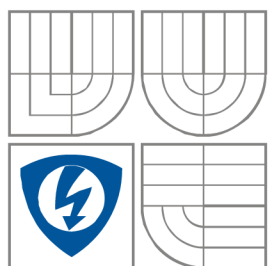


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **Počítačový model tranzistoru FET**

Computer modeling of FET transistors

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

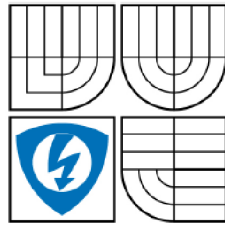
Petr Kaupa

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Petr Kaupa  
**Ročník:** 3

**ID:** 78105  
**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

### Počítačový model tranzistoru FET

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti tranzistorů FET a z možnými způsoby jejich modelování. Zaměřte se zejména na program Comsol Multiphysics.

V tomto programu vytvořte vhodný model zadaného tranzistoru FET a své výsledky ověřte v dostupné literatuře.

Vytvořte v Matlabu jednoduchý program pro globální optimalizaci. Tento program propojte s modelem tranzistoru FET. Optimalizační algoritmus použijte k vyhledání takových parametrů modelu tranzistoru, aby jeho charakteristiky odpovídaly charakteristikám požadovaným.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATERKA, A., KACPRZAK, T. Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, vol. 33, no. 2, p. 129–139.

[2] COMSOL Multiphysics 3.3 User's Guide. Stockholm: Comsol AB, 2006.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Kaupa  
Bytem: Čistá 276, 569 56  
Narozen/a (datum a místo): 8. června 1986 v Litomyšli

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Počítačový model tranzistoru FET

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 3. června 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Práce pojednává o tranzistorech FET, základních principech jejich fungování a vlastnostech. Zabývá se především simulováním tranzistorů MOSFET v programu FEMLAB. Dále se zabývá optimalizací parametrů simulovaného modelu tranzistoru s cílem dosáhnout shody jeho parametrů s parametry tranzistorů skutečných. K tomuto účelu je v programu MATLAB vytvořen optimalizační algoritmus. Tento algoritmus je založen na optimalizační metodě roje částic.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Modelování tranzistorů MOSFET, FEMLAB, optimalizace, metoda roje částic (PSO)

## **ABSTRACT**

The project deals with FET transistors, basic principles of their operation and their properties. The project is dominantly focused on modeling FET transistors in FEMLAB. The project describes the optimization of the model of the simulated transistor. The optimization is aimed to reach the match between the model of the transistor and parameters of real transistors. The optimization algorithm is programmed in MATLAB. This algorithm is based on the particle swarm method.

## **KEYWORDS**

Modeling MOSFET transistors, FET transistors, FEMLAB, optimization, particle swarm optimization, PSO

KAUPA, P. *Počítačový model tranzistoru FET*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 27 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Počítačový model tranzistoru FET jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 3. června 2009

.....  
(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 3. června 2009

.....  
(podpis autora)

# OBSAH

<b>Obsah</b>	<b>vii</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2 Tranzistory řízené polem</b>	<b>9</b>
2.1 Tranzistory JFET .....	10
2.2 Tranzistory MOSFET .....	12
<b>3 Modelování tranzistorů MOSFET v programu FEMLAB</b>	<b>14</b>
<b>4 Optimalizace tranzistoru</b>	<b>17</b>
4.1 Metoda roje částic .....	17
4.2 Aplikace metody roje částic .....	19
4.3 Porovnání modelu s tranzistorem BSS806N .....	21
<b>5 Závěr</b>	<b>22</b>
<b>6 Literatura</b>	<b>23</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>24</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>25</b>
<b>Zdrojový kód</b>	<b>26</b>
1 Zdrojový kód pro změnu šířky izolantu .....	26

# SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 2.1</b> <i>Klasifikace tranzistorů řízených polem</i> .....	10
<b>Obr. 2.2</b> <i>Tranzistor JFET</i> .....	11
<b>Obr. 2.3</b> <i>Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru JFET</i> .....	11
<b>Obr. 2.4</b> <i>Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem</i> .....	12
<b>Obr. 2.5</b> <i>Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem</i> .....	12
<b>Obr. 2.6</b> <i>Tranzistor MOSFET s vodivým kanálem</i> .....	13
<b>Obr. 2.7</b> <i>Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem</i> .....	13
<b>Obr. 3.1</b> <i>Geometrický model tranzistoru MOSFET</i> .....	14
<b>Obr. 3.2</b> <i>Síť pro analýzu tranzistoru MOSFET</i> .....	16
<b>Obr. 3.3</b> <i>Dvojměrné zobrazení rozložení potenciálu v tranzistoru MOSFET</i> .....	16
<b>Obr. 3.4</b> <i>Trojrozměrné zobrazení rozložení potenciálu v tranzistoru MOSFET</i> .....	16
<b>Obr. 3.5</b> <i>Výstupní charakteristika tranzistoru MOSFET</i> .....	17
<b>Obr. 4.1</b> <i>Průběžné přibližování charakteristiky modelu (modrá) k požadovanému výsledku (červená)</i> .....	20
<b>Obr. 4.2</b> <i>Srovnání zadaného průběhu s průběhem získaným optimalizací</i> .....	21
<b>Obr. 4.3</b> <i>Porovnání výstupní charakteristiky tranzistoru BSS806N s průběhem získaným optimalizací (pro <math>U_G = 1,3</math> V)</i> .....	21
<b>Obr. 4.4</b> <i>Výstupní charakteristiky tranzistoru BSS806N pro různé napětí <math>U_G</math></i> .....	22



# 1 ÚVOD

Tato práce se zabývá principy fungování tranzistorů FET (*Field Effect Transistor*, FET) a jejich modelováním. Tranzistory FET jsou založeny na principu řízení pohybu nosičů náboje elektrickým polem, přičemž vedení proudu se uskutečňuje v tzv. kanále pouze jedním typem nosičů náboje: Proto se také tato skupina tranzistorů nazývá unipolární [1].

Práce je zaměřena na podskupinu tranzistorů FET, která je známá pod zkratkou MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor FET*, MOSFET). Tranzistory MOSFET jsou základním aktivním prvkem většiny současné elektroniky, ve většině oblastí vytlačily klasické bipolární tranzistory. Používají se nejen v signálových digitálních a analogových obvodech, ale také ve výkonové elektronice [3].

Pro studium tranzistorů MOSFET využívám v předložené bakalářské práci možnosti numericky je modelovat v programu FEMLAB [2]. Od verze 3.0 byl program přejmenován na COMSOL Multiphysics. Program je založen na metodě konečných prvků [3].

