



**Fakulta pedagogická
Katedra obecné fyziky**

**TVORBA POČÍTAČOVÝCH MODELŮ
PRO VÝUKU ELEKTRONIKY**

Rigorózní práce

Plzeň 2009

Mgr. Pavel Kratochvíl

*Prohlašuji, že jsem rigorózní práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury
a zdrojů informací.*

V Plzni dne 19.1.2009

Pavel Kratochvíl

Anotace

Práce se zabývá tvorbou modelů pro výuku elektroniky. Na přiloženém CD jsou uloženy vytvořené modely z oblasti pásové teorie, unipolární tranzistory a klopné obvody. Textová část obsahuje teorii k modelovaným jevům, obvodům a součástkám. Dále pak metodické návody a vzorový výklad. Jsou zde vypsány i části zdrojového kódu s popisem funkce, aby tyto programy mohly sloužit jako vzor pro tvorbu dalších modelů.

Obsah

1 Úvod.....	5
2 Modely ve fyzice	6
2.1 Pojem model	6
2.2 Klasifikace modelů	7
2.3 Modely ve vědě.....	8
2.4 Ideální modely ve vyučování	8
2.5 Vyučovací prostředky	11
2.6 Modely a pomůcky používané ve výuce elektroniky	14
2.7 Pedagogicko-psychologický význam modelů v kognitivních procesech	17
2.7 Cíle práce	20
2.8 Tvorba animací	21
3 Popis vytvořených modelů.....	24
3.1 Jevy v polovodičích	24
3.1.1 Rozhraní polovodič-kov	25
3.1.2 P-N přechod.....	35
3.1.3 Zenerův jev	46
3.1.4 Lavinový jev	52
3.1.5 Tunelový jev v propustném směru.....	58
3.1.6 Fotoelektrické jevy	63
3.1.7 Tranzistorový jev	68
3.2 Unipolární tranzistory	74
3.2.1 Unipolární tranzistor s přechodovým hradlem – JFET.....	74
3.2.2 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem s indukovaným kanálem – MOSFET, obohacovací typ	81
3.2.3 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem se zabudovaným kanálem – MOSFET, ochuzovací typ	90
3.3 Klopné obvody.....	96
3.3.1 Bistabilní obvod.....	96
3.3.2 Monostabilní obvod	102
3.3.3 Astabilní obvod.....	109
4 Závěr	117
5 Použitá literatura a internetové zdroje	118
6 Příloha: CD	119

1 Úvod

Tato práce navazuje na práci diplomovou, jejíž cílem bylo vytvoření interaktivního modelu čtyřbitového procesoru a modelů jeho jednotlivých součástí, přičemž je možné hierarchicky postupovat až k nejjednodušším stavebním prvkům – hradlům NAND, AND. Programy jsem vytvořil za účelem počítačové podpory výuky digitální elektroniky a na katedře obecné fyziky byly úspěšně zařazeny do několika předmětů.

Práce rigorózní se zabývá tvorbou modelů z oblasti analogové elektroniky. Měla by se stát počítačovou podporou vybraných kapitol pro předmět Elektronika pro učitele SŠ. Programy jsou tvořeny jako doplněk k učebním textům [3], které jsou používány pro tento předmět. V souladu s těmito skripty jsou jako první skupina programů zvoleny modely jevů v polovodičích na základě pásové teorie. Následují modely unipolárních tranzistorů a klopných obvodů.

Tato práce bude dále rozšířena na práci disertační, zabývající se tvorbou elektronických modelů pro střední školy. Proto je veškerý text již koncipován pro potřeby středoškolského vzdělávání. Jsou zde zařazeny kapitoly zabývající se obecnými otázkami: klasifikace modelů, jejich pedagogicko-psychologický význam, přehled modelů používaných v elektronice, zásady tvorby nových modelů. Ve druhé části jsou zařazeny metodické návody a vzorové výklady k vytvořeným programům. Jsou zde zařazeny i výpisy zdrojového kódu, aby tato práce mohla sloužit i jako návod pro tvorbu dalších animací. Vzhledem k tomu, že na gymnáziích je elektronika probírána pouze velmi okrajově, budou vytvořené modely určeny pro studenty elektrotechnických škol se slaboproudým zaměřením.

2 Modely ve fyzice

2.1 Pojem model

Modely se od samého vzniku fyziky používaly jako jeden z nejvýznamnějších prostředků velmi efektivního způsobu budování fyzikálních teorií i k jejich názornému výkladu. První myšlenkové konstrukce, mající charakter modelů, se objevují již ve starověku. Tehdejší filozofie vytvářely spekulativní konstrukce světa, které se více nebo méně opíraly o poznání skutečnosti. Některé z těchto systémů již měly znaky vědecké teorie a konstrukci blízkou dnešnímu modelování. První vědecké modely jsou spojeny se vznikem starověké astronomie. Ať už je to Ptolemaiovův geocentrický model vesmíru, nebo Aristarchův model heliocentrický.

Základy vědeckého modelování položili v 17. století Galileo a Newton. Místo zkoumání příliš složitého, nebo nepřístupného systému je možné zkoumat systém náhradní, který je s originálním systémem izomorfní v přesně definovaném oboru. Získané poznatky je pak možné přenášet na originál.

V 19. stol. Hertz a Maxwell zpřesňují pojem model. Zkoumá se vztah mezi originálem a jeho zobrazením. Sledovalo se, jaké podmínky musí model splňovat. Maxwell při modelování elektromagnetických jevů zdůrazňoval nejen názornost modelu, ale i možnost objasnění průběhu fyzikálního jevu před tím, než je dobudována ucelená teorie. Analogie vytvořené Maxwellem jsou historickým základem současné metody matematického modelování.

Pojem model se ustaluje začátkem 30. let 20. století v pracích Hilberta a Tarskiho. Objevily se snahy vytvořit obecnou teorii modelování. Avšak tohoto pojmu se užívá v mnoha oborech v tak různém pojetí, že dodnes neexistuje jednotná teorie modelování ani jednotná terminologie.

Kašpar v [10] na str. 309 uvádí: „Jak vyplývá z historie modelování ve fyzice, představuje model jednak myšlenkově nebo i prakticky zhotovenou strukturu, zobrazující určitou část skutečnosti ve zjednodušené a názorné formě, jednak zobrazení určité oblasti jevů pomocí jiné oblasti, která je lépe prozkoumaná a lépe dostupná smyslovému vnímání nebo myšlení.

V prvním slova smyslu vystupuje model vždy jako určitá idealizace, zjednodušená skutečnost, přičemž se samotný ráz a stupeň zjednodušení může u daného modelu s časem měnit. I když se takový model opírá o fakta, pozorování, experimentální údaje, přece obsahuje i prvek fantazie, vědeckého předvídání.

Ve druhém případě splývá pojem modelu s pojmem fyzikální analogie, což znamená vztah shodnosti soustav tvořených elementy různé fyzikální podstaty, avšak se stejnou strukturou. Přitom není rozhodující, zda takové analogie existují reálně nebo jen v představách.“

2.2 Klasifikace modelů

Modely lze dělit podle různých kritérií: podle obsahu, cíle, prostředků, zaměření, materiálu nebo formy, vztahu mezi modelem a originálem. Dále je možné dělit modely podle časového průběhu na statické a dynamické, spojitě a nespojitě. Nelze opomenout ani rozdělení na jednoznačně determinující a pravděpodobnostní.

Základním rozdělením je tzv. Štoffova klasifikace podle [4]:

A. *modely materiální*

- a. prostorově podobné: makety, prostorové modely
- b. fyzicky podobné: modely mající mechanický, dynamický, kinematický aj. charakter fyzikální podobnosti s originálem
- c. matematicky podobné: analogové modely, strukturní modely, počítačové modely (číslicové i analogové)

B. *modely ideální*

1. obrazné (ikonické): idealizace, analogie, stálé modelové představy
2. smíšené (obrazně-znakové): náčrtky, schémata, grafy, mapy, strukturní vzorce
3. znakové (symbolické): určitým způsobem interpretované znakové systémy

Je třeba podotknout, že jednotlivé typy modelů se navzájem nevylučují. Zařazení se provádí podle hlavního znaku modelu, kterým je charakterizován především z praktického hlediska. Většina modelů nese znaky několika těchto skupin. U fyzicky podobných modelů obvykle existuje i prostorová, případně matematická podobnost. Dochází i k prolínání modelů materiálních a ideálních. Jakýkoli materiální model musí projít procesem zjednodušení a idealizace, aby se oprostil od vedlejších a nepodstatných znaků a naopak byly zdůrazněny podstatné znaky. Stejně tak ideální modely, které existují zpočátku pouze v myšlenkách vědce jsou postupně převedeny do nějaké materiální formy (náčrt, schéma, reálná konstrukce).

Z hlediska vztahu mezi modelem a originálem je možné modely roztrždit do skupin podle [4]:

1. **modifikující:** při zachování fyzikální podstaty se mění vzhledem k originálu měřítko, popřípadě z kvantitativního hlediska nepodstatné jednotlivosti. Výsledky experimentu jsou v širokém měřítku přenosné na originál.
2. **transformační:** děj z originálu se přenáší na v podstatě souhlasný fyzikální systém. Obecně nelze dělat přímé a úplné závěry o originálu, slouží ke zjednodušenému objasnění chování originálu.
3. **simulující (imitující):** originální děje napodobují pouze vnějškově, formálně. Činnost modelu se řídí vlastními zákonitostmi odlišnými od originálu, existuje např. pouze geometrickokinetická podobnost.
4. **ilustrující:** obrazně znázorňující originální děj. Jejich pracovní a ilustrující funkce spočívá v zákonech, které uživatel při jejich pozorování asociuje.
5. **formalizující:** popisují originální děje matematickými znakovými systémy.

I u tohoto dělení dochází k překrývání jednotlivých typů modelů. Počítačové modely popisované v této práci jsou především modely simulujícími, ilustrujícími a lze nalézt i znaky formalizující. Podle Štoffovy klasifikace nesou znaky modelů materiálních-matematických a ideálních-smíšených.

2.3 Modely ve vědě

Věda si neklade za úkol vytvářet modely, ale zkoumat objektivní skutečnost a vytvářet teorie, popisující tuto skutečnost co nejpřesněji. Model je ve vědeckém zkoumání pouze prostředek k dosažení poznání. Vytváří jakýsi most mezi skutečností a teorií. Materiální – geometricky podobné modely – zprostředkovávají pouze informace o vnějším vzhledu, uspořádání, činnosti zařízení a vztahu k okolí, proto mohou být důležité v didaktice. Pro vědeckou činnost jsou však tyto modely podřadné. Ve vědě hrají důležitou roli modely ideální.

Počátkem v hledání teorie je počáteční hypotéza, ta je pak potvrzena nebo vyvrácena experimentem. Zkoumaná oblast je však většinou příliš velká a složitá, aby se ji podařilo celou obsáhnout. Proto je třeba provést abstrakci (zdůraznění hlavních vlastností vzhledem k ostatním) a idealizaci (určité rysy považujeme za zcela dokonalé, nerušené jakýmkoli vlivy). Takto zjednodušený systém musí co nejpřesněji reprodukovat funkci systému původního. Často, vzhledem k obtížnému zkoumání originálního systému, přecházíme k systému, který je snadnější podrobit zkoumání. Model je tedy to, s čím operujeme místo obtížně zkoumatelné skutečnosti. Takto vytvořený model je podkladem pro vytvoření teorie. Často mezi experimentální skutečností a teorií postupně vzniká a zaniká celá řada modelů. Možný je i jiný postup, kdy je nejprve vytvořena teorie. Poté se hledá model, který by tuto teorii experimentálně prověřil.

Modely tak mohou dokázat výsledky, které jsou obsažené v pozorování, ale nejsou zřejmé. Mohou dát podnět k dalšímu bádání a objevu nových faktů. Deduktivními úvahami lze dojít za pomoci modelu k předpovědi pozdějších stavů. Jednou z nejdůležitějších vlastností modelu je jeho vysvětlující (explanační) funkce, jak ve vědecké oblasti, tak ve vyučovacím procesu. Třeba podotknout, že stejně jako je model důležitou a často nepostradatelnou pomůckou, může být špatný model značnou překážkou.

2.4 Ideální modely ve vyučování

(Zpracováno volně podle [4] str. 50-96)

Modely – idealizace

Fyzikální skutečnost je tak složitá, že je nemožné vyjádřit a sledovat vztahy mezi všemi parametry určitého fyzikálního systému. Proto je nutné zjednodušením, zobecněním, idealizací a abstrakcí přejít k takovému systému, který bude snadno pozorovatelný.

Podstatou abstrakce v nejširším smyslu je pozorování objektu pouze z jednoho hlediska při zanedbání všech jeho ostatních vlastností. Izolující abstrakce se provádí zdůrazněním nejdůležitějších rysů systému, které nás nejvíce zajímají. Ostatní rysy zanedbáme. Pokud potřebujeme znát určité rysy systému jako aspekty jednoho uceleného systému, provádíme ztotožňující abstrakci. Ta se provádí zdůrazněním jednoty rysů a shody struktury a zanedbáním vnějších odlišností. Realitu abstrahovanou od nepodstatných časových nebo prostorových změn, zachycuje stabilizující abstrakce, která zobrazuje skutečnost v zafixovaném stacionárním tvaru.

Jednou z podmínek pro generalizaci (možnost přejít od konkrétního k obecnému a rozšíření závěrů na celou třídu jevů) je idealizace. Spočívá v tom, že určité rysy objektu považujeme za zcela dokonalé, nerušené jakýmkoli vlivy. Teprve takto idealizovaný systém umožňuje zkoumání a získávání informací o originálu. Umožňuje jeho popsání a porozumění. Pokud praxe potvrdí oprávněnost a užitečnost takového systému, lze ho označit za fyzikální model.

Na těchto modelech byla založena celá klasická fyzika. Dlouho tyto idealizace nebyly chápány jako modely. Původně fyzici nerozlišovali mezi skutečností a jejím idealizovaným zobrazením. Dnes chápeme klasickou fyziku jako aproximativní systém, který v určité oblasti zobrazuje velmi věrně realitu.

Setkáváme se s idealizacemi jako je hmotný bod, ideálně tuhé těleso, ideální kapalina, absolutně černé těleso a další. Jedná se o modely, které jsou jakousi mezní hodnotou, jaká se v čisté podobě nikdy nevyskytuje. Dalším příkladem idealizace je linearizace fyzikálních systémů. Většina systémů má nelineární charakter. Práce s nimi je však náročná, proto se přistupuje k formulaci fyzikálních zákonů v lineárním přiblížení.

Idealizace fyzikální reality je nezbytným stupněm jak ve vědeckém zkoumání, tak ve vyučovacím procesu. Ve vyučování je často vědecká idealizace ještě zjednodušována, aby fyzikální vztahy a závislosti získaly jednoduchou a snadno pochopitelnou stavbu. Idealizace je tím větší, čím elementárnější je stupeň výuky.

Při používání idealizací by si měl žák jasně uvědomovat, kdy pracuje s modelem a kdy s fyzikální realitou, za jakých podmínek je model platný a kde jsou hranice jeho upotřebitelnosti. Uvažujeme-li například ideálně tuhé těleso, dopouštíme se značného zjednodušení reality. Přesto je řada závěrů v dobrém souladu se skutečností. Pokud ale dochází k takové deformaci tělesa, která ovlivňuje průběh sledovaných dějů, je tento model nepoužitelný.

