pro výrobu mikrootvorů. Nejhlavnějšími zástupci elektroerozivního obrábění jsou již zmiňované drátové řezání a hloubení. Další metody jsou spíše jejich uzpůsobením pro speciální technologické operace [1; 2; 22].

## 1.1 Elektroerozivní drátové řezání

V dnešní době je samozřejmostí každého moderního stroje řízení pomocí CNC řídicího systému. U řezání drátovou elektrodou se konkrétně jedná o řízení směru a rychlosti pohybů polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu dielektrika a kontrolu probíhající elektroeroze.

Řídicím systémem je umožněno snadné naprogramování obráběné kontury, která bude danou nástrojovou elektrodou opisována. Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, jež jsou na drátovou elektrodu a na obráběný materiál přiváděny z generátoru formou

pulzů o určité frekvenci. Jednotlivé pulzy jsou charakterizovány napětím, proudem a tvarem [1; 3; 4].

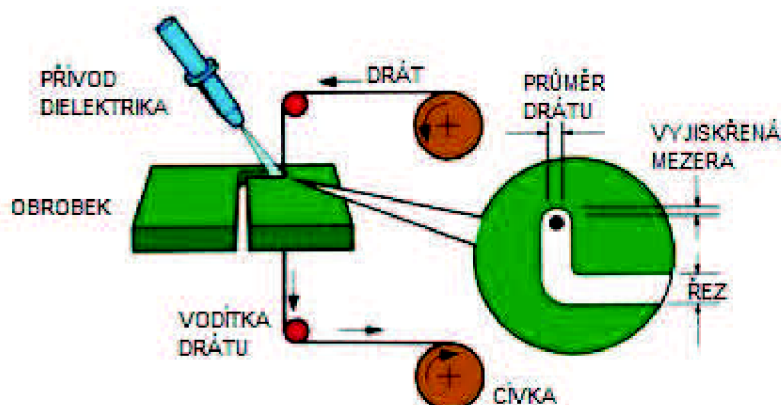


Obr. 1.3 Schéma řezání drátovou elektrodou [4]

Jedna z nevýhod drátového řezání je nutnost vrtání děr pro drát, což výrazně prodlužuje výrobní proces. Z toho důvodu jsou moderní stroje pro elektroerozivní řezání vybaveny zařízením pro automatické vrtání otvorů a automatické zavádění drátu do tzv. startovacích děr [1; 3; 4; 11].

U přesných strojů jsou pro vedení drátu používána diamantová vodítka a napínání drátu je řízeno elektronickým regulačním systémem. Mechanismus vedení drátu je uložen ve vodící hlavě, která díky nezávislým posuvům umožňuje řezat plochy pod úhlem až  $\pm 45^\circ$ . Pracovní podmínky lze nastavit dle potřeby od režimu pro výkonné řezání (hrubování), až do režimu pro dokončovací řezání [4].

Pro zaručení stále stejné kvality opracovaného povrchu slouží optimalizační procesor, jenž optimalizuje parametry elektroeroze dle okamžitých podmínek v místě řezání. Běžně používané řídicí systémy umožňují ovládat čtyři až pět os, což v kombinaci s naklápěním drátu dovoluje vyřezávat i velmi složité tvarové součásti [4].



Obr. 1.4 Princip podávání a vedení drátové elektrody [13]

Elektroerozivní stroje lze konstruovat jako automatizovaná pracoviště, u nichž je obrobek vyjímán a zakládán automaticky pomocí mechanické ruky, manipulátoru nebo robota. Díky tomu lze dosáhnout bezobslužného provozu až po dobu 80 hodin [1; 4].

### 1.1.1 Charakteristika výbojů

Elektrický výboj hraje při procesu elektroerozivního obrábění klíčovou roli a teprve až po jeho podrobném prozkoumání lze zcela pochopit princip elektroeroze. Celý průběh elektrického výboje je možné rozdělit do devíti jednotlivých fází [20].

**Fáze 1:** Jakmile přivedeme napětí na nástrojovou elektrodu a obrobek, začne vytváření elektrického pole. Díky nerovnostem povrchů elektrod dojde v místě s nejmenší mezerou k vytvoření maximálního gradientu, kde se okolní elektricky vodivé částice (nečistoty) obsažené v dielektriku začnou kumulovat (viz obr. 1.4 a) [18; 20].

**Fáze 2:** Přivedené napětí již dosahuje maxima, elektricky vodivé částice začínají vytvářet můstek, který je základem pro zapálení výboje (viz obr. 1.4 b) [18; 20].

**Fáze 3:** Vlivem působení elektrického pole dochází k uvolňování elektronů ze záporně nabitých elektrod a k jejich následnému srážení s neutrálními

částicemi. Díky tomu vznikají v jiskřišti kladné a záporné ionty. Tento proces je znám jako ionizace prostředí (viz obr. 1.4 c) [18; 20].

**Fáze 4:** Střed budoucího výbojového kanálu se začíná obalovat ionty, čímž klesá jeho odpor. V prostoru mezi elektrodami roste proudová hustota, dochází k vytvoření vodivého plasmového kanálku. Povrch elektrod se zahřívá, roste proud a klesá napětí (viz obr. 1.4 d) [18; 20].

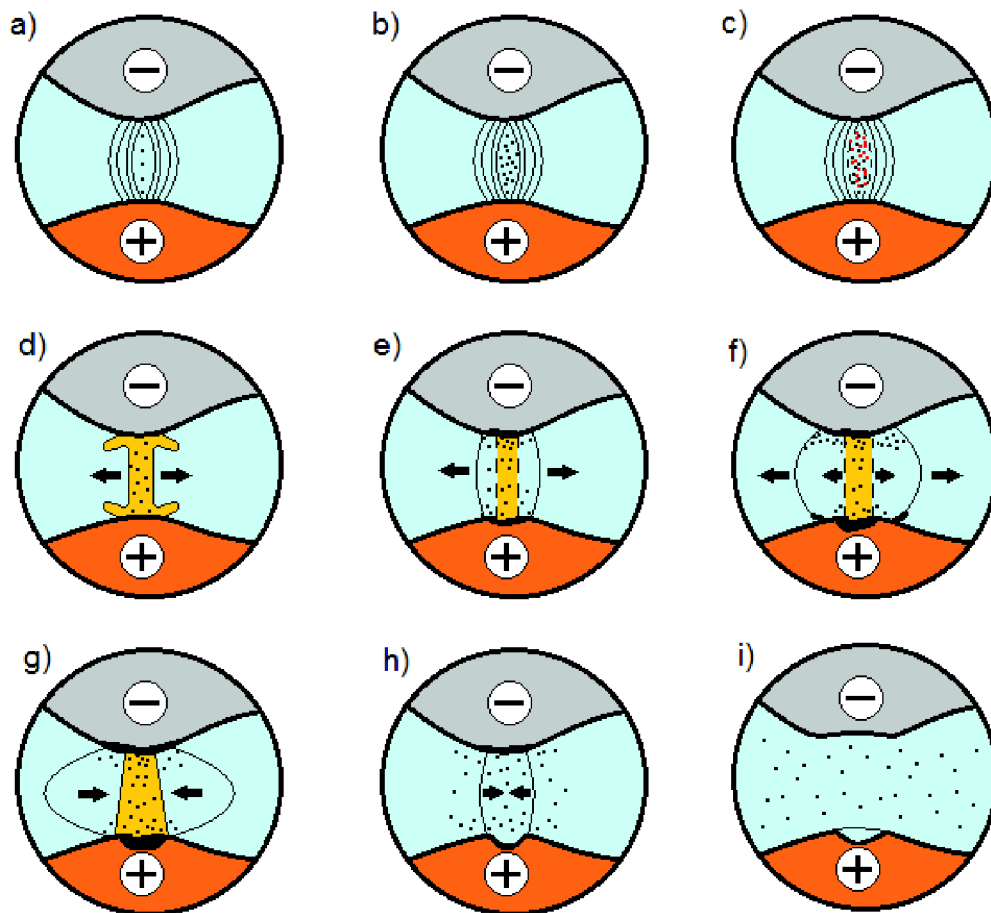
**Fáze 5:** V důsledku srážení částic dochází k nárůstu teploty (až na 10 000 °C), dielektrikum se začne odpařovat a vzniká plynová bublina. Nárazy iontů na katodu a elektronů na anodu způsobují lokální ohřev ohraničených míst obou elektrod, dochází k jejich tavení a následnému odpařování. Dosahuje se maxima proudu protékajícího výbojovým kanálem a ustálení napětí na zápalné hodnotě výboje (viz obr. 1.4 e) [18; 20].

**Fáze 6:** Expanze bubliny, tavení a následné vypařování materiálu nabírá na intenzitě (viz obr. 1.4 f) [18; 20].

**Fáze 7:** V důsledku přerušení přívodu energie a snížení proudu v pracovní mezeře dojde k poklesu tepla, což odstartuje implozi plynové bubliny. Vlivem sil elektrického pole a poklesu tlaku plynů dojde k rozrušení materiálu, vzniklá tavenina je doslova vytrhávána do prostoru pracovní mezery, dochází k vytvoření kráteru (viz obr. 1.4 g) [18; 20].

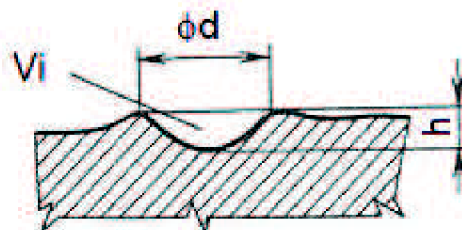
**Fáze 8:** Hodnoty proudu a napětí v pracovní mezeře dosahují nulových hodnot, následuje zánik bubliny a elektrického výboje. Vzniklý prostor je zaplaven dielektrikem, odebraný materiál je zchlazen a v prostoru eroze se vyskytuje ve formě malých kuliček (viz obr. 1.4 h) [18; 20].

**Fáze 9:** V této poslední fázi je dielektrikum znečištěno produkty eroze a obsahuje zbylé volné ionty, jež jsou základem pro vznik nového výbojového kanálku (viz obr. 1.4 i) [18; 20].



Obr. 1.5 Jednotlivé fáze elektrického výboje [20]

Kráter vzniklý elektrickým výbojem lze definovat velikostí a tvarem, což je úměrné velikosti vybíjecí energie. Průměr a hloubka kráteru pak závisí na hodnotě přivedené energie a době výboje. Tyto parametry jsou určující pro drsnost opracované plochy, přesnost rozměrů a účinnost procesu obrábění. Jedním z hlavních parametrů určujících produktivitu elektroerozivního obrábění je množství materiálu, které je odebráno při jednom elektrickém výboji a lze ho vypočítat z rovnice 1.1 [19; 20].



$$V_i = K \cdot W_i \quad (1.1)$$

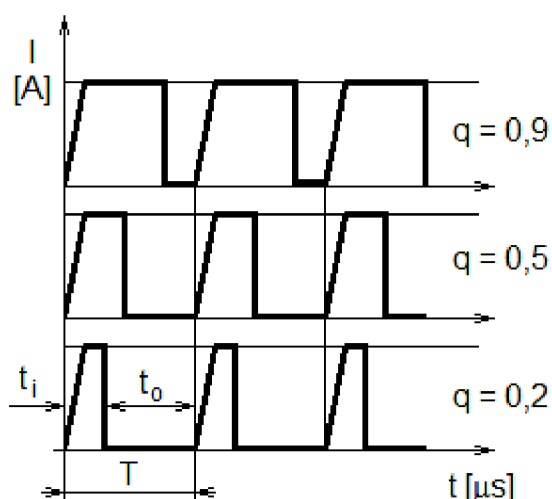
Obr. 1.6 Profil kráteru [19; 20]



Časový průběh elektrického výboje má značný vliv nejen na intenzitu úběru materiálu, ale i na drsnost obrobené plochy. Z tohoto důvodu se snažíme o systematické rozdělení výbojů, což nám umožní zavedení veličiny časového využití periody výboje, pro kterou platí rovnice 1.2 [20].

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_o} \quad (1.2)$$

Tato veličina umožňuje charakterizovat formu výboje číselnou hodnotou a zároveň lze s její pomocí názorně zobrazit časový průběh dodávané energie do místa výboje [20].



Obr. 1.7 Časové využití periody výboje [20]

#### Dle časového průběhu dělíme elektrické výboje na [20]:

- elektrojiskrové výboje,
- krátkodobé elektrické oblouky.

Charakteristickým znakem elektrojiskrových výbojů je krátká doba pulsu ( $t_i = 10^{-4}$  až  $10^{-6}$  s) při relativně malých hodnotách časového využití periody výboje ( $q = 0,03$  až  $0,2$ ) a vysokých frekvencích výbojů. Ve výbojovém kanále převládá elektronová vodivost, což způsobuje větší opotřebení anody oproti katodě [20].

Tento jev je způsoben vyšším tepelným účinkem elektronů, které po uvolnění z katody dopadají na anodu. Vzniklé výboje mají nižší energii, proto se využívají především na dokončovací operace, kde nejsou vyžadovány velké úběry [20].

Na rozdíl od elektrojiskrových výbojů jsou krátkodobé elektrické oblouky charakterizovány delší dobou impulsu ( $t_i > 10^{-6}$  s) při současně vyšších hodnotách časového využití periody výboje ( $q = 0,2$  až  $1$ ). Také frekvence tvorby výbojů je nižší a ve výbojovém kanále převládá spíše iontová vodivost. Dochází k uvolňování většího počtu kladných částic z anody, které dopadají na katodu, čímž je vyvolán větší tepelný účinek a následný úběr této elektrody. Krátkodobé elektrické oblouky umožňují velký úběr materiálu, proto se především využívají při hrubovacích operacích [20].

### **1.1.2 Zdroje elektrické energie**

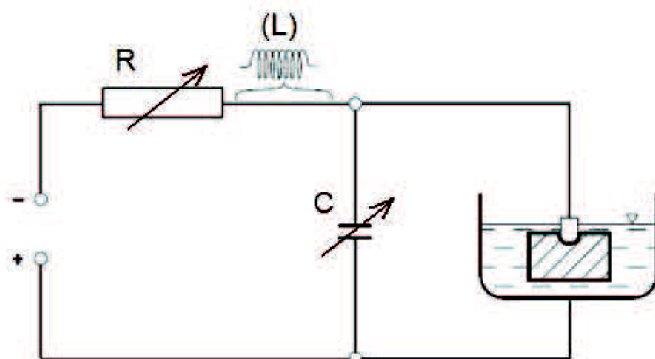
Zdrojem elektrické energie u elektroerozivního obrábění je generátor, jenž zároveň tvoří jednu z hlavních částí stroje. Vhodným nastavením parametrů generátoru lze výrazně ovlivnit celý řezný proces. Při obrábění lze měnit nejen polaritu nástrojové elektrody a obrobku, ale i parametry charakterizující elektrický výboj a jeho četnost. Všechny provedené změny parametrů generátoru se promítnou především na rychlosti, přesnosti a kvalitě obrobené plochy [17; 20].

#### **Generátory lze rozdělit na [17; 20]:**

- závislé (RC a RLC),
- nezávislé (pulzní).

Závislé generátory jsou také známé jako tzv. elektrojiskrové (relaxační) a řadí se k nejstarším zdrojům výbojů. Samotný princip činnosti generátoru spočívá v opakujícím se nabíjení a následném vybití kondenzátoru. K nabíjení dochází ze zdroje stejnosměrného proudu přes odpor a k vybití dojde

v pracovní mezeře mezi anodou a katodou, jestliže velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty [17; 20].



**Popis:**

**R** – odpor,

**(L)** – indukčnost,

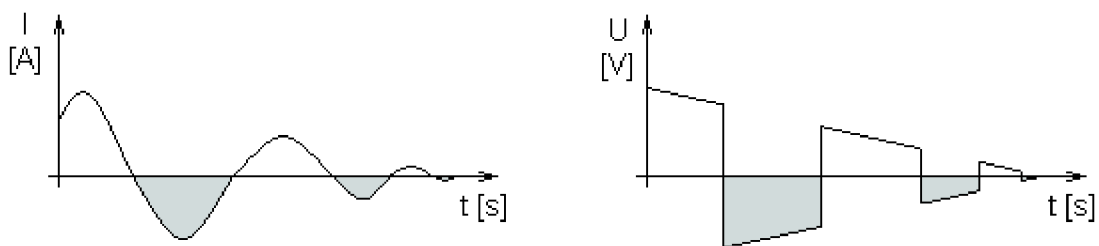
**C** – kondenzátor.

Obr. 1.8 Schéma zapojení RC a RLC generátoru [17; 20]

Velikost průrazného napětí roste se zvětšující se mezielektrodivou vzdáleností a stupněm znečištění dielektrika. Generátory nazýváme závislými z důvodu závislosti frekvence a energie jednotlivých výbojů na změně poměrů v jiskřišti. Tyto generátory se vyznačují krátkými výboji, ve kterých převládá elektronová vodivost. Nástrojová elektroda se z důvodu snížení jejího opotřebení zapojuje jako katoda a obrobek jako anoda [17; 20].

Velkou předností závislých generátorů je jejich jednoduchost a spolehlivost. Naopak mezi jejich nedostatky patří vysoký relativní objemový úbytek nástrojové elektrody (přes 30 %) způsobený zápornou půlvlnou střídavého proudu, omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů a také nízká produktivita obrábění [17; 20].

