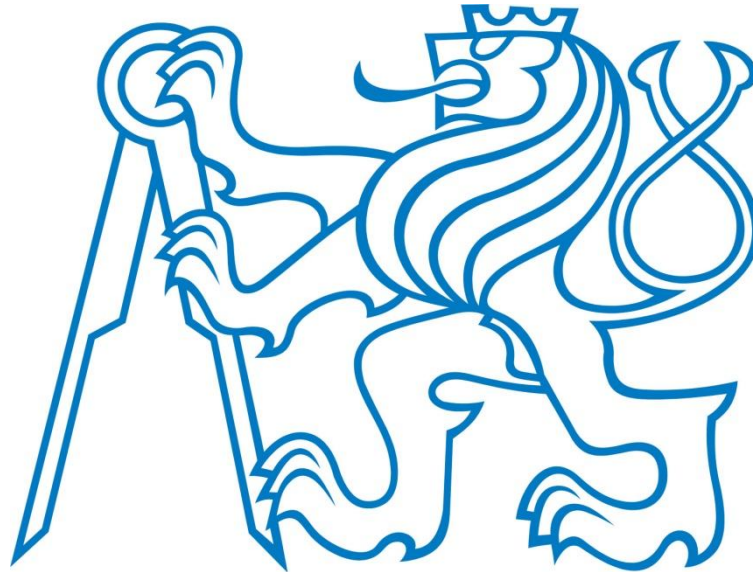


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Fyzikální parametry elektroerozivního obrábění

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Pracoviště: Ústav přístrojové a řídicí techniky

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

jméno:

Patrick Schöbel

obor: Informační a automatizační technika

Název tématu: **Fyzikální parametry elektroerozivního obrábění**

Název anglicky: Physical Parameters of Electro Discharge Machining

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu jednotlivých technologií elektroerozivního obrábění a mikroobrábění s ohledem na jejich dosahovanou přesnost, velikost dosahovaných detailů, způsobů jejich komerčního využití.
2. Vyhodnoťte hlavní fyzikální parametry ovlivňující elektroerozivní obrábění.
3. Proveďte měření časového průběhu elektrického pulzu za vybraných obráběcích podmínek mikroeletroerozivní hloubičce stroji SODICK AP1L.

Rozsah grafických prací: max. 50 %

Rozsah práce: min. 30 str. + přílohy

Seznam odborné literatury:

Carl Sommer, Non-traditional Machining Handbook, Advance Publishing, 2000.
Gatzen, Saile, Leuthold, Micro and Nano Fabrication, Springer, 2015.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 12. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 6. 2016



J. Chyský

doc. Ing. Jan Chyský, CSc.
vedoucí ústavu

M. Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne: 5. 4. 2016

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení hlavních fyzikálních parametrů ovlivňující elektroerozivní obrábění a měření časového průběhu pulzu při vhodně zvolených obráběcích podmínkách na mikroelektroerozivní hloubičce Sodick AP1L.

Klíčová slova: Elektroerozivní obrábění, hloubení, elektroeroze, dielektrikum, EDM

Abstract

The aim of the bachelor thesis is to evaluate the major physical parameters influencing Electric Discharge Machining and the measurement of the pulse waveform at suitably selected machining conditions on the machine Sodick AP1L.

Key words: Electroerosive machining, sinking, electroerosion, dielectric, EDM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Hoškovi Ph.D. za pomoc při vypracování této práce, především za poskytnutí cenných rad, připomínek a prostředků spojené s touto prací. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu nejen při vypracování bakalářské práce, ale i za podporu během celé doby mého studiu.

Obsah

1. Úvod	9
2. Elektroerozivní obrábění	10
2.1 Dielektrikum.....	11
2.2 Nástroje pro elektroerozivní obrábění	12
2.3 Určení rozměru elektrody	13
2.4 Opotřebenění elektrody	14
2.5 Zdroj elektrické energie	15
2.6 Charakteristika výboje	17
2.7 Elektrický výboj mezi elektrodou a obrobkem	18
2.8 Důvod, proč používat nekonvenční metody obrábění	21
2.9 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění	22
2.10 Elektroerozivní drátování.....	22
2.10.1 Popis metody	22
2.10.2 Přesnost elektroerozivního drátování	22
2.10.3 Stroj pro elektroerozivní drátování	22
2.10.4 Využití v praxi	23
2.10.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního drátování.....	23
2.11 Elektroerozivní hloubení	23
2.11.1 Popis metody	23
2.11.2 Přesnost elektroerozivního hloubení	23
2.11.3 Stroj pro elektroerozivní hloubení	23
2.11.4 Využití v praxi	24
2.11.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního hloubení.....	24
2.12 Elektroerozivní broušení	24
2.12.1 Popis metody	24
2.12.2 Přesnost elektroerozivního broušení	24
2.12.3 Stroj pro elektroerozivní broušení	25
2.12.4 Využití v praxi	25
2.12.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního broušení	25

3. Praktická část	26
3.1 Vstupní parametry stroje Sodick AP1L	27
4. Příprava k měření.....	31
4.1 Program LabVIEW 2014	31
4.2 Příprava měřícího programu.....	32
4.3 Měření impulsů a vyhodnocení naměřených hodnot.....	39
4.4 Návrh vstupních parametrů	40
4.5 Vyhodnocení vstupních parametrů	42
4.6 Shrnutí výsledků	45
5. Závěr	46
Použitá literatura.....	47
Seznam příloh	47
Seznam obrázků	48
Seznam použitých zkratk	49

1. Úvod

V dnešní době se snažíme dosahovat co nejmenší rozměry výrobků s nejvyšší přesností a vysokou kvalitou povrchů. Nároky na výrobu přesných výrobků se neustále zvyšují a to je i důvod vývoje nových technologií. Pomocí konvenčních metod obrábění jsme schopni dosáhnout přesné rozměry a to i opakovaně díky moderním CNC technologiím. Výroba velmi přesných součástí se projeví především na době trvání zhotovení součástky a na konečné ceně výrobku.

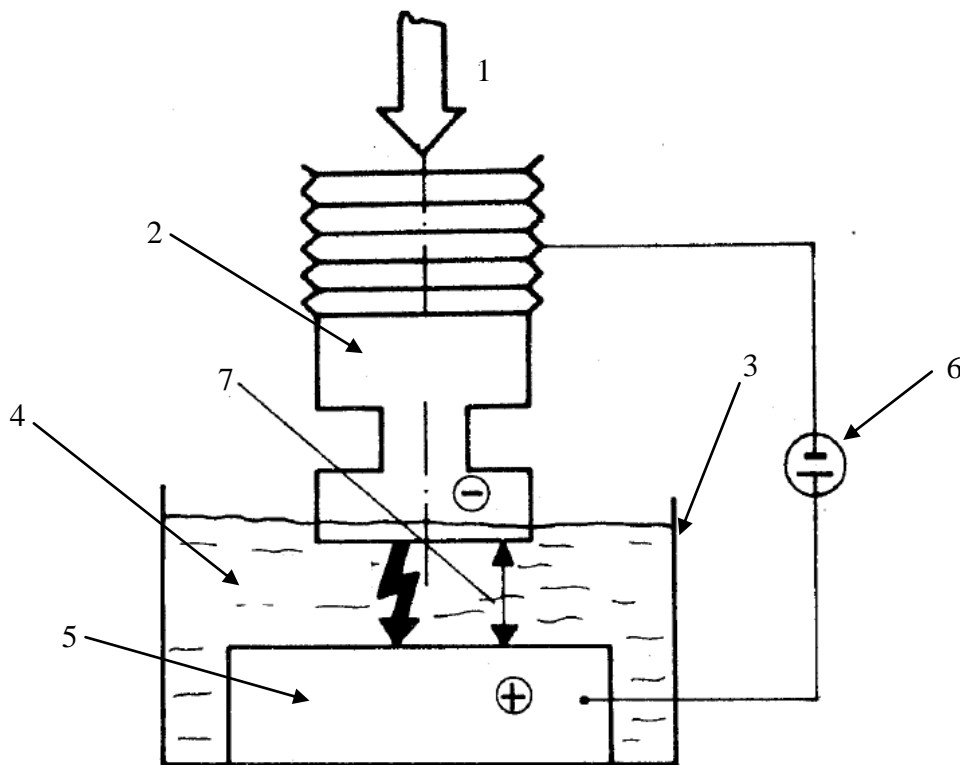
V roce 1770 objevil anglický vědec Joseph Priestley erozivní vliv elektrického výboje a v roce 1943 přišli ruští vědci B. R. Lazarenko a N. I. Lazarenko během provedených výzkumů na nápad tento erozivní vliv využít k opracování kovových materiálů. Tomuto opracování říkali jiskrová eroze, protože mezi dvěma vodiči, které byly ponořeny v nevodivé dielektrické kapalině, přeskakovala série jisker. První stroj pro elektroerozivní obrábění byl představen v roce 1955 a v roce 1969 byla vyvinuta a představena první elektroerozivní drátová řezačka řízena NC řídicím systémem.

K dosažení velmi přesných rozměrů se používají nekonvenční metody obrábění, které jsou časově náročnější než konvenční metody obrábění, ale výsledná přesnost je až o dva řády přesnější. Elektrojiskrové nebo elektroerozivní obrábění je technologie, při níž se materiál odebrá drobnými elektrickými výboji (jiskrami) mezi obrobkem a elektrodou v kapalném dielektriku. Hlavní výhody spočívají v tom, že lze obrábět i velmi tvrdé materiály, mezi nástrojem a obrobkem nepůsobí mechanické síly a stroje se velmi snadno řídí počítačem (CNC). Velkou nevýhodou je pomalý odběr materiálu a energetická náročnost.

Bakalářská práce se zabývá problematikou v oblasti elektroerozivního hloubení. Provedl se rozbor různých metod elektroerozivního obrábění a s ohledem na jejich dosahovanou přesnost a komerčního využití. Cílem této práce je vyhodnotit hlavní fyzikální parametry, které ovlivňují průběh pulzů napětí při elektroerozivním obrábění a návrh vhodných parametrů k optimalizaci při elektroerozivním obrábění na elektroerozivní hloubičce Sodick AP1L.

2. Elektroerozivní obrábění

Elektroerozivní obrábění je technologie, při které dochází k úběru materiálu pomocí elektrického výboje mezi obrobeným materiálem a nástrojem. Celý proces probíhá pod hladinou dielektrika, který slouží k ochlazení a odplavení odebraného materiálu. Na obrobeném povrchu vznikají po sérii elektrických výbojů malé krátery. Jako nástroj při elektroerozivním obrábění je použita elektroda v podobě tenkého drátu, která je ve většině případů připojena na katodu (záporný pól). Při kladné polaritě opotřebení elektrody klesá a při záporné polaritě se opotřebení snižuje při zmenšování doby trvání výboje. Impulzy při elektroerozivním obrábění mají 10 až 300 V při frekvenci 0,2 až 500 kHz. V místě vzniku výboje je koncentrace energie 10^5 až 10^7 W/mm² a vytvoří kráter o velikosti 10^{-3} až 10^{-5} mm³. Výhodou elektroerozivního obrábění je dosahovaná přesnost, kvalita obrobeného povrchu a možnost obrábět i složitější nepravidelné tvary. Mezi obrobkem a nástrojem nepůsobí žádné mechanické síly. Elektroerozivní obrábění dělíme na dvě metody, a to jsou elektroerozivní řezání nebo-li elektroerozivní drátování, elektroerozivní hloubení a elektroerozivní broušení. Každá metoda se liší počátečními technologickými charakteristikami a oblastí průmyslového použití.



Obr. 2.1 - Schéma elektroerozivního obrábění [1]

1 - směr posuvu nástrojové elektrody, 2 - nástrojová elektroda, 3 - pracovní vana,
4 - dielektrikum, 5 - obrobek, 6 - generátor, 7 - pracovní mezera

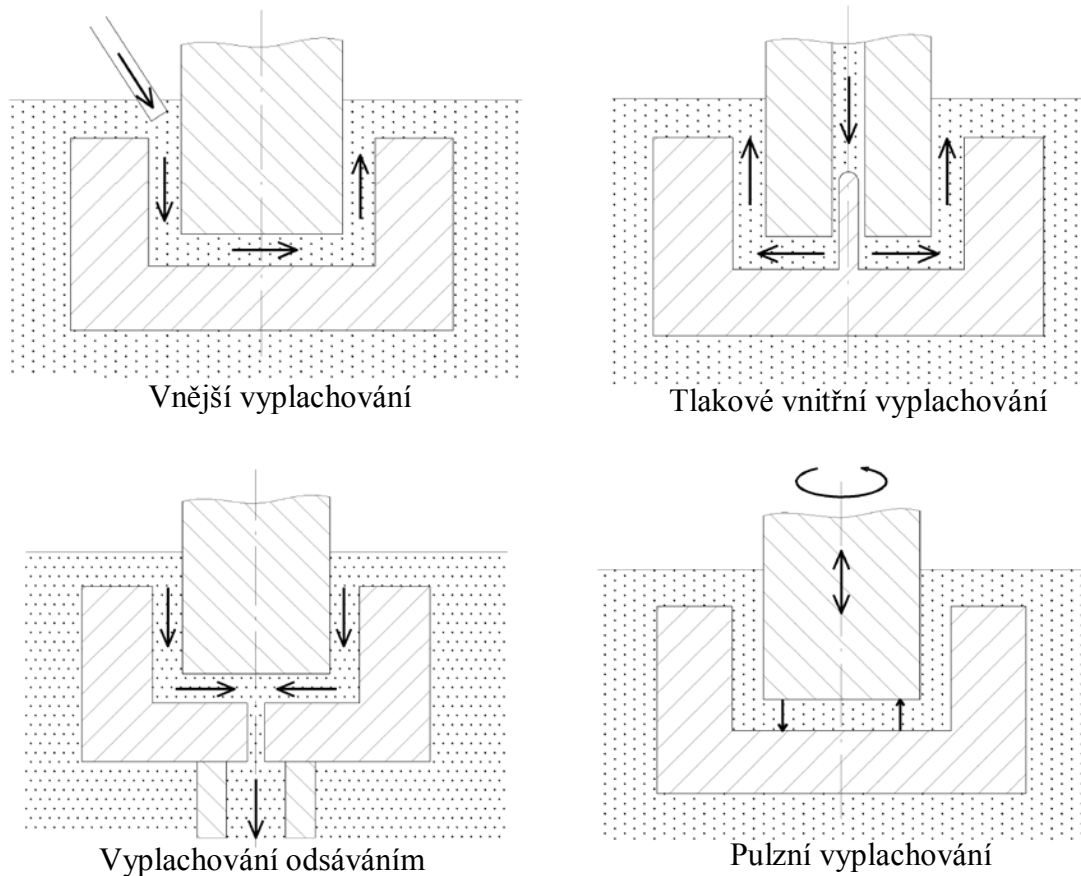
2.1 Dielektrikum

Dielektrikum slouží jako pracovní prostředí pro elektroerozivní obrábění. Je elektricky nevodivé a probíhá v něm výboj mezi elektrodami. Jako dielektrikum se používá petrolej, olej, transformátorový olej, destilovaná voda anebo vzduch. V některých případech se používá i polovodivé prostředí jako jsou solné roztoky, kaolinová emulze a vodní sklo. Vhodnou volbou dielektrika můžeme ovlivnit elektroerozivní obrábění a kvalitu výsledného obrobku. Na dielektrické kapalíně jsou vyžadovány tyto požadavky: [6]

- nízká viskozita a dobrá smáčivost k rychlému obnovení izolace pro výboj
- chemicky neutrální k snížení rizika vzniku koroze
- vysoká teplota hoření k zabránění vzplanutí
- nesmí vznikat jedovaté páry
- musí zabezpečit chlazení elektrod
- musí být lehko vyrobiteľná a nízko nákladová
- musí dobře odplavovat zbytky odebraného materiálu z místa výbojů
- musí zajistit pracovní vzdálenost mezi elektrodou a obrobkem k vzniku výboje

Dielektrikum se přivádí k místu obrábění různými způsoby. Prvním způsobem je vnější vyplachování, které se používá především při obrábění dutin o větší hloubce. Tato metoda je vhodná při použití v kombinaci s pulzním vyplachováním. Pulzní vyplachování je charakterizované přerušením procesu elektroeroze na 0,15 až 10 sekund za oddálení nástrojové elektrody od obrobku o 0,02 až 10 milimetrů. Tímto se nám zvětší vzdálenost mezi obrobkem a elektrodou, aby se mohli dokonale odplavit odebrané kousky materiálů z místa, kde vznikl elektrický výboj. Tato metoda je vhodná pro velmi hluboké dutiny, kde používáme tenké elektrodové drátky a pro obrábění na čisto. V dnešní době se o pulzní vyplachování starají naprogramované moderní CNC stroje. Jako další metodou pro vyplachování je vnitřní tlakové vyplachování. Touto metodou je dielektrikum přiváděno přímo k místu, kde probíhá elektrický výboj. Nástrojová elektroda má otvor pro přívod dielektrika, musíme ale počítat s nižší tvarovou přesností boků obráběné dutiny.