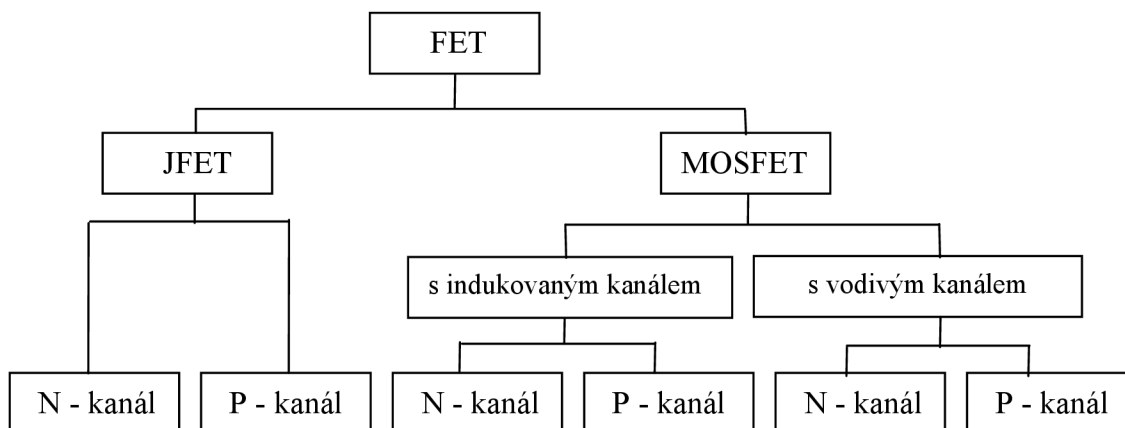
FEMLAB umožňuje modelovat jevy a struktury, popsané soustavou parciálních diferenciálních rovnic. Modelovaný jev či strukturu lze zadat buď vlastními parciálními diferenciálními rovnicemi, nebo rovnicemi předdefinovanými ve speciálních aplikačních modulech. Různé typy diferenciálních rovnic lze navzájem slučovat do jednoho modelu, a tím lze simulovat úlohy s více fyzikálními ději najednou [2].

Práce se dále zabývá globální optimalizací parametrů simulovaného modelu tranzistoru algoritmem vytvořeným v programu MATLAB. Algoritmus využívá metodu roje částic, která je vhodná k použití při řešení globálních optimalizačních problémů. Metoda roje částic (*Particle Swarm Optimization*, PSO) je stochastická evoluční optimalizace založená na principu chování a inteligenci roje. Princip PSO je nejčastěji vysvětlován jako analogie k roji včel, jejichž cílem je najít na určitém území místo s největší hustotou květin [6].

## 2 TRANZISTORY ŘÍZENÉ POLEM

Klasifikace tranzistorů řízených polem (FET) je znázorněna na obr. 2.1. Levou větev tvoří tranzistory, jejichž řídicí hradlo je od kanálu izolováno PN přechodem v závěrném směru (*junction gate field-effect transistor*), v pravé větvi jsou tranzistory s hradlem odděleným od kanálu vrstvou oxidu [5].

Tranzistory MOSFET jsou děleny na tranzistory s indukovaným kanálem a kanálem vodivým (viz dále). Poslední stupeň dělení bere v úvahu typ majoritních nosičů náboje v kanálu. Kanál vzájemně propojuje kolektor (*drain*) a emitor (*source*), vlastnosti kanálu jsou řízeny hradlem (*gate*).



**Obr. 2.1** Klasifikace tranzistorů řízených polem

Vlastnosti tranzistorů FET popisujeme následujícími parametry [5]:

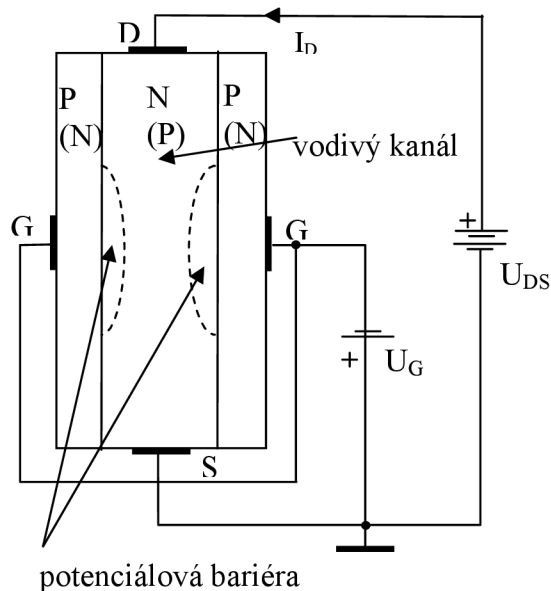
- Vstupní odpor. Protože hradlo je od vodivého kanálu odděleno závěrně polarizovaným přechodem P-N (JFET) nebo tenkou vrstvou izolantu (MOSFET), mají tranzistory FET ohromný vstupní odpor a tím nezatěžují zdroj zesilovaného signálu. U JFET dosahuje hodnota vstupního odporu až  $10^9 \Omega$ , u MOSFET až  $10^{15} \Omega$ .
- Strmost je poměr změny výstupního proudu  $\Delta I_D$  vyvolané změnou vstupního napětí  $\Delta U_{GS}$  [mA/V]. Její velikost určuje sklon vstupní charakteristiky.
- Vlastní šum. Především tranzistory JFET se vyznačují malým vlastním šumem, a proto se zapojují na začátek zesilovacího řetězce.
- Odpor v sepnutém stavu. Tranzistory FET mají malý odpor v sepnutém stavu (jednotky ohmu), a proto se používají jako spínače. Při paralelním propojení tranzistorových struktur v integrovaném obvodu mohou kolektorové proudy dosahovat desítek ampérů a odpor v sepnutém stavu setiny ohmu.
- Oddělení vstupu a výstupu. Tranzistory FET mají dokonale oddělen výstup od vstupu.
- Průraz vstupní elektrody. Vlivem vysokého vstupního odporu dochází u tranzistorů FET ke snadnému průrazu řídicí elektrody, a tím k jeho zničení. Proto se tranzistory FET prodávají se zkratovanými vývody, které se mají odstranit až po připojení součástky.

## 2.1 Tranzistory JFET

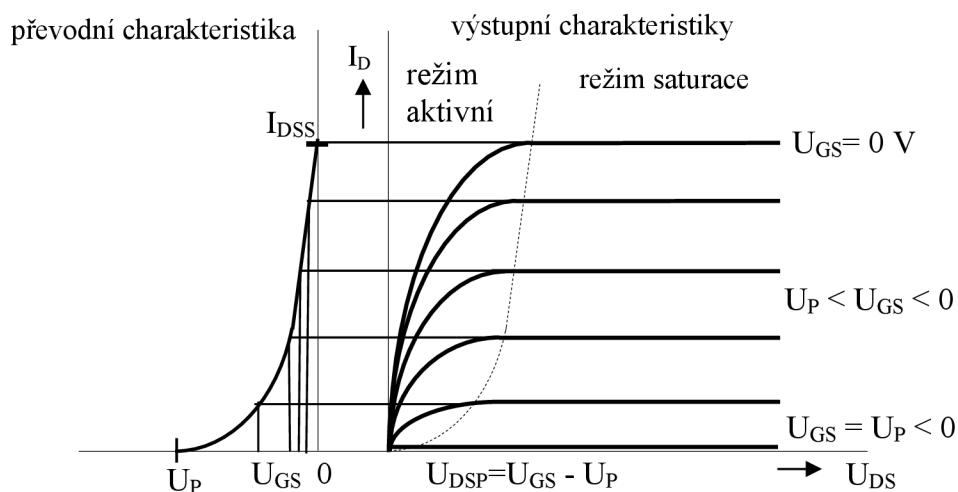
Tranzistor JFET je schématicky znázorněn na obr. 2.2.

Tranzistor JFET má vodivý kanál typu N mezi elektrodami S a D. Pod řídicími elektrodami G jsou vytvořeny malé oblasti opačné vodivosti, než má kanál, tedy oblasti s vodivostí P. Na styku vrstev N a P se vytvoří tzv. vyprázdňené oblasti, kde nejsou žádné volné nosiče náboje, a tyto oblasti se chovají jako izolant. Tím je řídicí elektroda G oddělena od vodivého kanálu. Bez řídicího napětí  $U_{GS}$  je šířka vyprázdňené oblasti

nejmenší, šířka vodivého kanálu nejširší, vodivost kanálu největší, a tím kanálem při určité velikosti  $U_{SD}$  poteče největší výstupní proud  $I_D$ . Tomu odpovídá i poloha výstupní charakteristiky při  $U_{GS} = 0$  V [3,5].



