S T U

F E I

PRIEMYSLOVÉ VÝKONOVÉ APLIKÁCIE MIKROVĹN A PROBLÉM IMPEDANČNÉHO PRISPÔSOBOVANIA

Vladimír Bilík

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
&
S-TEAM Lab, Bratislava

Verzia 23.11.2013

39. seminář
Pravidelné setkání zájemců o mikrovlnnou techniku

20 Nov. 2013

Obsah

ČASŤ 1: Priemyslové aplikácie mikrovĺn

ČASŤ 2: Impedančné prispôsobovanie

ČASŤ 1: Priemyslové aplikácie mikrovĺn

- Teoretické základy
- Materiály a komplexná permitivita
- Výhody a nevýhody mikrovlnného spracovania
- Mikrovlnný priemyslový systém
- Magnetrón
- Aplikátory
- Elektromagnetické simulátory
- Prehľad priemyslových aplikácií mikrovĺn

ČASŤ 2: Impedančné prispôsobovanie

- Teória
- Špecifiká priemyslových aplikácií
- Používané prispôsobovacie obvody
- Trojkolíkový vlnovodný autotuner
- Základné vlastnosti autotunerov
- Optimálne prispôsobenie
- Problém striedania kolíkov

ČASŤ 1
PRIEMYSLOVÉ APLIKÁCIE MIKROVĹN

Začiatky

- Percy Spencer (9.7.1894 – 8.9.1970)
  - 1946 Vynález mikrovlnného ohrevu magnetrónom
  - 1954 Raytheon: Prvá mikrovlnná rúra

  - 1967 Amana: Prvá domáca mikrovlnná rúra

- Neprekonaný komerčný úspech mikrovlnných aplikácií

Základná charakteristika

- Konvenčný ohrev
  - Teplo sa aplikuje zvonka
  - Vedením preniká dovnútra

- Mikrovlnný ohrev
  - Teplo sa generuje v objeme
  - Elektrická zložka poľa
    - Natáčanie mikroskopických dipólov
    - Urýchľovanie voľných nábojov

Frekvenčné pásma

- **ISM** = **I**ndustrial, **S**cientific and **M**edical
  - Voľne prístupné
  - Poplach! Zamorujú ich komunikácie

Pásmo (MHz)	λ_0 (mm)	P (kW)	EIA	IEC	a (mm)	b (mm)
(896, 915, 922)±10	328	5 - 100	WR 975	R 9	247,65	123,825
2450±25	122	0.1 - 20	WR 340	R 26	86,36	43,18
5800±75	52	1	WR 159	R 58	40,386	20,193

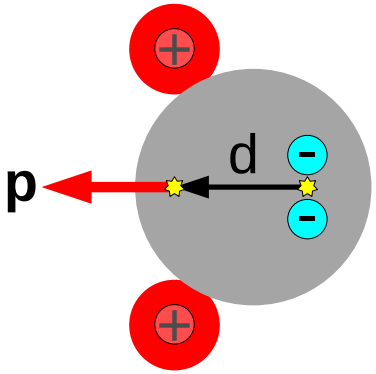
TEORETICKÉ ZÁKLADY

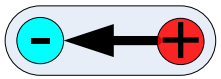
Dielektricý ohrev

- Prevládajúca aplikácia mikrovĺn: ohrev
- Prevládajúci materiál: voda
- Podstata
  - Rotačné rozkmitanie molekúl H_2O zložkou ***E*** poľa
  - Kolízie s inými molekulami
    - Odovzdanie nadobudnutej energie okoliu...
      = nárast teploty
- Molekula vody
  - Nesymetrická
  - Posunuté ťažiská **+** a **–** nábojov
  - Mikroskopický elektrický dipól ***p***

$$\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{d}$$

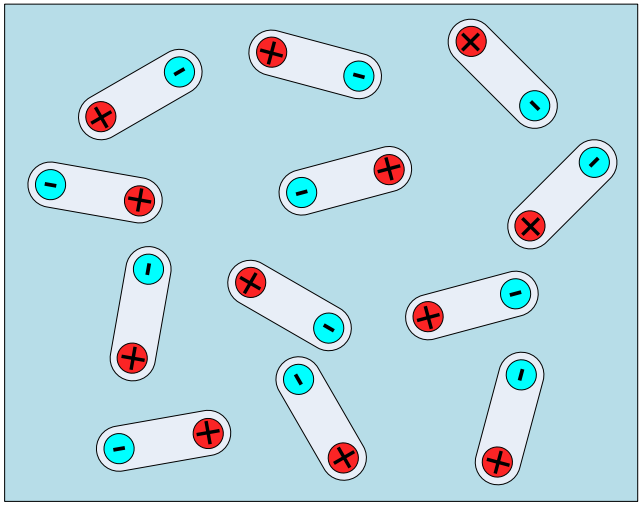
  - V poli sa snaží natočiť do smeru ***E***



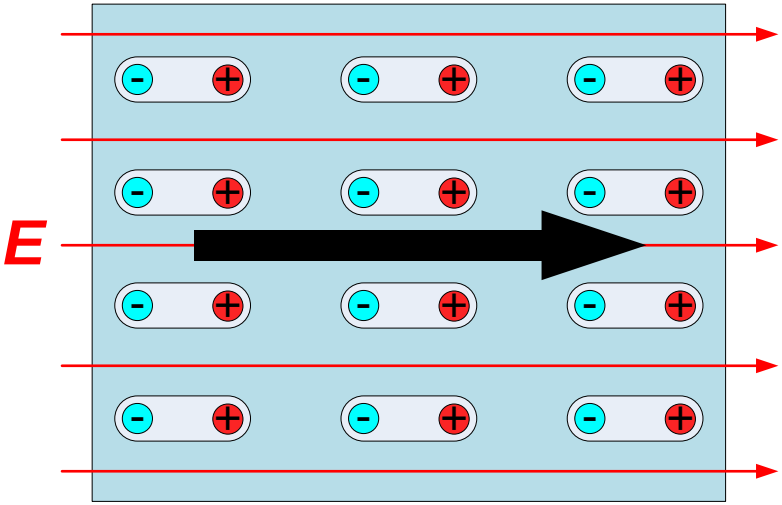


Vplyv poľa E

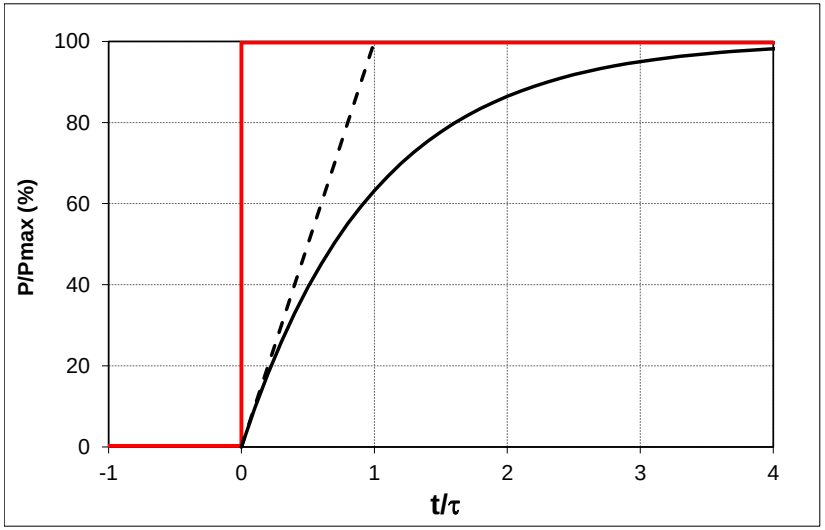
$$\vec{P} = \sum \vec{p}_i = 0$$



$$\vec{P} = \sum \vec{p}_i \neq 0$$



- Nenulové ***P***
  - Indukované pole
  - Permitivita $\varepsilon > \varepsilon_0$ ($\varepsilon_r > 1$)
- Proces natáčania nie je okamžitý
  - Spomaľovaný kolíziami: **relaxácia**
    - Strata energie molekúl
    - Zvyšovanie ***T*** látky
  - Skok ***E***: Exponenciála ***P***
    - Relaxačná čas. konštanta τ



Harmonické pole

- Harmonické ***E***
- Oneskorenie: fázový posuv ***P*** voči ***E***
- Fázový posuv = strata energie = **ohrev**
- Formálne: relatívna permitivita komplexná

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

  – Stratový činiteľ (loss tangent)

$$tg\,\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$$

  – Výkon stratený v jednotke objemu (power loss density)

$$p = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon''E^2 = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon'\tan\delta\,E^2$$

    - Základný vzťah pre generáciu tepla EM poľom

Model komplexnej permitivity

- Peter Debye

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}$$

- Definovaná tromi parametrami

  ε_s = statická permitivita (nízke frekvencie)

  ε_∞ = limitná hodnota pre veľmi vysoké frekvencie

  τ = relaxačná konštanta

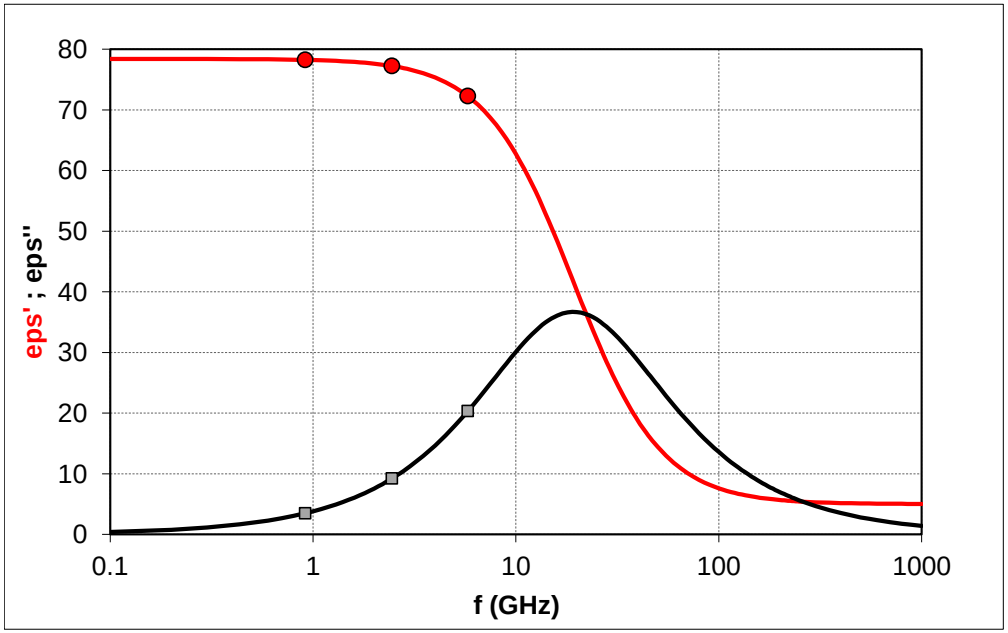
  – Závisia od teploty

Deionizovaná voda 25 C

ε_s = 78,4

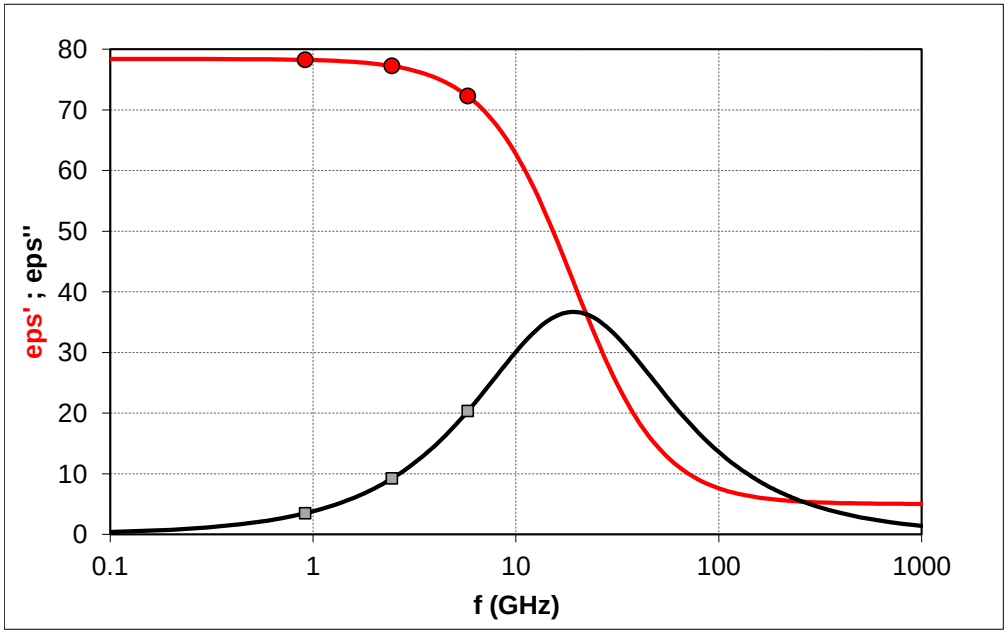
$\omega_r = 1/\tau = 2\pi$*19,2 GHz

$\varepsilon_\infty = 5$



- Nízke *f*
  - Molekuly sledujú pole bez oneskorenia
    - Relatívna permitivita vysoká ($\varepsilon' \approx \varepsilon_s$)
    - Straty malé ($\varepsilon'' \approx 0$)
- Veľmi vysoké *f*
  - Molekuly nedokážu reagovať, nenatáčajú sa
    - Relatívna permitivita nízka ($\varepsilon' \approx 1$)
    - Straty malé ($\varepsilon'' \approx 0$)

Deionizovaná voda 25 C



- Okolie $f_r = 1/(2\pi\tau)$
  - Rezonancia: molekuly mohutne kmitajú
    - Vysoké straty
    - Pre vodu maximum 20 GHz
  - Absorpčná krivka $\varepsilon''(f)$ veľmi široká
    - Efektívny ohrev v širokom pásme

Faktory ovplyvňujúce generáciu tepla

- Výkon stratený v jednotke objemu za jednotku času

$$p = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon' \tan\delta \, E^2$$

  - Faktor 1: Frekvencia: $p \approx f\, \varepsilon''(f)$
    - Vyššie ***f*** sa zdajú byť výhodnejšie (ale vodivostné straty $p \approx \sigma$)
  - Intezita poľa ***E*** vo vnútri materiálu
    - Faktor 2: Koeficient odrazu na rozhraní

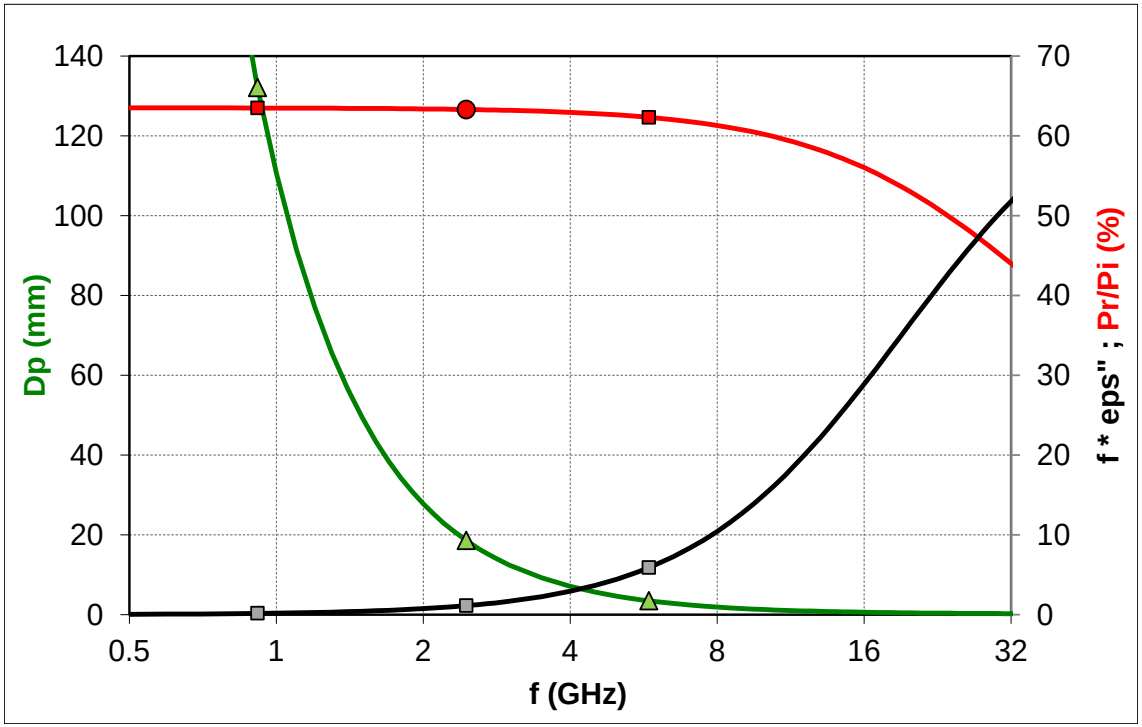
$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon'} - 1}{\sqrt{\varepsilon'} + 1}$$

    - Faktor 3: Hĺbka vniku

$$D_p = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon'}} \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{1 + (tg\,\delta)^2} - 1}}$$

- $\lambda = \lambda_0/\mathrm{sqrt}(\varepsilon')$ ↑
- $\mathrm{tg}\,\delta$ ↓

Faktory ovplyvňujúce generáciu tepla



- Pásmo 2,45 GHz dobrý kompromis

Vodivostné straty

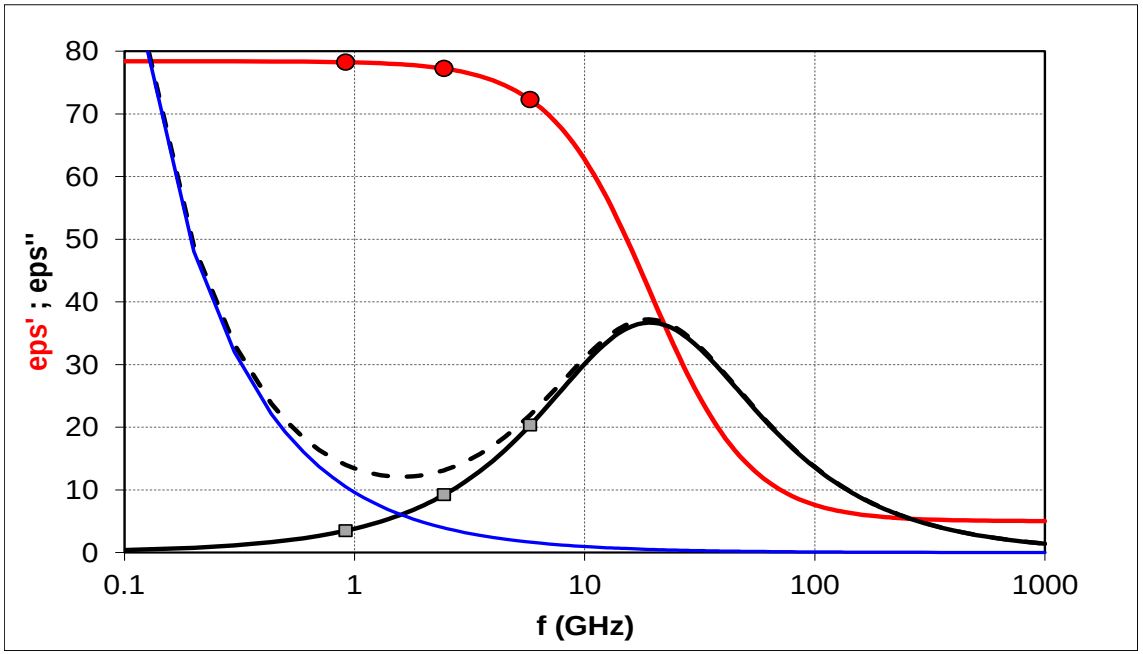
- Vodivé materiály
  - Slané roztoky: ióny Na^+, Cl^-, H^+, OH^-
  - Merná vodivosť σ
    - Málo frekvenčne závislá
  - Iný mechanizmus strát (Joulove straty)

$$p = \frac{1}{2}\sigma E^2$$

  - Formálne príspevok $\varepsilon_c = \sigma / (\omega\varepsilon_0) \approx 1/f$ do ε''

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - j\left(\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)$$

Vodivostné straty



- Voda s obsahom soli 0,3%
  - Morská voda rozriedená 1:10
  - 10-krát slanšia ako pitná voda

Teplota

- Zjednodušená kalorimetrická úvaha
  - Stratená energia sa premení na teplo
  - Teplo zvýši ***T*** materiálu

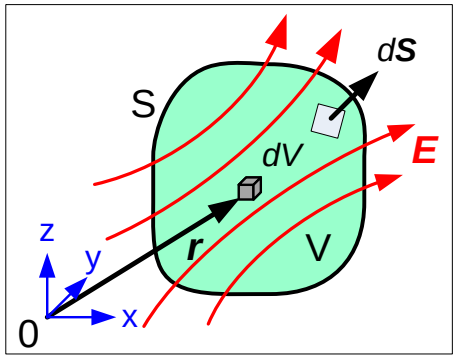
$$p\Delta t = \Delta Q = C\rho\Delta T$$

Voda C = 4200 J/(kg ^{o}C)

  - Ignoruje odvod tepla
    - vedením (kondukcia) – difúzia
    - žiarením (radiácia)
    - prúdením (konvekcia)
  - Dobré na základný odhad

Teplota

- Zložitá matematika
  - Aj tak zjednodušenie
    - Len vedenie tepla



  - Riešiť treba:

$$\frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\int_V \varepsilon''(\vec{r},T)E^2(\vec{r},T)dV = \int_V C(\vec{r})\rho(\vec{r})\frac{\partial T(\vec{r},t)}{\partial t}dV - \oint_S k(\vec{r})\nabla T(\vec{r},t)\cdot d\vec{S}$$

Tepelný výkon generovaný mikrovlnami

Teplo kumulované v látke

Tepelný výkon unikajúci vedením

  - Zmena ***T*** spätne ovplyvňuje rozloženie poľa ***E***
  - „Multifyzikálny“ problém
  - Moderné SW riešia

Materiály a komplexná permitivita

- Znalosť komplexnej permitivity ako funkcie ***f*** a ***T***
  - Zásadný predpoklad úspechu pri návrhu
  - Inžinier nemusí skúmať jej fyzikálny pôvod
  - Sortiment široký
    - ε' = 1 až 100
    - ε'' = 0,0001 až 10
  - Iné parametre
    - merná hmotnosť
    - tepelná kapacita
    - tepelná vodivosť
    - teplota mäknutia a tavenia
  - Rozsiahle tabuľky a empirické vzorce
    - Hodnoty získané meraním
    - Veľký rozsah teplôt

Príklady

Materiál	T (C)	ε'	ε''	D_p (mm)
Pitná voda	25	77	9,4	18
Ľad	-12	3,2	0,003	11600
Mäso	25	40	12	10
Zamrznuté mäso	0	4	0,3	130
Slanina	25	2,5	0,13	240
Papier	25	2,7	0,2	160
Drevo (suché)	20	2	0,02	1380
Lepenka	22	2,7	0,3	107
Kremenné sklo	25	3,8	0,0004	95000
Mramor, suchý	25	9	0,22	270
Benzín	25	1,92	0,003	9000
Laminát	25	4,5	0,13	320
Nylón	25	3	0,036	940
Plexisklo	25	2,6	0,015	2100
Polyetylén	25	2,3	0,001	30000
PTFE (teflón)	25	2.1	0,0003	94000
Guma	60	2,7	0,5	64

Plazma

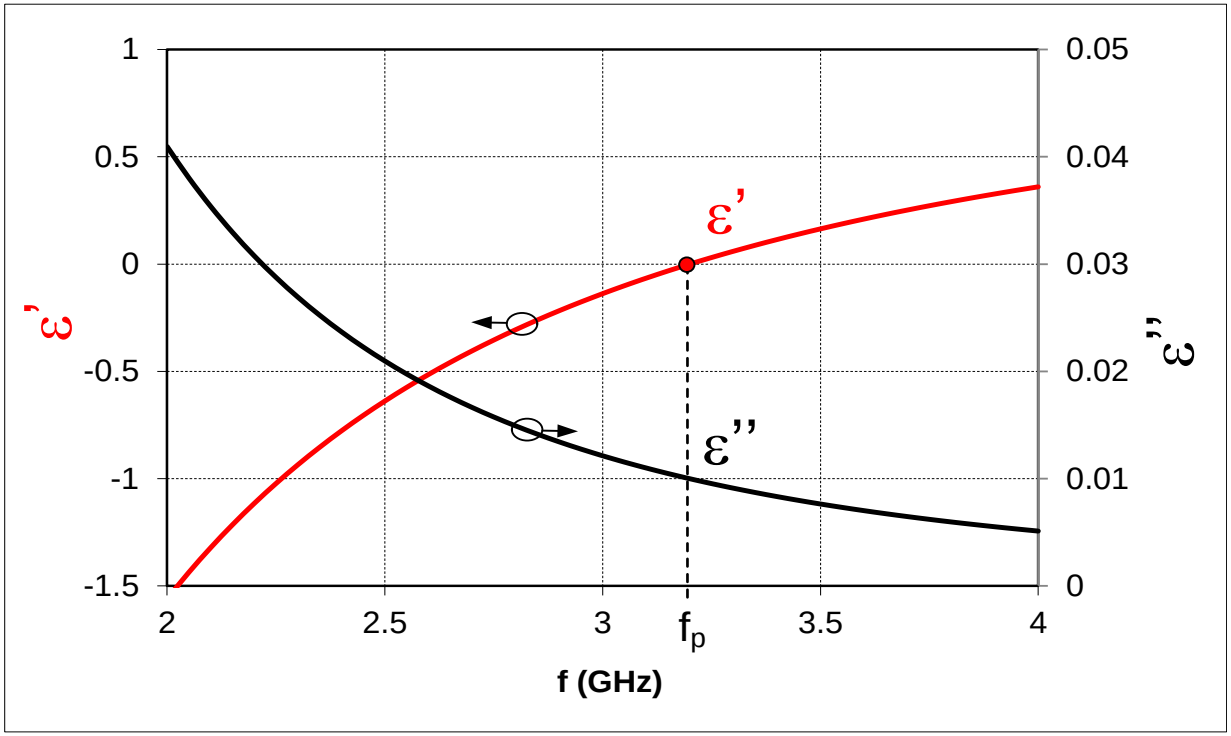
- Tiež komplexná permitivita
  - Ťažko postihnuteľná
    - Závisí od zmesi plynov, tlaku, aplikovaného výkonu, ...
    - Silná väzba medzi rozložením poľa a permitivitou
- Drudeho model
  - Voľné elektróny v striedavom poli
    - Oscilujú v dôsledku zotrvačnosti
    - Kolízie: relaxácia $\omega_r = 1/\tau$
  - Aplikuje a ustrední pohybové rovnice
  - Rezonancia: plazmová frekvencia ω_p
    - Rastie s koncentráciou voľných elektrónov
    - Leží v mikrovlnnom pásme

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\omega\omega_r}$$

  - Pre $\omega < \omega_p$ je $\boldsymbol{\varepsilon'}$ záporná!