Pro RC generátory nepřesahuje úběr materiálu při obrábění ocelí  $500 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  a při obrábění slinutých karbidů  $100 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . RLC obvod vznikne zapojením indukčnosti (L) do RC obvodu, čímž se prodlouží délka trvání výboje a omezí intenzita vybíjecího proudu. Úběr materiálu se zvýší až na  $2\,000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  při obrábění ocelí [17; 20].



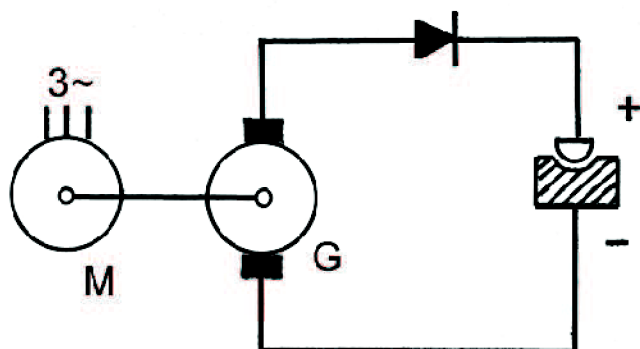
Obr. 1.9 Závislost napětí a proudu na čase u RC a RLC generátorů [17]

Nezávislé generátory se obecně vyznačují tím, že umožňují nastavení pracovních podmínek elektroeroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře [17].

**Nezávislé generátory lze rozdělit na [17]:**

- rotační,
- polovodičové.

Vznik pulsů u rotačních nezávislých generátorů je zajištěn roztáčením dynama pomocí asynchronního motoru. Tyto generátory umožňují vysoký úběr materiálu až  $5\,000\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$  při stálé frekvenci (např. 400 Hz). Nevýhodou je jejich relativně vysoká hluchost a obtížná změna frekvence pulzů [17].



**Popis:**

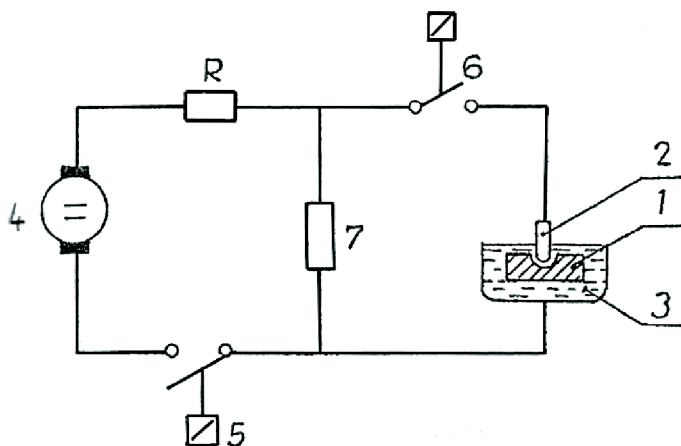
**M** – asynchronní motor,

**G** – generátor.

Obr. 1.10 Schéma zapojení rotačního generátoru [17]

Polovodičové generátory se naopak vyznačují širokou nastavitelností elektrických parametrů. Změna frekvence se běžně pohybuje v rozsahu 0,5 až

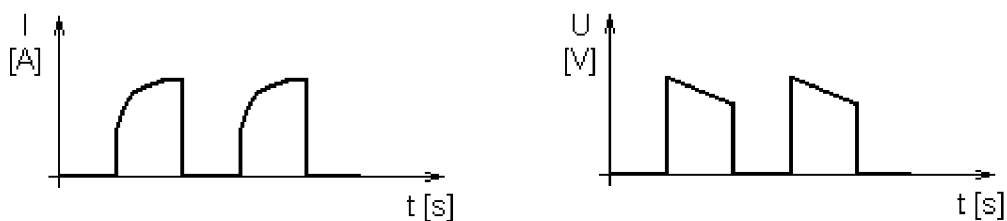
50 kHz. Dosahované hodnoty úběrů značně převyšují hodnoty ostatních generátorů a běžně se pohybují kolem  $7\,000\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ , u velkých zařízení až  $25\,000\text{ mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$  [17].

**Popis:**

- 1 – obrobek,
- 2 – nástrojová elektroda,
- 3 – dielektrikum,
- 4 – stejnosměrný zdroj,
- 5 – vypínač sledu impulsů,
- 6 – vypínač délky impulsů,
- 7 – akumulátor energie.

Obr. 1.11 Schéma zapojení polovodičového generátoru [17]

Charakteristickým jevem polovodičových generátorů je delší doba trvání impulsů s převahou iontové vodivosti. Z toho důvodu se nástrojová elektroda zapojuje jako anoda a obrobek jako katoda. Za zmínku stojí také relativní objemový úbytek materiálu nástrojové elektrody, který dosahuje cca 1 %, což je dáno tím, že při výbojích nevzniká negativní půlvlna [17].



Obr. 1.12 Závislost napětí a proudu na čase u polovodičových generátorů [17]

### **1.1.3 Dielektrikum**

Obecně se dá dielektrikum označit jako elektricky nevodivá látka, tedy izolující, ve které vnější elektrické pole, v našem případě mezi nástrojovou elektrodou a obráběným materiálem, vytváří pole opačné polarity. Statické elektrické pole u dielektrika zůstane zachováno i bez neustálého přívodu elektrického náboje [5].

Pro elektroerozivní obrábění se jako dielektrikum používá nejčastěji strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda, popř. speciální dielektrika dodávaná výrobcí strojů, jež jsou ověřena v běžném provozu [1].

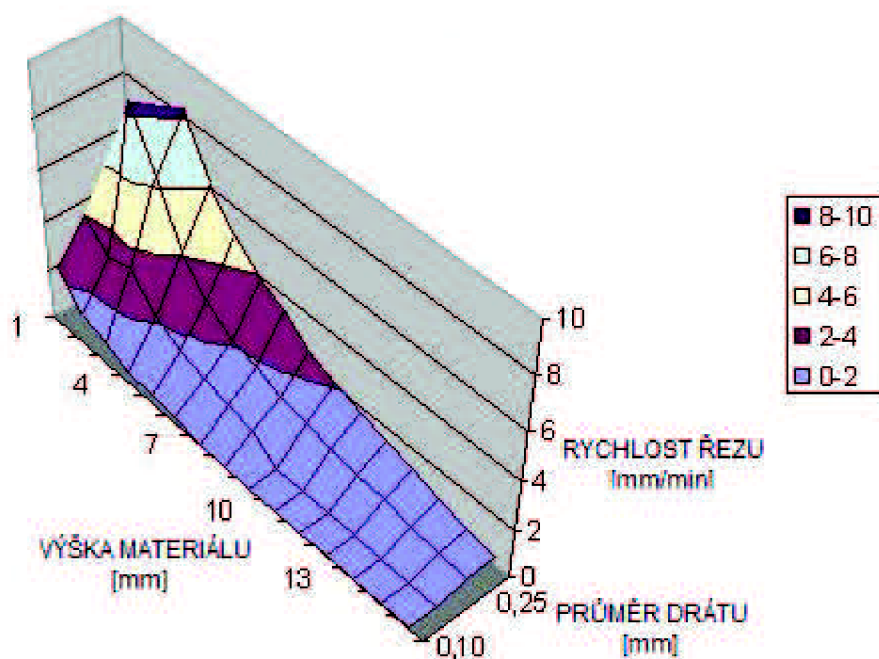
**Pokud za dielektrikum použijeme vodu, musíme dbát následujících zásad [8]:**

- kontrola kyselosti vody lakmusovými papírky, pH 7,5 – 8,5,
- zamezit přístupu organických částic (způsobují hnilobný zápach),
- vodivost snížit deionizační pryskyřicí,
- kontrola obsahu síranů, chloridů a tvrdosti vody,
- nutno zohlednit korozní vlastnosti vody,
- při obrábění tvrdokovů a hliníku roste vodivost dielektrika (nutná častější výměna).

Při výběru dielektrika musíme dbát toho, aby splňovalo základní požadavky kladené nejen na bezpečnost práce a ekologičnost, ale i technologii výroby, produktivitu a v neposlední řadě nízké náklady. Důležitým faktorem u dielektrika je vhodná, vysoce stabilní viskozita, která by odpovídala danému provozu, nízká agrese na lidskou pokožku, snadná filtrovatelnost, vysoká odolnost vůči stárnutí, nízká tendence odpařování aj. Velmi důležité je přihlídnout i k vysokému bodu vzplanutí, který výrazně snižuje pravděpodobnost vzniku požáru a tím zvyšuje bezpečnost na pracovišti [6].

### 1.1.4 Nástrojová elektroda (drát)

Nástrojová elektroda je tvořena napnutým drátem, který se odvíjí z cívky skrze soustavu kladek a vodítek. Parametry drátu volíme s ohledem na požadavky kladené na tvarovou a rozměrovou přesnost obrobku. Průměry se pohybují v rozmezí od 0,02 do 0,33 mm a s ohledem na ně musíme optimalizovat i řezné parametry. Obecně platí, že malé průměry použijeme pro jemné, velmi přesné obrábění s pomalými rychlostmi posuvu, popř. pro řezání pod úhlem. Naopak větší průměry lze využít u vysokých rychlostí posuvu, kde by u drátů s malým průměrem hrozilo nebezpečí častého přetržení [9; 10].



Obr. 1.13 Závislosti rychlostí řezů na výšce materiálu a na průměru drátu [4]

Nejběžnějším materiálem řezných drátů jsou mosazi, jež plně vyhovují požadavkům kladeným na elektrody. Mosazný drát (63 % Cu – 37 % Zn) se běžně dodává o průměrech od 0,1 do 0,30 mm s pevností v tahu 400 až 1 000 N·mm<sup>-2</sup>. Do 500 N·mm<sup>-2</sup> je doporučen pro řezání pod úhlem. I z důvodu přijatelné ceny je u elektroerozivního řezání nejběžnější [9; 10].

Vedle celomosazných drátů existují dráty jednoduše povlakované, jejichž jádro je tvořeno mosazí a povlak zinkem. Jsou určeny pro rychlosti zpravidla

o 20 až 30 % vyšší než u mosazných drátů. Dodávají se v pevnostech od 420 do 900 N·mm<sup>-2</sup> a průměrech v rozmezí od 0,07 do 0,3 mm [9; 10].

Poslední skupinou jsou řezné dráty speciálně povlakované, dosahující rychlosti obrábění o 20 až 30 % vyšší než jednoduše povlakované a o 40 až 50 % vyšší než dráty mosazné. Jádro je opět mosazné, vícenásobně povlakované, s obsahem vzácných kovů. Lze jimi dosáhnout velmi dobré drsnosti povrchu při vysoké rychlosti obrábění. Dráty se dodávají v cívkách a jejich hodnoty se mezi jednotlivými výrobci nepatrně liší. U každého drátu je uvedeno optimální použití [9; 10].

### **1.1.5 Dosahované parametry řezu**

Přesnost vyřezaných tvarů závisí nejen na vlastnostech elektroerozivního stroje, ale i na stabilitě okolních podmínek [8].

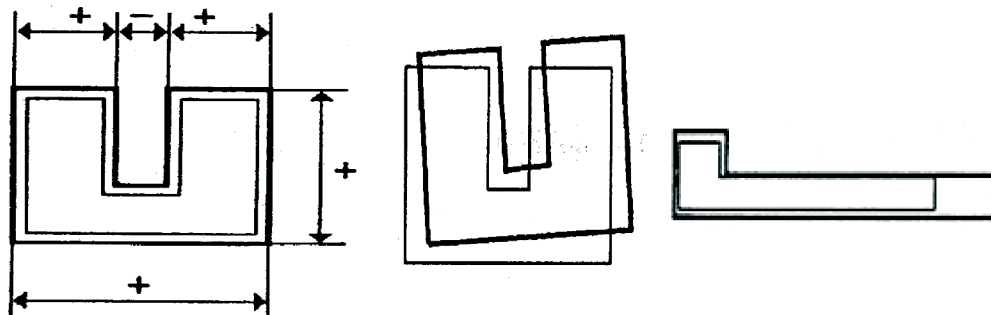
Přesnost stroje je dána zejména přesností vedení a napnutí drátu, přesností polohování CNC řídicího systému, stabilitou pracovních parametrů generátoru a kvalitou čištění dielektrika [1; 8].

Přesnost polohování je mimo jiné určena kvalitou vedení řezací hlavy, k čemuž se využívá kuličkových šroubů, které se rovněž používají u některých CNC frézovacích strojů. Nicméně i vysoce přesné kuličkové šrouby se časem opotřebují, čímž dojde ke zvětšení vůlí a zhoršení přesnosti polohování. Tomu lze zabránit použitím lineárních pohonů, které zaručují dosažení vysoké přesnosti po celou dobu životnosti stroje [12].

Nástrojová elektroda musí do místa řezu vstupovat dokonale vyrovnaná a napnutá, aby se co nejvíce zamezilo odchyvkám tvaru a přesnosti. Při řezání drátovou elektrodou se dosahuje úběru materiálu v rozmezí 35 až 200 mm<sup>2</sup>·min<sup>-1</sup> a rovnoběžnosti řezu do 2 μm na 100 mm. Pro rozměrovou přesnost je směrodatná kvalita obrobeného povrchu, která je ve většině případů udávána střední aritmetickou hodnotou drsnosti povrchu a značí se Ra. Při elektroerozivním řezání drátem se tato hodnota většinou pohybuje v rozmezí Ra = 0,15 až 0,3 μm [1; 8].

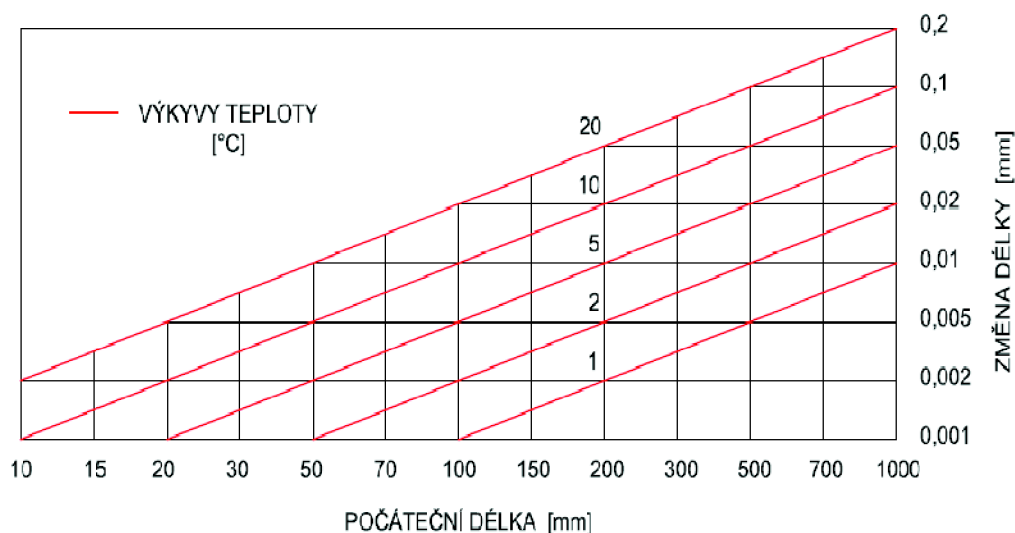


Na přesnost obrábění má také vysoký vliv teplota okolí. Velké výkyvy teploty ovlivňují nejen rozměr obrobku, ale i polohu a tvar [8].



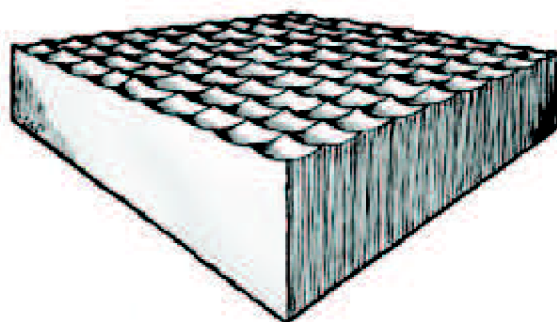
Obr. 1.14 Změna délky, polohy a tvaru obrobku [8]

Z následujícího diagramu je patrné, jak velký vliv má změna okolní teploty na rozměr obrobku. Z tohoto důvodu by elektroerozivní drátovka neměla být umístěna v průvanu, rovněž se nedoporučuje ji vystavovat přímému slunečnímu záření. Nejvhodnějším řešením se jeví klimatizovaná místnost umístěná v dostatečné vzdálenosti od strojů, jako jsou např. buchary a lisy, které by mohly způsobit nepřijatelné vibrace [1; 8].



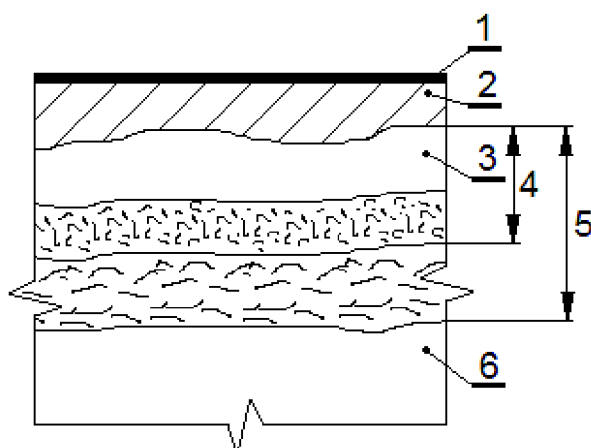
Obr. 1.15 Závislost změny délky na teplotě [8]

Mikrostruktura povrchu získaná elektroerozí je tvořena mikrokrátery a vzdáleně připomíná pomerančovou kůru. Hloubka mikrokráterů je dána nastavením parametrů generátoru.



