

# Využití multiobjektové optimalizace k návrhu vysokofrekvenčních obvodů (úvodní přehled)

Josef Dobeš a Jan Míchal  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

3. října 2021

*Architektura rádiových přijímačů a vysílačů*

# 1 Osnova

- Úvod do multiobjektové optimalizace
- Popis použité (a námi upravené) metody
  - Skalarizace problému
  - Referenční soubor pro asymptoticky rovnoměrné pokrytí Paretovy plochy
- Příklady
  - Dvojdímenzionální úloha: Nízkošumový zesilovač
    - Účelové funkce (cíle návrhu)
    - Dvojdímenzionální Paretova plocha (tedy v tomto případě křivka)
    - Kmitočtové charakteristiky pro vybraných pět bodů Paretovy křivky
  - Trojdímenzionální úloha: Výkonový zesilovač
    - Účelové funkce (cíle návrhu)
    - Trojdímenzionální Paretova plocha (tedy v tomto případě skutečně plocha v geometrickém významu)
    - Časové odezvy pro vybraných pět bodů Paretovy plochy
  - Čtyřdímenzionální úloha: Video zesilovač
    - Účelové funkce (cíle návrhu)
    - Způsob zobrazení čtyřdímenzionální Paretovy plochy (tedy v tomto případě vlastně trojdímenzionálního prostoru)

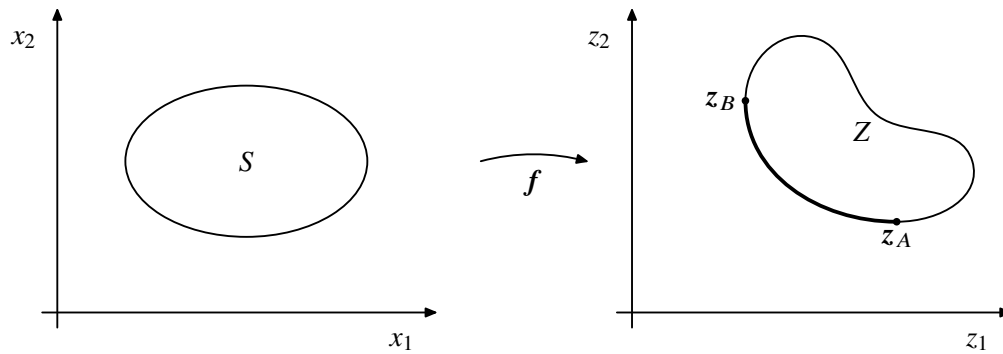
## 2 Multiobjektová optimalizace: základní vztahy

Úlohou multiobjektové optimalizace rozumíme minimalizaci  $k$ -tice účelových funkcí:

$$\underset{\mathbf{x} \in S}{\text{minimize}} \quad \{ f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}) \},$$

kde  $S$  je množina hodnot účelových funkcí splňujících omezující podmínky (*feasible region*). Optimalizací pak rozumíme hledání *nepodřadných* (*noninferior*) řešení lokalizovaných na *Paretově ploše*.

Ilustrace problému pro  $k = 2$  (dvojdímenzionální případ):



### 3 Skalarizace problému

Algoritmus je variantou metody GAM<sup>1</sup> (Goal Attainment Method, vztah níže je originální modifikace):

$$\underset{\mathbf{x} \in S}{\text{minimize}} \quad \max_{i=1, \dots, k} \frac{f_i(\mathbf{x}) - \bar{z}_i}{z_i^{\text{nad}} - z_i^*},$$

kde  $z_i^*$  jsou složky *ideálního* vektoru

$$\mathbf{z}^* = \left[ \min_{\mathbf{x} \in S} f_1(\mathbf{x}), \min_{\mathbf{x} \in S} f_2(\mathbf{x}), \dots, \min_{\mathbf{x} \in S} f_k(\mathbf{x}) \right],$$

a  $z_i^{\text{nad}}$  jsou složky *nadir* vektoru (tj. vektoru, který je protipólem optima, jde o vektor nejhorších (nezávisle na sobě zjištěných) hodnot)

$$\mathbf{z}^{\text{nad}} = \left[ \max_i (z_i^*), \dots, \max_i (z_i^*) \right].$$

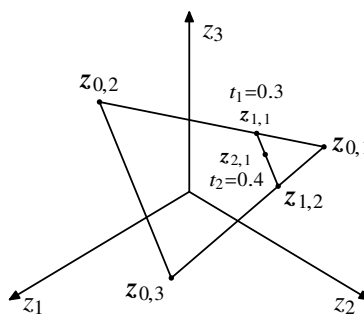
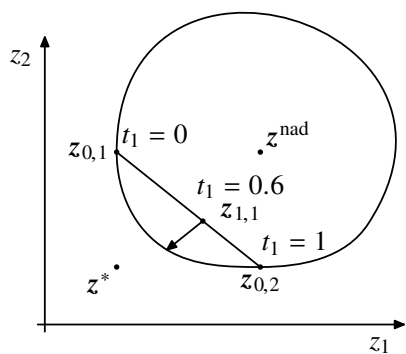
$\bar{z}_i$  jsou složky *referenčního* bodu vybrané z určitého konvexní *referenční* množiny s vrcholy  $\mathbf{z}_{0,l}$ , kde každý vrchol je příslušný vektor účelové funkce  $z_l^*$  získaný nezávislou minimalizací  $l$ -té účelové funkce.

