

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 451*

*ISSN 1213-418X*

**Pavel Fiala**

# **MODEL IMPULSNÍHO GENERÁTORU S VIRTUÁLNÍ KATODOU**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ  
ELEKTROTECHNIKY

**DOC. ING. PAVEL FIALA, PH.D.**

**MODEL IMPULSNÍHO GENERÁTORU  
S VIRTUÁLNÍ KATODOU**

MODEL OF IMPULSE GENERATOR WITH VIRTUAL CATHODE

TEZE PŘEDNÁŠKY  
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ  
V OBORU  
TEORETICKÁ ELEKTROTECHNIKA



BRNO 2013

**Klíčová slova:**

Elektromagnetický impuls, modulace, mikrovlny, numerický model, relativistický zdroj, částice, virtuální katoda

**Keywords:**

Electromagnetic impuls, modulation, microwave, numerical model, relativistic generator, particles, virtual cathode

## OBSAH

ŽIVOTOPIS	4
POUŽITÉ SYMBOLY	5
1. ÚVOD	6
2. PŘEHLED MIKROVLNNÝCH ZDROJŮ	6
3. RELATIVISTICKÉ MIKROVLNNÉ GENERÁTORY- TEORICKÉ ZÁKLADY	8
4. ROZDĚLENÍ A KONCEPCE MIKROVLNNÝCH IMPULZNÍCH ZDROJŮ	13
4.1 IMPULSNÍ ZDROJE- KLASICKÉ	13
4.2 IMPULSNÍ ZDROJE- RELATIVISTICKÉ	14
4.3 IMPULSNÍ ZDROJE- RELATIVISTICKÉ, NEMODULOVANÉ	14
5. NUMERICKÉ MODELY MIKROVLNNÝCH GENERÁTORŮ	16
5.1 SDRUŽENÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE A POHYBUJÍCÍCH SE ELEKTRICKY NABITÝCH ČÁSTIC	19
5.2 ANALÝZA SDRUŽENÉHO MODELU IMPULSNÍHO MIKROVLNNÉHO ZDROJE	20
6. OPTIMÁLNÍ REŽIM MIKROVLNNÉHO GENERÁTORU S VIRTUÁLNÍ KATODOU	23
7. EXPERIMENTY S MIKROVLNNÝM IMPULSNÍM GENERÁTOREM	29
7.1 MĚŘICÍ METODY	32
7.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	33
8. ZÁVĚR	34
9. LITERATURA	36
IMPULSNÍ ZDROJE, KONSTRUKCE, TEORIE	36
VF RELATIVISTICKÉ EFEKTY	37
SENZORY, DETEKCE, MĚŘENÍ, DIAGNOSTIKA	37
TEORIE SILNÝCH MAGNETICKÝCH POLÍ, MODELOVÁNÍ	37
10.ABSTRACT	38

## ŽIVOTOPIS

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D



**Datum narození:** 24. března 1964, Kraslice, e-adresa fialap@feec.vutbr.cz.

1983- Ukončeno střední odborné vzdělání, Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická, Ostrov n. Ohří, obor Elektrické přístroje

1988 - ukončeno studium na Fakultě Elektrotechniky VUT v Brně (Ing.)

specializace silnoproudá elektrotechnika elektrické přístroje

1988 – odborný asistent VUEP Brno, později IVEP Brno

1988-1989- základní vojenská prezenční služba

1989 -1990 – odborná asistent VUEP Brno, později IVEP Brno

1990 – odborný asistent Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky FE VUT Brno

1993 - zástupce ředitele Laboratoře modelování a optimalizace polí v elektromechanických systémech FEI VUT Brno a ABB EJV a.s. Brno

1999 - ukončeno postgraduální doktorské studium na FEI VUT v Brně (Ph.D.) a obhájena dizertační práce "Modelling of current transformers with short circuit tests"

2003 - ředitel Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky VUT FEKT v Brně

2005- Obhájení habilitační práce na téma: "Modelování a návrh výkonového pulsního zdroje"

### Vědecká, odborná a pedagogická činnost:

**Základní výzkum** v oblasti numerického modelování metodou hraničních prvků a metodou konečných prvků, 1986-2003, sdružené modely MKP, MKP/MKV, modely pohybu volných částic vázaných k makroskopickým modelům, metody pro zpracování obrazu, metody šumové spektroskopie, optoelektronické měřicí metody.

**Aplikovaný výzkum** ve vysokonapěťové oblasti silnoproudé elektrotechniky- oblast elektrických zkratů a výbojů (1988-1990). Zabývá se modelováním nelineárních vlastností materiálů (1992-1996), modelováním, analýzou a optimalizací sdružených elektromagnetických–teplotních–mechanických úloh spojených s modely, které jsou formulovány pomocí soustředných parametrů (1992-2003), modelováním úloh s turbulencím prouděním a elektromagnetickým polem s vlivem chemického složení materiálů (2000-2003). Sestavil a otestoval několik výkonných algoritmů pro optimalizaci netriviálních úloh (1996-2000). Dr. Fiala se zabýval modelováním a měřením nelineárních materiálových vlastností – hystereze (1991-1993). Zabývá se návrhem a modelováním výkonových impulsních zdrojů (2001-2008 PROTOTYPA a.) a výkonových mikrovlnných generátorů (2002-2008 PROTOTYPA a.s, Tesla Vršovice, Ústav fyziky plazmatu AV ČR Praha).

**Řešení projektů** - spolupráce s ABB EJV s.r.o Brno (1986-2008), ELEN Brno 1998, FISCHER- Návrh a analýza VN přístrojový transformátor, ELIS s.r.o Brno- návrh netypického indukčního průtokoměru DN-1000 (2001), PROTOTYPA a.s. Brno spolu řešitel průmyslového grantu FD-K/042 „Výkonové mikrovlnné generátory.“ (2001-2003), spolu řešitel FT-TA/028 "Technologie neletálních obranných prostředků" (2004-2008), spolu řešitel "GENVLN" MO VOP026 s.p. Šternberk divize VTUPV Vyškov (2006-2008) a další.

. Dr. Fiala je spoluautorem několika desítek návrhů vyráběných řad přístrojových transformátorů v ABB EJV Brno, ABB s.r.o. Brno.

**V pedagogické oblasti** se Dr. Fiala podílel a podílí na výuce kurzů Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky v předmětech Teoretická elektrotechnika, Teorie elektrických obvodů (1990-2001), Elektrotechnika I (2001-2004), Elektrická měření (1996-2000), Měření v elektrotechnice (2001-2004), Elektromagnetismus (1990-2003), Užitý elektromagnetismus (1996-2000). **Zavedl** kurzy Základy programování v jazyku C pod Windows (1991-1995), zavedl Základní kurz programování pod MS Windows (1992-1997), zavedl Rozšířený kurz programování pod MS Windows v letech (1992-1998). Dr. Fiala je **autorem a spoluautorem** učebních textů, vydával učební texty, pomůcky a výukové programy pro předměty Programování pod MS WINDOWS a Rozšířené programování pod MS Windows v letech 1993- 1996, Užitý elektromagnetismus (1999-2001), je spoluautorem skript Počítače a programování II (2003). Je garantem kurzu Seminář C++ (2004), BMEM - Počítačové modelování elektrotechnických zařízení a komponentů.

Je členem SPIE, APS,IEEE, IEE, OSA členem The Electromagnetic Academy, Cambridge, USA, je recenzentem IEEE Sensors Journal.

## POUŽITÉ SYMBOLY

Symbol	význam
$A$	vektorový magnetický potenciál
$B$	vektor magnetické indukce
$B_0$	střední hodnota vektoru magnetické indukce
$c$	rychlost světla ve vakuu
$D$	vektor elektrické indukce
$E$	vektor intenzity elektrického pole
$f$	frekvence
$f(t)$	časově závislá funkce
$f_e$	měrná síla
$H$	vektor magnetické intenzity
$i$	okamžitá hodnota elektrického proudu
$I$	elektrický proud
$J$	vektor proudové hustoty
$k$	koeficient tuhosti
$l$	délka
$l$	koeficient tlumení
$m$	hmotnost
$m_e$	hmotnost elektricky nabitě částice
$m_0$	klidová hmotnost elektricky nabitě částice
$N_e$	počet elektricky nabitých částic
$n_x$	počet vidů s indexem $x$
$p$	tlak
$P$	elektrický výkon
$q_e$	náboj elektricky nabitě částice
$Q$	činitel jakosti rezonančního obvodu
$R, r$	poloměr
$s$	koeficient rezonance
$T$	doba (délka) periody
$t$	okamžitá hodnota času
$U$	elektrické napětí
$u$	okamžitá hodnota elektrického napětí
$V$	objem
$v$	vektor okamžité rychlosti
$v_0$	vektor střední rychlosti
$W_e$	energie elektricky nabitě částice
$Z$	elektrická impedance
$\varepsilon$	elektrická permitivita
$\phi_e$	skalární elektrický potenciál
$\gamma$	měrná elektrická vodivost
$\lambda$	vlnová délka
$\mu$	magnetická permeabilita
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\Pi$	vektor plošné hustoty výkonu, Pointingův vektor
$\omega$	úhlová frekvence
$\Delta\omega$	změna úhlové frekvence
$\omega_0$	oscilační frekvence elektrického náboje
$\Omega$	frekvence oscilace elektronu
$\rho$	měrná hustota elektrického náboje

## 1. ÚVOD

Výkonovými impulsními zdroji [1] jsou pro účely této práce míněny takové zdroje, které využívají přechodové děje elektrických soustav k soustředování energie do jednorázových impulsů [1], [4], [8]. Pro napájení impulsních generátorů je využíván zejména Faradayův indukční jev [1], [9], pro zkracování elektromagnetického impulsu elektrické vedení s nelineárními prvky [14]. Cílem návrhu generátoru je transformovat elektrickou energii na požadovanou šířku pásma mikrovlnné části elektromagnetického záření a nastavit podmínky šíření volným prostorem [2], [3].

Takové zdroje vyžaduje především fyzika vysokých energií ke studiu vlastností částic hmoty [10], [11], [12], [13] a v poslední době stoupá i zájem obranného průmyslu [5], [6], [7] o celou třídu zbraní se směřovanou energií [10] a o zbraně kategorie nezabíjející (*non-lethal*). Silný elektromagnetický impuls namodulovaný na vhodné nosné frekvenci či frekvenčním spektru, v porovnání s přírodními výboji-blesk, byl zaznamenán v minulosti při zkouškách jaderných zbraní v atmosféře a dal vzniknout novému oboru ochrany proti elektromagnetickému impulsu (EMI) [10] a zkouškám elektromagnetické kompatibility (EMC). Bez respektování EMC, testů si nelze dost dobře představit vývoj celé řady elektronických zařízení, používaných zejména ve zdravotnictví, vojenství, telekomunikacích, dopravě, ale i v běžném životě. Důvodem je efekt interference elektromagnetických vln, který nelze v současné době efektivně jinými prostředky vyhodnocovat [3.6], [3.7], [3.14], [3.21], [3.13], [3.10].

Souběžně se ve světě rozvíjí disciplíny usilující o zvýšení odolnosti elektronických zařízení a zároveň je snahou generovat stále silnější a kratší elektromagnetické impulsy využitelné jak pro zkušebnictví EMC [3.6], [3.7], [3.14], [3.21], [3.13], [3.10], tak i ve vojenské oblasti pro realizaci levné „elektromagnetické zbraně“ [1], [15] schopné vyřazovat z činnosti sofistikovanou elektronickou část výzbroje protivníka, případně aktivně bránit teroristickým činům (zastavováním automobilů, rušení komunikací, atp.) [15].

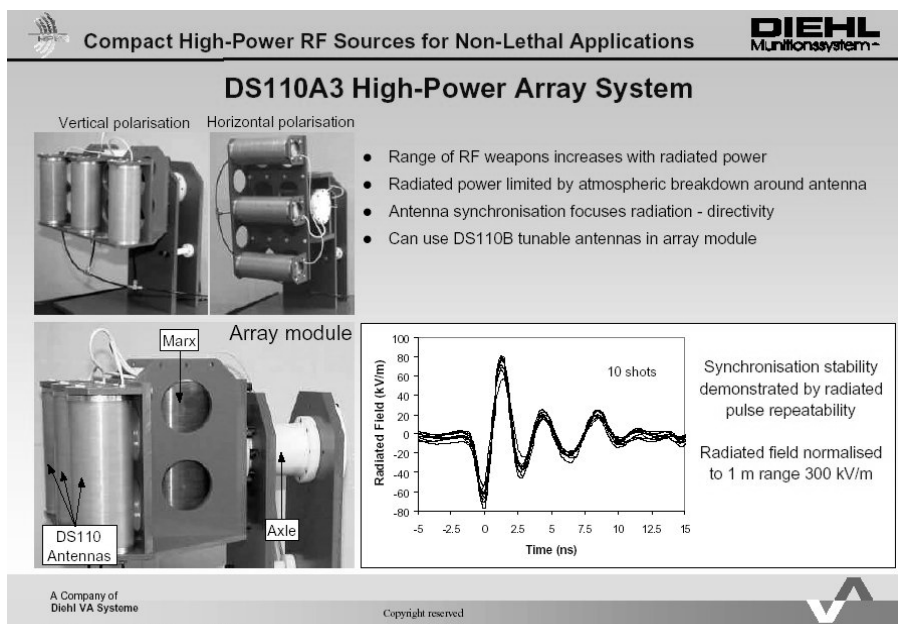
Rozvinula se metodika měření a měřicí metody, které mají testovat elektronická a elektrotechnická zařízení na jejich odolnost vůči vnějšímu rušení elektromagnetickým polem [2], [3]. Součástí metod je ověření správné funkce zařízení také pomocí elektromagnetických impulsů, které se generují v impulsních zdrojích [4.1], [4.2], [4.4], [4.5], [4.6], [1.1] až [1.9]. Testované výrobky jsou umístěny v elektromagnetickém impulsním poli. Pro tento test je zapotřebí disponovat výkonnými impulsními mikrovlnnými zdroji. Při testech se ale také musí s dostatečnou přesností elektromagnetické pole změřit. Proto se souběžně s vývojem impulsních mikrovlnných zdrojů rozvíjí metody, metodika, identifikace a měření impulsních elektromagnetických polí.