Obr. 1.16 Mikrostruktura povrchu řezu [3]

Při elektroerozi vzniká v blízkosti řezu ovlivněná oblast, jenž má vliv na vlastnosti povrchu obrobku. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je dána parametry obrábění. Při dokončovacím řezu bývá tato oblast zpravidla menší díky nižší energii výboje a kratším impulzům, které mají menší teplotní účinnost [1; 8].

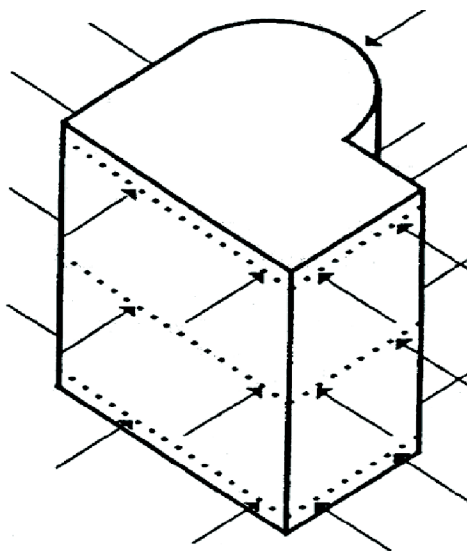
**Popis:**

- 1 – mikrovrstva vzniklá difuzí prvků dielektrika,
- 2 – povlak obsahující prvky materiálu elektrody,
- 3 – bílá vrstva (silně nauhličená martenzitická struktura),
- 4 – pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný základní materiál),
- 5 – pásmo plastické deformace vyvolané pulzními rázy,
- 6 – základní materiál obrobku.

Obr. 1.17 Složení povrchu opracované plochy [1; 19]

Všechny výše uvedené parametry se dají shrnout pod název maximální tolerance kontury ( $T_{Km}$ ). Hodnotu  $T_{Km}$  měříme v několika různých rovinách, většinou na horní, střední a spodní části obrobku. Tato hodnota zpravidla

odpovídá nejvyšší naměřené odchylce a je jedním z klíčových parametrů pro výběr elektroerozivní drátovky [8].

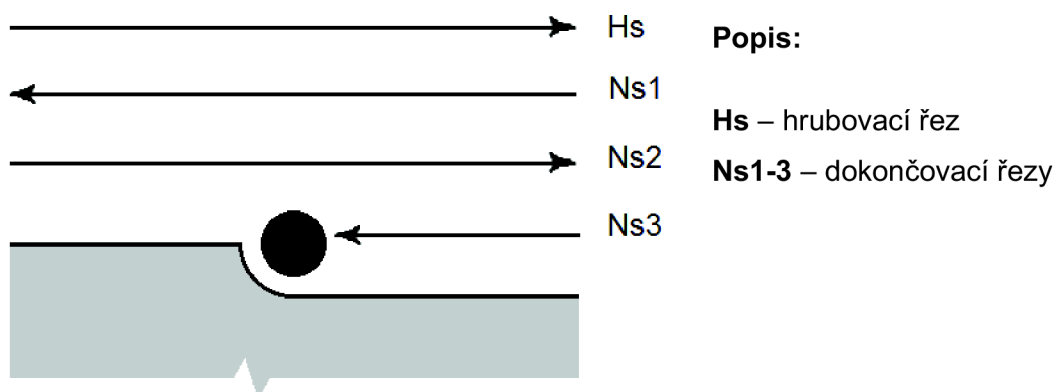


Obr. 1.18 Měření hodnoty  $T_{K_m}$  [8]

### 1.1.6 Technologie řezání

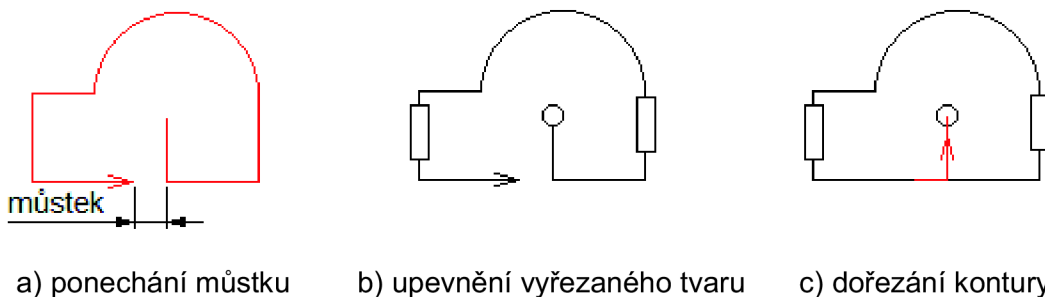
Pokud chceme dosáhnout vysokých rozměrových a tvarových přesností obrobku, používáme zpravidla několik řezů. První je tzv. hrubovací, jedná se o nejrychlejší, ale také nejméně přesný řez, opisující konturu obrobku s přídatkem dokončování. Po hrubovacím následuje jeden nebo i více řezů dokončovacích, při kterých se využívá nižších energetických parametrů, a tím je dosaženo i lepší drsnosti a přesnosti řezu. Při dokončování neubírá drát celým svým průměrem, ale jen částí [8].

Tímto způsobem je dosaženo konečných tvarů kontury bez dalších přídatků na dokončování. Více řezů výrazně prodlužuje čas obrábění, čímž se úměrně navyšuje i cena obráběné součásti. Abychom se vyhnuli vícenásobnému navlékání a polohování drátu, provádíme dokončovací řez v opačném smyslu, než byl řez předchozí [8].



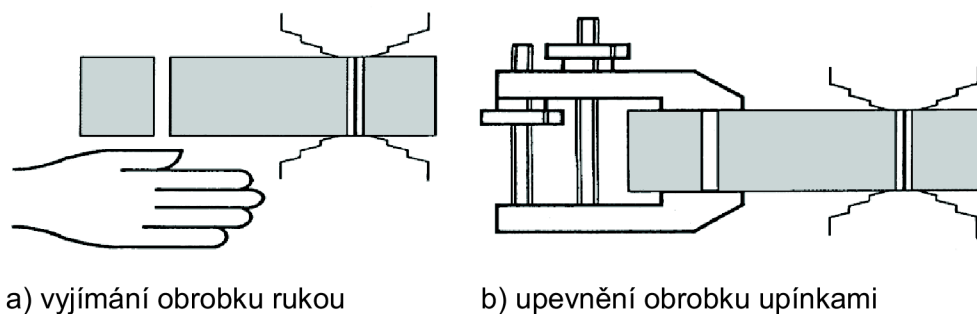
Obr. 1.19 Posloupnost řezů [8]

Při řezání uzavřených kontur je nutné počítat s tím, že pokud dořežeme konturu do konce, středová část nám vypadne (popř. se vzpříčí) a může způsobit problémy v dalším průběhu řezání. Z tohoto důvodu konturu neřežeme do konce, ale necháváme nedořezanou část zvanou můstek. Jakmile provedeme všechny potřebné řezy, středovou část zabezpečíme proti vypadnutí a odřežeme můstek [8].



Obr. 1.20 Technologie řezání [8]

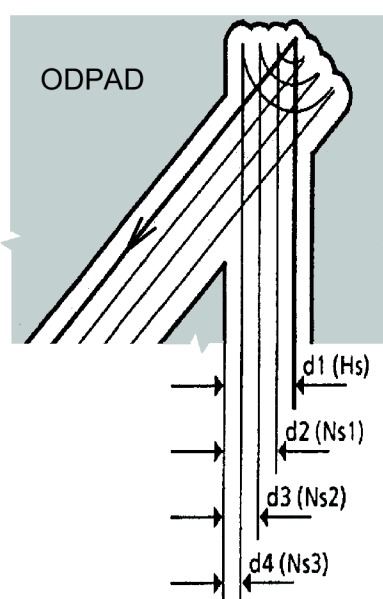
Lehké součásti se nemusí upevňovat, pokud je při dokončování řezu přítomna obsluha, která vyřezaný materiál zachytí a vyjme. Těžší součásti se zabezpečují upínkami, magnety nebo speciálními lepidly a tmely [8].



Obr. 1.21 Způsoby zachycení obrobku [8]

Pokud řezeme otvory (např. střížnice), je nutné mít na paměti, že nikdy nedosáhneme zcela ostrého rohu. Nejmenší dosažený rádius odpovídá polovině šířky řezu, tzn. součtu poloměru řezného drátu a prořezu. Tato hodnota je uvedena v materiálových listech drátové řezačky a závisí nejen na průměru drátu, ale i na nastavených parametrech řezu [8].

Při řezání vnějších ostrých úkosů dochází vlivem zpomalení elektrody v místě rohu k částečnému erodování rohu, čímž vznikne malý rádius. Tomuto efektu lze zabránit použitím zadních řezů. Princip spočívá v tom, že konturu v daném rohu částečně přejedeme, šikmo se vrátíme a navážeme na stávající konturu. Tímto způsobem řezu se elektroda nezpomalí v místě rohu a nedegraduje ho [8].

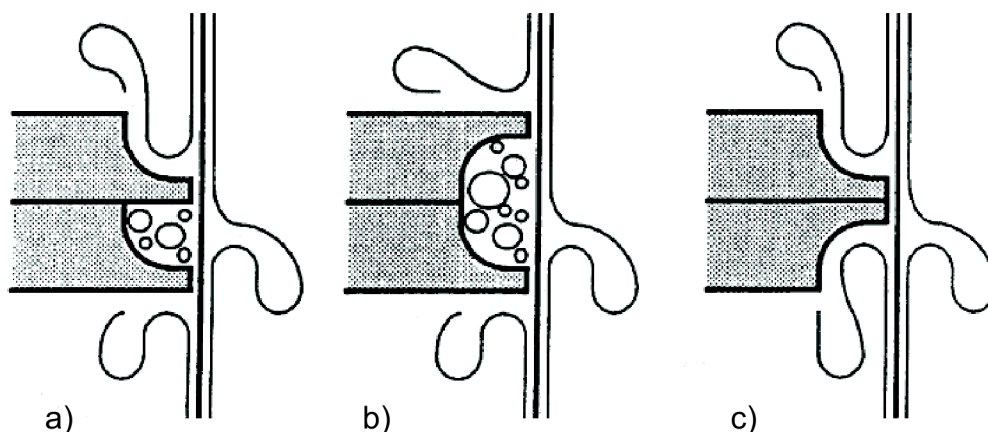


Obr. 1.22 Metoda zadních řezů [8]

Pro zvýšení produktivity u řezání tenkých obrobků (např. z plechu) se využívá sériových řezů ve svazku. Tato metoda spočívá v navrstvení více plechů na sebe, upnutých v jeden svazek a vyřezání několika stejných obrobků při jednom řezu. Největší výhodou je zvýšení řezného výkonu při vyšší řezné výšce a tím i zvýšení celkové produktivity práce [8].

Při použití sériových řezů musíme dbát toho, aby byly pláty plechu upevněny do jednoho bloku. Stejně tak ho musí tvořit i vyřezávaná součást, aby ji před dořezáním kontury bylo možné spolehlivě upevnit. Rovněž je velmi důležité zaručit dobrý přenos elektrického proudu mezi jednotlivými dílci a zabránit jejich vzájemnému lepení [8].

V neposlední řadě se musí dohlédnout na kvalitní výplach, který by z důvodu svazkování neměl být přerušovaný, aby v mezerách nezačalo docházet ke kumulování par vzniklých při řezání. Nevypravené zbytky materiálu obrobku by mohly nepříznivě ovlivnit kvalitu řezné plochy [8].



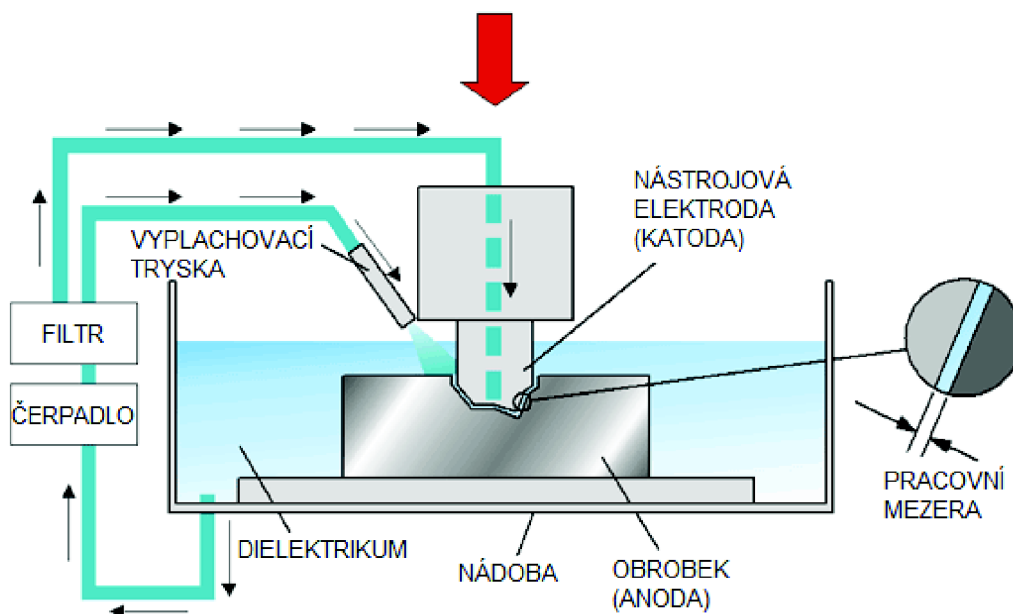
Obr. 1.23 a), b) přerušovaný výplach; c) nepřerušovaný výplach [8]

Výše uvedené technologie jsou jen zlomkem toho, co musí kvalifikovaná obsluha elektroerozivní drátové řezačky znát. Veškeré pokyny a zásady nutné k obsluze a údržbě stroje bývají obsaženy ve výrobcem přiložených manuálech. Pro dosažení spolehlivého chodu je vhodné se s nimi před započítím práce náležitě seznámit.

## 1.2 Elektroerozivní hloubení

U elektroerozivního hloubení platí stejné fyzikální zákony jako u elektroerozivního řezání drátem. Veškeré požadavky kladené na generátory, dielektrikum a na elektrody jsou také téměř totožné. Největším rozdílem je konstrukce elektrody, která již není tvořena drátem jako u předchozího případu, nýbrž jde o monolitní nástroj, jenž svým tvarem opisuje vyráběnou dutinu. Nástroj pomocí elektroeroze vniká do obrobku, čímž odpadá výroba startovacích děr, a lze tak vyrábět i dutiny neprůchozí, což u drátového řezání nebylo možné.

Tato metoda je hojně využívána především k výrobě nejrůznějších forem a zápusťek, jejichž výroba by jinými technologiemi byla problematická, často dokonce nemožná. Samozřejmostí je, stejně jako u řezání drátem, vysoká tvarová a rozměrová přesnost s možností zařazení bezobslužného provozu stroje [1; 2].



Obr. 1.24 Schéma elektroerozivní hloubičky [25]

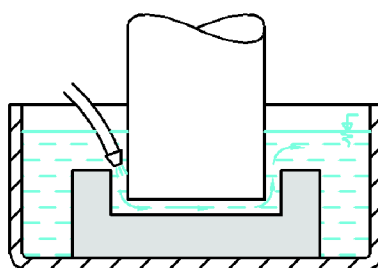
### 1.2.1 Dielektrikum

Jelikož je technologie elektroerozivního hloubení stejná jako technologie elektroerozivního řezání, bude i volba dielektrika probíhat podle stejných zásad. Spíše než samotné dielektrikum se mění způsob vyplavování roztaveného materiálu z oblasti řezu (tzv. vyplachování) [1; 17; 19].

**U samotného vyplachování rozlišujeme tyto metody [1; 17; 19]:**

- vnější,
- vnitřní,
- odsáváním,
- pulzní,
- kombinované.

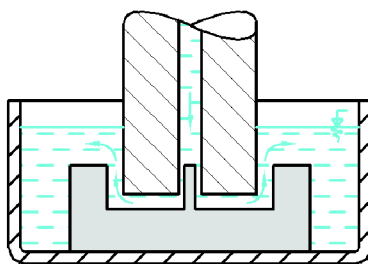
Vnější vyplachování se s výhodou používá především při hloubení hlubších děr a jeho princip spočívá v přivádění dielektrika do místa elektroeroze pomocí trysky. Tím je zajištěna stálá cirkulace dielektrika v místě obrábění a současně i dostatečný odvod roztaveného materiálu. Danou metodu lze pro zvýšení účinnosti kombinovat s vyplachováním pulzním [1; 17; 19].