Algoritmus GAM je např. standardně implementován v MATLAB, není třeba tedy většinou programovat matematické procedury. (Neposkytuje ovšem asymptoticky rovnoměrné pokrytí Paretovy plochy.)

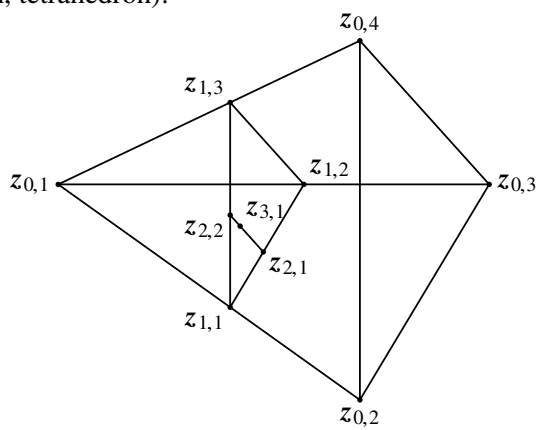
---

<sup>1</sup>Kaisa Miettinen, Nonlinear Multiobjective Optimization. Kluwer Academic Publishers, Boston, 4th ed., 2004.

Ilustrare pro  $k = 2$  a  $k = 3$ :



Ilustrace pro  $k = 4$  (čtyřstěn, tetrahedron):



## 4 Rovnoměrné pokrytí referenčního souboru

Startujeme s  $k$ -ticí vrcholů  $z_{0,i}$  a  $k - 1$  náhodně generovanými koeficienty  $r_j \in [0, 1]$ .

$$\begin{array}{c}
 t_1 = \sqrt[k]{r_1} \\
 z_{1,1} = (1 - t_1)z_{0,1} + t_1z_{0,2} \\
 z_{1,2} = (1 - t_1)z_{0,1} + t_1z_{0,3} \\
 \vdots \\
 z_{1,k-1} = (1 - t_1)z_{0,1} + t_1z_{0,k} \\
 \hline
 t_2 = \sqrt[k]{r_2} \\
 z_{2,1} = (1 - t_2)z_{1,1} + t_2z_{1,2} \\
 z_{2,2} = (1 - t_2)z_{1,1} + t_2z_{1,3} \\
 \vdots \\
 z_{2,k-2} = (1 - t_2)z_{1,1} + t_2z_{1,k-1} \\
 \hline
 \vdots \\
 \hline
 t_{k-1} = \sqrt[k]{r_{k-1}} = r_{k-1} \\
 z_{k-1,1} = (1 - t_{k-1})z_{k-2,1} + t_{k-1}z_{k-2,2}
 \end{array}$$

Tato rekurentní posloupnost v důsledku vede k *asymptoticky rovnoměrnému* pokrytí Paretovy plochy.

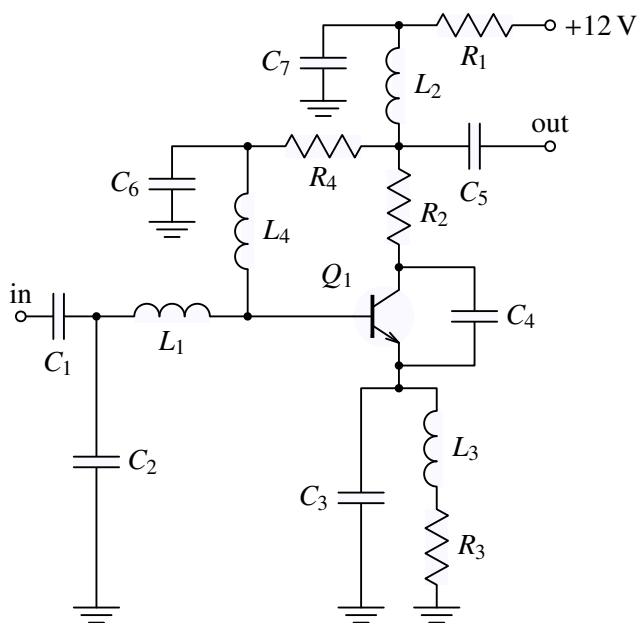
## 5 2-D opt.: Nízkošumový zesilovač

Pásmo 50 MHz to 500 MHz, na vstupu i výstupu  $75\ \Omega$ , bipolární tranzistor BFR90