## 2. PŘEHLED MIKROVLNNÝCH ZDROJŮ

Impulsní zdroje jsou vyvíjeny pro různé typy aplikací. Jednou z oblastí, která je velmi důležitá pro základní výzkum, je základní fyzika částic [10]. V jaderném výzkumu se pro ověření a testy hypotéz používaly nukleární zkoušky. Při nich se docílilo požadovaných fyzikálních parametrů teplota, tlak, délka EMI, koncentrace částic, atd. Z důvodů, jak ochrany životního prostředí, bezpečnosti, tak snížení ceny zkoušky a omezení možných rizik se v *Sandia National Laboratory* v roce 1996 zahájil projekt Z-machin [10]. Tento projekt nahradil v plném rozsahu jaderné zkoušky. Z-machin je stacionární impulsní laboratorní urychlovač, nejvýkonnější a s nejvyšší účinností na světě své doby. Pracuje v oblasti gama záření. Zdroj Z vznikl zdokonalením jedenáct let starého zdroje PBFA II, který sloužil k výzkumům v oblasti iontové fúze. Impuls, který se získá, má délku u paty  $t_{im} = 10$  ns a dosáhne špičkového výkonu až 290 TW, uvolní energii v oblasti gama záření do 1.9 MJ [10]. Tohoto zdroje se používá ke studiu materiálových vlastností, studiu přenosu tepla a částic radiací. To dříve nebylo možné při použití nukleárních výbuchů. Zdroje gama záření v Z-zdroji produkuje plazma podobně jako u některých hvězd [11], [12], [13]. Efekty vznikající při generaci krátkého výkonného impulsu pomohly vysvětlit mnohé

nejasnosti pulsarů. Z-zdroj je tedy vrchol v oblasti konstrukce impulsních výkonových zdrojů na který navazují v současnosti impulsní lasery s projektovaným výkonem v oblasti  $P_{imp}=1-10$  PW a délkou impulsu  $t_{imp}=10-100$  fs, energií impulsu od  $w_{imp}=100-5000$  J.

Směrem k nižším výkonům se v téže době na mnoha místech na světě prováděly pokusy se zdroji konstruovanými k různým účelům třídy maser, laser a dalšími typy až do části spektra tvrdého gama záření. Zdroje mají vzhledem k Z-zdroji řádově nižší výkon, také finanční náročnost jejich provedení je mnohonásobně menší. Mezi záměry použití zdrojů byly i vojenské účely, schématicky naznačené na obr. 2.1 [5]. Měly vytvořit dostatečnou energii v elektromagnetickém impulsu, který by bylo možné nasměrovat a přenést volným prostorem na větší či menší vzdálenost.



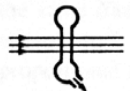
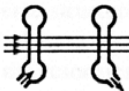
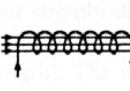


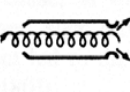
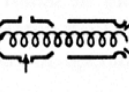
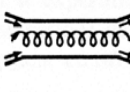
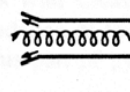
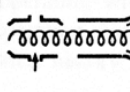
**Obr. 2.1** Vojenská aplikace impulsních výkonových generátorů

Základní koncepce výkoných vysokofrekvenčních zdrojů podle [1.9] je rozdělena do několika skupin podle koncepce návrhu. Frekvenční rozsah, na kterém zdroje pracují, je v intervalu od 1GHz do 100GHz. Základním rozdělením principu funkce generátorů je na skupinu typu oscilátory- O, a skupinu zesilovačů, vyznačujících se gyroskopickým pohybem částic. Zařízení se označují jako Gyro. Mikrovlonné generátory lze rozdělit do několika skupin :

- Konvenční koncepce zdrojů
- TWT - pohybující se vlnový trubkový generátor
- Magnetrony
- Klystrony
- BWO- zpětnovazební vlnový oscilátor
- FEL- volný elektronový laser
- Relativistický zdroj- vakuová doida s virtuální katodou (VIRKATOR)
- RDG - relativistický difrakční generátor
- MILO - magneticky izolovaný lineární oscilátor



Mezi klasické zdroje mikrovlnného záření patří široká skupina antén pro buzení TE, TM nebo TEM vlny s jakoukoliv polarizací, šířkou spektra, koncepcí a konstrukcí. [1.1] až [1.9], [2.2]. Takzvané Towards Wave Tube (TWT) generátory jsou založeny na aplikaci Čerenkovova principu- synchronizace s fázovou rychlostí vlny. Magnetrony a klystrony jsou často využívány pro kontinuální režim generování buď základní frekvence nebo generování periodických impulsních signálů. Zpětnovazební vlnový oscilátor (BWO) je založen na aplikaci Černovova principu. Vyznačuje se vyšší účinností (až 35 %) a schopností generovat výkony řádů jednotek GW. Problematika laserů a jejich aplikací je přehledově zpracována v knize [2.1], ovšem tato oblast je zcela samostatně rozvíjena vzhledem k cílové aplikaci. Jako velice jednoduché zařízení s nízkou účinností v oblasti mikrovlnného pásma se jeví zdroje s virtuální katodou dále nazývané VIRKÁTORY. Jejich účinnost je v řádech jednotek procent ve frekvenčním rozsahu 1-10 GHz. Relativistické difrakční generátory se vyznačují svou náročností konstrukce vzhledem k nastavení a funkci. Magneticky izolovaný lineární oscilátor z hlediska konstrukce není složitý, ale díky svým rozměrům nelze použít pro velmi jednoduché aplikace. Přehled koncepcí relativistických generátorů je schématicky rozdělen v obr.2.2.

Zařízení typ O	 Monotron	 Klystron	 TWT	 BWO	 Twystron
Zařízení typu Gyro	 Gyro-monotron	 Gyro-klystron	 Gyro TWT	 Gyro BWO	 Gyro-twystron

Obr.2.2 Srovnání koncepcí mikrovlnných generátorů, O-generátor a gyro-generátor

### 3. RELATIVISTICKÉ MIKROVLNNÉ GENERÁTORY- TEORICKÉ ZÁKLADY

Síly, které působí na pohybující se elektrický náboj v elektromagnetickém poli lze vyjádřit podle vztahu

$$f_e = \rho(\mathbf{E} + \mathbf{v}_o \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

kde  $\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce v prostoru pohybujících se elektrických nábojů s objemovou hustotou  $\rho$ ,  $\mathbf{v}$  je střední rychlost elektrických nábojů,  $\mathbf{E}$  je vektor elektrické intenzity. Potom měrná síla, která působí na pohybující se elektricky nabitě částice s elektrickým nábojem  $q_e$  a počtem  $N_e$  a ve sledované oblasti s objemem  $V$  je

$$f_e = \frac{d(N_e q_e)}{dV} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_o \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

Tato síla vyvolá změny energie  $W_e$  náboje a tím dojde ke změně oscilace  $\omega$  náboje. To lze zapsat ve výrazu

$$\Delta\omega_0 = \frac{\partial\omega}{\partial W_e} \Delta W_e, \quad (3)$$

kde  $\omega_0$  je oscilační frekvence elektrického náboje,  $\Delta\omega_0$  je změna frekvence oscilace elektrického náboje,  $\Delta W_e$  je změna energie elektricky nabitě částice. Změna frekvence elektricky nabitě částice může být směrem nahoru při brzdění pohybu elektrického náboje nebo směrem dolů při jeho zrychlení [1.9]. Závislost frekvence elektricky nabitě částice na ustálených hodnotách elektromagnetického a gravitačního pole lze vyjádřit jako

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{q_e (\mathbf{E} + \mathbf{v}_o \times \mathbf{B})}{m_e x}}, \quad (4)$$

kde  $x$  je charakteristická střední vzdálenost oscilace elektrického náboje  $q_e$  pohybujícího se ustálenou střední rychlostí  $\mathbf{v}$ ,  $m_e$  je hmotnost elektricky nabitě částice v magnetickém poli s magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$ . Pokud v relaci (4) převládá vliv elektrického pole, výraz se změní na tvar

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{q_e \mathbf{E}}{m_e x}}, \quad (5)$$

Na tomto principu jsou založeny zdroje jako Strophotron, Virkáator a další. Ty pracují s relativně dlouhou vlnovou délkou do milimetrových a podmilimetrových délek elektromagnetických vln.

Zajímavější jsou z hlediska aplikací pro modulování frekvence takové generátory, u kterých frekvence vzniká zbrzděním nebo zrychlením elektricky nabitých částic ve statickém, kvazistatickém (i nestacionárním) homogenním magnetickém poli s indukcí  $\mathbf{B}$ . V tomto případě se výraz (4) změní na tvar

$$\omega_0 \approx \frac{q_e \mathbf{B}}{m_e}, \quad (6a)$$

Pokud bude střední rychlost pohybu nabitě částice  $\mathbf{v}$  dosahovat rychlosti fotonu, relace (6a) lze doplnit o tuto závislost s respektováním známých poznatků teorie relativity [9] na tvar

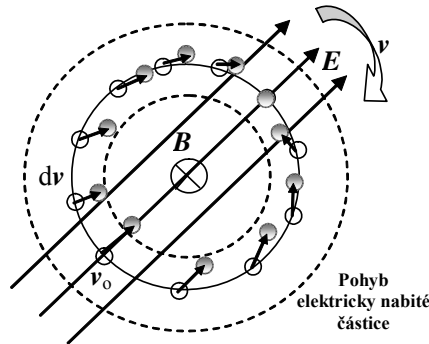
$$\omega_0 \approx \frac{q_e \mathbf{B}}{m_e \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{v_o^2}{c^2}\right)}}}, \quad (6b)$$

kde  $c$  je rychlost světla. Na obr. 3.1 je znázorněn pohyb s původní střední rychlostí  $\mathbf{v}$  a jeho změna  $d\mathbf{v}$  elektricky nabitých částic v závislosti na rozložení vnějšího elektromagnetického pole s elektrickou  $\mathbf{E}$  a magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$ .

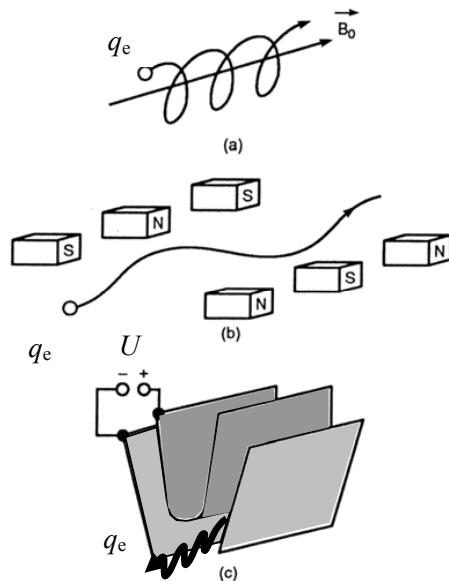
Na základě tohoto principu vyjádřeného relací (4) v letech 1958-59 byly popsány nestability rezonančního cyklotronového maseru. V obrázku obr.3.2 je zobrazeno několik základních geometrických variant tvaru vektorů elektromagnetického pole [1.9] vzhledem k pohybu elektricky nabitě částice

V obrázku obr.3.2a) je zachycena jednoduchá (lineární) konfigurace indukce magnetického pole  $\mathbf{B}$  a pohybu elektricky nabitě částice s výslednou dráhou elektrického náboje. V obr. 3.2b) je nastaveno nehomogenní magnetické pole s indukcí  $\mathbf{B}$  pomocí stacionárních nebo kvazistacionárních magnetických elementů a na základě relace (6a) je zachycena trajektorie pohybu elektricky nabitě částice. Další možnost konfigurace je zobrazena na obr. 3.2.c) jako elektrostatické nebo kvazistacionární elektrické pole

a výsledná trajektorie pohybu elektricky nabitých částic. Takovýchto konfigurací lze navrhnout celá řada a také jednotlivé typy řešení se realizovaly. Konstrukce generátorů je založena na snadné emisi elektronů jako elektricky nabitých částic a technicky dostupného nastavení podmínek vektorů elektromagnetického pole.



**Obr.3.1** Závislost směru pohybu elektricky nabitých částic v elektromagnetickém poli



**Obr.3.2** Pohyb elektronu v magnetickém poli

Skupina zdrojů, pracujících se svazky elektronů, má mnoho modifikací a tvoří skupinu CRM – cyclotron resonance maser. Tato zařízení mají mnoho společného s válcovými provedeními laserů – FEL – free electron laser. Nakonec na tomto principu jsou založeny válcové konstrukce generátorů jako virkátor, orbitrony, strophotrony a další u kterých elektrony tvoří radiaci, pokud oscilují v ustáleném elektrostatickém poli. Pro správnou funkci relativistických vysokofrekvenčních generátorů je nutné splnit

podmínku oscilace – mluví se o podmínce synchronismu. Pokud je doba funkce generátoru delší než perioda

$$T \geq \frac{2\pi}{\omega}, \quad (7)$$

je podmínka zapsána jako

$$\omega - n_z \omega_z \cong s\Omega, \quad (8)$$

kde  $\omega$  je frekvence výkonového zdroje,  $\omega_z$  je fázová frekvence generované vlny,  $\Omega$  je frekvence oscilace elektronu,  $n_z$  je axiální počet vidů vlny,  $v_z$  je axiální rychlost elektronu,  $s$  je koeficient rezonance. Pokud nenastane oscilace,  $s=0$ , podmínka synchronismu se změní na

$$\omega \approx n_z \omega_z, \quad (9)$$

ve které se pracuje pouze s fázovou rychlostí vlny. Tato podmínka je plně využívána v Čerenkovově typu generátoru (rychlost částice je vyšší než rychlost světla ve vakuu). U cyklotronů, ve kterých elektrony oscilují ve vnějším magnetickém zdroji (obr.3.2b)), je podmínka zapsána jako

$$\omega \approx \frac{s\Omega}{1 - v_z/v_{ph}}, \quad (10)$$

kde  $v_{ph}$  je fázová rychlost vlny. Z tohoto vztahu vyplývá, že frekvence vyzářené elektromagnetické vlny může být mnohem vyšší než frekvence rezonance oscilace elektronů. Tento efekt je známý jako Dopplerova násobná frekvence (Doppler frequency upconversion). Byl prvně použit pro generaci elektromagnetických vln krátkých vlnových délek. V případě rychlých vln je tento jev často uvažován, ve kterých elektrony mají axiální rychlost blízkou rychlosti světla  $c$  a jsou ovlivňovány elektromagnetickými vlnami s fázovou rychlostí  $v_{ph} \approx c$ . Lze snadno ukázat, že násobná Dopplerova frekvence je ve vztahu k rychlostem vyjádřena relací

$$\frac{\omega}{s\Omega} \cong 2 \left( 1 + \frac{1}{q_e U_b / m_0 c^2} \right)^2, \quad (11)$$

kde  $U_b$  je rozdíl potenciálů svazku elektronů,  $q_e$  je náboj elektronu,  $m_0$  je klidová hmotnost elektronu,  $c$  je rychlost světla. Je-li oscilace v periodickém statickém magnetickém poli s vidy

$$n_w = \frac{2\pi}{\lambda_w}, \quad (12)$$

kde  $\lambda_w$  je vlnová délka periody zkrutu. Patříčná oscilační frekvence je

$$\Omega = n_w v_z. \quad (13)$$

V tomto případě počet vidů vyzářené rychlé vlny je z výrazu (10)

$$n_z = n_w \frac{v_z/c}{1 - v_z/c}. \quad (14)$$

Pokud se rychlost svazku blíží mezním rychlosti šíření světla je předchozí výraz přibližně ve tvaru

$$n_z \cong 2n_w \left( 1 + \frac{1}{q_e U_b / m_0 c^2} \right)^2. \quad (15)$$

Vlastnost vysokofrekvenčního generátoru závisí na splnění podmínky synchronizace (8). Přijatelná neshoda – tolerance podmínky je dána výrazem

$$|\omega - n_z - s\Omega|T \leq 2\pi, \quad (16)$$

kde  $T = X/v_z$  je doba interakce prostředí,  $X$  je střední délka interakce sil a elektrického náboje. Pokud tato podmínka není splněna, brzdící síly mění charakter elektronů dokud se nacházejí v interagující zóně (síly, rychlost, elektronový svazek). Proto zde není přesně definované zpomalení. Více zajímavých důsledků plyne z výrazu (16). Jedna poznámka se týká elektronového svazku. Jeho rychlost  $v_z$  a oscilace  $\Omega$  závisí na energii elektronů a ta velmi závisí na interakci elektromagnetických sil. Efektivita generátoru může být zvýšena zlepšením podmínky synchronismu tvarem elektromagnetického pole. Proto lze zajistit toleranci některých parametrů a tak zlepšit podmínky pracovního režimu generátoru. Nastává zde také problém při zvyšování délky interakce elektronového svazku a vnějších sil. Může dojít k ohmickým ztrátám, výbojům. Poslední problém je v reprodukovatelnosti záření při opakovaných impulsích.