**Obr. 2.2** Tranzistor JFET

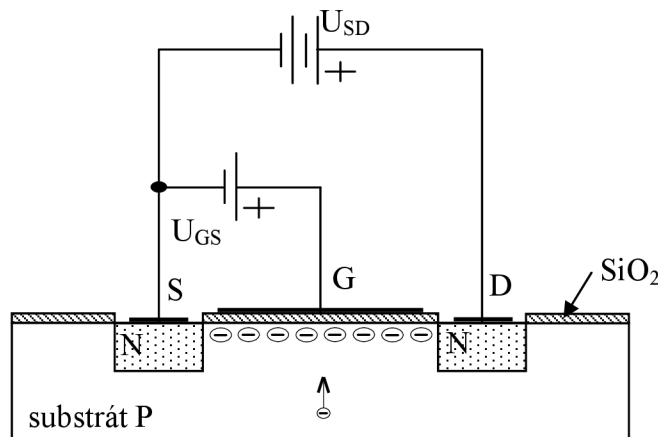


$U_P$  ... prahové napětí tranzistoru ...  $U_P < 0$   
 $I_{DSS}$  ... saturační proud tranzistoru při ...  $U_{GS} = 0$   
 $U_{DSP}$  ... napětí mezi D a S, při němž tranzistor přechází do režimu saturace;  $U_{DSP} = U_{GS} - U_P$

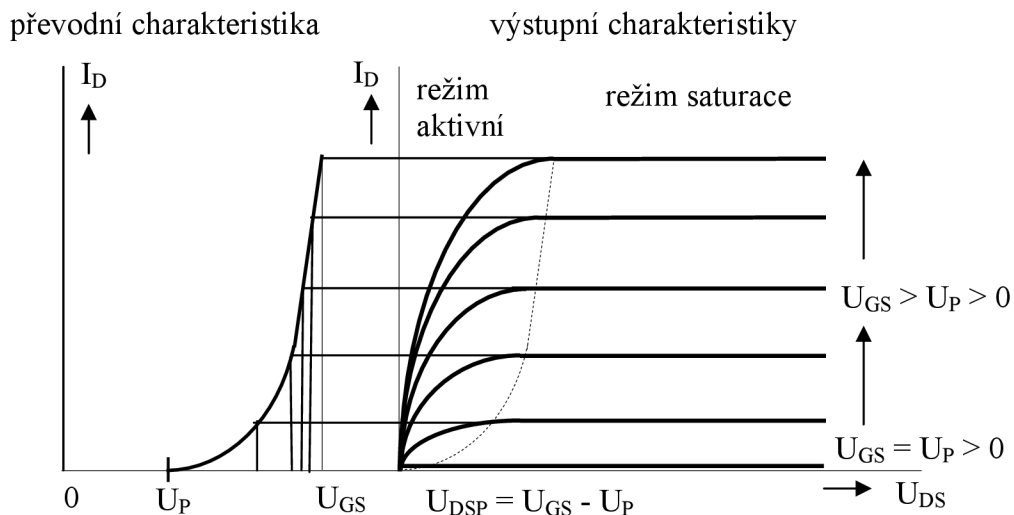
**Obr. 2.3** Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru JFET

## 2.2 Tranzistory MOSFET

Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem je schématicky znázorněn na obr. 2.4. Tento tranzistor obsahuje substrát s vodivostí P, v němž jsou vytvořeny dvě malé, velmi silně dotované oblasti s vodivostí N. Z těchto oblastí jsou elektrodami vyvedeny svorky D a S. Řídící elektroda G je oddělena od kanálu tenkou vrstvičkou izolantu (kyslíčnicku křemičitého  $\text{SiO}_2$ ). Bez napětí  $U_{GS}$  není mezi elektrodami D a S vytvořen vodivý kanál a tranzistor je uzavřen. Přivedením dostatečně velkého kladného napětí  $U_{GS}$  se ze substrátu „přitáhnou“ volné minoritní elektrony – dojde k „naindukování“ kanálu a tranzistorem začne protékat proud podle výstupních charakteristik [3, 5].



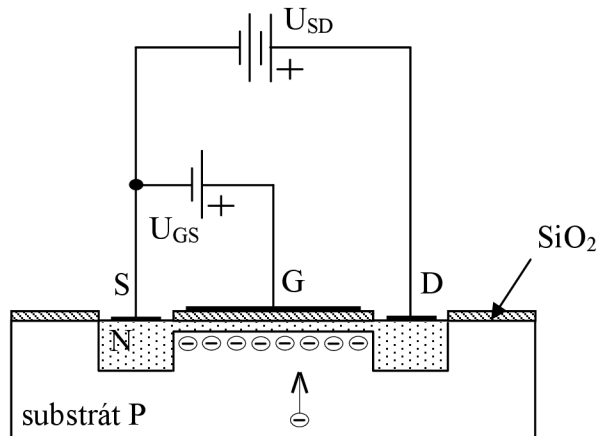
**Obr. 2.4** Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem



$U_P$  ... prahové napětí tranzistoru ...  $U_P > 0$   
 $U_{DSP}$  ... napětí mezi D a S, při němž tranzistor přechází do režimu saturace;  $U_{DSP} = U_{GS} - U_P$

**Obr. 2.5** Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

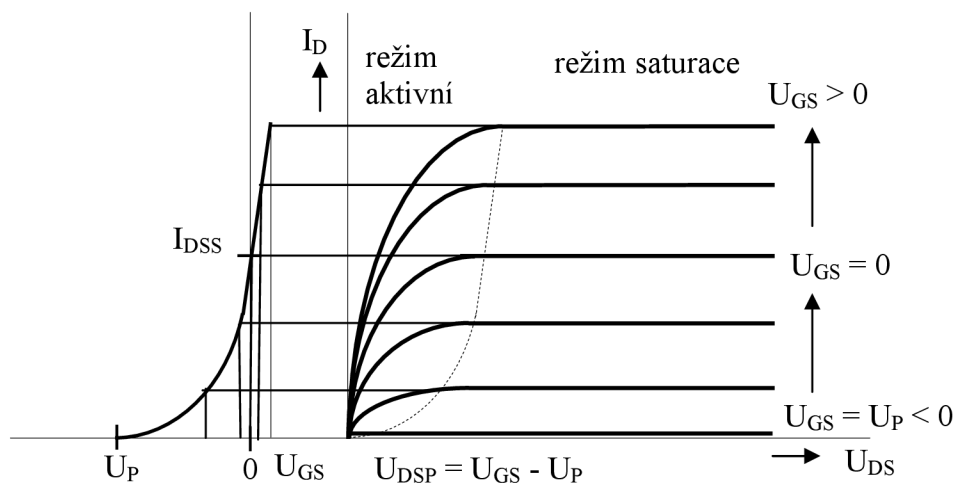
Tranzistor MOSFET s vodivým kanálem je schématicky znázorněn na obr. 2.6. Tento tranzistor obsahuje dvě silně dotované oblasti s vodivostí N, mezi nimiž je vytvořena úzká oblast N s menší dotací (vodivý kanál). I při odpojené řídicí elektrodě G ( $U_{GS} = 0$  V) poteče kanálem mezi S a D proud. Přivedením kladného předpětí  $U_{GS}$  se šířka vodivého kanálu indukci zvětší (obdobně jako u tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem), odpor kanálu se zmenší a proud vzroste. Tranzistor pracuje v tzv. obohaceném módu (režimu). Přivedením záporného předpětí  $U_{GS}$  se z vodivého kanálu elektrony vypudí, tím se jeho odpor zvětší, a proud se zmenší. Tranzistor pracuje v tzv. ochuzeném módu.