Účelové funkce: minimalizovat šumové číslo při současné maximalizaci zesílení

Omezující podmínky (constraints): maxima povolená tranzistorem, stabilita (např. Rollettovo kritérium)

Proměnné pro návrh: hodnoty pasivních prvků obvodu

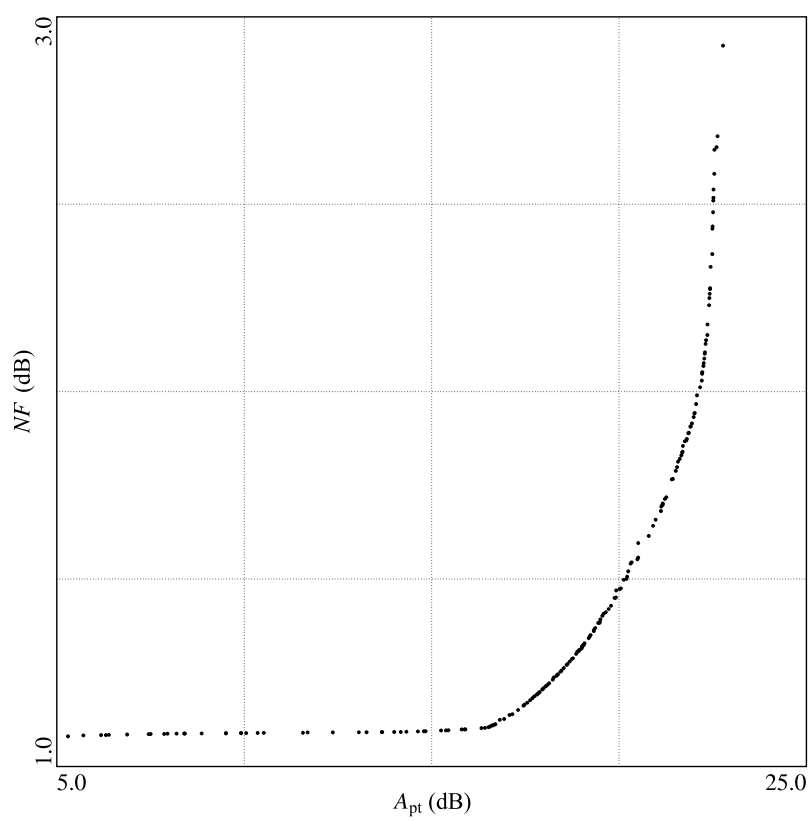


## Účelové funkce

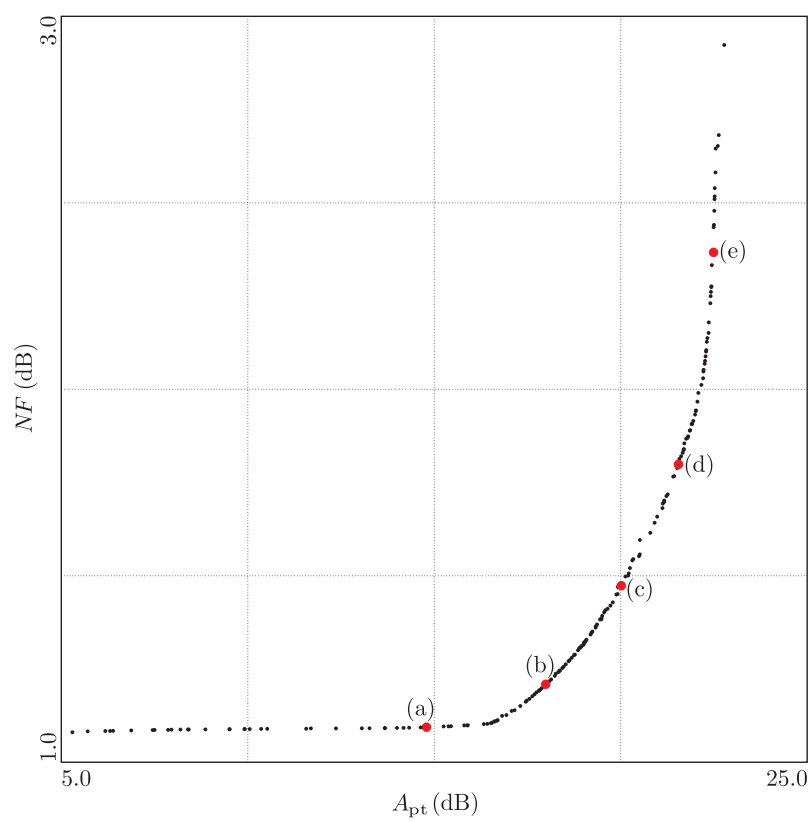
N <sup>o</sup>	Symbol	Typ	Směr	Optimum/ Limit	Jednotka
1	$A_{pt}$	obj.	max.	17.5	dB
2	$NF$	obj.	min.	1.10	dB
3	$I_c$	constr.	$\leq$	20	mA
4	$P_{diss}$	constr.	$\leq$	150	mW
5	$k_{Rs}$	constr.	$\geq$	1.1	—
6	$\Delta$	constr.	$\leq$	0.9	—