Velmi vysokou přesnost obráběné dutiny nám zajišťuje metoda vyplachování odsáváním. Při této metodě je dielektrikum odsáváno dutinou elektrody nebo obrobku. Nevýhodou zde je vytvoření otvoru do obrobku k odsávání. Poslední metoda je kombinované vyplachování, kde se jedná o vnitřní tlakové vyplachování a zároveň o odsávání dielektrika. Tímto způsobem lze dosáhnout přesné tvary obrobených dutin. Nejčastěji se tato efektivní metoda používá při hloubení složitých až velmi tvarově složitých dutin. [6]



Obr. 2.1.1 - Metody vyplachování

2.2 Nástroje pro elektroerozivní obrábění

Jako nástroje pro elektroerozivní obrábění se používají nástrojové elektrody. Volba elektrody ovlivňuje přesnost tvarů a rozměrů, jakost povrchu obrobku a výkon obrábění. Nástrojové elektrody se vyrábí pro každý případ zvlášť, to nese za následek vyšší cenu konečného výrobku. Náklady na zhotovení elektrody může činit až 50% celkové ceny výrobních nákladů. Nejběžnější materiály pro elektrody jsou elektrolytická měď, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a mědi, mosaz, grafit a kompozice grafitu a mědi.

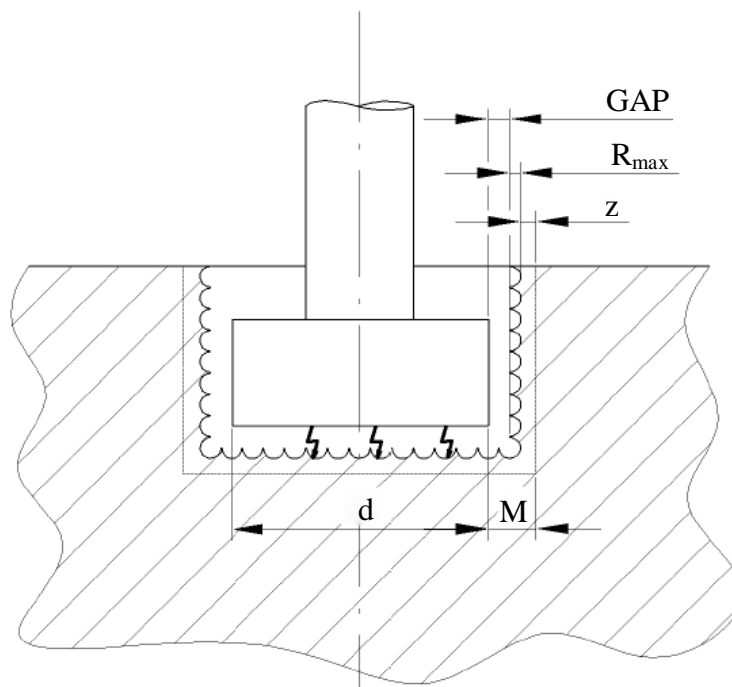
Volba materiálu elektrody závisí na materiálu obrobku, stroji a na relevantním objemovém opotřebení elektrody. Elektrody jsou nejběžněji ve formě drátu, vyskytují se ale i případy, kdy se používá přímo model budoucího výrobku. To je vhodné při elektroerozivním hloubení lisovacích forem. Volba velikosti elektrody závisí na požadovaných rozměrech dutin, velikosti pracovní mezery a drsnosti povrchu po hrubování. V případě, že chceme vyrobit ostré rohy, je důležitá korekce tvaru nástrojové elektrody. [6]

2.3 Určení rozměru elektrody

Hrubováním se snažíme odebrat co nejvíce materiálu za nejkratší dobu a nechává se malý přídavek na dokončovací obrábění na čisto. Rozměr d hrubovací elektrody se vypočítá podle vztahu:

$$d = D - 2 \cdot (GAP + R_{max} + z) = d - 2 \cdot M \quad (2.3.1)$$

Kde D je požadovaný průměr otvoru v dutině a M je minimální hodnota, o kterou musí být nástroj zmenšen k dosažení otvoru o průměru D . GAP udává hodnotu pracovní mezery a závisí na parametrech generátoru zdrojů impulsů a na dielektriku. Tento parametr se určuje z normativ, které jsou dodány přímo od výrobce stroje. Dalším parametrem je R_{max} , který zahrnuje tvarové chyby při hrubování. Důvodem tvarových chyb jsou boční výboje, které vznikají v důsledku opotřebení elektrody a vodivých částic. Z důvodu bočních výbojů dochází k vytvoření kuželových otvorů. Tento nežádoucí jev lze omezit pomocí úpravou tvaru nástrojové elektrody tím, že se vyrobí elektroda s osazením a s použitím vyplachovací metody odsáváním. Parametr z určuje přídavek na tloušťku narušené vrstvy, který má jen význam při velkých energiích výbojů. Tato hodnota se pohybuje v rozměrech od 0,005-0,01 milimetr. [6]

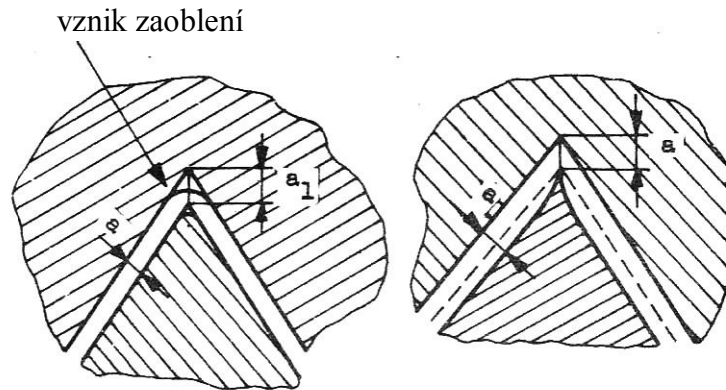


Obr. 2.3.1 - Určení rozměru elektrody

Po dokončení hrubovacího procesu přijde řada na elektroerozivní obrábění na čisto a na volbu nové nástrojové elektrody, která má tvar budoucí dutiny. Při dokončovacích operacích volíme výboje s nízkou energií impulsů. Z tohoto důvodu je parametr R_{max} zanedbatelný a rozměr d elektrody pro obrábění na čisto vypočteme podle vztahu:

$$d = D - 2 \cdot GAP \quad (2.3.2)$$

Kde D je požadovaný průměr otvoru v dutině a GAP je velikost pracovní mezery. Při obrábění na čisto závisí jen na pracovní mezeře, protože jsou tvarové chyby zanedbatelné. K snížení opotřebení nástrojové elektrody při elektroerozivním hloubení koná nástroj translační pohyb, který je řízen pomocí NC nebo CNC systémů. V případě, že bychom hloubili nekruhový otvor s ostrými hranami, nezískáme žádaný profil otvoru. Nástrojová elektroda musí být tvarově upravena, aby nám nevznikly zaoblené hrany v dutině obrobku. Této úpravě se říká korekce tvaru nástrojové elektrody. [1]



Obr. 2.3.2 - Korekce elektrody [1]

2.4 Opotřebení elektrody

Opotřebení elektrody při elektroerozivním obrábění závisí na době působení impulzů a na použitém materiálu elektrody. Jedním důvodem opotřebení elektrody je, když je elektroda pórovitá nebo jsou chyby v struktuře materiálu. Hlavní důvody opotřebení jsou vysoké hustoty elektronů v blízkosti nástroje, kde dochází k oddělování iontů a drobných částí materiálu elektrody. Další vliv na opotřebení má polarita výboje, která rozrušuje povrch nástrojové elektrody. Při vzniku elektrického výboje dochází k ohřevu na velmi vysoké teploty a nerovnoměrný ohřev elektrody, což ovlivňuje životnost zasaženého místa elektrody, dokud se lokálně neodpálí. Další faktory opotřebení jsou mechanické nárazy způsobené kavitací, které vznikají implozí bubliny. Nepříznivé pracovní podmínky, jako je nepříznivé proudění dielektrika a vysoká hustota proudu, hrají důležitou roli v opotřebení nástroje, které dokážeme regulovat z řídicího CNC-stroje.

Nejvíce ovlivněná místa jsou rohy a hrany nástrojové elektrody. Vyjádříme si celkové opotřebení elektrody jako velikost úbytku objemu. Relativní opotřebení je dáno poměrem úbytku objemu elektrody v závislosti k úbytku objemu odebraného materiálu. Opotřebení můžeme vypočítat podle následujících vztahů: [3]

$$o_{rel} = \frac{V_n}{V_m} \cdot 100\% \quad (2.4.1)$$

Výpočet opotřebení hrotu:

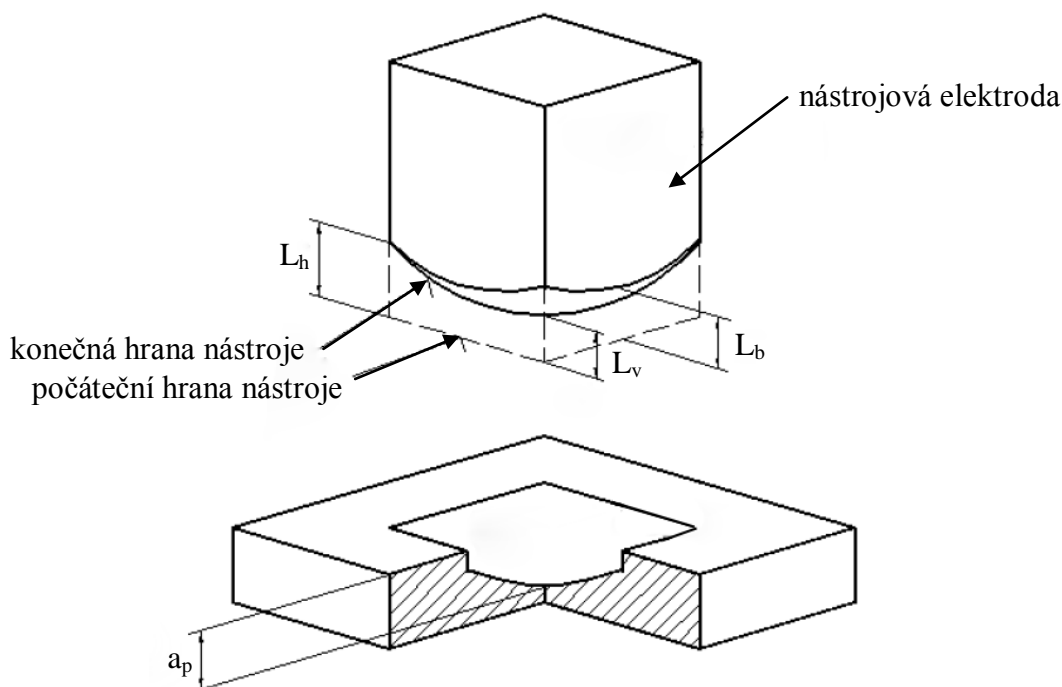
$$\varphi_v = \frac{a_p}{L_v} \quad (2.4.2)$$

Výpočet opotřebení hrany:

$$\varphi_h = \frac{a_p}{L_h} \quad (2.4.3)$$

Výpočet opotřebení boční strany:

$$\varphi_b = \frac{a_p}{L_b} \quad (2.4.4)$$



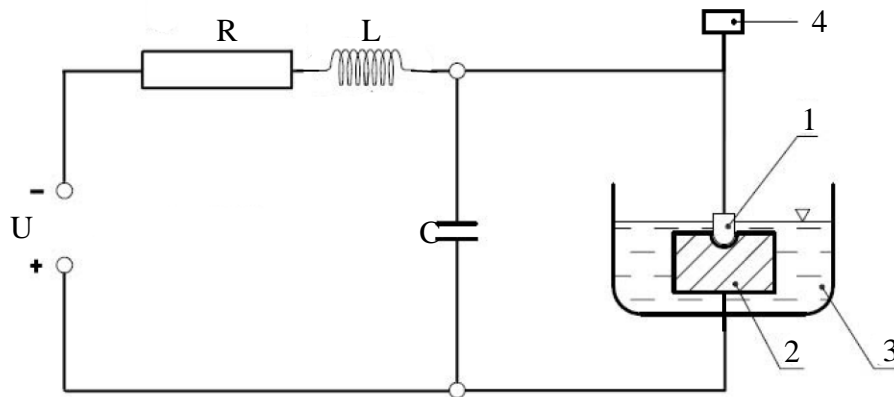
Obr. 2.4.1 - Opotřebení nástrojové elektrody při hrubování čtvercového otvoru [3]

2.5 Zdroj elektrické energie

Zdrojem elektrické energie u elektroerozivního obrábění je generátor, který je jedním z hlavních součástí stroje. Má zásadní vliv na výboje, které ovlivňují kvalitu a přesnost při elektroerozivním obrábění. Vhodným nastavením parametrů lze výrazně ovlivnit celý řezný proces. Změny parametrů se nám projeví na rychlosti, přesnosti a kvalitě obrobené plochy. Generátory dělíme na závislé a nezávislé.

Závislé generátory nebo-li jinými slovy elektrojiskrové relaxační generátory patří k nejstarším generátorům výbojů. Generátor funguje na principu opakovaného nabíjení a vybíjení kondenzátoru ze zdroje se stejnosměrným napětím. Kondenzátor je paralelně

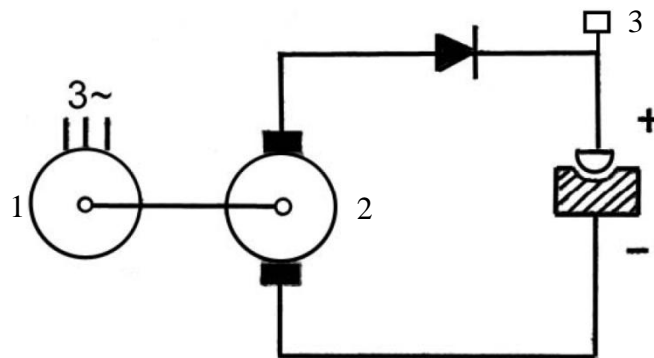
zapojen do obvodu a vybíjení v pracovní mezeře mezi anodou a katodou nastane, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Průrazné napětí je závislé na znečištění dielektrika a na mezielektrodové vzdálenosti. Generátory nazýváme závislými z důvodu závislosti frekvence a energie jednotlivých výbojů na změně poměrů v jiskřišti. Tyto zdroje produkují velmi krátké impulsy ve kterých převládá elektronová vodivost. Abychom zabránili opotřebení nástroje a zvýšili úběr materiálu na obrobku, zapojuje se nástroj na katodu a obrobek na anodu. Změnou odporu se mění nabíjecí proud, které nám umožňuje řízení nabíjení kondenzátoru. [1]



Obr. 2.5.1 - schéma zapojení RC/RLC generátoru [1]

1 - nástrojová elektroda, 2 - obrobek, 3 - dielektrikum, 4 - servomechanismus,
R - odpor [Ω], L - cívka [H], C - kondenzátor [μF]

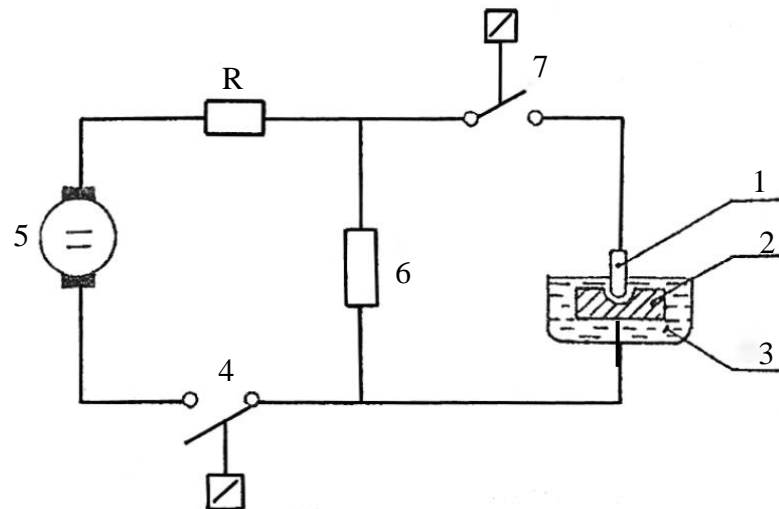
Nezávislé zdroje výbojů nám umožňují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. Hlavním znakem těchto zdrojů je delší doba trvání impulsů, nižší pracovní napětí a ve většině případů opačná polarita výbojů. Je zde převaha iontové vodivosti, to znamená, že je obrobek připojený jako katoda a nástroj jako anoda. Nezávislé generátory se dělí na dva typy, a to jsou rotační a polovodičové. U rotačních generátorů vznikají impulsy roztáčením dynama pomocí asynchronního motoru. Umožňují vysoký úběr materiálu až $5000 \text{ mm}^3/\text{min}$ při stálé frekvenci. Frekvenci je obtížné změnit, protože závisí na otáčkách asynchronního motoru. [1]