**Obr. 2.6** Tranzistor MOSFET s vodivým kanálem

převodní charakteristika

výstupní charakteristiky



$U_P$  ... prahové napětí tranzistoru ...  $U_P < 0$

$I_{DSS}$ ... saturační proud tranzistoru při ...  $U_{GS} = 0$

$U_{DSP}$  ... napětí mezi D a S, při němž tranzistor přechází do režimu saturace;  $U_{DSP} = U_{GS} - U_P$

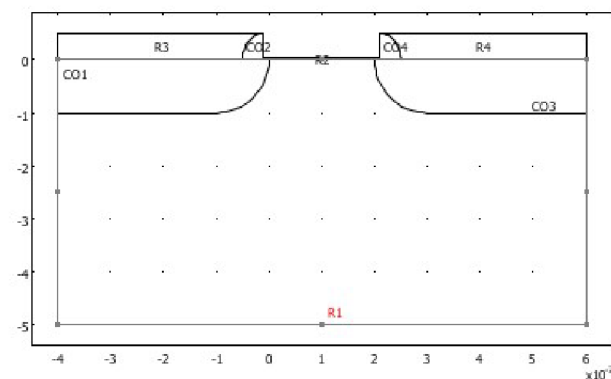
**Obr. 2.7** Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET s vodivým kanálem

### 3 MODELOVÁNÍ TRANZISTORŮ MOSFET V PROGRAMU FEMLAB

Při modelování fyzikálních struktur v programu FEMLAB se postupuje v následujících krocích [1]:

- Základní nastavení: Zadání dimenze modelované struktury (1D, 2D, 3D). Vybrání specializovaného modulu, vhodného pro vytvoření numerického modelu.
- Vytvoření geometrické struktury modelu. Geometrická struktura je vytvářena ve standardním grafickém editoru. K dispozici je funkce na vytváření základních geometrických útvarů (čtverce, kruhy, čáry, křivky). Na vybrané geometrické objekty lze aplikovat operce jako například průnik, sjednocení, zrcadlení a další.
- Zadání okrajových podmínek. Jedná se o přiřazení určitých hodnot nebo funkčních závislostí hranicím nakresleného modelu. Účelem je zajištění fyzikální jednoznačnosti řešení příslušných rovnic pole. Nejběžnějšími okrajovými podmínkami jsou Dirichletova podmínka (znalost hodnoty počítané veličiny na hranici) a Neumannova podmínka (znalost hodnoty derivace počítané veličiny ve směru vnější normály k hranici).
- Zadání parametrů jednotlivých podoblastí. Pro jednotlivé podoblasti je nastavena permitivita, permeabilita, vodivost, pohyblivost elektronů, hustota prostorového náboje a další fyzikální parametry.
- Vygenerování diskretizační sítě. Geometrický model je rozdělen na malé diskretizační prvky (v dvojrozměrném případě trojúhelníky). Hustotu sítě lze libovolně nastavovat dle potřeby modelu.
- Zpracování výsledků. Operace zpracování výsledků je přístupná ze submenu *Postprocessing*. Jednak lze volit způsob zobrazení vypočteného rozložení pole (*Surface plot*, *Contour plot*, *Boundary plot*, *Arrow plot*, ...), jednak lze vypočtené rozložení pole dále zpracovávat (integrování, derivování, atd.).

Jak vypadají výše popsané kroky konkrétně při modelování tranzistoru MOSFET, je uvedeno v následujících odstavcích.



Obr. 3.1 Geometrický model tranzistoru MOSFET

V úvodním okně FEMLABu vybereme dvojrozměrný elektrostatický model. V grafickém editoru následně vytvoříme geometrický model tranzistoru (obr. 3.1).

Následuje zadání rovnic jednotlivých oblastí a rovnic pro určení okrajových podmínek. Samozřejmě je nutné do programu zadat konstanty, které k výpočtu rovnic potřebujeme. Systém používá standardní driftovou a difuzní aproximaci spojenou s Poissonovými rovnicemi. Rovnice oblastí obsahují jako závislé proměnné elektrostatický potenciál  $\psi$ , koncentraci elektronů  $n$  a koncentraci děr  $p$  [1].

Třemi základními rovnicemi pro polovodič jsou [1]:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \psi) = q(p - n + N) , \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot J_n = -qR_{SRH} , \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot J_p = qR_{SRH} , \quad (3)$$

kde  $p$  a  $n$  jsou koncentrace děr a elektronů,  $N$  představuje pevný náboj sdružený s ionizovanými donory,  $R_{SRH}$  je Shockleyho-Readova-Hallová rekombinace,  $J_n$  značí proudovou hustotu elektronů a  $J_p$  je proudová hustota děr,  $\varepsilon$  značí permitivitu a  $q$  je hodnota náboje.

Pro hranice, které jsou v kontaktu s izolátorem nebo s místem daleko od aktivní oblasti, je nastavena symetrická okrajová podmínka nebo okrajová podmínka nulového náboje (toky) pro elektrostatický problém. Pro hranice, které jsou v kontaktu s kovem, je pevně zadán elektrostatický potenciál. Uvažuje-li se na kontaktu nekonečná rychlost rekombinace, pro koncentrace děr  $p$  a elektronů  $n$  platí [1]:

$$n_i^2 = n \cdot p , \quad (4)$$

kde  $n_i$  značí vnitřní hodnotu koncentrace. Uvážením (4) a předpokladem, že na kontaktu není náboj, lze počítat koncentraci nosičů náboje

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} , \quad (5)$$

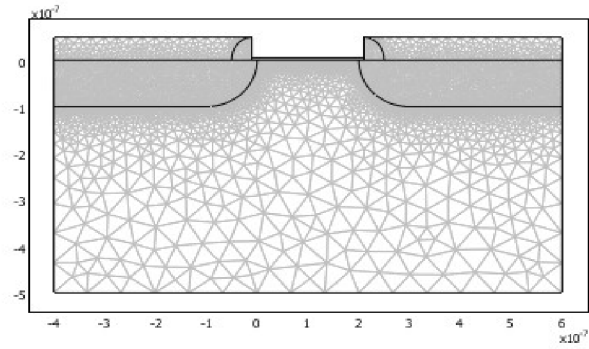
$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} . \quad (6)$$

Jsou-li vypočteny elektrostatický potenciál  $\psi$ , koncentrace elektronů  $n$  a koncentrace děr  $p$ , pokračujeme zadáním parametrů jednotlivých podoblastí (koncentrace nosičů náboje, permitivita, pohyblivost nosičů, difuzivita nosičů, doba života nosičů, atd.). Následuje určení počátečních hodnot elektrického potenciálu a koncentrace nosičů náboje.