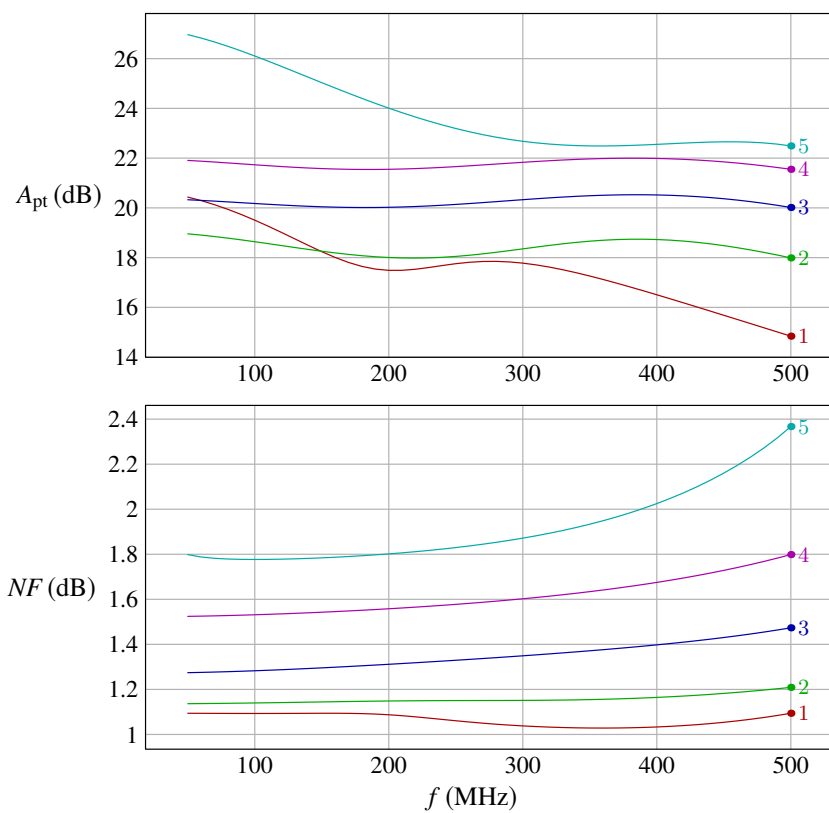
### Prvotní výsledek: (Poměrně) rovnoměrně pokrytá Paretova křivka



**Další krok: Výběr bodů na Paretové křivce (zde demonstrativní)**



## Vypočtené průběhy zesílení a šumového čísla pro pět vybraných bodů



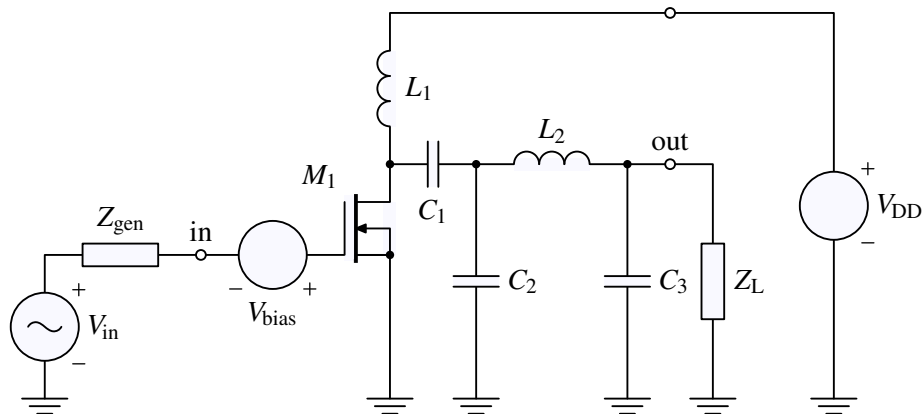
## 6 3-D opt.: Výkonový zesilovač

Úzkopásmová modulace na 300 MHz, 50  $\Omega$ , 12 V, tranzistor MOS LP821 (Polyfet)