Plazma

- f_p = 3.2 GHz, $f_r = f_p/100$



Výhody mikrovlnného spracovania

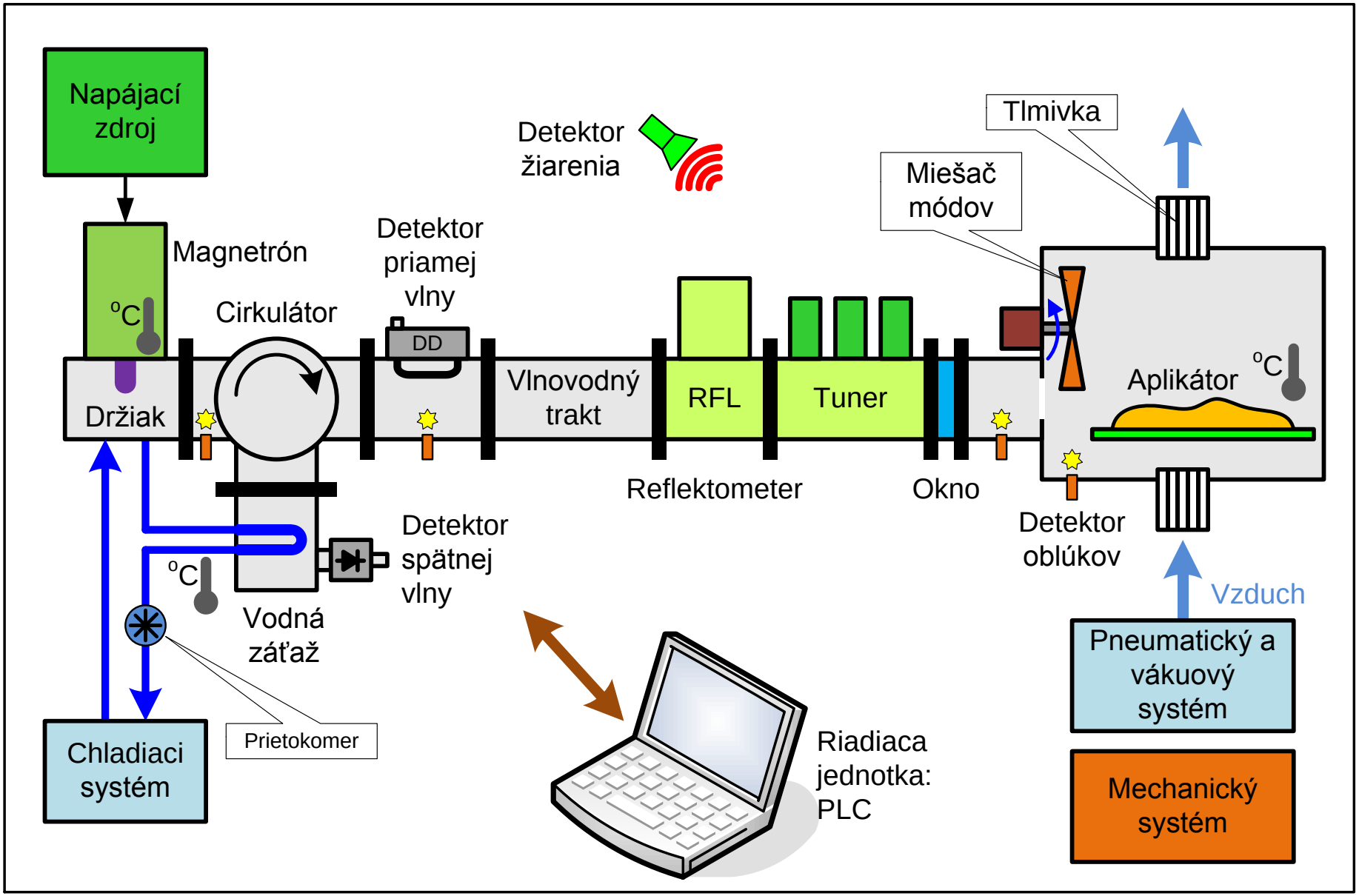
- ☺ Úspora
  - Času: Proces je rýchly
  - Energie: Zohrieva sa iba produkt
  - Miesta: Technologické zariadenie je kompaktné
- ☺ Kvalita Možnosti nedosiahnuteľné inými technológiami
- ☺ Šetrnosť
  - K životnému prostrediu
    - Nie sú splodiny spaľovania
    - Možnosť použitia obnoviteľných zdrojov energie
  - K produktu
    - Neprehrieva sa povrch
- ☺ Precízne riadenie procesu
- ☺ Krátka doba zapnutia/vypnutia
  - Netreba predhrievať a chladiť
- ☺ Homogénnejší ohrev (???)

Nevýhody mikrovlnného spracovania

- ☹ Vysoké vstupné investície
- ☹ Vyžaduje sa kvalifikovný personál
- ☹ Rozšírenie procesu na vysoké objemy produkcie (scale-up)
  - Obmedzený výkon
  - Obmedzená hĺbka vniku
- ☹ Nehomogenita ohrevu
  - Studené a prehriate oblasti (cold spot, hot spot)
- ☹ Nekontrolovateľný nárast teploty (thermal runaway).
  - Ak sa činiteľ strát zvyšuje s teplotou (ľad - voda)
  - Hot spot ešte viac absorbuje
  - Zničenie objektu
- ☹ Elektrické výboje a oblúky
- ☹ Predsudky
  - Nekompetentný prístup
    - Fyzik, chemik, mikrovlnný inžinier, strojár, energetik, automatizér,...

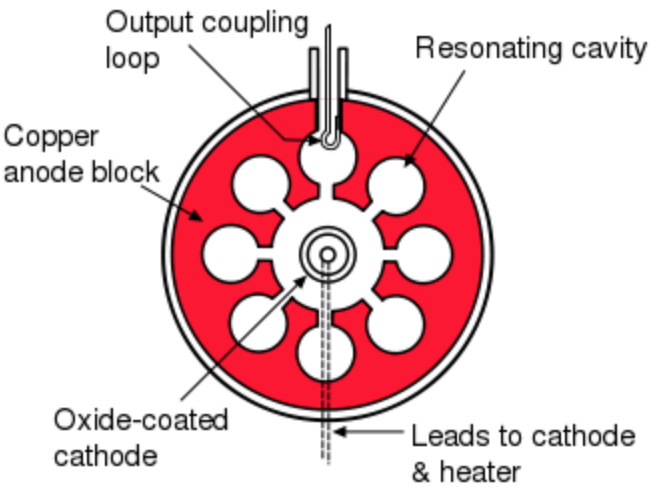
MIKROVLNNÝ PRIEMYSLOVÝ SYSTÉM

Mikrovlnný priemyslový systém

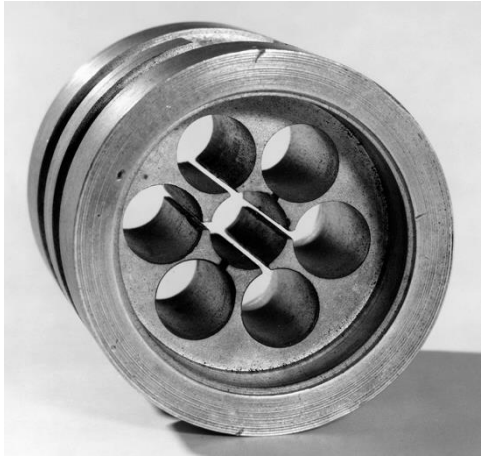


Magnetrón

- Osovo symetrická dióda
- Axiálne js magnetické pole
- V anóde rezonančné dutiny
- Elektróny rotujú
  - V dutinách vybudia pole



- Pracovné podmienky
  - Anódový prúd I_a (anódové napätie V_a dané VA charakteristikou)
  - Žeraviaci prúd
  - Prúd do solenoidu I_s
    - Permanentný magnet

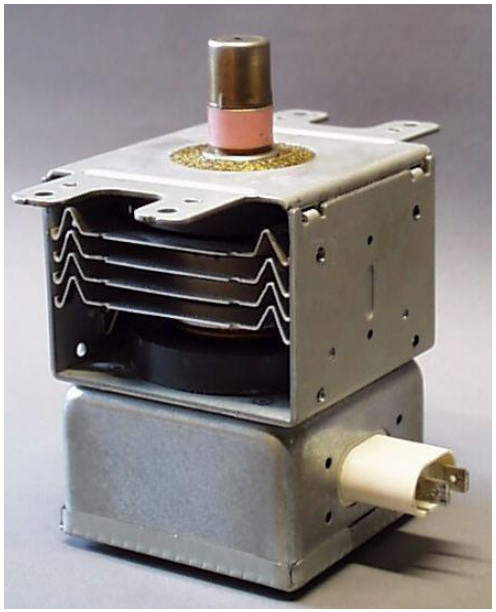


Prehľad

f (MHz)	P (kW)	V_a (kV)	I_a (A)	I_s (A)	η (%)	PSV max
915	5 – 100	20	6	4	88	1.1 !!!
2450	0,5 – 20	4	1	-	70	4

915 MHz / 100 kW

2.45 GHz / 1 kW

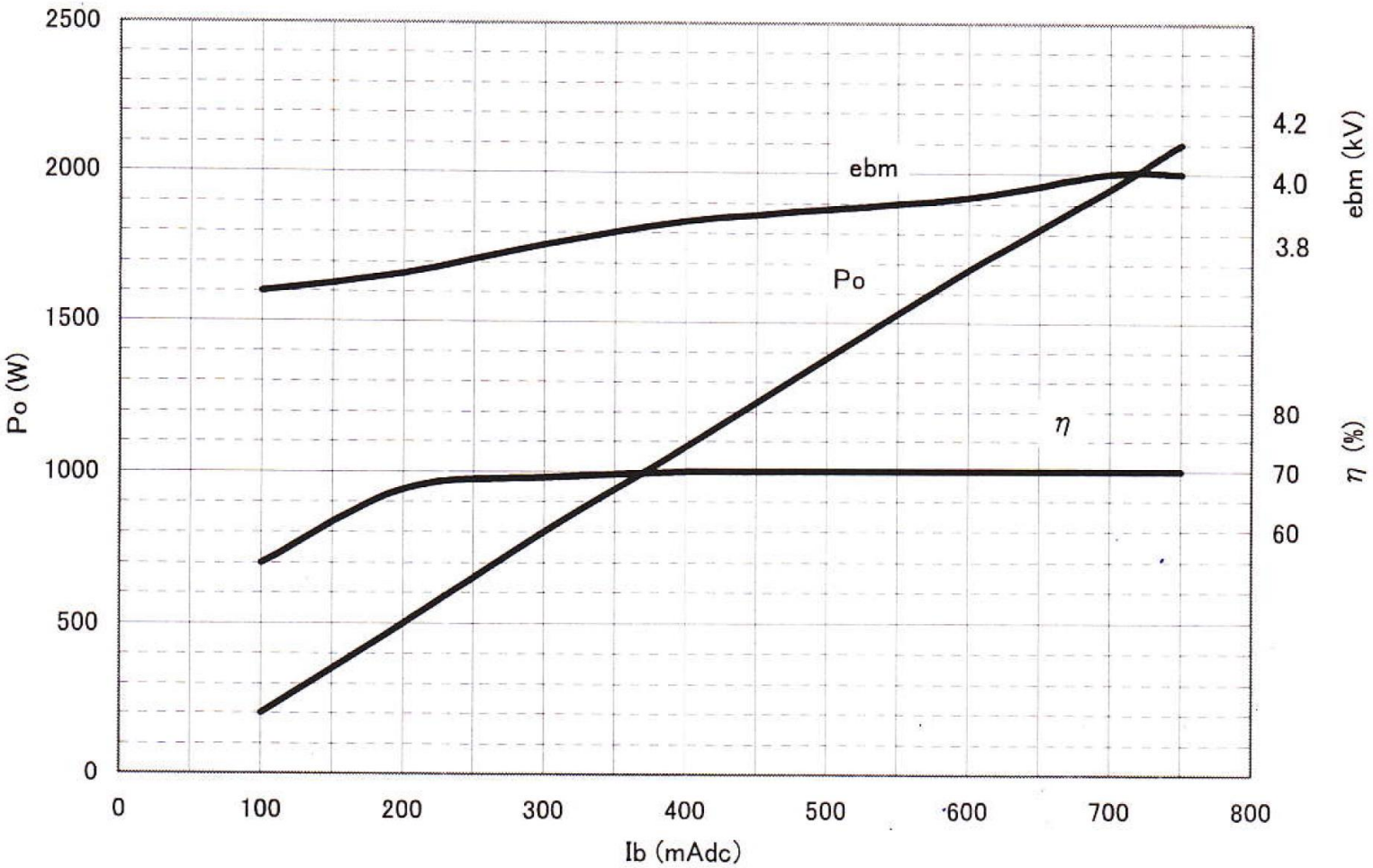


Pracovné charakteristiky

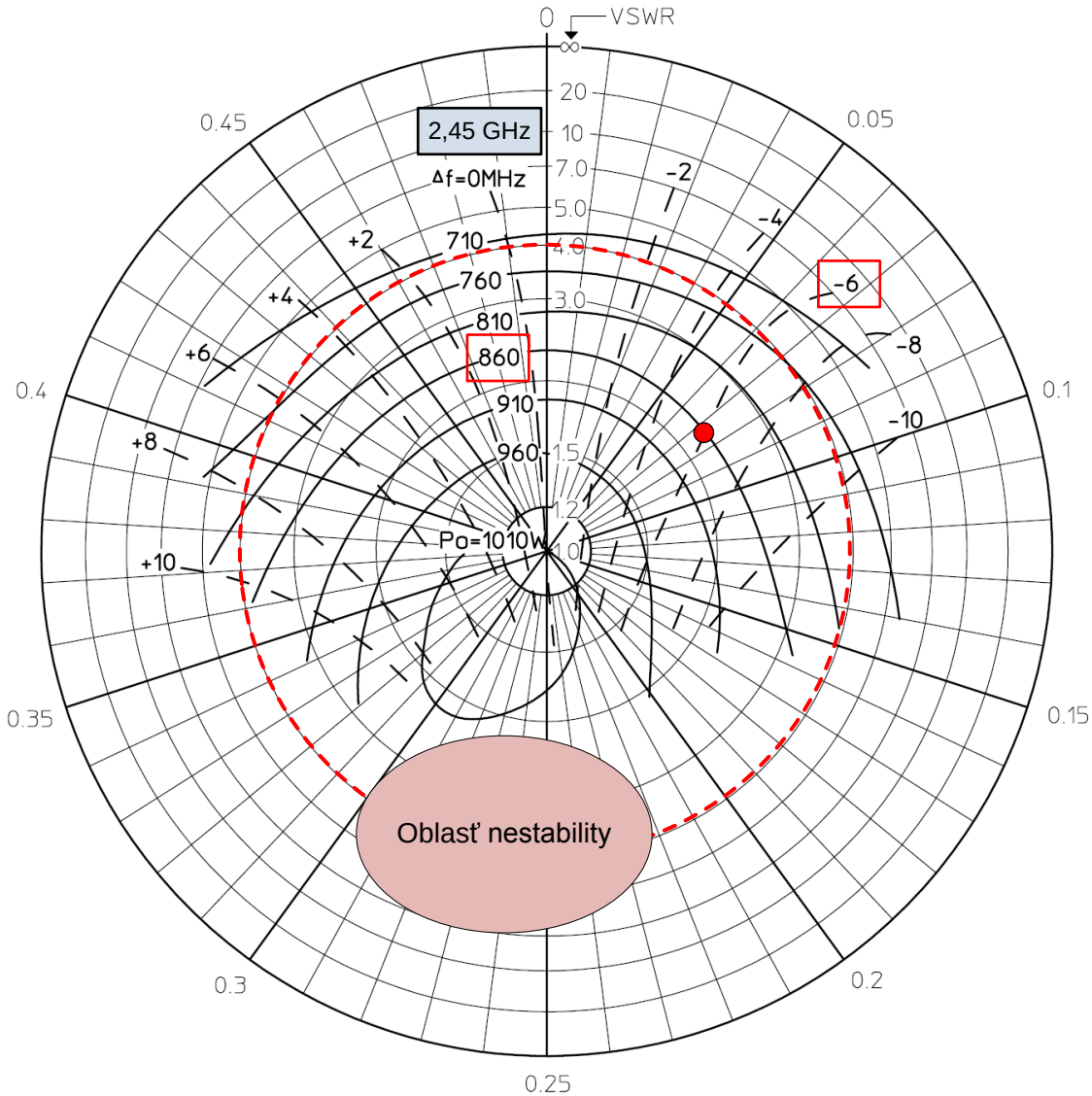
- VA charakteristika $\boldsymbol{V_a = f(I_a)}$
- Výkonová charakteristika $\boldsymbol{P_G = f(I_a)}$
- Účinnosť $\boldsymbol{\eta = f(I_a)}$
- Riekeho diagram
  - Závislosť $\boldsymbol{P_a}$ a $\boldsymbol{f}$ od koeficientu odrazu záťaže
  - Max. PSV: cirkulátor

Pracovné charakteristiky

- Panasonic 2M244-M12J1, 2.45 GHz, 2 kW

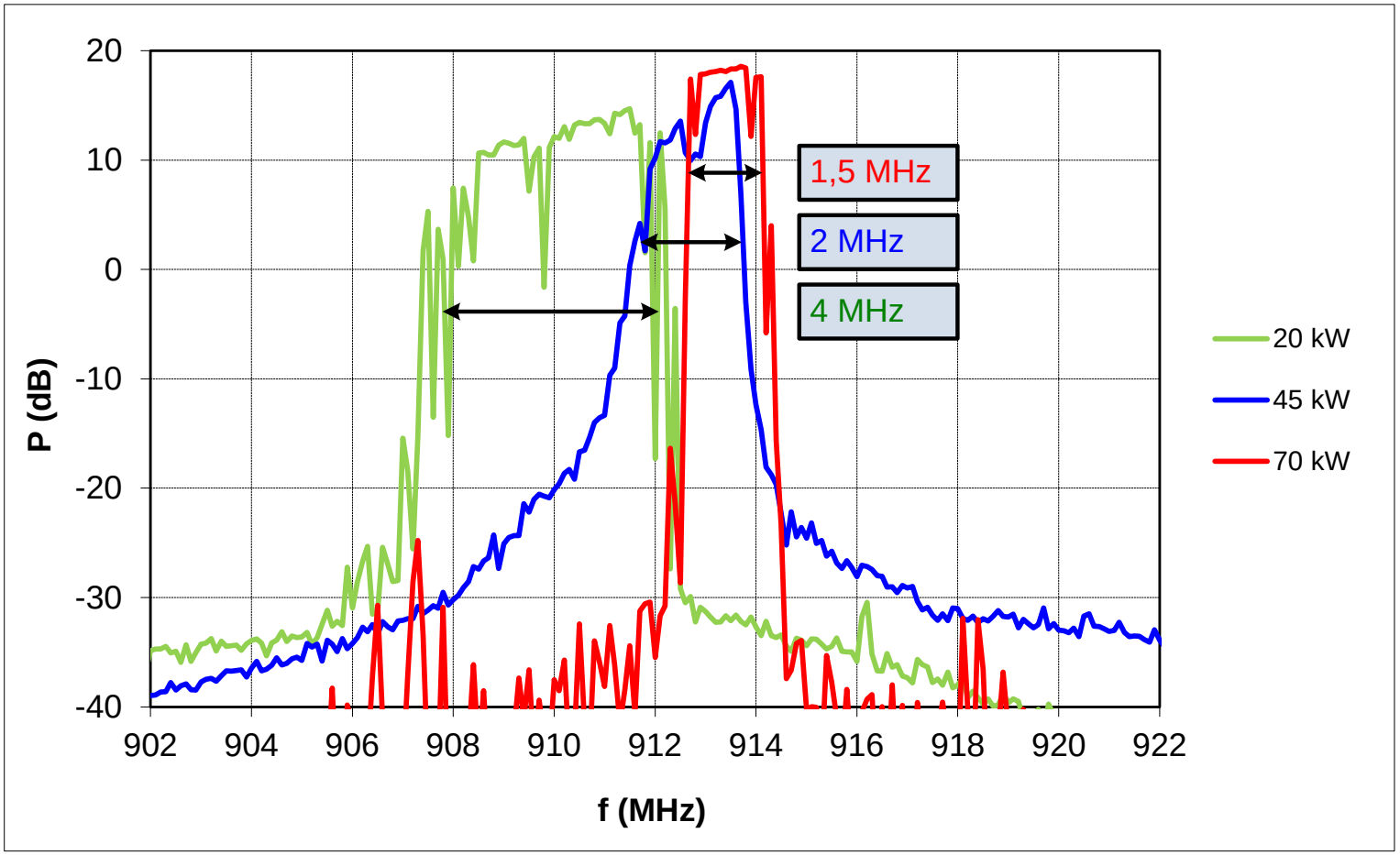


Riekeho diagram



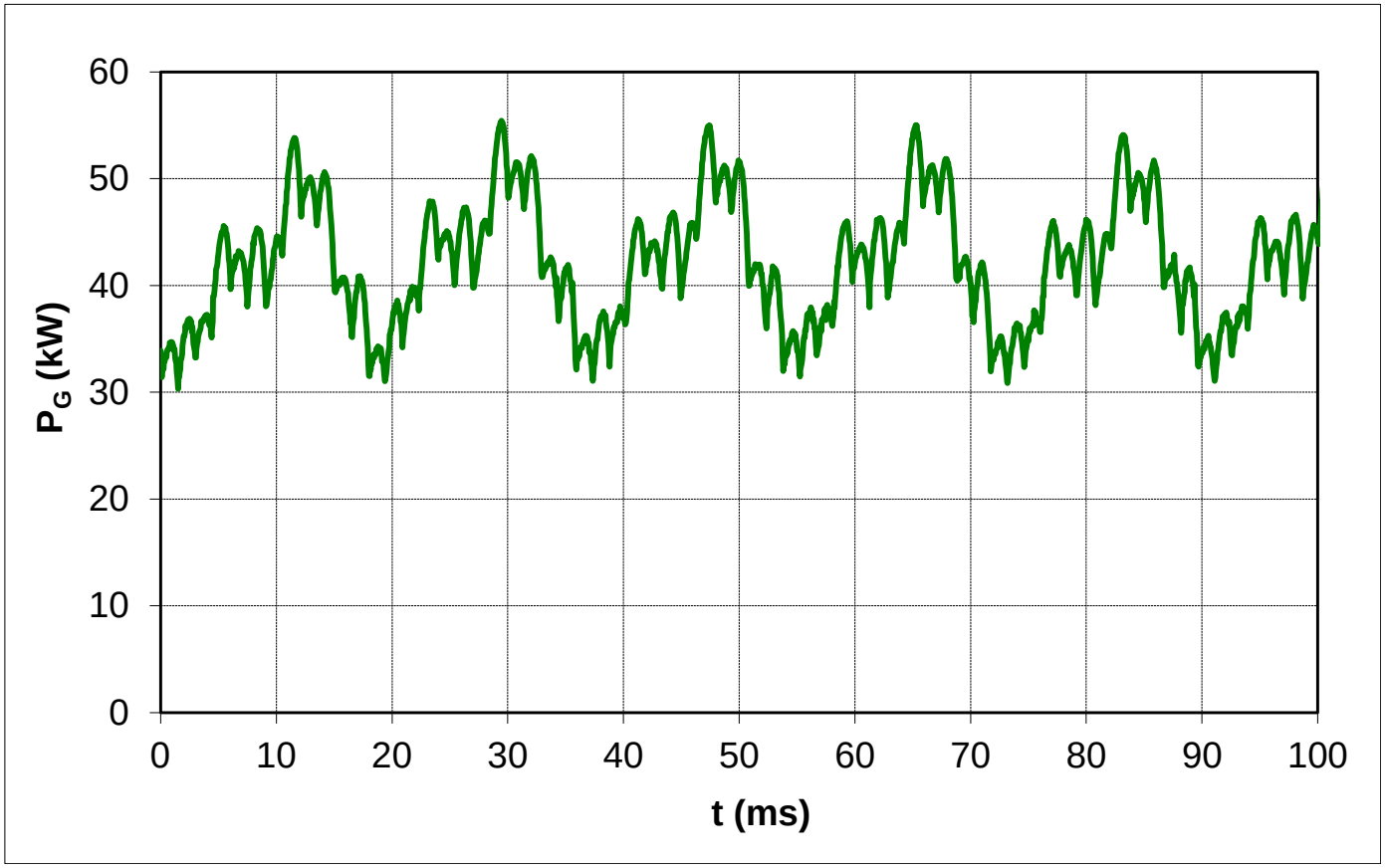
Spektrum

- Magnetrón 915 MHz, 75 kW
  - 20 kW 45 kW 70 kW



Modulácia výkonu

- Magnetrón 915 MHz, 75 kW, P_{set} = 45 kW
  - Zvlnenie anódového napätia: nutné zlo
    - *f* siete
    - 12 x *f* siete



Zhrnutie vlastností signálu

- Nedefinovaná frekvencia
- Široké spektrum
- Modulácia výkonu

☺ Málo dôležité pri ohreve

☹ **Bolenie hlavy pri automatickom prispôsobovaní**

APLIKÁTORY

Úvod

- Aplikátor:
  - Pracovný priestor, v ktorom dochádza k interakcii medzi mikrovlnami a objektom spracovania
  - Jadro systému

- Delenie podľa typu poľa
  - Jednomódové
  - Multimódové
  - Otvorené (vyžarovacie)

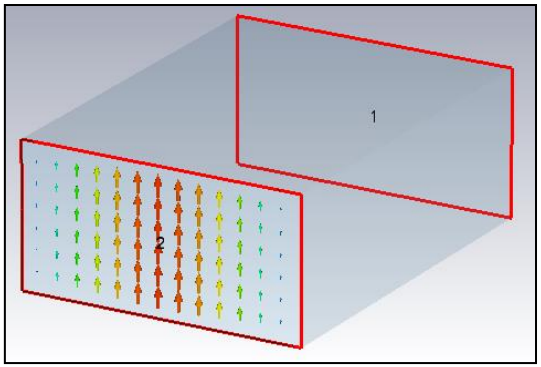
- Delenie podľa transportu produktov
  - Dávkovacie (batch): domáca rúra
  - Kontinuálne: dopravníkový pás

Jednomódové aplikátory

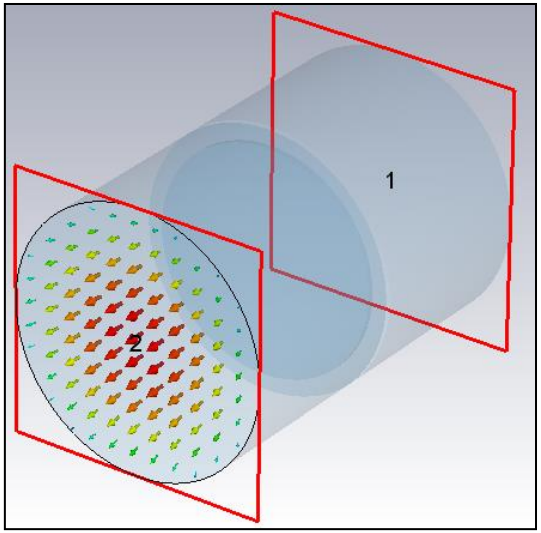
- Dutinové rezonátory
  - Rozmery porovnanateľné s vlnovou dĺžkou
  - Vybudí sa iba jeden z malého počtu možných módov
- ☺ Výhody
  - Možno ich dosť presne navrhnúť
  - Rozloženie poľa zodpovedá očakávaniu
  - Dajú sa ľahko ladiť a impedančne prispôsobiť
  - Energiu možno naviazať do málo stratových a malých vzoriek
- ☹ Nevýhody
  - Malé rozmery = malé množstvo materiálu
  - Citlivé na zmeny *f* a záťaže: treba ich prelaďovať
  - Vysoké intenzity poľa
    - Nebezpečenstvo elektrických výbojov a oblúkov

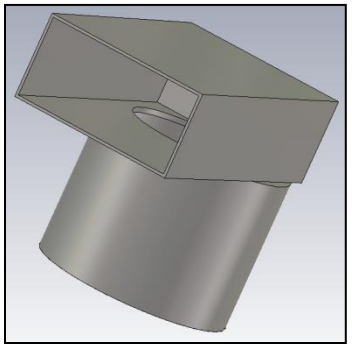
Najpoužívanejšie typy

- Mód $\mathbf{TE_{10n}}$ v pravouhlom vlnovode
  - Skratovaný vlnovod
  - ***E*** v priečnom smere
  - Vzorka v maxime stojatej vlny ***E***
    - Vzdialenosť $\lambda_g/4$ + násobky $\lambda_g/2$