Obr. 1.25 Vnější vyplachování [1; 17; 19]

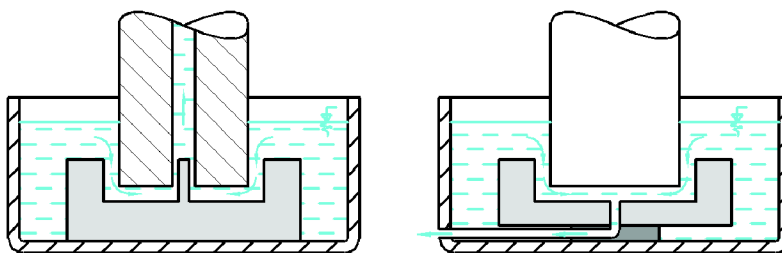
Vnitřní vyplachování využívá k dopravě dielektrika do místa obrábění díry, jež je zhotovena přímo v nástrojové elektrodě. Aby bylo dosaženo dostatečného výplachu, je nutné dielektrikum přivádět pod stálým tlakem. Nevýhodou této metody je dosažení menší tvarové přesnosti obráběné dutiny, což není vhodné zejména při dokončovacích operacích [1; 17; 19].





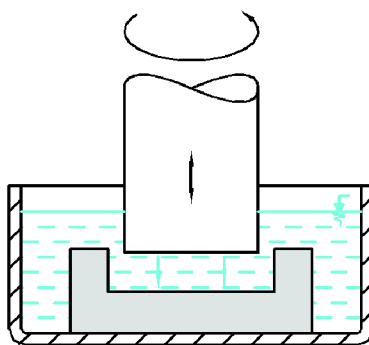
Obr. 1.26 Vnitřní vyplachování [1; 17; 19]

Vyplachování odsáváním je jakousi alternativou vnitřního vyplachování, s rozdílem, že dielektrikum do pracovního prostoru nevháníme, ale naopak ho z něj odsáváme. To lze realizovat buď dírou v elektrodě, nebo dírou přímo v obrobku. I přes jisté podobnosti s vnitřním výplachem se touto metodou dosahuje lepších tvarových přesností obráběné dutiny [1; 17; 19].



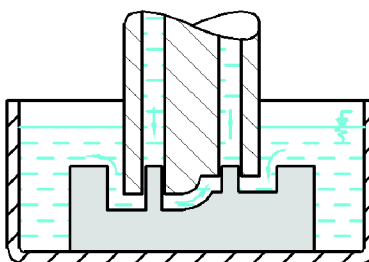
Obr. 1.27 Vyplachování odsáváním [1; 17; 19]

Pulsní způsob výplachu je založen na oddalování a opětovném přiblížování nástrojové elektrody za neustálého přerušování procesu elektroeroze. Při oddálení se zvětší mezera mezi nástrojem a obrobkem a opětovným přiblížením dojde k vytlačení roztaveného kovu ven z místa obrábění. Celý cyklus je díky modernímu CNC řízení možné naprogramovat. Pulsní vyplachování se s výhodou používá u výroby hlubokých děr a lze jej realizovat i při použití tenkých elektrod. Tato metoda je použitelná i při dokončovacích operacích [1; 17; 19].



Obr. 1.28 Pulsní vyplachování [1; 17; 19]

Posledním ze způsobů vyplachování je kombinovaný. Jak už název napovídá, jedná se o kombinaci vyplachování odsáváním a vnitřního. Tato technologie se převážně používá při obrábění tvarově náročných dutin při současném zachování tvarových přesností obráběné dutiny [1; 17; 19].



Obr. 1.29 Kombinované vyplachování [1; 17; 19]

### **1.2.2 Nástrojová elektroda**

Základem pro výrobu požadovaného obrobku je správná volba nástrojové elektrody. Pro každou dutinu zpravidla vyrábíme zcela originální elektrodu, jež kopíruje její tvar. Na její zhotovení klademe vysoké požadavky jak z hlediska rozměrové, tak i tvarové přesnosti. Volbou elektrody je určena nejen požadovaná přesnost, ale i jakost obrobené plochy a výkon obrábění. Výroba elektrody je náročná i z ekonomického hlediska a tvoří až 50 % celkových výrobních nákladů [1; 19].

Velmi důležitý je také materiál nástrojové elektrody, který volíme na základě materiálu obráběné součásti, použitého stroje a relativního objemového opotřebení elektrody [1; 19].

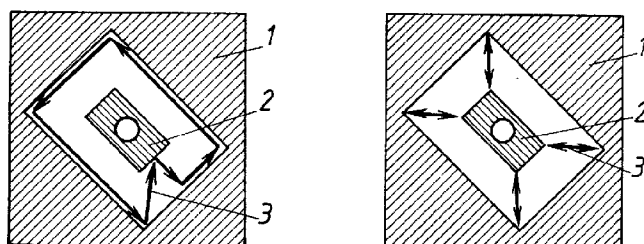
#### **Rozdělení materiálů elektrod [1; 19]:**

- **kovové**
  - elektrolytická měď,
  - slitina wolframu a mědi,
  - slitina wolframu a stříbra,
  - slitina chromu a mědi,
  - mosaz,
  - ocel,
- **nekovové**
  - grafit,
- **kombinované**
  - kompozice grafitu a mědi.

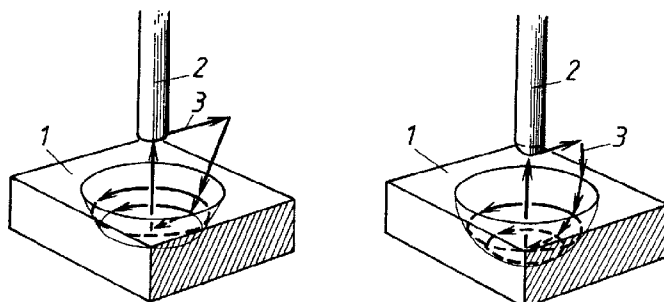
Samozřejmostí moderních elektroerozivních hloubiček je automatická výměna nástrojových elektrod. Díky tomu je výhodné používat pro zhotovení dutiny více elektrod jednodušších tvarů (jako jsou např. kruhy, čtverce, obdélníky), které lze snadněji a přesněji vyrobit [1; 19].

#### **1.2.3 Technologie hloubení**

Pomocí moderního CNC řídicího systému lze vhodnou kombinací tvaru a pohybu elektrody vyrobit i tvarově velmi složité součásti. Tímto způsobem dojde mimo jiné i dalšímu zjednodušení tvaru nástrojové elektrody, což se nám příznivě promítne na výrobních nákladech [1; 19].

**Popis:**

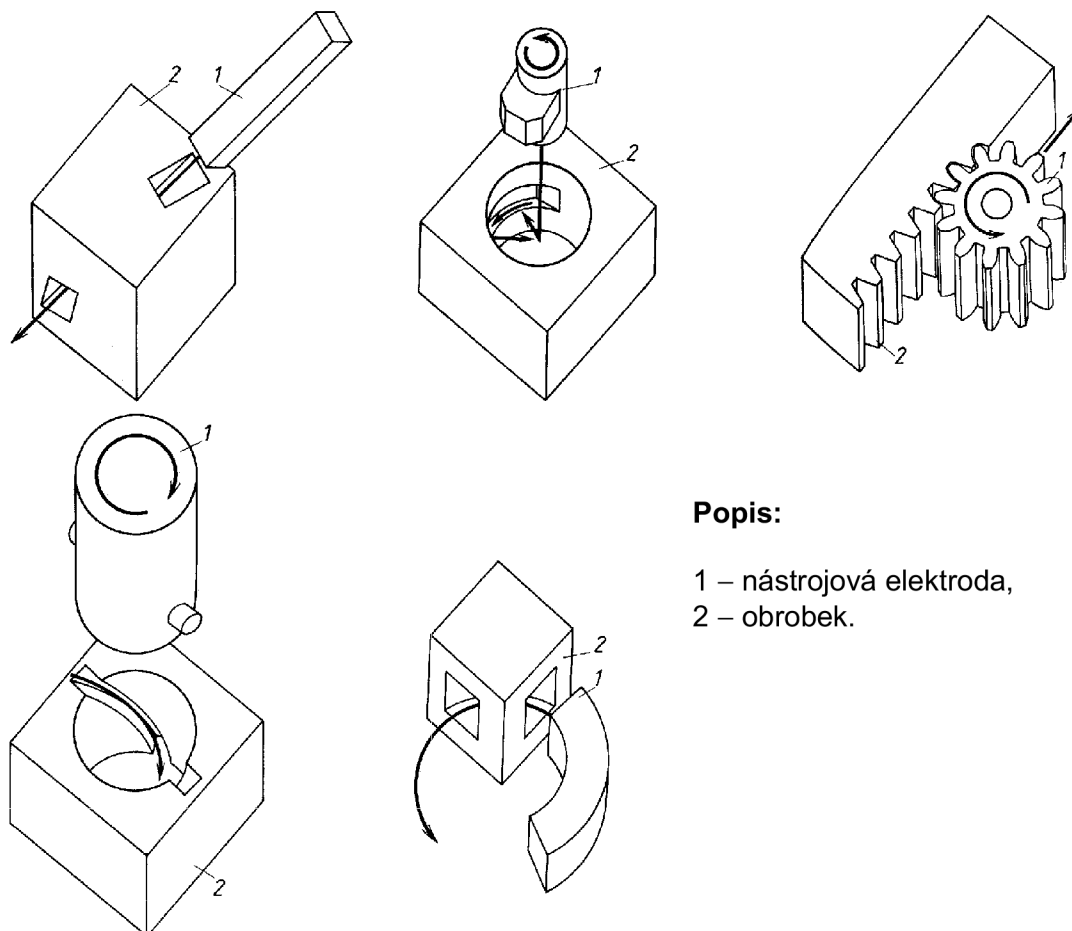
- 1 – obrobek,
- 2 – elektroda,
- 3 – pohyb elektrody.



Obr. 1.30 Výroba dutin kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody [19]

Zapojení vhodného pohybu dává procesu elektroerozivního hloubení nový rozměr a ještě více rozšiřuje již tak bohatý repertoár možných tvarů obrobků. Touto technologií lze obrábět nejen uzavřené dutiny, ale i rozmanité vnější tvary, drážky a díry [19].

Složité pohyby elektrody také kladou vysoké požadavky na CNC řídicí systém, který musí umožňovat samostatné řízení více os souřadného systému. Vhodným příkladem je planetový pohyb, jenž je složením tří přímočarých posuvných pohybů ve směru tří vzájemně kolmých os a dvou otáčivých pohybů [19].

**Popis:**

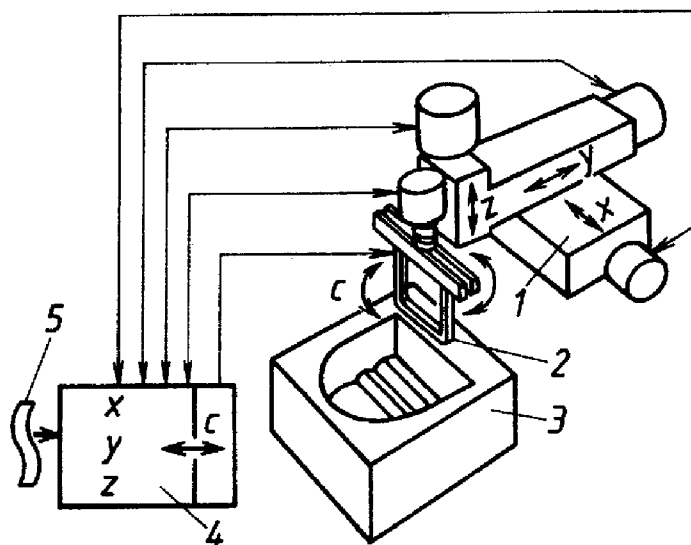
1 – nástrojová elektroda,  
2 – obrobek.

Obr. 1.31 Výroba povrchů kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody [19]

### 1.3 Elektroerozivní řezání tvarovou drátovou elektrodou

Rozvoj výpočetní techniky, především v oblasti 3D modelů, se stal podmínkou pro vývoj nových metod obrábění. V oblasti elektroeroze se konkrétně jedná o metodu vyřezávání třírozměrných tvarů tvarovou drátovou elektrodou [19].

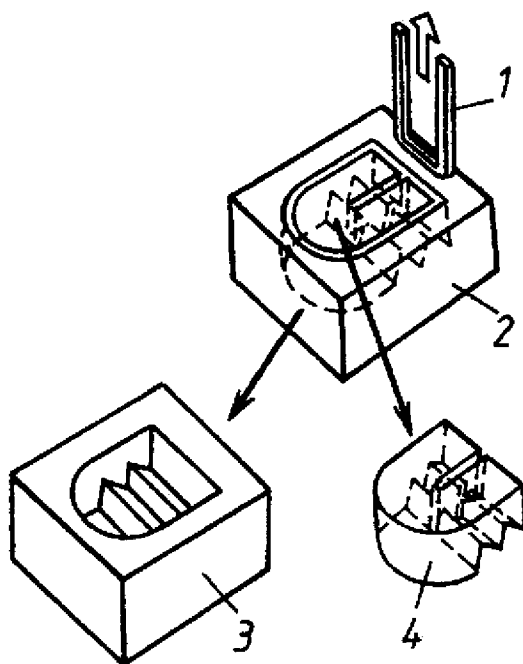
Dalo by se říct, že jde o spojení elektroerozivního drátového řezání a hloubení. Tato metoda opět využívá vhodné kombinace tvaru a pohybu nástrojové elektrody, která je v tomto případě většinou tvořena měděnou trubkou obdélníkového průřezu. Uvedený tvar je nejvýhodnější jak z hlediska požadované pevnosti, tak i tuhosti elektrody [19].

**Popis:**

- 1 – stroj,
- 2 – nástrojová elektroda,
- 3 – obrobek,
- 4 – CNC řídicí systém,
- 5 – napájecí zdroj.

Obr. 1.32 Schéma stroje pro řezání tvarovou drátovou elektrodou [19]

Jedna z předností této metody je značné urychlení procesu obrábění, protože na rozdíl od hloubení nevyjiskřujeme celý objem materiálu, nýbrž jen jeho konturu. To je výhodné především při obrábění velkých dutin nebo drahých materiálů, kdy je možné vyřezaný odpad dále využít [19].

**Popis:**

- 1 – nástrojová elektroda,
- 2 – polotovar,
- 3 – obrobená dutina,
- 4 – odebraný materiál.

Obr. 1.33 Princip výroby dutiny tvarovou drátovou elektrodou [19]

Metoda je vysoce progresivní, nicméně parametry řezu zdaleka nedosahují takových kvalit jako u metod předchozích. Přesnost obrobených rozměrů se pohybuje okolo 0,1 mm při drsnosti povrchu  $Ra = 10 \mu\text{m}$ . Proto je výhodné použít řezání tvarovou drátovou elektrodou pro méně přesné dutiny o délce větší než 70 mm [19].

## 2 STÁVAJÍCÍ STAV A REÁLNÉ MOŽNOSTI TECHNOLOGIE ELEKTROEROZIVNÍHO DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ VE FIRMĚ

### 2.1 Výrobní program firmy

Při tvorbě diplomové práce bylo spolupracováno se strojírenskou firmou Kovovýroba Horák, sídlem v obci Topolná. Jedná se o malý rodinný podnik, jenž byl založen v roce 1992 a v současné době zaměstnává pět kvalifikovaných pracovníků [14].

Firma se zabývá zejména kusovou, ale i malosériovou výrobou nejrůznějších strojních součástí na konvenčních i CNC strojích. Mezi hlavní výrobní technologie patří především soustružení, jež pokrývá většinu firemních zakázek, ale zdaleka není jedinou technologií, kterou společnost disponuje. Mezi další patří elektroerozivní obrábění drátovou řezačkou, frézování, broušení naplocho i nakulato, obrážení a v neposlední řadě větší i menší zámečnické práce. Mimo dílčí výrobu strojírenských součástí se zabývají i výrobou jednoúčelových strojů a zařízení dle výkresové dokumentace, včetně tepelného zpracování a povrchových úprav [14].



Obr. 2.1 Sídlo firmy Kovovýroba Horák. [14]

## 2.2 Strojní zázemí firmy

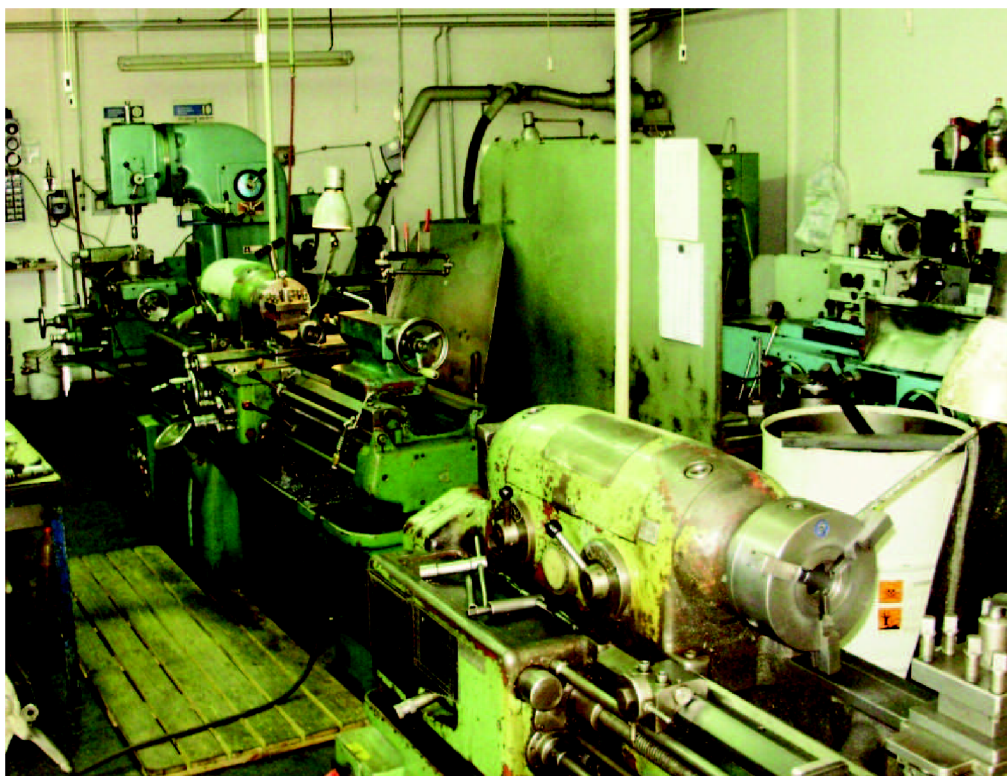
I přesto, že je Kovovýroba Horák malá firma, disponuje velkým množstvím nejrůznějších strojů, díky čemuž dokáže uspokojit rostoucí požadavky zákazníků, kladené především na kvalitu, přesnost a v neposlední řadě na cenu finálního výrobku. Ve větší míře se jedná o stroje staršího charakteru, nicméně plně dostačující pro požadovanou výrobu. Firma není odkázána na kooperaci s jinými podniky [14].