Obr. 2.5.2 - Schéma zapojení rotačního generátoru [1]

1 - asynchronní motor, 2 - generátor, 3 - servomechanismus

Nezávislé polovodičové generátory jsou považovány za generátory druhé generace. Umožňují široké nastavení elektrických parametrů. Frekvence elektrických impulsů lze měnit v rozsahu 0,5 až 50 kHz. Tranzistor zapojený do série s jiskřištěm se sepne a na elektrodách vznikne napětí. V případě, že je mezielektroková vzdálenost odpovídající pro průraz, protéká po dobu sepnutí tranzistoru obvodem pracovní proud. V případě, že dojde k uzavření tranzistoru, dojde k přerušení elektrického výboje. Tyto generátory se používají v moderních obráběcích strojích, které jsou řízeny CNC řídicím systémem. [1]



Obr. 2.5.3 - Schéma zapojení polovodičového generátoru [1]

1 - nástrojová elektroda, 2 - obrobek, 3 - dielektrikum, 4 - vypínač sledu impulsů, 5 - stejnosměrný zdroj, 6 - akumulátor energie, 7 - vypínač délky impulsů, R - odpor [Ω]

2.6 Charakteristika výboje

Časový průběh výboje se obvykle určuje z řady charakteristik, jako je doba impulsu, doba pauzy, doba výboje, vybíjecí proud a napětí. K základním fyzikálním charakteristikám umožňujícím popis výboje patří: [1]

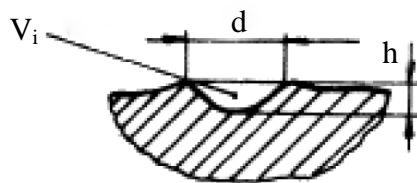
- Doba impulsu t_i , která udává čas mezi zapnutím a vypnutím generátoru a vypočte se podle vztahu: $t_i = t_d - t_e$ (2.6.1)
- Doba pauzy t_o , která udává čas mezi vypnutím a novému zapnutí generátoru
- Doba zpoždění výboje t_d , která udává čas mezi okamžikem zapnutí generátoru a proražení dielektrika
- Doba výboje t_e , která udává čas mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru
- Doba periody T , která udává čas určená dobou impulsu a pauzou, určuje frekvenci výbojů a vypočte se podle vztahu: $T = t_i + t_o$ (2.6.2)
- Napětí na prázdko U_z , které určuje napětí při zapnutí generátoru

- Střední vybíjecí napětí U_e , které udává střední hodnotu napětí mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru
- Napětí U_k , které určuje napětí při zhasnutí výboje a je závislá na ostatních pracovních podmínkách jako je materiál, dielektrikum a jeho stav
- Pracovní proud výboje I , který je maximální vybíjecí proud protékající mezi nástrojem a obrobkem v okamžiku výboje
- Střední vybíjecí proud I_e , který udává střední hodnotu proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru

2.7 Elektrický výboj mezi elektrodou a obrobkem

Vznik elektrického výboje mezi elektrodou a obrobkem se dělí do devíti fází. Tvar kráteru, který vznikne na obrobku po elektrickém výboji, závisí na velikosti vybíjecí energie. Vzniklý kráter závisí na přivedené energii a na době působení. Množství odebraného materiálu lze vypočítat z vybíjecí energie podle vztahu: [3]

$$V_i = K \cdot W_i \quad (2.7.1)$$



Obr. 2.7.1 - Profil kráteru [3]

V_i - objem odebraného materiálu, d - průměr kráteru, h - hloubka kráteru

Kde V_i je objem odebraného materiálu, W_i je energie výboje a K je součinitel úběru, který je pro anodu a katodu různý. Přivedená energie a doba působení má vliv na drsnost opracované plochy, přesnost rozměrů a na účinnosti celého procesu. Energie výboje se vypočítá podle vztahu:

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2.7.2)$$

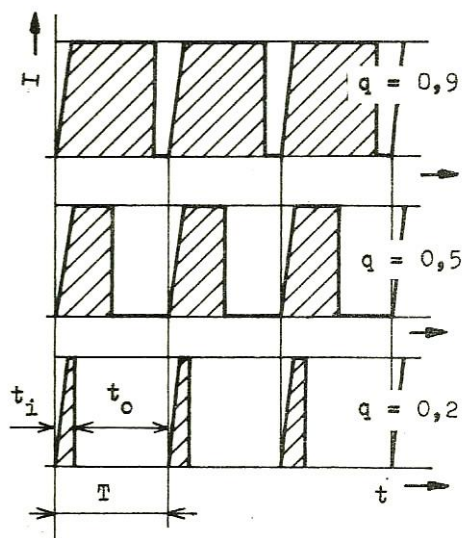
Z rovnice energie výboje vyplývá, že množství odebraného materiálu je úměrné frekvenci, napětí, proudu a době trvání výbojů. Časový průběh výboje má značný význam na intenzitu úběru materiálu a kvalitu obráběné plochy. Z tohoto důvodu je vhodné zavést veličinu, která udává časové využití periody výboje a vypočte se podle vztahu:

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_o} \quad (2.7.3)$$

Tato zavedená veličina je vhodná pro vyjádření číselné hodnoty a k snadnější charakterizaci formy výboje. Její výhoda je názornější pohled na časový průběh výboje oproti parametrům t_i , t_o a T . Tyto časové parametry jsou udávány v mikrosekundách. Z hodnot zavedené veličiny q , která udává časové využití periody výboje, dělíme elektrický výboj na elektrojiskrové výboje a na krátkodobé elektrické oblouky.

Elektrojiskrový výboj je charakterizován krátkou dobou impulsu. Veličina q dosahuje hodnot 0,03 až 0,2 při vysokých frekvencích výbojů. Ve výbojovém kanále převládá elektronová vodivost, která je důvodem vyššímu úbytku materiálu na anodě. V místě výboje je dosahováno vysoké hustoty proudu okolo 10^6 A/mm² a koncentraci energie až 10^7 W/mm². Dosažené teploty se pohybují okolo 10000°C a energie výboje $W_i=10^{-5}$ až 10^{-1} J. Elektrojiskrové výboje jsou vhodné pro dokončovací operace.

V případě, že časové využití periody výboje q se pohybuje v rozmezí od 0,2 až 1, jedná se o krátkodobé elektrické oblouky, které jsou charakterizovány delší dobou působení impulsu na nižší frekvenci výbojů. Ve výbojovém kanále převládá iontová vodivost, uvolňuje se větší množství kladných částic, které způsobí větší tepelný účinek dopadem na elektrodu a tím i úběr elektrody. Proudová hustota je 10^3 A/mm² při teplotách až 3600°C a hodnoty jednotlivých výbojů se pohybují okolo $W_i=10^2$ J. [1]



Obr. 2.7.2 - Vyjádření časového využití výboje [1]

1. fáze

Po přívodu napětí na nástrojovou elektrodu a na obrobek se začne vytvářet elektrické pole. Nástroj a obrobek nejsou dokonale rovné a z toho důvodu se v místě s nejmenší mezerou mezi nástrojem a obrobkem začne vytvářet maximální gradient, kde se začnou shromažďovat drobné vodivé nečistoty obsažené v dielektriku. [2]

2. fáze

Napětí v nástrojové elektrodě dosahuje maximálních hodnot a drobné nečistoty vytvoří můstky, které jsou základem pro vznik výboje. [2]

3. fáze

Na záporně nabitě elektrodě dochází k uvolnění elektronů a v prostoru mezi elektrodami k sražení s neutrálními nečistoty vlivem elektrického pole. Po srážce vznikají kladné a záporné ionty. Tomuto procesu se říká ionizace prostředí. [2]

4. fáze

Střed budoucího výbojového kanálu se začne obalovat ionty. Vlivem tohoto děje začne klesat odpor výbojového kanálu. V prostoru mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem začne růst proudová hustota a vytvoří se vodiví plasmatický obal. Proud na elektrodách roste a napětí klesá. [2]

5. fáze

Dochází k zvýšení teploty, odpařování dielektrika a to způsobuje vznik plynové bubliny. To má za následek uvolnění velkého množství tepelné energie. Proud dosahuje maxima, který protéká výbojovým kanálem a dochází k ustálení napětí na zápalné hodnotě výboje, které je řízeno automatikou, aby výboj nezhasl. [2]

6. fáze

Zvýšení intenzity tavení, vypařování materiálu a expanze bubliny. [2]

7. fáze

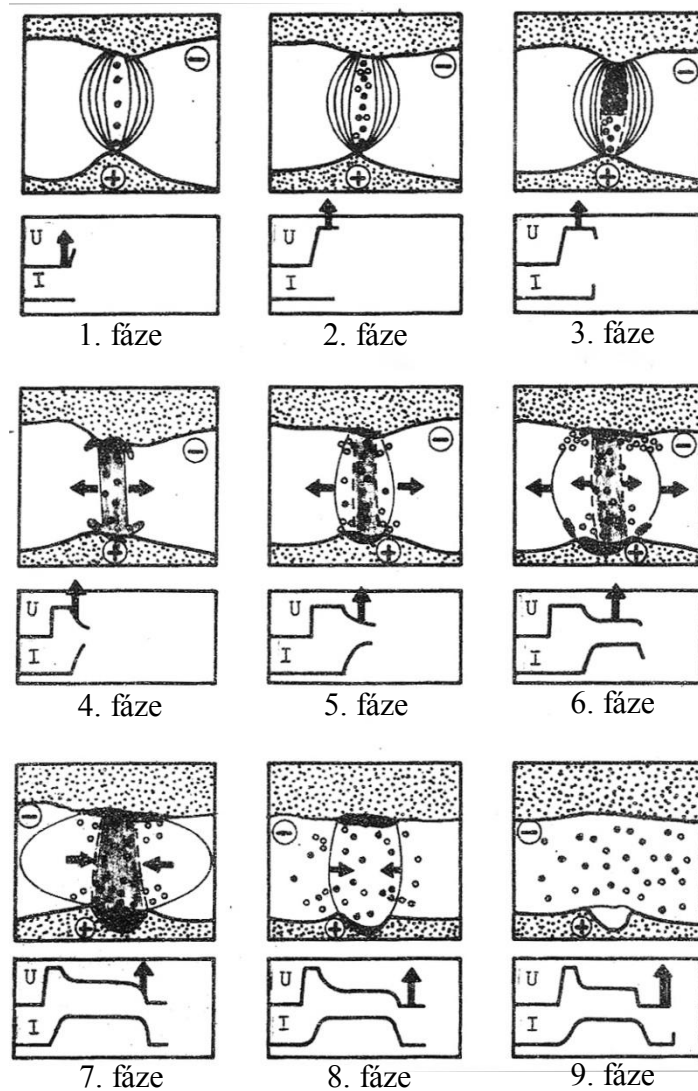
Z důvodu přerušení přívodu elektrické energie a snížení proudu mezi elektrodou a obrobkem dojde k poklesu teploty a zahájí se imploze bubliny. Vlivem sil v plazmatickém poli a snížení tlaků plynů dochází k rozrušení materiálu. Na povrchu materiálu se začne vytrhávat natavený materiál do pracovní mezery a vytvoří se kráter. [2]

8. fáze

Proud a napětí mezi elektrodou a obrobkem klesá na nulové hodnoty. Dochází k zániku bubliny a elektrického výboje. Prostředí je zaplavené dielektrikem a drobné částice odplaveny. Dielektrikum zároveň ochladí vzniklé krátery, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění vrstvy. Zbytky částic a spalin jsou v prostoru eroze ve formě kuliček volně rozptýlené v dielektriku. [2]

9. fáze

Poslední fáze je stav před vznikem nového výboje. V dielektriku jsou nečistoty a zbylé ionty z předchozí eroze, které tvoří základ vzniku nového výboje. [2]



Obr. 2.7.3 - Detail výboje v jednotlivých fázích [1]

2.8 Důvod, proč používat nekonvenční metody obrábění

V dnešní době jsou metody nekonvenčního obrábění využívány v každém průmyslu. Můžeme dosahovat velkých přesností až 0,001 milimetru a drsnost tohoto obrobeného povrchu se pohybuje na úrovni $Ra\ 0,2\ \mu\text{m}$. Z této přesnosti plyne obrábění velmi malých součástek, které mohou mít složité vnitřní a vnější tvary. Další z výhod této metody je obrábění velmi těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou titanové slitiny, kompozitní slitiny, slitiny kovů, kalené ocele, žáruvzdorné ocele a také keramické materiály. Nezáleží na tvrdosti a pevnosti materiálu, důležitou vlastností obrobeného materiálu u elektroerozivního obrábění je elektrická vodivost. Minimální vodivost materiálu by měla být okolo 1 S/cm (Siemens na centimetr). Většina typů strojů jsou CNC-stroje, které jsou plně automatizovaná a řízena programem. [6]

2.9 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění

Největší výhodou při elektroerozivním obrábění je možnost obrábět elektricky vodivé materiály bez ohledu na pevnost, tvrdost a křehkost materiálu. Dále můžeme vyrábět i tvarově složité součástky, díky elektroerozivním obráběním a CNC technologii se snižuje celková pracnost a usnadňuje automatizace procesu. Mezi obrobkem a nástrojem nepůsobí žádné mechanické síly, na obrobek působí pouze upínací síly a kavitační síly výboje. Lze vyrábět otvory se zakřivenou osou a hrany obrobku jsou bez otřepů. Odpad po obrábění nekonvenční metodou je mnohem menší než u metody konvenčního obrábění. Výroba nástrojových elektrod může být relativně jednoduchá.

Nevýhodou této metody odebrání materiálu je nízká produktivita při opracování měkkých materiálů. Abychom mohli zahájit obrábění, musíme celý obrobek ponořit do kapaliny a ne vždy k tomu máme vybavené stroje. Drobné součástky uložíme vždy do většiny strojů, ale manipulace s lisovací formou je už obtížnější. Poslední důležitou nevýhodou je jakost povrchu, která závisí na mnoha faktorech, které nedokážeme předem konkrétně určit.

2.10 Elektroerozivní drátování

2.10.1 Popis metody

Elektroerozivní nebo-li elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou je jedním způsobem nekonvenční metodou obrábění. Jako nástroj je zde použitý tenký měděný drát o průměru 0,1 až 0,3 milimetrů. Drát je veden mezi diamantová vodítka stroje s velmi přesným vedením a napínání je řízeno elektronickým regulačním systémem. Celý mechanismus je uložen ve vodící hlavě, která umožňuje řezat i pod úhlem 45°. Ve většině případů dokážeme řezat materiál o tloušťce 300 milimetrů při použití vodní lázně. Elektrojiskrové drátovačky jsou CNC stroje řízené počítačem. Před zahájením výroby je budoucí výrobek naprogramován podle předloženého výkresu do systému stroje nebo přímo převeden z CAD/CAM systémů. Řídící systém poté vyřeže výrobek podle naprogramovaných křivek. Materiál musí mít předem vyvrtaný otvor, do kterého se navede elektrodový měděný drát. Vyspělejší stroje dokážou navrtat a následně automaticky navést drát do otvoru. [2]

2.10.2 Přesnost elektroerozivního drátování

Přesnost při elektroerozivním drátování je dána napnutím drátu, přesností vedení, použitého dielektrika a na přesnosti pohybu CNC stroje. Zdroj energie nám musí garantovat co nejpřesněji stálý proud a napětí. Jedním z dalších faktorů, které nám ovlivňují přesnost při výrobě, je teplota okolí. Změnou teploty okolí se nám může tvarově a rozměrově měnit obrobek včetně polohy. Může docházet k naklonění do jedné strany. [2]

2.10.3 Stroj pro elektroerozivní drátování

Jako stroj pro elektroerozivní drátování se používá elektroerozivní drátovačka, která se skládá z impulzního generátoru, ovládací konzole, pracovního prostoru, nádrže s dielektrikem, cívku s nástrojovou elektrodou či drátem a zásobníku použitého drátu. Drát

je veden a napnut mezi dvěma kladky a veden skrz obrobek. Stroj dokáže drát natočit i pod úhlem až $\pm 45^\circ$ pro výrobu složitější tvarů a je řízen CNC řídicím programem. [11]

2.10.4 Využití v praxi

Touto metodou se vyrábějí šablony, střížné a lisovací nástroje. Elektrojiskrové drátování se používá i při dělení destiček ze slinutého karbidu, kubického nitridu boru, elektricky vodivé keramického materiálu, titanové slitiny a polykrystalického diamantu. Z důvodu vysoké přesnosti můžeme opracovávat i mikropředměty o velikosti $45 \mu\text{m}$ a dá se využít i pro výrobu mikroelektronických elementů.