Modely – analogie

Pojmem fyzikální analogie se označuje skupina modelů, lišících se svou fyzikální podstatou od modelovaného objektu. Označuje podobnost, shodu ve vlastnostech nebo postup, při kterém se uvádějí jevy do souvislosti. Vachek, Lepil v [4] na str. 55 uvádí: „Přesně tento pojem definoval Maxwell: Pod pojmem fyzikální analogie rozumím tu dílčí shodu mezi zákony libovolných oblastí vědy, díky již se jedna jeví jako ilustrace druhé. V tomto smyslu každé užití matematiky ve vědě je založeno na vzájemném vztahu zákonů, které platí pro fyzikální veličiny, a zákonů matematiky. Cílem exaktních věd je převést problémy přírodovědy na určení veličin pomocí početních operací. Přecházejíce od nejobecnější analogie k speciálním, nalézáme souhlas v matematickém tvaru jevů dvou různých oblastí přírody...“

Podle této definice nestačí pouze podobnost v chování, ale oba systémy musí být popsány matematickými vztahy téhož tvaru. Nemusí se jednat o reálně existující systémy, analogie lze vytvářet i mezi ideálními, abstraktními oblastmi, vytvořenými pouze myšlenkově. Také lze vytvářet analogie nejen mezi dvěma fyzikálními systémy, ale i v případě, že jeden je matematický. Pokud je matematický systém používán ke studiu fyzikálního systému, je jeho matematickým modelem. Slouží-li fyzikální systém k nalezení řešení matematického systému (hledání řešení soustavy diferenciálních rovnic), je naopak fyzikální systém modelem matematického.

Tyto modely mají jak ve vědě, tak ve vyučování důležité místo. Je však třeba podotknout, že analogie slouží pouze ke zjednodušení představ. Nemohou podávat vysvětlení a být zárukou takto vybudované teorie.

Setkáváme se také s analogiemi, které nelze v pravém slova smyslu nazvat modely. Využívá se podobnosti matematického popisu dvou fyzikálních oblastí, aby se žákům usnadnilo zapamatování a vybavování poznatků, zvláště vzorců a rovnic. Příkladem je analogie mezi translačním a rotačním pohybem v kinematice a dynamice. Žáci jsou s translačním pohybem seznamováni poměrně důkladně a většinu vztahů bezpečně zvládnou. Naproti tomu je problematika rotačního pohybu probírána často dosti povrchně. Zde nastupuje jako pomůcka analogie mezi vztahy v těchto dvou oblastech. Pokud si žák uvědomí, že hmotnosti a dráze při translačním pohybu odpovídá moment

setrvačnosti a úhel, je schopen vybavit si všechny potřebné vztahy. Tyto analogie mají pro žáky pouze formální ráz, umožňují lepší zapamatování jednotlivých vztahů. Je však možné i hlubší využití. Uvědomění si shodnosti struktury, umožní transfer vědomostí z obou oblastí. V tom případě se analogie stává modelem.

Modely-analogie mají ve vyučování důležitou roli. Nevhodně použité analogie však mohou u žáků vytvářet zkreslené nebo i chybné představy. Naprosto nevhodné je například tzv. polidšťování fyzikálních jevů (přirovnání elektrického proudu k proudu lidí).

Podmínky pro vhodné použití analogií ve vyučování by se daly shrnout do následujících bodů:

1. mezi oblastmi musí existovat fyzikální analogie,
2. srovnávaná oblast musí být žákům lépe známá, než oblast nově poznávaná,
3. musí podávat nové informace, objasňovat funkci, nebo vést k hlubšímu pochopení struktury srovnáním obou oblastí
4. nesmí vést k vytváření chybných představ (musí být ověřena praxí).

Grafické modely

Největší předností grafických modelů je jejich názornost, která je oceňována především ve vyučovacím procesu. Úkolem těchto modelů většinou není pouze zobrazení zjednodušené reality, ale objasňování podstaty zkoumaných jevů. Často jsou součástí obecnějších modelových konstrukcí. Mohou být pouze doplňkovou ilustrací, mnohdy však tvoří podstatnou část fyzikální teorie.

Grafické modely mohou znázorňovat málo známé nebo nedostupné oblasti pomocí objektů a jevů, které jsou známy lépe. Například znázornění vlnění pomocí sinusoidy, modelové konstrukce v geometrické optice, znázornění polí pomocí siločar, indukčních čar, proudnic, modely šíření vlnění podle Huygensova principu.

Další skupinou grafických modelů jsou náčrtky a schémata, znázorňující zjednodušeně a přehledně složitější zařízení tak, aby z nich byla lehce pochopitelná podstata funkce. Náčrty mají pro žáka dosti názorný charakter. Umožňuje mu pochopit určitou situaci a vztahy mezi jednotlivými prvky. Neodmyslitelně patří k řešení úloh, kde je většinou výchozím bodem. Může být i shrnutím celého výkladu. Patří sem i elektronická a bloková schémata a schémata náhradní.

Nedůležitější grafické modely jsou grafická znázornění fyzikálních závislostí, nejčastěji dvou fyzikálních veličin. Ačkoli postrádají tvarovou nebo fyzikální podobnost, mají pro žáka, který je k jejich užívání veden, výrazné rysy názornosti.

Neméně důležité je grafické znázorňování vektorových veličin pomocí orientovaných úseček, které umožňují znázorňování fyzikálních zákonitostí nezávisle na vztažné soustavě.

Používání grafických modelů sebou nese i některé nesnáze.

- Žák si může udělat zkreslenou představu o velikosti zobrazovaného předmětu.
- Rovnováha sil je doprovázena obrázkem dvou opačně orientovaných sil. Téměř vždy je však tento pojem spojen s vodorovným směrem. Tvoří se tak u žáků zkreslená představa, že podmínkou rovnováhy předmětu je jeho vodorovná poloha.
- Většina dějů má dynamický charakter. Jejich grafické znázornění však může vystihnout pouze okamžitý pohled, proto existuje nebezpečí vytvoření statických představ.
- Pochopení schématického obrazu závisí především na mentální úrovni žáka a jeho předchozí přípravě.

Znakové modely

Ve fyzice se používá spousta znaků. Některé jsou přejaty z matematiky (číslice, početní operace, rovnost...) a jiných vědních disciplín. Některé jsou specifické pouze pro fyziku. Jsou to především písmena pro označování veličin a jednotek. Z hlediska vyučování je vhodné neměnit označení veličin v průběhu školního kursu fyziky. To by vedlo narušování vytvořených spojení mezi znakem a jeho významem. Vzhledem k nedostatku písmen je nezbytné používání stejných znaků v různém významu. Při vyučování to však zpravidla nepředstavuje vážné obtíže, vzhledem k tomu, že se stejné znaky používají v různých oborech.

Zvláštním typem znakového modelu je matematický model. Matematická konstrukce se stává modelem, je-li experimentálně potvrzen souhlas závěrů této konstrukce s pozorovanými fakty. Matematické modely představují nejefektivnější zápis maxima informací a jejich studium přináší mnoho nového. Neumožňuje však rozvíjení tvůrčí fantazie, proto jsou hledány odpovídající fyzikální modely, i když jsou použitelné pouze v omezené oblasti. Pomocí matematického modelu jsou definovány nové veličiny, fyzikální zákony i systémy. Je však třeba klást důraz na to, aby žák porozuměl fyzikální podstatě modelovaných zákonitostí. Jinak se matematický model stává pouze návodem na vypočítání veličiny, bez porozumění obsahu. Opět zde existuje i nebezpečí ztotožňování modelu s realitou. Je třeba žákům ukázat, že ačkoli se jedná o vyjádření fyzikálních zákonů ve formě exaktních rovnic, má i tento model omezený obor platnosti.

Myšlenkový experiment

Jedná se o experimenty, probíhající pouze ve sféře myšlení s myšlenkovými objekty. Využívají různé modelové konstrukce, založené na idealizaci, abstrakci, analogii a podobnosti. V myšlenkovém experimentu lze rozeznat jednotlivé fáze:

1. Vytvoření ideálního modelu reálného objektu.
2. Stanovení ideálních podmínek, při kterých model pracuje, volba ideálních přístrojů.
3. Změna parametrů a sledování změn v činnosti modelu.

Při těchto experimentech se využívají platné fyzikální zákony. Jedná se tak o situace vědecky možné, ale v daných podmínkách nerealizovatelné. Můžeme například pracovat s prostředím bez mechanického tření, nebo s elektrickým systémem bez odporu. Stejně jako všechny metody modelování má i myšlenkový experiment svá omezení a nemůže plně nahradit reálný experiment. Proto je nutné ve vyučování vést žáky k tomu, že teprve skutečný experiment může s konečnou platností potvrdit závěry myšlenkového experimentu.

2.5 Vyučovací prostředky

(Zpracováno volně podle [4] str. 97-118)

Model, který je využíván při názorném vyučování, umožňující získání informací o fyzikálních objektech a jevech prostřednictvím smyslů, se stává vyučovacím prostředkem. Avšak vyučovacím prostředkem jsou všechny materiální objekty používané ve výuce, bez ohledu na jejich funkci. Proto se zavádí rozdělení učebních prostředků na:

- **učební pomůcky:** vyučovací prostředky, které jsou nosiči informací o předmětech a jevech
- **technické prostředky:** další nezbytné předměty a zařízení, umožňující využití pomůcek, nebo jsou pomocnými prostředky při experimentálním vyučování.

Klasifikaci vyučovacích prostředků vystihuje tabulka 1:

VYUČOVACÍ PROSTŘEDKY PRO FYZIKU	
UČEBNÍ POMŮCKY	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY
• PŘEDMĚTOVÉ (reálné) • OBRAZOVÉ (ikonické) • ZVUKOVÉ (fonické) • PÍSEMNÉ (literární)	• ZAŘÍZENÍ UČEBEN • STROJE A PŘÍSTROJE • NÁSTORJE A TECHNICKÉ POMŮCKY • MATERIÁL

Tabulka 1 Rozdělení vyučovacích prostředků [10]

Učební pomůcky předmětové

Tato skupina, která má ve fyzice klíčové postavení, se do značné míry překrývá se skupinou materiálních modelů (viz. 2.2). Patří sem všechny předměty a zařízení, jejichž pozorováním nebo manipulací získávají žáci fyzikální poznatky. Tyto pomůcky lze dále dělit podle[4]:

1. Přirozené objekty

- 1.1. Přírodniny
- 1.2. Technická zařízení a jejich konstrukční prvky
- 1.3. Didakticky upravené vzorky

2. Modely fyzikálních a technických objektů

- 2.1. Geometrické modely
- 2.2. Funkční modely
- 2.3. Realizované ideální modely

3. Pomůcky pro demonstrace jevů

- 3.1. Pro demonstraci jevů dostupných přímému smyslovému vnímání
- 3.2. Pro demonstraci jevů nedostupných přímému smyslovému vnímání
- 3.3. Pomůcky pro modelové pokusy

4. Pomůcky pro sledování fyzikálních veličin

- 4.1. Indikační pomůcky a přístroje
- 4.2. Měřicí pomůcky a přístroje
- 4.3. Pomůcky pro sledování funkčních závislostí fyzikálních veličin

Přirozené objekty nejsou modely v pravém slova smyslu. Nesou malé množství informace, většinou pouze o podstatných znacích objektu. Proto jsou z nich často vyrobeny didakticky upravené vzorky. Podstatné části jsou například barevně zvýrazněny, je proveden řez, apod.

Do druhé skupiny patří modely objektů, nevhodných pro přímé použití ve vyučování například díky svým rozměrům, nebo konstrukční složitosti.

Geometrické modely jsou většinou napodobeniny v odlišném měřítku, zachovávající podstatné znaky originálního objektu.

Funkční modely slouží k objasnění činnosti zařízení. Mají co nejjednodušší konstrukci, často jsou pro větší názornost rozebíratelné. Jedná se o modely modifikační, transformační a simulační (viz. 2.2).

Realizované ideální modely převážně zachycují smysly nepostižitelnou oblast. Například model krystalové mřížky, model sluneční soustavy, model polarizované elektromagnetické vlny. Často se blíží pomůckám pro demonstraci jevů.

Nejdůležitějšími pomůckami jsou pomůcky pro demonstraci jevů.

Pokud se jedná o jevy dostupné přímému smyslovému vnímání, jsou pomůcky upraveny tak, aby byla demonstrace názorná, a daný jev co nejvýrazněji.

Pro demonstraci jevů nedostupných přímému smyslovému vnímání slouží pomůcky nejrozličnějších typů. Mohou to být modifikační modely, jejichž činnost je odvozena přímo od originálního děje (mlžná komora). Transformační modely jsou založené na analogiích fyzikálních zákonitostí (elektrické kmity můžeme nahradit mechanickými). Simulační modely napodobují děje pouze vnějškově, ale řídí se jinými zákonitostmi (Machův vlnostroj).

Mezi modely pro demonstraci smyslově nedostupných jevů a pomůckami pro modelové pokusy není ostrá hranice. U těchto pomůcek je originální děj pouze modelovou představou (demonstrace dějů v mikrosvětě pomocí vzduchového stolu a zpětného projektoru).

Poslední skupinu tvoří přístroje pro sledování fyzikálních veličin. Tyto pomůcky mají velký význam při experimentech. Indikační pomůcky poskytují pouze základní informace o fyzikálních veličinách, nevyjadřují však jejich velikost (doutnavka, magnetka). Pro získávání kvantitativních informací o fyzikálních veličinách slouží měřicí přístroje (voltmetr). Mezi pomůcky pro sledování funkčních závislostí fyzikálních veličin patří například osciloskop, nebo různá zařízení komunikující s počítačem, jehož programové vybavení umožňuje zobrazení měřených veličin (ISES).

Učební pomůcky obrazové

Tyto pomůcky korespondují s ideálními ikonickými modely (viz. 2.2.2), avšak na rozdíl od nich jsou materiálního rázu. Dominuje u nich smyslové působení na zrak. Na rozdíl od předmětových pomůcek jsou však trvale spjaty s nějakým materiálním nosičem, který sám o sobě žádné informace neposkytuje.

Tuto skupinu lze dále dělit podle [4] na:

1. **fyzikální obrazy:** zobrazují skutečný předmět nebo jev, ať už věrně, zidealizovaně, nebo zjednodušeně. Patří sem i modely vytvořené v této práci
2. **schémata:** smluvené znaky, upravené k lepší přehlednosti a zdůraznění fyzikálního významu
3. **grafická znázornění:** vyjadřuje vztahy mezi veličinami (diagram, funkční závislosti, fázové diagramy)

Učební pomůcky zvukové

Jsou to nosiče informací ve formě zvukového záznamu. Mohou ilustrovat reálné zvuky. Případně mohou nést slovní popis reality.

Učební pomůcky písemné

Jsou to nosiče informací v podobě psaného nebo tištěného textu. Patří sem i znakové modely, popisující realitu matematickým modelem.

V novější literatuře [1] se dále objevují:

Dotykové pomůcky (reliéfové obrazy, slepecké písmo)

Speciální programy pro počítače

Již od dob operačního systému DOS lze vizualizovat nejrozličnější fyzikální děje. Velmi populárním nástrojem byl ve své době systém Famulus. Jeho výhodou je jednoduché programování, poměrně slušná numerická knihovna a dosti bohaté grafické prostředky pro dvou i třírozměrné zobrazování.

Rychlost počítačů a bohatý výběr grafických nástrojů dnes nabízí téměř neomezené možnosti modelování. Animace lze vytvářet pomocí některého obecného programovacího jazyka (Delphi), nebo použít prostředí určené speciálně k účelům animací (Java, Flash), ty mají další výhodu – možnost přímého umístění na internetových stránkách. Velký přínos pro vyučování spočívá v možnosti jejich využití v kombinaci s interaktivní tabulí. K modelování fyzikálních dějů lze použít i některý z matematických programů (Mathematika).

Výuku lze zefektivnit také využitím počítače k měření, záznamu a zpracování fyzikálních veličin. Připojení měřících přístrojů je obvykle řešeno prostřednictvím sériového (COM, USB) nebo paralelního (LPT) portu, nebo formou přídatné PC karty (ISA, PCI, ...).