Díky nižší pořizovací ceně repasovaných strojů může Kovovýroba Horák držet ceny výrobků na nízké hranici, což jí umožňuje úspěšně prosperovat v rostoucí konkurenci [14].

### **Strojní vybavení firmy [14]:**

- CNC soustruh SF 55/1000,
- elektroerozivní drátová řezačka HITACHI 245R,
- soustruh SV 18R,
- soustruh SN 40,
- frézka vertikální FA3AV,
- bruska nakulato BU 28x100,
- bruska naplocho BRH 20A,
- svislá obrážečka ST 125,
- vrtačka sloupová VS 20,
- ruční pásová pila MOD 270.





Obr. 2.2 Strojní vybavení firmy.

## 2.3 Elektroerozivní drátová řezačka ve firmě

Hlavní výrobní technologií Kovovýroby Horák je třískové obrábění, jež tvoří asi 80 % výrobního programu firmy. Ve zbylých 20 % jsou zahrnuty drobné zámečnické práce a technologie elektroerozivního řezání drátovou elektrodou [14].

### 2.3.1 Parametry a umístění elektroerozivní drátové řezačky

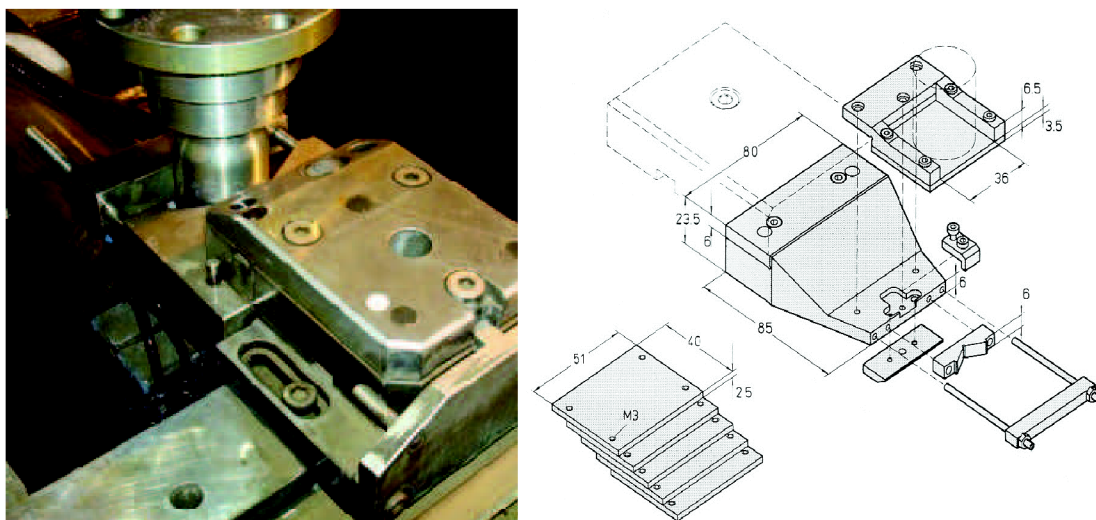
Elektroerozivní drátová řezačka je z důvodu omezených prostor firmy umístěna v otevřené místnosti v bezprostřední blízkosti CNC soustruhu. Toto umístění není zcela vhodné z důvodu kolísání teploty a zejména kvůli vibračním šířícím se od CNC soustruhu. Všechny tyto vlivy se nepříznivě podepisují při výrobě velmi přesných součástí, nicméně dosahovaná přesnost zcela vyhovuje požadavkům kladeným na tyto vyráběné součásti [14].



Obr. 2.3 Elektroerozivní drátová řezačka HITACHI 245R

Podnik disponuje elektroerozivní drátovou řezačkou značky HITACHI 245R, která i přes své stáří umožňuje přesné řezání mosazným drátem o průměru 0,25 mm. Pomocí CNC řízení jí lze vyřezávat širokou škálu velmi rozmanitých tvarů s maximálním úkosem +/- 12° na 100 mm výšky [14].

Drátová řezačka je ve firmě nejvíce využívána při výrobě raznic, částí forem, vytlačovacích hubic pro plastikářský průmysl a jiné přesné práce. Na stroji je použit upínací systém HIRCHMANN, který je pro tento typ zařízení obzvláště výhodný. Umožňuje přesné a rychlé upínání různých tvarových součástí [14].

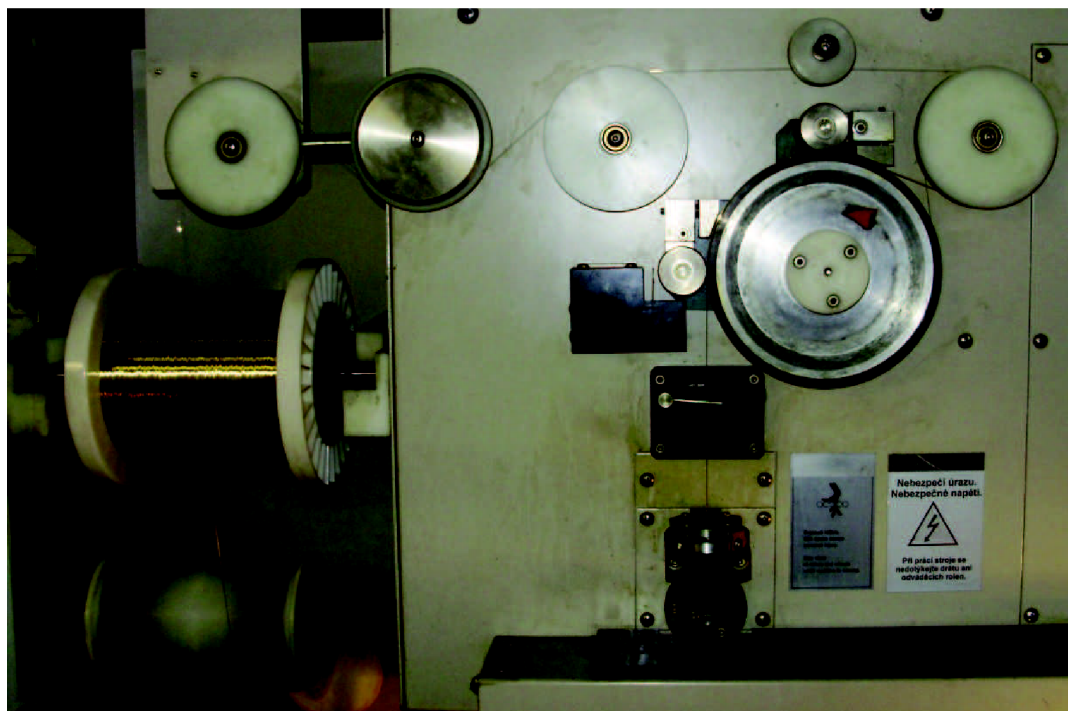


Obr. 2.4 Upínací systém HIRCHMANN [14; 26]

#### Základní parametry elektroerozivní drátové řezačky HITACHI 245R [14]:

- pojezdy X, Y, Z: 400 x 250 x 210 mm,
- max. úhel řezu: +/- 12° na 100 mm,
- max. obrobek (V, Š, H): 200 x 300 x 170 mm,
- přesnost řezu: 0,005 mm,
- programovací systém: Wire Cut.

Pro práci na řezačce HITACHI 245R je použit mosazný drát PENTA Cut "T" o průměru 0,25 mm. Jedná se o velmi universální drát určený přímo pro tento typ stroje. Na cívce K160 je navinuto cca 16 174 m drátu o celkové hmotnosti 7 kg. Drát je vyroben ve vysoké kvalitě s přesností na 1  $\mu$ m. Cívka je v řezačce uložena tak, aby se drát mohl pohodlně odvíjet. Drát prochází systémem kladek a napínáků, což zaručuje ideální napětí a vedení drátu v řezu [24].



Obr. 2.5 Systém kladek a napínáků

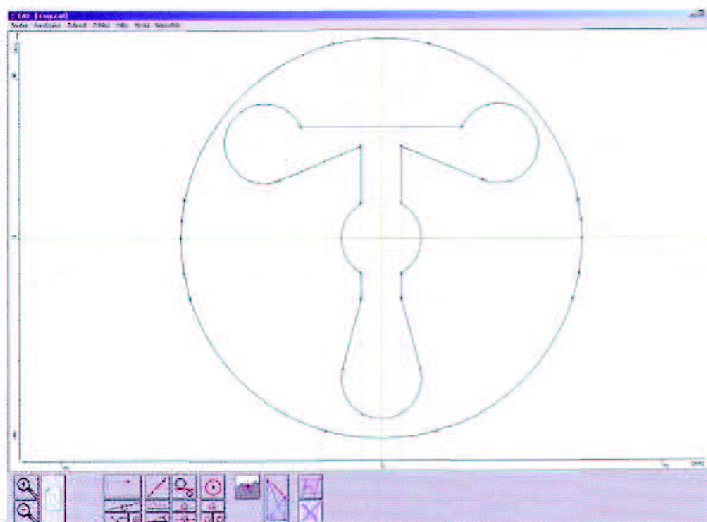
### 2.3.2 Programovací systém Wire Cut

Drátová řezačka HITACHI 245R disponuje programovacím systémem Wire Cut, sloužícím pro vytváření NC-programů. Systém je vcelku nenáročný na požadavky kladené na softwarové vybavení počítače a běží pod Windows od verze 3.1 až po XP. Hardwarové požadavky jsou rovněž nízké, systém běží i na PC 486 s pevným diskem a nejméně 8 MB RAM. Samotný systém je snadno ovladatelný, s možností zakoupení postprocesoru k drátovým řezačkám, jako jsou např. HITACHI, AGIE, FANUC, CHARMILLES, MAKINO, MITSUBISHI a SODIC [15].

Programovací systém Wire Cut je strukturován do čtyř základních modulů a to CAD, CONIC, TECHNO a NC-SIM. Tyto moduly umožňují přípravu programu od výkresové části až po simulaci řezného cyklu [15].

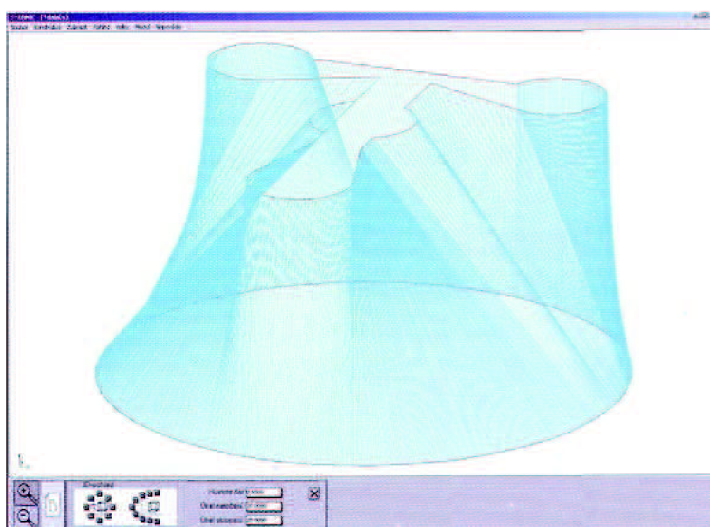
Začínajícím konstrukčním modulem programu je CAD. Jde o kreslicí program, který je především určen k vytváření řezných kontur z výkresové dokumentace. Tento modul dále umožňuje načtení souborů z jiných CAD programů ve formátu DXF, FDA-FS, ASCII a také zpětné vygenerování prvků

konstrukční geometrie z hotového NC-programu. Výstupem z programu je soubor formátu DXF nebo kontura s vlastním formátem, jež je určena pro další zpracování dvouosého a čtyřosého řezání [15].



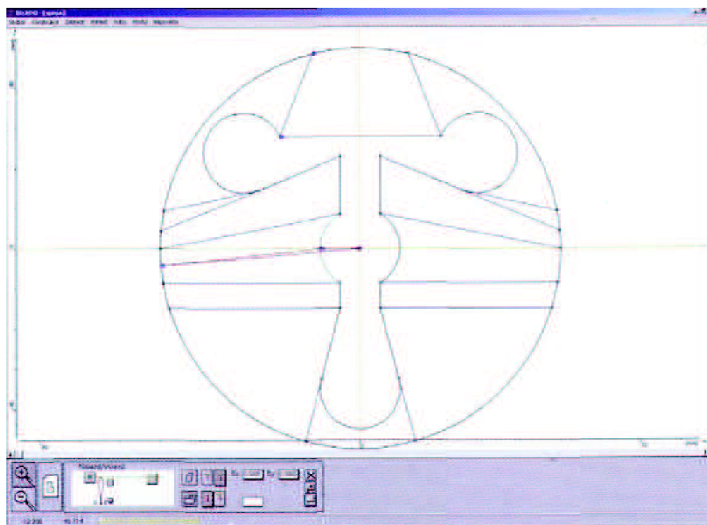
Obr. 2.6 Prostředí modulu CAD [16]

Druhou částí programu je CONIC, jež může importovat data z různých CAD programů ve stejném formátu jako předchozí modul CAD, nebo převezme data ve tvaru kontury vytvořené v základním modulu CAD. Hlavním úkolem této části je upravit importovaná data pro možnost řezání s úkosem [15].



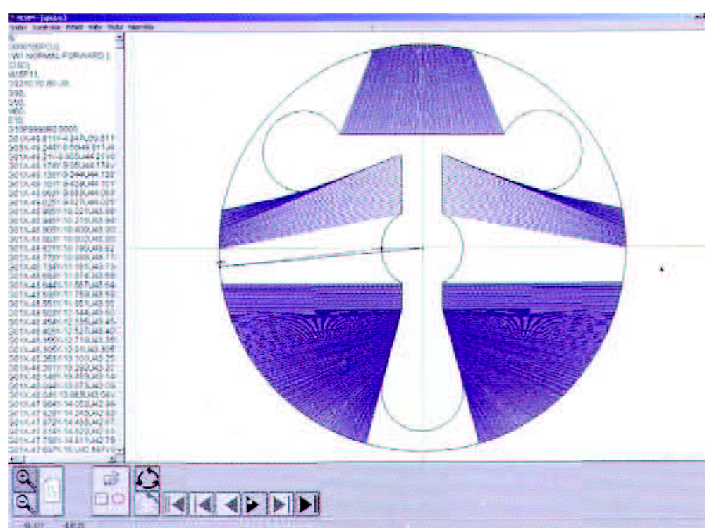
Obr. 2.7 Prostředí modulu CONIC [16]

Dalším a zároveň nejdůležitějším modulem je TECHNO. Tato část je detailně obeznámena s problematikou drátového řezání a zajišťuje převod importovaných dat na NC-program kompatibilní s reálným typem stroje. Modul ke geometrickým datům pro dvouosé nebo čtyřosé řezy přidává potřebná technologická data, jako jsou např. poloha startovacího bodu, materiál obrobku, pořadí řezu jednotlivých kontur, parametry řezu atd. [15].



Obr. 2.8 Prostředí modulu TECHNO [16]

Posledním z modulů programovacího systému Wire Cut je NC-SIM. Zde je možné vygenerovaný NC-program graficky zobrazit, a to dráhy nástroje, dráhy přejezdů a jiné technologické funkce. Daný modul umožňuje graficky simulovat a zpětně upravovat daný NC program, avšak nenahrazuje nutnou kontrolu programu na skutečné drátové řezačce [15].



Obr. 2.9 Prostředí modulu NC-SIM [16]

Mimo výše uvedené moduly systém Wire Cut obsahuje část nazývanou TECHNO-EDIT. Jedná se o editor technologických dat určených pro zvolené stroje, jež jsou nabízeny v modulu TECHNO [15].

Celkové ovládání programovacího systému Wire Cut je velmi intuitivní a pro jeho využívání není nutné žádné speciální vzdělání. Program si lze rychle osvojit a po krátkém zaučení je obsluha stroje schopná tvorby i složitých NC-programů [15].