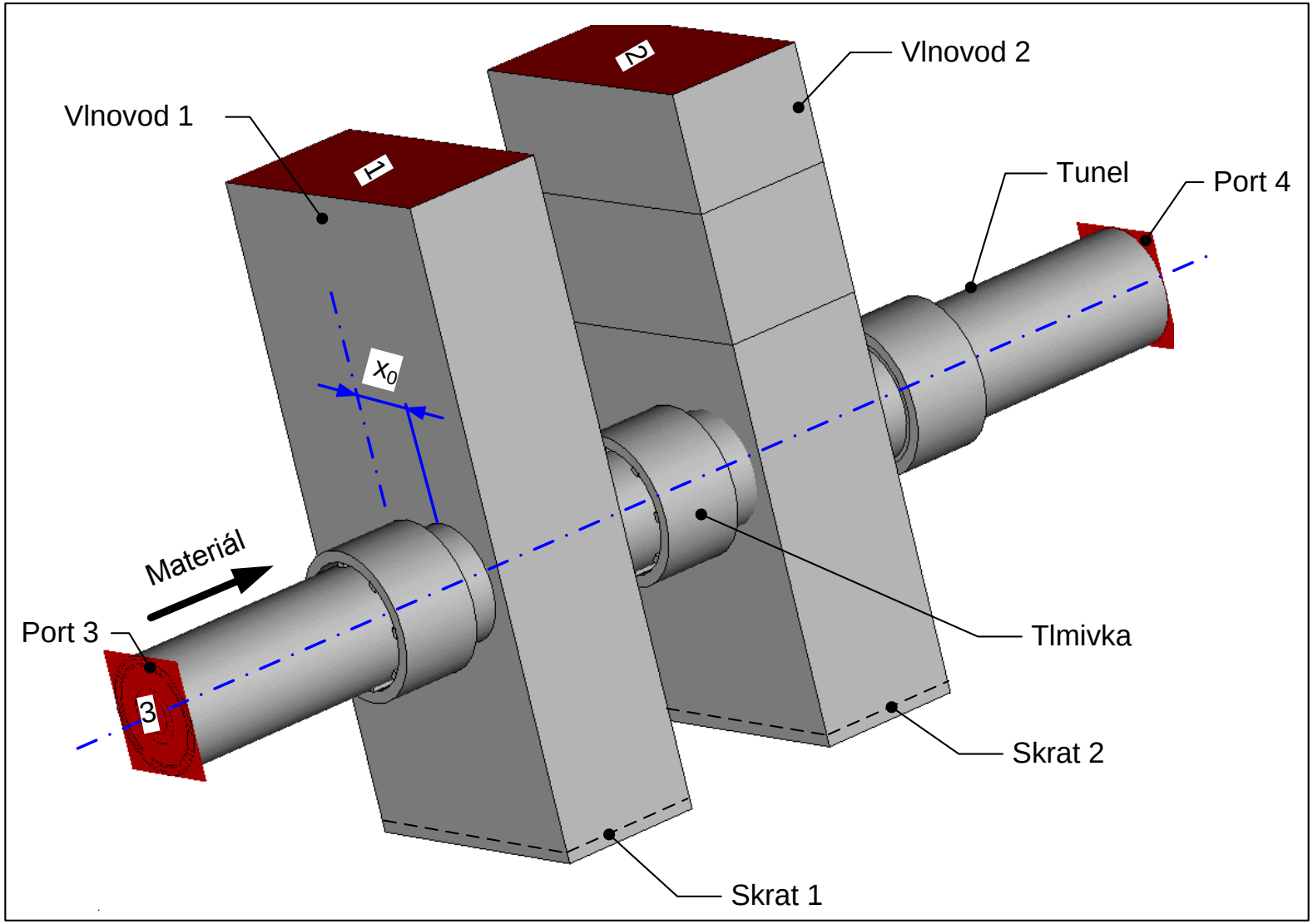


- Osovo symetrický mód $\mathbf{TM_{01n}}$ v kruhovom vlnovode
  - Skratovaný vlnovod
  - ***E*** v pozdĺžnom smere
  - Vzorka v maxime stojatej vlny ***E***
    - Vzdialenosť **0** + násobky $\lambda_g/2$
  - Mód $\mathbf{TM_{01n}}$ nie je dominantný!
    - Treba ho špeciálne vybudiť

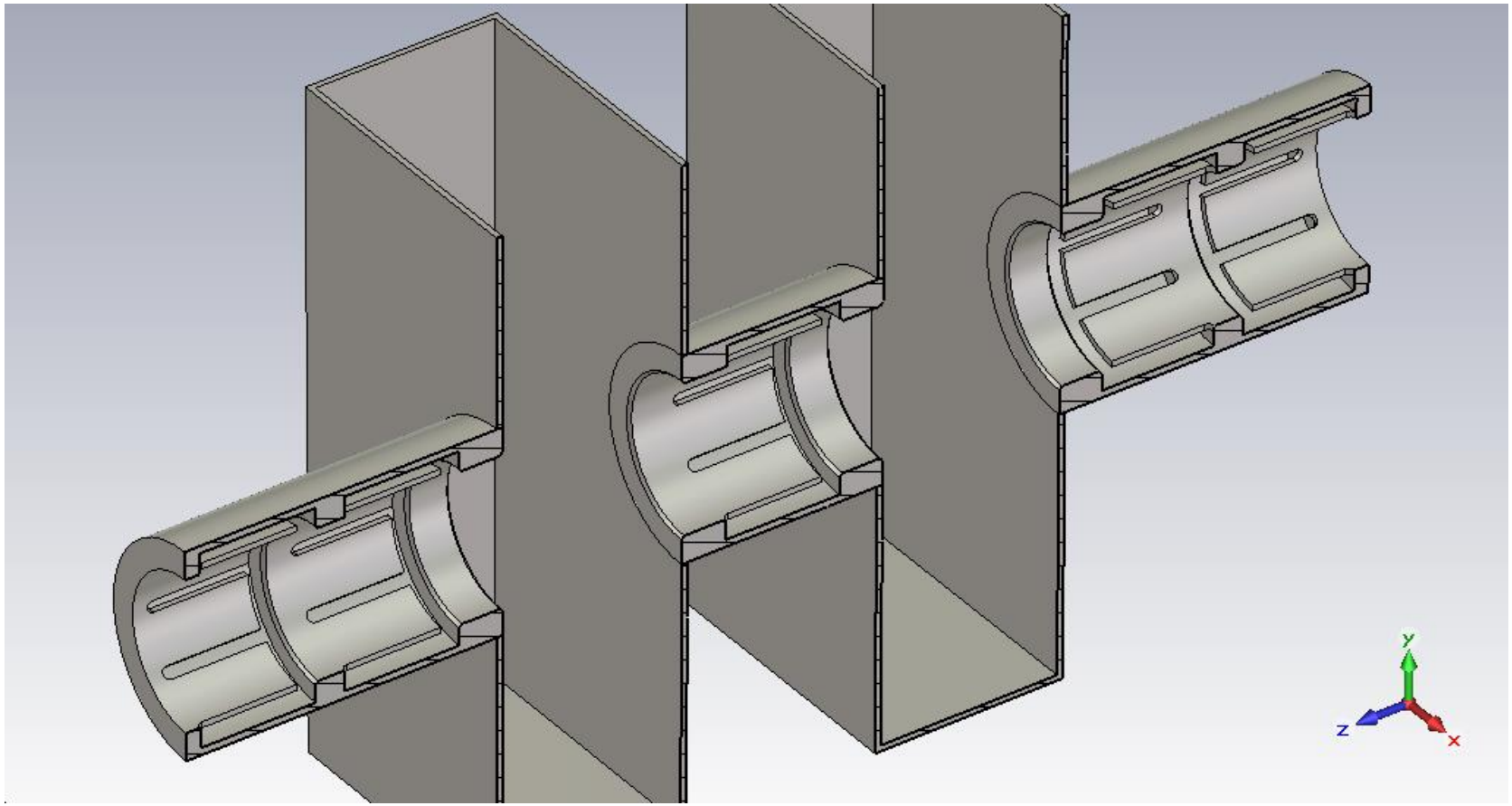




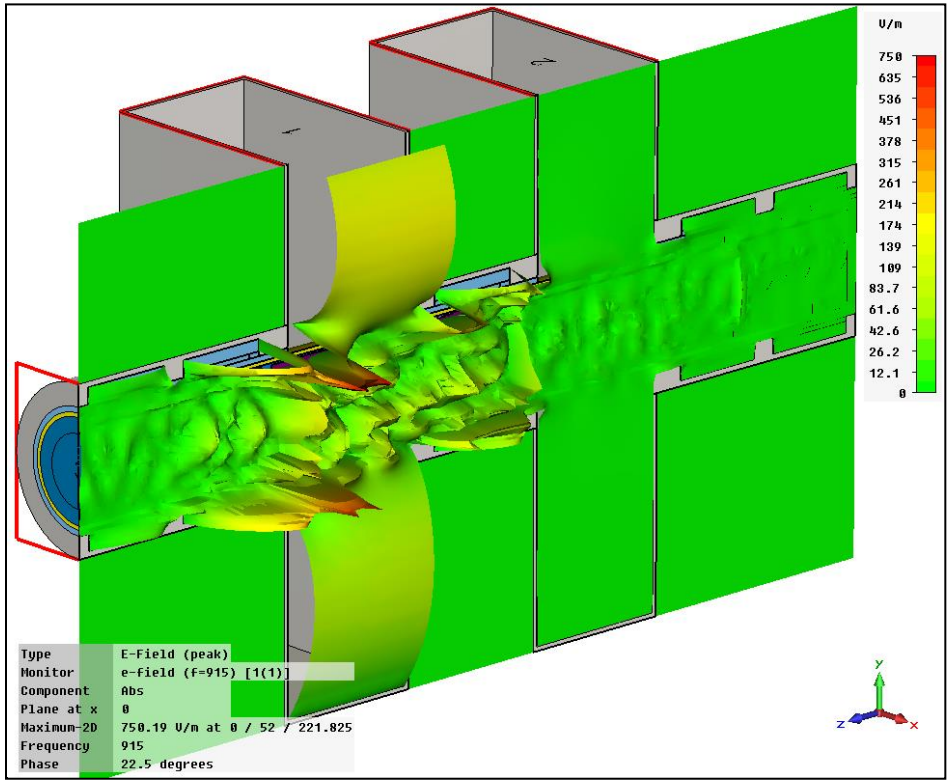
Príklad: Aplikátor TE10

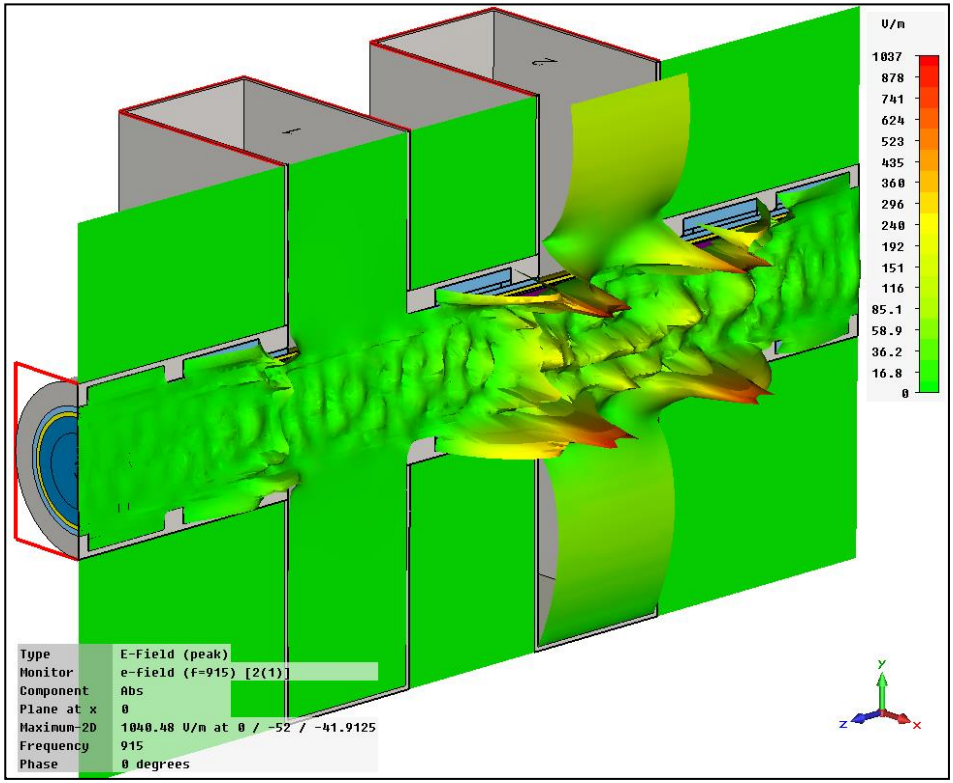


Tlmivky

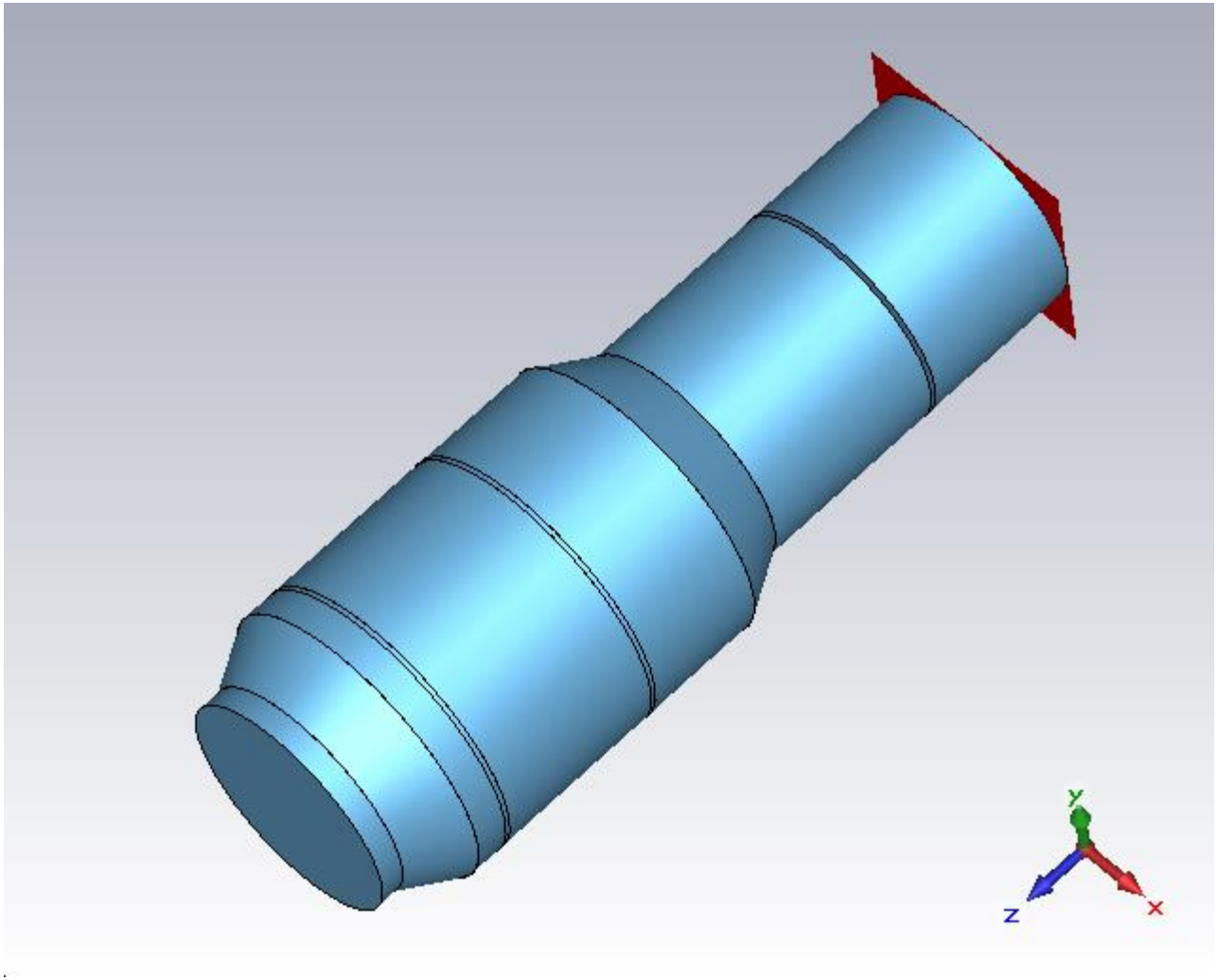


Efekt tlmiviek



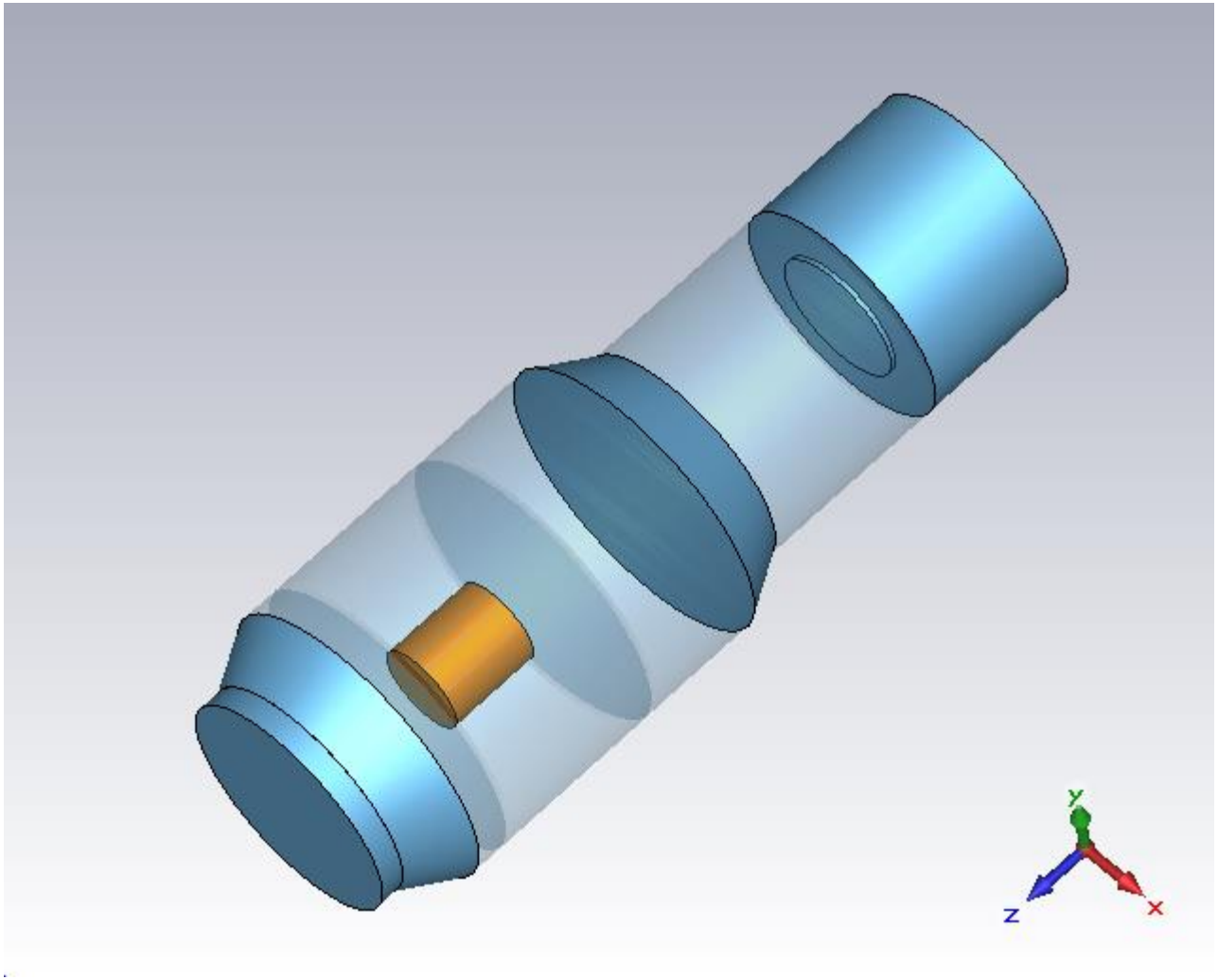


Príklad: aplikátor TM01

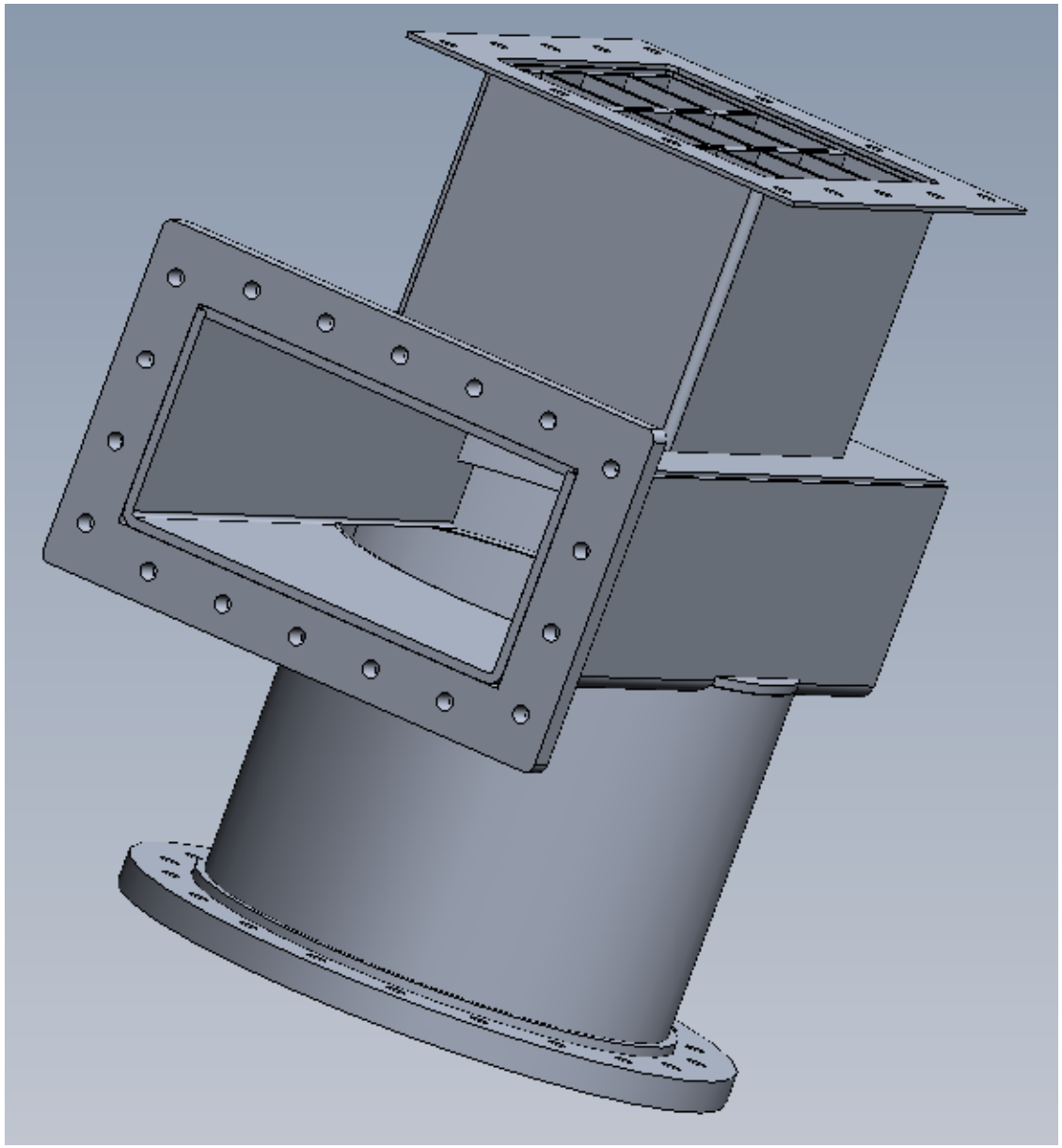


Aplikátor TM01

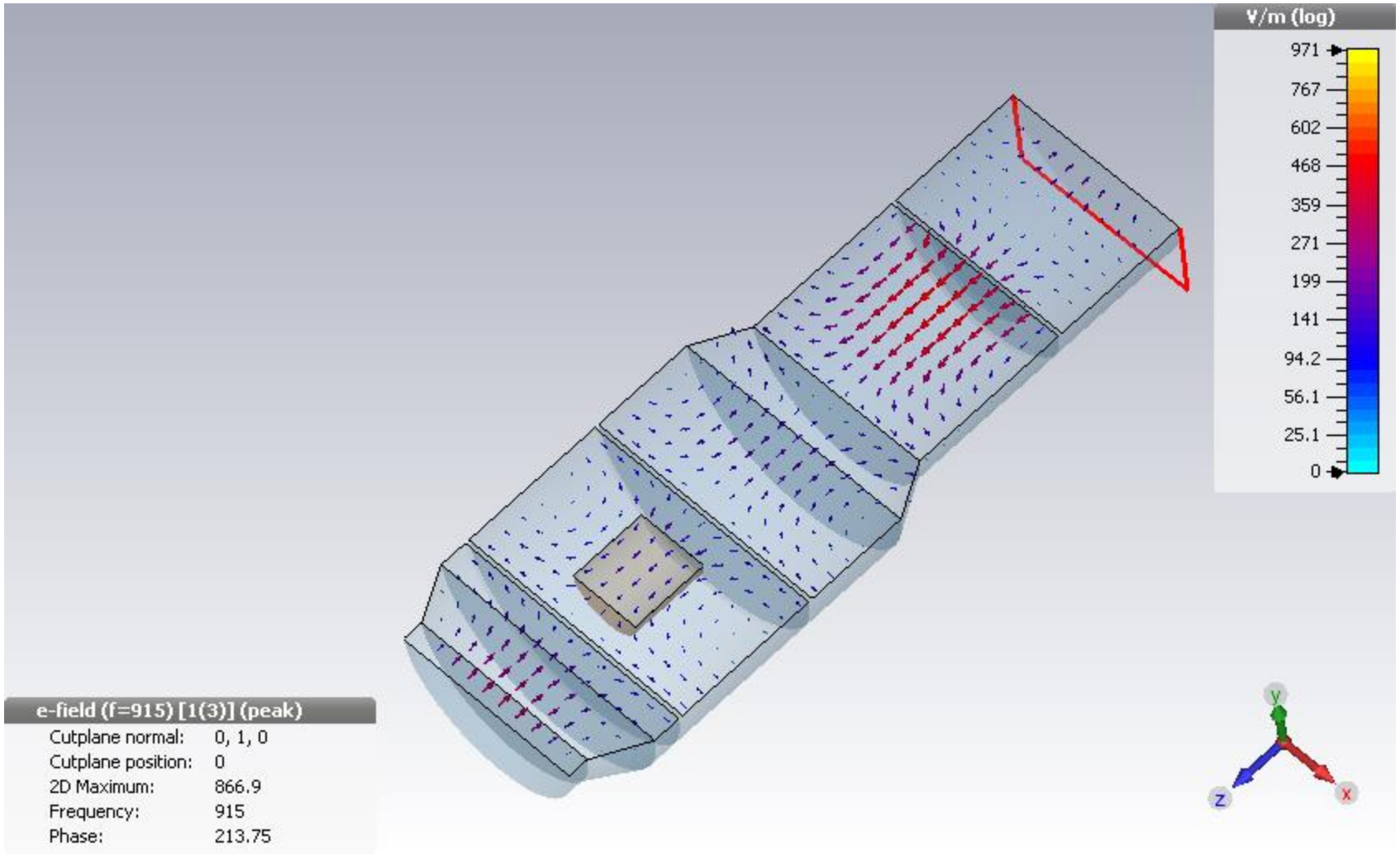
- Dávkovací (batch)