Dalším aspektem návrhu relativistických VF zdrojů je výkonové omezení. Výkonové omezení je dáno maximální úrovní mikrovlňného výboje v blízkosti přepážek. Je dáno maximální velikostí intenzity elektrického pole. Podle [1.9] je intenzita průrazu

$$E_{br} \cong 0.8 \cdot 10^3 \sqrt{f}, \quad (17)$$

kde  $f$  je frekvence elektromagnetické vlny generátoru. Maximum vyzářeného výkonu je

$$P_{br} = I_{br} \int_{\ell} \mathbf{E}_{br} \cdot d\mathbf{l}, \quad (18)$$

kde  $I$  je silokřivka elektrického pole,  $I_{br}$  je maximální proud zdroje. Ten lze určit a zapsat ve tvaru

$$I_{br} = \frac{mc^3}{2q_e} \frac{\left( \left( 1 + \frac{1}{q_e \int_{\ell} \mathbf{E}_{br} \cdot d\mathbf{l} / mc^2} \right)^{2/3} - 1 \right)^{3/2}}{\ln \frac{R}{r_b}}, \quad (19a)$$

$$m = m_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (19b)$$

kde  $r_b$  je poloměr elektronového svazku,  $mc^3/q_e = 17.04$  kA,  $R$  je válcový prostor, kanál, kde interagují síly a elektronový svazek. Je-li dán rozdíl potenciálů na elektronovém svazku, je maximální výkon dán elektrickou složkou elektromagnetické vlny a vhodným návrhem prostoru interakce elektromagnetické vlny. Tím se myslí vyšší módy v prostorech pod základní rezonancí délek vlny.

Generátory pracují v základních dvou režimech, jak již bylo uvedeno. První je oscilátor- O, druhý je zesilovač- Gyro. U oscilátorů musí být zajištěna vnitřní nebo vnější zpětná vazba. Elektrony, které vstupují do aktivního prostoru oscilátoru, samovolně generují šum (bílý nebo spektrálně definovaný).

Některé složky šumu mohou být shodné s vlastní frekvencí oscilátoru a pomocí zpětné vazby mohou být nastaveny podmínky oscilace, dokonce koherentní oscilace.

U zesilovačů není zpětná vazba nastavena a vstupní signál je přímo zaveden do aktivního prostoru zesilovače. Většinou se používají úrovně výkonu, které jsou mnohonásobně větší než úrovně šumu a ten je vzhledem k úrovním zanedbáván. Výstupní výkon oscilátorů je možné formulovat jako vztah

$$P_{osc} = \frac{\omega}{Q_{out}} W, \quad (20)$$

kde  $Q_{out}$  je činitel jakosti rezonančního obvodu,  $W$  je energie dodaná oscilátoru. Energie oscilátoru je přibližně

$$W \approx E^2 V, \quad (21)$$

kde  $E$  je modul intenzity elektrického pole,  $V$  je objem rezonančního prostoru. Na těchto poznátcích jsou založeny některé konstrukce výkonových mikrovlnných generátorů.

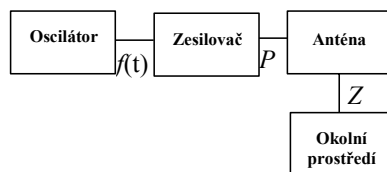
## 4. ROZDĚLENÍ A KONCEPCE MIKROVLNNÝCH IMPULZNÍCH ZDROJŮ

Mikrovlnné zdroje pro generování elektromagnetické vlny s výkonem nad 1kW se obtížně realizují na principech generátorů pevné fáze. Pokud ano, jejich cena je vysoká ve srovnání s generátory pracujícími na principech pohybu nabitých částic v řídkých kapalinách nebo vakuu.

Generátory využívající pohybu částic nebo vlny v pevné fázi hmoty jsou například anténní systémy buzené oscilátory jak širokopásmové s nižší účinností nebo laděné s vyšší účinností, ale užší šířkou spektra. Tato zařízení se využívají k přenosu informací, interferenčním jevům a jejich aplikaci v široké oblasti techniky a medicíny.

### 4.1 IMPULSNÍ ZDROJE- KLASICKÉ

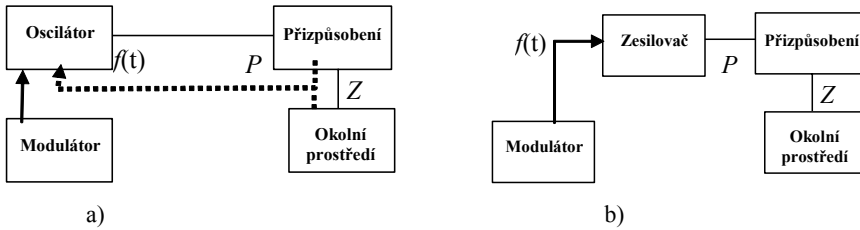
Podle dostupných pramenů [3.2] až [3.14] se impulsní zdroje elektromagnetických vln konstruují a využívají jak pro přenos informací, energie, ohřev, nedestruktivní defektoskopie, diagnostické metody a také pro speciální vojenské účely od radiolokace až po rušící systémy. Jejich koncepce je založena na efektech rezonance výstupního zařízení generátoru, který je napájen většinou elektronickým zdrojem – oscilátor a zesilovač. Schéma takového generátoru je na obr. 4.1.



**Obr.4.1** Klasická koncepce generátorů pevné fáze

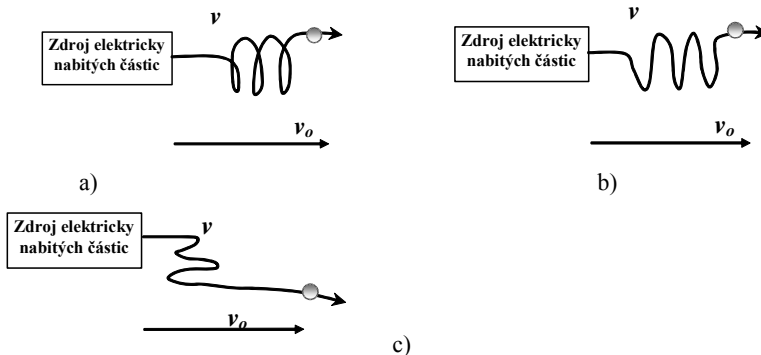
## 4.2 IMPULSNÍ ZDROJE- RELATIVISTICKÉ

Impulsní generátory založené na pohybu elektricky nabitých částic převážně ve vakuu, mají schématické uspořádání podle obr.4.2.



**Obr.4.2** Koncepte generátorů na bázi relativistického efektu pohybu nabitých částic, a) se zpětnou vazbou - gyro-generátor, b) bez zpětné vazby- oscilátor

Koncepte vychází z výrazů (7) až (16) pro podmínky synchronizmu, jak bylo popsáno dříve. Pokud výstupní elektromagnetická vlna zpětně působí na budící oscilátor, obr.4.2a) je generátor možné klasifikovat jako gyro-generátor. Je-li tato zpětná vazba minimální, klasifikuje se generátor jako oscilátor, ve smyslu rozdělení z obr.2.2. Mezi další znak základní klasifikace generování elektromagnetické vlny je nutné uvažovat vektor okamžité rychlosti  $\mathbf{v}$  pohybu elektricky nabitých částic vzhledem k jejich střední hodnotě rychlosti  $\mathbf{v}_0$ . Základní typy jsou schématicky zakresleny v obr.4.3.

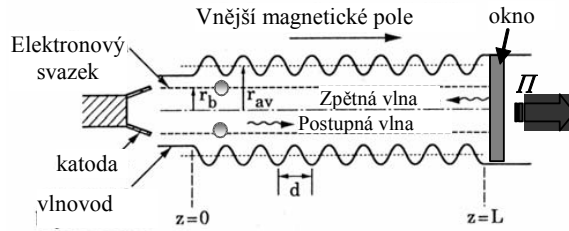


**Obr.4.3** Klasifikace generátorů podle charakteru pohybu nabitých částic, a) gyroskopický pohyb, b) podélně kmitavý, c) příčně kmitavý pohyb

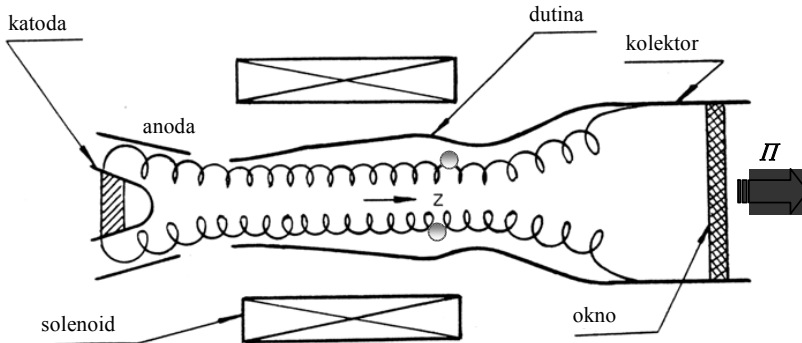
## 4.3 IMPULSNÍ ZDROJE- RELATIVISTICKÉ, NEMODULOVANÉ

Jedním z mikrovlnných generátorů je oscilátor Čerenkovova typu, s pohybem elektricky nabitě částice klasifikované podle obr.4.3.b). V oblasti katody se pohybují elektrony lineárně bez radiace, konstantní rychlostí  $\mathbf{v}$ . Radiace vznikne v okamžiku pohybu elektronů přes nebo za dielektrikem nebo v periodické krátkovlnné struktuře vlnovodu. Na konci vlnovodu dojde k vyzáření elektromagnetické vlny do vnějšího prostoru s hustotou elektrického výkonu  $\mathcal{I}$ . Poslední případ je často využíván u výkonných mikrovlnných generátorů, protože omezuje problémy oteplení a elektrických výbojů. Schéma Čerenkovova generátoru je na obr.4.4. Dalším typem generátoru je gyromonotron, který aplikuje pohyb elektricky nabitě částice podle obr. 4.3.a). Jeho schématické zobrazení je na obr. 4.5. Z katody jsou emitovány elektrony směrem k anodě vlivem silného elektrického pole mezi anodou a katodou. Vlivem vnějšího magnetického pole dojde

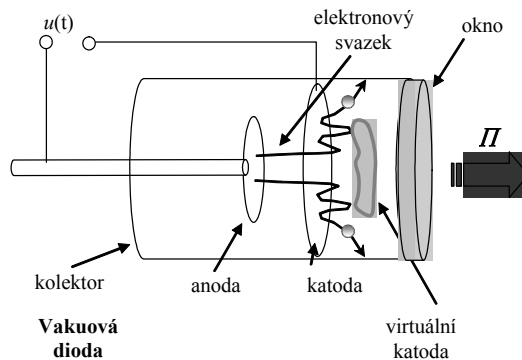
k změně směru vektoru střední rychlosti  $v_0$  a gyroskopickému pohybu elektricky nabitě částice. Ta je urychlována elektrickým polem na povrchu kolektoru. Vytvořená elektromagnetická vlna prochází dielektrickým oknem vně gyromonotronu. Na obr.4.6 je relativně jednoduchý mikrovlnný generátor s typem pohybu elektricky nabitě částice podle obr.4.3.c). Jedná se o vakuovou diodu s tenkou katodou. Díky vysoké intenzitě elektrického pole na povrchu anody dojde k zrychlení elektricky nabitých částic na takovou úroveň, při které dojde k tunelovému efektu a částice pronikne katodou. Vlivem tvaru a strmosti budičího impulsu (300-450kV/0.1 ns) [2], [3], nárůstu hustoty svazku nabitých částic (elektronů) dojde k efektu brzdění v čase prvních částic při jejich zpětném pohybu směrem ke katodě částicemi emitujícími z anody později. Díky srážkám a vytvoření vlastního magnetického pole dojde ke kmitavému pohybu některých elektricky nabitých částic. Tento prostor za katodou je nazýván virtuální katodou. Po skončení elektrického impulsu částice dopadnou na povrch kolektoru.



**Obr.4.4** Čerenkovův generátor



**Obr.4.5** Gyromonotron



**Obr.4.6** Vakuová dioda s virtuální katodou- "VIRKÁTOR"



Vlivem zakmitání nabitých částic je generována elektromagnetická vlna a je přes výstupní dielektrické okno vyzářena vně diody. Účinnost generátoru mimo jiné závisí na hustotě svazku elektricky nabitých částic, kvalitě srážek a nastavení tvaru budicího impulsu. Účinnost generátoru v oblasti mikrovlnné části spektra je mezi 1-3 % (výstupní mikrovlnný výkon/příkon). Zbylá část budicího výkonu je přeměněna na elektromagnetickou vlnu ve spektru frekvencí s kratšími vlnovými délkami až do části tvrdého  $\gamma$  záření.