2.10.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního drátování

Výhodou je velmi tenký přesný řez závislý na tloušťce elektrodového drátu. Dosahovaná drsnost povrchu se pohybuje okolo $0,8 \mu\text{m}$, poté již není nutnost brousit opracovaný povrch. Nevznikají mechanické síly mezi obrobkem a nástrojem a tím i k velmi nízkému opotřebenému odvíjeného drátu. Můžeme obrábět i velmi těžce obrobitelné materiály, jako jsou slinuté karbidy, titan a kalené nástrojové ocele, důležité je jen, aby měli dobrou elektrickou vodivost.

Nevýhoda této metody je vyvrtání otvoru pro elektrodový drát. Některé dražší stroje zvládnou vyvrtat otvor a poté automaticky navléknout do něj drát. Nemůžeme obrábět slepé díry a dutiny, k tomu je zapotřebí zvolit metodu elektroerozivního hloubení. Řezná rychlost dosahuje jen 500 mm/min .

2.11 Elektroerozivní hloubení

2.11.1 Popis metody

Při elektroerozivním hloubení se materiál odebrává stejně jako u elektroerozivním drátování, elektrickým výbojem. Výboj vzniká v nejužším místě mezi nástrojem a obrobkem. Celý proces probíhá pod hladinou dielektrika, které slouží k izolaci pracovního prostředí, k chlazení a odplavení odebraného materiálu z místa, kde vznikl elektrický výboj. Pracovní napětí je do 50 V a proud od $0,5$ až 320 A . Proudová hustota narůstá až do hodnot 108 A/cm^2 . Dosahovaná rychlost při obrábění je $0,01$ až $0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$ a úběr materiálu 100 až $25000 \text{ mm}^3/\text{min}$. [7]

2.11.2 Přesnost elektroerozivního hloubení

Přesnost při hloubení závisí především i na přesnosti vedení celého stroje. Přesnost při polohování může být v rozmezí $0,12$ až $0,05 \mu\text{m}$. Přesnost při obrábění je potom $\pm 0,01 \mu\text{m}$ a dosažená drsnost povrchu je $R_a=6,3 \mu\text{m}$ při hrubování. Drsnost po hloubení na čisto se pohybuje v rozmezí $0,15$ až $2 \mu\text{m}$. Na přesnosti konečného výrobku závisí i na přesnosti elektrody. Drobné výstupy mění vzdálenost mezi elektrodami, této vzdálenosti se říká GAP. Vzdálenost mezi elektrody je zhruba $0,01$ až $0,8 \text{ mm}$. [7]

2.11.3 Stroj pro elektroerozivní hloubení

Stroj pro elektroerozivní hloubení na první pohled připomíná frézku, která má místo frézy upnutý elektrodový drát. Stroj se skládá z rámu, pracovního stolu, suportu, nádrží s

dielektrickou kapalinou, čerpadla, zásobníkem nástrojových elektrod a generátoru elektrický impulzů.

V rámu stroje jsou uloženy všechny důležité komponenty, jako je suport, pracovní stůl a nádrž s dielektrickou kapalinou. Rám stroje zajišťuje dostatečnou stabilitu, tuhost a přesnost při výrobě. Tuhost se vyžaduje z důvodu působení hydraulických sil od proudění dielektrika mezi elektrodou a obrobkem. [10]

2.11.4 Využití v praxi

Tato metoda se využívá k výrobě zápusťek, střížných a lisovací nástrojů a k výrobě forem nebo jejich prototypů. Pomocí hloubení můžeme dokonce obrábět zlomený vrták nebo závitník uvnitř dutiny obrobku a tím snížit zmetkovitost výroby. [15]

2.11.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního hloubení

I zde stejně jako u metody elektroerozivního drátování je velkou výhodou, že můžeme obrábět materiály libovolné tvrdosti a pevnosti. Opět závisí jen na elektrické vodivosti materiálu. Materiál nemusí být předem provrtaný, elektroda je ve formě tenkého drátu, který se postupně přibližuje k materiálu. Takto dochází k odběru materiálu pomocí elektrického výboje. Nevznikají ani zde mechanické síly mezi nástrojem a obrobkem. Další výhodou je snížení pracnosti při obrábění tvarově složitých ploch. Výroba nástrojových elektrod je jednoduchá, neboť závisí na konkrétním případě. Nástroj může mít tvar budoucího výrobku, v případě že se bude jednat například o výrobu protikusu pro lisování. Pomocí hloubení můžeme vyrábět i slepé otvory a dutiny.

Hlavní nevýhodou je vybavení stroje, protože ne každý stroj má dostatečně velkou pracovní plochu s dielektrikem, kam můžeme umístit i ty největší obrobky. Při elektroerozivním hloubení se dostáváme na nízkou produktivitu při obrábění měkkých materiálů.

2.12 Elektroerozivní broušení

2.12.1 Popis metody

Elektroerozivní broušení pracuje na principu elektroeroze k úběru materiálu. Nástrojová elektroda je rotující kotouč vyrobený z grafitu nebo mosazi. Obrobek je u této metody obrábění zapojený jako anoda, na kladný pól a nástroj na katodu. Celý proces probíhá pod hladinou dielektrika a obrobek se posouvá směrem k rotující nástrojové elektrodě. Pracovní mezera mezi obrobkem a nástrojem je přibližně 0,013 až 0,08 milimetrů. Napětí zde dosahuje hodnot v rozmezí od 30 až 400 V a proud je okolo 100 A. Frekvence impulsů se pohybují v rozsahu od 0,2 až 260 kHz. Kotouč rotuje rychlostí okolo 30 až 180 m/min. [3]

2.12.2 Přesnost elektroerozivního broušení

V běžných podmínkách elektroerozivního broušení se dosahuje drsnosti povrchu okolo Ra 0,25 μm . Touto metodou jsme schopni dosáhnout velmi přesných rozměrů, kde se garantuje tolerance až $\pm 0,001$ milimetru. Úběr materiálu je ve srovnání s jinými metody malý. Množství odebraného materiálu se pohybuje v rozmezí 160 až 2500 mm^3/h . [3]

2.12.3 Stroj pro elektroerozivní broušení

Jako stroj se u této metody používá elektroerozivní bruska, která se skládá z rámu, vany s dielektrikem, z generátoru impulsů, pracovního stolu, nástroje a pohonného mechanismu.

2.12.4 Využití v praxi

Elektroerozivní broušení se používá k dělení velmi tenkých materiálu, kde bychom jinou metodou mohli způsobit deformace obrobku. Dále se tato metoda využívá k broušení velmi křehkých a lámavých materiálů a na výrobu tvarových nástrojů.

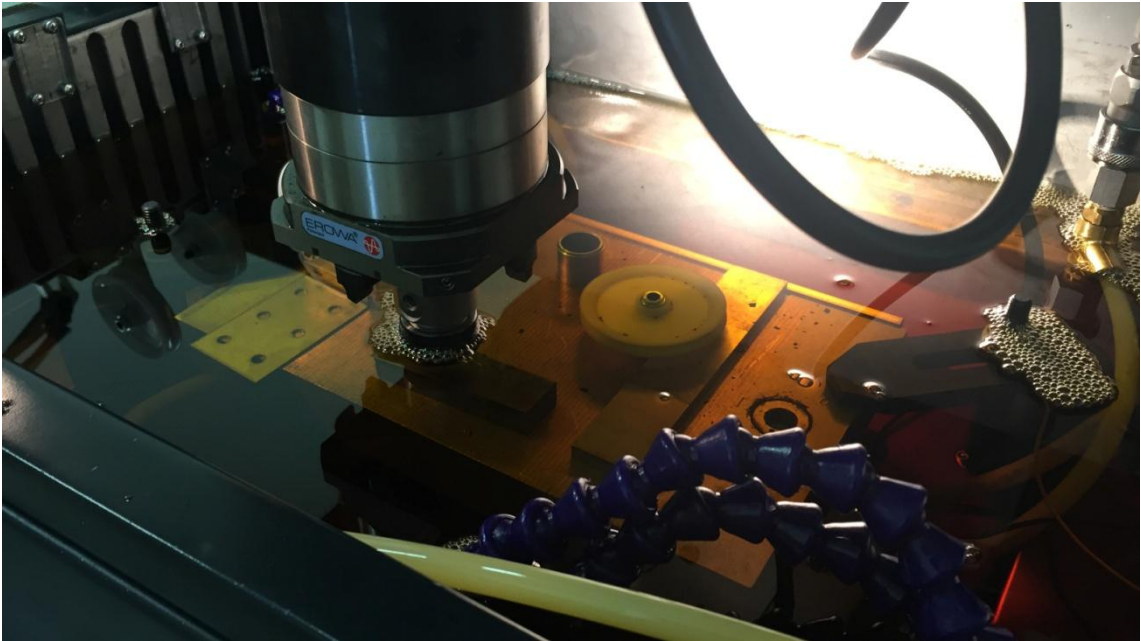
2.12.5 Výhody a nevýhody elektroerozivního broušení

Největší výhodou je dosahovaná přesnost, která se pohybuje řádově na 0,001 milimetrů. Opět nezávisí na tvrdosti, pevnosti a křehkosti materiálu, ale na elektrické vodivosti. Nástrojová elektroda je mnohem levnější než diamantový kotouč, který se používá v jiných metodách obrábění. Snadné orovnění kotouče pomocí orovnávače z rychlořezné oceli.

Nevýhodou je doba trvání při odebrání materiálu z obrobku. Není vhodné brousit obrobky z litiny, protože můžou poškodit grafitový brusný kotouč.

3. Praktická část

Cílem bakalářské práce je změřit průběh impulzů při elektroerozivním obrábění na elektroerozivní hloubičce Sodick AP1L. Poté z naměřených dat vyhodnotit průběh impulzů a porovnat je se vstupními parametry, které byly zvoleny pro první obrábění. Po vyhodnocení dat navrhnou vhodné vstupní parametry a měření zopakujeme, abych mohl vyhodnotit změnu průběhu se změnou vstupních parametrů a určit tak jejich vliv při elektroerozivním obrábění na hloubičce Sodick AP1L. Impulzy napětí budu měřit pomocí počítače, který je vybaven měřicí kartou a připojen pomocí diferenciální sondy ke stroji. Data z měření budu zaznamenávat a analyzovat v programu LabVIEW.



Obr. 3.1 - Elektroerozivní hloubička Sodick AP1L

3.1 Vstupní parametry stroje Sodick AP1L

Parametry, které zadáváme ve stroji se rozdělují do dvou skupin a to jsou vstupní parametry ovládající elektrické a pohybové výstupy. Parametry se zadávají pomocí kódu a skutečné hodnoty parametrů se převádějí pomocí převodních tabulek, které jsou vysvětleny a rozepsány v příloze [1] a jsou převzaty z manuálu ke stroji [5]. Parametry, které můžeme nastavit jsou:

Parametr	Funkce
PL	Polarita
ON	Čas elektrického vybíjení
OFF	Čas zastavení vybíjení
IP	Maximální vybíjecí proud
SV	Napětí serva
S	Rychlost serva
UP	Doba zvednutí nástroje k vyplachování
DN	Doba elektroerozivního obrábění
JS	Rychlost skoku mezi DN a UP
LNS	Předdefinovaný tvar
STEP	Určení velikosti tvaru LNS
V	Hlavní napájecí napětí
HP	Pomocné napájení obvodu
PP	Řízení impulzů
C	Kondenzátor
ALV	Úroveň detekce oblouku
OC	Řízení zapnutí impulzů
LF	Řízení vypnutí impulzů
JM	Trajektorie vyjetí při UP
LS	Rychlost a směr pro LNS
LNM	Zvolení souřadného systému

Tab. 3.1.1 - Vstupní parametry [5]

Polarita (PL)

Tento parametr určuje polaritu elektrody a obrobku. V systému nastavíme polaritu pro elektrodu a opačná polarita se automaticky nastaví pro obrobek.

Čas elektrického vybíjení (ON)

Parametr určuje dobu trvání elektrického výboje a stanoví elektrický vybíjecí impulz řídicího systému. Řízení pulzů typu B jsou určeny pro běžné obrábění a řízení pulzů typu A jsou k dosažení lepšího povrchu nebo k obrábění s trváním pulzů méně než 4 μ sec.

Čas zastavení vybíjení (OFF)

Parametr specifikuje dobu trvání pauzy mezi elektrickým výbojem. Pokud je čas zastavení vybíjení krátký, rychlost obrábění bude rychlá a stabilita při obrábění velmi nestabilní. Naopak když je tento čas nastaven na dlouhou dobu, rychlost obrábění bude pomalé ale stabilní.

Maximální vybíjecí proud (IP)

Parametr určuje maximální proud pro elektroerozivní obrábění. Maximální vybíjecí proud je součet proudu hlavního elektrického proudu a proudu SVC. Tento parametr je důležitý a určuje výkon při obrábění, jako je rychlost obrábění, drsnost povrchu, opotřebením elektrody a mezeru *GAP* v jiskřišti v kombinaci s časem elektrického vybíjení. Vysoké proudy způsobují rychlejší úběr materiálu a kratší čas při obrábění.

Napětí serva (SV)

Tímto parametrem nastavíme referenční napětí, které bude řídit pohyb serva k udržení konstantního napětí v pracovní mezeře *GAP*. Řízení pohybu serva se provádí v souladu s výkyvem napětí v pracovní mezeře *GAP* vzhledem k napětí serva. V případě že je napětí v jiskřišti *GAP* větší než napětí serva, elektroda obrábí. Vysoké hodnoty parametru napětí serva způsobují větší mezeru *GAP* a naopak nízké hodnoty tohoto parametru malé mezery *GAP*.

Rychlost serva (S)

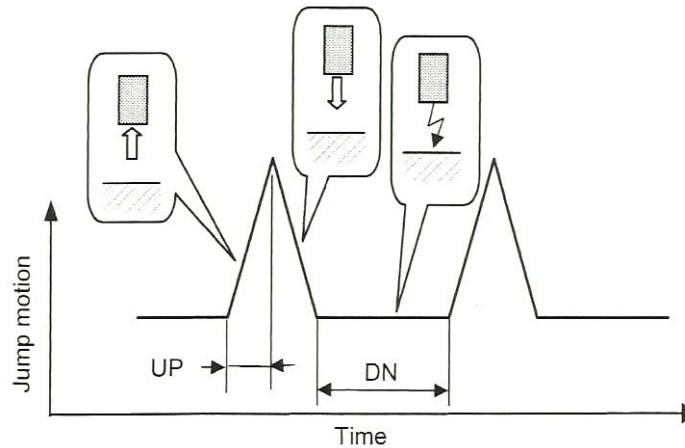
První číslo tohoto parametru udává limitní hodnotu napětí serva a druhé číslo určuje rychlost serva. Při nastavení vyšší limitní hodnoty napětí dosáhneme lepší výsledky při dokončovacích operacích a také pro obrábění větších ploch.

Doba zvednutí nástroje k vyplachování (UP)

Tento parametr specifikuje dobu trvání zvednutí nástroje, aby mohla být propláchnuta pracovní mezera dielektrikem a odplavit částice po výboji. Doba zvednutí nástroje závisí na parametru *JM*, který udává trajektorii při vyjetí elektrody. Doba pro vyjetí elektrody trvá stejnou dobu jako návrat do pracovního prostoru.

Doba elektroerozivního obrábění (DN)

Parametr *DN* určuje dobu trvání elektroerozivního obrábění. Je to doba, kdy elektroda zajede do pracovního prostoru až do doby, kdy se zvedne k vypláchnutí mezery *GAP*. Pro větší plochy se volí vyšší časové hodnoty.



Obr. 3.1.1 - Zobrazení parametru *UP* a *DN* [5]

Rychlost skoku mezi *DN* a *UP* (*JS*)

Zde definujeme rychlost posuvu při skoku nástroje. V případě, že elektroda není dostatečně tuhá, je vhodné volit menší hodnoty rychlostí skoků.

Předefinovaný tvar (*LNS*)

Tento parametr určuje pevně definovaný tvar, úhly a libovolné tvary obrysů. Lze nadefinovat různé prohlubně s libovolným tvarem a rozměrem.

Definování velikosti tvaru (*STEP*)

Parametr *STEP* určuje oběhovou vzdálenost od středu zvoleného tvaru *LNS*. Zadává se do programu stroje v milimetrech.

Hlavní napájecí napětí (*V*)

Tento parametr určuje napětí, které je dodáváno elektrickému vybíjecímu proudu. Hlavní napětí řídí hlavní vybíjecí proud a *SVC* napětí řídí *SVC* vybíjecí proud. Maximální vybíjecí proud je součet hlavního vybíjecího proudu a *SVC* vybíjecího proudu. Parametr hlavního napájecího napětí je závislý na maximálním vybíjecím proudu *IP*.