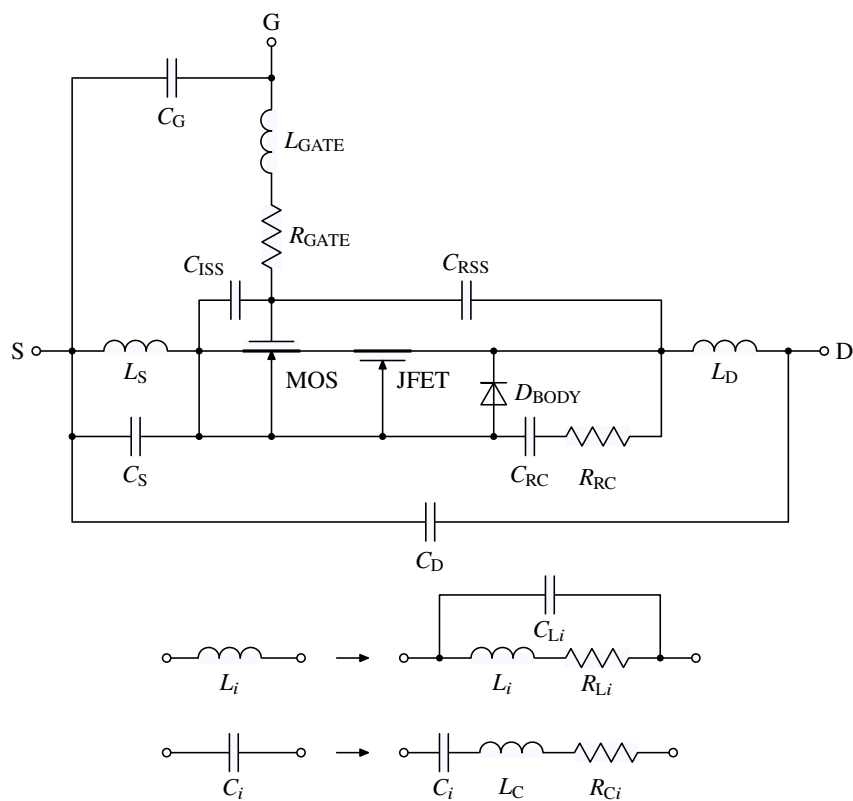
Účelové funkce: maximalizovat výstupní výkon první harmonické a výkonovou efektivnost, minimalizovat harmonické zkreslení

Omezující podmínky (constraints): maximální povolené hodnoty na tranzistoru

Proměnné pro návrh: hodnoty pasivních prvků, vstupní stejnosměrné (DC) předpětí (bias) a amplituda



## Použitý model tranzistoru LDMOS (Lateral Diffusion)



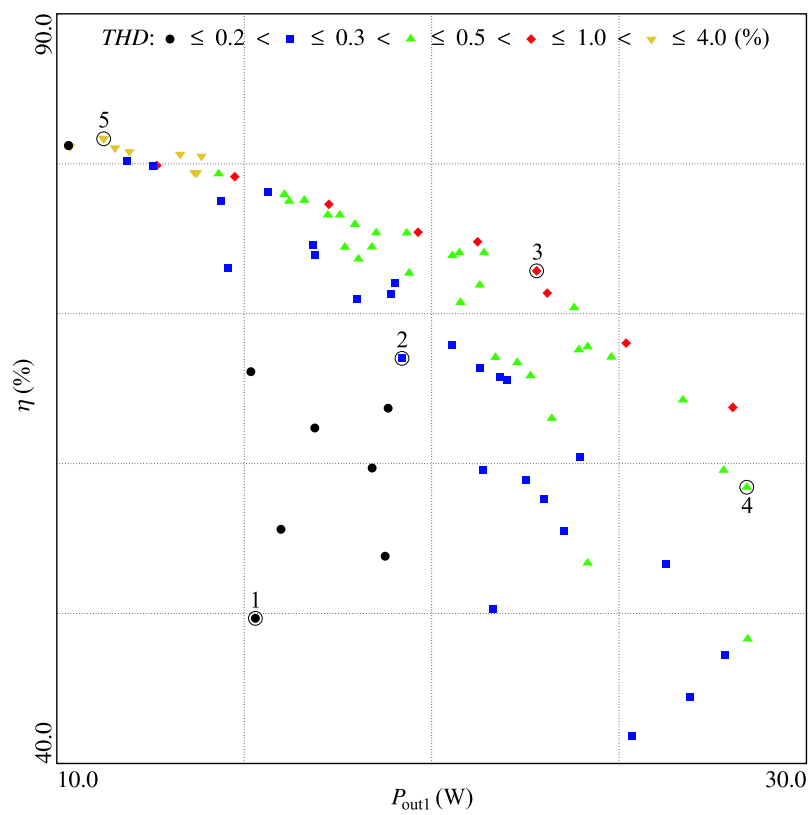
## Účelové funkce

N <sup>o</sup>	Symbol	Typ	Směr	Optimum/ Limit	Jednotka
1	$P_{\text{out1}}$	obj.	max.	31.1	W
2	$\eta$	obj.	max.	83.0	%
3	$THD$	obj.	min.	0.0783	%
4	$I_{\text{d avg}}$	constr.	$\leq$	5	A
5	$P_{\text{diss}}$	constr.	$\leq$	50	W