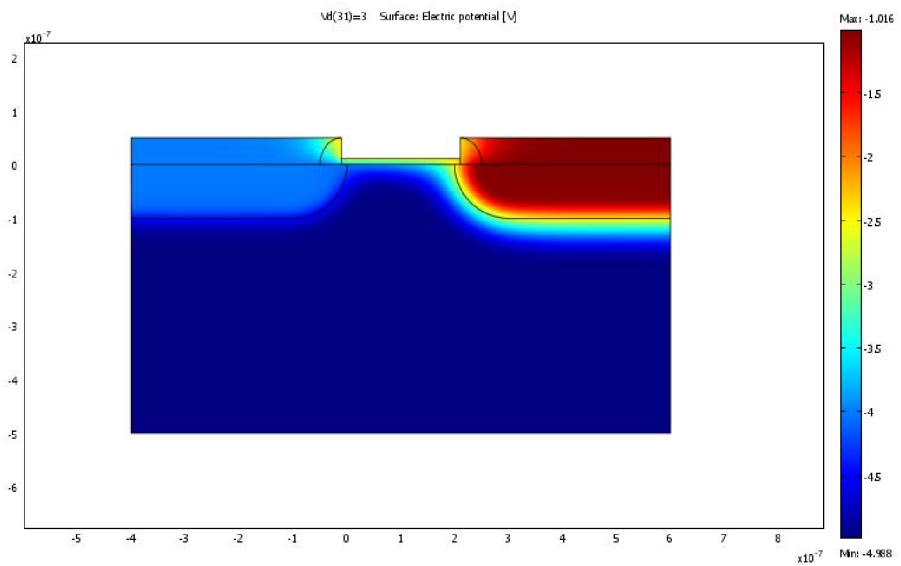
V dalším kroku je vygenerována diskretizační síť (obr. 3.2). Přitom je zapotřebí nastavit vhodnou hustotu sítě pro jednotlivé oblasti.

Následně je spuštěn výpočet elektrického potenciálu v tranzistoru a vykreslení jeho rozložení. Rozložení potenciálu lze reprezentovat jak dvojrozměrným grafem (obr. 3.3) tak grafem trojrozměrným (obr. 3.4).

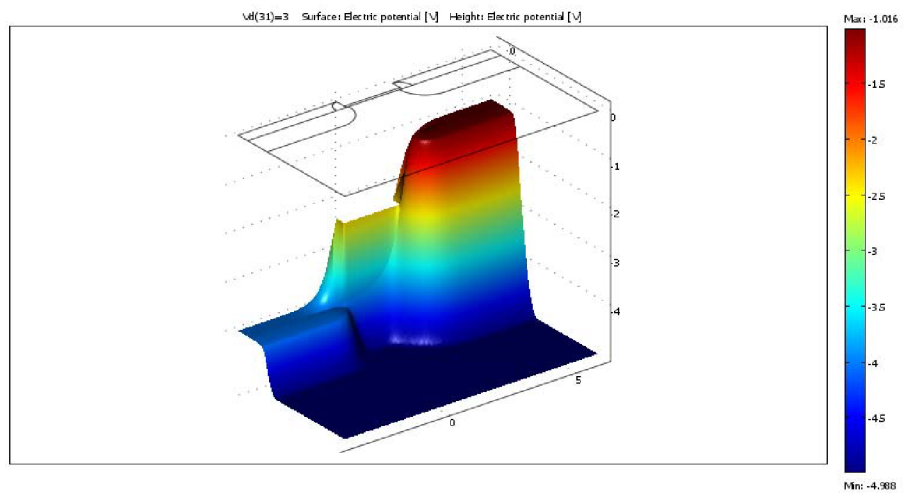
Dále můžeme zobrazit výstupní charakteristiku tranzistoru, tj. závislost proudu  $I_D$  na napětí  $U_{DS}$  při různém řídicím napětí  $U_G$  (obr. 3.5).



**Obr. 3.2** Síť pro analýzu tranzistoru MOSFET

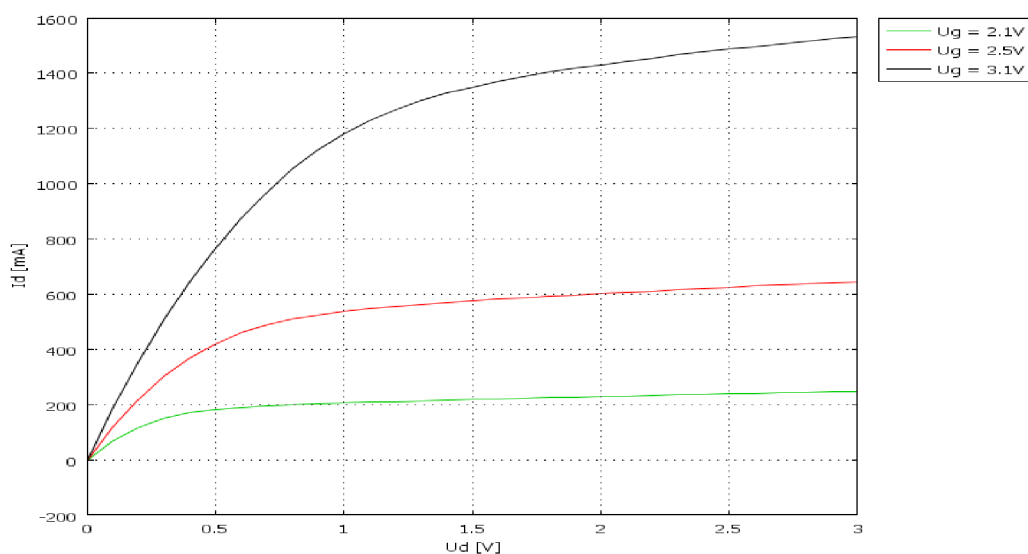


**Obr. 3.3** Dvozměrné zobrazení rozložení potenciálu v tranzistoru MOSFET



**Obr. 3.4** Trojrozměrné zobrazení rozložení potenciálu v tranzistoru MOSFET





Obr. 3.5 Výstupní charakteristika tranzistoru MOSFET

## 4 OPTIMALIZACE TRANZISTORU

### 4.1 Metoda roje částic

Metoda roje částic (*Particle Swarm Optimization*, PSO) je stochastická evoluční optimalizační metoda, založená na principu chování a inteligenci roje. Princip PSO je nejčastěji vysvětlována jako analogie k roji včel, jejichž cílem je najít na určitém území místo s největší hustotou květin. Bez jakékoliv znalosti lokality začínou včely prohledávat území náhodně z náhodné počáteční lokace a s náhodnou počáteční rychlostí. Každá včela si pamatuje místo, kde ona sama našla největší hustotu květin. Zároveň má každá včela informace o tom, kde byly úspěšné ostatní včely. Jednotlivé včely pak poletují mezi místem, které našly osobně, a mezi dosavadním nejlepším místem, o kterém se dozvěděly od ostatních včel. Pokud včela najde po cestě z jedné lokality do lokality druhé lepší místo (místo s větším počtem květin), změní se její trajektorie podle nově nalezeného místa. Pokud se změní poloha místa s nejlepším množstvím květin (globální maximum), trajektorie se opět změní směrem k tomuto místu. Tímto způsobem roj včel prozkoumá celé pole a skončí na místě s největším počtem květin. [6].

Při práci s PSO používáme následující termíny [6]:

1. Agent (částička) je jedinec v roji. Pro každého agenta platí stejná pravidla. Jeho úkolem je pohybovat se směrem k optimu.
2. Pozice je určena souřadnicemi agenta ve zvoleném prostoru. Počet rozměrů prostoru odpovídá počtu stavových proměnných optimalizace (při třech stavových proměnných se pohybujeme v trojrozměrném prostoru).
3. Fitness (kriteriální funkce) slouží k ohodnocení kvality nalezeného řešení na dané pozici. Fitness poskytuje kontakt mezi fyzickým problémem a optimalizačním

algoritmem. Fitness přiřazuje pozici v řešeném prostoru číslo, které představuje hodnotu této pozice (množství květin na těchto souřadnicích).