Virkátor je vzhledem ke své jednoduché konstrukci, malým rozměrům a relativně vysokému výstupnímu výkonu vyzářené elektromagnetické vlny a nezávislosti na vnějším magnetickém poli jednou z variant řešení impulsních mikrovlnných generátorů pro speciální impulsní aplikace. Příkladem je satelitní průzkum zemského povrchu, nezabíjející zbraň [5] až [7], výkonový generátor pro speciální testy zařízení vzhledem k elektromagnetické kompatibilitě [15]. Základní a aplikovaný výzkum prováděný ve firmách PROTOTYP A.S. a VOP 026 Šternberk, divize VTUP Vyškov byl zaměřen na návrh vlastní koncepce a konstrukce virkátoru s výstupním maximálním špičkovým výkonem  $P_{out}=250\text{MW}$  při minimální dolní hodnotě frekvenčního spektra  $f_m=3\text{GHz}$ . Ukázalo se, že aplikace pouze experimentálních metod v kombinaci s analytickým přibližným řešením nevede k cílovému optimálnímu řešení s požadovanými parametry. Pro experimenty a výzkum na virkátoru byl použit impulsní generátor. Ten se skládal z Marxovy kapacitní banky a tvarovače impulsu [13], [14] typu Blumline. Na konci přizpůsobeného vedení byl umístěn virkátor jak s trvale čerpaným systémem tak v uzavřené variantě. Pro základní funkci virkátoru je nutné dosáhnout vakua s tlakem  $p = 1.10^{-5}-1.10^{-8}$  Pa. Experimenty a ověřování hypotéz je velmi časově náročné a drahé. Ukázalo se, že bez numerického modelování, analýzy a interpretace výsledků nelze optimálně v efektivním časovém horizontu nastavit konstrukční parametry virkátoru.

## 5. NUMERICKÉ MODELY MIKROVLNNÝCH GENERÁTORŮ

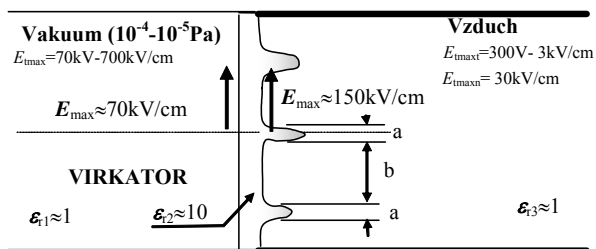
Jako vhodná metoda pro analýzu sdružené elektromagnetické úlohy s pohybem elektricky nabitých částic se ukázala metoda oknečných prvků (MKP) nebo metoda konečných objemů (MKO). Lze formulovat i další odlišné metody založené na jiných způsobech minimalizace funkcionálu. Obě numerické metody jsou ze skupiny řešení minima funkcionálu okrajových úloh cestou nalezení aproximované funkce nad diskretizovanou sítí elementů. Rozdíl mezi kvalitou nalezených výsledků není pro uvažovaný model významný. Liší se pouze dostupnou podporou programového vybavení (ANSYS- MKP, CFX- MKO). Vzhledem k menší dostupnosti podpory tvorby geometrického modelu v prostředí CFX byl zvolen systém ANSYS. Analýza byla provedena pomocí kombinované metody MKP/MKO formulované pomocí jazyka ANSYS- APDL.

Koncepce geometrického uspořádání virkátoru byla zvolena axiální (další jsou radiální, tangenciální). Tato koncepce má řadu výhod, ale jednou z nevýhod je vyřešení přechodu vakuum-volný prostor. Zde dochází na rozhraní dielektrického okna k problémům s překročením mezních elektrických intenzit a následuje možnost elektrického výboje. Řešením- odstraněním problému je tvarování rozhraní dielektrik tak, aby nedošlo k překročení limitních hodnot pevnosti média elektrickou intenzitou jak ze strany vakua, tak ze strany vzduchu. Tím lze dosáhnout maximálního vyzářeného mikrovlnného výkonu do volného prostoru. Tvarování povrchu okénka přestupu virkátor/volný prostor by mělo jednak změnit charakter mezních intenzit elektrického pole a také zabránit vzniku sekundárního elektrického výboje.

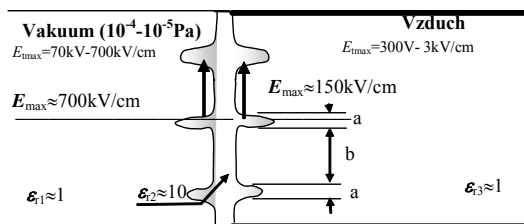
Na obr.5.1 je schématicky znázorněno rozložení parametrů a princip tvarování dielektrického okénka pro variantu virkátoru, který pracuje do uzavřeného vlnovodu. V obr.5.1a) je možné uvažovat parametr

$$\frac{a}{b} = \frac{\epsilon_{r3}}{\epsilon_{r2}} \quad (22)$$

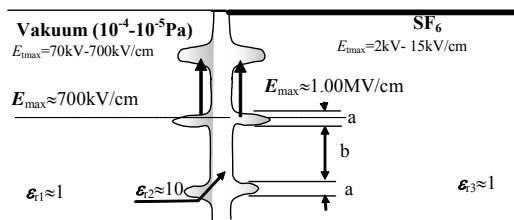
kde  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ ,  $\epsilon_{r3}$  jsou relativní permitivity příslušných oblastí,  $a$ ,  $b$  jsou rozměry podle obrázků obr.5.1. Podobná je i úprava ze strany vakua. Pokud by nebylo možné navrženou geometrii dielektrického okénka realizovat, je vhodné použít mezistupeň plněný vhodným plynem, například SF<sub>6</sub>. Jeho vlastnosti jsou známy z vysokonapěťové impulsní techniky [4.1], [4.2].



**Obr.5.1a** Návrh změny uspořádání okénka virkátoru pro navázání výkonu do zavřeného vlnovodu

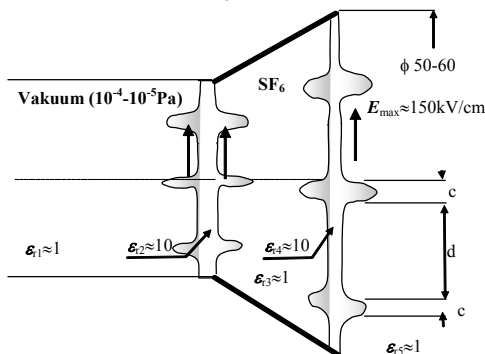


**Obr.5.1b** Návrh změny uspořádání okénka virkátoru pro navázání výkonu do vlnovodu



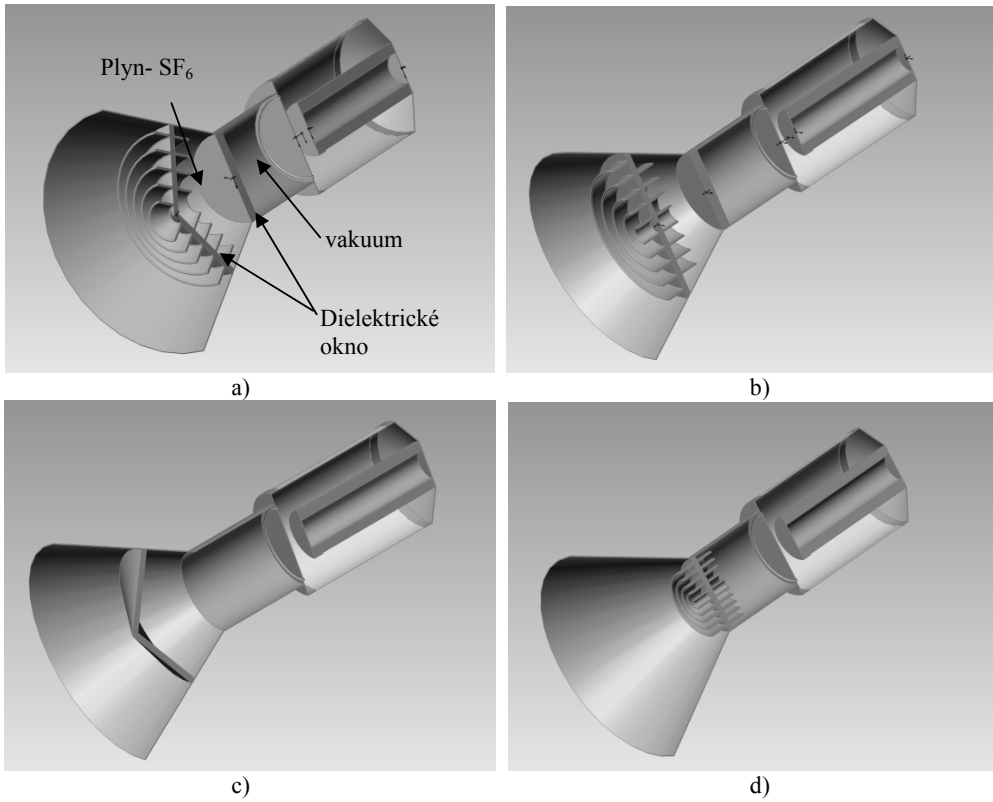
**Obr.5.1c** Návrh změny uspořádání okénka virkátoru pro navázání výkonu do vlnovodu naplněného plynem

Výsledný koncept přechodu mezi virkátorem a vnějším okolím axiálního virkátoru je zachycen na obr.5.2.

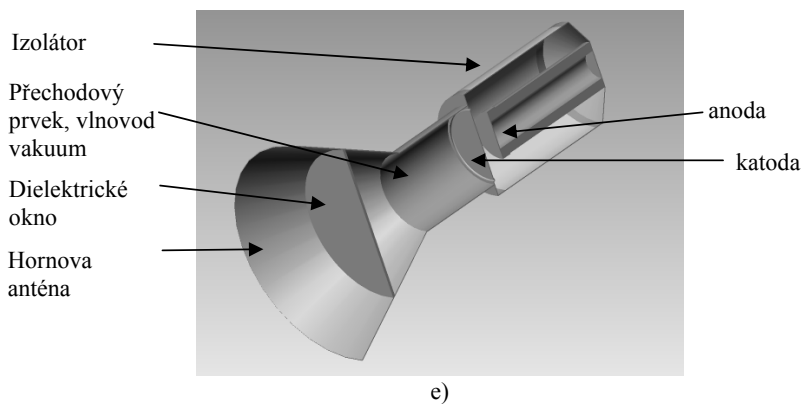


**Obr.5.2** Návrh změn uspořádání okénka virkátoru pro navázání výkonu do volného prostoru

Základní geometrické varianty numericky analyzovaného modelu odvozené ze schémat obr.5.1 obr.5.2 jsou zobrazeny na obr.5.3



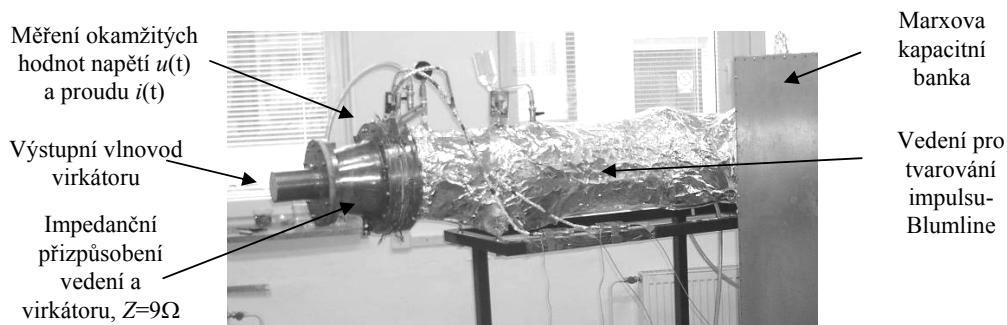
**Obr. 5.3** Geomerické modely variant modelu virkátoru



**Obr. 5.3** Geomerické modely variant modelu virkátoru

Na obr. 5.3 a) až e) je zobrazení geometrických modelů virkátorů. Liší se tvarem výstupního dielektrického okna, způsobem řešení přechodu výstupního okna do volného prostoru. V obr. 5.3 a) je konstrukce tvořena tvarovaným dielektrickým oknem s žebrováním zvyšujícím mezní elektrickou intenzitu na povrchu jak ze strany vzduchu tak ze strany oddělovacího plynu. Tuto přechodovou část vlnovodu odděluje druhé dielektrické okno. Je na rozhraní plyn a vakuum. Varianta z obr.5.3 b) se od první liší tvarem dielektrického okna mezi vlnovodem plněným plynem a volným prostorem. Tato varianta je vzhledem k technologii výroby dielektrického okna výhodnější. Varianta z obr.5.3 c) je návrh bez oddělovacího vlnovodu s plynem. Problémy mohou nastat s udržením požadovaného stupně vakua. U zvolené varianty je poměrně náročný tvar povrchu okna -dielektricka ve výstupním okně vzhledem k dostupnosti technologie výroby. Proto byla navržena varianta z obr.5.3 d). Spolehlivosti udržení elektrické intenzity na povrchu dielektrického výstupního okna je dosaženo volbou jeho tvaru. Jiným řešením varianty z obr.5.3d) je volba pouze plochého tvaru okna. Zde je riziko překročení mechanické pevnosti materiálu a narušení těsnosti kontaktu dielektrika s vlnovodem.

Pro numerické modelování byl použit návrh z obr. 5.3a). Virkátor je umístěn v zapouzdřeném koaxiálním vedení a jsou omezeny okrajové podmínky modelované úlohy. Na konci vedení a na vstupu virkátoru je generován napěťový impuls se strmostí náběžné hrany 450kV/0.1 ns.