## Proměnné pro návrh

N°	Symbol	Limit		Jednotka	Typ pokrytí
		Dolní	Horní		
1	$V_{gs\ max}$	2	20	V	lin.
2	$V_{gsACm}$	0.4	12	V	lin.
3	$L_1$	3 n	30 n	H	log.
4	$C_1$	10 p	300 p	F	log.
5	$C_2$	3 p	300 p	F	log.
6	$L_2$	3 n	100 n	H	log.
7	$C_3$	3 p	100 p	F	log.

## Výsledky: Trojrozměrná Paretova plocha

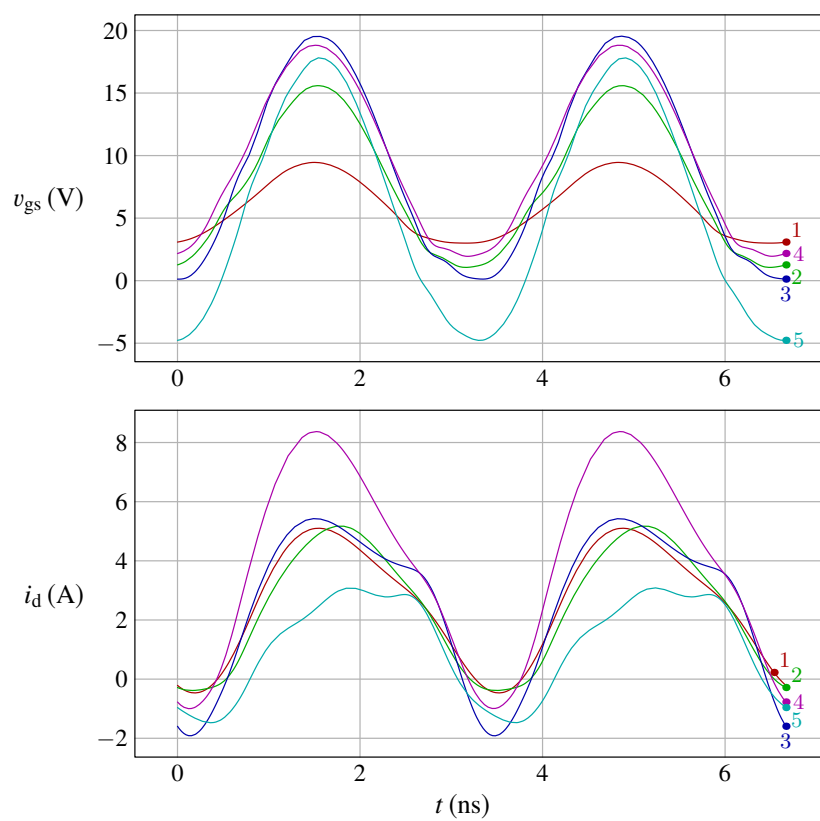




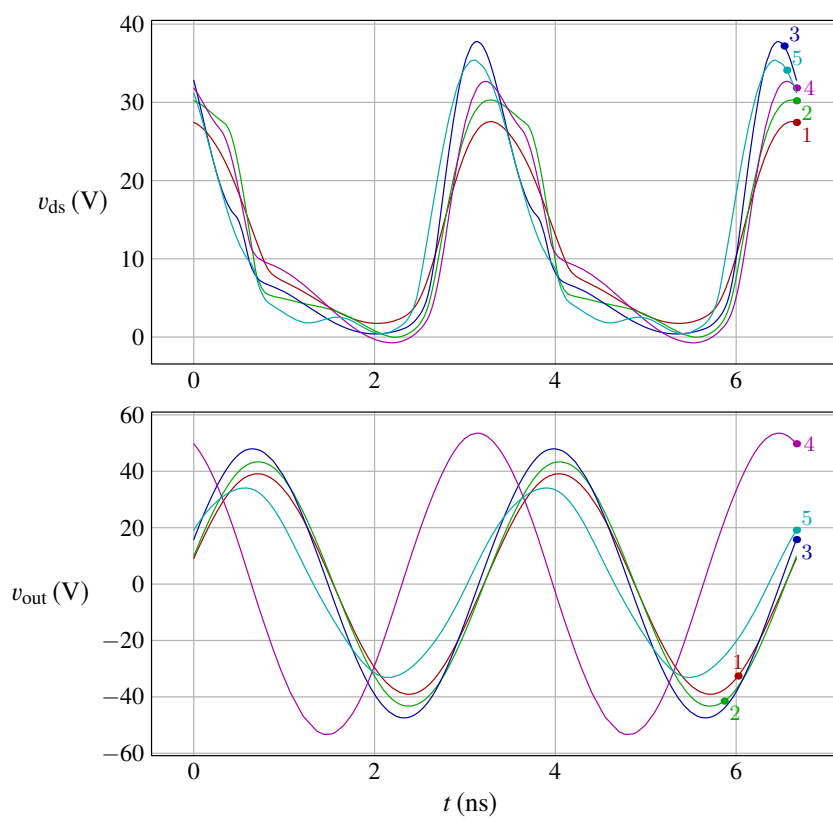
### Výsledky: Parametry pěti vybraných (demonstrativních) řešení