2.6 Modely a pomůcky používané ve výuce elektroniky

Schémat elektronických obvodů

Je to nejpoužívanější model používaný v elektronice. Není pouze prostředkem k pochopení funkce reálných obvodů, jeho ovládnutí je samo o sobě i cílem výuky. Žák s elektrotechnickým vzděláním musí umět schéma navrhnout a realizovat a naopak i reálný obvod překreslit do schématické podoby. Pro žáky systematicky vedené k jejich používání se tyto modely stávají dostatečně názornými. Nevýhodou je pouze jejich staticnost. Při vysvětlování funkce obvodu je nutné rozkreslit měnící se veličiny do několika nákrešů, nebo doplnit grafy časových průběhů, které pro netrénované žáky mohou znamenat obtíže.

Vodní analogie elektrického obvodu

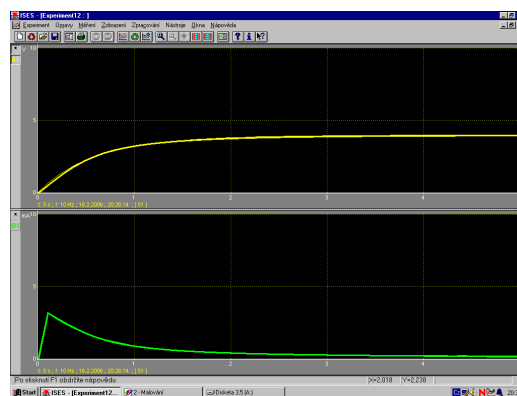
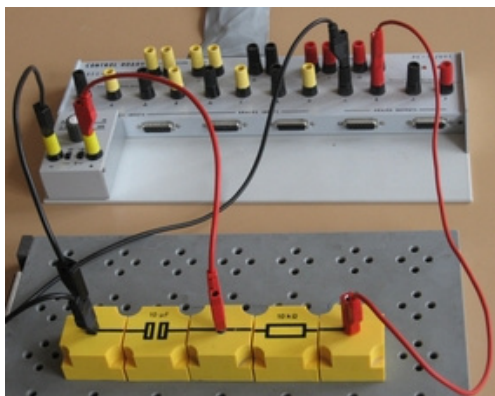
Je určena spíše pro utvoření základních představ (na základních školách) o elektrickém obvodu na základě analogií: elektrický proud – proud vody, napětí – rozdíl hladin (čerpadlo), odpor vodiče – délka a průměr hadičky, spotřebič (motor) – vodní mlýnek, atd. umožňuje i konstrukci složitějších součástek: dioda – klapka, propouštějící vodu pouze jedním směrem. Tato analogie je velmi názorná, nese však s sebou i některá zkreslení: Aby elektrickým obvodem protékal proud, musí být uzavřený, což z vodní analogie nemusí být zcela zřejmé. Není možné odvodit ohmův zákon, protože množství vody vytékající z nádoby (analogie elektrického proudu) otvorem, není přímo úměrné výšce hladiny nad otvorem (elektrické napětí), ale jeho odmocnině. Vodní analogie proto nesplňuje všechny požadavky na model.

Elektronické stavebnice

Velmi přínosný model, ať už se jedná o vertikální tabuli pro demonstrační účely učitele, nebo menší horizontální pro frontální výuku. Spojuje vlastnosti reálného obvodu se schématickým nákresem. Je vhodným mezistupněm k realizaci skutečného obvodu.

Měřicí programy typu ISES

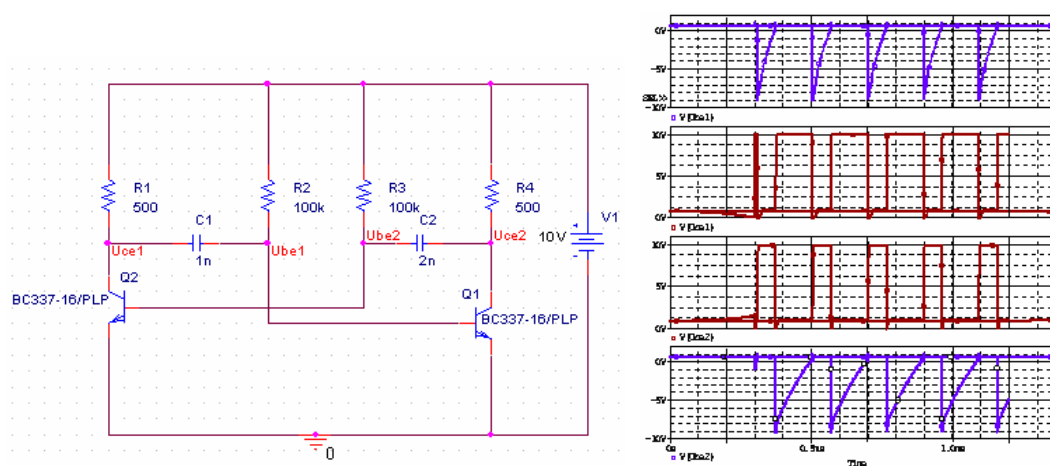
Toto vybavení má oproti klasickým měřícím přístrojům výhodu, spočívající v záznamu průběhů veličin jak časových, tak v závislosti na sobě. Je možné zaznamenat i velmi rychlé děje. Limitním parametrem je při tom kombinace vzorkování s rychlostí procesoru, což je omezující pouze u starších počítačů. Vhodné je použití tohoto vybavení v kombinaci s elektronickými stavebnicemi (obr. 1.1).



Obr. 1.1 ISES připojený na elektronickou stavebnici

Simulační programy typu ORCAD

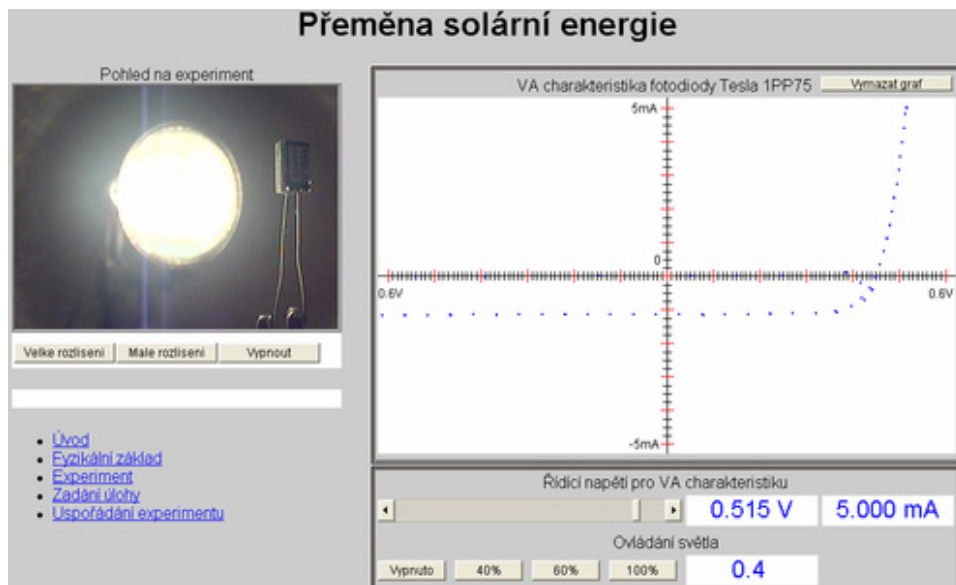
Tyto programy mají obrovské možnosti využití, ať už se jedná o volně stažitelnou demoverzi, výukový program, nebo profesionální software pro navrhování obvodů a plošných spojů. Výhodou je aktualizovatelná databáze součástek. Lze tak sestavit obvod se součástkami libovolných parametrů, dokonce od konkrétních výrobců. Po spuštění simulace jsou vykresleny průběhy libovolných veličin v libovolných částech obvodu, u lepších programů i libovolný počet veličin. Jediným předpokladem je ovládání schématického modelu. Výhodou je možnost nasimulování i velmi složitých obvodů, nevýhodou časová náročnost. Na obr. 1.2 je znázorněn astabilní obvod sestavený v programu ORCAD s vykreslenými průběhy napětí v důležitých místech.



Obr. 1.2 ORCAD – simulace astabilního obvodu

Virtuální laboratoře

Jedná se o interaktivní internetové simulace jevů z nejrůznějších oblastí. Většinou obsahují ovládací prvky vstupních veličin, grafy výstupních veličin a video s reálnou situací. Výstupy a video se mění podle aktuálně nastavených vstupů. Na obr. 1.3 je zobrazena fotodioda ve virtuální laboratoři. Lze měnit osvětlení a napětí, do grafu je zaznamenáván proud.



Obr. 1.3 Fotodioda ve virtuální laboratoři [24]

Virtuální laboratoře jsou k nalezení např. na:

<http://remote1.kev.zcu.cz/>

<http://www.ises.info/index.php/en/ises>

<http://www.ni.com/webappdemos/tempcontroldemo.htm>

<http://remote1.kev.zcu.cz/ro/robo.htm>

http://kdt-4.karlov.mff.cuni.cz/vacharakteristika_2.html

<http://kdt-17.karlov.mff.cuni.cz/pruzina.html>

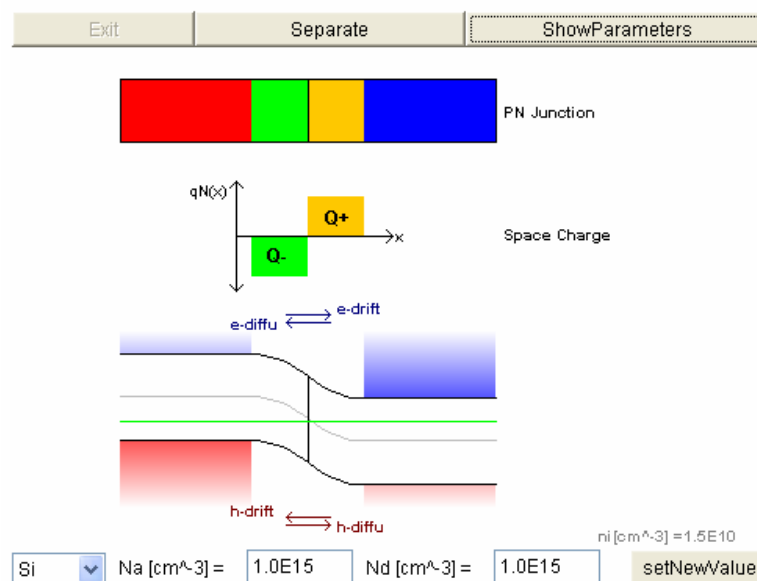
<http://kdt-20.karlov.mff.cuni.cz/>

Počítačové animace

Patří sem nejrozumnější aplety umístěné na internetu. Stejně jako u ostatních věcí stahovaných z internetu musíme uvážit věrohodnost a vhodnost obsahu. Na obr. 1.4 je znázorněno pásové schéma P-N přechodu s přiloženým napětím v propustném směru.

Tuto a další animace týkající se elektroniky lze nalézt např. na:

<http://jas.eng.buffalo.edu/>



Obr. 1.4 Pásové schéma P-N přechodu [27]

2.7 Pedagogicko-psychologický význam modelů v kognitivních procesech

Modely používané ve vyučování musí kromě obecných podmínek fyzikálního modelu splňovat další výchovné podmínky a didaktické zásady. Didaktické zásady jsou chápány jako systém nejobecnějších pedagogických principů, který má být respektován, aby byl pedagogický proces účinný. Zde je uvedena nejčastěji používaná tradiční soustava didaktických zásad podle [9].

1. Zásada komplexního rozvoje osobnosti žáka

Podstata učitelovy práce je vždy komplexní, měl by si uvědomit, jaké možnosti dává učivo pro rozvoj žákovy osobnosti v oblasti kognitivní, psychomotorické a afektivní. Tato zásada se týká spíše učitelova přístupu k žákům, než volby vhodných modelů ve vyučování.

2. Zásada vědeckosti

Učivo tvořící obsah školního vyučování musí odpovídat úrovni současné vědy. Očekává, že si učitel celoživotně doplňuje znalosti a aktualizuje zastarávající poznatky. Většina modelů používaných ve vyučování fyzice splňují tuto zásadu vzhledem k jejich přebírání z vědeckých oblastí. Jsou pak dále zjednodušovány, aby fyzikální vztahy a závislosti získaly jednoduchou a snadno pochopitelnou stavbu.

3. Zásada individuálního přístupu k žákům

Učitel by měl dobře rozpoznat individuální zvláštnosti svých žáků a řídit jejich učení tak, aby každý žák měl možnost uspět v učební činnosti. To vyžaduje, aby si učitel byl vědom rozdílů mezi žáky, například v jejich zdravotním stavu, v úrovni myšlení a chápání, v úrovni emocionální, v zájmech, postojích a v rodinném prostředí. Tato zásada nemá prakticky žádný vliv na výběr modelů.

4. Zásada spojení teorie s praxí

Předpokladem úspěšné pedagogické práce je, aby teoretické vědomosti žáků byly propojeny s jejich praktickou činností. V elektronice lze tuto zásadu bez problémů naplnit například použitím elektronických stavebnic. Žák má možnost sestavit fungující, reálný elektronický obvod, na kterém je kromě jeho činnosti zřejmá i souvislost se schématickým znázorněním.

5. Zásada uvědomělosti a aktivity

Od učitele se vyžaduje správně formulovat cíle a organizovat vyučování tak, aby uspokojovalo psychické potřeby žáků, tj. potřebu úspěchu, poznání, uznání atd. Žáci se tak z vlastní vnitřní potřeby aktivně účastní výuky. Použití modelu jako motivačního prostředku je níže věnován samostatný odstavec.

6. Zásada názornosti

Poznané je to, co prošlo žákovými smysly. Učitel používá srozumitelné příklady a takové pojmy, kterým žáci rozumějí. Problematika názornosti je opět rozvedena níže.

7. Zásada soustavnosti a přiměřenosti

Učivo musí být uspořádáno tak, aby bylo přístupné žákům, aby poznatky tvořily posloupnost a jeden poznatek logicky vyplýval z druhého. Tato zásada je do značné míry obsažena a rozebrána ve všech následujících odstavcích.

Ve vyučování fyziky mají modely nezastupitelné místo. Jejich hlavní význam v procesu učení lze shrnout do následujících bodů:

Modely ve struktuře učiva

Z každého systému lze vybrat obecné prvky a vztahy, které tvoří jeho strukturu – jsou pro daný systém určující. Vyučování jednotlivým poznatkům a dovednostem bez ujasnění jejich místa ve struktuře předmětu je neefektivní. Pokud zůstane některý fakt izolovaný, bez zařazení do struktury učiva, je rychle zapomínán. Není důležité učení podrobností, ale učení základních principů. Tyto základní a obecné principy, které zůstanou v paměti, napomáhají k rychlému obnovení detailů. Proto je pro žáky důležité pochopení struktury vyučovacího předmětu, což znamená umět do tohoto systému zařadit jednotlivá fakta a chápat i provázanost s jinými předměty.

Tato obecná tvrzení platí i pro vyučování fyziky. Strukturu tohoto předmětu tvoří obecné fyzikální principy, fyzikální zákony, fyzikální veličiny a jednotky, základní experimenty, hlavní metody měření, způsoby aplikace poznatků v praxi. Především jsou to však fyzikální teorie. A zde hrají hlavní roli fyzikální modely, jakožto prostředek přechodu od reality k fyzikálním teoriím, jak v oblasti vědecké, tak ve vyučovacím procesu. Lze tedy říci, že modely tvoří důležitou součást struktury fyzikálního učiva.