Obr. 5.4 Experimentální pracoviště s virkátorem

## 5.1 SDRUŽENÝ MODEL ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE A POHYBUJÍCÍCH SE ELEKTRICKY NABITÝCH ČÁSTIC

Numerický model vychází z formulace redukováných Maxwellových rovnic podle Heavisidova způsobu zápisu pro veličiny intenzit a indukci elektromagnetického pole

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_T, \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (23)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (24)$$

kde  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického pole,  $\mathbf{B}$  je indukce magnetického pole,  $\mathbf{J}_T$  je proudová hustota,  $\mathbf{D}$  je indukce elektrického pole. S respektováním rovnice kontinuity

$$\operatorname{div} \mathbf{J}_T = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (25)$$

Vektorové funkce jsou vyjádřeny pomocí skalárního elektrického potenciálu  $\phi_e$  a vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{A}$ , přičemž po Coulombovské kalibraci [9] je vztah mezi veličinami vyjádřen jako

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \phi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (26)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (27)$$

Celková proudová hustota z výrazu (4)  $\mathbf{J}_T$  s respektováním rychlosti pohybujících se elektricky nabitých částic  $\mathbf{v}$  v magnetickém poli je

$$\mathbf{J}_T = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{\partial(\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t} + \frac{\gamma}{q} \left( \frac{m d\mathbf{v}}{dt} + l\mathbf{v} + k \int_t \mathbf{v} dt \right). \quad (28)$$

kde  $m$  je hmotnost částice s respektováním relace (19b),  $q$  je elektrický náboj pohybující se částice,  $\gamma$  je měrná vodivost prostředí z makroskopického pohledu,  $l$  je koeficient tlumení,  $k$  je koeficient tuhosti okolního prostředí. Materiálové elektromagnetické vztahy pro makroskopickou část modelu jsou reprezentovány výrazy

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (29)$$

kde indexy veličin permeabilit a permitivit  $r$  označují hodnotu relativní veličiny a 0 hodnotu veličiny pro vakuum. Vazba mezi makroskopickou částí modelu a mikroskopickou (dynamika částic v elektromagnetickém poli) je popsána vztahy silového působení na jednotlivé elektricky nabitě částice v elektromagnetickém poli a je respektován vliv pohybu elektricky nabitých částic na okolní elektromagnetické pole. Tento model byl aplikován na experimentálně ověřených měřeních a konfrontován s těmito výsledky [17]. Vazba je vyjádřená pomocí výrazu (28) a vztahu

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} + l\mathbf{v} + k \int_t \mathbf{v} dt = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \frac{q}{\gamma} \frac{\partial(\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t}. \quad (30)$$

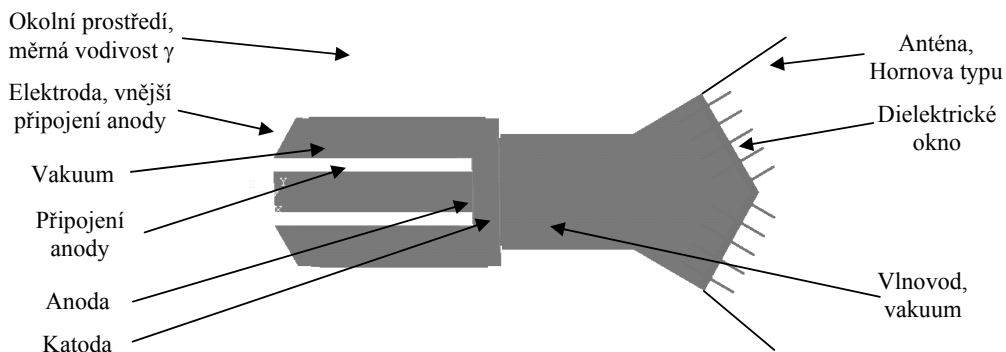
Vzhledem k tomu, že virtuální katoda a prostor pohybu elektricky nabitě částice se nenachází v silném externím magnetickém poli a zrychlení částice je převážně způsobeno vlivem intenzity elektrického pole na mezi katodou a anodou (podle testů [17]), lze výraz (30) zjednodušit na tvar

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E}), \quad (31)$$

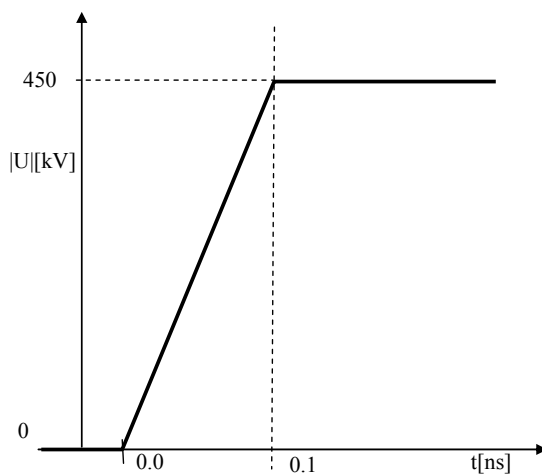
Aplikací Galerkinovy metody na nalezení minima funkcionálu jak bylo například popsáno v [1], [8] nebo [16] a respektováním okrajových podmínek se získá numerický model jako soustava nelineárních rovnic. Ta se řeší standardními metodami.

## 5.2 ANALÝZA SDRUŽENÉHO MODELU IMPULSNÍHO MIKROVLNNÉHO ZDROJE

Geometrický model v plně třírozměrné variantě byl vytvořen podle návrhu z obr.5.3a. Přesné rozměry a detaily konstrukce jsou například uvedeny ve zprávě [18]. Model byl realizován a formulován v jazyce APDL v systému ANSYS. Podle dostupných údajů byl nachystán numerický model obr.5.5 pro testování chování částic při definovaném elektrickém impulsu přivedeném na část anoda-katoda elektrický impuls podle obr.5.6.

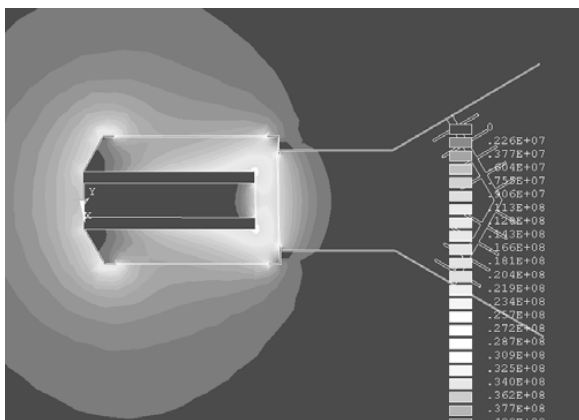


**Obr. 5.5** Řez geometrickým modelem virkatoru



**Obr. 5.6** Okamžité hodnoty vstupního napětí modelu virkátoru- anoda-katoda

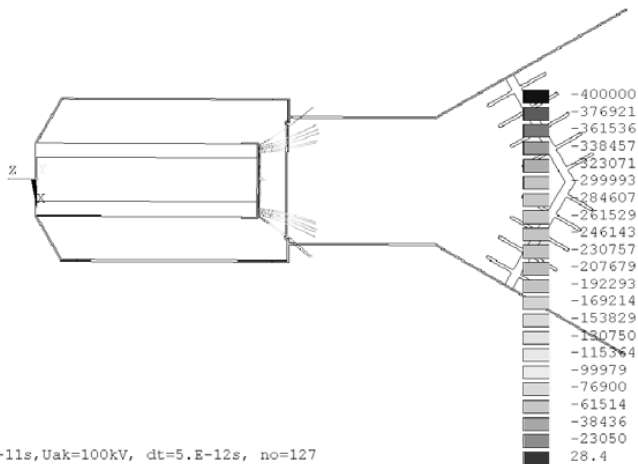
Rozložení modulu intenzity elektrického pole v řezu modelu je zobrazeno na obr.5.7. Nastavená vzdálenost mezi anodou a katodou byla  $z_{AK}=18\text{mm}$ . Analýza a interpretace výsledků byla stanovena vzhledem k parametrům napěťvého impulsu, obr. 5.6. Podle tvaru impulsu byly zadávány okrajové podmínky elektrického potenciálu v časových okamžicích s intervalem  $\Delta t=5$  ps, a řešena trajektorie všech emitovaných elektricky nabitých částic z anody. Parametry částic odpovídaly elektronům. Ze získaných dat lze sesavit chování svazku během přivedeného napěťvého impulsu mezi anodu a katodu. Příklad zobrazení trajektorie je na obr.5.8.



Obr. 5.7 Řez modelem virkatoru – vyhodnocení modulu intenzity elektrického pole  $E$



Obr. 5.7 Řez modelem virkatoru – vyhodnocení modulu intenzity elektrického pole  $E$



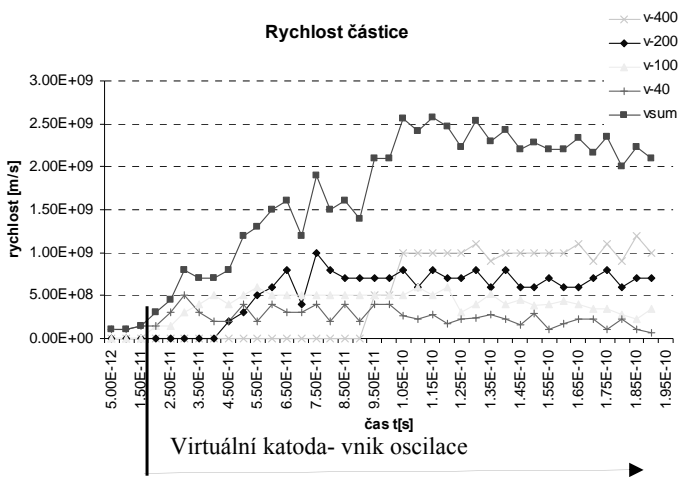
Obr. 5.8 Řez modelem virkatoru – vyhodnocení trajektorie elektronového svazku pro časový okamžik  $t=35ps$ , napětí anody  $U_{ak}=100kV$

Z analýzy vyplývá, že svazek je dutý. Potvrdila se velká citlivost očekávaného výstupního mikrovlnného výkonu v závislosti na vzdálenosti anoda-katoda, na tvaru povrchu anody, tvaru a způsobu uchycení katody, délce vlnovodu za katodou směrem k výstupnímu oknu. Při analýze okamžité rychlosti a střední rychlosti elektronů ve svazku lze nalézt pro diskrétně zvolené hodnoty napětí anoda-katoda  $U_{AK}$  podmínky oscilace na základě blíží se rychlosti světla a změně okamžité rychlosti  $v$  ukázané například ve vztahu (19). V obr.5.9 je vyhodnocena okamžitá rychlost pro napětí  $U_{AK}$  40, 100,200 a 400kV. Průběh je vyhodnocován s klidovou hmotností elektronu  $m_0$  proto, aby bylo zřejmé zda nastanou podmínky pro oscilaci a vznik virtuální katody. Z analýzy numerického modelu lze tak vhodně měnit jak tvar vstupního napěťového impulsu a zkoumat podmínky vzniku virtuální katody, tak nalézt vliv síly elektronového svazku na očekávaném výstupním mikrovlnném výkonu, délku oscilace generátoru, frekvenční spektrum generované virkátorem.

## 6. OPTIMÁLNÍ REŽIM MIKROVLNNÉHO GENERÁTORU S VIRTUÁLNÍ KATODOU

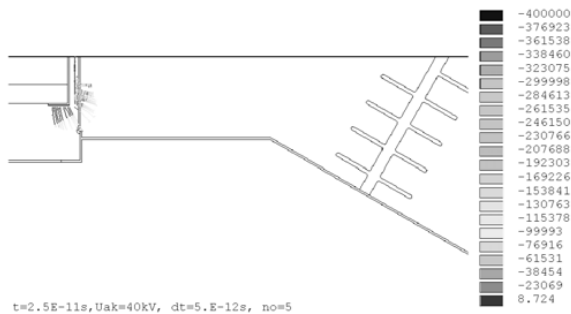
Podle předchozích odstavců této práce se na modelech a realizovaných experimentech ověřovaly jak měřicí metody, tak fyzikální vlastnosti navržené koncepce. Z nashromážděných informací z teoretické i praktické oblasti (technologie výroby) návrhu vznikly základní návrhy (včetně rozměrů jednotlivých prvků) impulsního mikrovlnného generátoru.

Byly provedeny analýzy vlivu tvaru a vzdálenosti mezi anodou a katodou, tvaru anody a uchycení katody. Z těchto analýz byly navrženy konstrukční úpravy zkoušeného vzorku generátoru. Například na obr.6.1- obr.6.3 je zachycena základní citlivostní analýza tvaru a povrchu anody s očekávaným vlivem na průběh anodového proudu a nastavení základní geometrie pro hledání optima geometrie anody známými optimalizačními metodami [16].

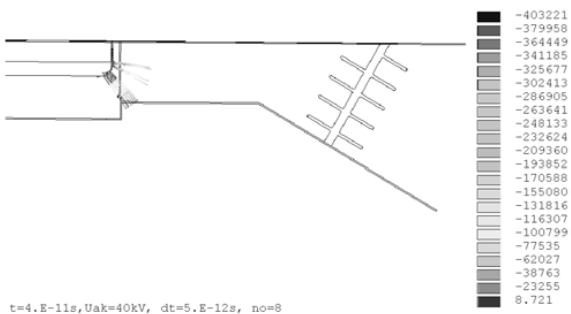


Obr. 5.9 Vyhodnocení okamžitých rychlostí elektronového svazku pro čtyři časové okamžiky napěťového impulsu.

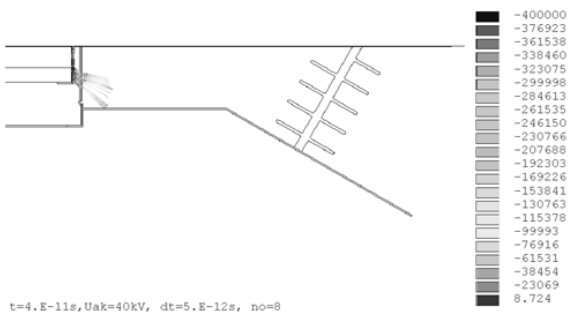




**Obr. 6.1** Elektronový svazek v oblasti anoda-katoda- původní návrh, trajektorie částic,  $t=25$  ps

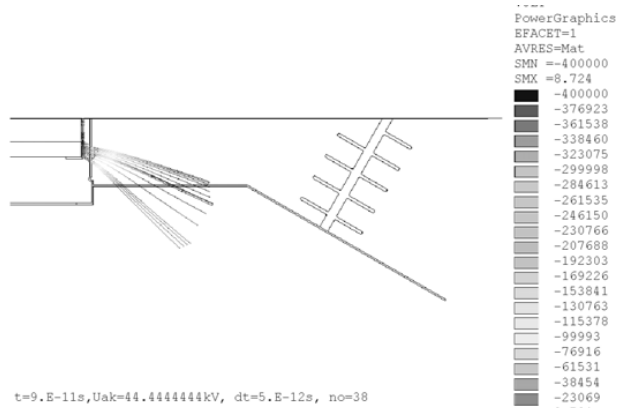


**Obr. 6.2** Elektronový svazek v oblasti anoda-katoda- 1.změna plochy a tvaru anody,  $t=40$  ps



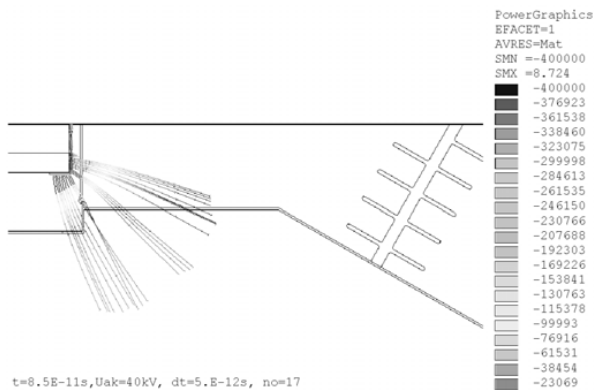
**Obr. 6.3** Elektronový svazek v oblasti anoda-katoda- 2.změna plochy a geometrie anody,  $t=40$  ps

Podle řešení rozložení elektrického pole z obr.5.7 je trajektorie zajímavá tím, že končí na stěnách vlnovodu. Tedy byl vytvořen dutý svazek a nedopadá na dielektrické okno na konci vlnovodu. Takovýto efekt je pro řešení návrhu generátoru žádoucí.