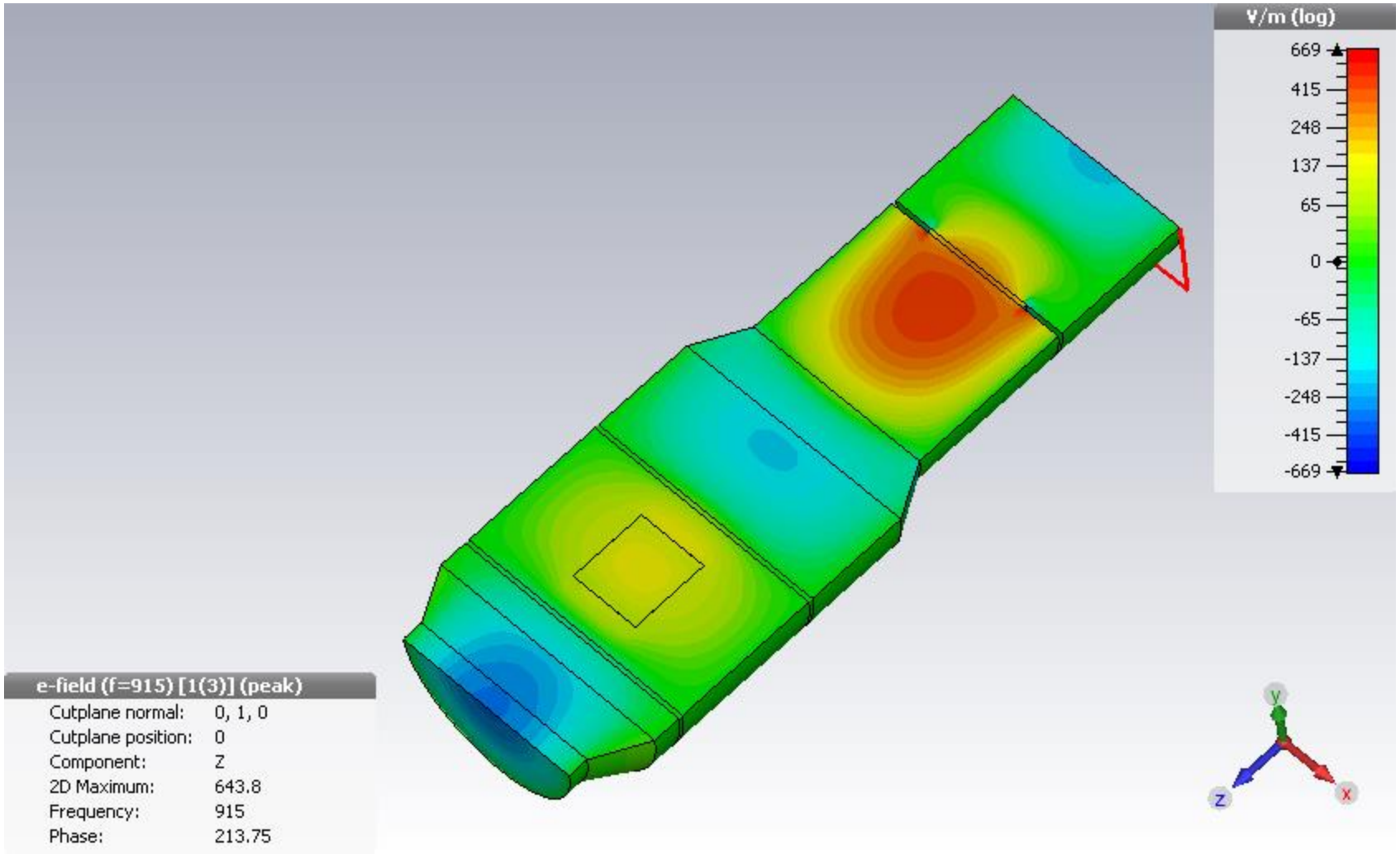
Konverzia □ TE10 – ○ TM01



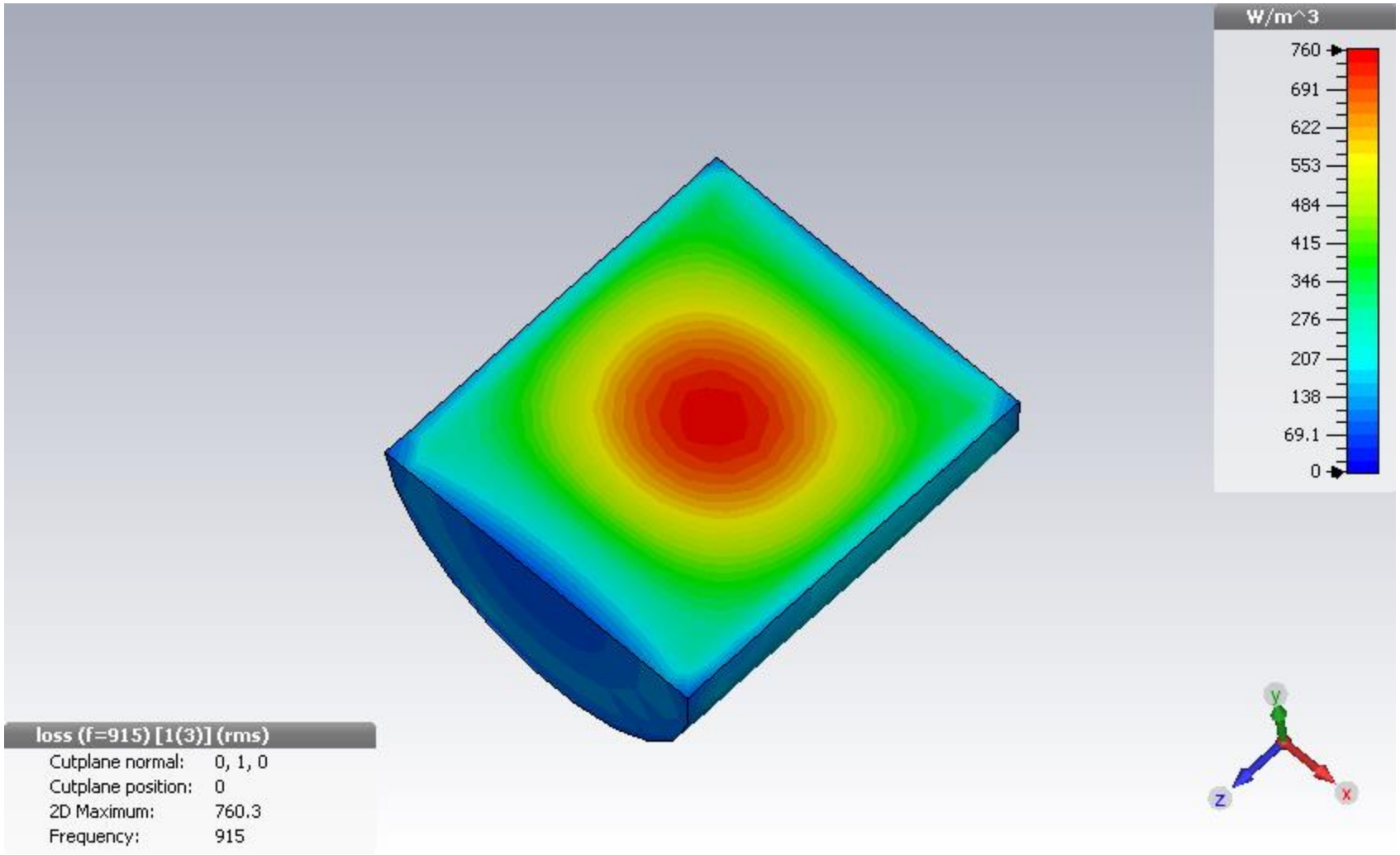
Pole E: TM013


V/m (log)
971
767
602
468
359
271
199
141
94.2
56.1
25.1
0
e-field (f=915) [1(3)] (peak)
Cutplane normal: 0, 1, 0
Cutplane position: 0
2D Maximum: 866.9
Frequency: 915
Phase: 213.75
y
z
x

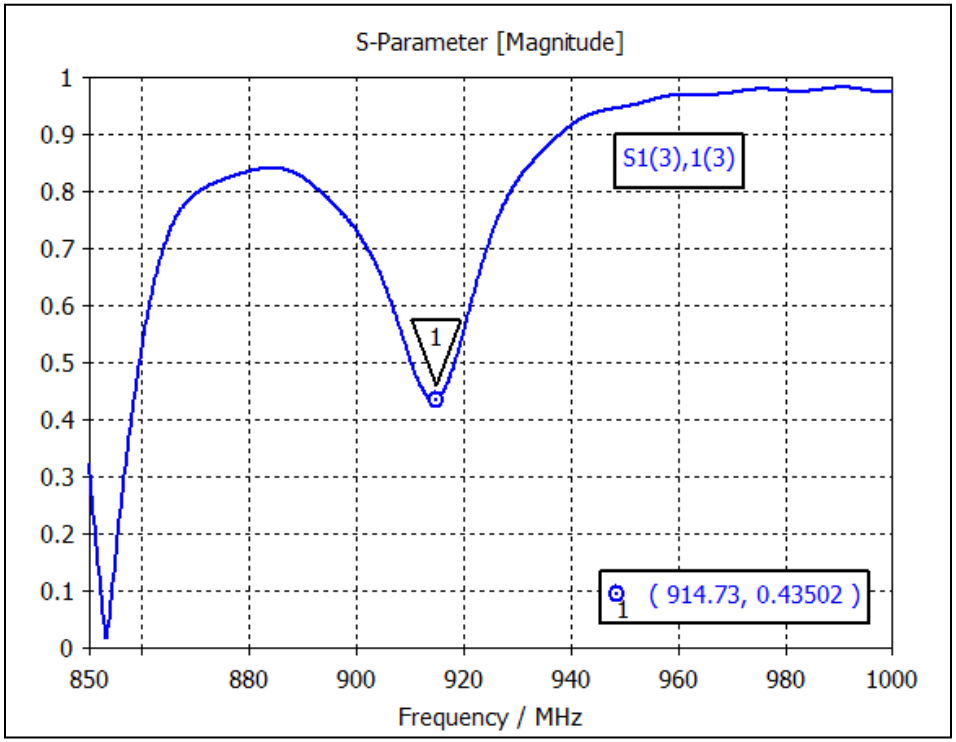
Pole E: TM013

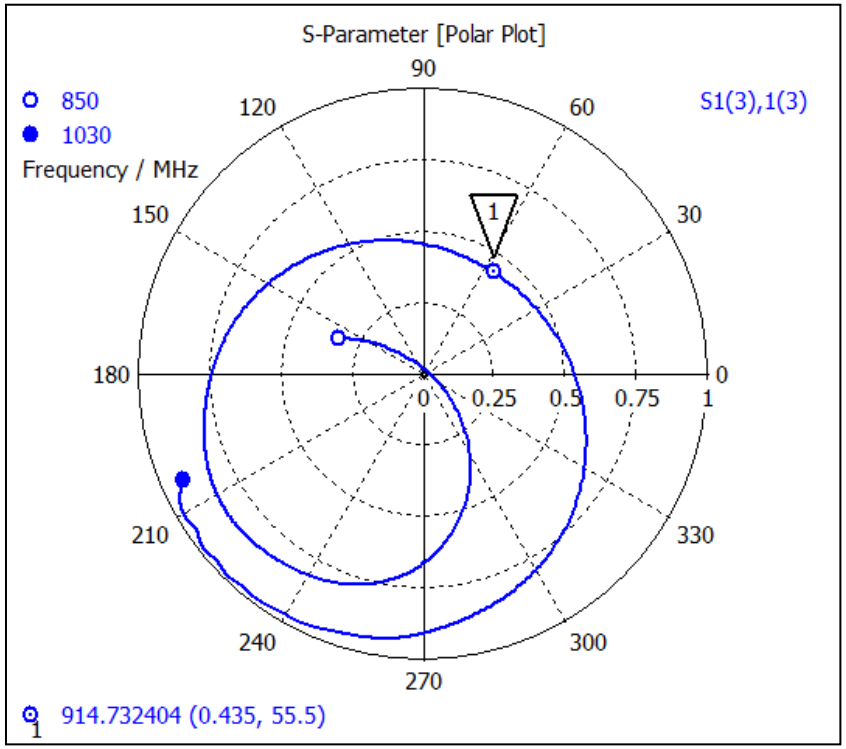

V/m (log)
669
415
248
137
65
0
-65
-137
-248
-415
-669
e-field (f=915) [1(3)] (peak)
Cutplane normal: 0, 1, 0
Cutplane position: 0
Component: Z
2D Maximum: 643.8
Frequency: 915
Phase: 213.75
y
z
x

Hustota stratového výkonu



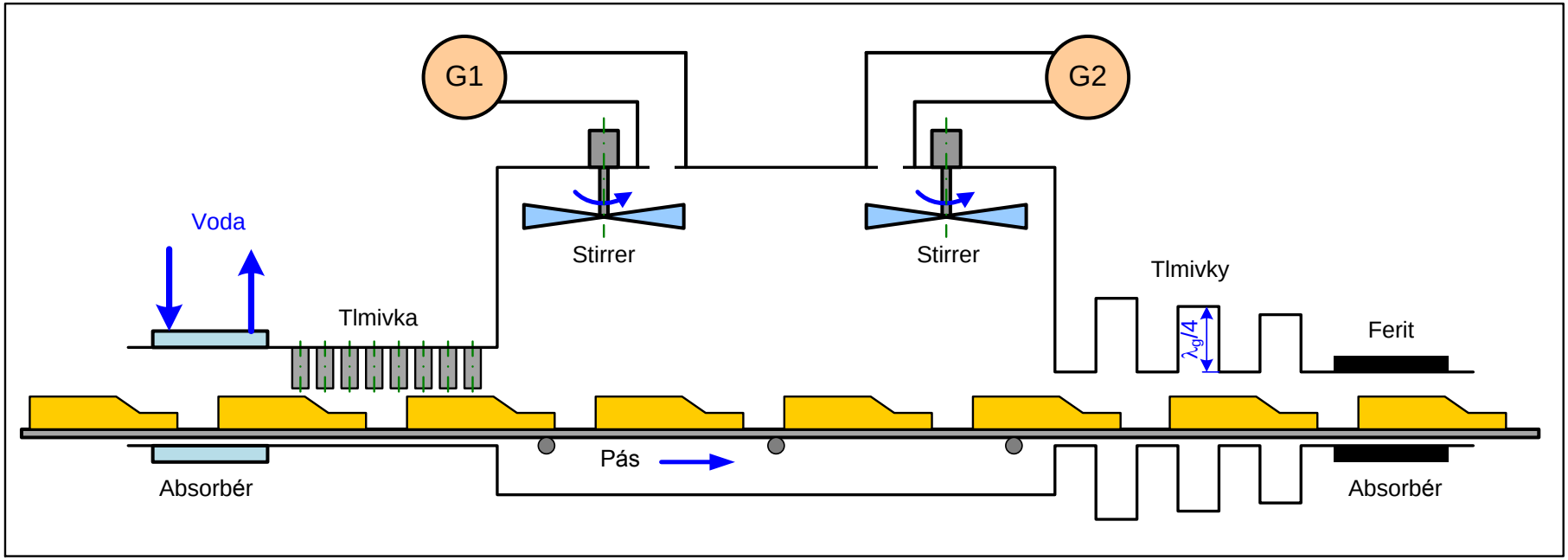
Vstupný koeficient odrazu





Multimódové aplikátory

- Domáce rúry vo veľkom
  - Rozmery veľké v porovnaní s vlnovou dĺžkou
  - Môžu v nich existovať až stovky módov
- V priemysle najpoužívanejšie
  - Často viac v kaskáde



Multimódové aplikátory

☺ Výhody

- Jednoduchá konštrukcia
- Netreba ich prelaďovať pri zmenách záťaže
- Prvky napomáhajúce homogenizácii poľa
  - Otáčavé podložky
  - „Miešače poľa" (mode stirrers)
- Veľké rozmery
  - Veľkoobjemová produkcia
- Budenie viacerými zdrojmi súčasne (multifeed)
  - Vzájomná väzba medzi žiaričmi
    - Zníženie účinnosti procesu
    - Zničenie generátorov
- Kombinácia s iným druhom ohrevu
  - Infražiariče, horúci vzduch

Multimódové aplikátory

☹ Nevýhody

- Nemožno ich navrhnúť analyticky
- Nemožno predpovedať rozloženie poľa
  - Ani s pomocou elektromagnetickej simulácie
- Nehomogénne rozloženie poľa
- Nízka účinnosť
  - Časť energie sa stráca v samotnom aplikátore

Príklad: Exfoliácia vermikulitu ☺

- Lístkovanie sľudy

http://www.nottingham.ac.uk/research/groups/industrial-microwave-processing/research.aspx

Exfoliácia vermikulitu

- Kompaktná sľuda s uväznenou vodou
- Prudkým ohrevom voda „exploduje“, vermikulit vytvorí „vejár“
- Rádový nárast objemu

Exfoliácia vermikulitu

Exfoliácia vermikulitu

Exfoliácia vermikulitu

Exfoliácia vermikulitu

Otvorené aplikátory

- Vyžarovacie aplikátory
  - Žiaria do voľného priestoru
  - Množsto žiaričov usporiadaných lineárne alebo plošne
  - Príklad: Meander z vlnovodu so štrbinami nad pásom textilu

☺ Výhody
  - Homogenita poľa
  - Malá citlivosť na zmeny záťaže
  - Veľké rozmery

☹ Nevýhody
  - Nemožno ich navrhnúť analyticky
  - Ťažšia ochrana pred vyžarovaním do okolia

ELEKTROMAGNETICKÉ SIMULÁTORY

Elektromagnetické simulátory

- V súčasnosti neoceniteľné pomôcky
- Pole a odvodené veličiny v „ľubovoľnej“ štruktúre
  - Rozptylové parametre
  - SAR
  - Vyžarovacie charakteristiky antén
  - ...
- Ale:
  - Správne zadať štruktúru
  - Poznať vlastnosti materiálov
  - „Vodičský preukaz“
  - Fyzikálna znalosť problematiky **nevyhnutná**!
  - Aj pri splnení podmienok niekedy iba rámcové odpovede
- „Multifyzikálne“ simulátory
  - Súčasne riešia rovnice z rôznych oblastí fyziky

PREHĽAD PRIEMYSLOVÝCH APLIKÁCIÍ MIKROVĹN

Prehľad priemyslových aplikácií mikrovĺn

- Spracovanie potravín
- Sušenie
- Ohrev
- Plazma

- Veľmi obšírny zoznam: http://www.romill.cz/cz/prehled-aplikaci

Spracovanie potravín

- Predhrievanie (temperovanie) zamrazených potravín
  - Zostanú tesne pod bodom mrazu
  - Mäso, zelenina, maslo
- Dopekanie potravín
  - Zahnednutie (browning)
  - Skyprenie, nafúknutie (puffing)
- Pečenie slaniny
- Pasterizácia a sterilizácia
  - Možno spracúvať balené potraviny
  - Konvenčné metódy: Desiatky min. až hod., relatívne vysoká T
  - Alternatíva:
    - Veľmi rýchle zohriatie (5 s) na T = 65 C
    - Aplikácia vysokého js poľa $\boldsymbol{E}$
    - Perforuje bunkové steny "šokovaných" mikroorganizmov
    - Takýto rýchly ohrev je možný prakticky iba mikrovlnami

Sušenie

- Konvenčné sušenie
  - Účinné v počiatočných fázach
  - Voda sa zvnútra dostáva kapilárami na povrch
  - Dosušovanie zvyšku extrémne časovo náročné
- Mikrovlny dokážu dosušovanie rádovo skrátiť
  - Sušenie horúcim vzduchom a mikrovlnami sa často kombinuje
- Farmaceutický priemysel
  - Vákuové sušenie liekov, práškov, granulí
- Cestoviny
  - 1000 kg: Konvenčné sušenie 10 – 15 hodín
  - Sušenie mikrovlnami vo vákuu 1 hodina
- Keramika, papier, kartón, koža, drevo
- Kaly z čističiek, olejovité bahno z podmorských vrtov
  - 915 MHz, inštalované výkony až 1 MW

Ohrev

- Vulkanizácia gumy
- Vytvrdzovanie epoxidov
- Tvarovanie, tavenie a zváranie termoplastov
- Urýchlenie chemických reakcií, chemická syntéza
- Sintrovanie a vypaľovanie keramiky
- Drvenie rudy
- Exfoliácia (rozlístkovanie) vermikulitu a perlitu
- Výroba biopaliva

Plazma

- Polovodičový priemysel
  - Selektívne leptanie a čistenie substrátov
- Nanášanie tenkých vrstiev
    - PCVD (Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition)
  - Fotovoltaické panely
  - Slnečné kolektory
  - Výroba umelých diamantov
  - Reflektory svietidiel
  - Módne, dúhovými farbami hrajúce nádobky
  - **Výroba optických vláken**

Bizarné aplikácie

- Dekontaminácia pôdy (oleje)
- Ničenie buriny a škodcov v pôde
- Extrakcia aromatických látok z rastlín
  - Mentol z mäty pri výrobe žuvačiek, voňavky
- Omračovanie dobytka
- Tavenie železa, výroba liatiny, kalenie ocele
- Zapaľovanie v automobiloch
- Prenos energie zo solárnych panelov vo vesmíre na Zem.
- "Slnko na Zemi" (sulfur lamp)
  - Prášková síra, argón v kremennej banke 30 mm
  - Bez elektród
  - Mikrovlnný výkon 2 kW ekvivalentný klasickým žiarovkám 25 kW
  - Haly, štadióny. Polia miesto slnka
  - Rozvod svetlovodmi

ČASŤ 2
IMPEDANČNÉ PRISPÔSOBOVANIE

ČASŤ 2: Impedančné prispôsobovanie

- Teória
- Špecifiká priemyslových aplikácií
- Používané prispôsobovacie obvody
- Trojkolíkový vlnovodný autotuner
- Základné vlastnosti autotunerov
- Optimálne prispôsobenie
- Problém striedania kolíkov

Terminológia

- Impedančné prispôsobenie
  - Stav, v ktorom sa z generátora do záťaže prenáša maximálny možný výkon
    - „Prenáša“ = absorbuje v záťaži (premení na teplo)
  - Hovoríme: Záťaž je impedančne prispôsobená k danému generátoru
  - Tiež: výkonové alebo **konjugované** prispôsobenie

Terminológia

- Prispôsobený generátor
  - K čomu prispôsobený?
    - K vedeniu, ktoré ho spája so záťažou
    - Nemusí tam byť (abstraktné vedenie)
    - Referenčné: voči nemu definované $\boldsymbol{S_{ij}}$
  - Dokonale absorbuje spätnú vlnu odrazenú od záťaže
  - Bezodrazový

- Ak je generátor prispôsobený
  - Max. výkon v záťaži: ak je bezodrazová
  - Prispôsobená záťaž = bezodrazová záťaž

Potreba impedančného prispôsobenia

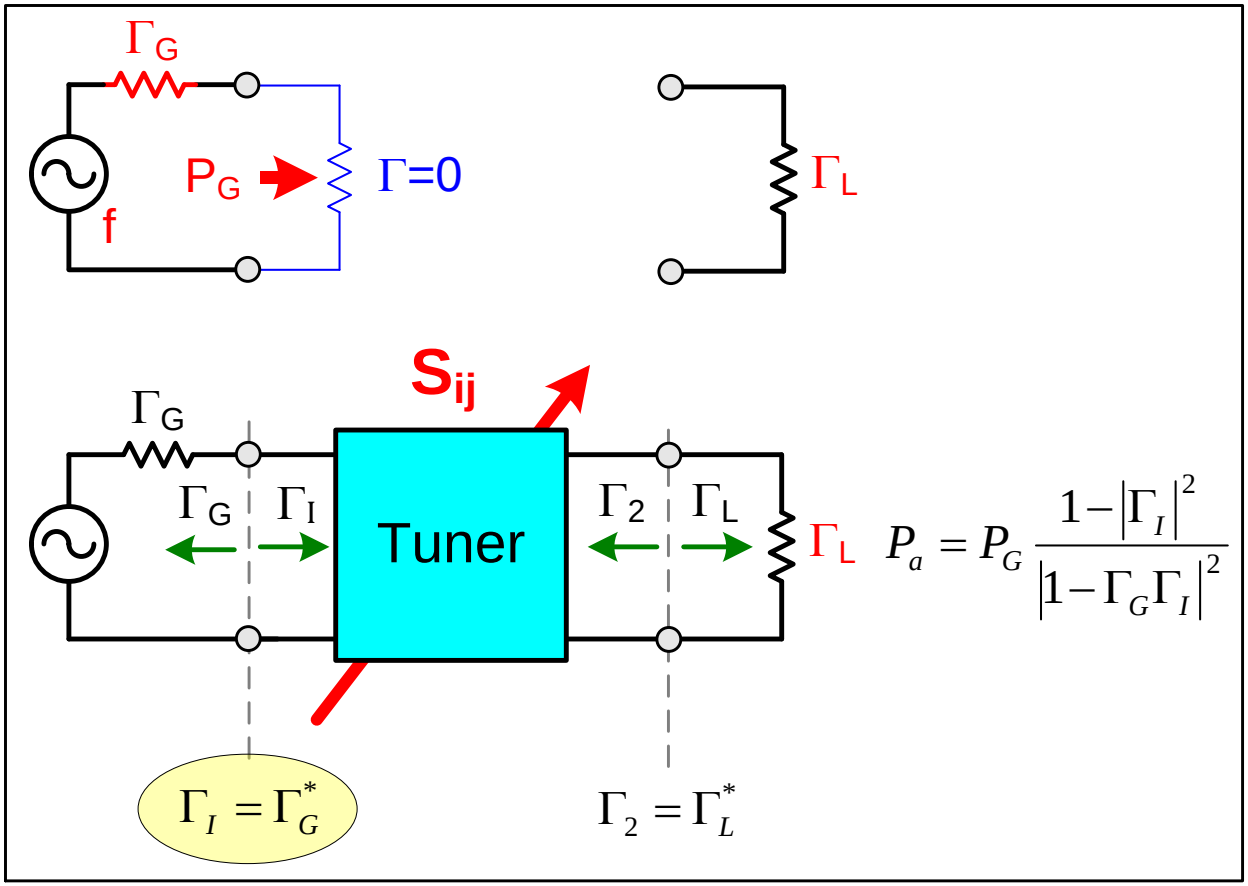
- Generátor: magnetrón s cirkulátorom
  - Bezodrazový
  - Cirkulátor presmeruje spätnú vlnu do vodnej záťaže
    - Energia sa premení na **bezcenné teplo**

- Záťaž: aplikátor s objektom
  - V praxi odráža až 50% výkonu
    - Nemožno presne navrhnúť
    - Vlastnosti objektu sa menia (sušenie)
    - Rôzne druhy objektov
    - Nesprávny návrh

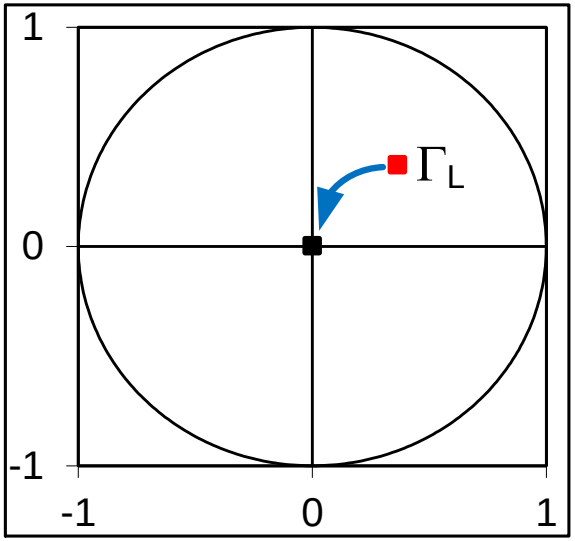
Potreba impedančného prispôsobenia

- Prevádzky
  - Inštalovaný výkon megawatty
  - 24 hodín denne
  - Aj 5% úspory energie má význam
- Iné dôvody
  - Kvalita produkcie
    - Stabilita plazmy
- Riešenie: medzi generátor a aplikátor „**tuner**“
  - Adaptívne nastaviteľný **bezstratový** obvod
  - Transformuje impedanciu aplikátora
  - Generátor vidí bezodrazovú záťaž