4. Osobní optimum ( $p_{best}$ ) udává pozici agenta, která odpovídá jeho nejlepší hodnotě fitness. V každém bodě trajektorie agent srovnává fitness aktuální pozice s osobním optimem. Jestliže aktuální umístění má vyšší hodnotu fitness než je jeho osobní optimum, je osobní optimum aktualizováno.
5. Globální optimum ( $g_{best}$ ) je pozicí nejlepší fitness ze všech osobních optim.

Algoritmus PSO lze popsat následujícími kroky [6]:

1. Definování prostoru optimalizace spočívá ve výběru parametrů fyzického problému (stavové proměnné optimalizace) a v omezení rozsahu těchto parametrů (stavový prostor optimalizace). Toto omezení je označeno jako  $Xmin_n$  a  $Xmax_n$ , kde  $n$  je z rozsahu od 1 do  $N$ .
2. Definování fitness. Sestavíme funkci, která vrací pro pozici v prostoru číslo, jenž je úměrné úspěšnosti přiblížení se k optimálnímu výsledku. Tato funkce je specifická pro každou optimalizaci.
3. Určení počtu agentů a počtu iterací. Počet agentů a počet iterací se volí s ohledem na řešený problém. Počet agentů je nutné volit s ohledem na rozsah velikosti řešeného prostoru (při malém počtu agentů by nemuselo dojít k nalezení globálního optima). Počet iterací je volen s ohledem na potřebnou přesnost výsledku. Oba tyto parametry ovlivňují dobu optimalizace.
4. Inicializování počátečního umístění roje a jeho rychlosti. Prohledávání zadaného prostoru začíná každý agent z náhodné pozice s náhodnou rychlostí a s náhodným počátečním směrem. Tato startovní pozice se v prvním kroku stává osobním optimem každého agenta. První hodnota globálního optima je vybrána ze všech hodnot počátečních osobních optim.
5. Systematický let agentů stavovým prostorem. Na každé nové pozici agenta je vypočítána osobní fitness agenta, která je porovnána s jeho osobním optimem a s optimem globálním. Je-li osobní fitness agenta lepší nežli osobní optimum, je osobní optimum aktualizováno. Totéž platí o optimu globálním.

Velice důležitým parametrem optimalizace je rychlost pohybu jednotlivých agentů. Rychlost agenta je závislá na souřadnicích osobního optima  $p_{best}$  a optima globálního  $g_{best}$  [6]:

$$v_{n+1} = w v_n + c_1 r_1 (p_{best,n} - x_n) + c_2 r_2 (g_{best,n} - x_n), \quad (7)$$

kde  $v_n$  je rychlost agenta v  $n$ -tém iteračním kroku,  $x_n$  je souřadnice agenta v  $n$ -tém iteračním kroku,  $w$  je inerciální váha,  $c_1$  je míra přitažlivosti k osobnímu optimu,  $c_2$  je míra přitažlivosti k optimu globálnímu,  $r_1$  a  $r_2$  jsou náhodná čísla z intervalu od 0 do 1,  $p_{best}$  jsou souřadnice osobního optima a  $g_{best}$  jsou souřadnice optima globálního.

Nové souřadnice agenta získáme podle [6]:

$$x_n = x_n + \Delta t v_n, \quad (8)$$

kde  $\Delta t$  je časový krok.

Celý postup se opakuje, dokud není nalezeno optimální řešení nebo dokud neproběhne požadovaný počet iterací.

6. Okrajové podmínky. Existují tři typy okrajových podmínek.

Pokud částice narazí do **absorpční hranice** řešeného prostoru, složka rychlosti kolmá k hranici se stane nulovou. Pokud částice narazí do **odrazné hranice** prostoru, změní se u složky rychlosti kolmé k hranici znaménko. Pokud částice narazí na **neviditelnou hranici**, má dovoleno letět bez jakéhokoliv omezení ven z řešeného prostoru (následně se ale nehodnotí její fitness).

## 4.2 Aplikace metody roje částic

Při použití PSO pro hledání parametrů modelu tranzistoru MOSFET, jež odpovídají tranzistoru reálnému, měníme parametr  $x$ , který určuje změnu šířky izolantu na hradle. Pro proměnou  $x$  je nutno definovat rozsah, ve kterém bude optimalizace probíhat. Dále je nutno vygenerovat náhodnou počáteční hodnotu rychlosti.

```
% zadání průběhu funkce, ke kterému se chceme přiblížit
zm=[0 0.3 0.3 0.3 0.3];
for n=1:J % zadání počátečních hodnot agentům
    x(n,1) = 0.00 + 2.500*rand();
    p(n,1) = x(n,1);
    p(n,2) = 1e+6;
end
v = rand( J, 1); % rychlost agentů
```

Dále propojíme optimalizaci s modelem tranzistoru, ve kterém je parametr  $x$  jako vstupní proměnná.

```
for l=1:J
    Z(l,:) = fet(x(l,1));
end
```

Proměnná  $Z$  je výstup modelu tranzistoru. Proměnná  $Z$  obsahuje průběh výstupní charakteristiky tranzistoru (spočítáno v předem daných bodech), který by měl souhlasit s rozložením požadovaného průběhu.

Následuje vytvoření hodnotící funkce, která porovnává oba průběhy. Tato funkce je koncipována jako součet rozdílů v počítaných bodech, přičemž rozdíl, který se nachází v lineární části charakteristiky, má větší váhu. To je zajištěno násobením rozdílu hodnotou proměnné  $k$ .

```
for i=1:J
    d=length(zm);
    for k=1:d
        kriterium=kriterium+(((zm(1,k)-Z(i,k))^2)*k);
    end
    x(i,2) = kriterium;
    kriterium=0;
end
```

Po spočítání hodnotící funkce pro všechny agenty se s těchto hodnot vybere nejmenší.

Ta představuje globální minimum v první generaci.

```
% najít minima kritéria z J počtu agentů
[e(m+1), ind] = min(x(:, 2));
if e(m+1) < e(m)
    g=x(ind, 1);           % globální nejlepší výsledek
    zzz2=Z(ind, :);
else
    e(m+1)=e(m);
end
```

Dále je zjištěno osobní optimum každého agenta.