Pomocné napájení obvodu (*HP*)

Je možné přidat řídicí obvod nebo vysoce napěťové pulzy separátně od *IP* a *V*. Používá se k zlepšení účinnosti elektrického výboje jako doplňkové řízení hlavního napájecího napětí, které je doplněné zvolenou hodnotou pro *SVC*. Při zapnutí synchronizace napětí dosáhneme vyšší stability při dokončovacích operacích a velkoplošném obrábění a pracovní mezera *GAP* může být rozšířena.

Řízení impulsů (PP)

Tento parametr stanoví zapnutí a vypnutí řízení pulzů k snížení opotřebení elektrody a vypne řízení obvodu které zvyšuje efektivitu elektrického vybíjení. Rychlost obrábění se zpomalí a opotřebení elektrody se sníží.

Kondenzátor (C)

Parametr určuje kapacitu kondenzátoru pro pracovní mezeru *GAP*. Používá se pro dokončovací operace a hloubení malých otvorů. Když je kapacita kondenzátoru vysoká, získáme vysokou rychlost obrábění, hrubý povrch a větší opotřebení nástrojové elektrody. Naopak, když zvolíme nízkou kapacitu kondenzátoru, získáme hladký povrch, menší opotřebení elektrody a pomalejší rychlosti při obrábění.

Úroveň detekce oblouku (ALV)

Tímto parametrem specifikujeme úroveň detekce oblouku během obrábění. V případě že nemůže být obrábění zahájeno hladce s připraveným otvorem nebo první zářez s dokončovací elektrodou, je vhodné nastavit tento parametr na hodnotu *0000*. Po zaběhnutí stroje můžeme navrátit původní hodnotu. První a druhá číslice není definována a nepoužívá se pro kódování programovacího jazyka.

Řízení zapnutí impulsů (OC)

Řízení zapnutí impulsů stanoví dobu trvání referenčního impulsu při řízení začátku obrábění. Čím vyšší je nastavena hodnota, tím více se zvedne odpor oblouku. Význam oblouku je platný pouze pro maximální vybíjecí proud *IP* od *0.1* do *7.7* a pro řízení impulsů typu B, který se nastaví v parametru *ON*.

Řízení vypnutí impulsů (LF)

Tento parametr určuje prodloužení doby trvání vypnutí pulzu a provozní parametry serva. Čím vyšší je hodnota tohoto parametru, tím více se zvýší odpor oblouku.

Trajektorie výjezdu při vyplachování (JM)

Pomocí tohoto parametru definujeme dráhu zvednutí nástrojové elektrody z pracovní mezery *GAP*, aby pracovní prostředí mohlo být propláchnuto dielektrikem a odvedlo nečistoty a zbytky po výboji z místa obrábění.

Rychlost a směr pro hloubení tvaru (LS)

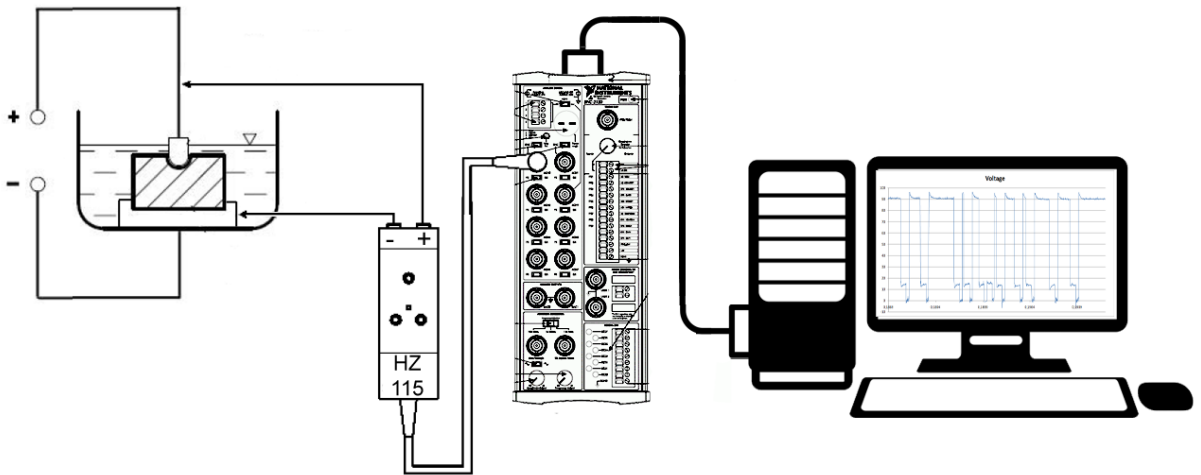
Při nastavování rychlosti a směru hloubení tvaru musíme dbát na následky, které se s tímto parametrem spojují. Při vysokých rychlostech můžou nastat vibrace a výsledkem je nestabilní obrábění.

Zvolení souřadného systému (LNM)

Tento parametr udává souřadný systém, ve kterém budeme obrábět a způsob posuvů, jakými se má elektroda pohybovat.

4. Příprava k měření

Před zahájením měření je nutné připevnit k elektroerozivní hloubičce firmy Sodick potřebné měniče napětí a propojit je s počítačem, který je vybaven měřicí kartou. Měli jsme k dispozici diferenciální sondu Hameg HZ 115, která sníží napětí v poměru 100:1 anebo 1000:1 a maximální vstupní napětí do sondy je 1500 V. Maximální napětí v elektroerozivní hloubičce je 300 V, po průchodu diferenciální sondou jsme takto získali napětí o velikosti maximálně 3V, které jsme mohli přímo měřit přes měřicí kartu počítače. Kladný vstupní kabel jsme připojili na nástrojovou elektrodu, protože byla nastavena kladná polarita nástrojové elektrody. Záporný vstupní kabel byl připojen na magnetický stůl stroje kde byla i zároveň záporná polarita. Ze sondy vede kabel s BNC konektorem, který jsme připojili do vstupního portu periferie National Instruments BNC 2120. Periferie zpracovává vstupní signál a následně přeposílá do měřicí karty počítače, který zobrazuje aktuální průběh a ukládá naměřená data do souboru.



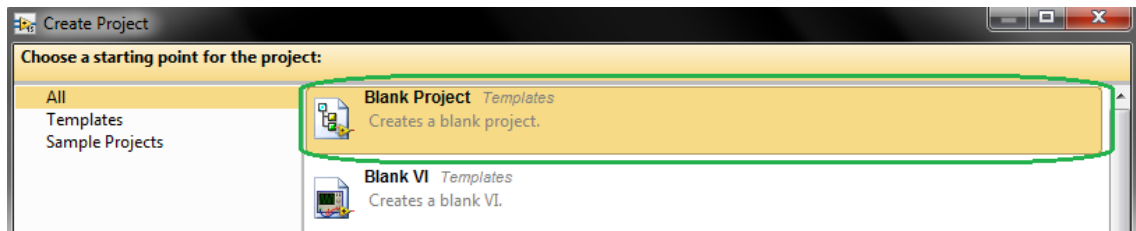
Obr. 4.1 - Schéma propojení

4.1 Program LabVIEW 2014

LabVIEW je moderní grafické programovací prostředí, které slouží k vytváření měřících a diagnostických programů ve formě blokových diagramů. Program má velkou sbírku knihoven, ze kterých je možné brát bloky k analýze měřených dat. Při měření impulzů signálu z elektroerozivní hloubičky jsme použili počítač vybavený PCI měřicí kartou National Instruments a periferie BNC 2120.

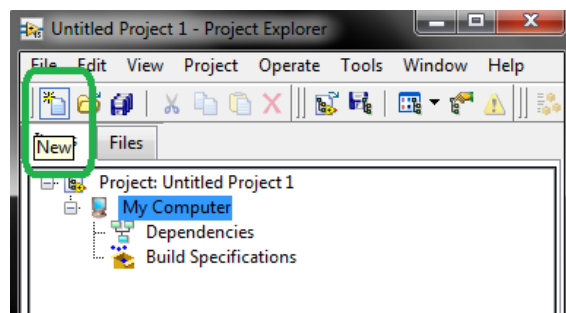
4.2 Příprava měřícího programu

Po spuštění programu LabVIEW klikneme na tlačítko *vytvořit nový projekt*. Načte se nám tabulka s již vytvořenými projekty na ukázkou od National Instruments a s nabídkou *prázdný projekt*. Vybereme si *prázdný projekt* a klikneme na tlačítko *konec*.



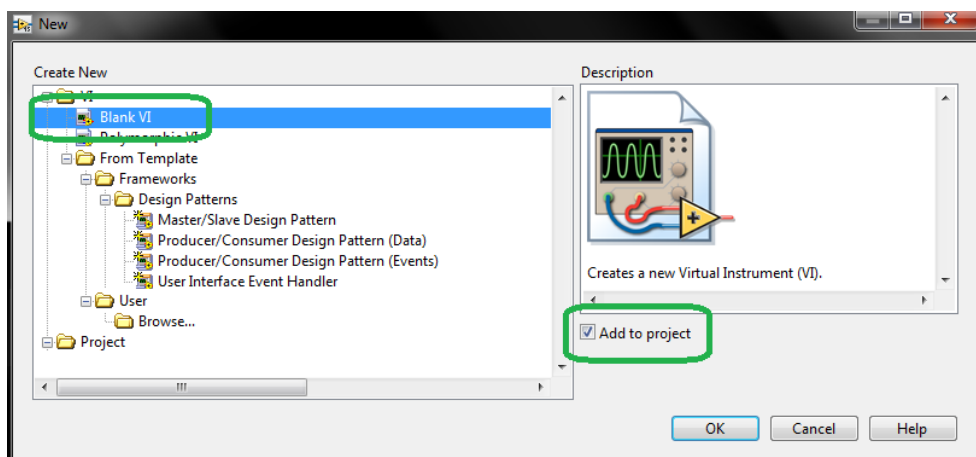
Obr. 4.2.1 - Výběr prázdného projektu

Po vytvoření nového projektu, vložíme nový virtuální nástroj. Najedeme na lištu a klikneme na ikonku *nový*.



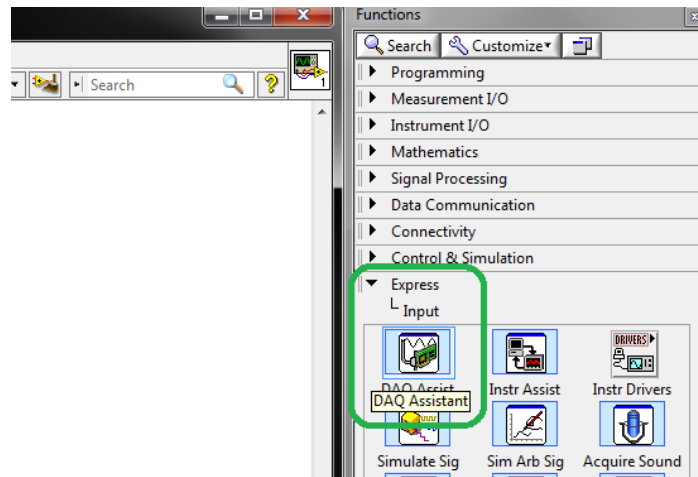
Obr. 4.2.2 - Vytvoření nového virtuálního nástroje

Nyní máme k dispozici různé již předem nakonfigurované virtuální nástroje pro náš projekt. Jsou zde předpřipravené programy k načtení souborů a následnému zobrazení na virtuální obrazovce osciloskopu, nástroje ke generování pulzů a signálů a mnohem víc. My si zvolíme opět *prázdný virtuální nástroj*, zaškrtneme políčko *přidat do projektu* a potvrdíme tlačítkem *OK*.



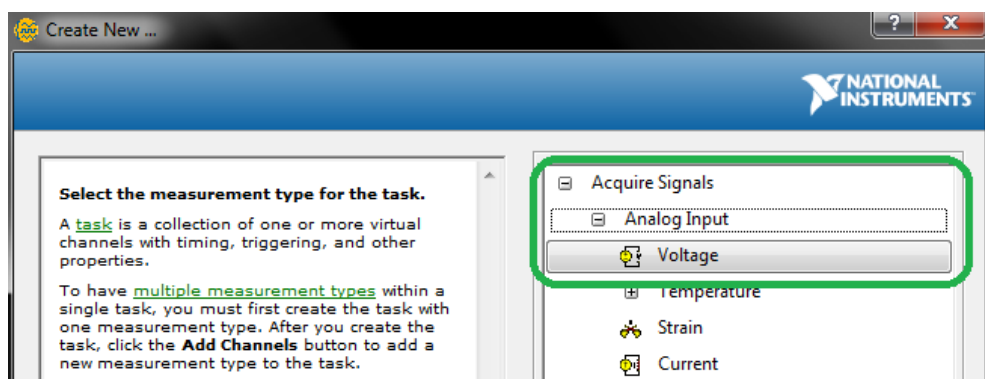
Obr. 4.2.3 - Výběr prázdného virtuálního nástroje

Vytvořili se nám dvě okna, jeden slouží k vytvoření blokového diagramu a druhý okno je uživatelský panel, kde si uživatel může nastavit vstup signálu, zapnout ukládání souborů a všechny funkce, které nadefinujeme. Měřící program, který nám bude zobrazovat průběh a zároveň i ukládat data na pevný disk počítače, si vytvoříme pomocí *DAQ Assist*, který najdeme v expresním balíčku knihovny v záložce *vstup*. Ikonku jednoduše přesuneme z panelu knihoven do okna blokového diagramu. Tento asistent má velkou výhodu že je snadno programovatelný, bez větších znalostí v programování blokových diagramů.



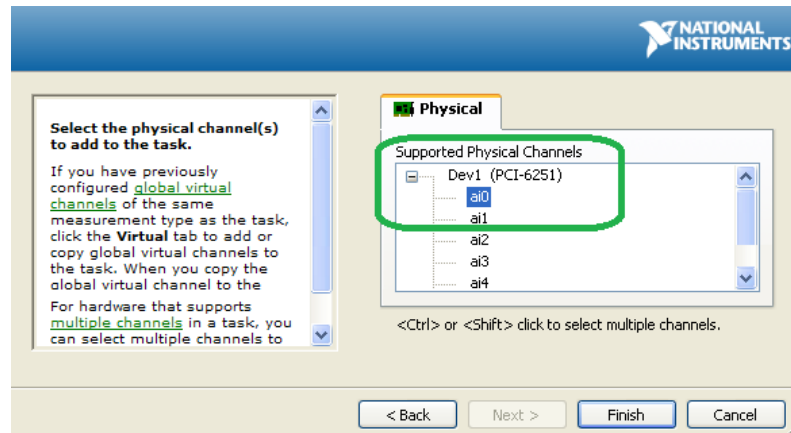
Obr. 4.2.4 - Blok DAQ Assist

Po přetažení ikonky *DAQ Assist* do okna blokového diagramu se nám automaticky načte asistent nastavení našich požadavků. Zde si vybereme, co přesně chceme měřit. V našem případě to je napětí elektroerozivní hloubičky. Vybereme položku napětí v analogovém vstupu a klikneme na tlačítko *další*.



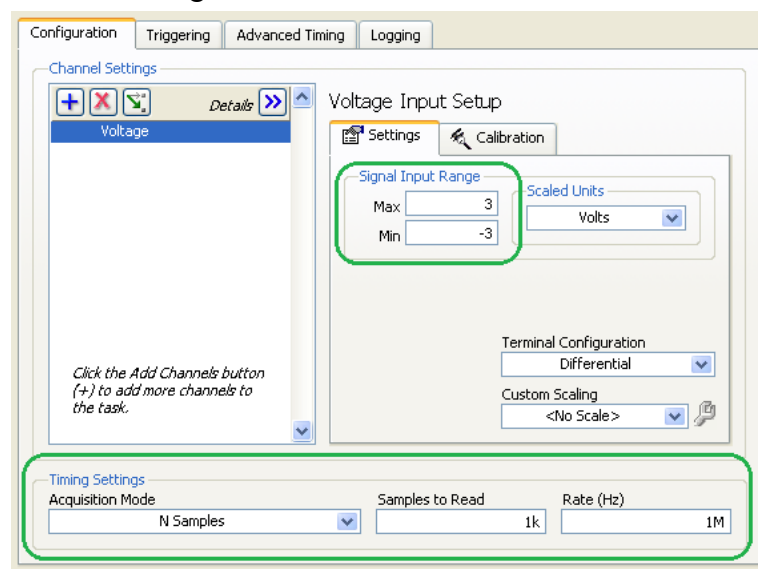
Obr. 4.2.5 - Výběr měřené veličiny

Nyní si nadefinujeme vstupní porty a jednotlivé kanály, které budeme používat. Při tomto měření nám vystačí jeden vstupní port na který přivedeme snížené napětí z diferenciální sondy. Označíme si zvolený port, v našem případě jsem si zvolil port *ai0* a poté stiskneme tlačítko *další*.



