

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 184

ISSN 1213-418X

Pavel Fiala

**MODELOVÁNÍ A NÁVRH
VÝKONOVÉHO
PULSNÍHO ZDROJE**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

**MODELOVÁNÍ A NÁVRH VÝKONOVÉHO PULSNÍHO
ZDROJE**

MODELLING AND POWER PULSED GENERATOR DESIGN

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2005

Klíčová slova: Metoda konečných prvků, model, integrální rovnice, parciální diferenciální rovnice, výkon, pulsní výkonový generátor, matematický model, fyzikální model, intenzita elektrického pole E , magnetická indukce B , proudová hustota J , analýza přechodného děje, Poyntingův vektor, Faradayův zákon, měření.

Keywords: Finite element method, model, integral equations, partial differential equations, power, pulsed power generator, mathematical model, physical model, electric intensity E , magnetic flux density B , current density J , transient analysis, Poynting's vector, Faraday's law, measurement.

Originál je uložen:

UTEE FEKT VUT v Brně
Kolejní 4
612 00 Brno

© Pavel Fiala, 2005
ISBN 80-214-3050-8
ISSN 1213-418X

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	6
3. CÍL PRÁCE	7
4. PRINCIP A KONCEPCE GENERÁTORU	7
4.2 KONCEPCE PULSNÍHO ZDROJE	9
5. MODEL GENERÁTORU	9
5.1 ZJEDNODUŠENÝ MODEL SE SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY	11
5.2 MATEMATICKÝ MODEL DEFINOVANÝ POMOCÍ PARCIÁLNÍCH DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC	12
5.3 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL	13
5.4 PRÁCE S MODELEM	14
6. NÁVRH KONSTRUKCE	14
7. NAVRŽENÉ MĚŘICÍ METODY	15
8. ZÁVĚREČNÝ TEST PULSNÍHO GENERÁTORU	15
8.1 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	17
8.2 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A TEORETICKÝCH MODELŮ	17
9. ZÁVĚR	18
10. LITERATURA	18
PULSNÍ ZDROJE, KONSTRUKCE, TEORIE	18
VF ZÁŘIČE, PRINCIPY	19
ČIDLA, MĚŘENÍ, DIAGNOSTIKA	19
TEORIE SILNÝCH MAGNETICKÝCH POLÍ, MODELOVÁNÍ	19
ABSTRACT	20

ŽIVOTOPIS

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 – zaměstnanec VUEP Brno, později IVEP Brno
 1988–1989 – základní vojenská prezenční služba
 1989–1990 – zaměstnanec VUEP Brno, později IVEP Brno
 1990 – zaměstnanec 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
 1998 – ukončeno postgraduální studium na FEI VUT v Brně (Ph.D.) a obhájena disertační práce „Modelling of current transformers with short circuit tests“
 2003 – ředitel Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky VUT FEKT v Brně

Vědecká, odborná a pedagogická činnost:

Základní výzkum v oblasti numerického modelování metodou hraničních prvků a metodou konečných prvků (1986–2003), výzkum zaměřen na aplikaci ve vysokonapěťové oblasti silnoproudé elektrotechniky – materiálové vlastnosti v oblasti elektrických zkratů a výbojů (1988–1990). Podílel se na řešení několika desítek projektů (hospodářské smlouvy) – spolupráce s ABB EJV s. r. o. Brno (1986–2003), ELEN Brno 1998, FISCHER – Návrh a analýza VN přístrojový transformátor, spolupracoval s firmami ELIS s. r. o. Brno – návrh netypického indukčního průtokoměru (2001), PROTOTYPA a. s. Brno řešení průmyslového grantu FD-K/042 „Výkonové mikrovlnné generátory.“ (2001–2003). P. Fiala je spoluvůdcem návrhů vyráběných řad přístrojových transformátorů v ABB EJV Brno. Zabývá se modelováním nelineárních vlastností materiálů (1992–1996), modelováním, analýzou a optimalizací sružených elektromagnetických–teplotních–mechanických úloh spojených s modely, které jsou formulovány pomocí soustředných parametrů (1992–2003), modelováním úloh s turbulentním prouděním a elektromagnetickým polem s vlivem chemického složení materiálů (2000–2003). Sestavil a otestoval několik výkonných algoritmů pro optimalizaci netriviálních úloh (1996–2000). P. Fiala se zabýval modelováním a měřením nelineárních materiálových vlastností – hystereze (1991–1993). Zabývá se návrhem a modelováním výkonových pulsních zdrojů (2001–2005 PROTOTYPA a. s.) a výkonových mikrovlnných generátorů (2002–2005 PROTOTYPA a. s, Tesla Vršovice, Ústav fyziky plazmatu AV ČR Praha). Své poznatky pravidelně prezentuje na vědeckých konferencích. V pedagogické oblasti se P. Fiala podílel nebo podílí na výuce kurzů Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky v předmětech Teoretická elektrotechnika, Teorie elektrických obvodů (1990–2001), Elektrotechnika 1 (2001–2004), Elektrická měření (1996–2000), Měření v elektrotechnice (2001–2004), Elektromagnetismus (1990–2003), Užítý elektromagnetismus (1996–2000). Vytvořil kurzy Základy programování v jazyku C pod Windows (1991–1995), Základní kurz programování pod MS Windows (1992–1997), 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, Užítý elektromagnetismus (1999–2001), je spoluautorem skript Počítače a programování II (2003). Je garantem kurzu Seminář C++ (2004).

1. ÚVOD

V současné době se snad nenalezne odvětví lidské činnosti, kde se nepoužívají elektronická zařízení s elektronickými obvody. Ty téměř výhradně používají polovodičových diskretních nebo integrovaných elektronických prvků. Hustota integrace obvodů výrazně stoupá a tím se částečně snižuje jejich odolnost proti průrazu vlivem intenzity elektrického pole. Pokud se na polovodič s p-n přechodem objeví v závěrném směru napětí, které překročí jeho mezní hodnotu, dojde k destrukci přechodu. Protože se v každodenním životě stále více používá složitých elektronických zařízení, roste oprávněný požadavek na zvýšení jejich spolehlivosti. Elektronická zařízení je proto nutné koncipovat a konstruovat i s ohledem na jejich ochranu před poruchou nebo zničením a tak snížit na minimum možnost případného ohrožení uživatelů nebo obsluhy, zvýšit její spolehlivost. Jednou z mnoha příčin poruch elektronických zařízení je destrukce polovodičových struktur působením pulsního elektromagnetického pole. V současnosti vzrůstá potřeba ochrany elektrických zařízení proti těmto vlivům. Ucelený systém návrhu, ochrany, zkušebnictví byl v roce 1996 shrnut do nového oboru a je znám jako Elektromagnetická kompatibilita (EMC) [3.6], [3.7], [3.14], [3.21], [3.13], [3.10].