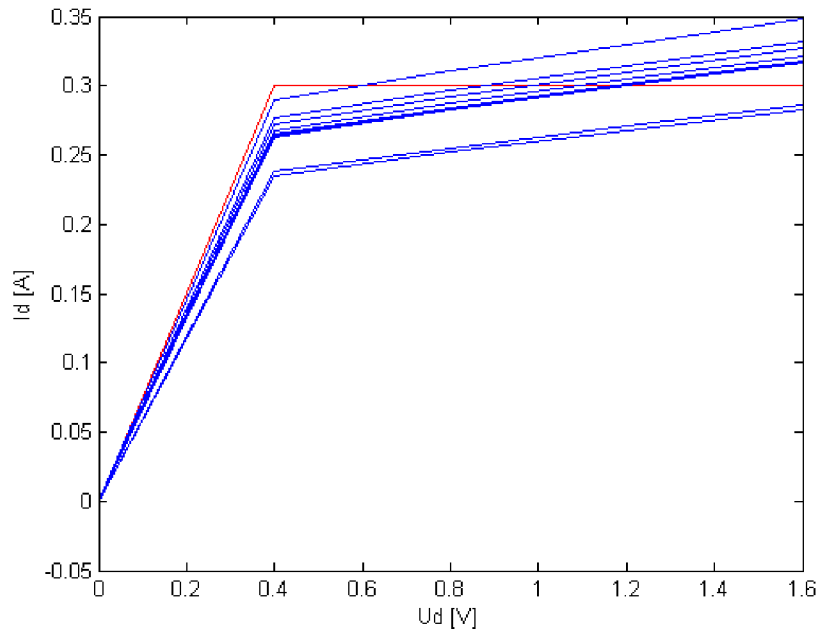
```
if x(n, 2) < p(n, 2)       % osobní nejlepší výsledek
    p(n, :) = x(n, :);
end
```

Nakonec spočítáme změny rychlosti agentů a nastavíme okrajové podmínky (využíváme absorpční zed').

```
% rovnice pro změnu rychlosti pohybu jednotlivých agentů
v(n, 1) = w*v(n, 1) + c1*rand()*( p(n, 1)-x(n, 1) );
v(n, 1) = v(n, 1) + c2*rand()*( g(1, 1)-x(n, 1) );
x(n, 1) = x(n, 1) + dt*v(n, 1);
if x(n, 1) > 2.50, x(n, 1)=2.50; end
```

Celý zdrojový kód je uveden v příloze.

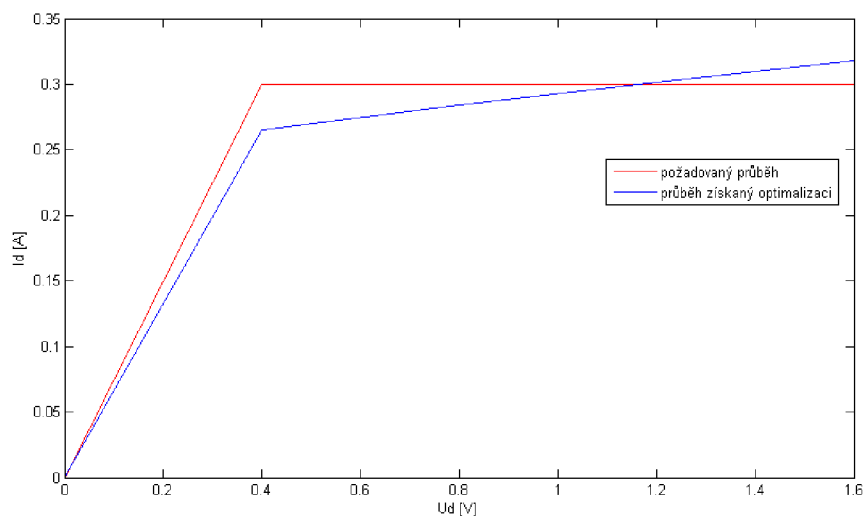
Pro porovnání obou charakteristik (charakteristika zadaná a charakteristika optimalizovaná) slouží obr. 4.1, na kterém je zobrazeno jejich postupné přibližování.



**Obr. 4.1** Průběžné přibližování charakteristiky modelu (modrá) k požadovanému výsledku (červená).

Na obr. 4.2 je zobrazeno srovnání průběhu požadovaného (reálný tranzistor) a průběhu výsledného (optimalizace parametru modelu). Dalším výstupem algoritmu je hodnota

šířky izolantu na hradle, která odpovídá výslednému průběhu výstupní charakteristiky. Pro tento případ je šířka izolantu rovna 5.515 nm pro hodnotu  $U_G = 0,8$  V.

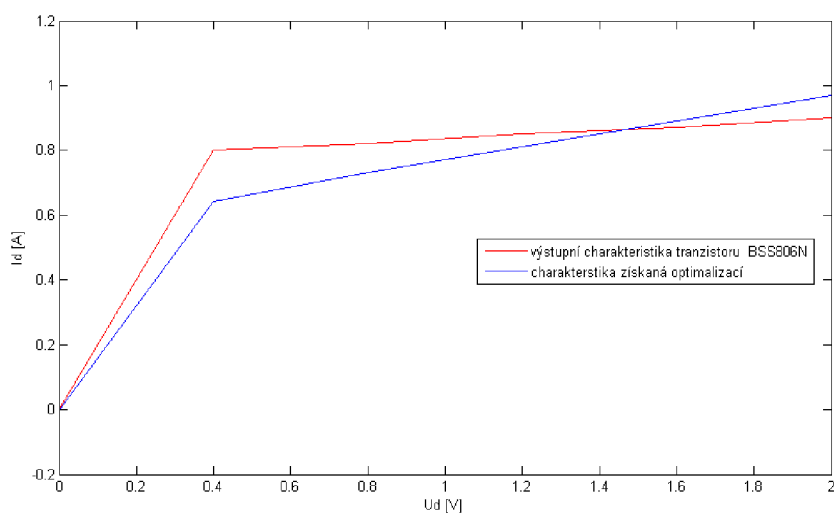


**Obr. 4.2** Srovnání zadaného průběhu s průběhem získaným optimalizací

### 4.3 Porovnání modelu s tranzistorem BSS806N

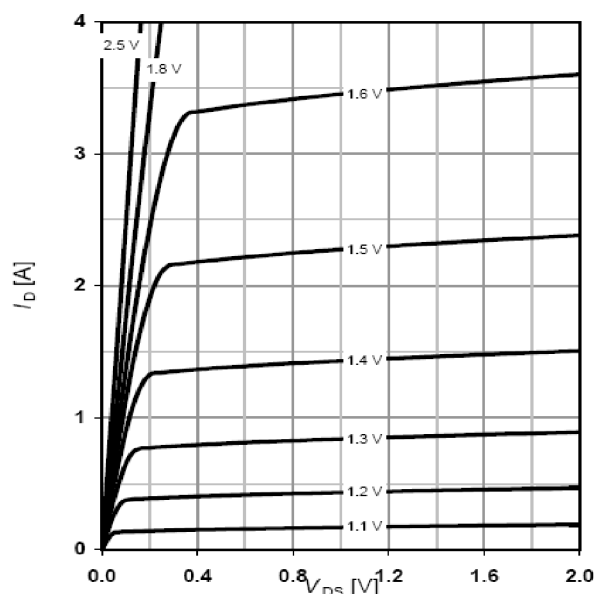
Pomocí PSO lze měnit i několik parametrů modelu tranzistoru. Abychom získali charakteristiku, která by byla srovnatelná s charakteristikou skutečného tranzistoru BSS806N (viz obr. 4.4), musíme v modelu tranzistoru měnit nejen šířku izolantu na hradle, ale také velikost dotovaných oblastí [4].

Na obr. 4.3 lze porovnat obě charakteristiky pro napětí na hradle  $U_G = 1,3$  V. Výsledná charakteristika je nejlepším možným přiblížením (s ohledem na přesnost) pro daný počet jedinců a generací. Výsledná šířka izolantu je 9.798 nm a parametr  $y_j$  je roven  $0.868 \cdot 10^{-7}$  (parametr  $y_j$  ovlivňuje velikost dotovaných oblastí).



**Obr. 4.3** Porovnání výstupní charakteristiky tranzistoru BSS806N s průběhem získaným optimalizací (pro  $U_G = 1,3$  V).