Explanační modely ve vyučování

Objasňování fyzikálních jevů je jedním ze základních úkolů fyziky. Především se jedná o deduktivně-kauzální explanaci. Spočívá v hledání hypotéz, modelů a zákonů k vysvětlení fyzikálních jevů. Explanace ve vyučování se od vědecké liší v tom, že dochází k objasňování vědou již vysvětlených jevů. Ve fyzice měly vždy důležité místo vysvětlující modely. Taktéž mají nezastupitelnou funkci i ve vyučování. Jsou jednak přebírány z fyziky jako vědy (většinou s podstatným zjednodušením), jednak jsou vytvářeny z čistě didaktických potřeb. Modely musí vykazovat variabilitu, aby mohly být použity v různých stupních vývoje žáka. Cílem vyučovacího procesu je porozumění žáka učivu. To znamená postřehnutí nejjednodušší struktury, která je základem pro celou třídu jevů. V důsledku nevhodného vyučování a povrchní interpretace fyzikálních poznatků se u mnoha lidí vytváří přesvědčení, že fyzika přesně vystihuje skutečnost, což vede ke ztotožnění fyzikální reality a jejího modelu. Fyzikální modely mají zpravidla jednodušší strukturu než realita, která je ovlivněna spoustou podružných faktů. Porozumění neznamená znalost modelu, ale schopnost uvést do vztahu model s realitou a na základě znalosti modelu umět předvídat i následující průběh dějů. Velký význam pro porozumění má aplikace stejného typu modelu v nových situacích. Například model gravitačního pole lze později použít i na pole elektrostatické a magnetostatické. Takové podání učiva usnadňuje chápání a vytváří u žáka sjednocující pohled na celou fyziku.

Při užívání zvláště symbolických a znakových modelů existuje nebezpečí, že si žák osvojí učivo pouze mechanicky bez porozumění podstaty. Namísto modelu systému potom žák vidí pouze vztahy pro výpočet veličin. Proto se učitel nesmí spokojit pouze s verbální reprodukcí, ale musí žádat správnou fyzikální interpretaci a využití pro konkrétní případy.

Modely a názornost učiva

Názorností rozumíme vytváření kontaktů mezi žákem a poznávaným objektem z hlediska smyslového chápání skutečnosti. Je významná především v učivu, které je pro žáka značně abstraktní. Smyslem je vytváření jasných představ. Nejčastěji chápeme názornost jako obvyklost. Jevy, které lze zařadit do systému smyslově dostupných jevů, s kterými se žák opakovaně setkává v životě nebo ve vyučování, mu připadají pochopitelnější a přirozenější než představy, které do tohoto obvyklého světa zařadit nelze.

V případech, kdy objekt nebo jev není přímo dostupný lidskému vnímání hrají důležitou roli modely (model krystalové mřížky). Srovnáním skutečnosti s modelem a uvědoměním si odlišností modelu a reality se stává objekt názorným. Takovýto způsob názornosti je možný používat až zhruba od 12 let věku, neboť předpokladem je dosažení určitého stupně chápání, kdy je žák schopen provádět formální operace. Je však třeba zdůrazňovat omezenost shody a zabráňovat ztotožňování modelu a reality.

Pokud jsou žáci cvičeni k abstraktnímu uvažování, je možné za názorné považovat i děje, které nejsou vztahovány na proces bezprostředního vnímání. Jsou to takzvané myšlenkové pokusy, kdy se i představy různých dějů vnímají jako názorné.

Jako názorné mohou být považovány i obrazně znakové modely, jako schémata a grafy. Žák, který je veden k používání elektronických schémat, je schopný promýšlet jeho funkci a kdykoli schéma realizovat ve formě reálného zapojení. Stejně tak je to i s grafickým znázorněním fyzikálních dějů. Pokud je žák k takovému přístupu veden, bez problémů se v grafech orientuje a dokáže je používat při řešení různých úloh.

Z prvotní názornosti je pak možné v další výuce přejít k modelům znakovým (matematickým), které jsou schopné nejlépe popsat danou oblast.

Modely a zapamatování učiva

Zapamatování učiva znamená jeho uložení do dlouhodobé paměti. Aby proces zapamatování byl efektivní a dlouhodobý musí být učivo strukturované. Základem trvalých vědomostí není množství izolovaných faktů, ale jejich vzájemná provázanost, jak uvnitř oboru fyziky, tak ve vztahu k ostatním předmětům. Jsou to především ideální modely, které umožňují organizaci učiva a nesou největší množství informací. Také modely-analogie mají velký význam hlavně pro uvědomění si souvislostí a rozdílů (stacionární pole, mechanické a elektrické jevy). Modely mají význam i pro transfer vědomostí. Pokud umí žák řešit úkoly pomocí určitého modelu, je schopen řešit i úkoly podobné. Pokud pozná, že se daný model dá použít i v jiné oblasti, je schopen řešit problémy zcela nové, dokonce i v jiných vědních oborech.

Modely jako motivační prostředek

Motivace je jedním z nejdůležitějších předpokladů úspěšného učení. Pro učitele je mnohdy největším úkolem přimět studenty, aby se učit chtěli.

Dlouhodobé motivační faktory jsou typu:

- Věci, které se učím, se mi hodí
- Kvalifikace, kterou studiem získám, se mi hodí

Většina faktorů však působí pouze krátkodobě. Dají se rozdělit do několika skupin:

- Dobré výsledky mi zvyšují sebevědomí
- Dobré výsledky vyvolají příznivý ohlas učitele nebo mých spolužáků
- Špatné výsledky budou mít nepříjemné důsledky
- Věci, které se učím, jsou zajímavé a vzbuzují moji zvědavost
- Zjišťuji, že vyučování je zajímavé

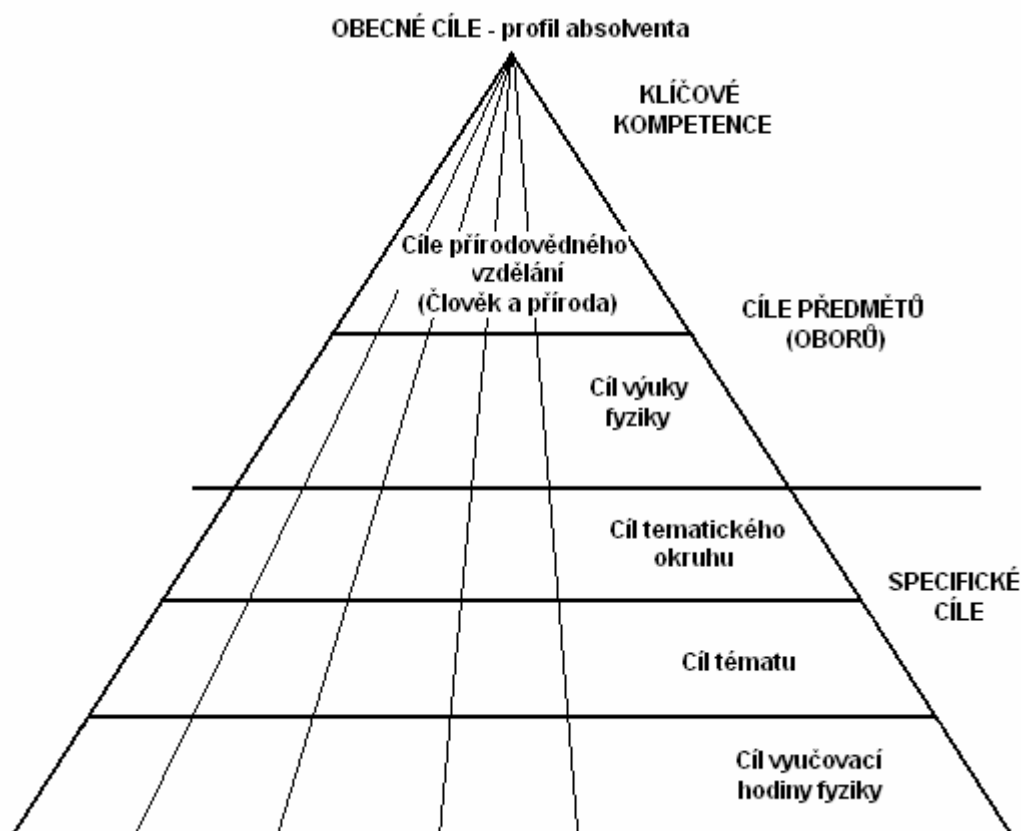
Většina modelů ve vyučování fyziky působí jako motivační faktor nepřímo. Jsou to například ideální modely, které mají zjednodušující charakter často velmi složité fyzikální skutečnosti, za účelem vytvoření ucelené teorie, vhodné pro vyučování. Vzniká tak například mechanický systém bez tření a odporu vzduchu nebo dokonale stlačitelný ideální plyn. Takto vytvořené modely mají explanační funkci, student se lépe orientuje ve struktuře učiva, což vede k lepšímu zapamatování učiva, jak již bylo popsáno v předchozích bodech. Tyto vlastnosti jsou spolu se správně formulovanými

přiměřenými cíli nutným předpokladem k dobrým učebním výsledkům, které jsou velmi silným motivačním faktorem.

Některé modely působí motivačně bezprostředně. Jsou to především učební pomůcky (modely, umožňující získání informací prostřednictvím smyslů). Jejich použitím ve výuce lze vzbudit zvědavost a zájem studentů, kteří jsou poté ochotni se problematikou zabývat podrobněji. Nový rozměr získává motivace použitím počítačových animací a simulací fyzikálních dějů. Studenty dokáže aktivovat již samotné využití výpočetní techniky, obzvlášť pokud se jedná o interaktivní programy, kde se mohou aktivně podílet na průběhu simulovaných dějů.

2.7 Cíle práce

Programy s metodickými návody a vzorovými výklady, které jsou obsahem této práce jsou koncipovány tak, aby mohly být nápomocny plnění cílů výuky. Stanovení cílů má zásadní význam na efektivitu vyučovacího a výchovného procesu, práci učitele a celé školy. Problematika výukových cílů jakožto nejdůležitějších elementů vzdělávacího procesu je detailně rozpracována v Rámcovém vzdělávacím programu. Cíle jsou zde hierarchicky tříděny podle jejich obecnosti od nejobecnějších cílů mířících k zapojení studenta do společnosti a sociálnímu smýšlení až k cílům vyučovací hodiny. Naplňování cílů vede u studentů k rozvíjení tzv. kompetencí. Tuto strukturu lze vyjádřit pomocí pyramidy (obr. 1.5), v jejíž vrcholu se nacházejí společné, obecné cíle, směrem dolů se pyramida rozvětňuje podle oborů a dále podle předmětů až k cílům jednotlivých vyučovacích hodin.



Obr. 1.5 Struktura výukových cílů [1]

Cíle výuky fyziky včetně cílů specifických lze dělit na:

- a) **poznávací (kognitivní) cíle**
- b) **činnostní (operační) cíle**
- c) **hodnotové cíle**

Každou z těchto skupin lze dále hierarchicky rozvrstvit podle úrovně náročnosti. Přičemž pro každou skupinu cílů existují aktivní slovesa, kterých se užívá k jejich formulaci. Pro naše potřeby není nutné uvádět rozdělení všech skupin. Uvádím zde pouze Bloomovu taxonomii poznávacích cílů podle [1]:

- A) **Znalost**, aktivní slovesa: *pojmenovat, definovat, přiřadit, reprodukovat...*
- B) **Porozumění**, aktivní slovesa: *jinak formulovat, vysvětlit, vypočítat, odvodit...*
- C) **Aplikace**, aktivní slovesa: *aplikovat, demonstrovat, diskutovat, použít...*
- D) **Analýza**, aktivní slovesa: *rozčlenit, specifikovat, analyzovat, navrhnout...*
- E) **Syntéza**, aktivní slovesa: *kombinovat, modifikovat, shrnout, zdůvodnit...*
- F) **Hodnotící posouzení**, aktivní slovesa: *argumentovat, diskutovat, oponovat...*

Modely, jež jsou náplní této práce jsou schopny zasahovat pouze do nižších pater pyramidy – do cílů specifických. Konkrétně do poznávacích cílů na úrovni porozumění, popřípadě aplikace. Mohou být nápomocny i při naplňování činnostních cílů jako pomůcka při zapojování reálného obvodu nebo připojení měřících přístrojů.

E. Svoboda v [1] na str. uvádí: „Aby byl vyučovací proces efektivní, musí být specifické cíle vymezeny jako konkrétní požadavky na kompetence žáků, na požadovaný výkon žáků, na jejich pozorovatelnou a kontrolovatelnou činnost.“ Jaké cíle budou naplňovány z hlediska žáků je plně v kompetenci učitele. U každé skupiny programů je zařazen odstavec **Didaktický cíl**. Zde jsou popsány cíle z hlediska modelů: co musí být zobrazeno, jaké děje mají být v jednotlivých fázích znázorněny a jaké zanedbány. Z těchto požadavků na model může učitel vyjít při stanovování výukových cílů.

Prvním cílem práce je tedy vytvoření modelů s metodickými návody sloužících k názornému, interaktivnímu vyučování, mající kromě explanační funkce i funkci motivační.

Druhým cílem je zpracování umožňující použití vytvořených programů jako vzorových příkladů pro tvorbu dalších animací. Proto je u každého modelu zařazena podkapitola **Realizace**, obsahující části zdrojového kódu s vysvětlením funkce. Případní zájemci mohou na přiloženém CD najít i kompletní programy použitelné k tomuto účelu.

2.8 Tvorba animací

Nejčastěji používaným a mnohdy i jediným modelem v elektronice jsou schématické nákresy obvodů, jejichž ovládnutí je klíčové k elektrotechnickému vzdělání. Často je schéma obvodu tak složité, že se v něm žák ztrácí. Zejména jedná-li se o obvody obsahující zpětnou vazbu. Pro větší názornost je vhodné zakreslení veličin přímo do obvodu, což vede díky jeho dynamičnosti k několika nákresům. Tento problém lze vyřešit za pomoci počítačových animací. Důležité veličiny jsou v obvodu názorně zobrazeny a plynule se mění s časem.

Pro tvorbu animací by měly být vybrány složitější obvody (nemá smysl animovat obvod typu zdroj-žárovka). Vhodné jsou obvody, v nichž dochází k časovým změnám zobrazovaných veličin. Pokud je obvod statický, je vhodné ho doplnit ovládacími prvky pro změnu parametrů, popřípadě zobrazovat výpočty veličin. Ale nejen elektronické

obvody jsou vhodné pro animování. Aby byl zřejmý rozsah použitelnosti počítačových animací, byly v této práci zvoleny tři skupiny modelů z různých oblastí elektroniky:

1) Jevy v polovodičích, 2) Unipolární tranzistory, 3) Klopné obvody.

Při tvorbě modelu musí vždy dojít k idealizaci skutečné situace. Vždy je nutné stanovit, které znaky jsou důležité a které lze pro lepší přehlednost zanedbat. Důležité veličiny (jevy, nositelé náboje...) pak co nejnázorněji zobrazit. Proudů lze v obvodech znázornit pohybujícími se čárkovanými čarami, je tak vidět i směr proudu, tloušťkou čáry je přibližně zachycena jeho velikost. V místech, kde je třeba znát přesnější hodnotu je nakreslen ampérmetr s pohyblivou ručkou. Stejným způsobem jsou orientačně znázorněna i napětí. V některých případech je vhodné zakreslovat veličiny do grafů, aby byly zaznamenány jejich (časové) průběhy. Napětí na kondenzátoru lze zachytit ještě názorněji – růstem a poklesem barevného sloupce mezi elektrodami. V modelech jevů v polovodičích a unipolárních tranzistorů je procházející proud znázorněn přímo pohybujícími se nositeli náboje. Je nutné si uvědomit, že při konstrukci jakýchkoliv modelů dochází k většímu či menšímu zkreslení reality. Například v modelech jevů v polovodičích je počet minoritních nositelů (pokud jsou zobrazeni) asi čtyřikrát menší než nositelů majoritních. Ve skutečnosti je však majoritních nositelů zhruba 10^9 krát více než minoritních, což je vysoko nad rámcem našich možností zobrazení. Ať už je zkreslení jakékoliv, je vždy nutné na tyto odchylky upozornit. V první řadě je však nutné zdůraznit, že se jedná pouze o model, který nelze přesně ztotožňovat se skutečností.