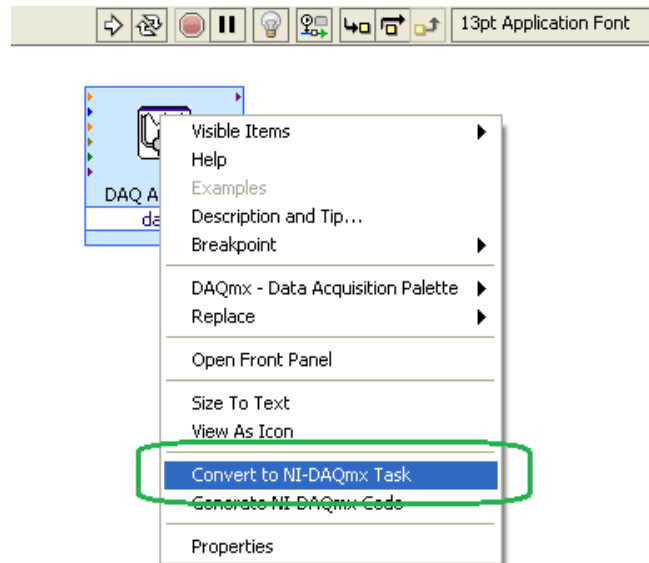
Obr. 4.2.6 - Výběr vstupního portu

V dalším dialogovém okně si nastavím maximální hodnoty pro vertikální osu Y, která nám bude zobrazovat napětí generované strojem. Stroj nám generuje maximálně 300 V a diferenciální sonda má dělicí poměr 1000:1 a 100:1. Z toho vyplývá, že na ose Y bude maximálně +3 V a minimálně -3 V při zvoleném dělicím poměrem 100:1. Mód získávání vzorků nastavíme na *N vzorků* a počet vzorků, který má program uložit, nastavíme na 1000. Program poté po jednom cyklu uloží 1000 naměřených hodnot do souboru. Frekvenci vzorkování nastavíme na 1 MHz, což je nejvyšší možná frekvence periferie National Instruments BNC-2120 a k analýze impulzů během elektroerozivního obrábění dostačující. Po nastavení těchto parametrů stiskneme tlačítko *konec* a vrátíme se automaticky do blokového diagramu.



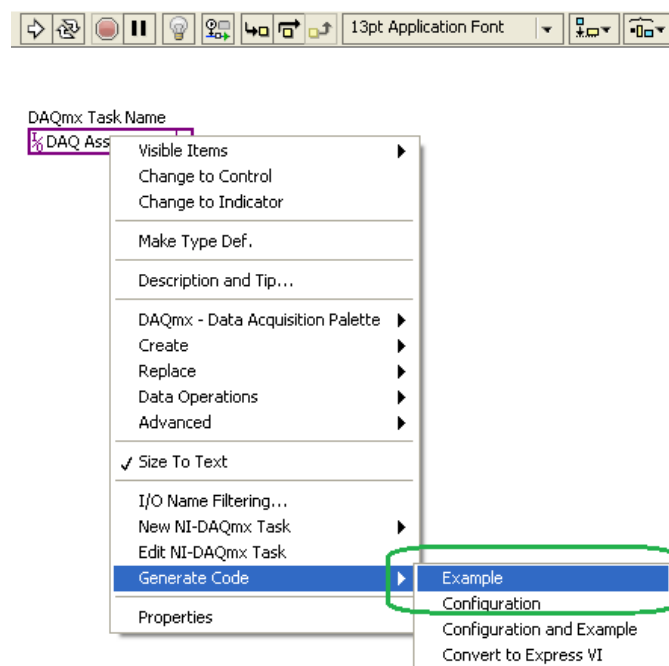
Obr. 4.2.7 - Nastavení parametrů

Z nově vytvořeného bloku *DAQ Assist* nyní vytvořím blokový diagram pomocí nástrojů virtuální laboratoře LabVIEW. Klikneme pravým tlačítkem myši na blok *DAQ Assist* a z nabídky vybereme *Převod do NI-DAQmx úlohy*.



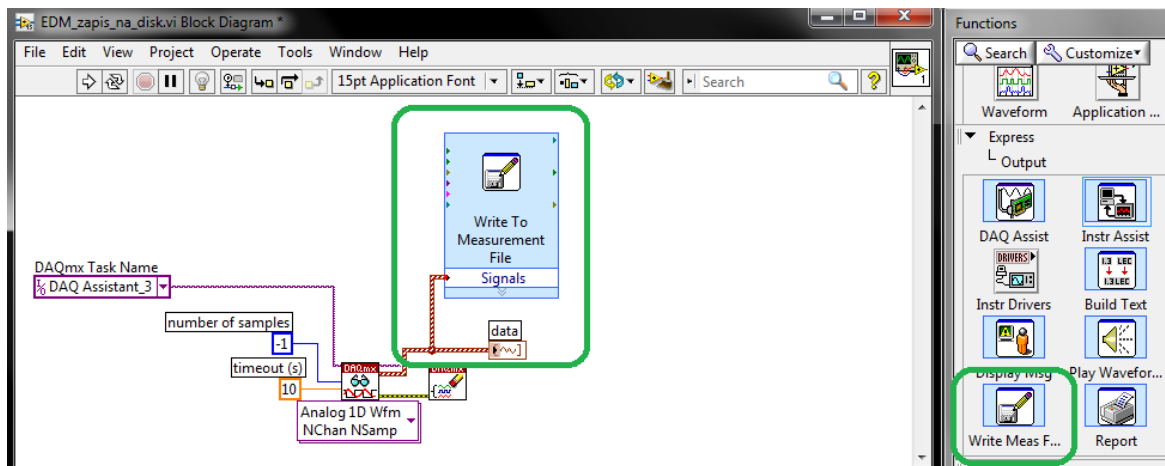
Obr. 4.2.8 - Převod do NI-DAQmx úlohy

Z nově vytvořeného bloku nyní vygenerujeme celý blokový diagram. Opět klikneme pravým tlačítkem myši na blok a z nabídek vybereme *generovat kód* a poté na *vzor*.



Obr. 4.2.9 - Generování blokového diagramu

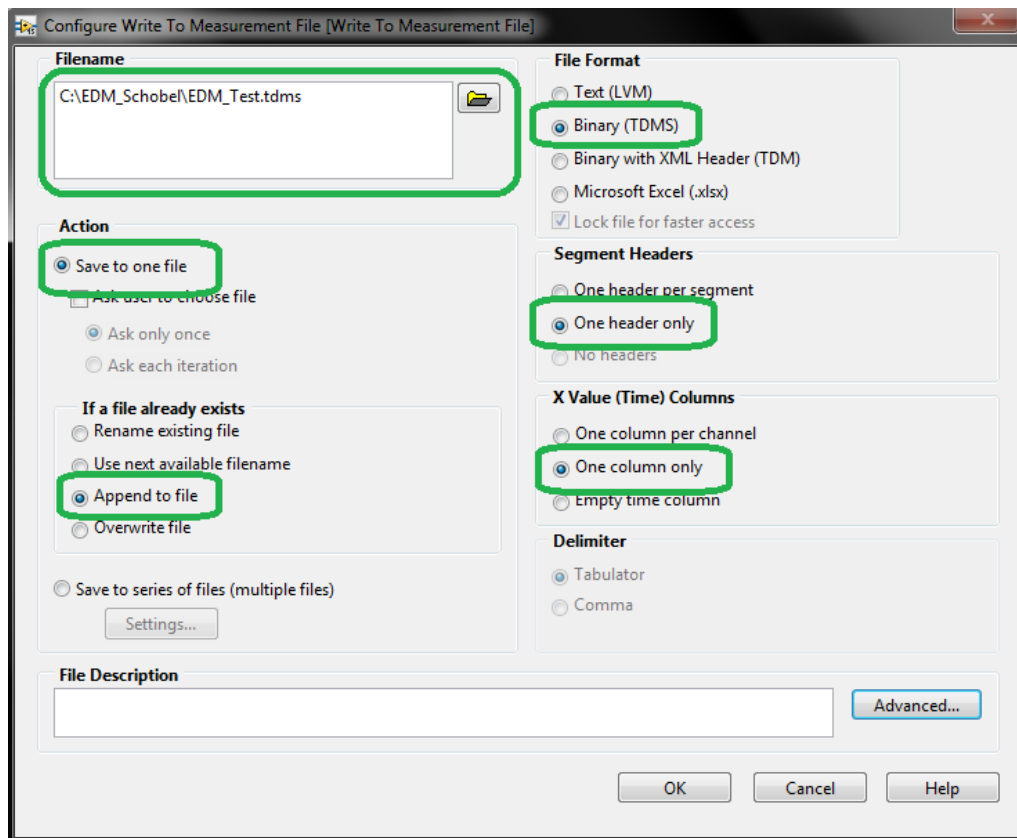
Teď je celý blokový diagram pro měření impulzů z měřicí karty hotový. Aby program ale dokázal i data ukládat, doplníme tento blokový diagram o jeden blok z expresní nabídky. Jedná se o blok *zápis do souboru měření*, který najdeme v expresním balíčku knihovny v záložce *výstup*. Tento blok přesuneme do okna blokového diagramu a propojíme vstup s názvem *signál* s virtuálním vodičem *data*.



Obr. 4.2.10 - Blok pro zápis dat do souboru

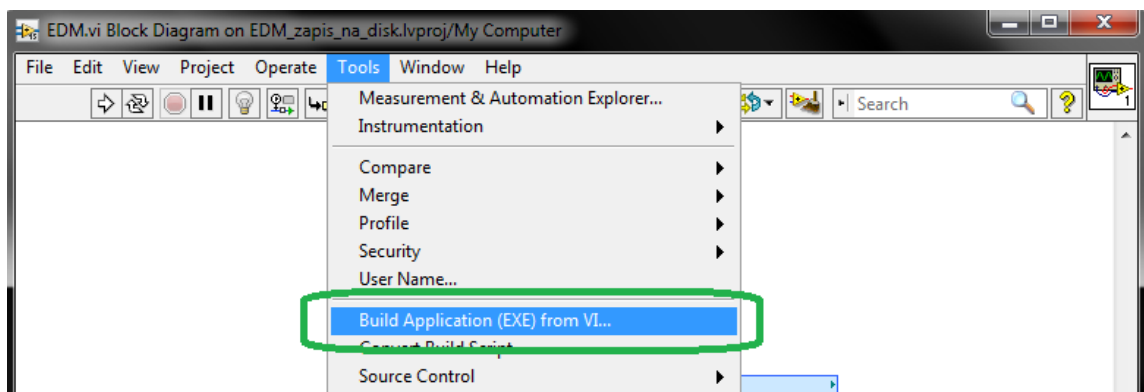
Zbývá nám nyní správně nastavit blok k ukládání dat do souboru. Klikneme dvakrát na tento blok a zobrazí se dialogové okno. V prvním okně si nastavíme cílovou složku, do které chceme soubor ukládat. V nastavení akcí zvolíme, aby program ukládal naměřená data do jednoho souboru. Pokud soubor již existuje, nastavíme aby program další data připnul na konec souboru se stejným názvem. Jestliže program běží v nekonečné smyčce, ukládá data automaticky do jednoho souboru. V případě, že běží jen po dobu počtu zvolených vzorků v předchozím nastavení, uloží naměřená data do souboru a oddělí je hlavičkou, aby se jednotlivé měření rozeznala.

Jako výstupní formát souborů doporučuji zvolit binární s koncovkou *TDMS*. Tento formát je kompatibilní s Microsoft Excel a také ho lze zpětně přehrát jako simulaci v LabVIEW. V části segmentu hlavičky zaškrtneme *pouze jedna hlavička*. To nám vytvoří vždy pro jedno měření právě jednu hlavičku, a je jedno, kolik se načte vzorků během celého měření. Poslední část dialogového okna se zabývá vodorovnou osou, na které je vynášen čas. Doporučuji zatrhnout položku *pouze jeden sloupec* a to z důvodu ušetřit výpočetní technice náročnost při zpracování dat. V našem případě pracujeme jen s jedním kanálem, takže to nemá vliv na měření a zpracování dat. V případě, že by se měřilo více kanálů najednou, je čas pro všechny kanály stejný a je nevhodné je ukládat víckrát do stejného souboru. To by mohlo způsobit větší velikost souboru s naměřenými daty a výpočetní technika by nemusela být schopna ukládat tak velké množství znaků. Po nastavení potvrdíme změny tlačítkem *OK*.



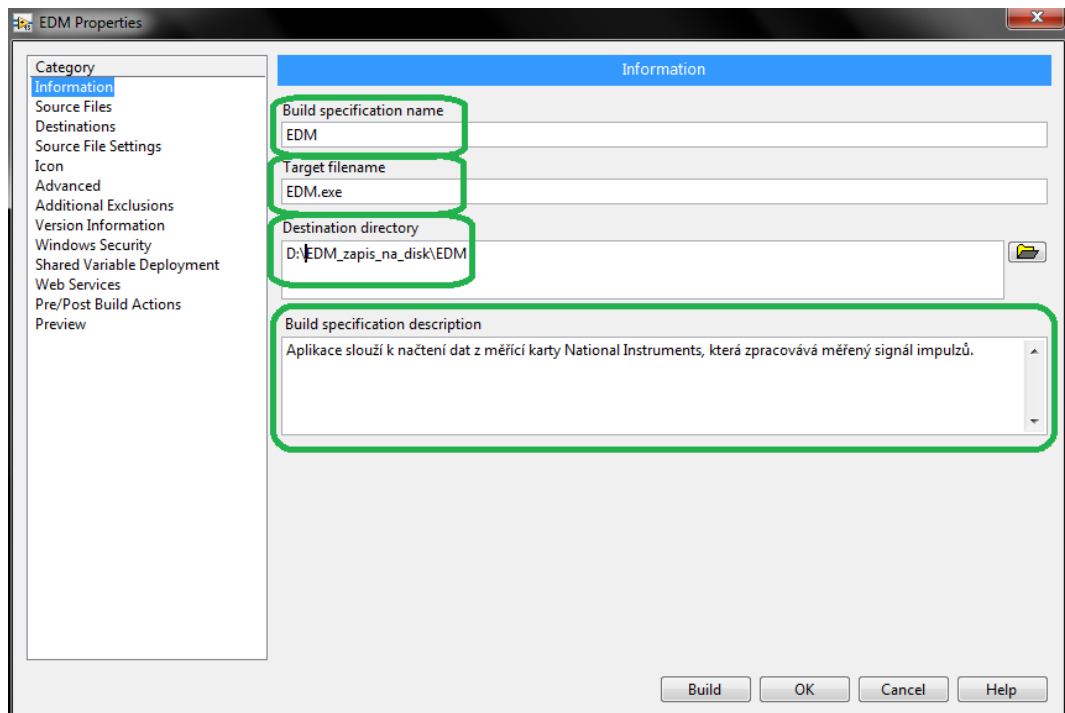
Obr. 4.2.11 - Podrobné nastavení bloku

Hotový projekt uložím jako počítačovou aplikaci, kterou bude možné spouštět bez pomoci programu LabVIEW u konečného uživatele. K tomu najedeme v liště na položku *nástroje* a v ní vybereme *vytvořit aplikaci EXE z VI*.



Obr. 4.2.12 - Vytvoření aplikace

V novém dialogovém okně vyplníme název aplikace, její popis a cílovou adresu, kde si přejeme aplikaci uložit a potvrdíme tlačítkem *vytvořit*. Po načtení všech komponent a následném zkompilování je aplikace připravena k použití.