Jelikož však vytvořený model je jen model a BSS806N je tranzistor prakticky již zkonstruovaný, vyrobený a zapouzdřený, lze oba tranzistory porovnávat jen na úrovni jejich výstupních charakteristik. (obr. 4.3 a obr. 4.4) [4].



**Obr. 4.4** Výstupní charakteristiky tranzistoru BSS806N pro různé napětí  $U_G$

## 5 ZÁVĚR

Program Femlab je možné použít k modelování problémů v mnoha oborech. Je zde možné sdružení více geometrií i různých dimenzí. Program v základním provedení obsahuje velké množství již vytvořených modelů.

V této práci je využit Femlab k vytvoření modelu tranzistoru MOSFET. Z modelu tranzistoru lze získat rozložení elektrického potenciálu v tranzistoru a jeho výstupní charakteristiky, tedy závislost proudu kanálem  $I_D$  na napětí mezi kolektorem a emitorem  $U_{DS}$  při různém řídicím napětí  $U_G$ .

Dále jsou optimalizovány parametry modelu tranzistoru. Pro tuto optimalizaci je v programu MATLAB vytvořen optimalizační algoritmus, který je založen na metodě roje částic. Pomocí tohoto algoritmu jsou měněny parametry tranzistoru tak, aby byla získána výstupní charakteristika srovnatelná s charakteristikou skutečného tranzistoru.

Při optimalizaci je důležité správně nastavit počet agentů, počet generací a velikost prozkoumávané oblasti. Při zvětšení prozkoumávané oblasti je nutné zvýšit počet jedinců a generací.

Optimalizační algoritmus pracuje s modelem tranzistoru, který je vytvořen v programu Femlab. Simulace pro různé parametry je velice časově náročná. Proto nutno dobře odhadnout velikost oblasti, ve které se nachází optimální hodnoty parametrů. K tomuto pak následně patří odhad vhodného počtu agentů a generací.

V důsledku časové náročnosti na výpočet simulace jsou charakteristiky počítány jen v několika málo bodech.

Na obr. 4.3 je zobrazeno výsledné porovnání požadovaného průběhu a průběhu získaného optimalizací modelu tranzistoru.

## 6 LITERATURA

- [1] *COMSOL Multiphysics 3.3 User's Guide*. Stockholm: Comsol AB, 2006.
- [2] BABČANÍK, J. Simulujeme v programu FEMLAB [online]. Dostupné z WWW: <[www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Software/ART1779-Simulujeme-v-programu-Femlab.html](http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Software/ART1779-Simulujeme-v-programu-Femlab.html)>
- [3] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A. a kol. *Elektronické součástky*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [4] Dokumentace tranzistoru BSP 296 [online]. Dostupná z WWW: <[www.infideon.com](http://www.infideon.com)>
- [5] VOŠKA, S. *Zesilovače 2*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003.
- [6] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52, no. 2, p. 397 – 407.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FET	<i>Field Effect Transistor</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor FET</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
D	kolektor ( <i>drain</i> )
G	hradlo ( <i>gate</i> )
S	emitor ( <i>source</i> )
$I_D$	proud kolektorem ( <i>drain</i> )
$U_G$	napětí na hradle ( <i>gate</i> )
$U_D$	napětí na kolektoru ( <i>drain</i> )
$p$	koncentrace děr
$n$	koncentrace elektronů
$n_i$	vnitřní hodnota koncentrace
$N$	pevný náboj sdružený s ionizovanými donory
$R_{SRH}$	Shockleyho-Readova-Hallove rekombinace
$J_n$	proudová hustota elektronů
$J_p$	proudová hustota děr
$\varepsilon$	permitivita
$q$	náboj
$\psi$	elektrostatický potenciál
$g_{best}$	globální optimum
$p_{best}$	osobní optimum
$v_n$	rychlost agenta v $n$ -tém iteračním kroku
$x_n$	souřadnice agenta v $n$ -tém iteračním kroku
$w$	inerciální váha
$c_1$	míra přitažlivosti k osobnímu optimu
$c_2$	míra přitažlivosti ke globálnímu optimu
$\Delta t$	časový krok



# SEZNAM PŘÍLOH

<b>Zdrojový kód</b>	<b>26</b>
1 Zdrojový kód pro změnu šířky izolantu .....	26

## **1CD**

psofet.....	zdrojový kód algoritmu PSO pro změnu šířky izolantu
psofet2.....	zdrojový kód algoritmu PSO pro změnu šířky izolantu velikosti dotované oblasti
fet.....	zdrojový kód pro vytvoření modelu tranzistoru, vstupní parametr umožňuje měnit šířku izolantu na hradle
fet2.....	zdrojový kód pro vytvoření modelu tranzistoru, vstupní parametry umožňují měnit šířku izolantu na hradle a velikost dotovaná oblasti

# ZDROJOVÝ KÓD

## 1 Zdrojový kód pro změnu šířky izolantu

```
function out = psofet(J,G)
% J = počet jedinců
% G = počet generací

zm = [0 0.3 0.3 0.3 0.3]; % zadání průběhu funkce
osa = [0 0.4 0.8 1.2 1.6]; % osa x

figure(66); % vykreslení průběhu funkce, kterou chceme
plot(osa,zm,'r'); % získat na výstupu tranzistoru (červená)
xlabel('Ud [V]')
ylabel('Id [A]')
drawnow;
hold on

dt = 0.10; % časový krok, kterým se změní pozice agenta
c1 = 1.49; % konstanta určující tah k osobnímu minimu
c2 = 1.49; % konstanta určující tah ke globálnímu minimu

x = zeros(J, 2); % pozice agenta
p = zeros(J, 2); % nejlepší hodnoty jednotlivých agentů
for n=1:J % zadání počátečních hodnot agentům
    x(n,1) = 0.00 + 2.500*rand();
    p(n,1) = x(n,1);
    p(n,2) = 1e+6;
end

v = rand(J,1); % rychlost agentů
g = zeros(1,1); % nejlepší globální hodnota
e = zeros(G+1,1); e(1) = 1e+6;
Z = zeros(J,5);

for m=1:G % HLAVNÍ SMYČKA
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % váhová konstanta
    for l=1:J % funkce pro volání fet comsol
        Z(l,:) = fet(x(l,1));
    end

    kriterium=0; % hodnotící funkce
    for i=1:J
        d=length(zm);
        for k=1:d
            kriterium=kriterium+(((zm(1,k)-Z(i,k))^2)*k);
        end
        x(i,2) = kriterium;
        kriterium=0;
    end
    [e(m+1),ind] = min(x(:,2)); % archivace minima
end
```

```

if e(m+1)<e(m)
    g=x(ind,1);
    zzz=Z(ind,:);
    zzz2=Z(ind,:);
else
    e(m+1)=e(m);
    zzz=Z(ind,:);
end

figure(66)
plot(osa,zzz,'b');
drawnow;

for n=1:J
    if x(n,2)<p(n,2)
        p(n,:)=x(n,:);
    end

    % rovnice pro změnu rychlosti pohybu jednotlivých agentů
    v(n,1) = w*v(n,1) + c1*rand()*( p(n,1)-x(n,1));
    v(n,1) = v(n,1) + c2*rand()*( g(1,1)-x(n,1));
    x(n,1) = x(n,1) + dt*v(n,1);

    if x(n,1) > 2.50, x(n,1)=2.50; end % absorpční zeď
end

end

figure(1);
plot(osa,zm,'r',osa,zzz2)
xlabel('Ud [V]')
ylabel('Id [A]')
out = (g*1e-9)+4e-9;

```