Důležitý je i výběr vhodných barev. Program by měl na uživatele působit přátelsky. Měli bychom se vyvarovat křiklavých barev a divokých barevných kombinací. Vhodné je použití světlejších, neutrálních odstínů na nichž pak vyniknou důležité znaky. Ty pak stačí zvýraznit sytější odstínem, vyvarujeme se tak rušivých křiklavých barev. Jako podklad ve všech modelech je zvolena bílá plocha se základní černou kresbou. Na tomto podkladu lze s dostatečným kontrastem použít jakékoliv barvy. Dokonce můžeme použít různé odstíny jedné barvy na odstupňování různě důležitých znaků. Tyto barvy navíc korespondují se schématem nakresleným v sešitě (učebnici), takže se vyvarujeme dojmu vytrženosti animace z kontextu probírané látky. Proudů jsou v obvodech rozlišeny červenou (kolektorové proudy) a modrou barvou (bázové proudy) z kvalitativních i kvantitativních důvodů. Červená barva působí na lidskou mysl jako důležitější. Bázové proudy mají jednak funkci řídicí, zatímco kolektorové proudy udávají hodnotu napětí na výstupu. Jednak jsou kolektorové proudy řádově stokrát větší než proudy bázové, což je v měřítkách modelu pomocí šířky čáry nezachytitelné, navíc je tak obvod rozčleněn na více částí, což usnadňuje pochopení a zapamatování. U modelů unipolárních tranzistorů si s černobílým pozadím nevystačíme. Zde je nutné dostatečně barevně odlišit polovodič typu N a P. Voleny jsou takové barvy, aby byla na první pohled zřejmá rozdílnost jednotlivých oblastí s ohledem na dostatečnou viditelnost červených teček – elektronů. Pro ovládací panel je zvolena světle modrá barva, aby nebyla v rozporu s hlavní lištou a orámováním okna. Podobné barvy je použito na panelech nástrojů v aplikacích Microsoft Office, čímž by se mělo docílit, že na uživatele nebude program působit příliš cizí.

Při výběru vývojového prostředí jsem se rozhodl mezi prostředím Java a Codegear Delphi. Java applety mají nespornou výhodu v možnosti přímého umístění na internetových stránkách, kde jsou samy spuštěny při jejich otevření. Nutnou a postačující podmínkou je v tomto případě nainstalování Java Runtime Environment. Tato aplikace již bývá standardně nainstalovaná. Další výhodou je multiplatformnost

Javy (aplety jsou spustitelné v jakémkoliv operačním systému). Komplikace nastává v okamžiku, kdy by učitel neměl k dispozici připojení na internet. Pro tento případ by musela být vytvořena offline verze internetových stránek, nebo další soubory pro samostatné spuštění. Další otázkou je přístupnost animací široké veřejnosti. Programy jsou vytvořeny jako pomůcka učitele při vyučování. Obávám se, že bez učitelova výkladu ve většině případů nelze problematiku dostatečně pochopit. Pro náhodné internetové kolemjdoucí by byly animace zcela bezcenné. Nakonec bylo zvoleno vývojové prostředí Codeger Delphi (dříve Borland Delphi), vycházející z jazyka Pascal, v minulosti populárního pro jeho snadné osvojení a poměrně velkou svobodu ve vyjadřování. Výhodou je výsledný program s příponou .exe, spustitelný bez nutnosti dalšího programového vybavení. To ocení učitelé, kteří nemají k dispozici připojení na internet. Pro případné zájemce není problém umístění programů na internet. Nevýhodou je pouze nutnost stažení souboru před jeho spuštěním.

3 Popis vytvořených modelů

3.1 Jevy v polovodičích

Didaktický cíl:

Hlavním cílem této skupiny modelů je znázornění energetických hladin ve struktuře polovodič typu P-polovodič typu N, případně kov-polovodič na základě pásové teorie. Dále pak změny tvaru hladin v závislosti na vnějším napětí a animace pohybu elektronů a děr.

Modely *Polovodič-kov* a *P-N přechod* jsou konstruovány tak, aby vysvětlovaly vznik rovnovážného stavu na těchto rozhraních. To je realizováno nejběžnějším způsobem – spojením dvou původně oddělených částí. V žádném případě však toto zjednodušení nesmí vést ke zkreslení představ. Je třeba zdůraznit nutnost vytvoření oblastí s různým typem vodivosti v jediném monokrystalu. Po spojení musí být znázorněna difúze nositelů náboje, s tím související vznik difúzního napětí, zakřivení energetických hladin a vznik hradlové vrstvy.

Při změně vnějšího napětí musí docházet ke změnám šířky hradlové vrstvy v závislosti na energetické bariéře. Po vyrovnání hladin prochází přes rozhraní proud, znázorněný pohybem elektronů a děr. Z modelu je vidět jejich rekombinace. Zvýšením napětí v propustném směru, dochází k nárůstu proudu – rychlejšímu pohybu nositelů. Toto znázornění je pouze ilustrativní, proto je přiložena voltampérová (V-A) charakteristika, zachycující i téměř zanedbatelný proud v závěrném směru, tvořený minoritními nositeli (ti nejsou v pásovém diagramu zakresleni).

Model dále může sloužit k utvoření představy o koncentraci elektronů a děr (minoritních je o několik řádů méně), především v blízkosti rozhraní v závislosti na napětí. Je zde nastíněno i použití těchto striktur v usměrňovacích, případně Schottkyho diodách.

Modely zbylých jevů již vycházejí z rovnovážného stavu na P-N přechodu (k demonstraci vzniku rovnovážného stavu lze použít již zmíněný model: *P-N přechod*). Animace musí opět vykreslovat tvary energetických hladin a pohyb nositelů náboje. U příliš rychlých dějů je možné zobrazit zpomalený detail. Programy opět nabízí zjednodušenou ukázkou použití zobrazovaných jevů v konkrétních elektronických součástkách, nechybí ani V-A charakteristiky.

Model tranzistorového jevu se díky příliš širokým možnostem využití omezuje pouze na vysvětlení jevu samotného. Animace vychází ze dvou rovnovážných P-N přechodů, pro jejichž demonstraci lze opět použít model: *P-N přechod*.

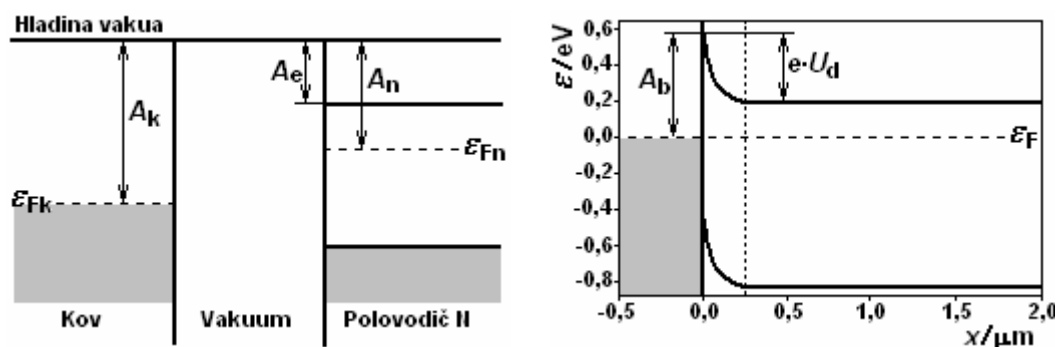
3.1.1 Rozhraní polovodič-kov

Teorie:

Spojením polovodiče a kovu může, za určitých podmínek, vzniknout rozhraní s usměrňujícími účinky. Při použití polovodiče typu N, je nutné volit takové materiály, aby výstupní práce elektronů z polovodiče byla menší než výstupní práce z kovu. Pokud je použit polovodič typu P, výstupní práce elektronů z polovodiče musí být větší než výstupní práce z kovu. Popis vlastností tohoto rozhraní se provádí na představě ideálního spojení původně oddělených částí: kov, polovodič.

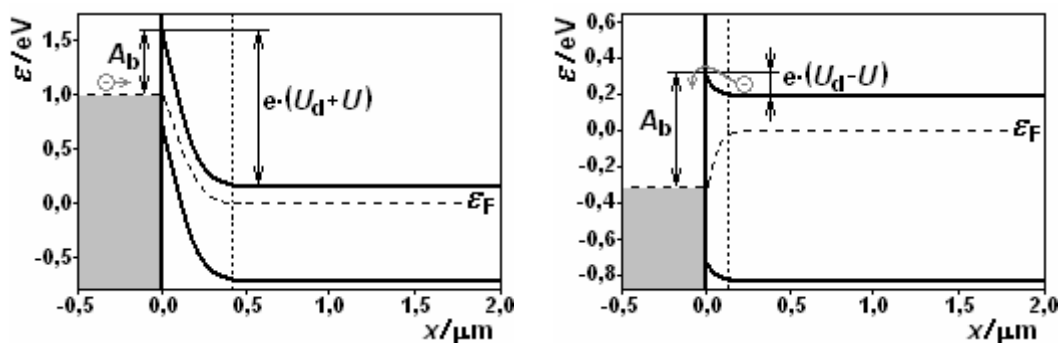
Polovodič N-kov:

Na obr. 2.1 vlevo jsou znázorněna pásová schémata oddělených částí kov-polovodič N. Zajímají nás takové materiály, pro které platí: $A_k > A_n$. Přičemž A_k je hodnota výstupní práce elektronu z kovu, A_n je výstupní práce elektronu z polovodiče N. Energetický rozdíl mezi hladinou nulové energie (při které elektron uniká do vakua) a spodní hranicí vodivostního pásu A_e se nazývá elektronová afinita. Po spojení začne docházet k difúzi elektronů z oblasti, kde mají větší energii (polovodič N) do míst s nižší energií (kov). Elektrony, které odejdou z polovodiče, po sobě zanechají nevykompenzované ionizované donory. Nábojové rozlišení způsobí zakřivení energetických hladin. Po dosažení rovnovážného stavu jsou Fermiho energetické hladiny vyrovnány. Na obr. 2.1 vpravo je patrná energetická bariéra A_b pro přechod elektronů z kovu do polovodiče ($A_b = A_k - A_e$). Velikost bariéry brání další difúzi elektronů z vodivostního pásu polovodiče do kovu je $e \cdot U_d = A_k - A_n$. e je elementární náboj, U_d se nazývá difúzní napětí. Povrchová oblast polovodiče má velmi nízkou koncentraci volných elektronů, protože vzdálenost Fermiho hladiny od dolní hranice vodivostního pásu je velká. Tato vrstva, která má výrazně větší odpor než zbytek polovodiče se nazývá hradlová vrstva. Na obr. 2.1 vpravo je ohraničena tečkovanou čarou.



Obr. 2.1 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič N

Pokud tuto strukturu připojíme k vnějšímu napětí U se stejnou polaritou jako napětí difúzní (obr. 2.2 vlevo), dochází ke zvýšení energetické bariéry pro přechod elektronu z polovodiče do kovu $e \cdot (U_d + U)$ a rozšíření hradlové vrstvy. Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní snižuje energetickou bariéru $e \cdot (U_d - U)$ a zapříčiňuje další difúzi elektronů (obr. 2.2 vpravo). Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do kovu a přechodem prochází stálý proud. Znamená to, že spojením vhodného polovodiče N a kovu docílíme usměrňujících účinků.



Obr. 2.2 Struktura kov-polovodič N při vnějším napětí v závěrném a propustném směru

Proudovou hustotu přechodu lze vyjádřit Schottkyho vztahem: $J = J_0 \cdot \left(e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right)$.

Znaménko + platí pro propustný, – pro závěrný směr. U je vnější napětí, T termodynamická teplota, k Boltzmannova konstanta, e elementární náboj, J_0 limitní velikost proudové hustoty v závěrném směru.[3] str.21

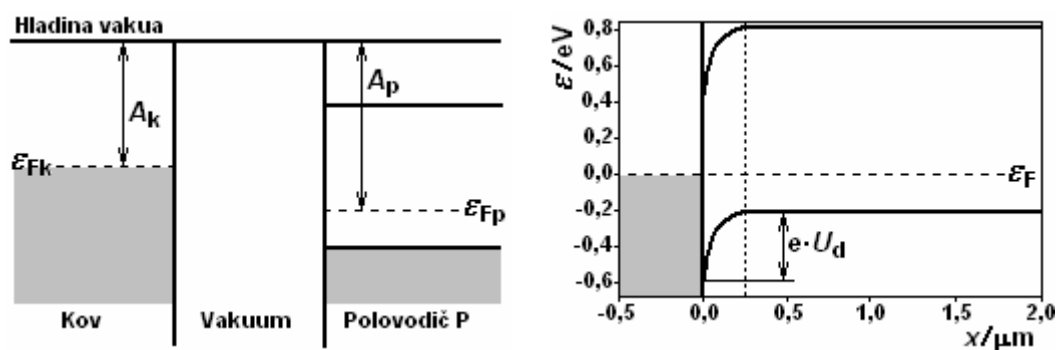
Narozdíl od P-N přechodu, kde je proud v závěrném směru dán injekcí minoritních nositelů, je závěrný proud na přechodu polovodič-kov dán i emisí majoritních nositelů přes bariéru. Proto závěrný proud u struktury polovodič-kov dosahuje o několik řádů větších hodnot než u P-N přechodu.

Polovodič P-kov:

Na obr. 2.3 vlevo jsou znázorněna pásová schémata oddělených částí kov-polovodič P. Tentokrát nás zajímají materiály, pro které platí $A_k < A_p$. Po spojení začne docházet k difúzi elektronů z oblasti, kde mají větší energii (kov) do míst s nižší energií (polovodič P). Elektrony, které odejdou z kovu, v polovodiči P rekombinují s majoritními děrami. Díky nevykompenzovaným ionizovaným akceptorům vzniká opět

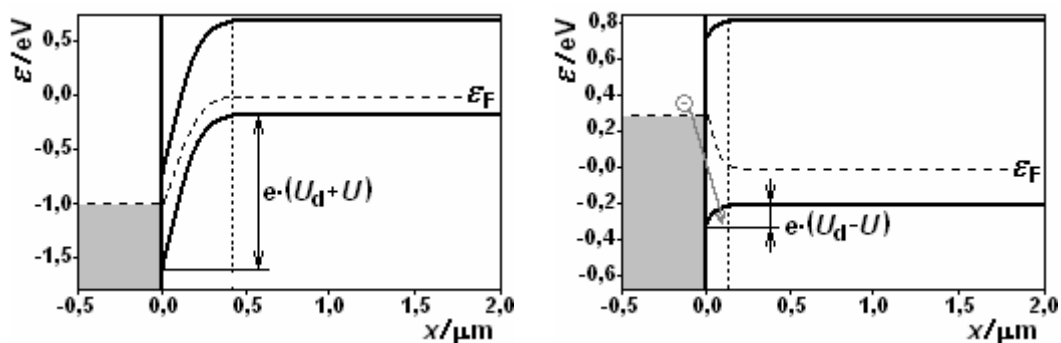
difúzní napětí $U_d = \frac{A_p - A_k}{e}$, způsobující zakřivení energetických hladin (obr. 2.3

vpravo). Vzniká tak energetická bariéra, která brání děrám v postupu směrem k rozhraní polovodič-kov. Zastavuje se proto difúze elektronů, které nenacházejí v polovodiči volné pozice (díry). Po dosažení rovnovážného stavu jsou Fermiho energetické hladiny vyrovnány. Povrchová oblast polovodiče má velmi nízkou koncentraci děr. Této vrstvě, která má výrazně větší odpor než zbytek polovodiče se říká hradlová vrstva. Na obr. 2.3 vpravo je ohraničena tečkovanou čarou.