Teória



$$P_a = P_G \frac{1-|\Gamma_I|^2}{|1-\Gamma_G\Gamma_I|^2}$$



$\Gamma_G = 0$

$\Gamma_I = 0$

$S_{22} = \Gamma_L^*$

$$P_a = P_G\left(1-|\Gamma_I|^2\right)$$

Prispôsobenie: Bežná elektronika

- Elektrické obvody
  - So sústredenými parametrami
  - Vedenia vĺn TEM
- Spektrum signálu široké
- Výkon signálu nízky
- Impedancia zdroja a záťaže
  - Frekvenčne závislé
  - Časovo stále
- Prispôsobenie
  - V širokom frekvenčnom pásme
  - Zložitý prispôsobovací obvod
  - Jednorazovo naladený

Priemyslové aplikácie

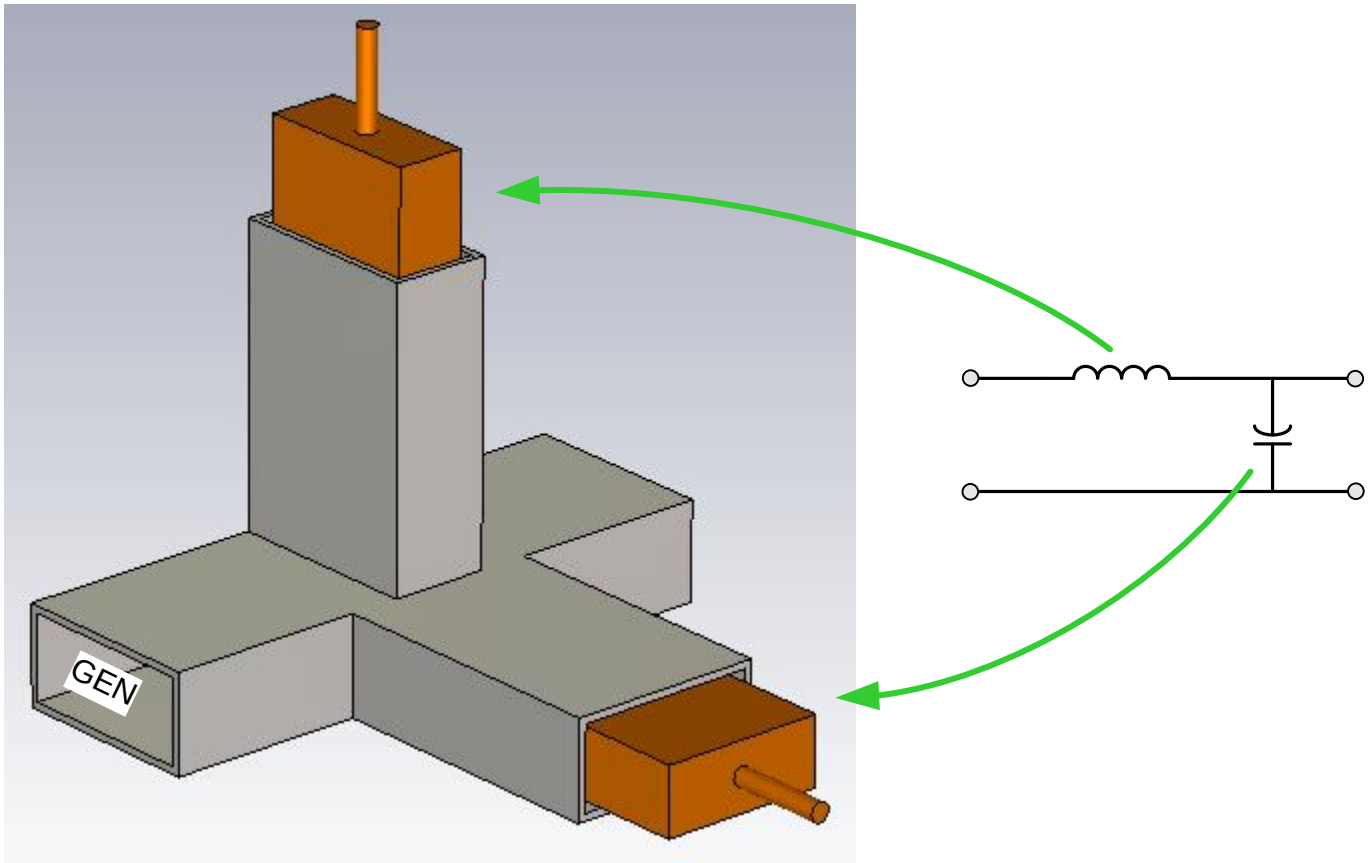
- Vlnovody
- Spektrum signálu úzke
- Stredná frekvencia premenlivá
  - Nie je vopred známa
  - Musí sa merať
- Výkon vysoký: 1 – 100 kW
- Generátor bezodrazový
- Záťaž
  - Frekvenčne závislá
  - Časovo premenná
    - Pomalé zmeny (vlastnosti objektu v procese)
    - Rýchle oscilácie (použité zariadenie)

Prispôsobenie: Priemyslové aplikácie

- Úzkopásmové
- Tuner: Elektricky jednoduchý prispôsobovací obvod
- Preladiteľný
  - Zmena záťaže
  - Zmena frekvencie

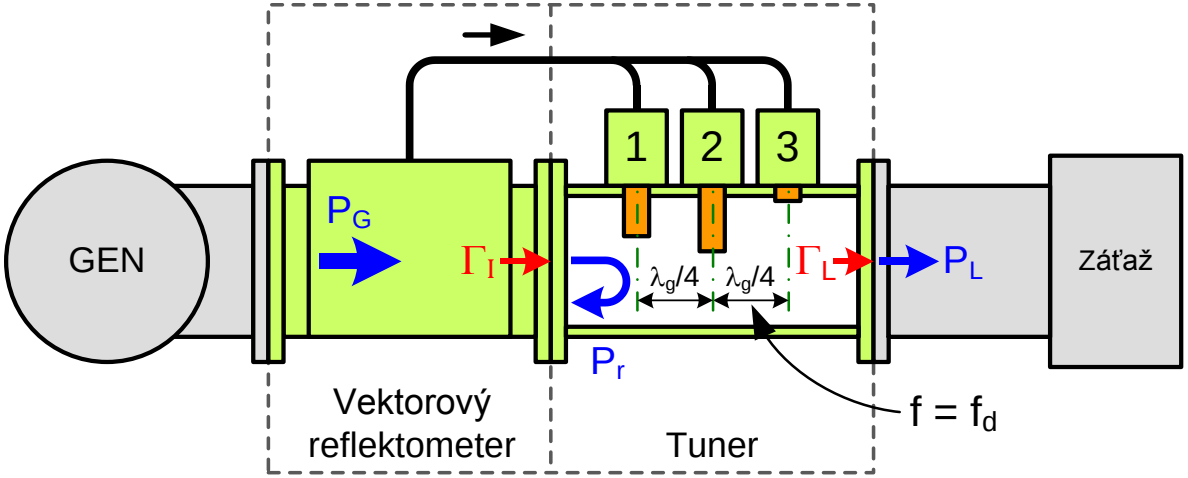
- Najčastejšie používané obvody
  - Trojkolíkový vlnovodný impedančný transformátor
  - Magické T

Magické T



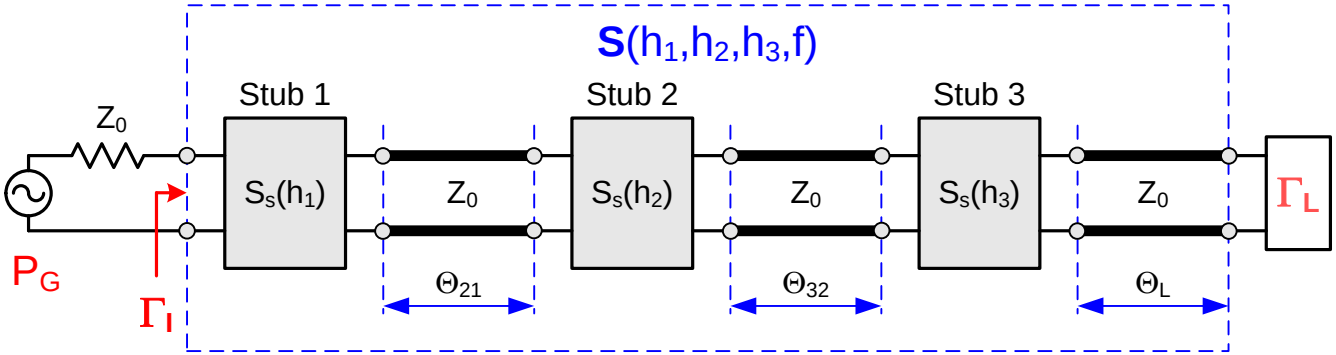
- Slabé miesta
  - Posuvné skraty
  - Frekvenčná závislosť

Trojkolíkový vlnovodný autotuner



- Vektorový reflektometer
  - Meria Γ_I
- Tuner
  - Kolíky **1+2** alebo **2+3**

1. Meraj Γ_I a frekvenciu f
2. Zo známej f a zasunutia kolíkov h_k počítaj $S_{ij}(h_1,h_2,h_3,f)$



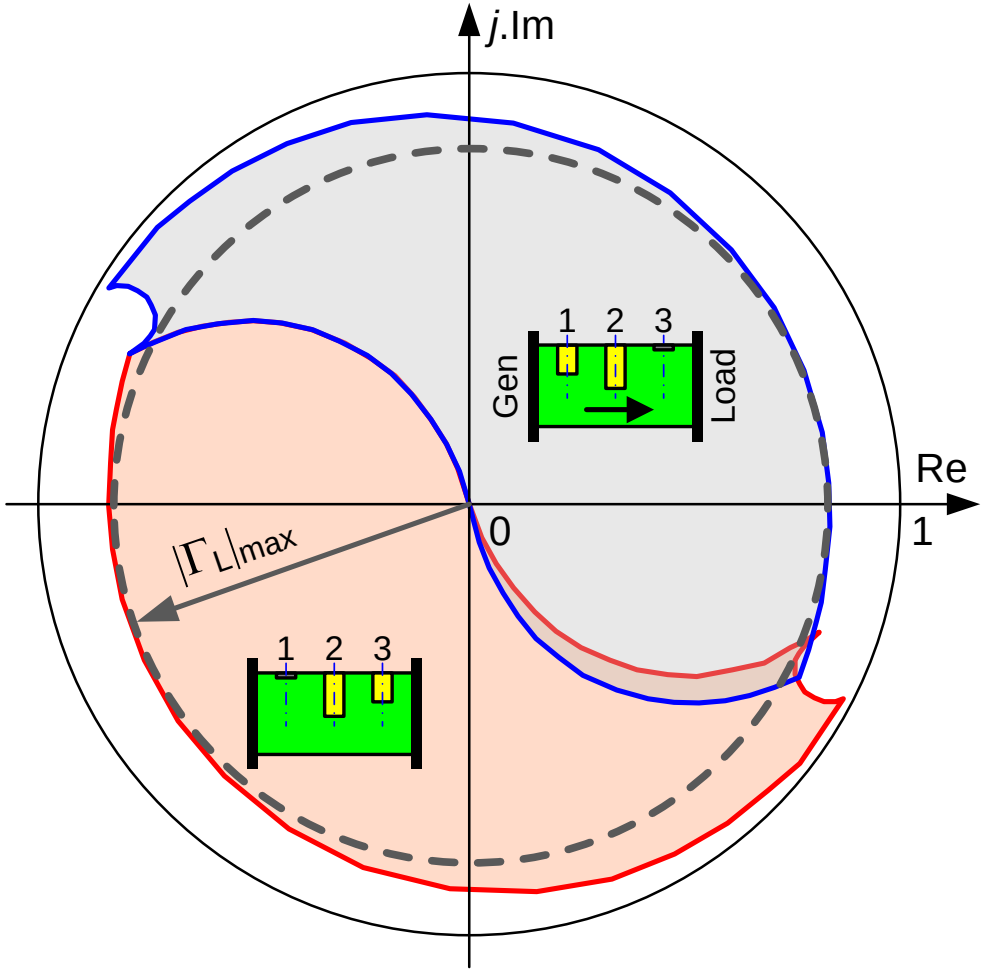
3. Pomocou S_{ij} prepočítaj Γ_I na Γ_L
4. Zo známeho Γ_L urči nové hĺbky h_1, h_2, h_3 tak, aby $\Gamma_I = 0$
5. Posuň kolíky do nových polôh

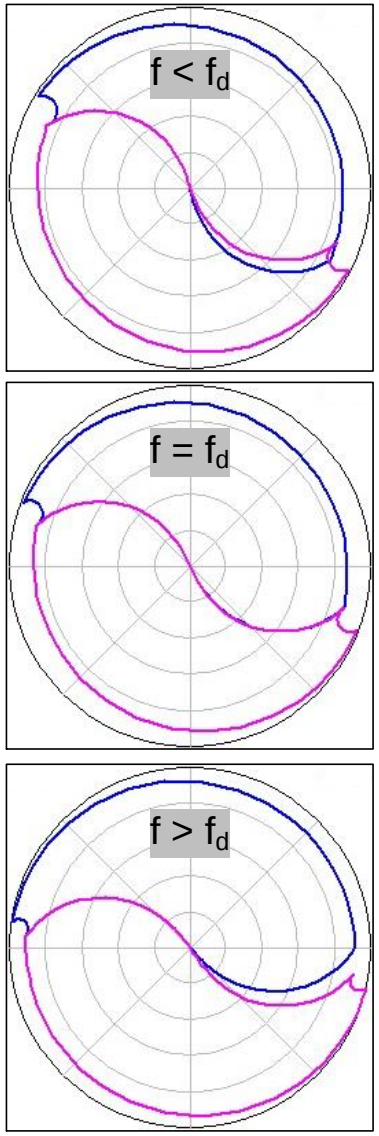
Základné vlastnosti autotunerov

- Oblasť prispôsobiteľných koeficientov odrazu
  - Zjednodušene: jediné číslo
    - Max. $|\Gamma_L|$ (PSV), ktoré možno prispôsobiť bez ohľadu na fázu
  - Presnejšie: zobrazenie v komplexnej rovine Γ_L
- Presnosť prispôsobovania
- Rýchlosť prispôsobovania
- Maximálny pracovný výkon

Oblasť prispôsobiteľnosti

- Dve podoblasti
- Frekvenčne závislé

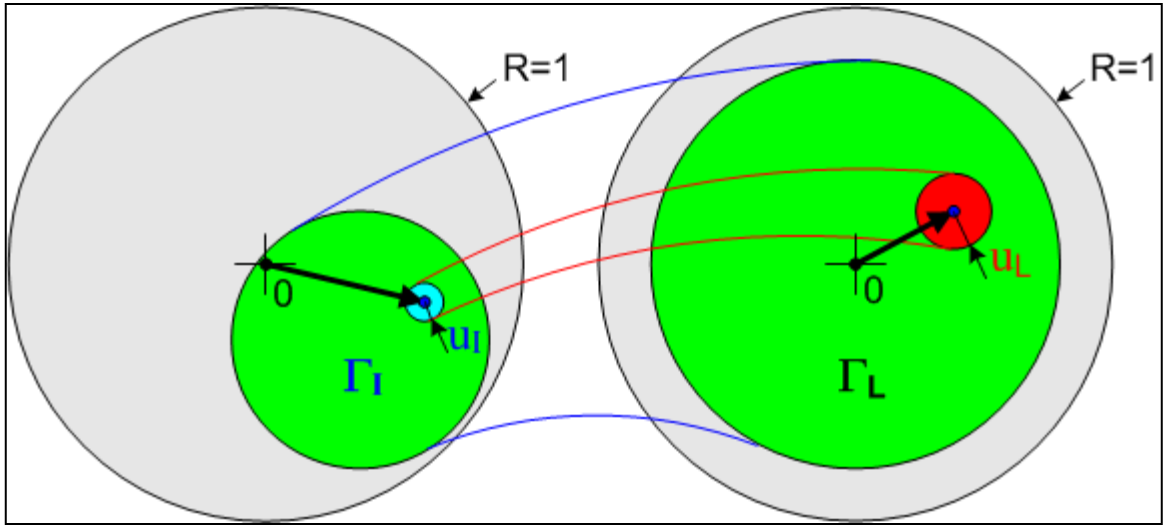




Presnosť prispôsobovania

- Presnosť merania koeficient odrazu Γ_I
- Presnosť náhradnej schémy tunera
- Nepresnosť: Po zasunutí kolíkov $\boldsymbol{\Gamma_I \neq 0}$
  - Doladenie po viacerých krokoch
  - Systém sa rozkmitá

Veľké $|\Gamma_L|$
- Kolíky zasunuté hlboko
- Maskujú Γ_L
- Horšia presnosť ladenia



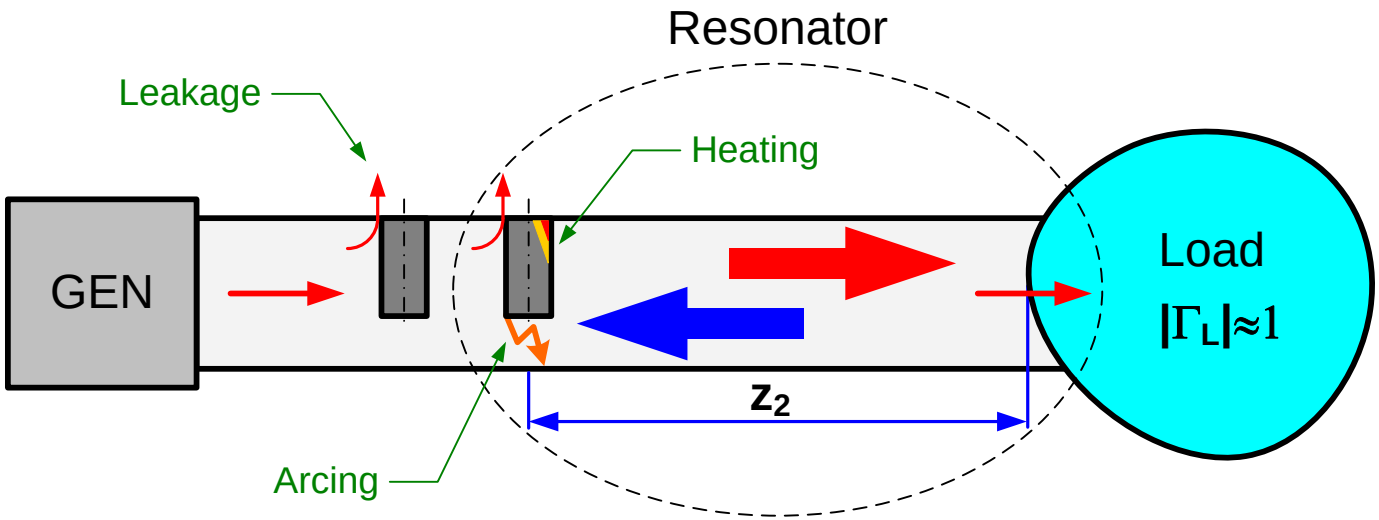
Rýchlosť ladenia

1. Doba merania
2. Rýchlosť výpočtov
3. Doba presunu kolíkov
   - Plné vysunutie typ. 0,5 – 10 s
   - Obvykle dominuje
   - Ak len malé korekcie: typ. **5 ladiacich krokov/s**

➢ Niekedy meranie musí trvať dlho (100 ms – 1 s)
   - Spriemerňovanie fluktuácií
   - Limituje kadenciu ladenia

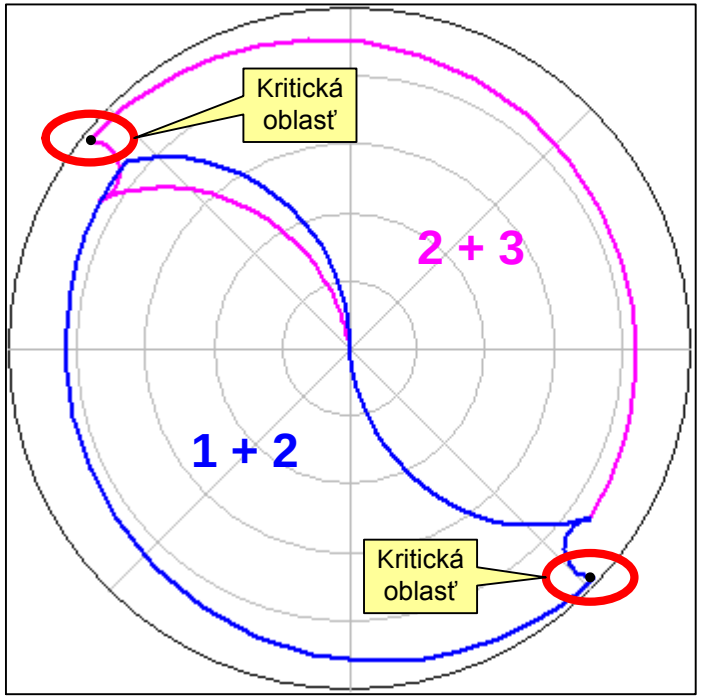
Maximálny pracovný výkon

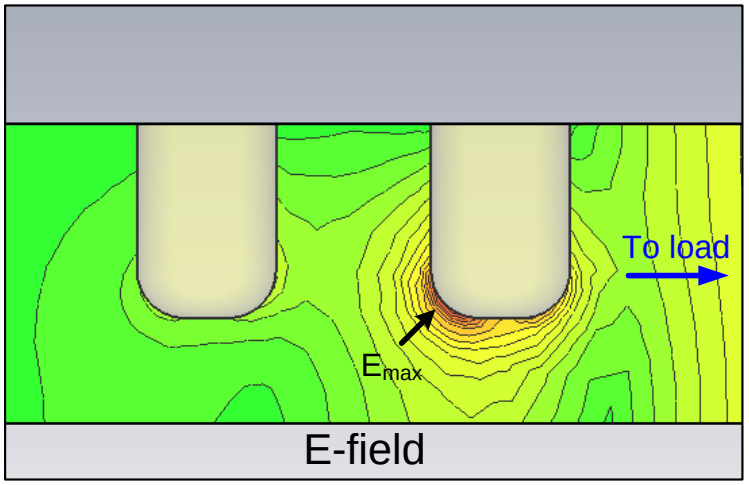
- Elektrické výboje – vysoké lokálne ***E***
- Prehriatie kolíkov – vysoká plošná hustota prúdu
- Parazitné vyžarovanie

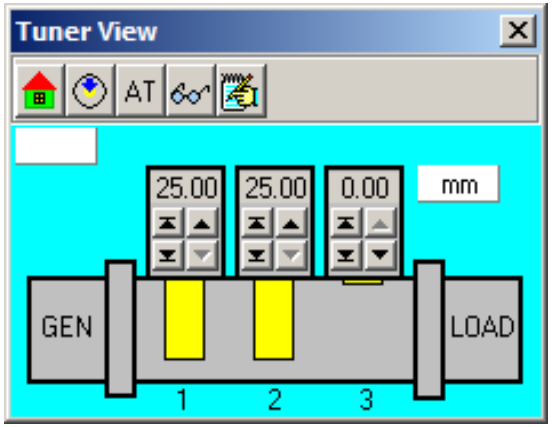


- Typické P_{max} pre $|\Gamma_L| < 0{,}95$
  - 2,45 GHz 20 kW
  - 900 MHz 100 kW