Rozvinula se metodika měření a měřicí metody, které mají testovat elektronická a elektrotechnická zařízení na jejich odolnost vůči vnějšímu rušení elektromagnetickým polem. Součástí metod je ověření správné funkce zařízení také pomocí elektromagnetických pulsů, které se generují v pulsních zdrojích [4.1], [4.2], [4.4], [4.5], [4.6], [1.1]-[1.9]. Testované výrobky jsou umístěny v elektromagnetickém pulsním poli. Pro tento test je zapotřebí mít k dispozici pulsní zdroj (mikrovlnný), který generuje potřebný krátký intenzivní elektromagnetický puls. Při testech se ale také musí s dostatečnou přesností elektromagnetické pole změřit. Proto se souběžně s vývojem pulsních mikrovlnných zdrojů rozvíjí metody, metodika, identifikace a měření pulsních elektromagnetických polí.

Výkonovými pulsními zdroji jsou pro účely této práce míněny takové zdroje, které využívají přechodové děje elektrických soustav k soustředování energie do jednorázových impulsů. Přitom je využíván zejména Faradayův jev a rychlosti změny magnetického toku je dosahováno jak obvodovými řešeními, tak i mechanickým pohybem s využitím nejrůznějších druhů transformací energií (chemická energie, potenciální energie, kinetická energie atd.). Takové zdroje vyžaduje především fyzika vysokých energií ke studiu částic a v poslední době stoupá i zájem obranného průmyslu o celou třídu zbraní se směřovanou energií a o zbraně nezabíjející (*non-lethal*). Silný elektromagnetický impuls, 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) a již zmíněným zkouškám EMC. Bez EMC si nelze dost dobře představit vývoj celé řady elektronických zařízení používaných zejména ve zdravotnictví, vojenství, telekomunikacích, dopravě, ale i v běžném životě. Souběžně se ve světě tedy rozvíjí disciplíny usilující o zvýšení odolnosti elektronických zařízení ruku v ruce se snahou generovat stále silnější a kratší elektromagnetické impulsy využitelná jak pro zkoušení EMC, tak i ve vojenské oblasti pro realizaci levné „elektromagnetické zbraně“ schopné vyřazovat z činnosti sofistikovanou elektronickou část výzbroje protivníka, případně aktivně bránit teroristickým činům (zastavováním automobilů, rušení komunikací). Pulsní zdroje koncipované pro tyto účely se nejčastěji dělí podle geometrické konstrukce, podle pohybu jádra generátoru:

GEOMETRICKÉ KONSTRUKCE NA

- **sférické,**
- **cyklindrické,**
- **planární.**

PODLE ZPŮSOBU DEFORMACE JÁDRA GENERÁTORU TLAKOVOU VLNOU PŘI ŘÍZENÉM VÝBUCHU

- **explozí,**
- **implozí,**
- **tlakem kapaliny,**

- **pinch efektem.**

PODLE OPAKOVATELNOSTI FUNKCE NA

- **jednorázové,**
- **opakovatelné.**

PODLE POUŽITÍ ZDROJE NA

- **laboratorní,**
- **pro základní výzkum,**
- **pro aplikovaný výzkum,**
- **experimentální jed nouúčelové.**

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

Pulsní zdroje jsou vyvíjeny pro různé typy aplikací. Jednou z oblastí, která je velmi důležitá pro základní výzkum, je základní fyzika částic. 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. Tento projekt nahradil v plném rozsahu jaderné zkoušky. Z-machin je stacionární pulsni laboratorní urychlovač, nejvýkonnější a s nejvyšší účinností na světě. Pracuje v oblasti gama záření. Zdroj Z vznikl zdokonalením jedenáct let starého zdroje PBFA II, který sloužil k výzkumům v oblasti iontové fúze. Puls, který se získá, má délku do 10ns a dosáhne špičkového výkonu až 290 TW, uvolní energii v oblasti gama záření do 1.9 MJ [5]. Tohoto zdroje se používá ke studiu materiálových vlastností, studiu přenosu tepla a částic radiací, což dříve nebylo možné při použití nukleárních výbuchů. Zdroje gama záření v Z zdroji produkuje plazma podobně jako u některých hvězd. Efekty vznikající při generaci krátkého výkonného pulsu pomohly vysvětlit mnohé nejasnosti pulsarů. Zdroj Z je tedy vrchol v oblasti konstrukce pulsniích zdrojů. 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 zdroji Z řádově nižší výkon, také finanční náročnost jejich provedení je mnohonásobně menší. Mezi záměry použití zdrojů byly i vojenské účely schematicky naznačené na obr. 2.1 [2]. Měly vytvořit dostatečnou energii v elektromagnetickém pulsu, který by bylo možné nasměrovat a přenést na větší či menší vzdálenost.



Obr. 2.1 Některé vojenské aplikace pulsniích výkonových generátorů

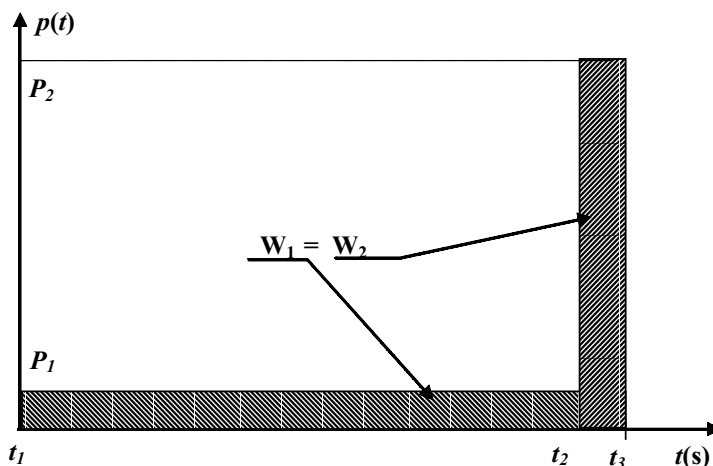
3. CÍL PRÁCE

Cíle habilitační práce je možné shrnout do několika stručných bodů. Jejich systematické rozčlenění je komplikované díky provázanosti jednotlivých prací, testů a experimentů.

- Hlavním cílem práce bylo navrhnout koncepci a základní konstrukci pulsního výkonového zdroje třídy malých výkonů do $P_{\max} \in \langle 1, 10 \rangle$ MW, délky impulsu $T_{\text{imp}} \in \langle 1, 10 \rangle$ μs , válcové geometrie s urychlujícím zařízením na bázi exploze výbušniny (imploze), pro jednorázové experimentální využití v návaznosti na vojenskou aplikaci ve třídě nezabíjejících zbraní.
- Navrhnout harmonogram prací a návaznost experimentů potřebných k ověření koncepce generátoru vedoucí k návrhu jeho konstrukce.
- Sestavit numerické modely formulované pomocí parciálních diferenciálních rovnic.
- Sestavit numerické modely se soustředěnými parametry a provést jejich kalibraci podle naměřených výsledků.
- Navrhnout metodiku měření jednorázového neopakovatelného děje pro prostory nebezpečné a výbušné.
- Navrhnout sestavu pracoviště, metody měření a přenosu dat pro velmi krátký neopakovatelný děj s následným zničením měřicích sond a okolních zařízení do vzdálenosti v okruhu s poloměrem 10 m.
- Porovnat numericky modelované a experimentálně naměřené výsledky, vyhodnotit úspěšnost projektu.