Obr. 2.3 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič P

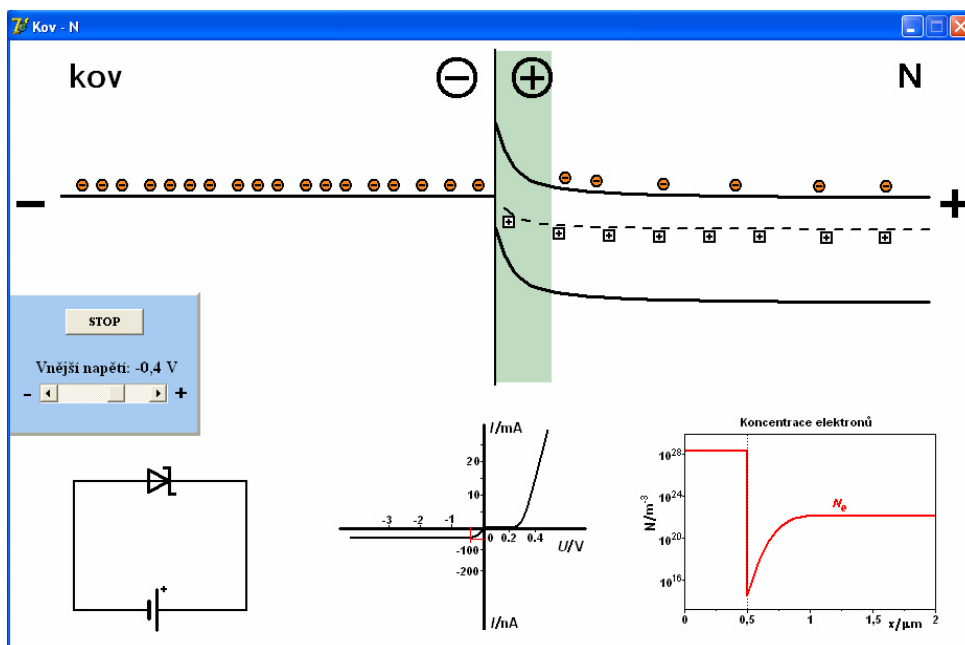
Připojení vnějšího napětí se stejnou polaritou jako napětí difúzní opět způsobuje zvýšení energetické bariéry a rozšíření hradlové vrstvy (obr. 2.4 vlevo). Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní energetickou bariéru snižuje (obr. 2.4 vpravo). Po vyrovnání vnějšího a difúzního napětí díry procházejí až k rozhraní s kovem, kde rekombinují s volnými elektrony přecházejícími z kovu. Ze zdroje jsou dodávány stále nové elektrony a díry, přechodem prochází stálý proud. Spojením vhodného polovodiče P a kovu lze též docílit usměrňujících účinků. Proudovou hustotu lze opět popsat Schottkyho vztahem.



Obr. 2.4 Struktura kov-polovodič P při vnějším napětím v závěrném a propustném směru

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 2.5. Podstatnou část okna zabírá zobrazení pásového modelu energetických hladin. Na ovládacím panelu se nachází tlačítko **START** (**STOP**), představující spojení (rozdělení) polovodiče a kovu a posuvník (Scrollbar) s rozsahem -20 až 4 pro změnu hodnoty i polarity vnějšího napětí v rozsahu -2 V až $0,4$ V po $0,1$ V. V dolní části se nachází graf koncentrace elektronů v této struktuře, V-A charakteristika přechodu a zapojení Schottkyho diody, využívající rozhraní polovodič-kov, ke zdroji napětí.



Obr. 2.5 Provedení modelu kov-polovodič N

V této části bude popsána pouze struktura kov-polovodič N. Spojení kovu a polovodiče P je realizováno prakticky stejně. Energetické hladiny jsou při stejných napětích zakřiveny stejně, pouze opačným směrem, což vyžaduje pouze změnu znamének při jejich výpočtu. Dále byla třeba změna polarity všech napětí. Rozdíl je též v grafu koncentrací nositelů náboje, kde polovodič P namísto elektronů obsahuje díry.

Po spuštění jsou v pásovém schématu zobrazeny oddělené části kov, polovodič. Ke znázornění energetických hladin je použita komponenta `PaintBox`, umožňující kreslení jednoduchých tvarů:

```
with PaintBox1.Canvas do
  begin
    Pen.Width := 2;
    Pen.Color := clBlack;

    moveto(410,0);
    lineto(410,320);

    moveto(423,0);
    lineto(423,320);

    Pen.Width := 3;
    moveto(0,140);
    lineto(409,140);
  ...atd.
```

Na ovládacím panelu je po spuštění možné použít pouze tlačítko **START** představující spojení obou oddělených částí. Po jeho stisknutí je spuštěn časovač, který provádí posun obrázků elektronů:

```
image22.Left:=image22.Left-10;
image23.Left:=image23.Left-9;
...atd.
```

Energetické hladiny se opět vykreslují do komponenty `PaintBox`, tentokrát jako polynom:

```
with PaintBox1.Canvas do
  begin
    Pen.Width := 3;
    Pen.Color := clBlack;
    Polyline(FPoints1);
    Polyline(FPoints2);
  ...atd.
```

Body vykreslovaného polynomu (`FPoints`) jsou počítány jako vybrané body funkce $\arctg(x)$:

```

x := 0;
for i := 0 to High(Form1.FPoints) do
begin
Form1.FPoints[i].X := Round(x * RozsahX / 10);
Form1.FPoints[i].Y := Round( (a-3)*arctan(x) * RozsahY/20);
x := x + interval;
end;

```

Zakřivení hladin se mění s parametrem a , který se postupně mění s difundujícími elektrony:

```

if image22.Left<470 then a:=2;
if image22.Left<430 then a:=1;
if image22.Left=402 then a:=0;

```

Po zastavení difúze je na ovládacím panelu aktivována komponenta `Scrollbar`, jejíž hodnota lze měnit v rozsahu -20 až 4 , což odpovídá připojení vnějšího napětí $-2,0$ V až $0,4$ V po $0,1$ V. Tvar energetických hladin je při změně vnějšího napětí opět dán funkcí $arctg(x)$ a parametrem a , jehož hodnota je měněna podle polohy `Scrollbaru`. Dále je zeleně znázorňována hradlová vrstva. Ta je vykreslována v `PaintBoxu` jako obdélník s rozměry závislými též na parametru a :

```

Brush.Color := clmoneygreen;
Brush.Style := bsSolid;
Fillrect(Rect(pocatek.X, 2, pocatek.X-4*(a-4), 318));

```

Při změně vnějšího napětí se mění graf koncentrací elektronů a V-A charakteristika. Graf koncentrace elektronů se nemění spojitě, je zde vloženo pouze několik grafů pro různé intervaly napětí:

```

if a=0 then image33.Visible:=true;
if a=1 then image34.Visible:=true;
if a=2 then image35.Visible:=true;
if (a=3)or(a=4) then image36.Visible:=true;
if (a<0)and(a>-11) then image37.Visible:=true;
if (a<-10)then image38.Visible:=true;

```

V-A charakteristika je zde vložena jako jeden obrázek, překrytý komponentou `PaintBox`, ve které jsou vykreslovány čárky na aktuální hodnotě:

```

with PaintBox2.Canvas do
begin
Pen.Width := 1;
Pen.Color := clred;
moveto(fpointsG[scrollbar1.position].X, 104);
if scrollbar1.position<0 then
    lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
           fpointsG[scrollbar1.position].Y+4)
else

```

```

        lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
               fpointsG[scrollbar1.position].Y-4);
    moveto(141, fpointsG[scrollbar1.position].Y);
    lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
           fpointsG[scrollbar1.position].Y);
end;

```

fpointsG jsou předem zadané souřadnice jednotlivých bodů grafu.

Pokud je nastaveno vnější napětí 0,3 V nebo 0,4 V, je spuštěn časovač, posouvající elektrony v pásovém schématu. V kovu je umístěno třikrát více elektronů než v polovodiči, z čehož plyne nutnost třikrát rychlejšího posunu v polovodiči než v kovu, aby na sebe plynule navazovaly. Každý elektron, který dorazí na levý okraj schématu je přemístěn na pravý okraj a opět putuje směrem doleva:

```

for i:=1 to 24 do begin
    if Form1.FImages[i].Left>410 then
        Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left-6
    else
        Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left-2;
    if Form1.FImages[i].Left<10 then
        Form1.FImages[i].Left:=810;
end;

```

Protékající proud je znázorněn i v jednoduchém obvodu pomocí pohybujících se čárkovaných čar. Časovač posouvá čárky vždy o 2 pixely pomocí proměnné k, po osmém posunutí se vrací na počáteční místo:

```

    k:=k+1;
    if k=9 then k:=1;
    image58.Left:=12+ 2*k;
    image65.Left:=105+ 2*k;
    image67.Left:=119- 2*k;
...atd.

```

V jakékoli fázi vykonávání programu lze použít tlačítko **STOP**, představující oddělení částí polovodič-kov. Po jeho stisknutí je nastaven počáteční stav, jako při spuštění programu.

Metodický návod:

Tato část je vzhledem k analogii a stejnému provedení modelů přechodu kov-polovodič N a kov-polovodič P společná. V případě odlišností je popis modelu kov-polovodič P uveden v závorce.

1. Spuštění souborem „1_Kov-N.exe“ („2_Kov-P.exe“).

Zobrazeny jsou oddělené části kov-polovodič, volné elektrony v kovu, majoritní nositelé náboje (u polovodiče N elektrony – červené, u polovodiče P díry – modré), ionty příměsí (čtverečky) a Fermiho energetické hladiny (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno grafem koncentrací nositelů. Na ovládacím panelu je možné pouze stisknutí tlačítka **START**.

2. Stisknutí tlačítka **START**.

Dojde k ideálnímu spojení částí kov a polovodič. Probíhá difúze elektronů (u polovodiče P rekombinace s děrami). Díky nevykompenzovaným iontům vzniká difúzní napětí (označení **+**, **-** v kroužku), energetické hladiny se zakřivují. Rovnováha na přechodu nastává po vyrovnaní Fermiho hladin. V polovodiči vznikla hradlová vrstva (zelená barva). Nyní je na ovládacím panelu k dispozici tlačítko **STOP** a posuvník.

3. Stisknutí tlačítka **STOP**.

Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k nastavení počátečního stavu jako při spuštění programu. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po spojení obou částí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.

4. Nastavení vnějšího **napětí: -0,5 V** pomocí posuvníku.

Vnější napětí se stejnou polaritou (označení **+**, **-** na okrajích struktury) jako napětí difúzní způsobuje zakřivení energetických hladin a úbytek nositelů náboje – rozšíření hradlové vrstvy. Pokles nositelů a rozšíření hradlové vrstvy je zřejmý i z grafu koncentrací. Z V-A charakteristiky je patrný malý závěrný proud, způsobený emisí majoritních nositelů přes bariéru.

5. Zvyšování **napětí** na **-2,0 V**.

Dochází k dalšímu zakřívování hladin a rozšiřování hradlové vrstvy.

6. Nastavení **napětí: 0 V**.

7. Nastavení **napětí: 0,2 V**.

Vnější napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní způsobuje vyrovnavání energetických hladin. Tím pádem se hradlová vrstva zužuje, což je spolu s přírůstkem nositelů zřejmé i z grafu koncentrace.

8. Nastavení **napětí: 0,3 V**.

Při tomto napětí je zcela zrušena energetická bariéra a elektrony mohou volně procházet z polovodiče N do kovu (z kovu do polovodiče P, kde rekombinují s děrami). Přechodem nyní prochází proud, zachycený ve V-A charakteristice i ve schématickém obvodu pomocí pohybujících se červených čárek V grafu koncentrací je vidět zvýšený počet nositelů náboje v sousedních oblastech.

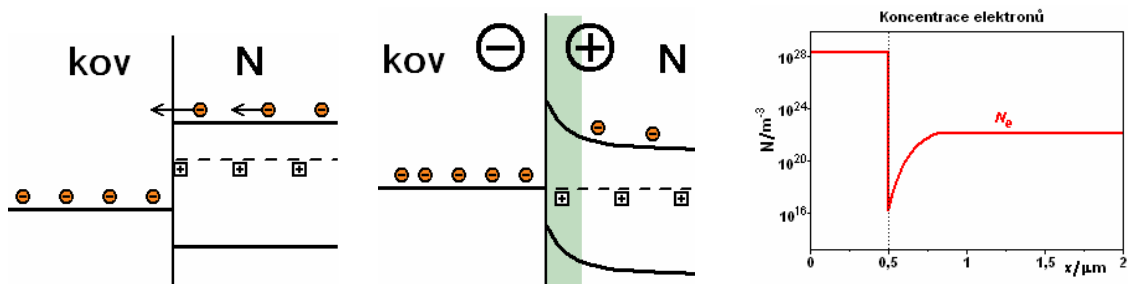
9. Nastavení **napětí: 0,4 V**.

Dojde k zakřivení hladin ve směru pohybu nositelů, což způsobuje nárůst proudu, znázorněného ve V-A charakteristice.

Výklad:

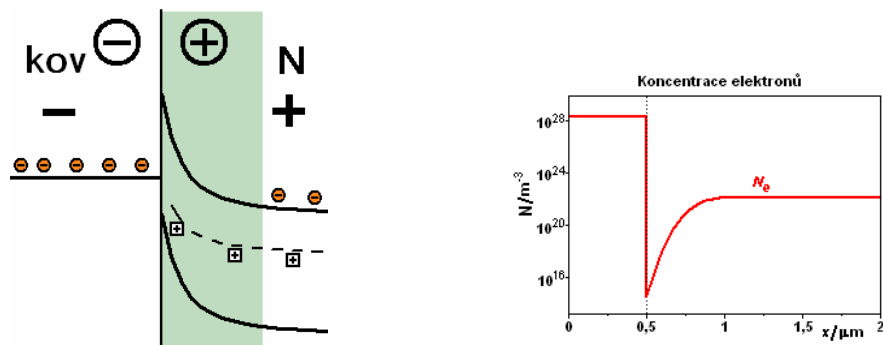
Polovodič N-kov:

Výklad se provádí na představě ideálního spojení původně oddělených částí kov, polovodič. Důležitým krokem k pochopení činnosti této struktury je rozbor dějů probíhajících po tomto spojení. Z pásového modelu lze vyčíst energie volných elektronů v kovu a v polovodiči. Protože se elektrony vždy snaží obsadit místo s co nejnižší energií, začne docházet k jejich difúzi z polovodiče N do kovu (obr. 2.6 vlevo). Kov se proto nabíjí záporně. Polovodič N, kde zůstávají nevykompenzované ionizované donory (k zobrazení nehybných donorových atomů jsou zvoleny čtverečky, aby se vizuálně zdůraznila jejich nehybnost – nemohou se kutálet), se nabíjí kladně. V blízkosti styku kov-polovodič tak vzniká oblast prostorového náboje s vysokou intenzitou elektrického pole. Toto nábojové rozlišení (difúzní napětí označené $+$, $-$ v kroužku) způsobuje zakřivení energetických hladin a vznik bariéry bránící další difúzi elektronů. V blízkosti přechodu je vzhledem k bariéře a velké vzdálenosti vodivostního pásu od hladiny příměsí velmi malá koncentrace volných elektronů. Tato oblast s velkým odporem se nazývá hradlová vrstva (zelená oblast na obr. 2.6 uprostřed). Zde je nutné zdůraznit, že počet volných elektronů v kovu a polovodiči zobrazených v modelu je pouze ilustrativní. Ve skutečnosti je koncentrace elektronů v kovu cca 10^{28} m^{-3} , v polovodiči cca 10^{22} m^{-3} , což je 10^6 krát méně (obr. 2.6 vpravo).



Obr. 2.6 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-N

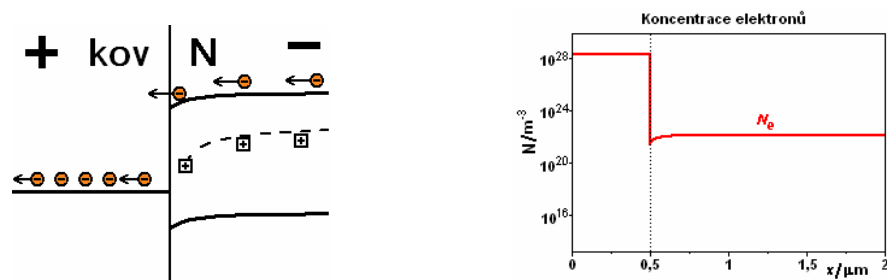
Model dále umožňuje připojení vnějšího napětí pomocí posuvníku. Pokud má napětí stejnou polaritu jako napětí difúzní, dochází ke zvýšení energetické bariéry a rozšíření hradlové vrstvy. V hradlové vrstvě navíc dojde ke snížení koncentrace nositelů náboje (obr. 2.7).