Elektrické výboje

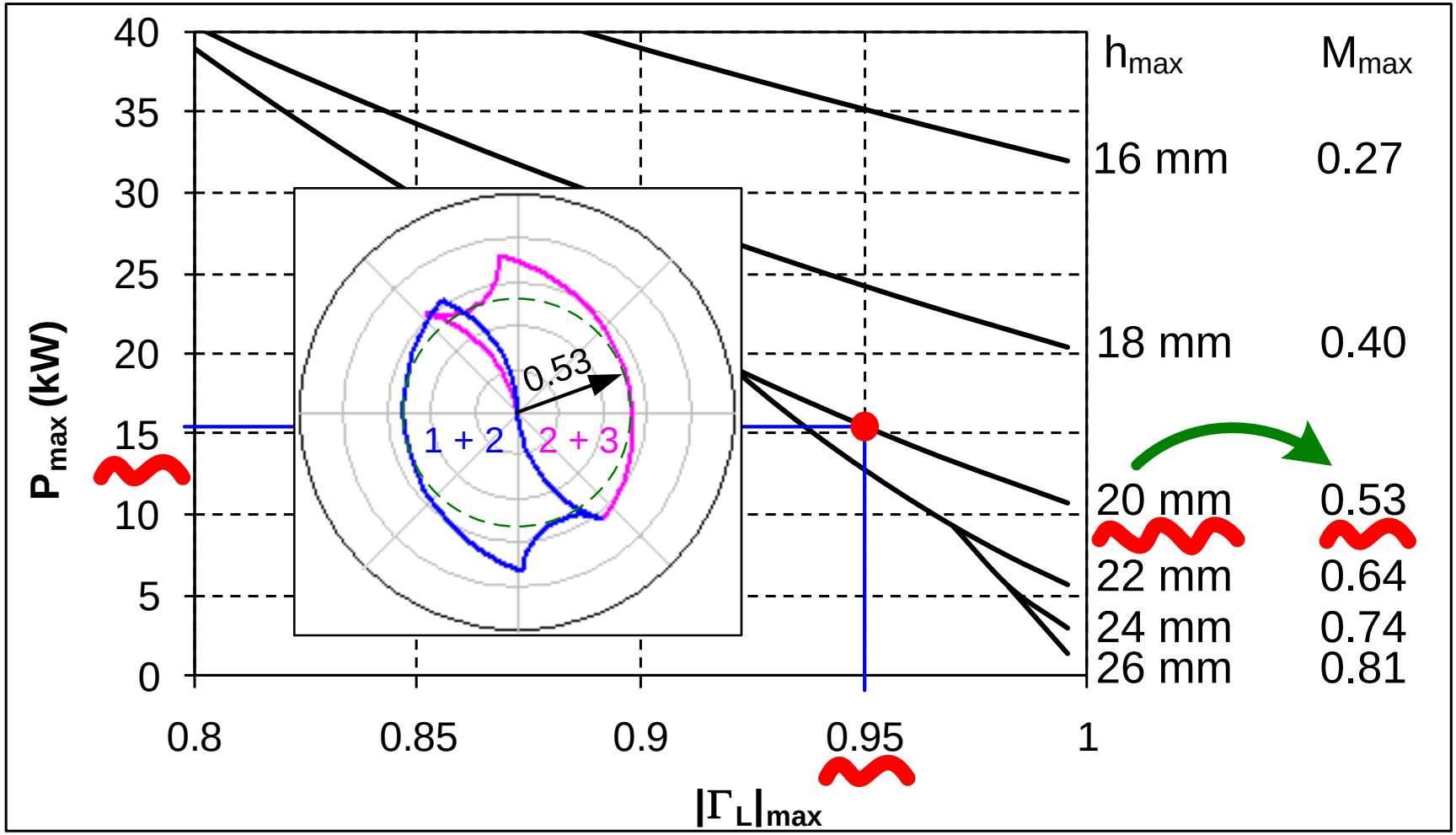




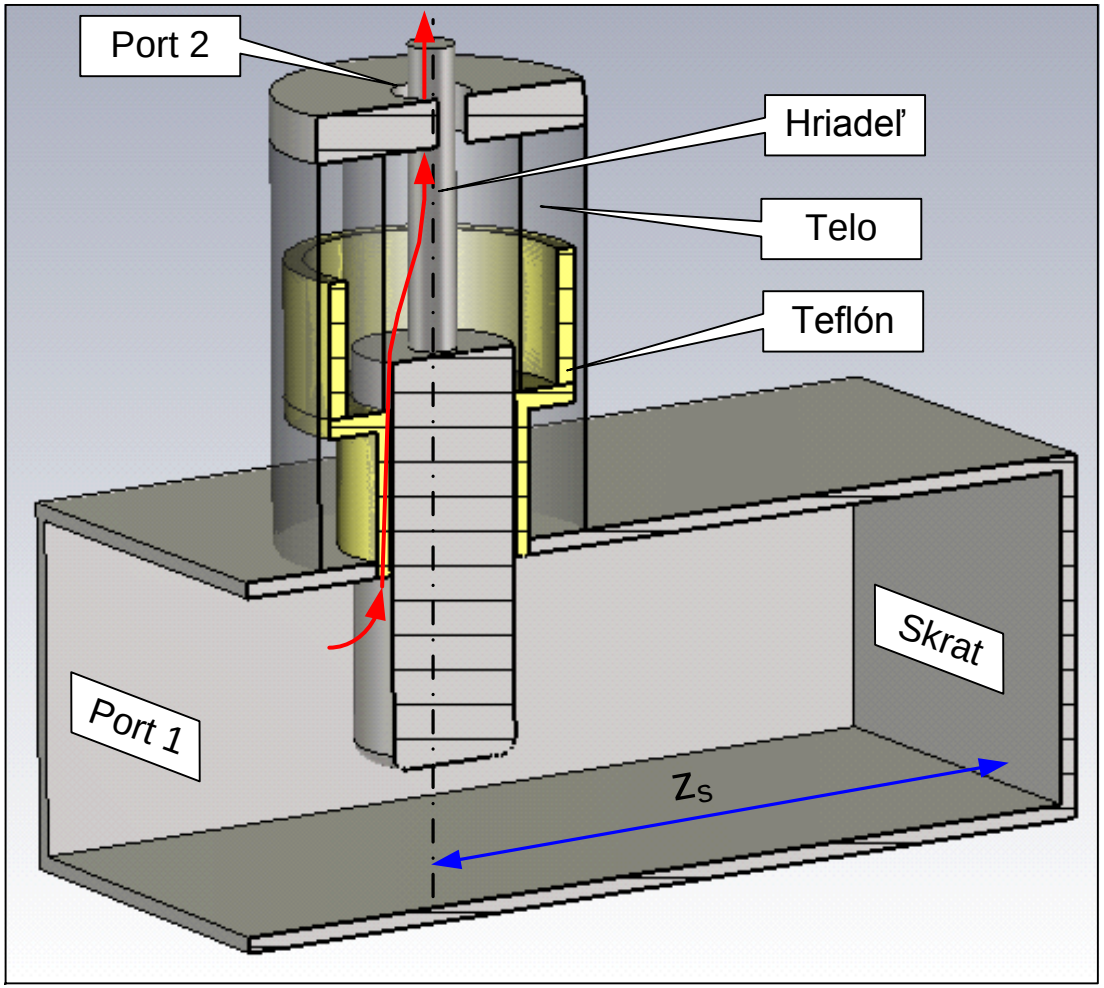


Čo sa dá robiť

- Neprekročiť stanovené max $|\Gamma_L|$
- Obmedziť hĺbku zasunutia kolíkov

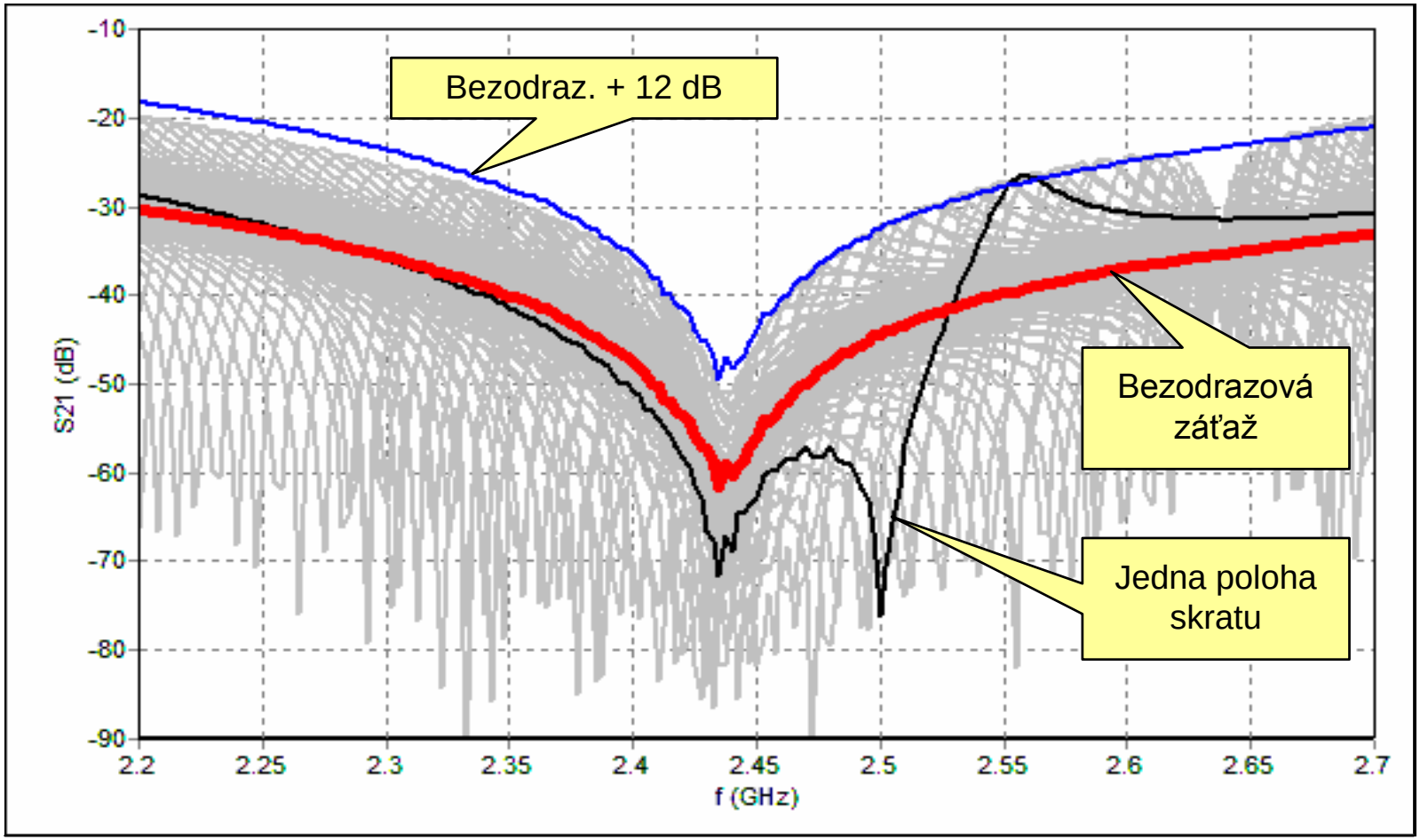


Únik žiarenia (leakage)



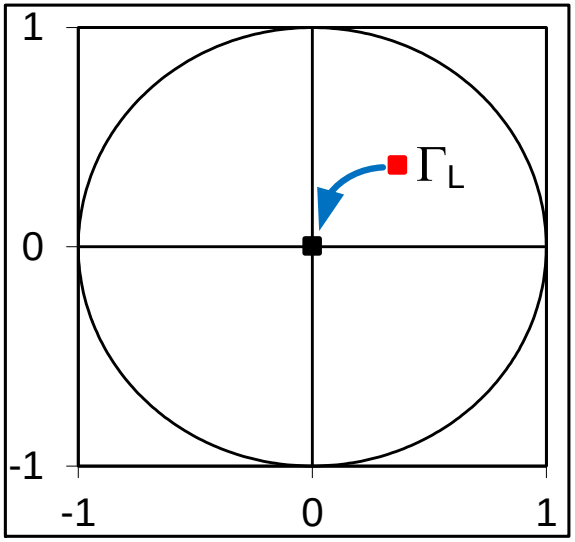
Meranie izolácie

– Vlnovod zakončený
  - Bezodrazovou záťažou
  - Skratom



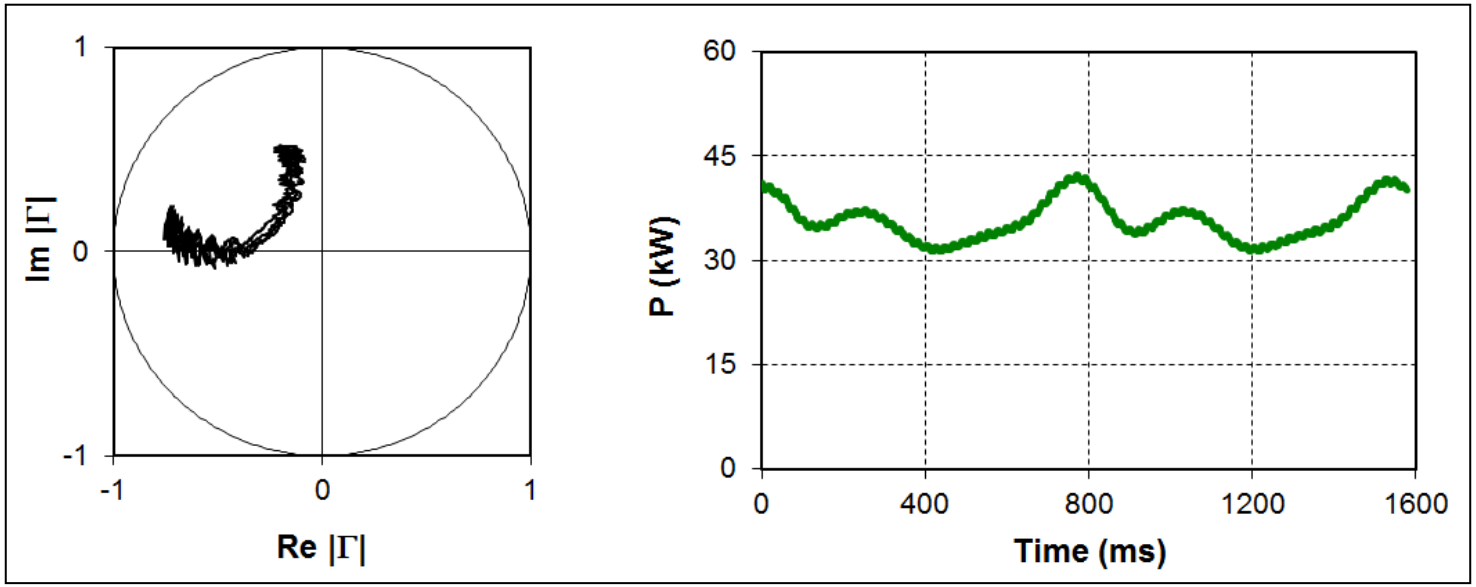
OPTIMÁLNE PRISPÔSOBENIE

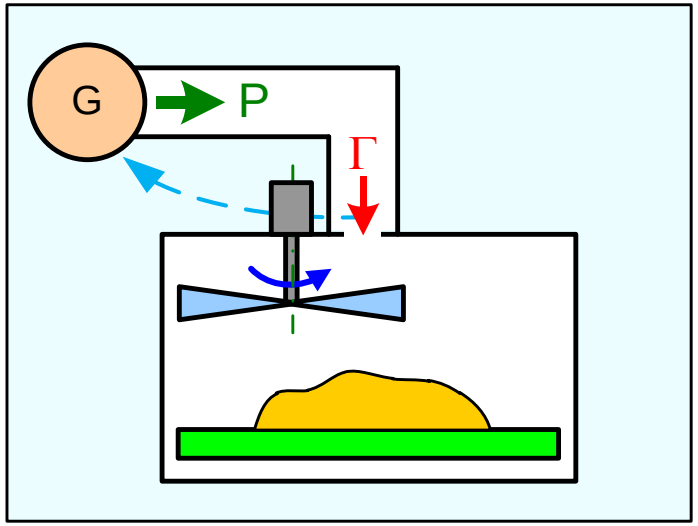
Teória je užitočná



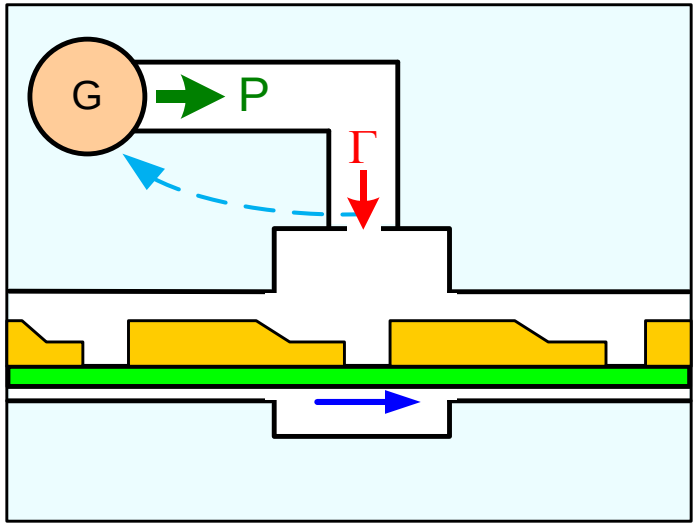
- ale...

Život je zložitejší



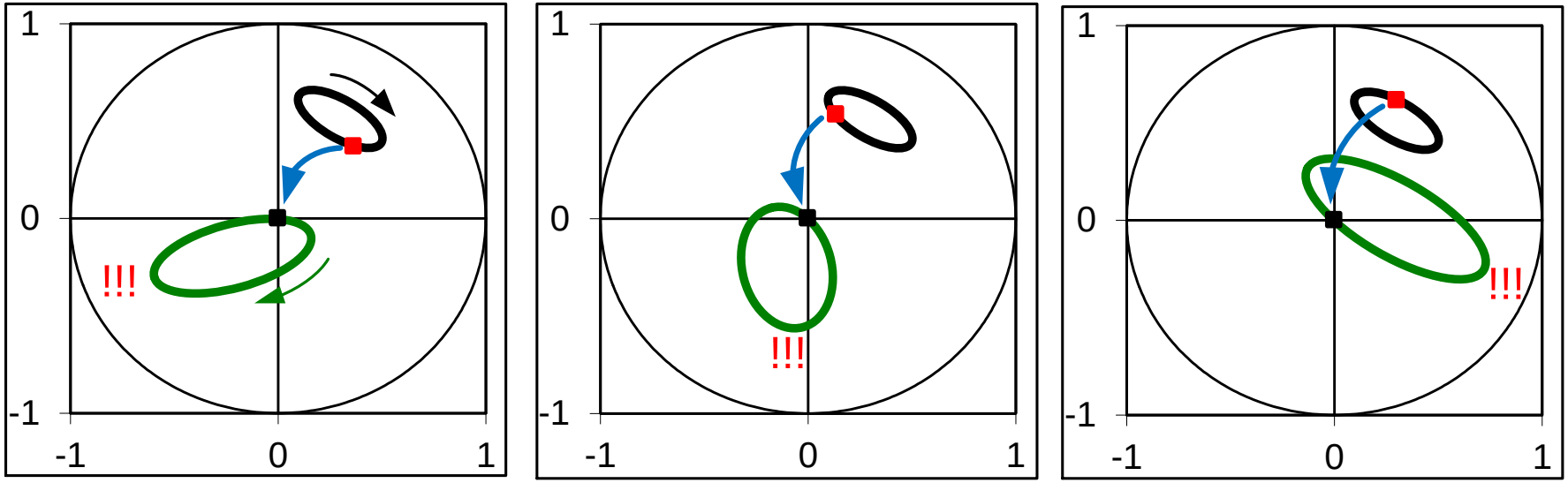


Mode stirrers



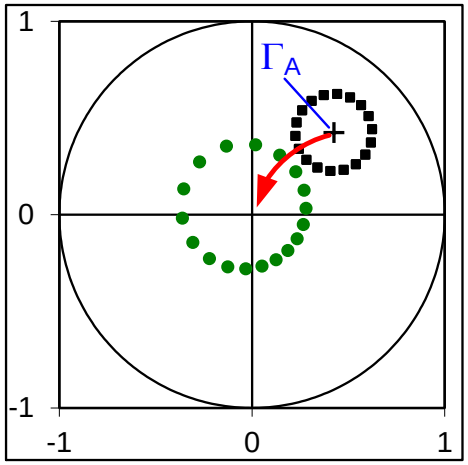
Moving of inhomogeneous objects

Ignoruj to...



- Náhodné merania a ladenie
- Zlá funkčnosť: vysoký priemerný odrazený výkon
- Fluktuácie všetkých meraných údajov
- „Nervózny“ tuner: stále dolaďuje
- Nutné nejako spriemerovať

Intuitívne metódy

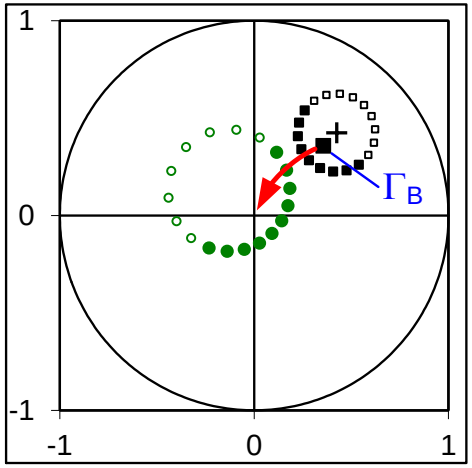


A: Stredná hodnota koeficienta odrazu

$$\Gamma_{L,n} = x_n + jy_n, \quad P_{G,n}, \quad n = 1, 2, \ldots N$$

$$\boxed{\Gamma_A = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\Gamma_{L,n}}$$

- Ignorujú sa zmeny výkonu P_G generátora



B: Priemer **vážený** výkonmi generátora

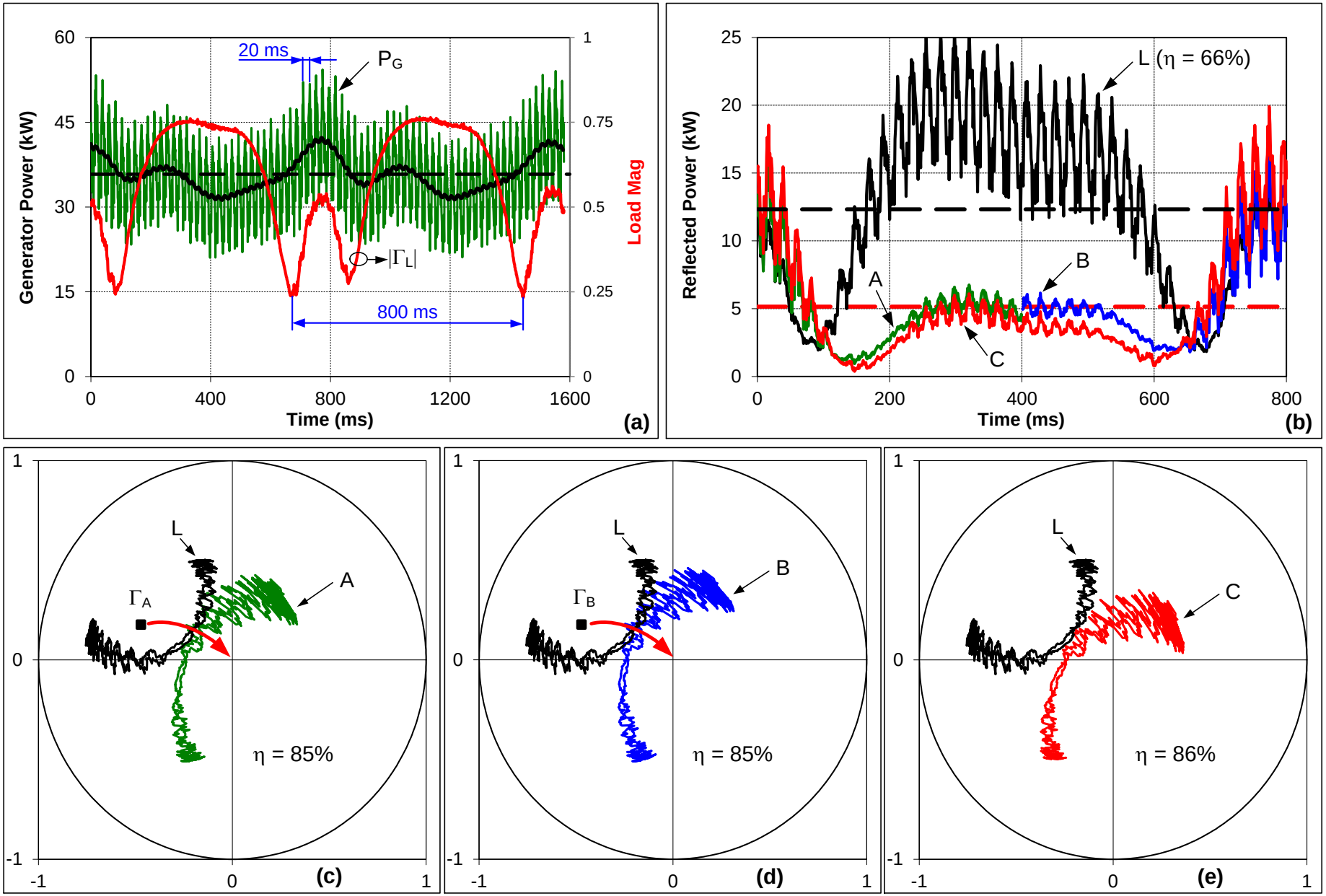
$$\boxed{\Gamma_B = \frac{1}{N}\frac{\sum_{n=1}^{N} P_{G,n}\Gamma_{L,n}}{\sum_{n=1}^{N} P_{G,n}}}$$

- Vzorky s vyšším P_G majú vyššiu váhu
- Je to optimum?

C: Rigorózna analýza (2012): Maximalizuj stredný výkon absorbovaný v záťaži

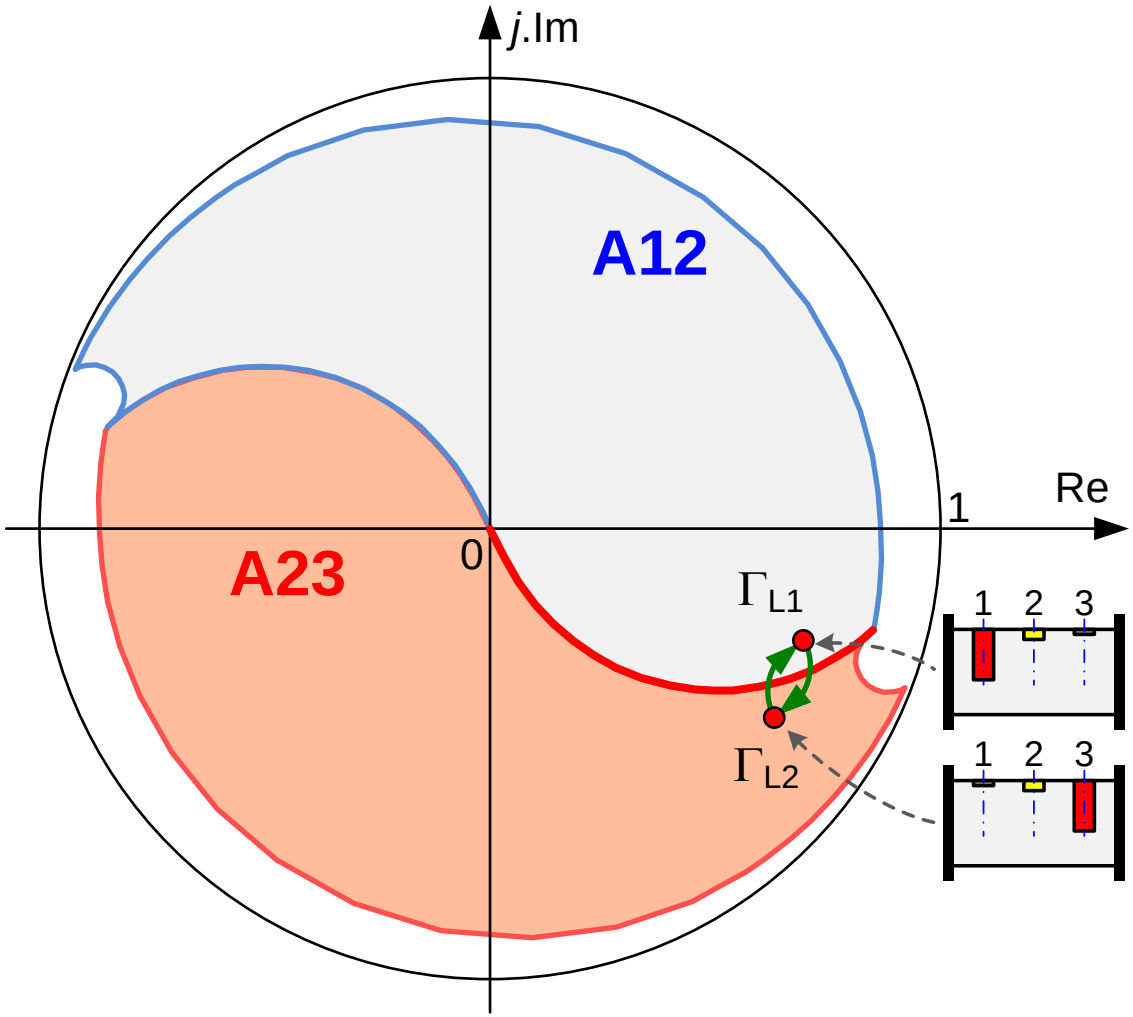
– Riešenie neprakticky zložité

– Dôležitý výsledok: Metóda B prakticky optimálna


Generator Power (kW)
Load Mag
Time (ms)
20 ms
P_G
$|\Gamma_L|$
800 ms
(a)
Reflected Power (kW)
Time (ms)
L (η = 66%)
A
B
C
(b)
L
A
Γ_A
η = 85%
(c)
L
B
Γ_B
η = 85%
(d)
L
C
η = 86%
(e)

PROBLÉM STRIEDANIA KOLÍKOV

Striedanie kolíkov (stub swapping)



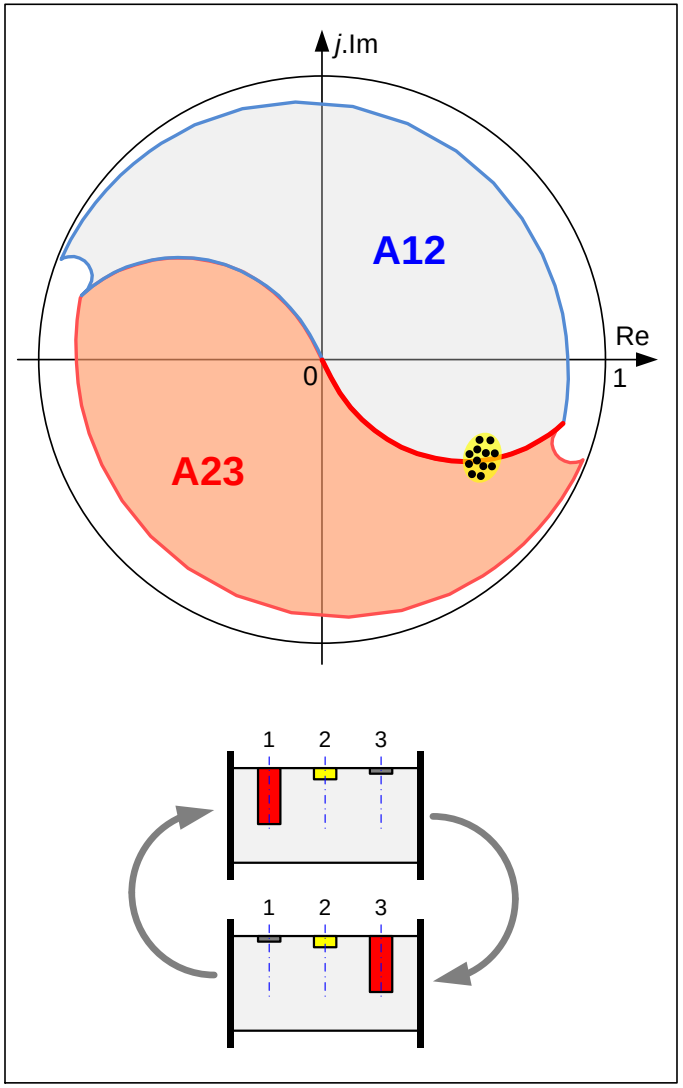
Prechodový proces

- Konvenčný spôsob pohybu kolíkov: **Čo najrýchlejšie**
  - Kolíky dostanú príkaz presunúť sa
  - Všetky sa začnú pohybovať plnou rýchlosťou
  - Kolík sa zastaví, keď dosiahne cieľové zasunutie