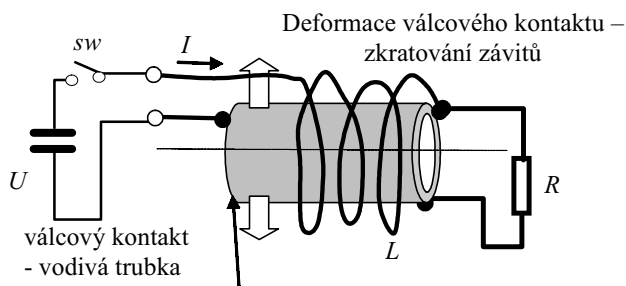
4. PRINCIP A KONCEPCE GENERÁTORU

Princip generátoru je založen na konstrukčním řešení parametrického induktoru, který s využitím Faradayova indukčního zákona dokáže energii paralelního LC obvodu transformovat na krátký puls s vysokou hodnotou špičkového výkonu. Na obr. 4.1 je zachycen princip změny okamžitého výkonu v pulsním zdroji. Zdroj běžné konstrukce využije energii nashromážděnou v magnetickém poli induktoru $W = 1/2 LI^2$ a ta je proměněna na reálné elektrické zátěži na elektrický výkon p_1 v intervalu od t_1 do t_3 . Pulsní zdroj, o kterém pojednává tato práce, dokáže také využít energii W , ale na připojené reálné zátěži ji promění na elektrický výkon p_2 v intervalu od t_2 do t_3 . Při návrhu zdroje byla snaha získat pro konstantní energii W co nejkratší interval $\langle t_2; t_3 \rangle$ a tím vyšší hodnotu špičkového elektrického výkonu P . Takovéto zařízení je obtížné sestavit bez parametricky řízené indukčnosti L . Za cenu snížení energie W se zkrátí délka impulsu. Díky vhodně časovaným parametrickým změnám indukčnosti L lze při respektování Faradayova indukčního zákona dosáhnout délek impulsu v řádu jednotek mikrosekund. Základní části a princip funkce generátoru znázorňuje obr. 4.2. Jako zdroj elektrické energie je použit kondenzátor nabitý na napětí U_m . Vinutí generátoru s induktancí L je do série zapojeno s reálnou elektrickou zátěží R . Po sepnutí spínače sw začíná protékat vinutím elektrický proud I . Ve vhodném okamžiku (pro první náhled je to okamžik, kdy proud má maximální hodnotu) se začne válec naplněný výbušninou (kontakt) deformovat a postupně zkratuje závit. K rychlé deformaci válcového kontaktu se používá účinku exploze (hexogen). Díky deformaci kontaktu se mění celková plocha cívky a zvyšuje se magnetický tok. Na zbývajících závitěch generátoru se mění hodnota napětí a za jistých okolností může dojít ke zvyšování hodnoty elektrického proudu v obvodu. Tím se zvyšuje okamžitá hodnota výkonu na elektrické zátěži R . Tento princip a další byly popsány v literatuře [1.1] až [1.9], [4.1], [4.2]. Nebyla zde ale uspokojivě vysvětlena závislost rychlosti deformace kontaktu, rozměrů vinutí a trubky na dosažené hodnotě pulsního výkonu.



Obr. 4.1 Princip změny průběhu okamžitého výkonu pulsním generátorem

Popsaný proces je schematicky zobrazen v obrázku obr. 4.3. Pro časový okamžik $t < t_0$ je zdroj (nabíjí kondenzátor C) odpojen od obvodu vypínačem sw_1 . V časovém okamžiku t_0 dojde k jeho sepnutí. Obvodem začne procházet elektrický proud $i(t)$ a na koncích cívky L se mění okamžitá hodnota napětí $u_L(t)$. Jestliže se okamžité hodnoty elektrického napětí a proudu vyhodnotí, například pro čas t_1 , získá se okamžitá hodnota činného výkonu $p(t)$ a je zaznamenána ve spodní části obrázku. S postupnou deformací válcového kontaktu se mění okamžité hodnoty napětí, proudu a výkonu. V okamžiku t_3 dojde k sepnutí spínače sw_2 a elektrický proud prochází vnější elektrickou zátěží s impedancí Z . V časovém okamžiku t_3 dojde k destrukci zařízení díky postupující detonační vlně způsobené explozí (tvarování válcového kontaktu). V grafech s časovou závislostí u , i , p je za příslušným časovým okamžikem naznačen teoretický průběh veličin, který by nastal v případě přerušeni deformace a destrukce válcového kontaktu generátoru.



Obr. 4.2 Základní funkční části generátoru PGV-1

Pro nalezení vhodných parametrů zdroje lze postupovat zásadně dvěma směry. První směr je ryze experimentální. Ten je finančně náročný, protože potřebuje k věrohodnému ověření jednoho návrhu řadu opakovaných testů, ze kterých se vyhodnotí hledané parametry. V tomto případě se cena vývoje neúměrně zvýší. Musí být pronajat zkušební prostor, test nelze opakovat na jediném kusu generátoru, někdy dojde ke ztrátě dat. Postup je do značné míry intuitivní.

Druhý postup spočívá v ryze teoretickém návrhu. Lze sestavit sofistikovaný matematicko-fyzikální model, který celý děj modeluje. Cena vývoje modelu je vysoká, pracnost také. Nastávají zde problémy s modely materiálových vlastností. Vývoj modelu je vzhledem k experimentům zdlouhavý a modely nevystihnou vždy náhodné nebo nahodilé jevy při funkci generátoru.

Pro postup návrhu koncepce, jeho ověření a konstrukce generátoru byla proto volena kombinace obou způsobů.