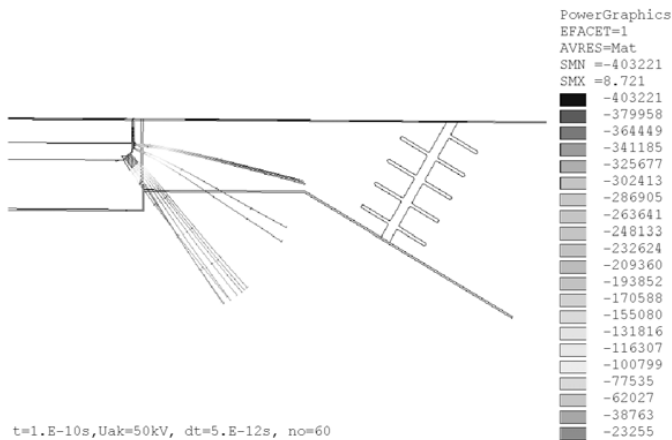


**Obr. 6.4** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru -trajektorie pro ostrou geometrii, aktivní plocha anody pouze na čele anody,  $t=90$  ps

Pokud se katoda vytvoří s aktivním povrchem po stranách (válcová axiální a částečně radiální směr), dojde k nežádoucí emisi elektronů přímo v oblasti dutiny virkátoru, obr.6.5. Při pokusu o tvarování anody dojde ke změnám trajektorie, obr.6.6.



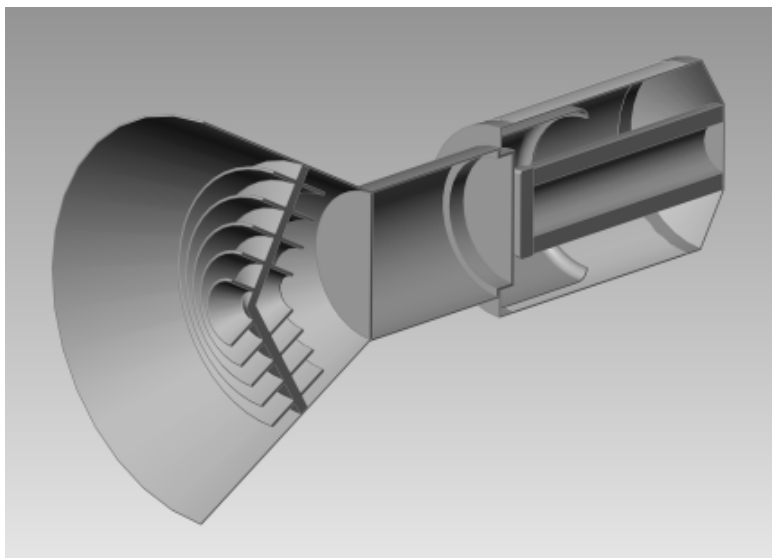
**Obr. 6.5** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru -trajektorie pro "ostrou geometrii", aktivní plocha na radiální i axiální straně anody,  $t=85$  ps



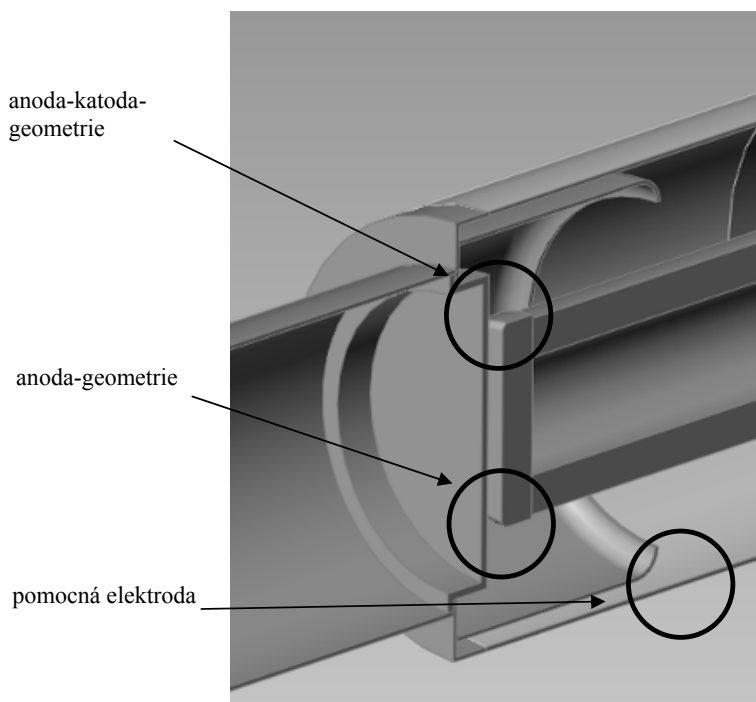
**Obr. 6.6** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru -trajektorie pro "ostrou geometrii", změna geometrie,  $t=100$  ps

Z obr.6.6 je patrná změna trajektorie, ale také změna elektrické proudové hustoty (stále zadávané shodné podmínky emise na anodě). Tím se změní spektrální rozložení generovaného elektromagnetického výkonu.

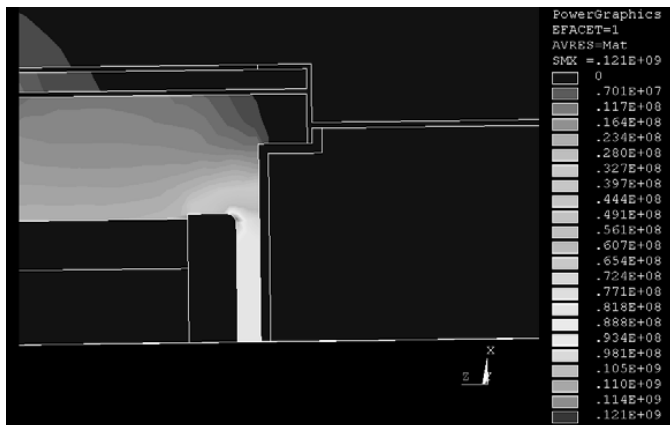
Po analýze výše uvedených skutečností byl model virkátoru aktualizován podle požadavků na vyzářený výkon a jeho frekvenční spektrum. Na obr.6.7 je nový návrh modelu. Ten je doplněn o elektrodu, která brání sekundární emisi elektronů v nežádoucích částech virkátoru. Také nalezené kritické parametry pomocí citlivostní analýzy se v návrhu modelu virkátoru projeví a doplnily numerický model o návrh změny tvaru anody, obr.6.8.



**Obr. 6.7** Aktualizovaný model virkátoru



**Obr. 6.8** Aktualizovaný model virkátoru - detaily úpravy geometrie

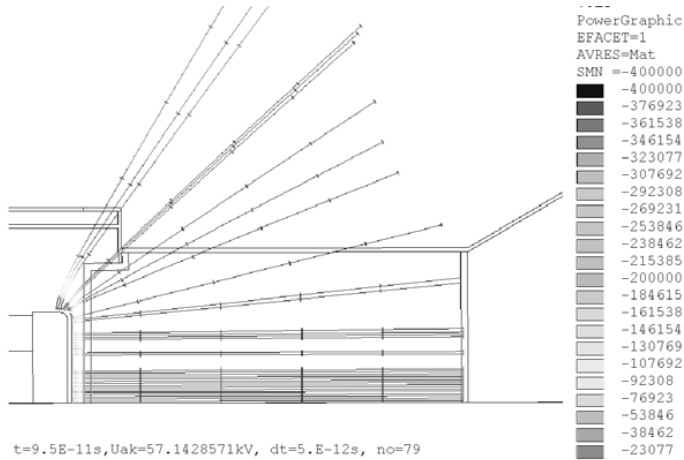


**Obr. 6.9** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru - intenzita elektrického pole v upraveném numerickém modelu

Vzhledem ke změně geometrie modelu a dalším úpravám, obr.6.8, jak u tvaru a nastavení hran anody, tak uspořádání anoda -katoda, se rozdíl modulu intenzity elektrického pole na přechodu radiální a axiální aktivní části anody zmenšil vzhledem k prvnímu modelu na necelý 1.5x násobek změny podélu profilu axiální části katody, obr.6.9.

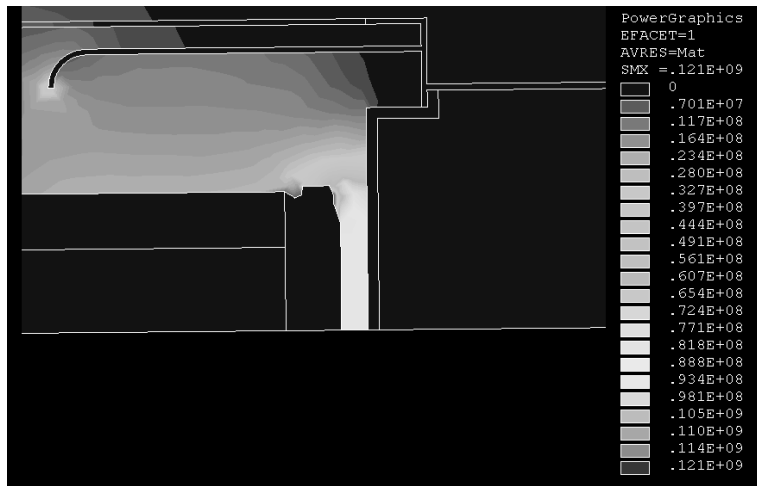
Z analýzy modelu ale vyplývá, že trajektorie elementárních částic se ale výrazně změnila a odpovídá dosud prováděným experimentům v laboratoři. Analýza rozložení trajektorií částic je zobrazena na obr.6.10. Objevuje se rovnoběžný svazek, semi-dutý, je evidentní dopad elektronového svazku na výstupní okénko vlnovodu. Zde dojde k výboji jak ze strany vakua, tak ze strany vzduchu jak bylo teoreticky předpokládáno a experimentem ověřeno, obr.7.3.

Následovala optimalizace tvaru anody a katody s cílem nalezení maxima vyzářeného výkonu v požadovaném frekvenčním spektru.



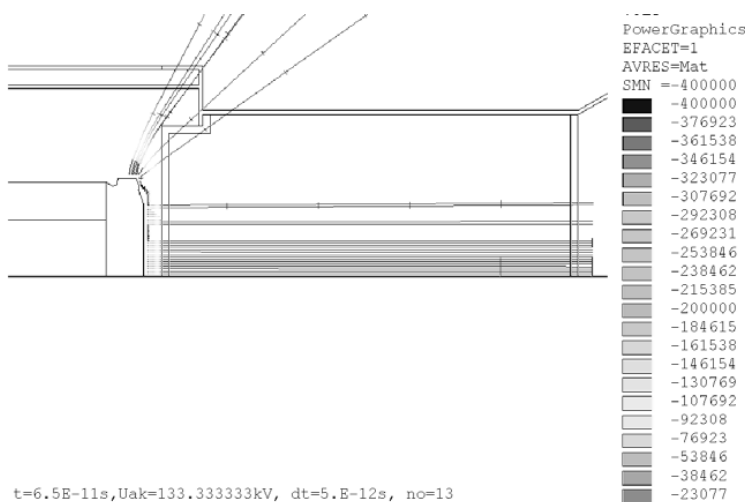
**Obr. 6.10** Vyhodnocení nového modelu virkátoru -trajektorie pro základní změněný návrh geometrie,  $t=95$  ps

Vzhledem k daným možnostem a omezujícím podmínkám byla v modelu upravena geometrie anody a provedena analýza trajektorie částic.



**Obr. 6.11** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru - intenzita elektrického pole-upravené detaily modelu - anoda

Podle výsledků z obr.6.11 bylo zajištěno nastavení nižšího rozdílu modulu intenzity elektrického pole  $E$  na radiální a axiální straně aktivní části anody. Výsledek trajektorie je na obr.6.12 a lze jej považovat za optimální k požadavku vyzářeného mikrovlnného výkonu a jeho spektrálního rozložení.



**Obr. 6.12** Vyhodnocení zjednodušeného modelu virkátoru - intenzita elektrického pole a trajektorie částic pro model s upravenou anoda,  $t=65$  ps

Následovalo dokončení modelu z variant na obr. 5.3 a to výhodným návrhem z obr.5.3a vzhledem k minimalizaci přeskoků v ústí vlnovodu a technologické realizovatelnosti experimentálního vzorku generátoru.

## 7. EXPERIMENTY S MIKROVLNNÝM IMPULSNÍM GENERÁTOREM

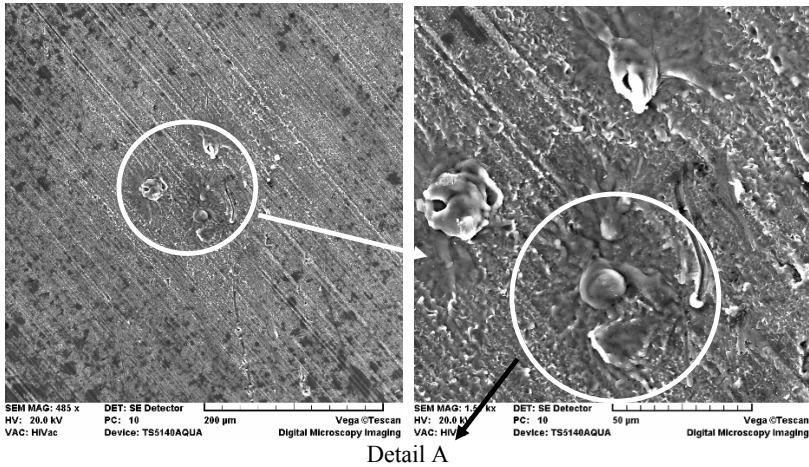
Byla provedena řada experimentů (od roku 2001) s návrhem a ověřením funkce virkátoru publikovaných v pracích [5]- [7]. Byly vyvinuté speciální měřicí metody a zařízení pro měření okamžitých hodnot napětí na vstupu virkátoru, okamžitých hodnot proudu anody a katody, měření mikrovlnného výkonu, energie impulsu, průběhu okamžitého mikrovlnného výkonu vyzářeného jak do uzavřeného prostoru tak do volného prostoru [2], [3], [3.1]- [3.14]. Byly získány cenné zkušenosti v oblasti konstrukce, měření i numerického modelování [4.1]- [4.7].