Dôsledky

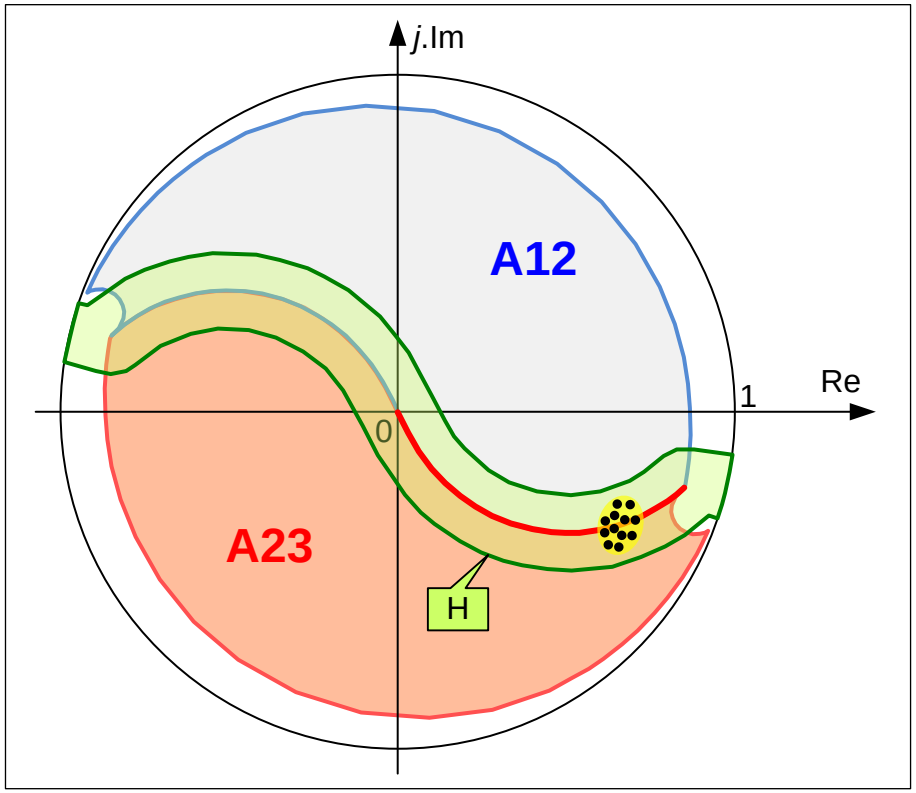
Neustále skákanie kolíkov 1 and 3

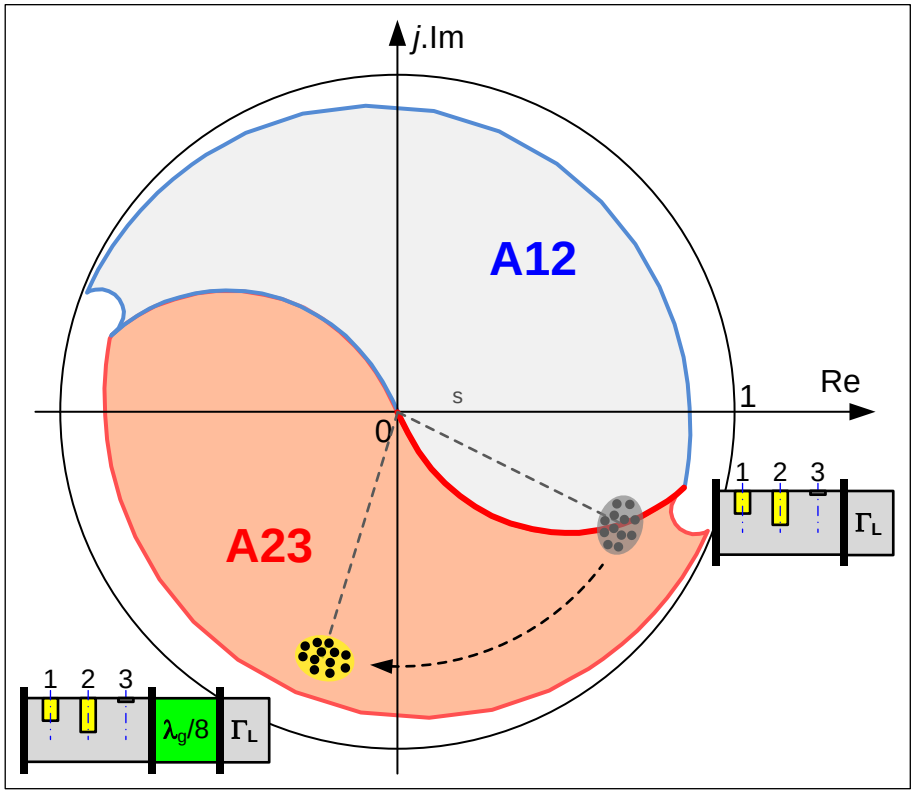
- Znižuje životnosť tunera
- Prechodový proces pohybu kolíkov
  - Vstupný koeficient odrazu nie je pod kontrolou
    - Vysoký odrazený výkon
    - Plytvanie energie
    - Aktivuje ochranu magnetrónu: Znehodnotí výrobný proces



Protiopatrenia

- Len znižujú pravdepodobnosť javu
- Neovplyvnia samotný prechodový proces





Hysterézia

V oblasti H je striedanie zakázané

☹ Zvačšenie $|\Gamma_l|$

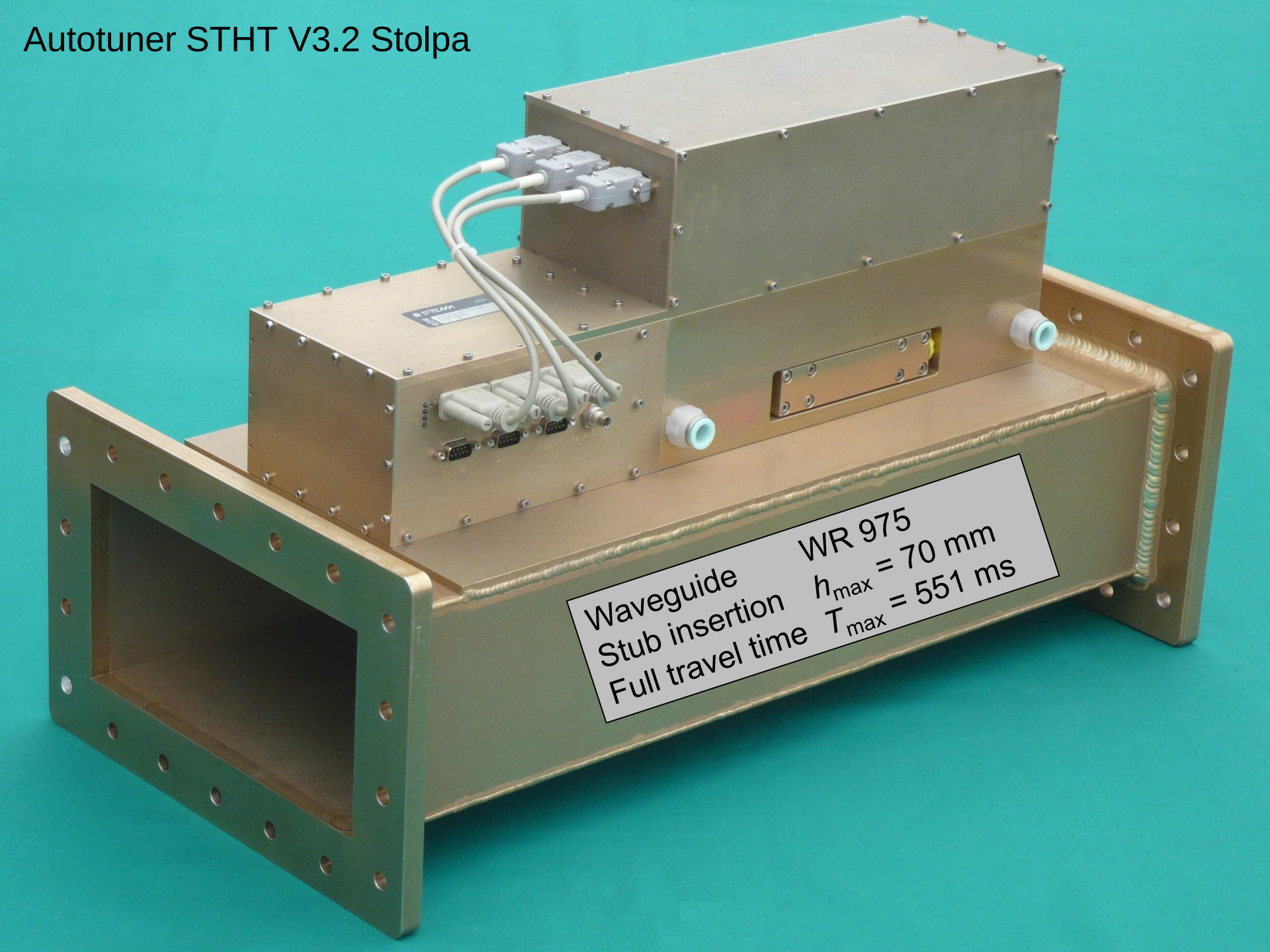
Fázový posuv Γ_L

Vloženie úseku vlnovodu

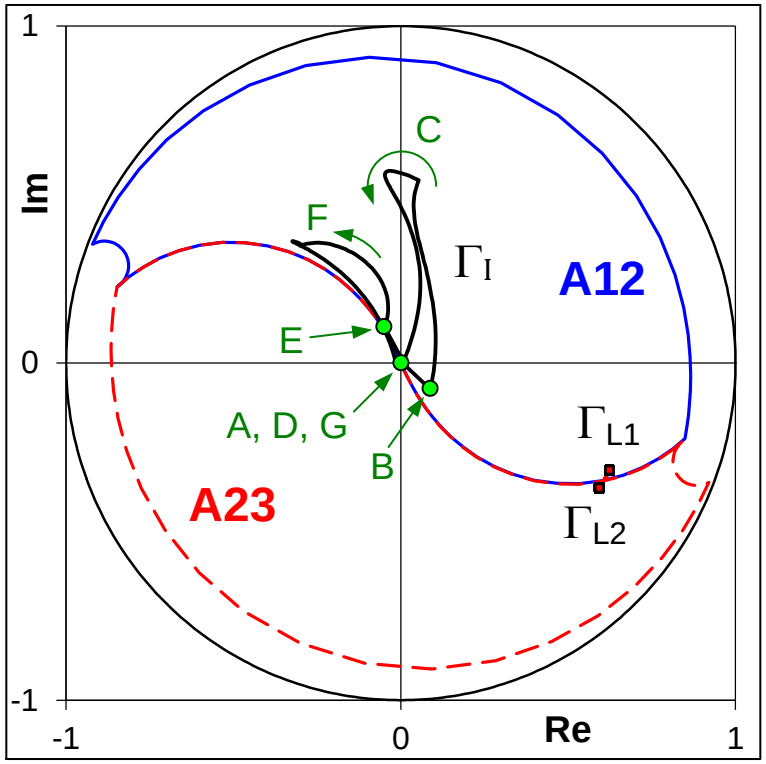
☹ Ťažkopádne

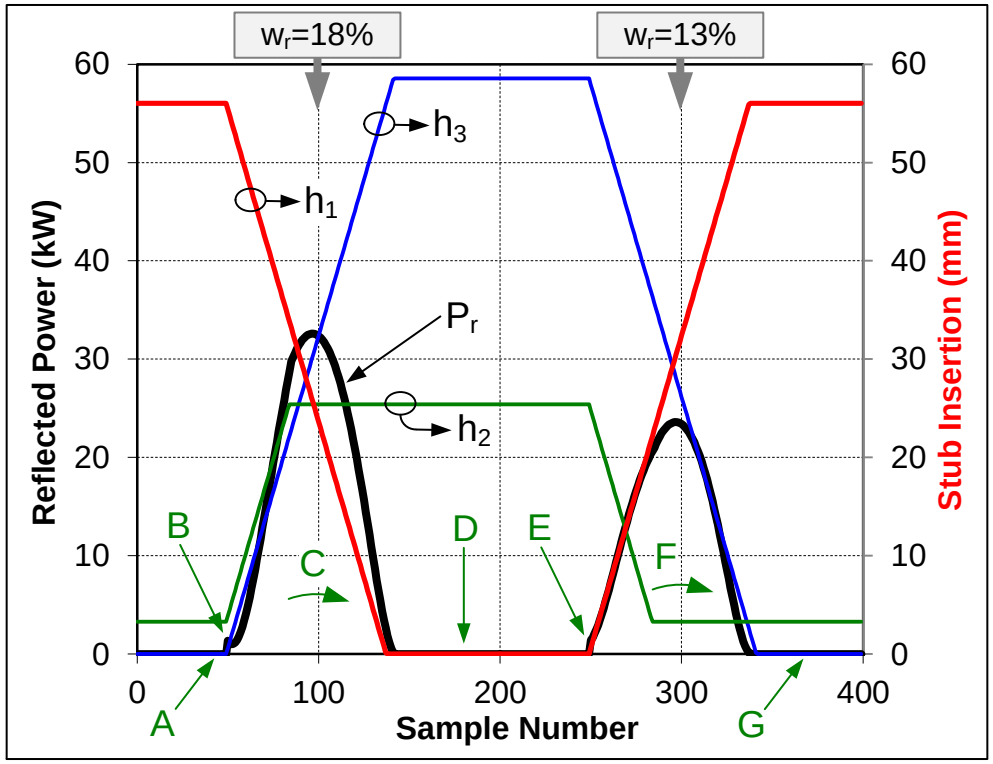
☹ Problém pri zmene záťaže

Autotuner STHT V3.2 Stolpa



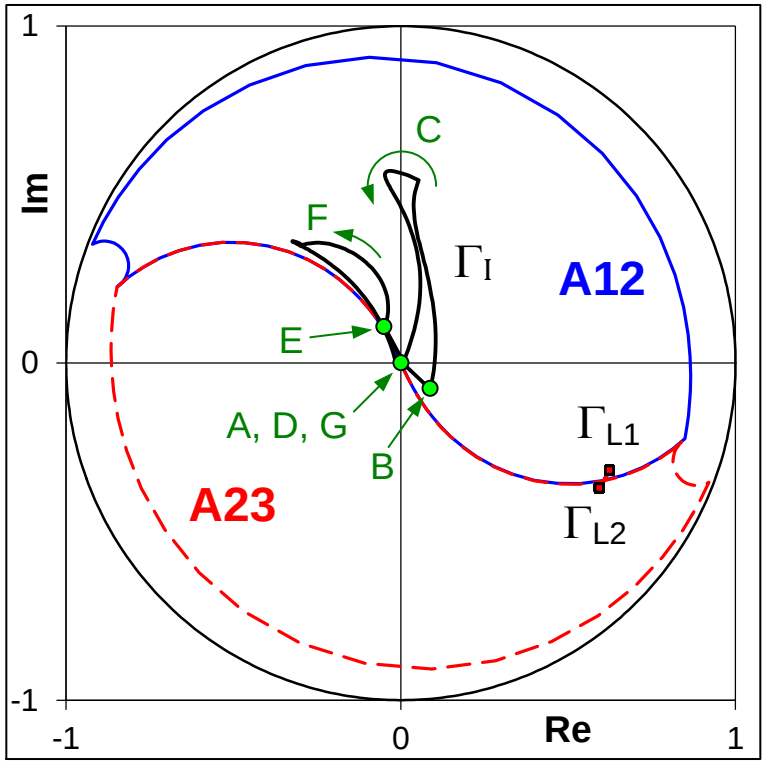
Prechodový jav

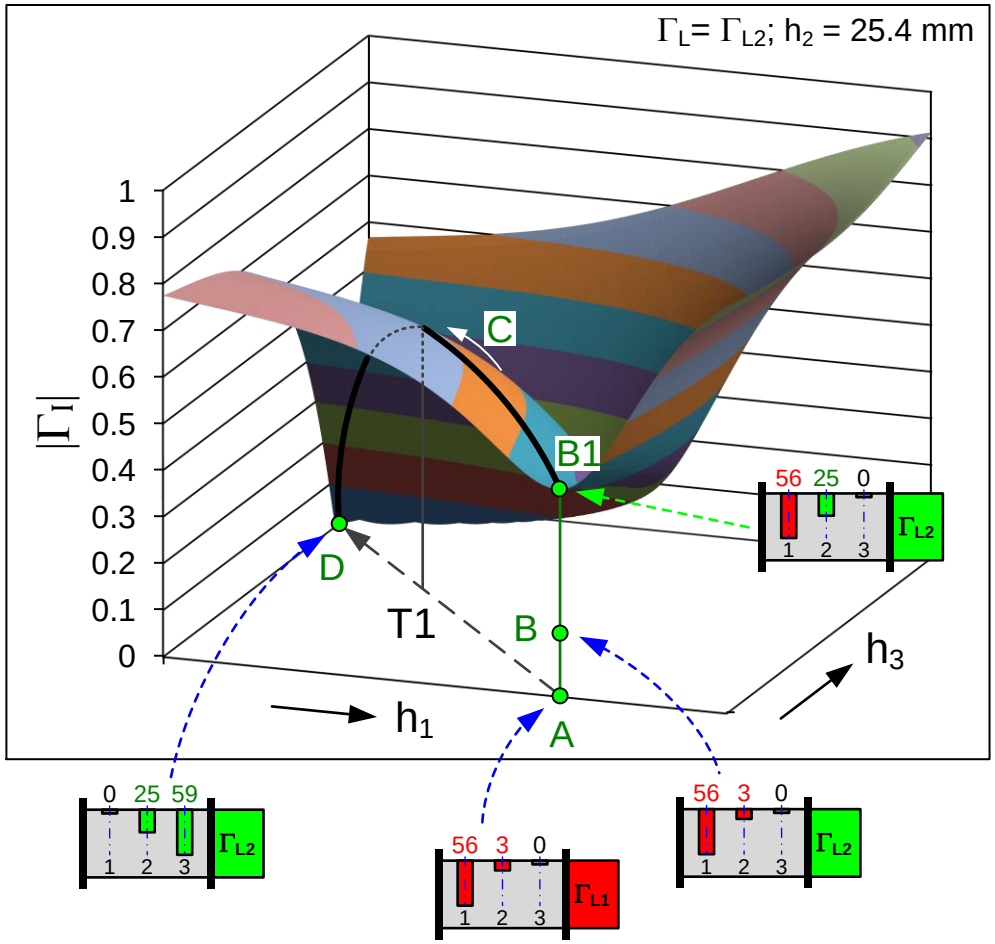




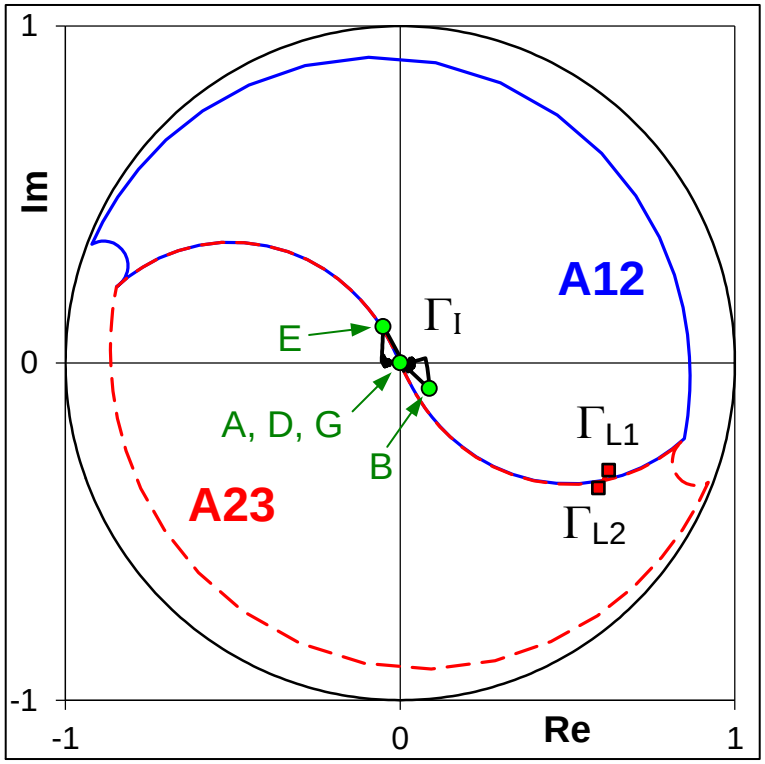
- Veľký „úlet“ Γ_I
- V špičke $P_r \approx 32\%$ z P_G
- Prechodový jav dlhý: bezmála plné vysunutie/zasunutie
- Vysoká stratená energia: $w_r = 18\%$ z dodanej

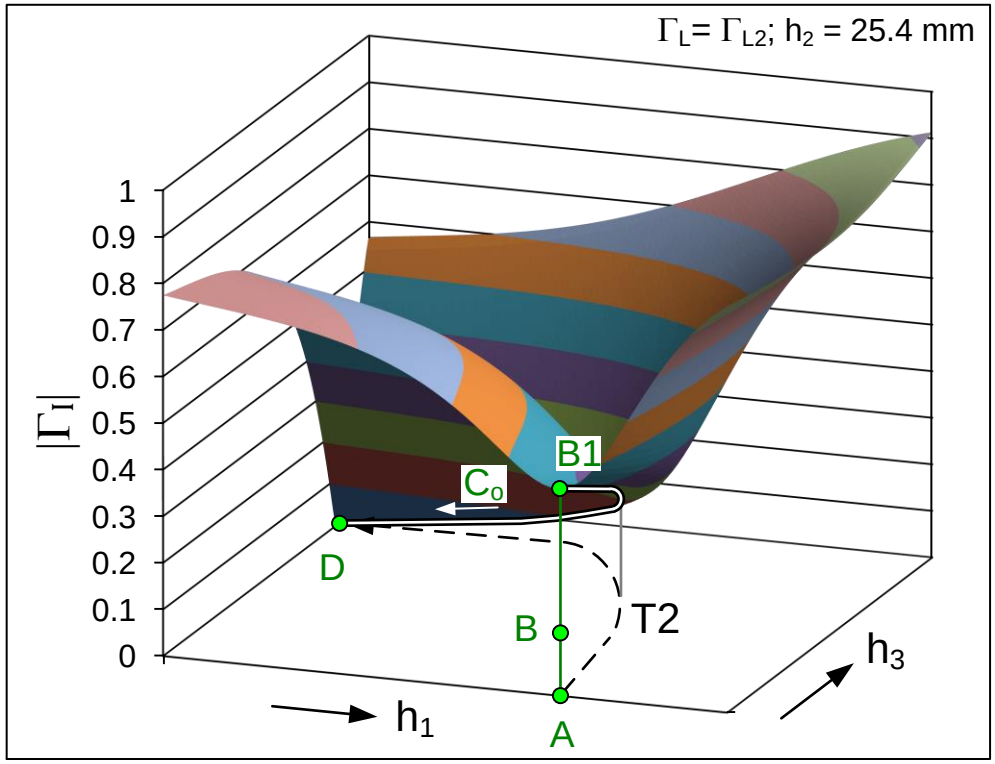
Vysvetlenie správania sa





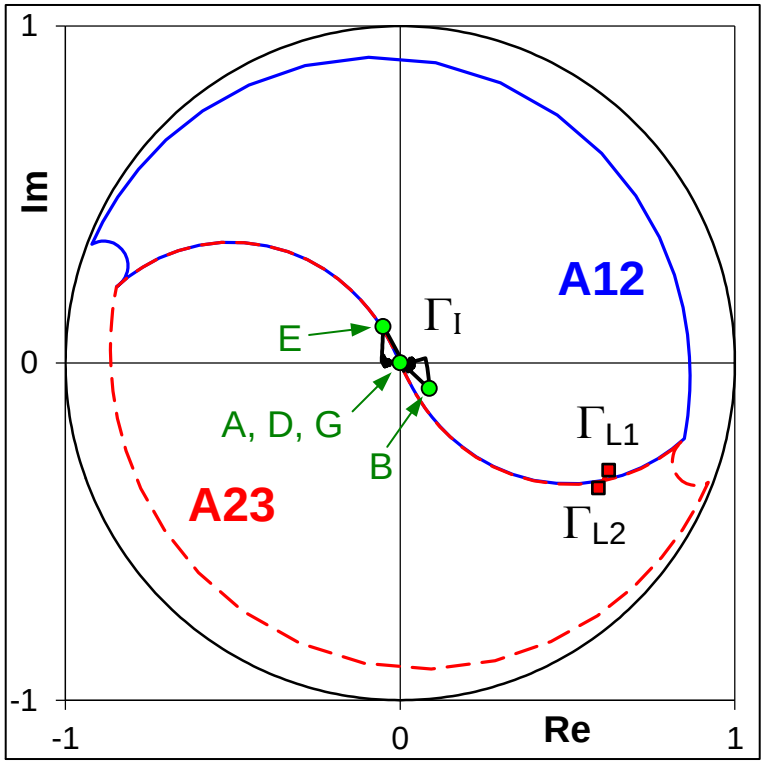
Optimalizovaný pohyb kolíkov

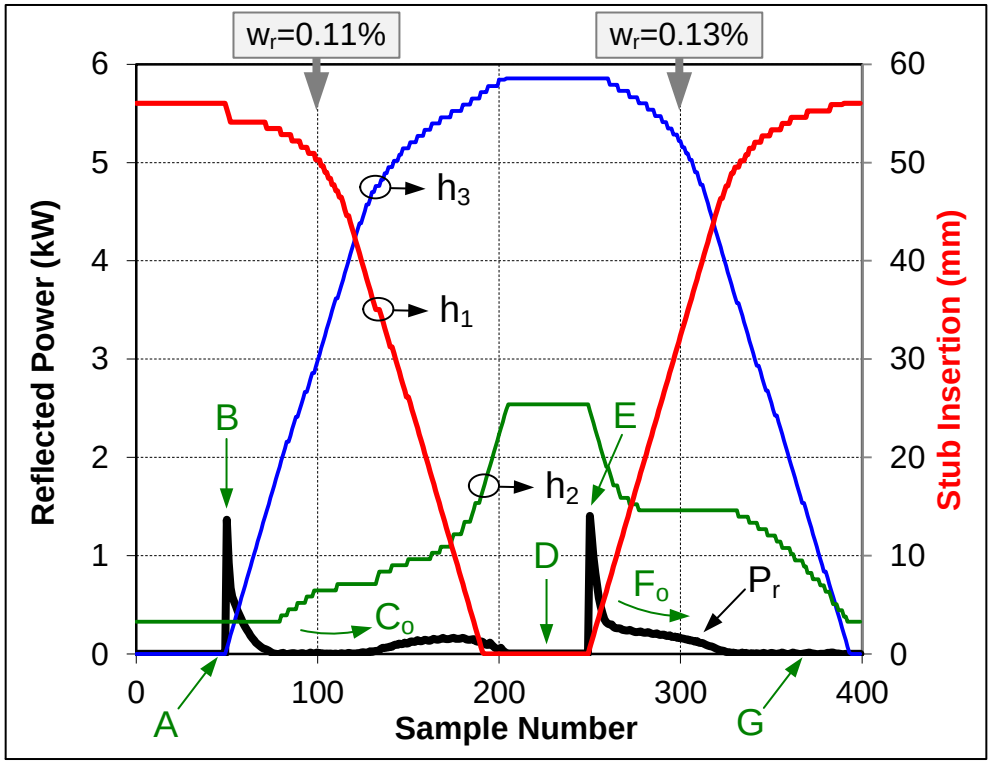




- Existuje lepší spôsob: Dolu údolím pozdĺž C_o
- Trvá dlhšie
- Cestou je menšie neprispôsobenie