N°	Symbol	Číslo řešení					Jednotka
		1	2	3	4	5	
1	$V_{gsmax}$	9.97	15.9	20.0	19.2	18.9	V
2	$V_{gsACm}$	4.03	8.05	10.7	9.24	12.0	V
3	$L_1$	7.86 n	11.3 n	4.23 n	3.97 n	5.03 n	H
4	$C_1$	294 p	133 p	299 p	51.6 p	166 p	H
5	$C_2$	22.6 p	5.09 p	27.0 p	300 p	3.41 p	H
6	$L_2$	6.84 n	7.00 n	7.97 n	7.32 n	9.89 n	H
7	$C_3$	20.1 p	2.35 p	18.4 p	22.6 p	17.0 p	H
1	$P_{out1}$	15.3	18.8	22.8	28.4	11.2	W
2	$\eta$	49.7	63.7	72.9	58.4	81.7	%
3	$THD$	0.163	0.239	0.512	0.394	3.03	%
4	$I_{d\ avg}$	2.56	2.44	2.59	4.01	1.15	A
5	$P_{diss}$	13.6	8.42	6.65	16.0	1.84	W

### Výsledky: časové průběhy pro vybraných pět řešení

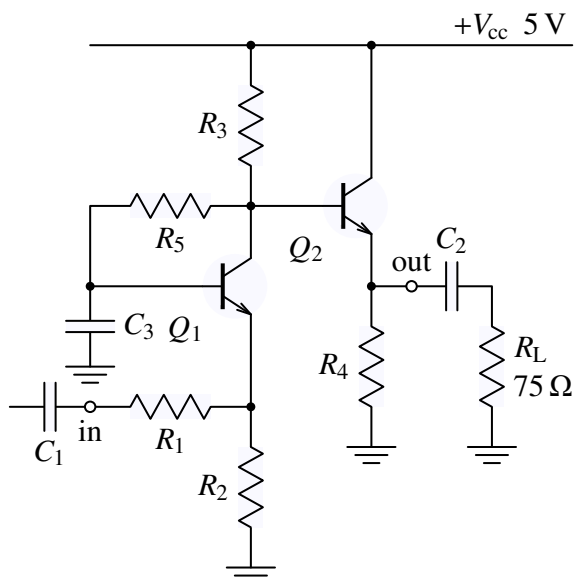


### Výsledky: časové průběhy pro vybraných pět řešení (pokračování)

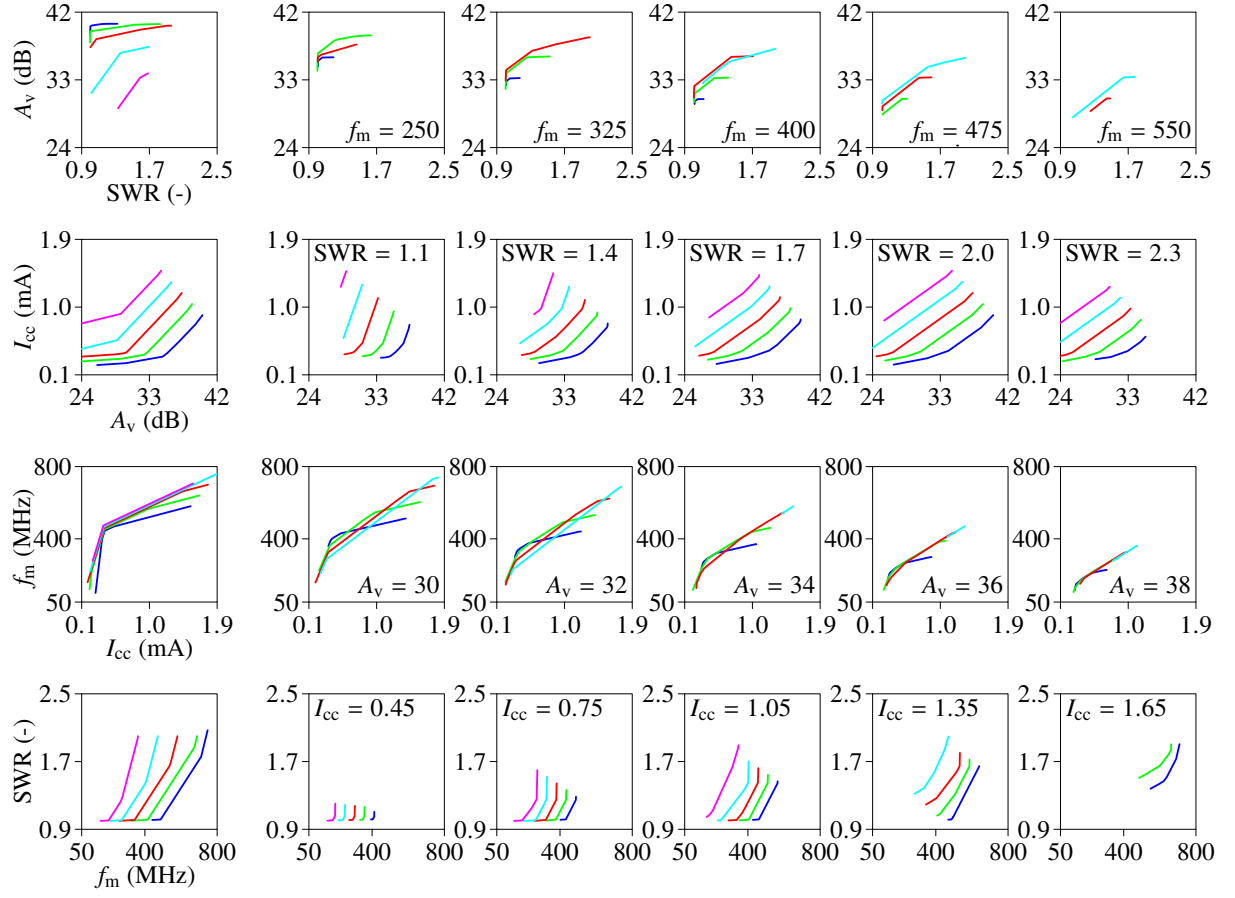


## 7 4-D opt.: Video zesilovač

Video zesilovač se vstupem přizpůsobeným impedanci zdroje  $75\ \Omega$  s výstupem do zátěže  $75\ \Omega$  a kapacitou výstupu  $1\ V_{pp}$ . Kmitočet  $f_m$  pro 3 dB pokles má být co největší, nízkofrekvenční napěťový zisk  $A_v$  by měl být kladný a co největší a celkový stejnosměrný napájecí proud  $I_{cc}$  by měl být co nejmenší. Jako proměnné pro návrh budou použity rezistory  $R_1$ – $R_5$ . Má se i minimalizovat SWR (Standing Wave Ratio).



- minimalizovat SWR,  $I_{cc}$ ,
- maximalizovat  $A_v$ ,  $f_m$ ,
- vzhledem k podmínce  $V_{out} \leq 3.5\ V$ ,  