### 3 ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE VZOROVÉ SOUČÁSTKY

#### 3.1 Popis a použití vybrané vzorové součástky

Vzhledem k omezenému sortimentu, který je Kovovýrobou Horák vyráběn na drátové řezačce, byla za vzorovou součást vybrána vytlačovací hubice pro plastikářský průmysl. Jedná se o jednoduchou součást kruhového průřezu, ve které je vyřezaná tvarová kontura. Tato hubice byla vyrobena pro firmu EXTRAPLAST s.r.o. sídlící v Napajedlech. Jak už napovídá název, firma se zabývá výrobou plastových dílců, zejména vytlačovaných profilů, jako jsou lišty, hadice, trubičky atd. [23].



Obr. 3.1 Příklad protlačovaných plastových profilů [23]

Vytlačovací hubice slouží v plastikářském průmyslu jako forma, skrze kterou je pomocí např. šnekového dopravníku protlačován roztavený plast, čímž dosahuje požadovaného tvaru. Požadavky kladené na tvarovou přesnost hubice se odvíjejí od požadované přesnosti protlačeného profilu, nicméně pro dosažení hladkého tvaru protlačovaného profilu je stěžejní, aby kontura vyřezaná v hubici měla co nejnižší drsnost. Vzhledem k tomu, a také kvůli tvarové náročnosti některých profilů, je elektroerozivní řezání drátovou elektrodou ideální technologií pro její výrobu.



Obr. 3.2 Model vybrané protlačovací hubice

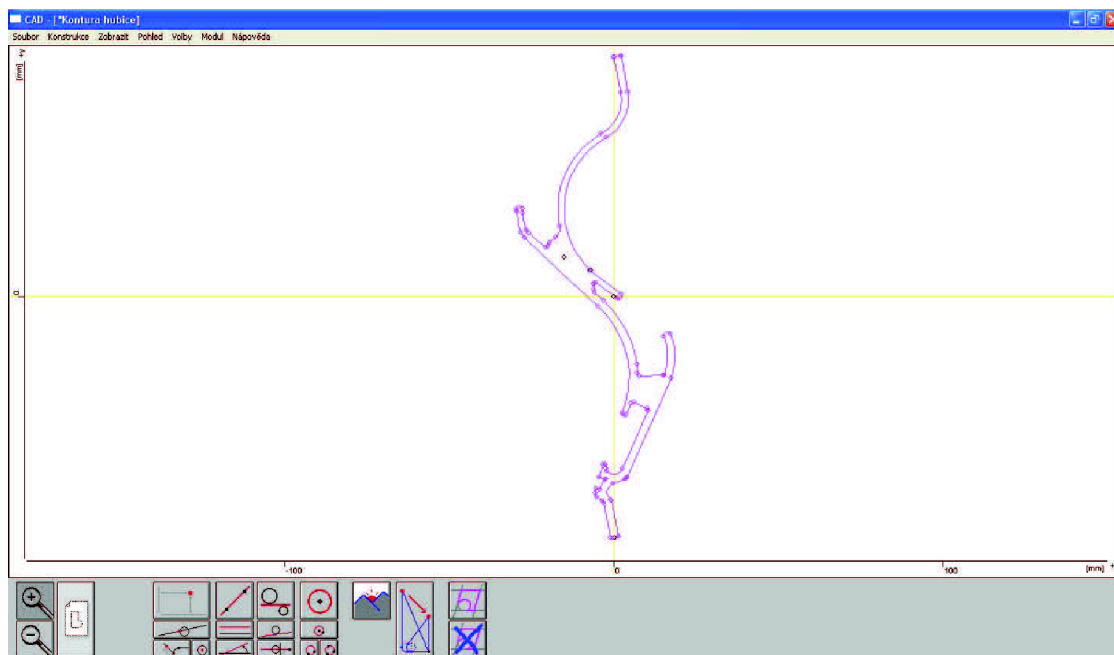


### 3.2 Programování řezané kontury

Elektroerozivní drátová řezačka HITACHI 245R využívá pro tvorbu NC programů systému Wire Cut. Tohoto systému bylo využito i při programování řezané kontury vybrané protlačovací hubice.

Před začátkem programování je nutné přesně nakreslit vyráběnou konturu dle výkresu dodaného zákazníkem. K tomuto slouží kreslicí modul systému Wire Cut, kterým je CAD. V běžné praxi se často stává, že zákazník místo výkresu pošle elektronickou cestou pouze obrázek požadované kontury, vytvořený ve formátu DXF. Tento formát je podporován většinou běžně používaných kreslicích programů a lze ho využít i v modulu CAD. Takto obdržený obrázek se importuje do CADu, čímž odpadne často zdlouhavé kreslení kontury a výrazně se zkrátí samotný čas programování.

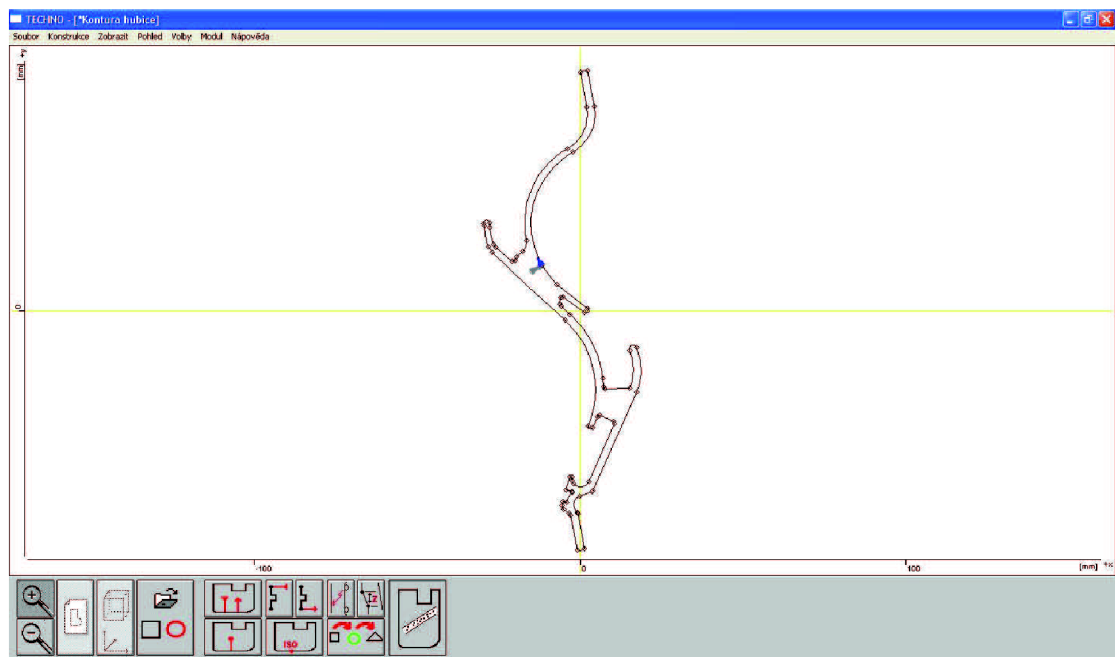
Po importu kontury se zpravidla posouvá nulový bod tak, aby plně vyhovoval našim požadavkům. Dalším velmi důležitým krokem prováděným v modulu CAD je kontrola uzavření kontury. Při kreslení se často stává, že se některá z čar nedotáhne do konce, díky čemuž nebude možné program vytvořit. Pokud je kontura v pořádku, systém zahlásí, že je kontura uzavřena. Posledním krokem v modulu CAD je vytvoření bodu, který je v dalším modulu využit pro tvorbu startovacího bodu. Takto upravenou konturu lze exportovat do dalšího modulu CONIC, kde se nastavuje řezání s úkosem, nicméně vybraná protlačovací hubice úkos nemá, proto přejdeme přímo do modulu TECHNO.



Obr. 3.3 Kontura hubice v modulu CAD

Modul TECHNO slouží k vytvoření nájezdu a výjezdu drátu z řezu. K tomuto použijeme bod vytvořený v CADu, který pro náš případ tvoří startovací a zároveň dokončovací bod. V modulu TECHNO si vybereme funkci pro vytvoření nájezdu/výjezdu ze stejného bodu a poté si jen patřičný bod označíme a kliknutím na přilehlou křivku dojde k vytvoření nájezdu/výjezdu. Mimo to lze dle potřeby měnit i smysl pohybu drátu po kontuře.

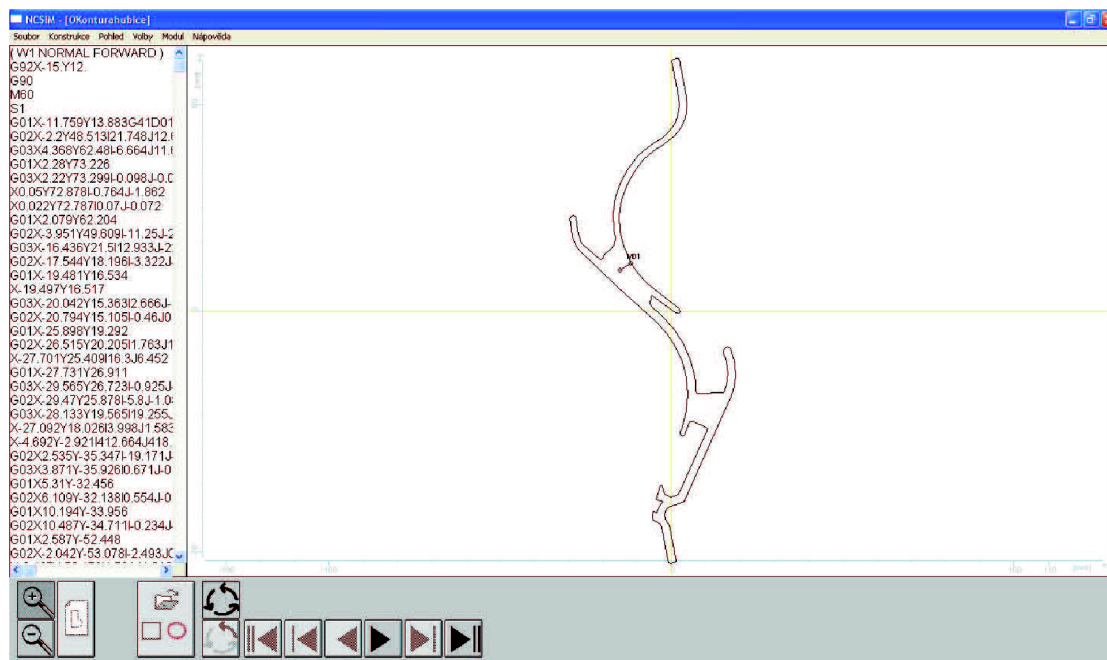
Dalším krokem v modulu TECHNO je volba technologie, kde se mimo parametrů řezného drátu volí i počet řezů a výška obrobku. Pro vybranou hubici byl zvolen jen jeden řez, což plně vyhovělo požadavkům zákazníka z hlediska kvality a ceny. Na základě těchto dat je vygenerován NC program, s nímž se dále pracuje v modulu NC-SIM.



Obr. 3.4 Kontura hubice v modulu TECHNO

Vygenerovaný program se v modulu NC-SIM zobrazuje nejen v NC kódu, ale i graficky. Výhodou toho je, že po označení jakékoli části programového kódu se tato část barevně odliší i v grafickém zobrazení. Tím lze snadno získat přehled v jednotlivých částech kódu.

Samozřejmostí je i možnost provádět úpravy jakékoli části NC kódu, kde jednoduchým přepsáním můžeme měnit např. výšku řezané součásti, čímž se automaticky přepočítají i řezné podmínky.



Obr. 3.5 Kontura hubice v modulu NC-SIM

### 3.3 Technologie výroby protlačovací hubice

Před samotným řezáním kontury na elektroerozivní drátové řezačce je nutné obrobit základní tvar protlačovací hubice. Hubice je vyrobena z materiálu 11 600.

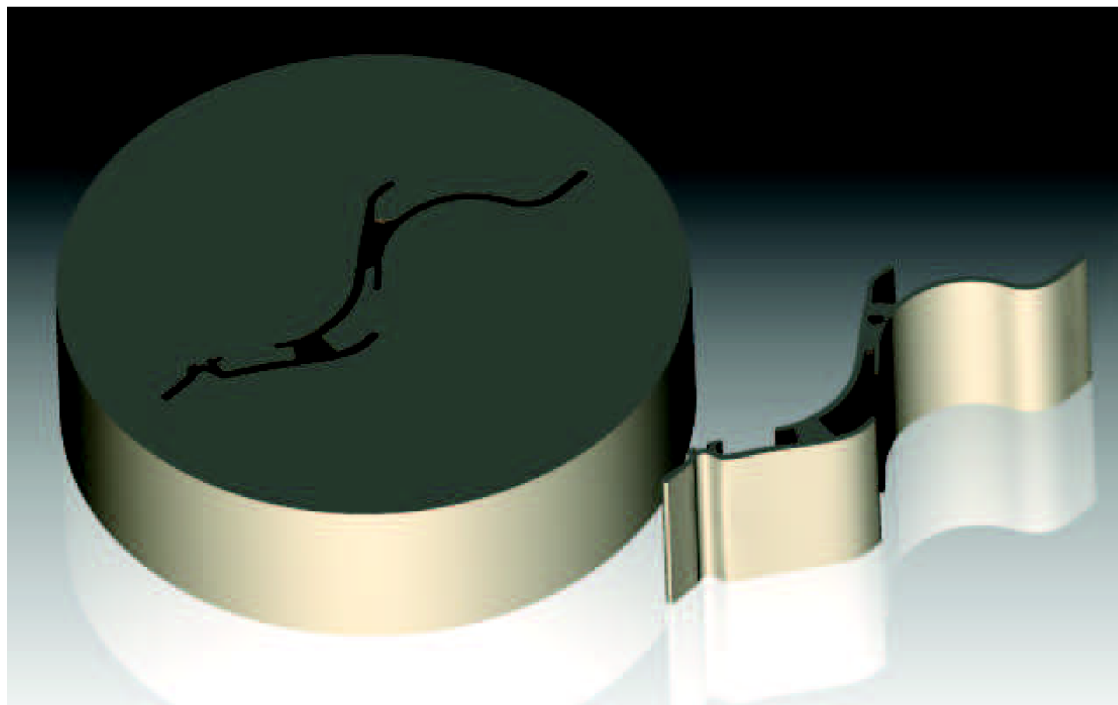
Tab. 3.1 Výrobní postup základního tvaru protlačovací hubice

Výrobní postup			
Číslo operace	Označení stroje	Popis operace	Nástroje / měřidla / přípravy
00/00	Ruční pásová pila MOD 270	Upnout polotovary $\Phi 190$ mm a uříznout na délku 60 mm.	Prizmatické čelisti
01/01	Soustruh hrotový SN 40	Upnout do sklíčidla a osoustružit polotovar na $\Phi 180$ mm a výšku 50,6 mm.	Ubírací nůž ohnutý pravý + přímý pravý
02/02	Kontrola	Kontrola základních rozměrů.	Posuvné měřítko
03/03	Bruska na plocho BRH 20A	Upnout na magnetický stůl a přebrousit čela na výšku 50 mm.	Brousící kotouč 1-252x25x76 - A36L5V
04/04	Sloupová vrtačka VS 20	Vyvtat díru $\Phi 3,8$ mm a poté vystružit na $\Phi 4$ H7.	Vrták $\Phi 3,8$ mm Výstružník $\Phi 4$ H7
05/05	Kontrola	Kontrola základních rozměrů.	Posuvné měřítko

Takto připravený polotovár je pomocí upínacího systému HIRCHMANN ustaven v pracovním prostoru elektroerozivní drátové řezačky HITACHI 245R. Pomocí diskety se přenese vytvořený program do drátovky a najede se pohyblivým vodičkem do nulového bodu. Před navlečením drátu je nutné nahráný program simulovat nad obrobkem, čímž zjistíme, zda nedojde ke kolizi vodička např. s upínacím přípravkem. Dalším krokem je automatické navlečení drátu pomocí tenkého proudu dielektrika. Navlečený drát se ve třech bodech dotkne stěn startovací díry a automaticky se nepolohuje na její střed.

V poslední fázi se pracovní prostor řezačky zaplaví dielektrikem a začne řezání naprogramované kontury dle nastavených řezných parametrů (viz tab. 3.2). Při dojíždění kontury byla volná část obrobku upnuta pomocí magnetických upínek, aby nedošlo k jejímu vypadnutí.

Po vyřezání kontury se vypustí voda z pracovního prostoru řezačky a navlečený drát se ustříhne. Potom lze hotovou součást vyjmout a po osušení a kontrole připravit k expedici.



Obr. 3.6 Průtlačná hubice s vyřezaným odpadem.

Tab. 3.2 Základní řezné parametry drátové řezačky

HITACHI 245R	
Řezné parametry	Hodnoty
H [mm]	50
$A_W$ [mm·s <sup>-1</sup> ]	120
B	1
d [μm]	156
$v_S$ [mm·min <sup>-1</sup> ]	1,2
$v_{HS}$ [mm <sup>2</sup> ·min <sup>-1</sup> ]	59

#### 4 TECHNICKO - EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Technologie elektroerozivního drátového řezání prošla za posledních 15 let značným vývojem. Obecným trendem v oblasti strojírenství je zvyšování dosahované přesnosti výroby a zkracování výrobních časů při zachování nebo snížení výrobních nákladů. Stejným směrem se ubírá i technologie elektroerozivního drátového řezání.