Obr. 2.7 Připojení vnějšího napětí v závěrném směru

Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní snižuje energetickou bariéru, koncentrace elektronů v hradlové vrstvě roste. Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do kovu (obr. 2.8). Ze zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, přechodem prochází stálý proud.

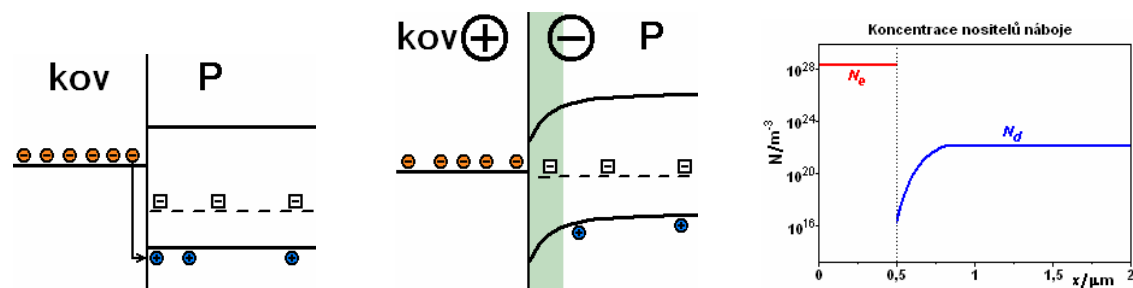
Vzhledem v řádově větší rezistivitě polovodiče než kovu se zakřivení energetických hladin projevuje prakticky pouze v polovodiči, v kovu není patrné.



Obr. 2.8 Připojení vnějšího napětí v propustném směru

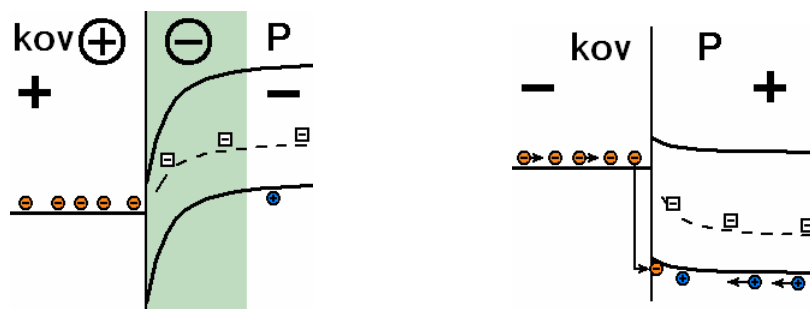
Polovodič P-kov:

I u této struktury začnou po spojení obou částí elektrony hledat místa s co nejnižší energií. Volným elektronům z kovu se nabízí energeticky výhodnější neobsazené pozice ve valenčním pásu polovodiče (díry). Začne docházet k jejich difúzi do polovodiče a rekombinaci (obr. 2.9 vlevo). Kov se díky odcházejícím elektronům začne nabíjet kladně, polovodič P záporně, protože v blízkosti přechodu zůstávají pouze nevykompenzované akceptorové ionty (čtverečky). V blízkosti styku kov-polovodič vzniká oblast prostorového náboje s vysokou intenzitou elektrického pole. Toto nábojové rozlišení (difúzní napětí označené +, - v kroužku) způsobuje zakřivení energetických hladin. Díry se narozdíl od elektronů snaží zaujímat pozice s co nejvyšší energií – putují dále od rozhraní. Elektrony přecházející z kovu proto nenacházejí v polovodiči volné pozice a difúze se zastavuje. V blízkosti přechodu je vzhledem k bariéře a velké vzdálenosti valenčního pásu od hladiny příměsí velmi malá koncentrace děr. Tato oblast s velkým odporem se nazývá hradlová vrstva (zelená oblast na obr. 2.9 uprostřed). Zde je opět nutné zdůraznit rozdílnost koncentrací nositelů náboje. Volných elektronů v kovu je opět o šest řádů více než děr v polovodiči (obr. 2.9 vpravo).



Obr. 2.9 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-P

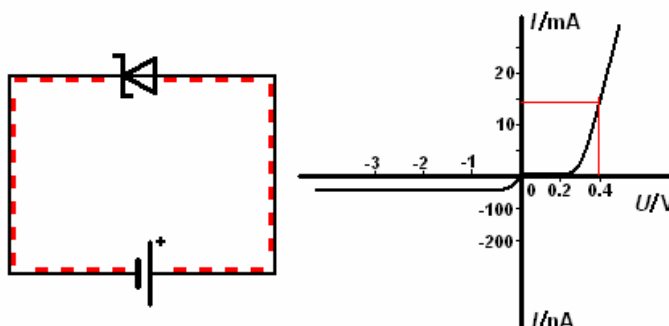
Připojení vnějšího napětí má stejné účinky jako u struktury kov-polovodič N. Napětí se stejnou polaritou jako napětí difúzní způsobuje další zakřivení hladin, úbytek děr a rozšíření hradlové vrstvy (obr. 2.10 vlevo).



Obr. 2.10 Připojení vnějšího napětí v závěrném a propustném směru

Napětí s opačnou polaritou než difúzní napětí způsobuje vyrovnávání energetických hladin a zvyšování koncentrace děr, hradlová vrstva se zužuje. Po vyrovnání difúzního napětí vnějším napětím hradlová vrstva zcela zaniká a díry mohou putovat ve směru elektrického pole až k rozhraní, kde nabízejí volné pozice elektronům z kovu (obr. 2.10 vpravo). Dochází k jejich rekombinaci. Ze záporného pólu zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, odsáváním elektronů kladným pólem zdroje vznikají nové díry. Přechodem prochází proud.

Usměrňujících účinků přechodu kov-polovodič se využívá v Schottkyho diodách, jejíž schématická značka, připojení ke zdroji napětí a V-A charakteristika jsou také zobrazovány v modelu (obr. 2.11).

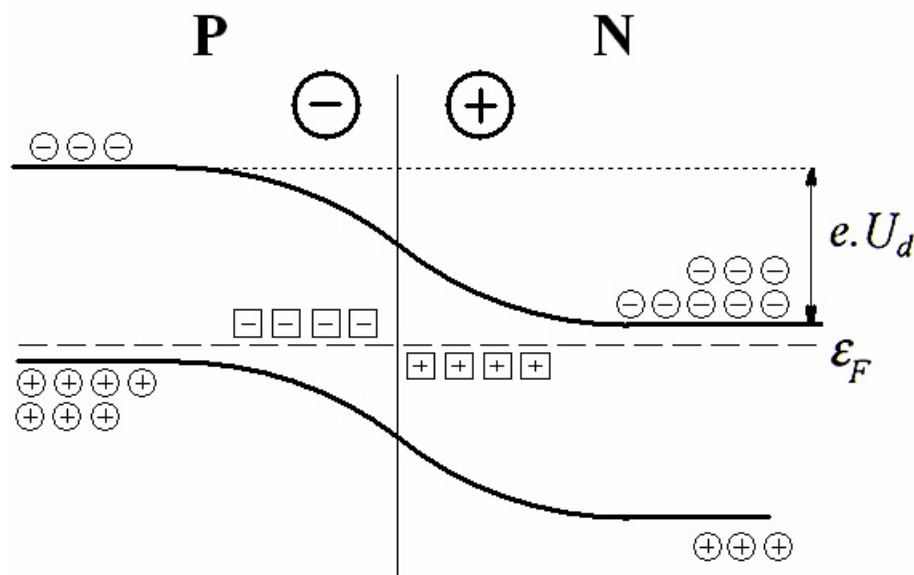


Obr. 2.11 Schottkyho dioda s V-A charakteristikou

3.1.2 P-N přechod

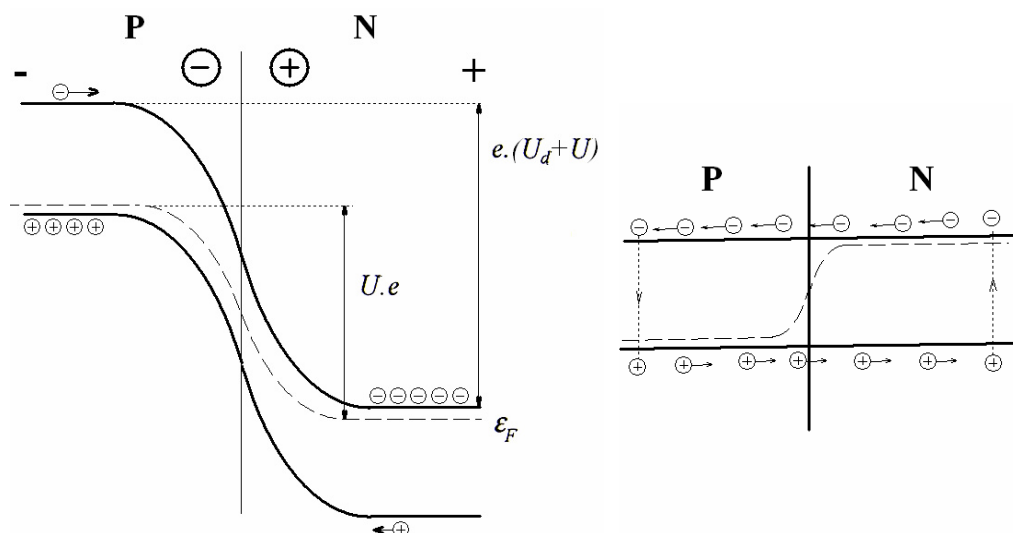
Teorie:

Popis vlastností P-N přechodu se provádí na představě ideálního spojení dvou původně oddělených polovodičů typu P a N. V polovodiči P je o několik řádů vyšší koncentrace děr než elektronů, v polovodiči N je tomu naopak. Po spojení obou polovodičů proto začne docházet k difúzi děr do polovodiče N a elektronů do polovodiče P. Díry, které odejdou z oblasti P, po sobě zanechají nevykompenzované ionizované akceptory, elektrony zanechávají nevykompenzované ionizované donory. Tyto nepohyblivé náboje jsou znázorněny čtverečky (obr. 3.1). Vzniká tak nábojová dvojvrstva s vysokou intenzitou elektrického pole. Toto difúzní napětí U_d (polarita vyznačena $+$, $-$ v kroužku) způsobuje drift elektronů a děr ve směru opačném k difúzi. Když se driftová proudová hustota vyrovná difúzní proudové hustotě, nastává na P-N přechodu rovnováha. V tomto stavu jsou Fermiho energetické hladiny vyrovnány. Fermiho energetická hladina ε_F je znázorněna čárkovanou čarou. Difundující elektrony rekombinují v oblasti P s děrami, stejně tak díry, které difundují do oblasti N zde rekombinují s elektrony. Oblast v blízkosti spojení obou oblastí má proto sníženou koncentraci nositelů náboje, nazývá se hradlová vrstva.



Obr. 3.1 Energetické hladiny struktury P-N v rovnovážném stavu bez vnějšího napětí [3]

Pokud je na P-N přechod připojeno napětí se stejnou polaritou jako je napětí difúzní, dochází ke zvýšení energetické bariéry. Elektrony přecházejí do míst s nižší energií, navíc se zvyšuje energie, potřebná k přechodu elektronů z donorových příměsí (z Fermiho hladiny) do vodivostního pásu. Stejně tak i díry cestují do energeticky výhodnějších míst dále od rozhraní P-N. Zvyšuje se i energie potřebná k přechodu elektronů z valenčního pásu do akceptorových příměsí (na Fermiho hladinu). V blízkosti přechodu proto dochází ke snížení koncentrace nositelů náboje. Hradlová vrstva se rozšiřuje (obr. 3.2 vlevo).



Obr. 3.2 Struktura P-N s vnějším napětím v závěrném a propustném směru [3]

Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní snižuje energetickou bariéru a zapříčiňuje další difúzi elektronů a děr. Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do polovodiče P, kde rekombinují s majoritními děrami a díry do polovodiče N, kde rekombinují s majoritními elektrony (obr. 3.2 vpravo). Ze záporného pólu zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, odsáváním elektronů kladným pólem zdroje vznikají nové díry, přechodem prochází stálý proud.

Závislost proudu na napětí lze stejně jako u přechodu kov-polovodič Schottkyho

vztahem: $J = J_0 \cdot \left(e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right)$. [3] str.24

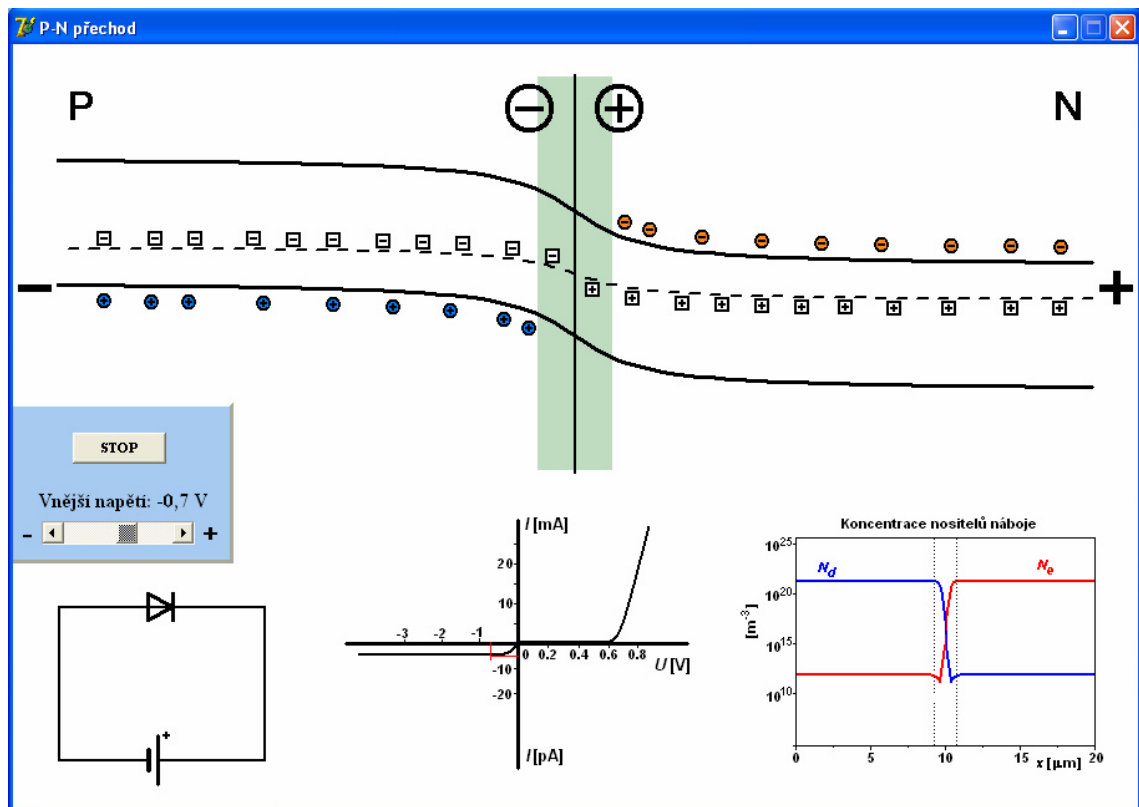
Limitní proudová hustota v závěrném směru lze vyjádřit: $J_0 \approx e^{-\frac{\epsilon_g}{kT}}$ [3] str.24, kde ϵ_g je šířka zakázaného pásu.

Realizace:

Celkové provedení programu je patrné z obr. 3.3. Horní polovinu okna zabírá pásový model energetických hladin P-N přechodu. Na ovládacím panelu se nachází tlačítka **START** (**STOP**), představující spojení (rozdělení) obou polovodičů a **Scrollbar** s rozsahem -30 až 8, kterým je možné měnit hodnotu i polaritu vnějšího napětí v rozsahu -3 V až 0,8 V po 0,1 V. V dolní části se nachází graf koncentrace elektronů a děr v této struktuře, V-A charakteristika přechodu a zapojení stabilizační diody, využívající rozhraní P-N, ke zdroji napětí.