přičemž toto omezení  $V_{out}$  zajišťuje požadovanou  $1\ V_{pp}$  kapacitu.



Křivky v prvním řádku grafů reprezentují *nepodřadné* body pro proudy  $I_{cc}$  0.45, 0.75, 1.05, 1.35, a 1.65 mA.

Křivky v druhém řádku grafů reprezentují *nepodřadné* body pro kmitočty  $f_m$  250, 325, 400, 475 a 550 MHz.

Křivky v třetím řádku grafů reprezentují *nepodřadné* body pro poměr stojatých vln SWR 1.1, 1.4, 1.7, 2.0 a 2.3.

Křivky v čtvrtém řádku grafů reprezentují *nepodřadné* body pro zesílení  $A_v$  30, 32, 34, 36 a 38 dB.

## 8 Závěr

- Bylo demonstrováno technicky velmi užitečné použití semiautomatické a posteriori metody založené na asymptoticky rovnoměrném pokrytí referenčního souboru (vede na přibližně rovnoměrné pokrytí Paretovy plochy, což je z uživatelského technického hlediska velmi významné)
- (Formální důkaz rovnoměrnosti pokrytí byl proveden matematickou indukcí v našem článku v Solid-State Electronics<sup>2</sup>.)
- Metoda spolehlivě pracuje v kmitočtové i časové doméně. (Nároky pro výpočty v časové doméně jsou ovšem výrazně větší, úlohy v tomto případě nemohou běžet v reálném čase...)

**A to je k úvodu vše, děkuji za pozornost.**

---

<sup>2</sup>J. Dobeš, J. Míchal, V. Paňko, and L. Pospíšil, “Reliable procedure for electrical characterization of MOS-based devices,” Solid-State Electronics, vol. 54, no. 10, pp. 1173–1184, Oct. 2010.