4.2 KONCEPCE PULSNÍHO ZDROJE

Nyní následuje v několika stručných částech shrnutí a směr volby koncepce pulsního výkonového generátoru. Na obr. 4.4 je schematicky znázorněna koncepce explozivního nebo implozivního pulsního zdroje. Funkce zdroje je založena na využití několika efektů. Prvním z nich je

- změna plochy S smyčky ve formulaci Faradayova indukčního zákona (1),
- změna magnetického pole \mathbf{B} vlivem vířivých proudů deformovaného válce (1),

$$\oint_{\ell} \mathbf{E}(t) \cdot d\boldsymbol{\ell} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}(t+dt)}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} + \oint_{\ell} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\boldsymbol{\ell} \quad (1)$$

kde ℓ je délka vodiče vinutí generátoru, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole v podélném směru vodiče. Jako významný jev lze využít

- pohybovou složku elektromotorického napětí (reprezentuje křivkový integrál v relaci (1)).
Hustota činného výkonu označené Poyntingovým vektorem $\mathbf{\Pi}$ je ze svorkového napětí

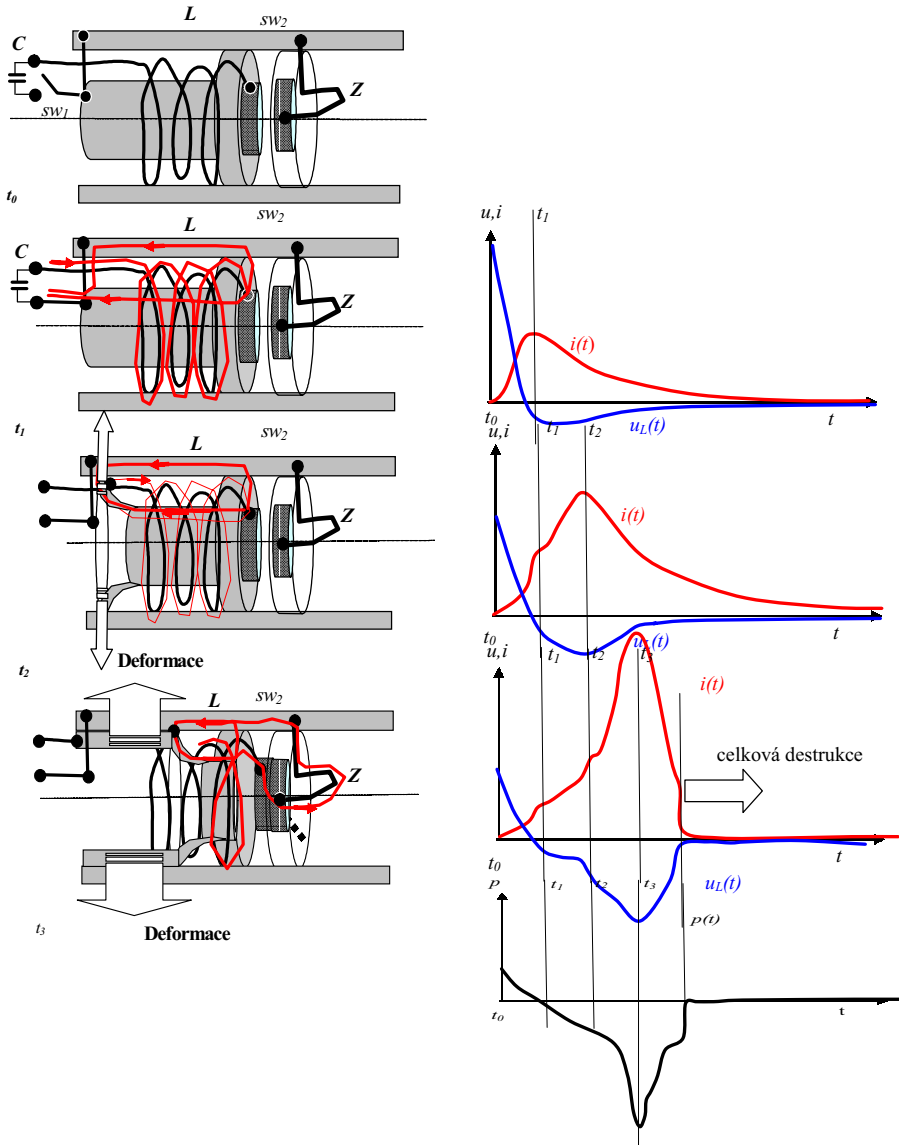
$$u_2(t) = u_1(t) - \frac{\partial}{\partial t} \iint_S B_0 dS - \oint_{\ell_c} (\mathbf{v} B_0) d\ell, \quad (2)$$

$$\mathbf{\Pi}_1(t) = \mathbf{E}(t) \times \mathbf{H}_0(t) = \begin{vmatrix} \mathbf{u}_r & \mathbf{u}_\varphi & \mathbf{u}_z \\ 0 & E_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & H_{0z} \end{vmatrix} = \mathbf{u}_r E_\varphi H_{0z}, \quad \mathbf{\Pi}_2(t) = \mathbf{E}(t) \times \mathbf{H}_0(t) = \begin{vmatrix} \mathbf{u}_r & \mathbf{u}_\varphi & \mathbf{u}_z \\ 0 & 0 & E_z \\ H_{0r} & 0 & 0 \end{vmatrix} = \mathbf{u}_\varphi E_z H_{0r}, \quad (3)$$

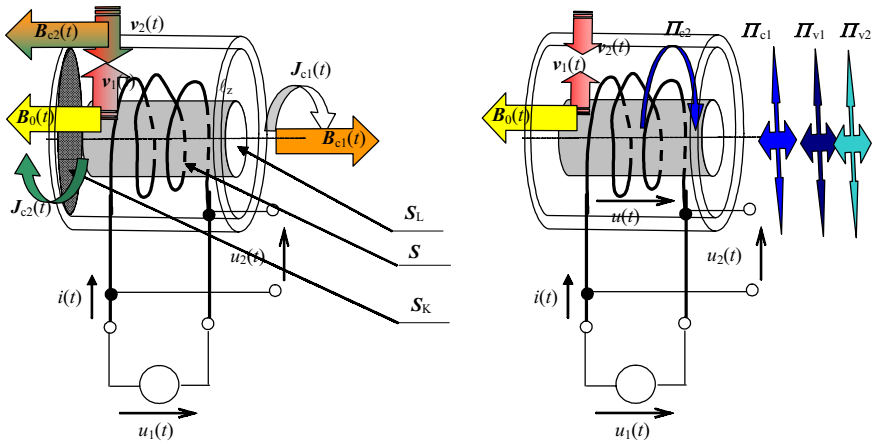
kde $u_2(t)$ je okamžitá hodnota napětí po deformaci, $u_1(t)$ okamžitá hodnota napětí před deformací, B_0 je maximální hodnota magnetické indukce v ose z , \mathbf{v} je vektor rychlosti deformace závitů generátoru, S je plocha obepnutá závitě, ℓ_c je délka závitů cívky, $\mathbf{\Pi}_1$, $\mathbf{\Pi}_2$ jsou jednotlivé složky Poyntingova vektoru, \mathbf{E} , \mathbf{H} jsou vektory intenzity elektrického a magnetického pole.

5. MODEL GENERÁTORU

Byly navrženy modely jak se soustředěnými tak s rozloženými parametry.