Mezi zajímavé části experimentů patří například zkoumání povrchu katody po opakovaných impulsích. Očekávalo se nalezení destruktivního účinku svazku na katodě. Byly nalezeny pouze stopy po výboji zbytkovými ionty, ovšem katoda (tl.  $30\mu\text{m}$ ) nebyla perforovaná, obr.7.1. Nastal tunelový efekt. Podle lokálních povrchových stop po výboji s těžkými částicemi byl vyhodnocen tvar elektronového svazku, jak je zobrazen na obr.7.2. Tento stav byl později potvrzen pomocí analýzy numerického modelu.

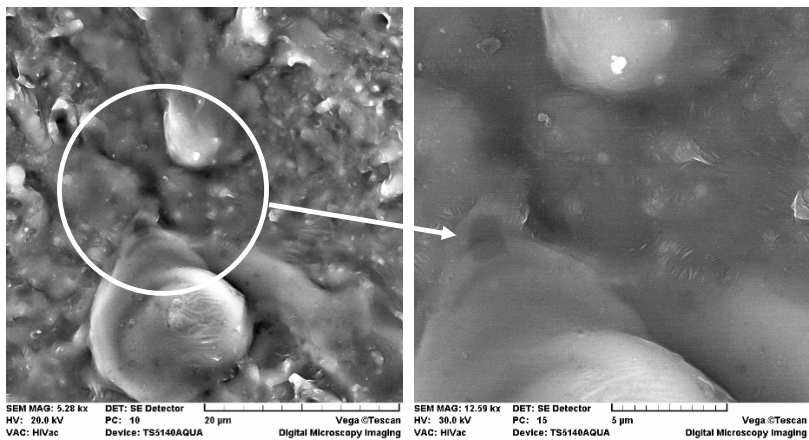
Byly ověřeny například předpoklady s překročením elektrické povrchové pevnosti vzduchu na rozhraní dielektrického okna axiálního virkátoru, podle obr.5.1. Na obr. 7.3 je zachycen průběh změn v okolí virkátoru během buzení napěťovým impulsem. Byl použit senzor s citlivostí v infračerveném pásmu. Na snímcích se ukazují poruchy obrazu, což je efekt přítomnosti gama záření. Po skončení funkce virkátoru snímky tyto poruchy již nevykazují. Na jednom ze snímků je patrný přeskok vlivem překročení elektrické

pevnosti vzduchu v tečném směru. Ze snímku je patrný intenzivní ohřev z vnitřní strany okna a to vlivem dopadajícího svazku elektronů.

Další experimenty byly například zaměřeny na ověření proudu anodou, katodou a nalezení oblasti virtuální katody. Ta musí ležet v dostatečné vzdálenosti od výstupního dielektrického okna. Důvod je patrný z analýzy numerického modelu obr. 6.1- obr.6.3. Na obr. 7.4a) je zobrazen přípravek pro určení polohy virtuální katody a záznam průběhů okamžitých hodnot napětí mezi katodou a elektrodou v oblasti virtuální katody  $u_{KvK}$  a proud virtuální katody  $i_{vK}$ , obr.7.4.b) a schéma konfigurace pomocného přípravku obr.7.4c).

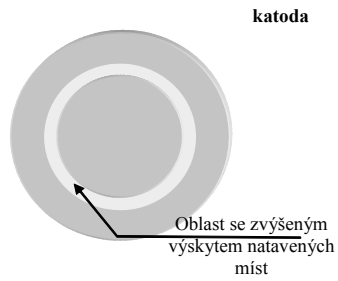


**Obr.7.1** Zvětšení povrchu fólie – odstraněná tavenina za fólie po použití virkátoru

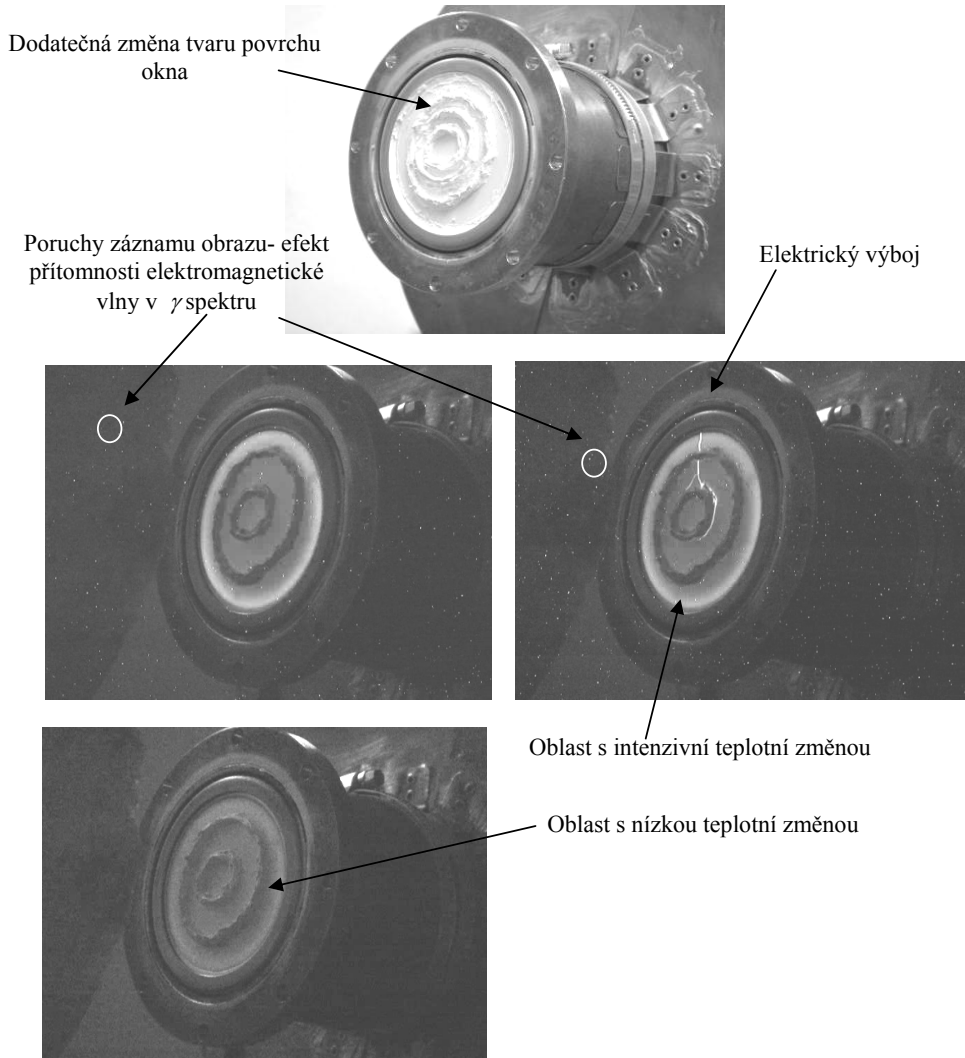


**Obr.7.1** Zvětšení povrchu fólie – odstraněná tavenina za fólie po použití virkátoru, Detail A

Během výzkumu chování elektronového svazku v závislosti na parametrech tvaru impulsu, geometrické konfiguraci virkátoru byl zkoumán vliv vnějšího magnetického pole na tvar elektronového svazku. To bylo experimentálně zjišťováno, obr.7.5 a) až obr.7.5c) a na základě měření okamžitých hodnot napětí mezi katodou a elektrodou v oblasti virtuální katody  $u_{KvK}$  a proud virtuální katody  $i_{vK}$  jak je zachyceno na záznamu obr.7.5 d). Výsledný funkční vzorek virkátoru je zobrazen na obr.7.6.



**Obr.7.2** Schéma rozmístění natavených oblastí na katodě.

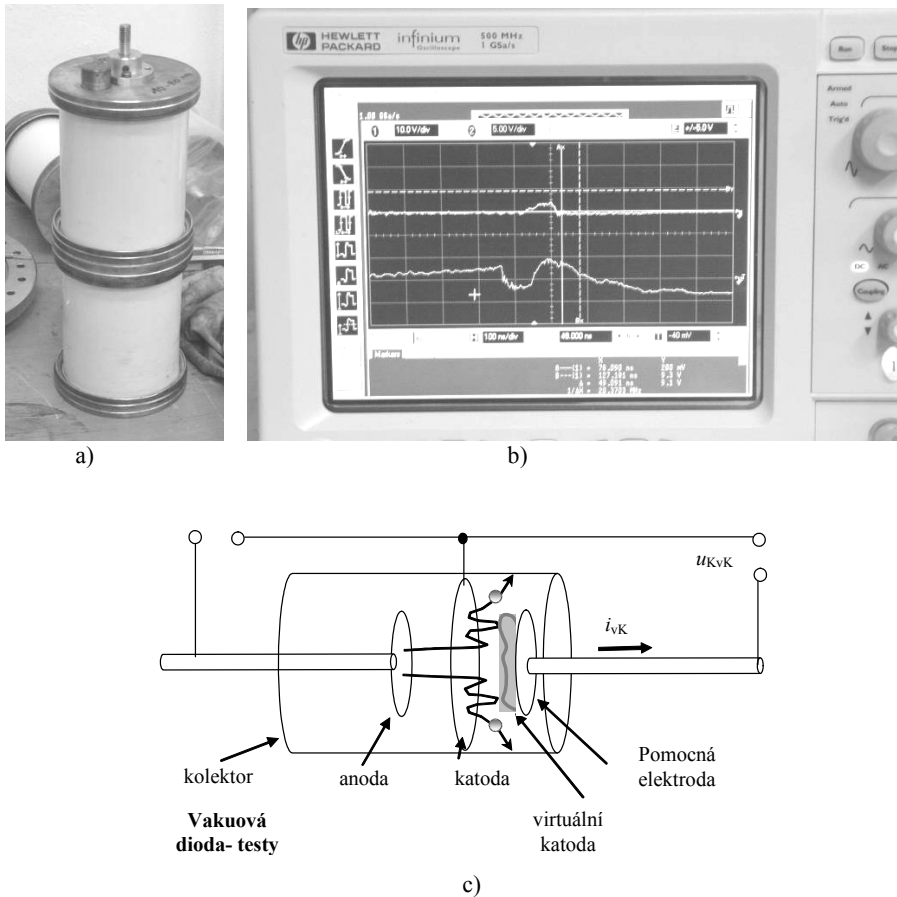


**Obr.7.3** Schéma rozmístění zábran na vnější straně dielektrického okna.



## 7.1 MĚŘICÍ METODY

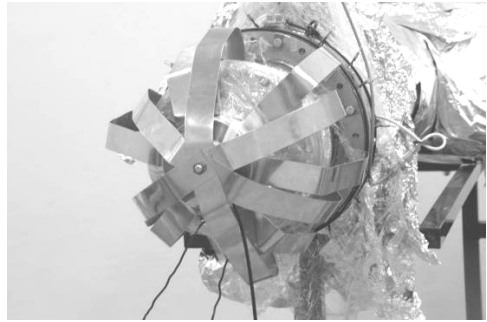
Vzhelem k náročným podmínkám na extrémně rychlé jednorázové měření byly vyvinuty měřicí metody a zařízení, které by vyhovovaly náročným požadavkům na přesnost měření. Bylo nutné navrhnout a zpracovat jak metody tak metodiky měření napětí v rozsahu 0-500kV s očekávanou náběžnou hranou v délce 0.1ns [3]. Byly vyvinuty metody měření proudu do rozsahu 50kA s očekávanou délkou impulsu u paty impulsu 50ns [3]. Byly vyvinuty a patentovány metody pro měření okamžitého mikrovlnného výkonu, energie impulsu [2], [18], [19]. Na obr. 7.7 a) je zobrazen příklad naměřeného průběhu okamžitého mikrovlnného výkonu vyzářeného vlnovodem s kruhovým průřezem do uzavřeného prostoru. Senzor byl několikastupňově kalibrován pomocí impulsů nižších výkonů a větších délek impulsu ( $T_{imp}=1000-10000ns$ ) jak bylo popsáno například v pracích [1], [2], [3], [18]. Na obr.7.8 je zobrazen záznam měření proudu mezi anodou a katodou virkátoru  $i_{AK}$ .



**Obr.7.4** Přípravek pro měření polohy virtuální katody a), naměřený proud a napětí na pomocné elektrodě za virtuální katodou b), schéma umístění pomocné elektrody c)

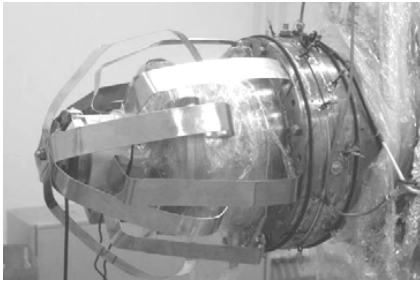


a)

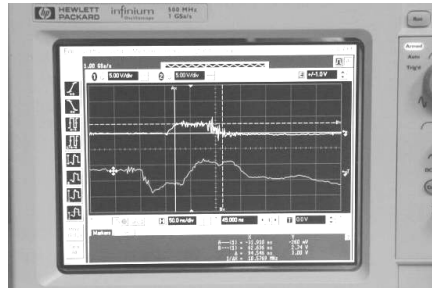


b)

**Obr.7.5** Testy vlivu magnetického pole na tvar elektronového svazku



c)



d)

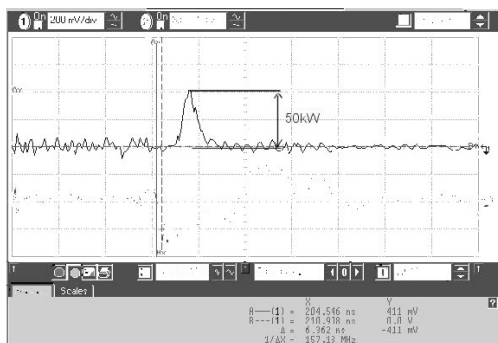
**Obr.7.5** Testy vlivu magnetického pole na tvar elektronového svazku a) dodatečně vnější vlnití, b) záznam průběhu napětí a proudu na virkátoru



**Obr.7.6** Kontrukční díly navržené varianty virkátoru

## 7.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Experiments brought valuable experience in the field of plasma research, microwave sources and measurement methods. Overall progress in research was enabled by appropriate supplementation of experiments with numerical modeling, both of the cathode itself, as well as of the designed parts and measuring devices. The solution of the cathode got into the phase of applied research with the goal of optimizing the output performance and lifetime of the cathode.