Díky nedostatku kvalifikovaných pracovníků v oblasti strojírenství byly značně sníženy i nároky na obsluhu elektroerozivních drátových řezaček, což vedlo k zpřístupnění této technologie širšímu uživatelskému spektru. Takový rozvoj má za následek zvýšení konkurence na trhu, což tlačí dodavatele elektroerozivních strojů, aby snižovaly jejich pořizovací ceny. I přes snižování nákladů spojených s elektroerozí se v porovnání s běžnými metodami obrábění stále jedná o finančně velmi náročnou technologii.

Elektroeroze se jeví jako ekonomická především při výrobě velmi přesných tvarově složitých součástí, které nelze obrábět jinou technologií.

## 4.1 Stanovení dílčích nákladů na výrobu vzorové součástky

### 4.1.1 Čas řezání kontury vzorové součástky

Při znalosti střední rychlosti posuvu (viz tab. 3.2) a délky řezané kontury (viz příloha 1) můžeme snadno spočítat přibližnou dobu, za kterou drát vyřeže požadovanou konturu.

$$T_O = \frac{l_K}{v_S} [\text{min}] \quad (4.1)$$

Kde:  $l_K$  ... délka řezné kontury,  $l_K = 460$  [mm]

$v_S$  ... střední rychlost posuvu,  $v_S = 1,2$  [mm·min<sup>-1</sup>]

$$T_O = \frac{460}{1,2} = 383,33 [\text{min}]$$

### 4.1.2 Náklady na hodinu provozu stroje

Tyto náklady jsou hlavním ukazatelem pro určení konečné ceny součásti vyráběné na elektroerozivní drátové řezačce. Při jejich stanovení je nutné zahrnout mnoho jednotlivých aspektů.

#### **V hodinových nákladech na provoz stroje jsou zahrnuty:**

- náklady na drát spotřebovaný za hodinu provozu stroje,
- cena spotřebované energie za hodinu provozu stroje,
- mzdové náklady na pracovníka,
- ostatní náklady,
- režijní náklady.

Náklady na spotřebovaný drát za hodinu řezání na elektroerozivní drátové řezačce lze jednoduše stanovit ze znalosti ceny 1 m drátu a rychlosti odvíjení drátu  $A_W$  (viz tab. 3.2).

Cena mosazného drátu PENTA Cut "T" o průměru 0,25 mm se udává v závislosti na 1 kg drátu. Společnost PENTA trading s.r.o. dodává 1 kg tohoto drátu za 170 Kč (bez DPH 20 %). Náklady na metr drátu viz vzorec 4.2.

$$N_{mD} = \frac{C_{kg}}{D_D} [Kč \cdot m^{-1}] \quad (4.2)$$

Kde:  $C_{kg}$  ... cena 1 kg drátu,  $C_{kg} = 170$  [Kč]  
 $D_D$  ... délka drátu v 1 kg,  $D_D = 2\,310$  [m]

$$N_{mD} = \frac{170}{2\,310} = 0,074 [Kč \cdot m^{-1}]$$

Náklady na drát spotřebovaný za hodinu řezání na stroji lze potom stanovit dle následujícího vzorce.

$$N_D = A_W \cdot 3,6 \cdot N_{mD} [Kč \cdot h^{-1}] \quad (4.3)$$

Kde:  $A_W$  ... rychlost odvíjení drátu,  $A_W = 120$  [mm·s<sup>-1</sup>]  
 $N_{mD}$  ... náklady na 1 m drátu,  $N_{mD} = 0,074$  [Kč·m<sup>-1</sup>]

$$N_D = 120 \cdot 3,6 \cdot 0,074 = 32 [Kč \cdot h^{-1}]$$

Dalším ukazatelem (v hodinových nákladech na provoz stroje) je cena spotřebované energie za hodinu provozu stroje. Tento ukazatel se určuje z příkonu stroje a ceny elektrické energie.

$$N_{SE} = P \cdot C_E [Kč \cdot h^{-1}] \quad (4.4)$$

Kde:  $P$  ... příkon stroje,  $P = 7,8$  [kW]  
 $C_E$  ... cena elektrické energie za 1 kWh,  $C_E = 3,19$  [Kč·kWh<sup>-1</sup>]

$$N_{SE} = 7,8 \cdot 3,19 = 24,9 [Kč \cdot h^{-1}]$$

Hodinová mzda pracovníka obsluhujícího elektroerozivní drátovou rezačku je velmi zkreslujícím ukazatelem. Jelikož se jedná o počítačově řízený stroj, je přítomnost obsluhy omezena pouze na upínání a vyjímání obrobku.



Ve zbylém čase většinou obsluha vytváří program na další součást, popř. obsluhuje jiný stroj. Z tohoto důvodu si určíme, že čas obsluhy strávený u elektroerozivní drátové řezačky během obrábění bude 1 hodina. Při znalosti hodinové mzdy obsluhy se nám tento čas promítne do hodinových nákladů na provoz stroje dle vzorce 4.5.

$$N_M = \frac{60 \cdot H_M}{T_O} [K\check{c} \cdot h^{-1}] \quad (4.5)$$

Kde:  $H_M$  ... hodinová mzda obsluhy,  $H_M = 150$  [Kč]

$T_O$  ... čas řezání kontury (viz. kapitola 4.1.1),  $T_O = 383,33$  [min]

$$N_M = \frac{60 \cdot 150}{383,33} = 23,5 [K\check{c} \cdot h^{-1}]$$

Pojmem ostatní náklady se rozumí dlouhodobé náklady spojené s provozem elektroerozivní drátové řezačky. Jsou zde zahrnuty průměrné náklady na nejvíce opotřebovávané díly v závislosti na hodinu provozu stroje (viz tab. 4.1). Data uvedená v tabulce 4.1 jsou čerpána z podkladů vyhotovených společností PENTA trading s.r.o. (viz příloha 3).

Tab. 4.1 Ostatní náklady na provoz drátové řezačky HITACHI 245R

Položka	Cena za jednotku	Potřeba jednotek	Náklady	Celková životnost	Náklady na hodinu práce
Filtr HITACHI	2 495 Kč	2 ks	4 990 Kč	550 h	9,07 Kč
Deionizační pryskyřice	124,88 Kč	5 l	624,40 Kč	600 h	1,04 Kč
Vodítka 0,25 mm sada F	79 987 Kč	1 sada	79 987 Kč	6000 h	13,33 Kč
Přivaděče proudu	4 464 Kč	2 ks	8 928 Kč	1200 h	7,44 Kč
Odváděcí rolny	6 304 Kč	2 ks	12 608 Kč	6000 h	2,10 Kč
Uretanová rolna	11 872 Kč	1 sada	11 872 Kč	4000 h	2,97 Kč
Těsnění ramene	14 333 Kč	1 sada	14 333 Kč	3000 h	4,78 Kč
Brzda drátu	13 178 Kč	1 ks	13 178 Kč	6000 h	2,20 Kč
<b>Náklady celkem: <math>N_o =</math></b>					<b>42,93 Kč</b>

Posledním z ukazatelů jsou tzv. režijní náklady, mezi které se řadí např. náklady na vytápění, osvětlení, náklady na administrativní pracovníky a jiné náklady spojené s řízením podniku. Tyto náklady si každý podnik stanovuje

dle vlastního uvážení a výrazně se podílí na celkové kalkulaci hodinových nákladů na provoz stroje. Kovovýroba Horák si tyto náklady stanovila na  $N_R = 326,67 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Při zohlednění všech dílčích nákladů spojených s provozem stroje se náklady na hodinu provozu elektroerozivní drátové řezačky HITACHI 245R stanoví dle vzorce 4.6.

$$N_{Ch} = N_D + N_{SE} + N_M + N_O + N_R \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (4.6)$$

Kde:  $N_D$  ... náklady na spotřebovaný drát,  $N_D = 32 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$

$N_{SE}$  ... náklady na elektrickou energii,  $N_{SE} = 24,9 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$

$N_M$  ... mzdové náklady,  $N_M = 23,5 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$

$N_O$  ... ostatní náklady,  $N_O = 42,93 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$

$N_R$  ... režijní náklady,  $N_R = 326,67 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$

$$N_{Ch} = 32 + 24,9 + 23,5 + 42,93 + 326,67 = 450 \text{ [Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$$

#### 4.1.3 Náklady na výrobu polotovaru

V první řadě je nutno vypočítat pořizovací cenu materiálu. Dle tabulky 3.1 vidíme, že součást byla zhotovena z tyčového přířezu o  $\Phi 190 \text{ mm}$  a délce  $60 \text{ mm}$ . Materiál přířezu je ocel třídy 11 600. Při znalosti ceny materiálu a hmotnosti přířezu můžeme ze vzorce 4.7 snadno stanovit náklady na neobrobený polotovar. Kovovýroba Horák tento materiál odebírá za cenu  $C_M = 45 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

$$N_{MT} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot 10^{-9} \cdot l_p \cdot \rho \cdot C_M \text{ [Kč]} \quad (4.7)$$

Kde:  $d_p$  ... průměr přířezu,  $d_p = 190 \text{ [mm]}$

$l_p$  ... délka přířezu,  $l_p = 60 \text{ [mm]}$

$\rho$  ... hustota oceli,  $\rho = 7850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

$C_M$  ... cena 1 kg oceli 11 600,  $C_M = 45 \text{ [Kč} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$$N_{MT} = \frac{\pi \cdot 190^2}{4} \cdot 10^{-9} \cdot 60 \cdot 7850 \cdot 45 = 600,75 \text{ [Kč]}$$

Dále je nutné spočítat náklady na obrobení přířezu. Operace prováděné na přířezu byly soustružení, broušení, vrtání a vystružování. Za všechny tyto úkony si Kovovýroba Horák účtuje  $N_U = 300 \text{ Kč}\cdot\text{h}^{-1}$ . Čas, za který byly vykonány, byl reálně změřen na  $T_U = 70 \text{ min}$ . Potom náklady na obrobení polotovaru lze stanovit dle vzorce 4.8.

$$N_{OP} = \frac{N_U \cdot T_U}{60} \text{ [Kč]} \quad (4.8)$$

Kde:  $N_U$  ... hodinové náklady na úkony,  $N_U = 300 \text{ [Kč}\cdot\text{h}^{-1}]$

$T_U$  ... čas obrábění,  $T_U = 70 \text{ [min]}$

$$N_{OP} = \frac{300 \cdot 70}{60} = 350 \text{ [Kč]}$$

Celkové náklady na výrobu polotovaru potom odpovídají součtu nákladů na hutní materiál 11 600 a nákladů na obrobení přířezu.

$$N_{CP} = N_{MT} + N_{OP} \text{ [Kč]} \quad (4.9)$$

Kde:  $N_{MT}$  ... náklady na materiál,  $N_{MT} = 600,75 \text{ [Kč]}$

$N_{OP}$  ... náklady na obrobení polotovaru,  $N_{OP} = 350 \text{ [Kč]}$

$$N_{CP} = 600,75 + 350 = 950,75 \text{ [Kč]}$$

## 4.2 Stanovení celkových nákladů na výrobu vzorové součástky

Celkové náklady se stanoví na základě času, za který se na drátové řezačce součástka obrobí, dále na celkových nákladech na hodinu provozu drátové řezačky a na nákladech na výrobu polotovaru (viz vzorec 4.10).

$$N_{CV} = \frac{T_O \cdot N_{Ch}}{60} + N_{CP} \text{ [Kč]} \quad (4.10)$$

Kde:  $T_O$  ... doba obrábění na drátové řezačce,  $T_O = 383,33 \text{ [min]}$

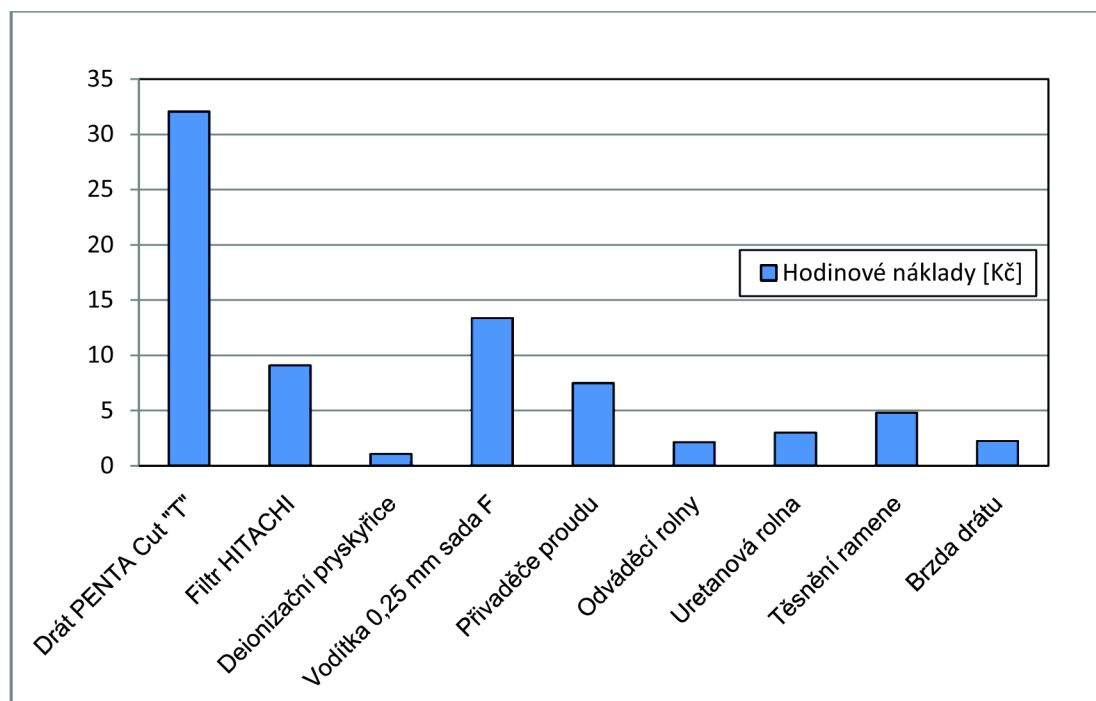
$N_{Ch}$  ... náklady na hodinu provozu drátové řezačky,  $N_{Ch} = 450 \text{ [Kč}\cdot\text{h}^{-1}]$

$N_{CP}$  ... celkové náklady na polotovar,  $N_{CP} = 950,75 \text{ [Kč]}$

$$N_{CV} = \frac{383,33 \cdot 450}{60} + 950,75 = 3\,825,73 \text{ [Kč]}$$

### 4.3 Vyhodnocení

Na základě provedených výpočtů bylo zjištěno, že při výrobě protlačovací hubice mělo na výši hodinových nákladů elektroerozivní drátové řezačky HITACHI 245R největší vliv množství spotřebovaného drátu PENTA Cut "T". I přes jeho relativně nízkou pořizovací cenu se ho při výrobě spotřebuje obrovské množství, čímž rapidně vzrostou i náklady na provoz (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Podíl nákladů jednotlivých položek na 1 hodinu řezu.

Kovovýroba Horák si za 1 hodinu provozu stroje účtuje  $450 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$  (viz kapitola 4.1.2), což je v porovnání s jinými podniky značně podhodnocená suma. Běžná cena hodinového provozu elektroerozivní drátové řezačky je od 600 Kč výše. Tento fakt je především způsoben tím, že Kovovýroba Horák zakoupila drátovou řezačku jako starší stroj, čímž byly pořizovací náklady v porovnání s novými stroji mnohem nižší. I když parametry řezu nedosahují takových hodnot jako u nových zařízení, jedná se stále o vysoce přesný stroj plně vyhovující požadavkům firmy.

## ZÁVĚR

Dlouhodobým trendem v oblasti strojírenství jsou stále se zvyšující požadavky kladené na přesnost, rychlost a v neposlední řadě ekonomičnost obrábění. Stále se zvyšující tvrdost a pevnost obráběných materiálů vede k rozvoji technologií, které by umožnily jejich efektivní obrábění. Technologie elektroerozivního obrábění se zdá být správnou cestou pro plnění těchto požadavků, což vede k jejímu rozvoji.

Elektroerozivní drátové řezání prošlo značným rozvojem, ať už zdokonalováním povlaků řezných drátů či vývojem lineárních pohonů. Také stále se zlepšující vlastnosti generátorů neustále zvyšují rychlost a parametry obráběcího procesu. Rostoucí zájem o tuto technologii zvyšuje konkurenci mezi distributory elektroerozivních strojů, což vede zákonitě ke snižování jejich pořizovací ceny. Především díky tomu se elektroerozivní stroje staly dostupnými i pro malé strojírenské podniky, které si tuto technologii dříve nemohly z finančních důvodů dovolit.