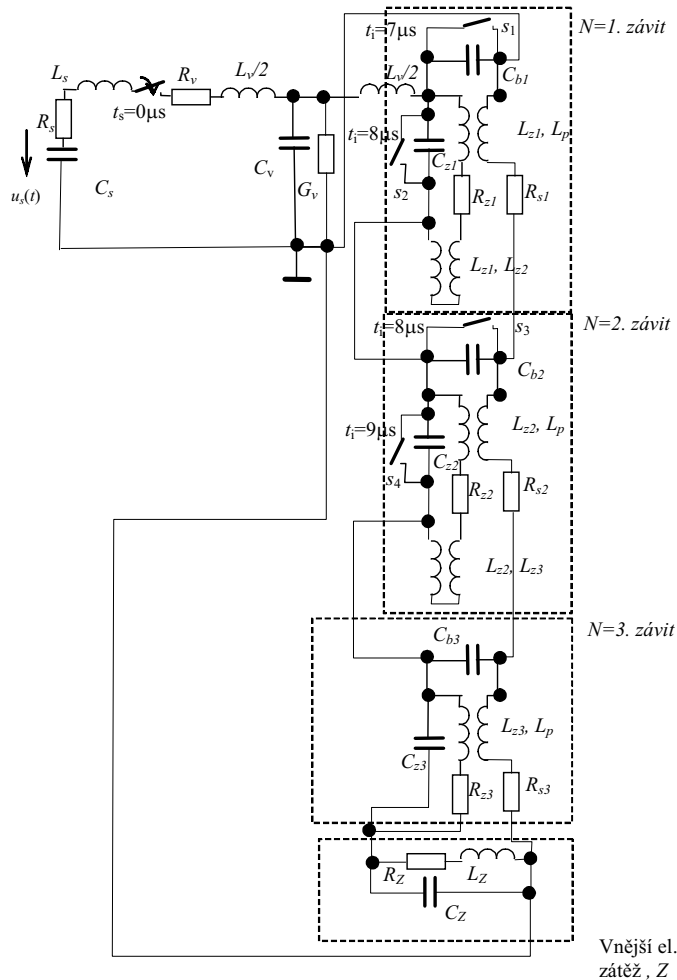


Obr. 4.3 Funkce výkonového pulsního generátoru



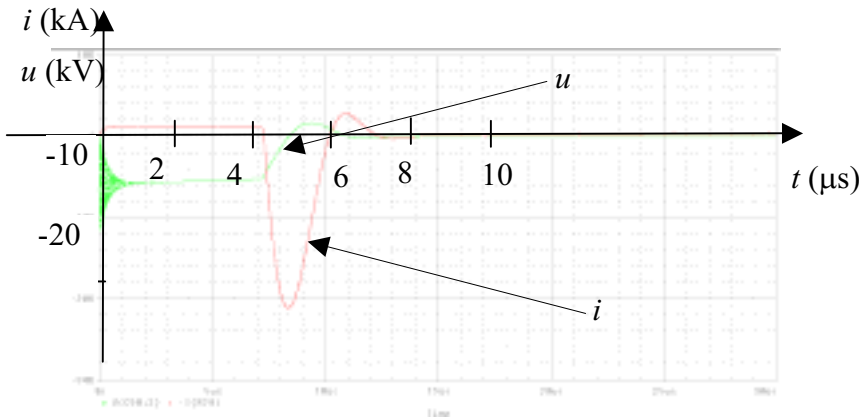
Obr. 4.4 Schéma doporučené koncepce generátoru explozivní i implozivní deformace válce

5.1 ZJEDNODUŠENÝ MODEL SE SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY

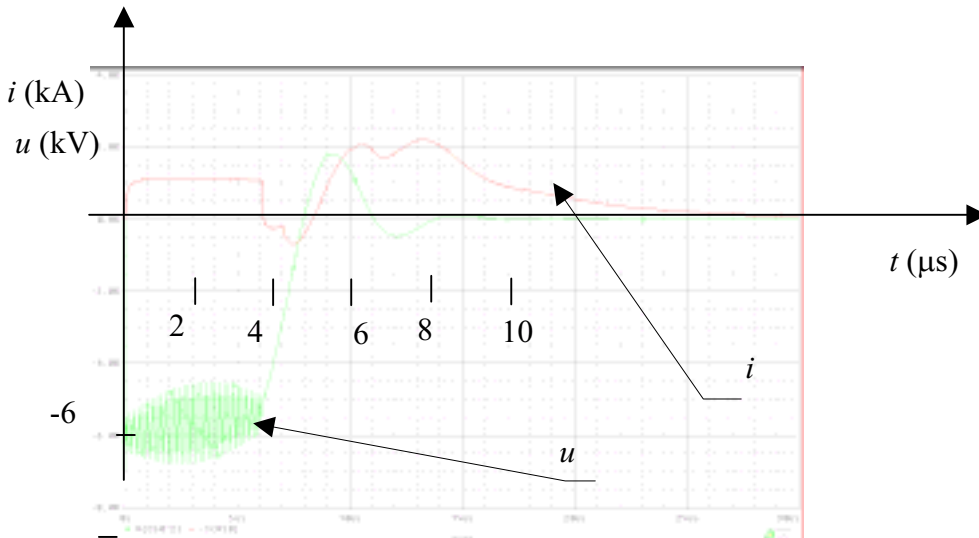


Obr. 5.1 Zjednodušený model pulsního generátoru se soustředěnými parametry, $U_{Cs0} = 6 \text{ kV}$

Na obr. 5.1 je navržené schéma modelu se soustředěnými parametry. Výsledky modelu jsou pro ideální cílový stav na obr. 5.2 a pro reálné provedení generátoru na obr. 5.3.



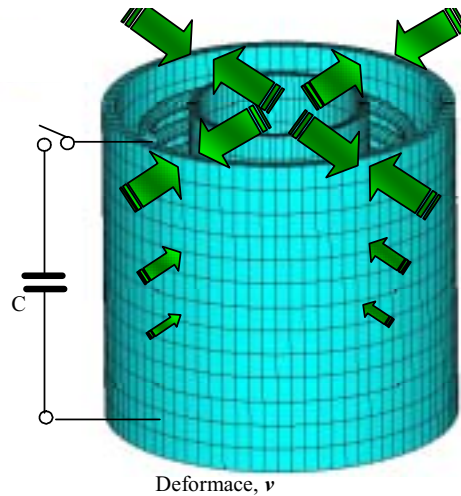
Obr. 5.2 Průběhy okamžitých hodnot napětí a proudů modelu pulsního generátoru se soustředěnými parametry – ideální průběh



Obr. 5.3 Průběhy okamžitých hodnot napětí a proudů z modelu pulsního generátoru se soustředěnými-realizovaný zdroj

5.2 MATEMATICKÝ MODEL DEFINOVANÝ POMOCÍ PARCIÁLNÍCH DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC

Varianta navrženého modelu respektuje vlastnosti pulsního zdroje podle obr. Navržené koncepce.