Optimalizovaný pohyb kolíkov





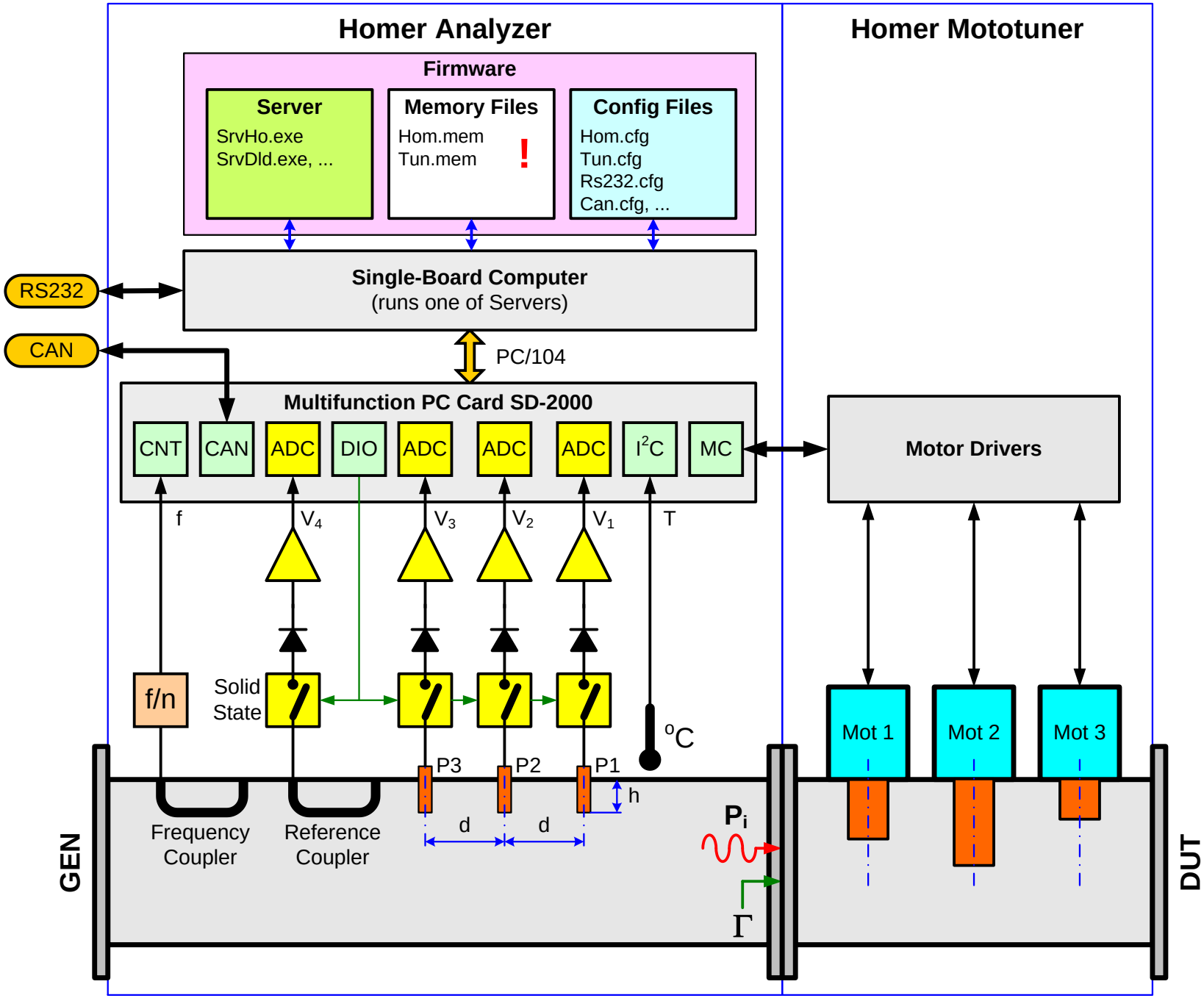
- Prechodový jav dlhší o ≈ 50%
- Nie sú exkurzie Γ_I
- Špička $P_r \approx 1.4\%$ z P_G (23 × menej)
- Stratená energia: $w_r = 0.1\%$ z dodanej (160 × menej)
- Algoritmus ešte treba vymyslieť

PRÍKLADY

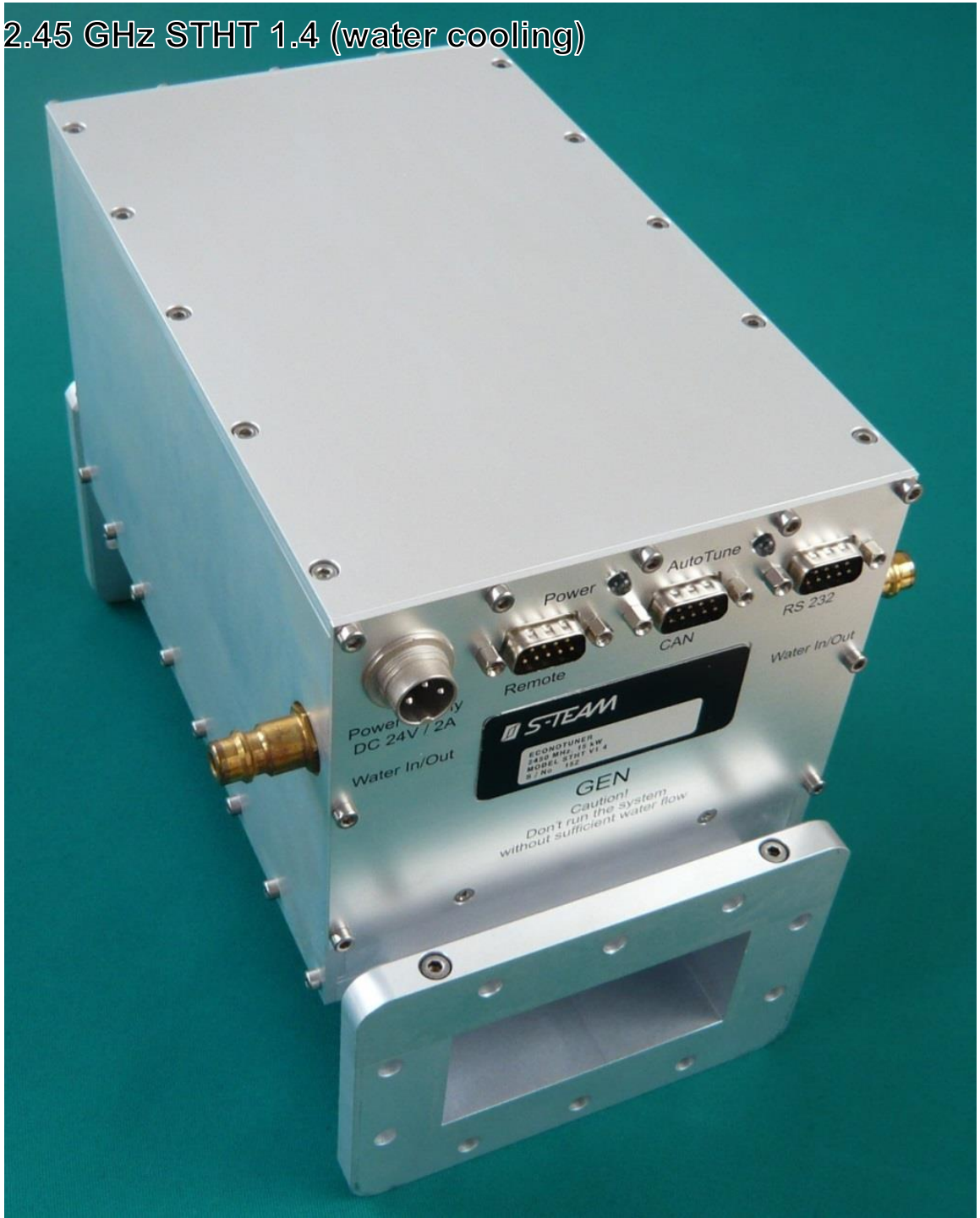
Výrobcovia

- Sairem (FRA)
- MKS – AsTex (USA)
- Daihen (JPN)
- S-TEAM (SVK)

Homer Autotuner

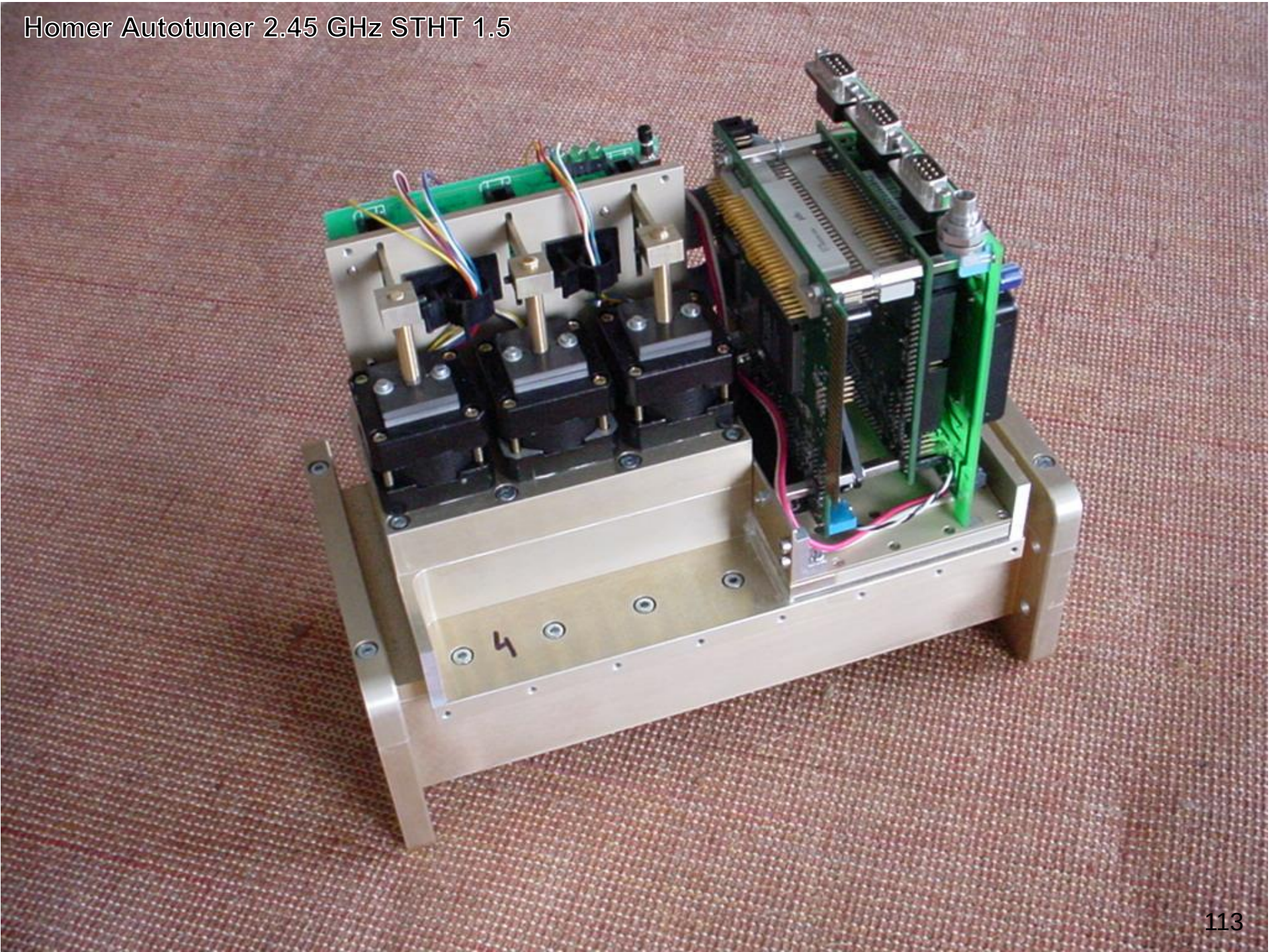


Homer Autotuner 2.45 GHz STHT 1.4 (water cooling)

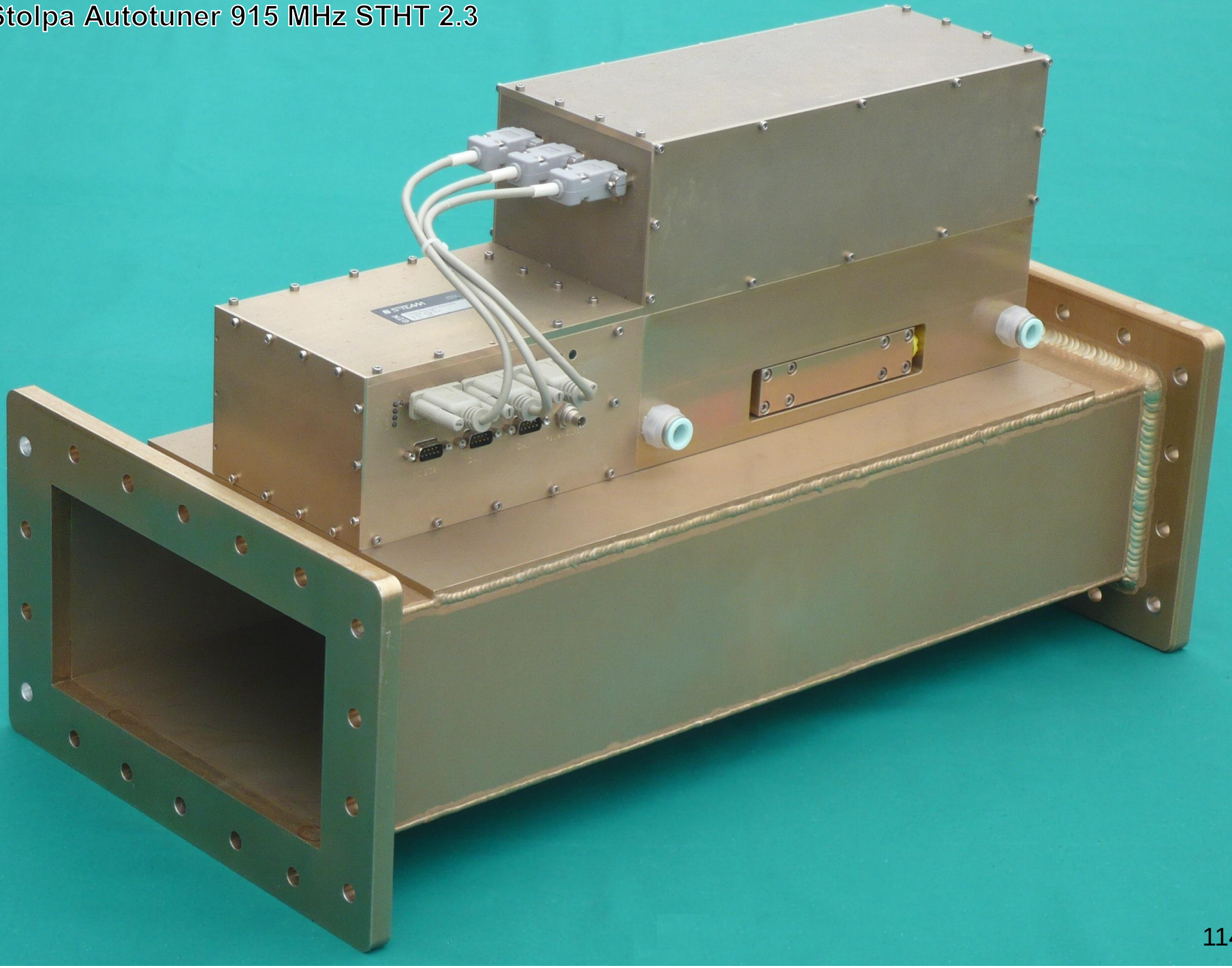


Homer Autotuner 2.45 GHz STHT 1.5

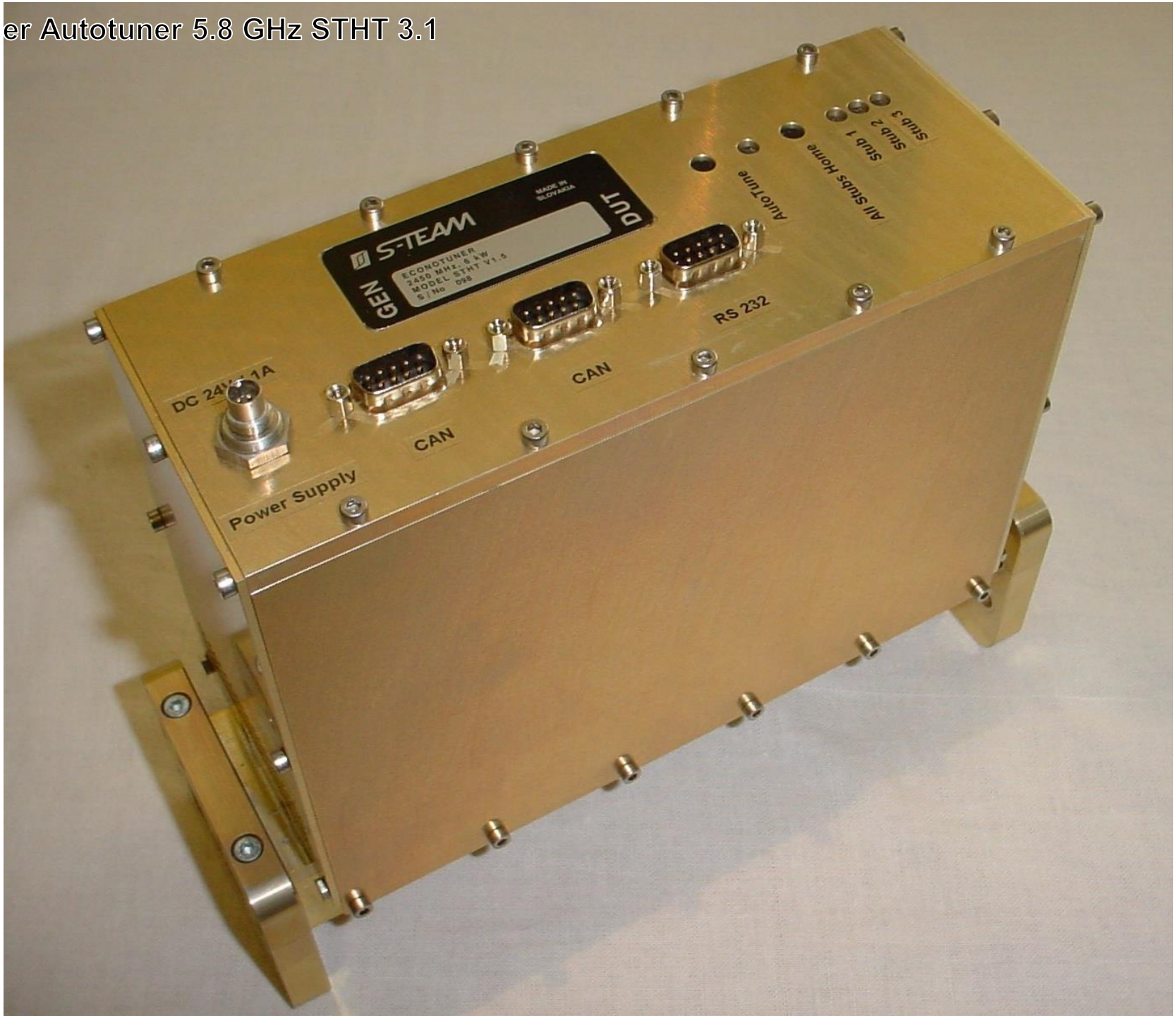
Homer Autotuner 2.45 GHz STHT 1.5



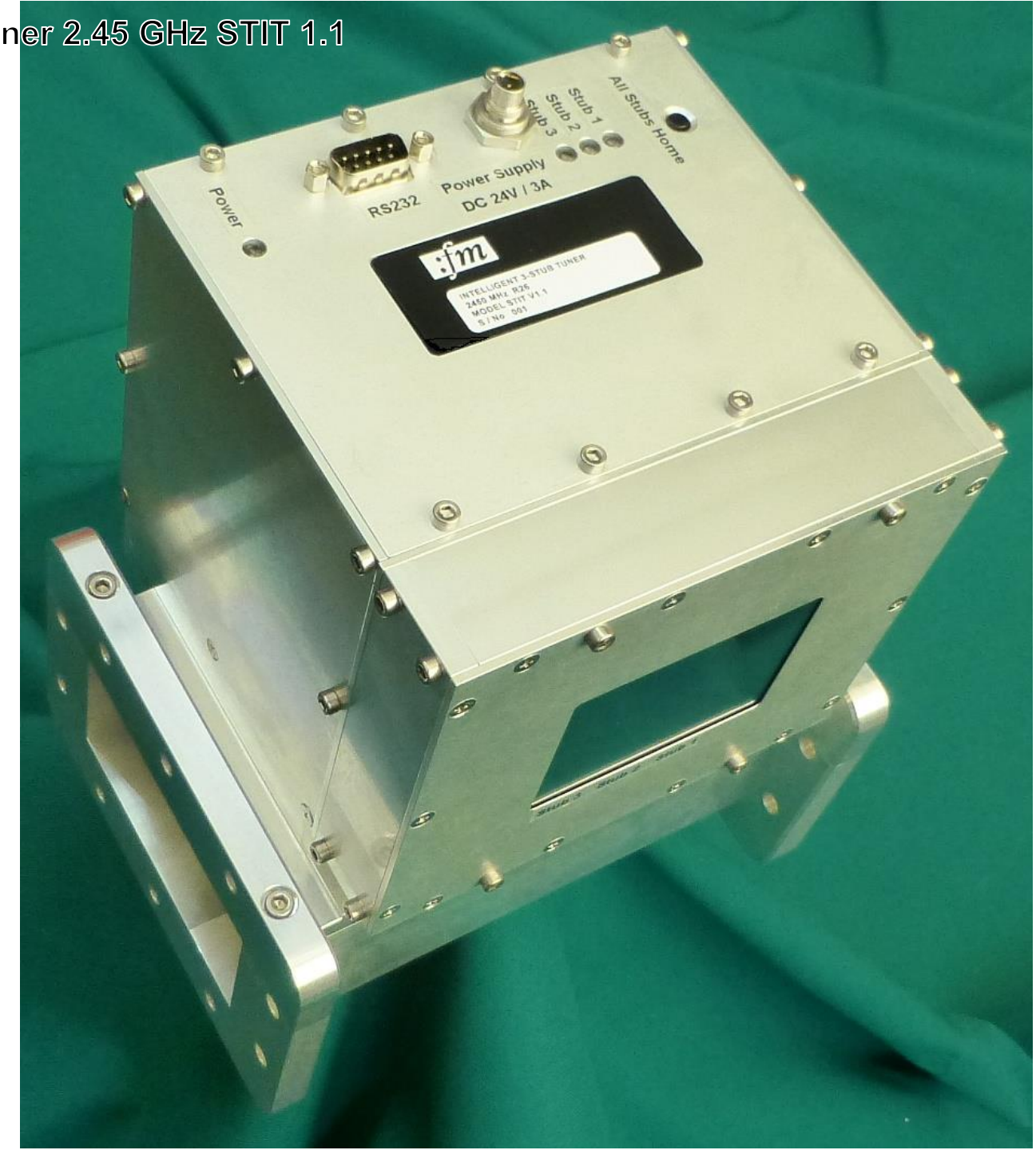
Stolpa Autotuner 915 MHz STHT 2.3



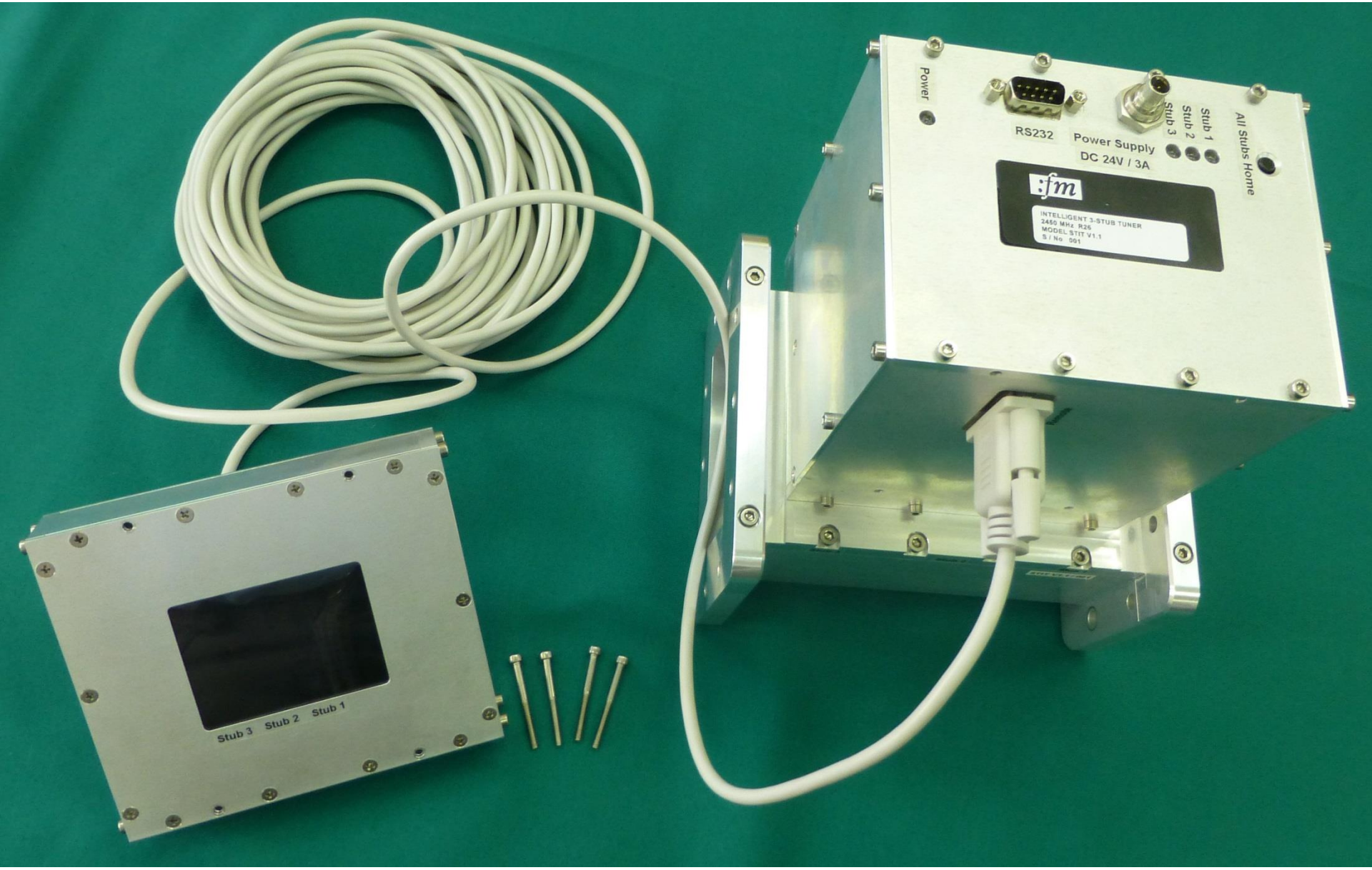
Homer Autotuner 5.8 GHz STHT 3.1



Intelligent Tuner 2.45 GHz STIT 1.1



Intelligent Tuner 2.45 GHz STIT 1.1



KONIEC 🔔