Budoucí uplatnění elektroerozivního drátového řezání v malých strojírenských firmách spočívá v obrábění velmi přesných a tvarově náročných součástí těžko obrobitelných konvenčními metodami. Optimální využití elektroerozivních strojů je především ve vícestrojové obsluze, nejlépe při dvou až třisměnném provozu. U větších podniků pak půjde především o začleňování elektroerozivních strojů do větších plně automatizovaných celků, kde bude pro zvýšení efektivity obrábění elektroeroze kombinována s jinými technologiemi obrábění.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění. *MM: Průmyslové spektrum*. 19. 7. 2007, č. 7, s. 60. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
2. POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. *MM: Průmyslové spektrum*. 17. 7. 2006, č. 7, s. 37. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>>.
3. ŠPINAR, Jiří. [Http://www.toolscomp.cz](http://www.toolscomp.cz) [online]. 14. 10. 2010 [cit. 2010-10-27]. EDM – Elektrojiskrové obrábění. Dostupné z WWW: <<http://www.toolscomp.cz/technologie/edm-elektrojiskrove-obrabeni/>>.
4. *Fermat: použití EDM technologií* [online]. c2008 [cit. 2011-02-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.fermatmachinery.com/cs/392-pouziti-edm-technologie>>.
5. KREJZA, Karel. [Http://elektrika.cz](http://elektrika.cz) [online]. c1998-2010 [cit. 2010-10-29]. Dielektrikum. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-06-28.1360072444/view>>.
6. *Pfingstner* [online]. c2010 [cit. 2010-10-29]. Dielektrikum. Dostupné z WWW: <<http://www.pfingstner.cz/index.php/dielektrikum>>.
7. *Životopisy online* [online]. c2003-2009 [cit. 2010-11-06]. Luigi-Galvani (9.9.1737-4.12.1798)-objevitel-zivocisne-elektriny. Dostupné z WWW: <<http://zivotopisyonline.cz/luigi-galvani-991737-4121798-objevitel-zivocisne-elektriny/>>.
8. *AGIE training center: AGIECUT 100D, 200D, 300D*. Switzerland: AG für industrielle Elektronik Losone, 506 s.
9. *Pfingstner* [online]. c2011 [cit. 2011-01-19]. Řezací dráty. Dostupné z WWW: <<http://www.pfingstner.cz/index.php/rezaci-draty>>.

10. *EDM TRADE s.r.o.* [online]. c2008 [cit. 2011-01-19]. Řezací dráty. Dostupné z WWW: <[http://www.edmtrade.cz/material-detail/Řezací dráty.html](http://www.edmtrade.cz/material-detail/Řezací_dráty.html)>.
11. Elektroerozivní stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 21. 5. 2003, č. 5, [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-stroje>>.
12. KÜNSTLER, Viktor. Drátové řezačky s lineárními pohony v ekonomické třídě. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 1.9. 2010, č.9, [cit. 2011-02-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dratove-rezacky-s-linearnimi-pohony-v-ekonomicke-tride>>.
13. VIJAYARAM, Thoguluva Raghavan. *The Metallurgist* [online]. c2010 [cit. 2011-02-17]. Electrical Discharge Machining (EDM) of Metals and Alloys. Dostupné z WWW: <[http://www.themetallurgist.co.uk/articles/electrical\\_discharge\\_machining\\_edm\\_of\\_metals\\_and\\_alloys.shtml](http://www.themetallurgist.co.uk/articles/electrical_discharge_machining_edm_of_metals_and_alloys.shtml)>.
14. *Kovovýroba Horák* [online]. c2010 [cit. 2011-02-20]. Dostupné z WWW: <[www.horakkovo.cz](http://www.horakkovo.cz)>.
15. *Komfortní programovací systém pro drátové řezačky WireCut 6.xx CZ*. Praha: PENTA TRADING, spol. s.r.o., c2004. 42 s.
16. *PENTA trading s.r.o.* [online]. 2009c [cit. 2011-02-23]. Programovací systémy. Dostupné z WWW: <<http://www.penta-edm.cz/index.php?text=49-programovaci-systemy>>.
17. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Plzeň: ZČU Plzeň, 1994. 102 s. ISBN 80-7082-161-2.
18. *Service-edm.com* [online]. c2011 [cit. 2011-03-06]. Electroerozion. Dostupné z WWW: <<http://www.service-edm.com/erosion>>.

19. ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 : Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. Praha: Scientia, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.
20. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989. 122 s.
21. KRAJČÍK, Michal. *Elektrická iskra ako najtvrdší nástroj*. Vyd. 1. Slovensko: OSVETA, 1958. 69 s.
22. PÍŠKA, Miroslav, et al. *Speciální technologie obrábění*. první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
23. *EXTRAPLAST s.r.o.* [online]. c2004 [cit. 2011-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.extraplast.cz>>.
24. *PENTA trading s.r.o.* [online]. 2009 c [cit. 2011-05-01]. Spotřební materiál. Dostupné z WWW: < [http://www.penta-edm.cz/dokumenty/spotrebni\\_material/drat\\_pc\\_t.jpg](http://www.penta-edm.cz/dokumenty/spotrebni_material/drat_pc_t.jpg) >.
25. *Mechanical Design Forum* [online]. 2011 [cit. 2011-05-05]. Electro-discharge machining (EDM). Dostupné z WWW: <<http://www.mechanicaldesignforum.com/forum/kb.php?a=18>>.
26. *HIRCHMANN* [online]. c 2009 [cit. 2011-05-10]. Fixturing System 4000 for Wire EDM. Dostupné z WWW: <[http://www.hirschmanngbh.com/en/systems\\_automation/download.html](http://www.hirschmanngbh.com/en/systems_automation/download.html)>.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

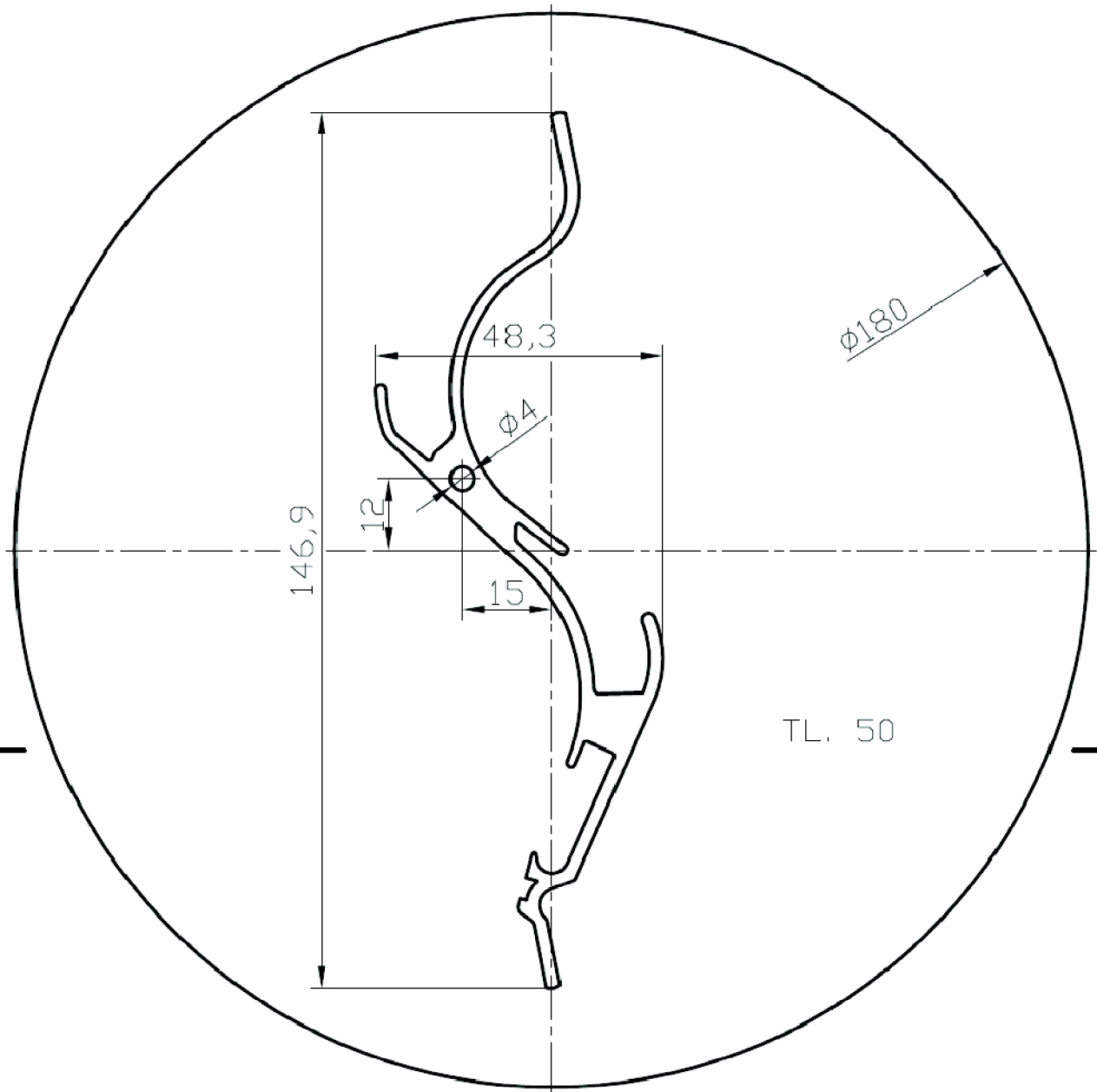
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CAD	-	Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování - software (nebo obor) pro projektování či konstruování na počítači
CNC	-	Computer Numerical Control – řízení obráběcího stroje počítačem, resp. programem
Ra	$\mu\text{m}$	Průměrná aritmetická úchylka
EDM	-	Elektroerozivní obrábění
$V_i$	$\mu\text{m}^3$	Množství odebraného materiálu při jednom elektrickém výboji
$\Phi_d$	$\mu\text{m}$	Průměr kráteru
h	$\mu\text{m}$	Hloubka kráteru
K	-	Konstanta
$W_i$	J	Energie výboje
q	-	Časové využití periody výboje
$t_i$	$\mu\text{s}$	Doba impulsu
$t_0$	$\mu\text{s}$	Doba prodlevy impulsu
T	$\mu\text{s}$	Doba periody výboje
R	$\Omega$	Odpor
L	H	Indukčnost
C	F	Kapacita kondenzátoru
I	A	Proud
U	V	Napětí
M	-	Asynchronní motor
G	-	Generátor
$T_{km}$	$\mu\text{m}$	Maximální tolerance kontury
$H_s$	-	Hrubovací řez
RAM	MB	Random Access Memory – paměť s přímým přístupem
$N_s$	-	Dokončovací řez

DXF	-	Drawing Exchange Format – CAD formát
ASCII	-	American Standard Code for Information Interchange – CAD formát
H	mm	Výška řezu
EDM		Electrical discharge machining – elektroerozivní obrábění
$A_W$	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost odvíjení drátu
B	-	Pro zaplavenou komoru nabývá hodnoty 1, pro nezaplavenou 0
d	$\mu\text{m}$	Korekce
$v_s$	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Střední rychlost posuvu
$v_{HS}$	$\text{mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$	Střední řezná rychlost
$T_O$	min	Čas řezání kontury
$N_{mD}$	$\text{Kč}\cdot\text{m}^{-1}$	Náklady na metr drátu
$N_D$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Celkové náklady na drát
$N_{SE}$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Náklady na spotřebovanou energii
$N_M$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Náklady na mzdu
$N_O$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Ostatní náklady
$N_R$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Režijní náklady
$N_{Ch}$	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	Celkové náklady na hodinu provozu stroje
$N_{MT}$	Kč	Náklady na materiál
$N_{OP}$	Kč	Náklady na obrobení polotovaru
$N_{CP}$	Kč	Celkové náklady na polotovar
$N_{CV}$	Kč	Celkové náklady na výrobu vzorové součástky

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1    Rozměrový náčrt protlačovací hubice  
Příloha 2    NC program protlačovací hubice  
Příloha 3    Náklady na provoz drátových řezaček HITACHI R

# Příloha 1



## PARAMETRY PROTLAČOVACÍ HUBICE

PROJECTION: ISO - E



M 1:1

MATERIÁL :	11 600
ROZMĚRY POLOTOVARU:	$\phi 190-60\text{mm}$
PLOCHA ŘEZANÉ KONTURY:	$643\text{mm}^2$
OBVOD ŘEZANÉ KONTURY:	460mm
ČISTÁ HMOTNOST HUBICE:	9,73kg

## Příloha 2

G92X-15.Y12.

G90

M60

S60

G01X-11.759Y13.883G41D01

G02X-2.2Y48.513I21.748J12.632

G03X4.368Y62.48I-6.664J11.662

G01X2.28Y73.226

G03X2.22Y73.299I-0.098J-0.019

X0.05Y72.878I-0.764J-1.862

X0.022Y72.787I0.07J-0.072

G01X2.079Y62.204

G02X-3.951Y49.609I-11.25J-2.354

G03X-16.436Y21.5I12.933J-22.572

G02X-17.544Y18.196I-3.322J-0.724

G01X-19.481Y16.534

X-19.497Y16.517

G03X-20.042Y15.363I2.666J-1.967

G02X-20.794Y15.105I-0.46J0.117

G01X-25.898Y19.292

G02X-26.515Y20.205I1.763J1.856

X-27.701Y25.409I16.3J6.452

G01X-27.731Y26.911

G03X-29.565Y26.723I-0.925J-0.018

G02X-29.47Y25.878I-5.8J-1.083

G03X-28.133Y19.565I19.255J0.779

X-27.092Y18.026I3.998J1.583

X-4.692Y-2.921I412.664J418.84

G02X2.535Y-35.347I-19.171J-21.291

G03X3.871Y-35.926I0.671J-0.281

G01X5.31Y-32.456

G02X6.109Y-32.138I0.554J-0.23

G01X10.194Y-33.956

G02X10.487Y-34.711I-0.234J-0.525

G01X2.587Y-52.448  
G02X-2.042Y-53.078I-2.493J0.997  
X-2.427Y-52.173I1.591J1.212  
G01X-2.605Y-51.031  
G03X-3.301Y-51.002I-0.351J-0.054  
G01X-4.357Y-54.893  
X-2.427Y-55.417  
X-2.469Y-55.572  
G03X-4.237Y-58.672I3.336J-3.956  
G01X-5.305Y-58.382  
X-5.642Y-59.626  
G03X-5.176Y-60.881I1.11J-0.301  
G01X-3.393Y-62.084  
G02X-2.907Y-62.818I-0.643J-0.953  
G01X-0.883Y-73.232  
G03X-0.823Y-73.306I0.098J0.019  
X1.347Y-72.884I0.764J1.862  
X1.375Y-72.793I-0.07J0.072  
G01X-0.697Y-62.133  
X-0.739Y-62.003  
X-0.811Y-61.886  
X-0.907Y-61.79  
G02X-0.163Y-56.844I1.774J2.262  
G01X3.612Y-55.395  
X3.743Y-55.323  
X3.853Y-55.219  
X3.931Y-55.092  
X17.378Y-24.885  
G03X17.33Y-11.299I-16.608J6.734  
X15.204Y-12.179I-1.063J-0.44  
G02X15.312Y-23.858I-14.434J-5.973  
X15.221Y-23.922I-0.093J0.037  
G01X7.739Y-24.104  
G02X7.115Y-23.236I0.515J1.028  
G03X6.993Y-20.735I-17.703J0.389

X-3.086Y-1.138I-30.855J-3.478

G01X-5.792Y1.299

G02X-6.171Y2.094I0.77J0.855

G01X-6.061Y3.939

X-6.06Y3.95

G02X-5.269Y4.328I0.474J0.025

G01X-5.261Y4.322

X1.222Y-0.501

G03X2.321Y0.729I0.574J0.593

G01X-7.149Y8.108

G02X-11.759Y13.883I17.138J18.406

M01

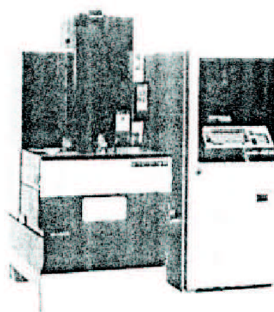
G01X-15.Y12.G40

M50

M02

## Náklady na provoz drátových řezaček HITACHI

FF / F-vodítka /



Položka	Nákupní cena	Mj	Za jednotku	Potřeba	Náklady	Celková životnost	Náklady na hodinu práce
Drát PENTA Cut "T"	170,00 Kč	1 kg	170,00 Kč	7 kg	1 190,00 Kč	70,22 hod	16,95 Kč
Filtr HITACHI	2 495,00 Kč	1 ks	2 495,00 Kč	2 ks	4 990,00 Kč	550 hod	9,07 Kč
Deionizační pryskyčice	3 122,00 Kč	25 l	124,88 Kč	5 l	624,40 Kč	600 hod	1,04 Kč
Vodítka 0,25mm sada, F	79 987,00 Kč	1 sada	79 987,00 Kč	1 sada	79 987,00 Kč	6000 hod	13,33 Kč
Priváděče proudu	4 464,00 Kč	1 ks	4 464,00 Kč	2 ks	8 928,00 Kč	1200 hod	7,44 Kč
Odváděcí rolny	6 304,00 Kč	1 ks	6 304,00 Kč	2 ks	12 608,00 Kč	6000 hod	2,10 Kč
Uretanová rolka	11 872,00 Kč	1 ks	11 872,00 Kč	1 sada	11 872,00 Kč	4000 hod	2,97 Kč
Těsnění ramene	14 333,00 Kč	1 sada	14 333,00 Kč	1 sada	14 333,00 Kč	3000 hod	4,78 Kč
Brzda drátu	13 178,00 Kč	1 ks	13 178,00 Kč	1 ks	13 178,00 Kč	6000 hod	2,20 Kč
<b>Náklady celkem</b>							<b>59,88 Kč</b>

Podíl nákladů jednotlivých položek na 1 hodinu řezu