Obr. 5.4 Geometrický model pulsního zdroje s deformací obou kontaktních válců

5.3 MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL

Fyzikální model je založen na řešení redukovaných Maxwellových rovnic

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (4)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (6)$$

$$\text{div } \mathbf{J} = 0, \quad (7)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (8)$$

Materiálové vztahy jsou reprezentovány výrazy

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_v = \gamma \mathbf{E}, \quad (10)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}. \quad (11)$$

Vektorové funkce elektrického a magnetického pole (\mathbf{E}, \mathbf{B}) jsou vyjádřeny pomocí skalárního elektrického potenciálu ϕ_e a vektorového magnetického potenciálu \mathbf{A}

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \phi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (13)$$

Výsledná proudová hustota \mathbf{J} ze vztahu (4) je tvořena budící proudovou hustotou \mathbf{J}_s a proudovou hustotou způsobenou vířivými proudy \mathbf{J}_v . Pohybový efekt je respektován v modelu proudovou hustotou

$$\mathbf{J}_m = \gamma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (14)$$

Potom

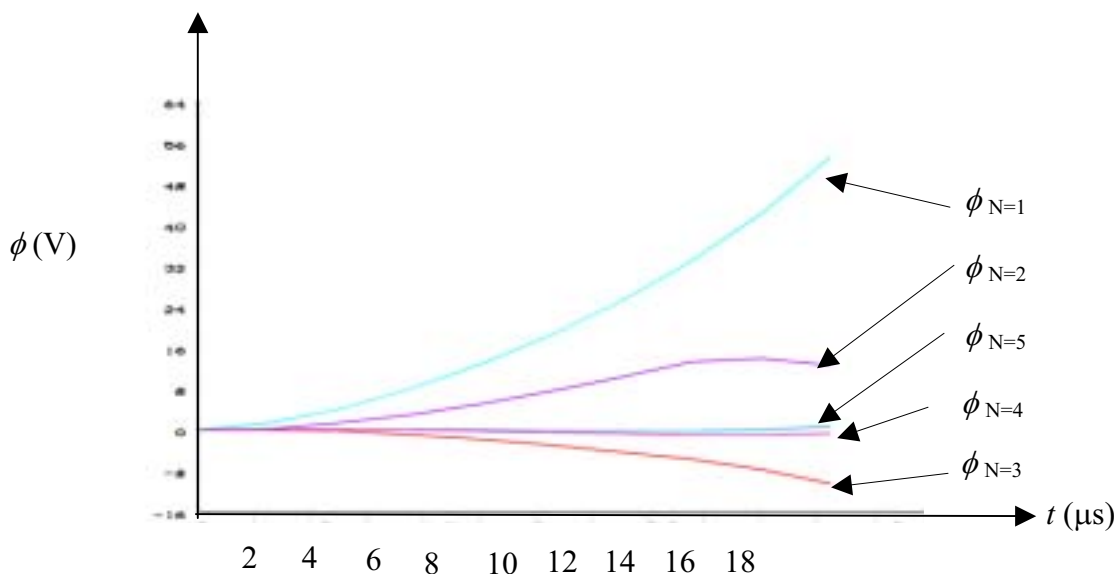
$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_m. \quad (15)$$

Rozložení elektromagnetického pole se formuluje pomocí výrazů (4) až (11).

V práci [9] bylo provedeno úplné odvození matematického modelu. Díky celkovému rozboru bylo možné použít programový systém ANSYS, který byl modifikován (interně označované řešení SOLID97), pomocí vhodně volených okrajových podmínek tak, aby byly respektovány vlastnosti modelu popsané v relacích (45) až (47).

5.4 PRÁCE S MODELEM

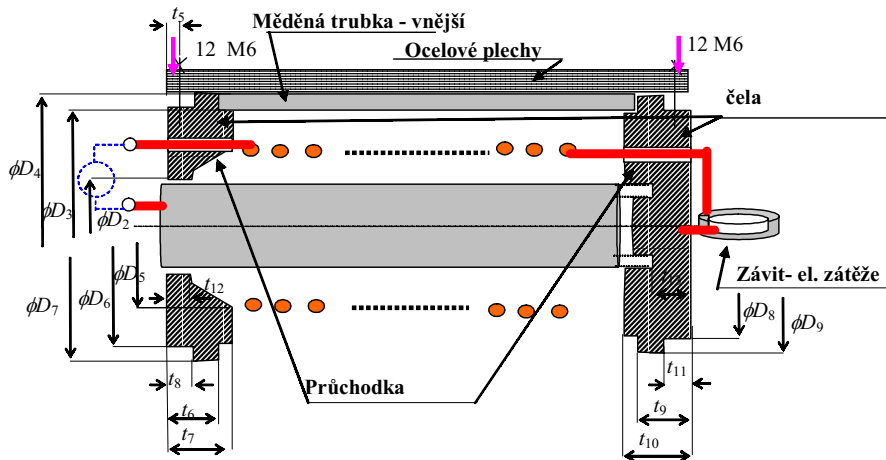
Geometrický model z obr. 5.4 byl odladěn v programu ANSYS v jazyce APDL. Poté byly provedeny základní analýzy a testy konvergence a stability. Na obr. 5.5 jsou zobrazeny okamžité hodnoty elektrického skalárního potenciálu na závitech generátoru.



Obr. 5.5 Průběh elektrického potenciálu ϕ na povrchu vodiče, $t \in \langle 0, 1, 45, 1 \rangle \mu\text{s}$, ICCG

6. NÁVRH KONSTRUKCE

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) pulsního generátoru PGV-1.



Obr. 6.1 Rozložení základních prvků a hlavní rozměry generátoru PGV-1



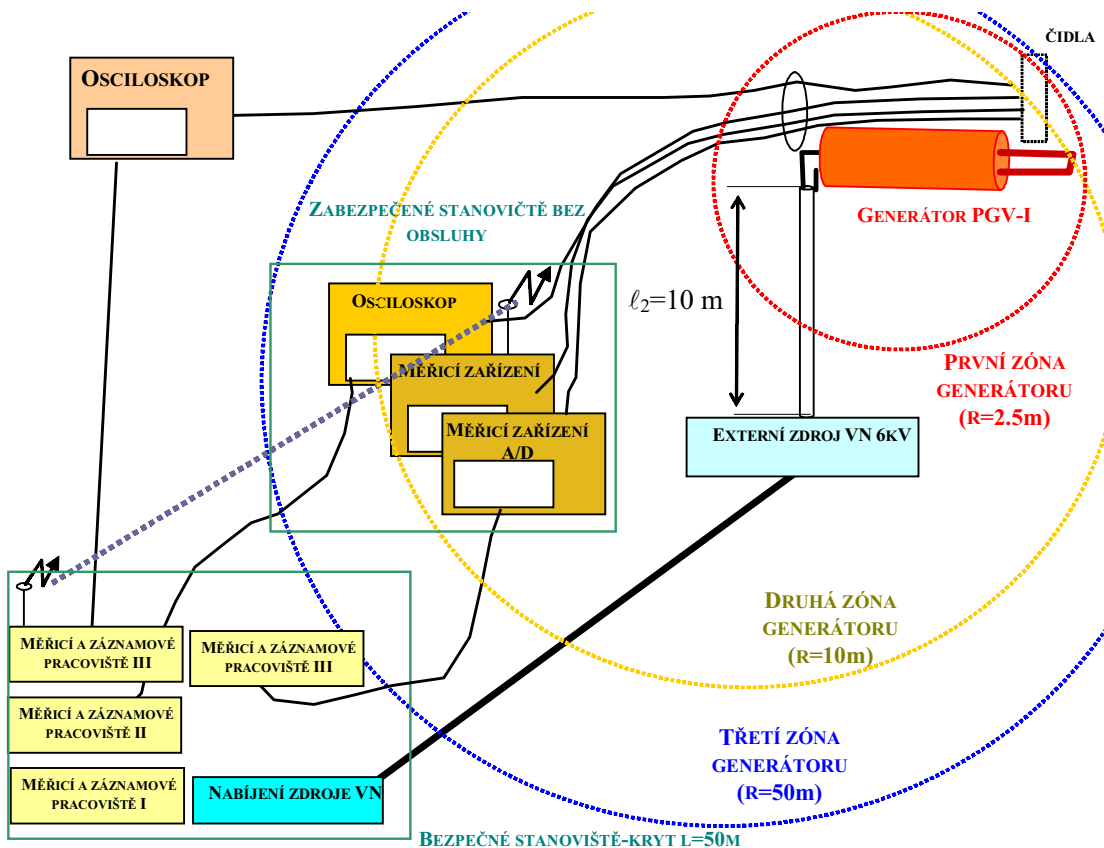
Obr. 6.2 Sestava pulsního generátoru PGV-1 před konečnou montáží