Obr. 4.2.13 - Vyplnění informací

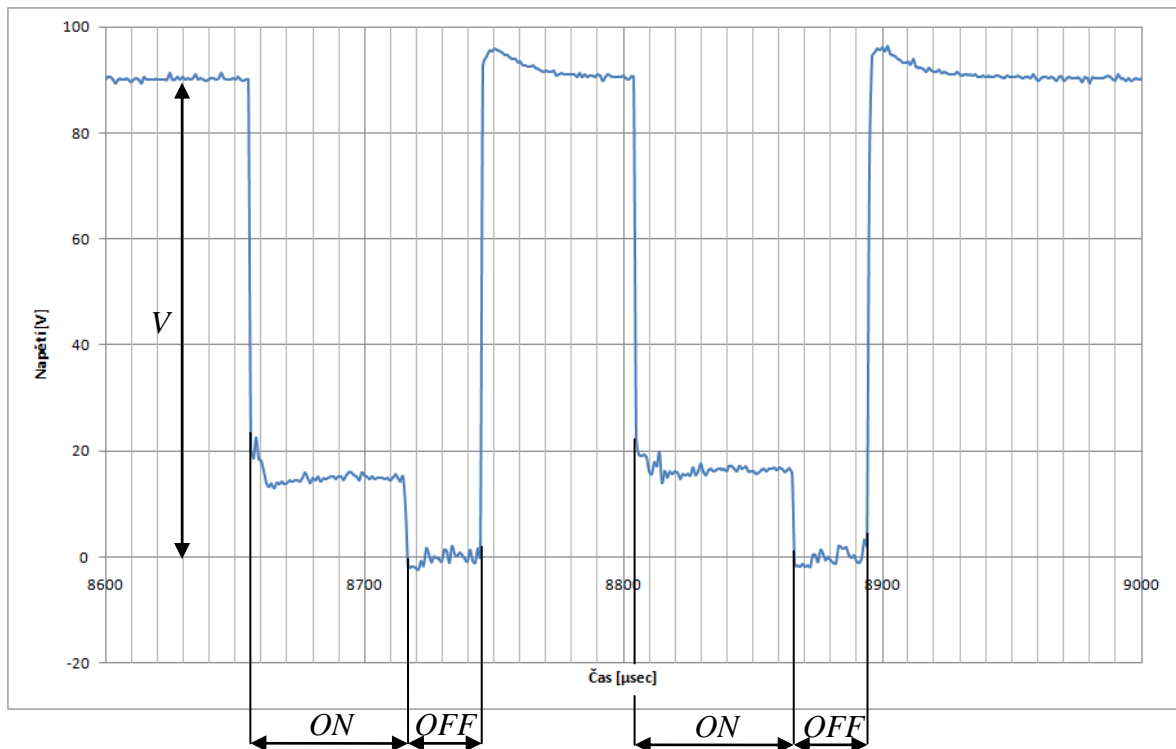
4.3 Měření impulsů a vyhodnocení naměřených hodnot

Po spuštění měření v aplikaci jsme spustili program pro hloubení otvoru o hloubce 0,2 mm ve stroji Sodick AP1L. Z naměřených dat jsem vygeneroval průběh pulzů a vynesl ho do grafu. V grafu jsem označil úseky s parametry, které je řídí. Použité parametry pro první měření jsou uvedené v *Tab. 4.3.1*. V tabulce nejsou vypsány parametry popisující způsob vyjetí elektrody při vyplachování, vyhloubené tvary a parametry určující velikost těchto tvarů.

PL	ON	OFF	IP	SV	S	UP	DN
+	0060	0030	002.4	055	42	015	020
V	HP	PP	C	ALV	OC	LF	JS
11	000	01	0	0010	0000	1602	004

Tab. 4.3.1 - Vstupní parametry pro první měření

V *grafu 4.3.1* je označený parametr *V*, který udává nastavenou hodnotu dodávaného vstupního napětí. Po zvětšení jednotlivých pulzů lze určit parametry *ON* a *OFF*. Tyto parametry definují dobu vlastního obrábění. V tomto časovém intervalu dochází k odebrání materiálu.



Graf 4.3.1 - Vyznačení parametrů v průběhu pulzu

Hloubení otvoru o hloubce 0,2 mm trvalo s takto nastavenými parametry 15 sekund. Tento časový údaj jsem odečetl z monitoru stroje. Úběr nástrojové elektrody byl 0,0074 mm, což je v poměru s vyhloubeným otvorem 3,7%. V grafu je vyznačen parametr *ON*,

který trvá 60 μ sec a *OFF* s délkou trvání 30 μ sec. Po zpětném zobrazení celého průběhu v LabVIEW jsem zjistil, že nastaly chyby při ukládání hromadných dat do souboru a délka trvání se takto dostala na 0,13 sekund. Z tohoto důvodu nejsem schopný vyjádřit počet pulzů mezi jednotlivými operacemi vyplachování a celkový počet pulzů, který stroj vykonal k vyhloubení otvoru. Nedokážu v grafu vyznačit parametry *UP* a *DN*, které udávají dobu trvání, kdy je nástrojová elektroda v pracovním prostředí a kdy je mimo tuto oblast, aby se mohli odplavit zbylé nečistoty po výboji.

4.4 Návrh vstupních parametrů

Podle manuálu ke stroji *Sodick APIL* [5] a z vyčtených informací o průběhu pulzu z předchozího měření jsem sestavil několik vhodných obráběcích podmínek, které by měly snížit opotřebení elektrody a urychlit celý proces obrábění.

První návrh parametrů je uveden v *Tab. 4.4.1*. Nástrojová elektroda má kladnou polaritu, stejně jako v předchozím případě. Parametr *ON* je nastaven na 50 μ sec, *OFF* na 20 μ sec, *UP* na 0,15 sec a *DN* na 0,25 sec, což by mělo zkrátit dobu trvání výplachu a prodloužit dobu, kdy je nástrojová elektroda v pracovním prostoru. Nižší hodnoty parametru *SV* mají zkrátit dobu zpoždění výboje, proto jsem zde navrhl 30 V. *S* udává rychlost serva a zvolená hodnota určuje střední rychlost. *IP* je vybíjecí proud a je nastaven na 4,5 A za předpokladu jemnějších výbojů s menším odběrem materiálu a je závislý na *V*, které je nastaveno na 90 V. Pomocí *OC* by měla být ovlivněna doba trvání elektrického výboje. K odzkoušení jsem v tomto případě zvolil nižší účinnost vstupního parametru. Rychlost při skoku z pracovního prostoru udává *JS* a je nastaven na 4 m/min.

PL	ON	OFF	IP	SV	S	UP	DN
+	0050	0020	001.4	030	45	015	025
V	HP	PP	C	ALV	OC	LF	JS
11	100	10	2	0015	0311	1702	004

Tab. 4.4.1 - První návrh parametrů

Druhý návrh parametrů je uveden v *Tab. 4.4.2*. I zde má nástrojová elektroda kladnou polaritu. Doba trvání *ON* je nastavena na 50 μ sec a doba trvání *OFF* na 20 μ sec. Doba trvání výjezdu elektrody z pracovního prostoru *UP* je nastavena na 0,2 sec a doba *DN*, kdy je elektroda v pracovní mezeře a odebírá materiál, je nastavena na 0,3 sec. Vybíjecí proud *IP* má celkem 9,8 A a napětí *V* je 90 V pro hlavní obvod a 90 V pro náhradní obvod *SVC*. Pomocí uvedeného kódu u parametru *HP* jsem dal stroji pokyn k zapnutí synchronizace napětí a zapnutí dílčích pulzů a nastavil jsem kondenzátor z jemné řady. To by se mělo projevit na výsledném celkovém napětí při obrábění. Parametr *C* představuje kondenzátor, který je nastaven na $470 \times 10^{-6} \mu\text{F}$. Předpokládám lepší průběh při nabíjení na maximální hodnotu napětí. Pomocí *PP* nastavujeme rychlost obrábění a opotřebení nástrojové elektrody. Zde jsem zvolil nižší rychlost a nižší opotřebení a vypnuté

řízení pulzů. *OC* je parametr, který řídí zapnutí impulzu elektrického výboje a stanoví jeho dobu trvání. Zde jsem zvolil kód, který zajišťuje vyšší účinnost tohoto parametru v kombinaci s rychlostí při obrábění.

PL	ON	OFF	IP	SV	S	UP	DN
+	0050	0020	003.2	020	45	020	030
V	HP	PP	C	ALV	OC	LF	JS
11	161	01	3	0020	0411	1803	203

Tab. 4.4.2 - Druhý návrh parametrů

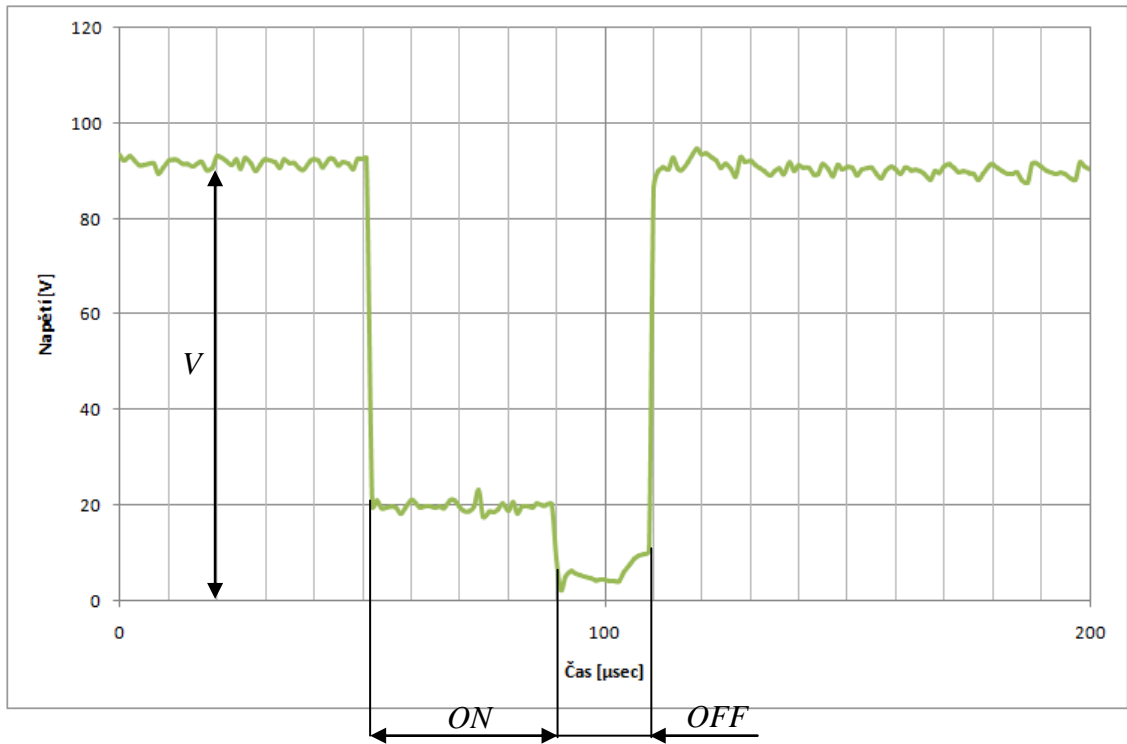
Třetí návrh, který je uveden v *Tab. 4.4.3*, by měl podle zvolených parametrů sloužit k rychlému obrábění a vyšším opotřebením nástrojové elektrody. Doba trvání výboje *ON* je zvolen na 60 μ sec a doba pauzy *OFF* na 30 μ sec. Elektroda se bude nacházet v pracovním prostoru po dobu 0,3 sekund a k výplachu bude mít 0,4 sekund. Vybíjecí proud jsem zvolil vyšší, a to celkem 10 A. Dodávané napětí *V* je 120 V a je doplněno o část napětí z náhradního obvodu *SVC*. Pomocí *HP* jsem zvolil typ kondenzátoru, a to ze standardní řady a povolení k dodání napětí z náhradního obvodu. K lepšímu zobrazení doby nabíjení kondenzátoru jsem zde navrhl kondenzátor s vyšší kapacitou o velikosti 0,047 μ F. Vyšší hodnoty kondenzátoru nám způsobují větší opotřebením nástrojové elektrody a vyšší rychlost při obrábění.

PL	ON	OFF	IP	SV	S	UP	DN
+	0060	0030	002.4	070	42	020	030
V	HP	PP	C	ALV	OC	LF	JS
22	042	01	4	0020	0311	1602	003

Tab. 4.4.3 - Třetí návrh parametrů

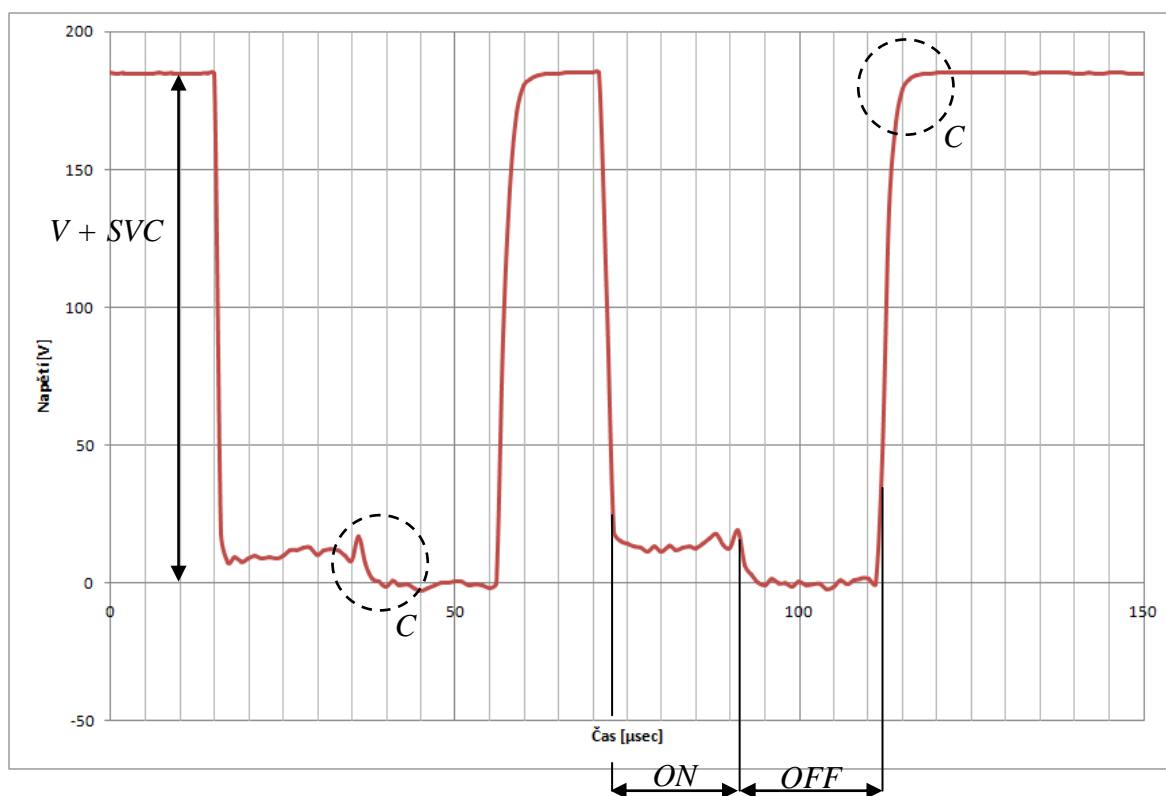
4.5 Vyhodnocení vstupních parametrů

Hloubení otvoru o hloubce 0,2 mm s parametry z *Tab. 4.4.1* trvalo podle údajů z monitoru stroje celkem 11 sekund. Úběr nástrojové elektrody byl 0,004 mm a to je v poměru s vyhloubeným otvorem 2%. Výsledný průběh pulzů je znázorněn v *grafu 4.5.1*, a doplněn o vstupní parametry s vyznačenou oblastí jejího vlivu na průběh pulzu. Změřené maximální napětí odpovídá nastavenému napětí V . Doba trvání pauzy je 20 μsec a i tato hodnota odpovídá. Doba trvání výboje dosahuje 40 μsec , což je méně než bylo nastaveno. To způsobuje parametr OC , který řídí mimo jiné dobu trvání elektrického výboje. Jelikož zde byla nastavena hodnota s nižší efektivitou, zkrátila se nám doba o 10 μsec . Hodnota kondenzátoru byla příliš malá a není v grafu vidět. Z vyskytnutých problémů během ukládání hromadných dat jsem během měření přišel o důležitá data, která by mi pomohla určit počet celkových pulzů a celkovou dobu trvání odebrání materiálu.