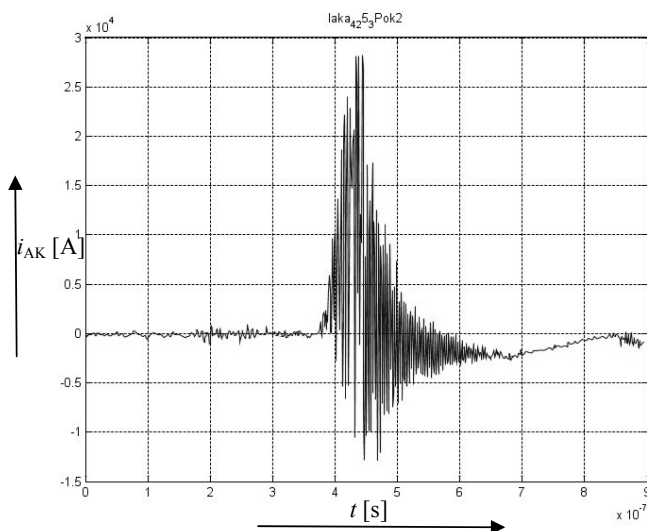


a)



b)

**Obr.7.7** Naměřený průběh okamžitých hodnot mikrovlnného výkonu vyzářeného virkátorem a), kalibrace senzoru v EMC zkušebně VOP 026 Šternberk, divize VTUP Vyškov



**Obr.7.8** Naměřený průběh okamžitých hodnot elektrického proudu mezi anodou a katodou

## 8. ZÁVĚR

Základní a aplikovaný výzkum prováděný při návrhu výkonového mikrovlnného impulsního generátoru založeného na relativistickém pohybu elektricky nabitých částic (Čerenkovo záření) přinesl řadu zkušeností v teoretické elektrotechnice a dalších oborech elektrotechniky, elektroniky. Jednoznačně se prokázalo nutné propojení teoretické elektrotechniky, experimentů a numerického modelování k úspěšnému získání řešení.

Celý projekt byl soustavně veden teoretickými úvahami, výsledky modelování pomocí numerických modelů a řadou experimentů a jejich porovnávání.

Vlastní přínos práce spočívá v oblasti numerického modelování, v návrhu řady modelů, v jejich ověření a kalibraci pomocí unikátních experimentů.

Významným příspěvkem v oblasti návrhu modelů je kombinace doplňujících se odlišných typů numerických modelů, které umožnily značné urychlení výpočetního procesu při dosažení dostatečné

přesnosti. Cenná je metodika využití a práce s numerickým modelem, ve které experimentální výsledky dosažené numerické analýzy potvrdily.

Díky důslednému spojení teoretických a experimentálních poznatků se podařilo opakovaně ověřit a prokázat funkci výkonového mikrovlnného impulsního generátoru s virtuální katodou.

Autor se podílel na formulaci a řešení numerických modelů, na formulaci teorií a hypotéz pro ověření principu impulsního generátoru. Dále pracoval v oblasti výzkumu některých měřících metod a metodologii měření. Podílel se na návrhu koncepce impulsního generátoru a spolupracoval při sestavování konstrukční dokumentace návrhu funkčních vzorků s pracovišti a týmy spoluřešitelů.

Při řešení projektu bylo dosaženo unikátní technologie výroby jednoduchého výkonového mikrovlnného impulsního generátoru s několika mezinárodními ohlasy, MBDA UK, Diehel Munition System SRN, BOFFORS Sweeden, NASA satelitní výzkum.

## 9. LITERATURA

- [1] Fiala, P.: *Modeling and design of pulsed power generator*. Habilitation thesis, VUT FEKT Brno, no. 13, ISBN 80-214-1346-8, August 2005, VUT FEKT Brno, Czech Republic.
- [2] Drexler, P.; Fiala, P. *Methods for HP EM pulse measurement*. IEEE SENSORS JOURNAL, 2007, no. 7, vol. 7, pp. 1006-1011. ISSN: 1530-437X.
- [3] Fiala, P.; Drexler, P. *Sensors and Methods for Electromagnetic Pulse Identification*. Sensors & Transducers, 2006, vol. 74, no. 12, pp. 844-854. ISSN:1726-5479.
- [4] Fiala, P.: *Finite element method analysis of electromagnetic field inside pulsed power generator*. 2-nd European Symposium on Non-Lethal Weapons May 13-14, 2003. Ettlingen, Germany 13.-15.5.2003, pp.52-1, 52-11.DWS Werbeagentur und Verlag GmbH, Karlsruhe.
- [5] 2-nd European Symposium on Non-Lethal Weapons May 13-14, 2003.Ettlingen, SRN.
- [6] 3-rd European Symposium on Non-Lethal Weapons May 12-14, 2005.Ettlingen, SRN.
- [7] 4-th European Symposium on Non-Lethal Weapons May 14-16, 2007.Ettlingen, SRN.
- [8] Fiala, P.: *Analýza sdruženého elektromagnetického modelu pulsního zdroje napětí nebo proudu*. UTEE FEKT v Brně, Laborať modelování a optimalizace polí v elektromechanických systémech VUT FEKT v Brně, Výzkumná zpráva č.3/02, 2002.
- [9] Stratton, J, A.: *Teorie elektromagnetického pole*, SNTL, Praha 1961.
- [10] [www.sandia.gov/pulspowert/hedief](http://www.sandia.gov/pulspowert/hedief)
- [11] A de Roeck, H.Junng, *HERA and THE LHC* CERN–2005–014, DESY–PROC–2005–001, 14 December 2005
- [12] *PARTON DISTRIBUTIONS SUMMARY REPORT FOR THE HERA - LHC WORKSHOP PROCEEDINGS*, arXiv:hep-ph/0511119v1 9 Nov 2005
- [13] *The Superconducting Electron Positron Linear Collider with an Integrated X-Ray Laser Laboratory*, DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg Germany, March 2001 ISBN 3-935702-00-0 ISSN 0418-9833, arXiv:hep-ph/0106315v1 28 Jun 2001
- [14] J.O. Rossi, *A 100 kV/200 A Blumlein Pulser for High-Energy Plasma Implantation*, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 34, NO. 5, OCTOBER 20
- [15] J.O. Rossi, *A High power electromagnetics: Enviroments, Integrations, effects and hardening*. HPE 20.1.2007, conference, Bonascre, France, 2007.
- [16] P. Fiala: *Modeling of short circuit transformer tests*. PhD thesis, DTEEE FEI BUT, Brno 1998, Czech Republic.
- [17] P. Fiala, R. Kadlec, and T. Kriz. *Numerical modeling of electromagnetic field in a tornado*, PIERS 2008, Hanzghou, March, China, 2008.
- [18] Fiala, P.: *OPTIMÁLNÍ NÁVRH MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ PULSNÍCH ZDROJŮ*. UTEE FEKT v Brně, Laborať modelování a optimalizace polí v elektromechanických systémech VUT FEKT v Brně, Výzkumná zpráva č.1/05, 11.11.2005.
- [19] Drexler, P.: *SENZOR PRO MĚŘENÍ EXTÉMNĚ KRÁTKÝCH OSAMOCENÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH IMPULSŮ*. UTEE FEKT v Brně, Patentová přihláška ČR, 2008.

## IMPULSNÍ ZDROJE, KONSTRUKCE, TEORIE

- [1.1] Grananstein, V, L - Alexeff, I.: *High power microwave sources*. Artech House, 1987, ISBN 0-89006-241-2.
- [1.2] Barker, R, J.-Schamiloglu, E.: *High power microwave sources and technologies*. IEEE Press, 1992, ISBN 0-7803-6006-0.
- [1.3] Gapanov, A, V.-Gregorov- Granatstein, V, L.: *Applications of high power microwaves*. Artech House, 1994, ISBN 0-89006-699-x.
- [1.4] Cowan, M.-R.B.Spileman: *Magnetocumulative generators*. Springer Verlag, 2001, ISBN 0-387-98786-x.
- [1.5] *Proceedings, 13<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference*. IEEE, 2001, USA, ISBN 0-7803-7122-4.
- [1.6] *Proceedings, 12<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference*. IEEE, June 27-30, 1999, California-USA, ISBN 0-7803-5498-2.
- [1.7] *Proceedings, 11<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference*. IEEE, June 29-July 2, 1997, Maryland-USA, ISBN 0-7803-4213-5.
- [1.8] Barker, R, J.- Schamiloglu, E.: *High-Power Microwave Sources and Technologies*. John Wiley and Sons, 2001, ISBN 0-7803-6006-0.

[1.9] Barker, R. J.: *High-Power Microwave Sources and Technologies*, IEEE, 2001; ISBN 0-7803-6006-0.

## VF RELATIVISTICKÉ EFEKTY

[2.1] Moisan, M.- Pelltier, J.: *Microwave excited plasmas*. Elsevier, 1992, ISBN 0-444-88815-2.

[2.2] Johnson, R. G.: *Designer notes for microwave antennas*. Artech House, 1997, ISBN 0-89006-521-7.

## SENZORY, DETEKCE, MĚŘENÍ, DIAGNOSTIKA

[3.1] Ott, H.W.: *Noise reduction techniques in electronic systems*. John Wiley and Sons, 1988, ISBN 0-471-85068-3.

[3.2] Graeme, J.G.: *Photodiode amplifiers OP AMP Solutions*. McGraw Hill, 1995, ISBN 0-07-024247-x.

[3.3] Radmanesh, M.M.: *Radio frequency microwave electronics illustrated*. Prentice Hall, 2000, ISBN 0-13-027958-7.

[3.4] Chang, K.: *Handbook of microwave and optical components*. John Wiley and Sons, 1989, ISBN 0-471-61366-5.

[3.5] Electronics and electrical engineering laboratory: *Measurements for competitiveness in electronics*. Electronics and electrical engineering laboratory, Department of commerce. 1993, electronic edition.

[3.6] Kodali, V.: *Engineering electromagnetic compatibility*. IEEE Press, 1996, ISBN 0-7803-1117-5.

[3.7] Kodali, V.P.: *Engineering Electromagnetic Compatibility, Second Edition Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models*, IEEE, 2001; ISBN 0-7803-4743-9.

[3.8] Garg, R. et al.: *Microstrip antennas design handbook*. Artech House, 2001, ISBN 0-89006-513-6.

[3.9] Booske, J.H. et al.: *Studies of nonthermal effects during intense microwave heating of crystalline solids*. Proc. 3-rd Symposium Microwave processing of materials. Vol. 269, Pittsburgh, 1992, pp. 137-143.

[3.10] Proceedings, *High power microwave electronics: Measurements, identifications, applications (MIA-ME2001) 2001 conference on IEEE*. IEEE, 2001, ISBN 0-7803-6743-X.

[3.11] Proceedings, Microwave conference "Microwave and telecommunication technology", 2001 11-th International crimean IEEE conference on IEEE. IEEE, 2001, ISBN 9-6679-6800-6.

[3.12] Diaz, L.- Milligan, T.: *Antenna engineering using physical optics*. Artech House, 1996, ISBN 0-89006-732-5.

[3.13] Arai, K.: *Measurement of Mobile Antenna Systems*. Artech House, 2001, ISBN 1-58053-065-6.

[3.14] Keiser, C.: *Principles of Electromagnetic Compatibility, Third Edition (IPF®)*. Artech House, 1987, ISBN 0-89006-206-4.

## TEORIE SILNÝCH MAGNETICKÝCH POLÍ, MODELOVÁNÍ

[4.1] Knoepfel, H.: *Pulsed high magnetic fields*. North-Holland publishing company, Amsterdam-London, 1970.

[4.2] Turch, P.J.: *Megagauss physics and technology*. Plenum Press, New York, 1980, ISBN 0-306-40461-3.

[4.3] Bolomey, D.C.- Gardiov, F.E.: *Engineering applications of the modulated scatterer technique*. Artech House, 2001, ISBN 1-58053-147-4.

[4.4] Lemke, R.W.-Clark, M.C: *Theory and simulation of high power microwave generation in a magnetically insulated transmission line oscillator*. J.Appl.Physics,62, pp.3436-3470, 1987.

[4.5] Novac, B.M. et al.: *Experimental methods with flux-compression generator*. Science and Technology journal, October, pp. 211-222, 1996.

[4.6] Boslough, M,B.- Assay, J,R.: *High pressure shock compression of solids*. Springer-Verlag, 1993, ISBN 3-541-63786-2.

[4.7] Koludzija, B.: *Electromagnetic Modeling of Composite Metallic and Dielectric Structures*. Artech House, 2002, ISBN 0-89006-360-5.

## 10. ABSTRACT

The thesis presents the concept, basic research, and numerical modelling of the power pulsed microwave generator. The author proposes the design and experimental verification of the power pulsed generator. The design of the generator is based on the application of the relativistic electron beam effect – the Cherenkov effect; within the research procedures, numerical and (partly) analytical models of the generator were built and verified by experimental tests. The final test proved the functionality and correctness of the applied numerical models.

The thesis brings novel approaches to be applied in numerical modelling; in this respect, a large number of models are proposed, including the experiments ensuring verification and calibration. Important contribution to the field of numerical modelling is achieved in the interconnection between different types of numerical models that facilitate considerable acceleration of the computing process with a pre-defined accuracy. Another significant element is the methodology for the utilization and operation of the applied numerical models in which the numerical solution was confirmed by the experimental results.

Analysis of the demonstrated numerical models exposed certain unpredictable effects; at the following stage of the research, these effects were experimentally verified. The functionality of the microwave power pulsed generator was repeatedly proved via the consistently strengthened link and complementation between of the theoretical knowledge and experimental experience. A large number of supportive experiments were discussed and performed; thus, the theoretical hypothesis was verified. The schedule of the research into the power generator design was proposed in such a manner that the principles of expert systems controlling was effectively applied.

The author participated not only in the formulation and solution of numerical models but also in the theoretical formulation of verification principles for the pulsed generator. Moreover, he was active within the development of measurement methodology and utilization of measuring methods. He participated in proposing the conception and design for the pulsed power generator and cooperated in compiling the related documentation.