7. NAVRŽENÉ MĚŘICÍ METODY

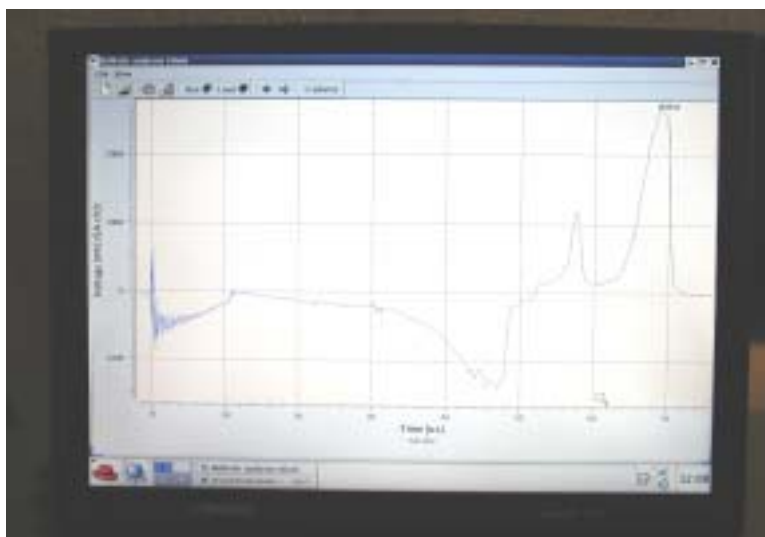
Teoreticky odvozené hodnoty elektromagnetických veličin jednotlivých modelů se soustředěnými parametry a modelů sestavených metodou konečných prvků (MKP) bylo nutné ověřit měřením. Problém měření na generátoru je ztížen tím, že generátor je spouštěn řízeným výbuchem a po skončení funkce (cca 50 μ s) je zničen a s ním i okolí o poloměru 1–3 m. Z toho vyplývá řada speciálních požadavků na návrh metodiky a metod měření. Na obr. 7.1 je schéma měřicího pracoviště.

8. ZÁVĚREČNÝ TEST PULSNÍHO GENERÁTORU

Generátor pro podobné účely s rozdílnými parametry byl řešen a testován dvěma nezávislými pracovišti v České republice. Prvním je PROTOTYPA a. s. Brno a druhým je Vojenský technický ústav pozemního vojska Vyškov (VTUPV Vyškov).



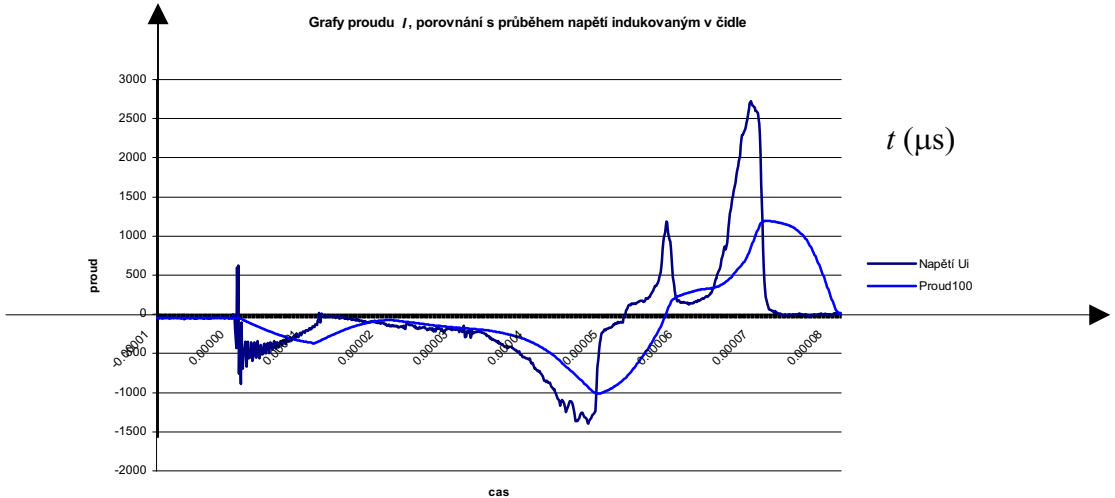
Obr. 7.1 Schéma uspořádání pracoviště při testech měření parametrů pulsního generátoru PGV-1



Obr. 8.1 Naměřené hodnoty průběhu napětí záznamového zařízení I

8.1 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

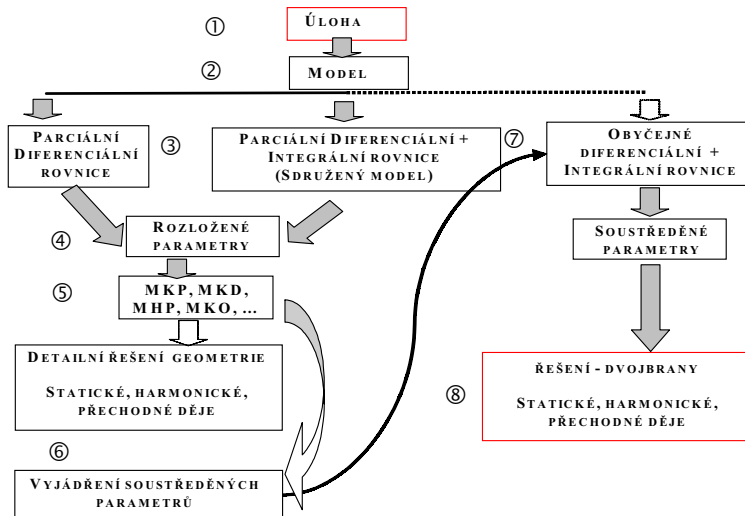
Měření při ověřování funkce pulsního generátoru PGV-1 firmy PROTOTYPA a. s. bylo úspěšné (délka děje $t_d = 70 \mu s$).