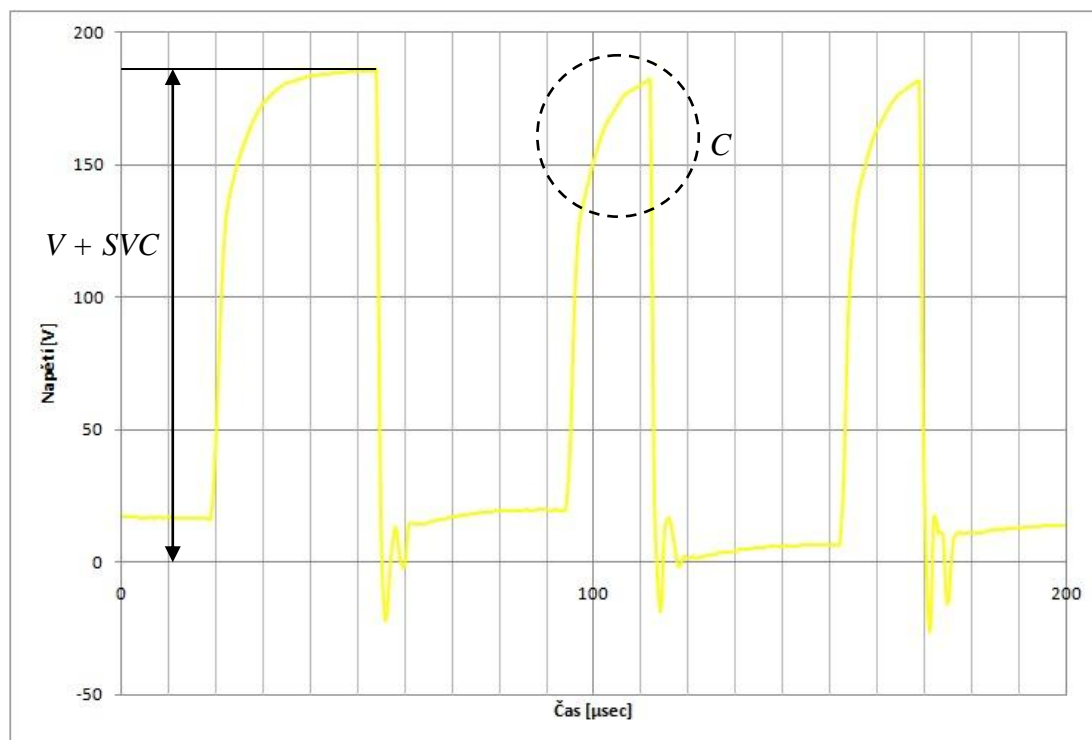
Graf 4.5.1 - Průběh pulzu

Druhý návrh parametrů podle *Tab. 4.4.2* nám přinesl kratší dobu obrábění s dobou trvání 10 sekund při hloubení stejného otvoru o hloubce 0,2 mm. Změřený úběr nástrojové elektrody byl 0,0015 mm. V poměru s vyhloubeným otvorem to je 0,75%. Podle nastaveného parametru *PP* jsme takto získali v porovnání s jinými vstupními parametry nižší opotřebení. Do *grafu 4.5.2* jsem vyznačil známé parametry a jejich vliv na průběh pulzu. Pomocí nastavené hodnoty v *HP* jsme připojili i náhradní obvod *SVC* a dostali se na celkové napětí 180 V. Parametr *OC*, který řídí dobu trvání *ON* se nám projevil ve zkrácení doby trvání výboje z 50 μsec na 20 μsec . Doba pauzy *OFF* není jiným parametrem ovlivněna a trvala podle nastavení 20 μsec . V porovnání s *grafem 4.3.1* je vidět, že se kondenzátor nabíjí a vybíjí, nedochází zde k překmitu napětí nad maximální hodnotu.



Graf 4.5.2 - Průběh pulzu

Hloubení otvoru o hloubce 0,2 mm s parametry z *Tab. 4.4.3* nám přinesl dobu trvání 8 sekund. Úběr nástrojové elektrody byl 0,0155 a v poměru s vyhloubeným otvorem to je úbytek 7,75%. Závisí to na rychlosti, která zde byla zvolena. Těmito parametry jsme získali nejkratší strojní čas, ale nejvyšší úběr elektrody. Vysoká hodnota kondenzátoru způsobila delší čas nabíjení a maximální napětí bylo 180 V. Tato hodnota je součet vstupního napětí o velikosti 120 V a část náhradního napětí SVC o velikosti 60 V.



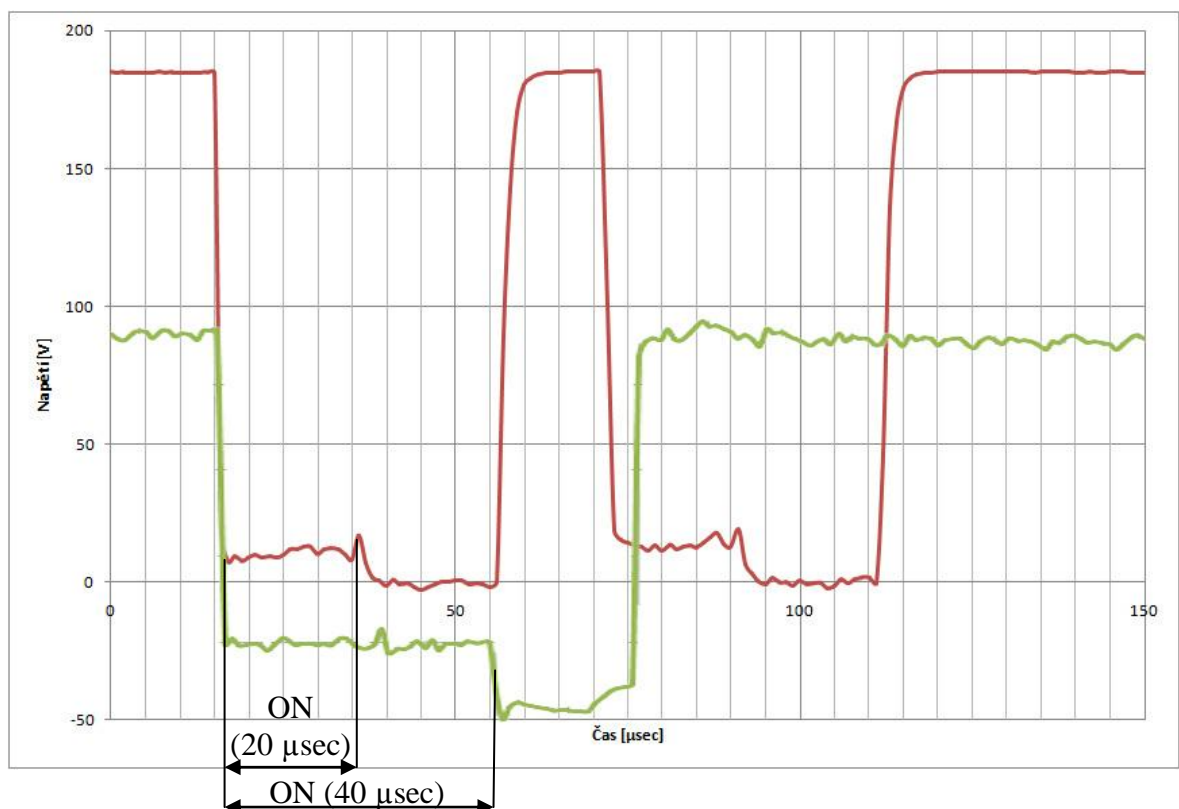
Graf 4.5.3 - Průběh pulzu

4.6 Shrnutí výsledků

Z naměřených hodnot a průběhů pulzů jsem určil vliv jednotlivých parametrů na průběh při elektroerozivním obrábění a vyznačil je do grafů. Průběhy pulzů jsou z velké části podle předpokladů zvolených parametrů.

V *grafu 4.6.1* jsem vynesl dva průběhy, které měly stejně nastavené časové parametry *ON* a *OFF*. Rozdíl v době trvání výboje způsobuje doplňkový parametr *OC*, který řídí dobu trvání výboje. *OC* je v obou případech nastavena na jinou hodnotu, která se nám projeví v délce trvání výboje. Z nastavených 50 μsec se nám zkrátily výboje na 40 μsec a 20 μsec .

Během měření jsem narazil na problém s ukládáním naměřených dat. Tyto data mi chyběly při vyhodnocování délky trvání obrábění s různě nastavenými vstupními parametry a při určení celkového počtu výbojů. Tento problém se nám nepodařil vyřešit a snažil jsem se z naměřených dat dostat co nejvíce užitečných informací. S aktuálním problémem jsem se spojil přímo s firmou National Instruments od které jsme používali měřicí periferii, měřicí PCI kartu a program LabVIEW 2014.



Graf 4.6.1 - Porovnání délky trvání pulzů

5. Závěr

Nekonvenční metody obrábění jsou v dnešní době jedny z nejpřesnějších. Pomocí těchto technologií jsme schopni vyrábět výrobky velmi malých rozměrů s vysokou přesností. Tyto metody odebrání materiálů jsou časově velmi náročné, ale nezáleží nám při tom na pevnosti, tvrdosti a křehkosti materiálu. Hlavní požadavek je elektrická vodivost materiálu.

V teoretické části bakalářské práce jsem podrobně vysvětlil princip elektroerozivního obrábění a jednotlivé metody, jako je elektroerozivní hloubení, drátování a broušení. Dále jsem podrobně vysvětlil průběh elektrického výboje, který nastává mezi nástrojovou elektrodou a obrobek při odebrání materiálu.

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit vliv vstupních parametrů při elektroerozivním obrábění na elektroerozivní hloubičce Sodika AP1L. Z naměřených hodnot jsem získal průběh jednotlivých pulzů, který je zobrazen v *grafu 4.3.1* a z nich jsem určil její vliv při obrábění. Abych si potvrdil změřené údaje a vliv parametrů, navrhl jsem několik různých vstupních parametrů, které jsou uvedené v práci v *Tab. 4.4.1*, *Tab 4.4.2* a *Tab 4.4.3*. Z naměřených dat jsem vyhodnotil její průběh a vliv známých parametrů do nich vyznačil a podrobně rozepsal jejich význam při vyhodnocování výsledků.

Z vytvořených průběhů jednotlivých impulzů je vidět, že doplňkové parametry pro řízení zapnutí impulzu, řízení vypnutí impulzu a kondenzátor ovlivní tvar jednotlivých pulzů. V porovnání *grafu 4.5.2* s *grafem 4.5.3* už není možné rozeznat dobu trvání výboje a dobu pauzy.

Během měření nastaly problémy s ukládáním velkého množství dat, které bylo potřeba k vyhodnocení časových závislostí některých parametrů. Z tohoto důvodu se mi nepodařilo potvrdit časové parametry pro dobu, kdy je nástrojová elektroda v pracovním prostoru a doba, kdy probíhá výplach dielektrikem a odstranění zbytků materiálu po výboji. Dále jsem nemohl určit počet výbojů, které vznikají při různě nastavených parametrech a vypočítat úběr materiálu při jednom výboji v závislosti na velikosti vybíjecího proudu.

Kontaktoval jsem firmu National Instruments od které jsme použili PCI měřící kartu, periférii a software a podrobně oznámil problém, který nastal během měření. Po zjištění příčin problému a jejím následném vyřešení bych měření chtěl zopakovat a potvrdit platnost zbylých časově závislých parametrů.

Použitá literatura

- [1] BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Vydavatelství ČVUT, Praha 1989.
- [2] SADÍLEK, M. Nekonvenční metody obrábění I., Skriptum TU Ostrava, 2009, (ISBN 978-80-248-2107-8)
- [3] MÁŇKOVÁ, I. Progresívne Technológie, Košice, 2000 (ISBN 80-7099-430-4), str. 137-165
- [4] REIM, K. LabVIEW-Kurs: Grundlagen, Aufgaben und Lösungen, Würzburg, 2014 (ISBN 978-3-8343-3294-3)
- [5] Sodick LN2-LQ Machining Manual, Kanagawa, 2007, str. 63-94
- [6] Ing. J. ŘASA, Csc., Nekonvenční metody obrábění MM Průmyslové spektrum 7,8/2007 (ISSN 1212-2572), str. 60-63
- [7] Ing. Z. KEREČANINOVÁ, Elektroerozivní obrábění MM Průmyslové spektrum 10/2007 (ISSN 1212-2572), str. 58-60
- [8] Technický slovník naučný, Praha, 2006 (80-7335-080-7)
- [9] Speciální metody obrábění [online], [vid. 14.6.2016]
Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/Specialni_metody.htm
- [10] Ing. J. ŘASA Csc., Nekonvenční metody obrábění [online], [vid. 10.6.2016]
Dostupné: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [11] V. KLAIN, Sedmiosé drátové řezání [online], [vid. 10.6.2016]
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/sedmiose-dratove-rezani.html>
- [12] D. MING, Influence of Electrical Machining [online], [vid. 8.6.2016]
Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4217735/>
- [13] Data Structures in LabVIEW [online], [vid. 10.6.2016]
Dostupné z: <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/data-structures>
- [14] Hloubení dutin zápustek a forem [online], [vid. 8.6.2016]
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1401>
- [15] Ing. M. Slaný, Ph.D., Nekonvenční technologie obrábění [online], [vid. 9.6.2016]
Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/2332>

Seznam příloh

- [1] Vysvětlení kódů vstupních parametrů
- [2] Hameg HZ 115 - Datasheet
- [3] Aplikace z LabVIEW k ukládání naměřených dat (CD)
- [4] Projekt z LabVIEW k ukládání naměřených dat (CD)

Seznam obrázků

Obr. 2.1 - Schéma elektroerozivního obrábění	10
Obr. 2.1.1 - Metody vyplachování	12
Obr. 2.3.1 - Určení rozměrů elektrody	13
Obr. 2.3.2 - Korekce elektrody	14
Obr. 2.4.1 - Opatření nástrojové elektrody při hrubování čtvercového otvoru.....	15
Obr. 2.5.1 - schéma zapojení RC/RLC generátoru	16
Obr. 2.5.2 - Schéma zapojení rotačního generátoru.....	16
Obr. 2.5.3 - Schéma zapojení polovodičového generátoru.....	17
Obr. 2.7.1 - Profil kráteru	18
Obr. 2.7.2 - Vyjádření časového využití výboje	19
Obr. 2.7.3 - Detail výboje v jednotlivých fázích	21
Obr. 3.1 - Elektroerozivní hloubička Sodick AP1L	26
Obr. 3.1.1 - Zobrazení parametru UP a DN.....	29
Obr. 4.1 - Schéma propojení	31
Obr. 4.2.1 - Výběr čistého projektu.....	32
Obr. 4.2.2 - Vytvoření nového virtuálního nástroje	32
Obr. 4.2.3 - Výběr čistého virtuálního nástroje	32
Obr. 4.2.4 - Blok DAQ Assist.....	33
Obr. 4.2.5 - Výběr měřené veličiny.....	33
Obr. 4.2.6 - Výběr vstupního portu	34
Obr. 4.2.7 - Nastavení parametrů	34
Obr. 4.2.8 - Převod do NI-DAQmx úlohy	35
Obr. 4.2.9 - Generování blokového diagramu	35
Obr. 4.2.10 - Blok pro zápis dat do souboru.....	36
Obr. 4.2.11 - Podrobné nastavení bloku	37
Obr. 4.2.12 - Vytvoření aplikace.....	37
Obr. 4.2.13 - Vyplnění informací.....	38

Seznam použitých zkratk

CNC	-	Computer Numeric Control (Počítačové číslicové řízení)
NC	-	Numeric Control (Číslicové řízení)
CAD	-	Computer Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CAM	-	Computer Aided Manufacturing (Počítačová podpora obrábění)
DAQ	-	Data Acquisition (Získávání dat)
PCI	-	Peripheral Component Interconnect (Periferní propojovací komponent)
SVC	-	Sub-Voltage Circuit (Náhradní napěťový obvod)
EXE	-	Přípona počítačového programu
VI	-	Virtual Instrument (Virtuální nástroj)
GAP	[mm]	pracovní mezera v jiskřišti
O_{rel}	[%]	relativní opotřebení elektrody
V_n	[mm ³]	úbytek objemu nástroje
V_m	[mm ³]	úbytek objemu materiálu
ϕ_v	-	stupeň opotřebení hrotu
L_v	[mm]	velikost opotřebení hrotu
ϕ_h	-	stupeň opotřebení hrany
L_h	[mm]	velikost opotřebení hrany
ϕ_b	-	stupeň opotřebení boční strany
L_b	[mm]	velikost opotřebení boční strany
a_p	[mm]	hloubka řezu
t_i	[sec]	doba impulzu
t_o	[sec]	doba pauzy
t_d	[sec]	doba zpoždění výboje
t_e	[sec]	doba výboje
T	[sec]	doba periody
U_z	[V]	napětí na prázdko
U_e	[V]	střední vybíjecí napětí
U_k	[V]	napětí při zhasnutí výboje
I	[A]	pracovní proud výboje
I_e	[A]	střední vybíjecí proud
V_i	[mm ³]	objem odebraného materiálu
W_i	[J]	energie výboje
K	-	součinitel úběru
q	-	časové využití výboje
R_a	[μ m]	střední aritmetická odchylka profilu
PL	-	polarita
ON	[μ sec]	čas elektrického vybíjení
OFF	[μ sec]	čas zastavení vybíjení
IP	[A]	maximální vybíjecí proud
SV	[V]	napětí serva
S	-	rychlost serva
UP	[sec]	doba zvednutí nástroje k vyplachování
DN	[sec]	doba elektroerozivního obrábění
JS	[m/min]	rychlost skoku mezi DN a UP
LNS	-	předdefinovaný tvar
STEP	[mm]	určení velikosti tvaru LNS
V	[V]	hlavní napájecí napětí
HP	-	pomocné napájení obvodu
PP	-	řízení impulzů
C	[μ F]	kondenzátor
ALV	-	úroveň detekce oblouku
OC	-	řízení zapnutí impulzů
LF	-	řízení vypnutí impulzů
JM	-	trajektorie vyjetí při UP
LS	-	rychlost a směr pro LNS
LNM	-	zvolení souřadného systému