Obr. 8.2 Zpracování měření (II) generátoru PGV-1 – Polička 2003

8.2 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A TEORETICKÝCH MODELŮ

Srovnání naměřených hodnot a hodnot získaných modelováním ukázalo rozdíly ve tvaru průběhu elektrického napětí a proudu testovaného generátoru. Je pravděpodobné, že deformace průběhu proudu byla zapříčiněna vznikem vířivých proudů. Postup návrhu, analýzy a vyhodnocení generátoru je zobrazen na obr. 8.3.



Obr. 8.3 Schéma postupu analýzy modelů PGV-1

9. ZÁVĚR

Práce přinesla základní koncepční a konstrukční návrhy pulsního výkonového generátoru v třídě malých výkonů do $P_{\max} = 10$ MW, s přibližnou délkou impulsu $T_{\text{imp}} = 10$ μs , válcové geometrie s urychlujícím zařízením na bázi exploze výbuštiny (imploze), pro jednorázové experimentální použití. Celý projekt byl soustavně veden teoretickými úvahami, výsledky modelování pomocí numerických modelů a řadou experimentů.

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, kde experimentální výsledky správnost numerické analýzy potvrdily.

Díky důslednému spojení teoretických a experimentálních poznatků se podařilo opakovaně ověřit a prokázat funkci výkonového pulsního generátoru PGV-1.

Autor se podílel na formulaci a řešení numerických modelů, na formulaci teorií a hypotéz pro ověření principu pulsního generátoru. Dále pracoval na vývoji některých měřicích metod a metodologii měření. Navrhl uspořádání pracoviště pro závěrečný test. Podílel se na návrhu koncepce pulsního zdroje a spolupracoval při sestavování konstrukční dokumentace návrhu prototypu generátoru PGV-1.

10. LITERATURA

- [1] Fiala, P.: *Finite element method analysis of electromagnetic field inside pulsed power generator*. 2nd 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.
- [2] 2nd European Symposium on Non-Lethal Weapons May 13–14, 2003. Ettlingen.
- [3] Fiala, P.: *Analýza sdruženého elektromagnetického modelu pulsního zdroje napětí nebo proudu*. UTEE FEKT VUT v Brně, Laboratoř modelování a optimalizace polí v elektromechanických systémech, Výzkumná zpráva č. 3/02, 2002.
- [4] Stratton, J. A.: *Teorie elektromagnetického pole*, SNTL, Praha 1961.
- [5] www.sandia.gov/pulspowert/hedief.
- [6] Šunka, P.: *Ústní sdělení*, Praha, Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR.
- [7] Fiala, P.: *Modeling of current transformers on short-circuit tests*. PhD thesis, FEI VUT v Brně, sv. 13, ISBN 80-214-1346-8, prosinec 1998.
- [8] Mayer, D.: *Úvod do teorie elektrických obvodů*. SNTL/ALFA Praha 1978.
- [9] Nepovím, J. a kol.: *Roční a závěrečné zprávy úkolu FD-K/42*. PROTOTYPA a. s., 2001–2003 Brno.
- [10] Vavra, P. – Majzlik, J. – Vagennknecht, J.: *Ústní sdělení*. Brno 2001–2003.
- [11] Král, B.: *Ústní sdělení*. PROTOTYPA a. s., 2001–2003.
- [12] Fiala, I. – Staněk, M.: *Ústní sdělení*. Elektronika spol. s r. o., 2001–2003.
- [13] Pěchouček, M.: *Ústní sdělení*. PROTOTYPA s. r. o., 2002.
- [14] Chyba, M.: *Dílčí zpráva*. T.E.S.L.A. Pardubice, Pardubice 2002.

PULSNÍ ZDROJE, KONSTRUKCE, TEORIE

- [1.1] Granatstein, 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. – Spileman, R. B.: *Magnetocumulative generators*. Springer-Verlag, 2001, ISBN 0-387-98786-X.
- [1.5] Proceedings, *13th IEEE International Pulsed Power Conference*. IEEE, 2001, USA, ISBN 0-7803-7122-4.

- [1.6] Proceedings, *12th IEEE International Pulsed Power Conference*. IEEE, June 27–30, 1999, California – USA, ISBN 0-7803-5498-2.
- [1.7] Proceedings, *11th 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 ZÁŘIČE, PRINCIPY

- [2.1] Moisan, M. – Pelletier, 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.

ČIDLA, 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. P.: *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. 3rd Symposium Microwave processing of materials. Vol. 269, Pittsburgh, 1992, pp. 137–143.
- [3.10] Proceedings, *High power microwave electronics: Measurements, identifications, applications (MLA-ME2001) 2001 conference on IEEE*. IEEE, 2001, ISBN 0-7803-6743-X.
- [3.11] Proceedings, Microwave conference “*Microwave and telecommunication technology*”, 2001 11th 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.

ABSTRACT

The thesis deals with conception, basic research, and optimisation of the power pulse generator. This work solves a design and an experimental verification of the pulse power generator. The design of generator is based on use of the explosion effects. Basic conception utilizes the Faraday's induction law and the electric potential transformation with (by) coli coil? winding. There were built a numerical and analytical models of the generator and they were verified by the experimental tests. The final generator test proved its function and rightness of the applied numerical models.

Actual contribution of this thesis consists in a numerical modelling region, design of a lot of models, their verification and calibration with unique experiments. Important contribution into construction of numerical modelling region is in a coupling of complement and different types of numerical models which enable the considerable acceleration of a computing process with defined accuracy. Valuable is the methodology of utilization and operation of the used numerical models where the experimental results confirmed numerical solution.

Two types of the numerical models were mutually supplemented and verified therefore the generator design was accelerated. Analysis of the numerical models demonstrated bring into light some unpredictable effects. With the assistance results of modelling were completely adjusted measured scails. The function of power pulsed generator PGV-1 was repeatedly proved by consistent coupling of a theoretical and an experimental knowledge. A lot of supportive experiments were discussed and performed, which verified the theoretical hypothesis. The timetable of research work for power generator design was suggested where the principles of an experts systems controlling were applied. There was presumption to made one current solitary generated pulse with high value but there were obtained few smaller current pulses.

Author participated on the formulation and the numerical models solution and on the theoretic formulation of the pulse generator verifying principles. He furthermore worked on the progression of the measuring methods methodology and their utilization. He projected test station for the final generator verification and participated on conception design of the pulse power generator and cooperated to linkage of pulsed power generator documentation.