Pro vykreslování energetických hladin je použita komponenta **PaintBox**. Po spuštění programu jsou hladiny vykresleny pomocí úseček:

```
with PaintBox1.Canvas do
begin
  Pen.Width := 2;
  Pen.Color := clBlack;
  moveto(410,0);
  lineto(410,321);
  Pen.Width := 3;
  moveto(0,110);
  lineto(409,110); ...atd.
```



Obr. 3.3 Provedení modelu P-N přechodu

Scrollbar je po spuštění neaktivní, je možné použít pouze tlačítko **START**. Po jeho stisknutí je spuštěn časovač, posouvající difundující elektrony a díry:

```
image41.Left:=image41.Left-7;
image42.Left:=image42.Left-8;
image1.Left:=image1.Left-8;
image2.Left:=image2.Left-10;
image3.Left:=image3.Left-8;
...atd.
```

Na počátku je nastavena proměnná $a := 7$; při každém kroku časovače se hodnota a sníží: $a := a - 1$; . Proměnná a je použita jako parametr k zakřivování energetických hladin. K tomuto účelu je využit průběh funkce $\arctg(x)$, který má tvar podobný energetickým hladinám:

```
for i := 0 to High(Form1.FPoints) do
begin
  Form1.FPoints[i].X:=Round(x*RozsahX/20);
  Form1.FPoints[i].Y:=Round((a-7)*arctan(x)*RozsahY/80);
  x := x + interval;
end;
```

Vybrané body této funkce jsou pak se spojnicí vykresleny v `PaintBoxu`:

```
with PaintBox1.Canvas do  
  begin  
    Pen.Width := 3;  
    Pen.Color := clBlack;  
    Polyline(FPoints1);  
    Polyline(FPoints2);
```

Při nulové hodnotě a je difúze dokončena, časovač vypnut a aktivován `ScrollBar`:

```
if a=0 then begin  
    timer2.Enabled:=false;  
    ScrollBar1.Enabled:=true;  
end;
```

`ScrollBar` znázorňující změnu vnějšího napětí má rozsah -30 až 8 , což odpovídá připojení napětí -3 V až $0,8$ V po $0,1$ V. Tvar energetických hladin je při změně vnějšího napětí opět počítán z funkce $\arctg(x)$ za pomoci parametru a , jehož hodnota je dána polohou `ScrollBaru`. V závislosti na a je také zeleně vykreslována hradlová vrstva:

```
Brush.Color := clmoneygreen;  
Brush.Style := bsSolid;  
Fillrect(Rect(pocatek.X+2*(a-8), 2,  
             pocatek.X-2*(a-8), 2*rozsahY));
```

Elektrony a díry se posunují před rozšiřující se hradlovou vrstvou:

```
form1.FImages[1].left:=pocatek.X-2*(a-8)+4;  
for i:=2 to 5 do  
if form1.FImages[i].left<form1.FImages[i-1].left+20  
then form1.FImages[i].left:=form1.FImages[i-1].left+20;
```

Pokud je vnější napětí větší než $0,6$ V, je spuštěn časovač, který posunuje elektrony a díry:

```
for i:=1 to 10 do  
  begin  
    FImages[i].left:=FImages[i].left-4;  
    if FImages[i].left<360 then FImages[i].left:=800;  
  end;  
  
for i:=11 to 20 do  
  begin  
    FImages[i].left:=FImages[i].left+4;  
    if FImages[i].left>460 then FImages[i].left:=20;  
  end;
```

V okně je znázorněn graf koncentrací nositelů náboje. Tyto průběhy se nemění plynule, ale je zde vloženo pouze šest obrázků pro různé intervaly vnějšího napětí:

```
if (scrollbar1.position<-12)and(scrollbar1.position>-21)
then image61.visible:=true;
...atd.
```

V-A charakteristika je zde vložena jako obrázek, překrytý komponentou PaintBox, ve které jsou vykreslovány čárky na aktuální hodnotě:

```
with PaintBox2.Canvas do
begin
  Pen.Width := 1;
  Pen.Color := clred;
  moveto(fpointsG[scrollbar1.position].X,104);
  if scrollbar1.position<0 then
    lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
          fpointsG[scrollbar1.position].Y+4)
  else
    lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
          fpointsG[scrollbar1.position].Y-4);
  moveto(141,fpointsG[scrollbar1.position].Y);
  lineto(fpointsG[scrollbar1.position].X,
        fpointsG[scrollbar1.position].Y);
end;
```

FpointsG jsou předem zadané souřadnice jednotlivých bodů grafu.

Pokud je nastaveno napětí větší než 0,6V, jsou v obvodu s diodou zviditelněny čárky znázorňující proud. Při každém sepnutí časovače se posouvají o dva pixely. Pokud jsou posunuty osmkrát, vrací se na svou počáteční polohu pomocí proměnné k:

```
k:=k+1;
if k=9 then k:=1;
image58.Left:=14+ 2*k;
image65.Left:=105+ 2*k;
image67.Left:=119- 2*k;
...atd.
```

V jakékoli fázi vykonávání programu lze použít tlačítko **STOP**, představující oddělení obou částí. Po jeho stisknutí je nastaven počáteční stav, jako při spuštění programu.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „3_P-N.exe“.

Zobrazeny jsou oddělené polovodiče P a N, majoritní nositelé náboje (elektrony – červené, díry – modré), ionty příměsí (čtverečky) a Fermiho energetické hladiny (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno grafem koncentrací nositelů. Na ovládacím panelu je možné pouze stisknutí tlačítka **START**.

2. Stisknutí tlačítka **START**.

Dojde k ideálnímu spojení částí P a N. Probíhá difúze nositelů náboje. Díky nevykompenzovaným iontům vzniká difúzní napětí (označení $+$, $-$ v kroužku), energetické hladiny se zakřivují. Rovnováha na P-N přechodu nastává po vyrovnaní Fermiho hladin. V oblasti styku částí P a N, vznikla hradlová vrstva (zelená barva), která je znázorněna i v grafu koncentrací (tečkovaná čára). Nyní je na ovládacím panelu k dispozici tlačítko **STOP** a posuvník.

3. Stisknutí tlačítka **STOP**.

Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k nastavení počátečního stavu jako při spuštění programu. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po spojení obou částí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.

4. Nastavení vnějšího **napětí: $-0,5$ V** pomocí posuvníku.

Vnější napětí se stejnou polaritou (označení $+$, $-$ na okrajích struktury) jako napětí difúzní způsobuje zakřivení energetických hladin a úbytek nositelů náboje – rozšíření hradlové vrstvy. Pokles nositelů a rozšíření hradlové vrstvy je zřejmý i z grafu koncentrací. Z V-A charakteristiky je patrný zanedbatelný proud, tvořený pouze minoritními nositeli.

5. Zvyšování vnějšího **napětí na -3 V**.

Dochází k dalšímu zakřivování hladin a rozšiřování hradlové vrstvy.

6. Nastavení vnějšího **napětí: 0 V**.

7. Nastavení vnějšího **napětí: $0,4$ V**.

Vnější napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní způsobuje vyrovnavání energetických hladin. Tím pádem se hradlová vrstva zužuje, což je spolu s přírůstkem nositelů zřejmé i z grafu koncentrace.

8. Nastavení vnějšího **napětí: $0,7$ V**.

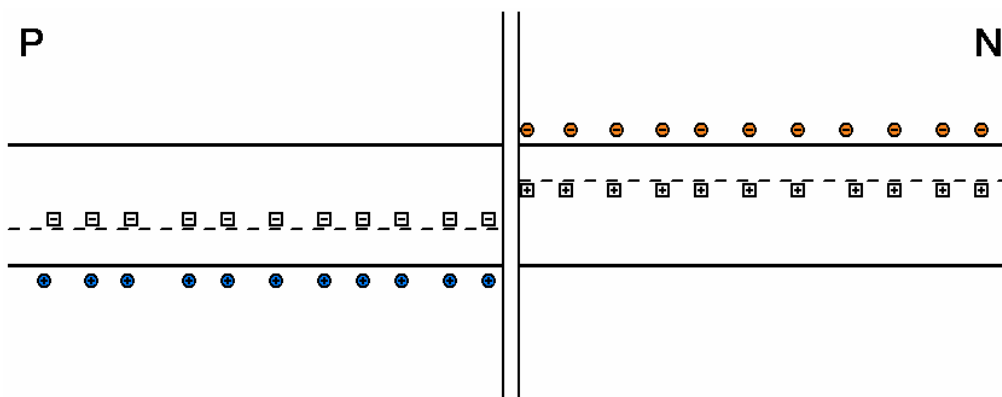
Při tomto napětí je zcela zrušena energetická bariéra a elektrony mohou volně procházet do oblasti P, kde rekombinují s děrami. Také díry také procházejí do oblasti N, kde rekombinují s elektrony. Přechodem nyní prochází proud, zachycený ve V-A charakteristice i ve schématickém obvodu pomocí pohybujících se červených čárek V grafu koncentrací je vidět zvýšený počet nositelů náboje v sousedních oblastech.

9. Nastavení vnějšího **napětí: $0,8$ V**.

Dojde k zakřivení hladin ve směru pohybu nositelů, což způsobuje nárůst proudu, znázorněného ve V-A charakteristice.

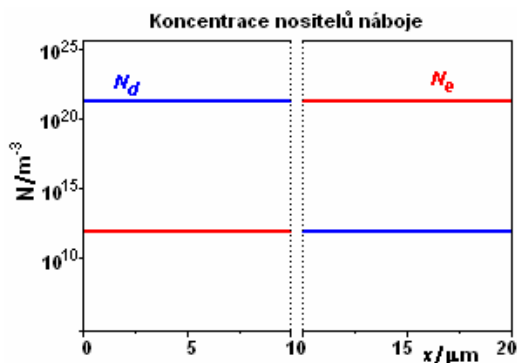
Výklad:

Po spuštění jsou v okně programu zobrazeny dva oddělené polovodiče (obr. 3.4). Polovodič typu P obsahuje příměsi s volnými elektronovými pozicemi energeticky blízkými valenčnímu pásu. Elektrony valenčního pásu proto mohou snadno přeskočit na tyto pozice, kde vznikají akceptorové ionty znázorněné čtverečky. Na místě, které elektron opustil, vzniká volná pozice (díra), která slouží jako nositel elektrického náboje. Díry jsou znázorněny modře. Polovodič typu N obsahuje příměsi s elektrony energeticky blízkými vodivostnímu pásu. Tyto elektrony mohou do vodivostního pásu snadno přeskočit. Získáváme tak volné elektrony, znázorněné červeně, které se účastní vedení elektrického proudu. Po těchto elektronech zůstává z příměsi donorový iont, znázorněný čtverečkem. Představa spojení dvou původně oddělených polovodičů typu P a N se provádí pouze pro snadnější pochopení vlastností P-N přechodu. Je však třeba zdůraznit, že P-N přechod musí být vytvořen v jediném monokrystalu. Proto si energetické hladiny valenčního a vodivostního pásu navzájem odpovídají. Čárkovaně je znázorněna Fermiho energetická hladina. U části typu N se, díky donorovým příměsím, nachází v blízkosti vodivostního pásu. V části typu P je tato hladina blízko pásu valenčního, díky akceptorovým příměsím.



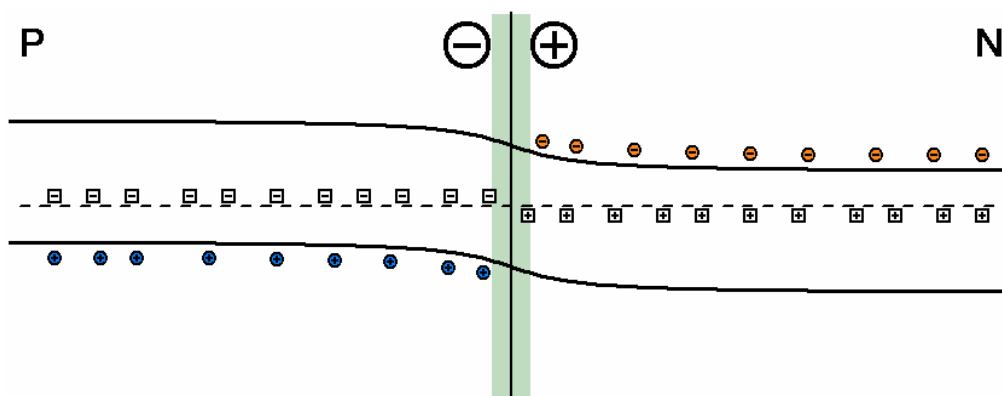
Obr. 3.4 Oddělené části polovodič P, polovodič N

Volné elektrony v polovodiči typu N a díry v polovodiči typu P nazýváme majoritní nositelé elektrického náboje. Polovodič P obsahuje kromě akceptorových příměsí i malý podíl příměsí donorových. To zapříčiňuje, že v polovodiči typu P se kromě děr vyskytují i volné elektrony. Stejně tak se i polovodiči N objevují akceptorové příměsi a s nimi díry. Tyto nositele elektrického náboje, jež tvoří pouze zanedbatelnou část nazýváme minoritní nositelé. Jejich koncentrace je o několik řádů nižší než koncentrace majoritních nositelů (obr. 3.5). Protože minoritní nositelé náboje nehrají v tomto případě tak důležitou roli, jsou v animaci znázorněni pouze nositelé majoritní (obr. 3.4).



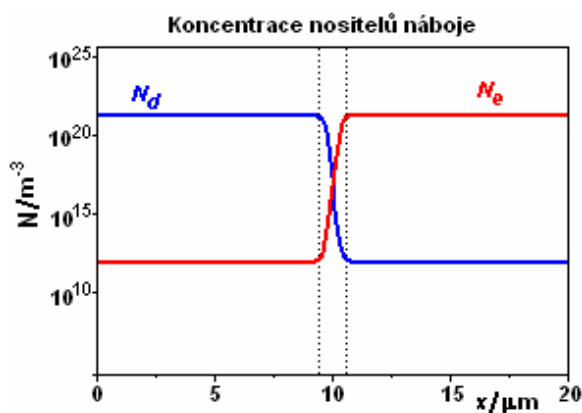
Obr. 3.5 Koncentrace nositelů náboje v oddělených částech P a N

Nyní je k dispozici pouze tlačítko **START**. Po jeho stisknutí dojde ke spojení obou polovodičů. Díky rozdílným koncentracím elektronů a děr v těchto dvou částech, začne docházet k jejich difúzi. Díry přecházejí do části typu N, elektrony do části typu P. Díry, které odejdou z oblasti P, po sobě zanechají nevykompenzované ionizované akceptory, elektrony zanechávají nevykompenzované ionizované donory. Difundující elektrony rekombinují v oblasti P s děrami, stejně tak díry, které difundují do oblasti N zde rekombinují s elektrony. Vzniká tak nábojová dvojvrstva s vysokou intenzitou elektrického pole (difúzní napětí, označení $+$, $-$ v kroužku), způsobující zakřivení energetických hladin, bránící další difúzi. Rovnovážný stav je v modelu znázorněn zastavením pohybu volných elektronů a děr. Ve skutečnosti však nedochází k úplnému zastavení difúze. Difúzní napětí způsobuje drift minoritních elektronů a děr ve směru opačném k difúzi. Když se driftová proudová hustota vyrovná difúzní proudové hustotě, nastává na P-N přechodu rovnováha. V tomto stavu jsou Fermiho energetické hladiny vyrovnány. Oblast v blízkosti spojení obou částí má sníženou koncentraci nositelů náboje, nazývá se hradlová vrstva (na obr. 3.6 je znázorněna zeleně). Takto již vypadá i skutečná situace na P-N přechodu, pokud neuvažujeme původně rozdělené oblasti P a N.



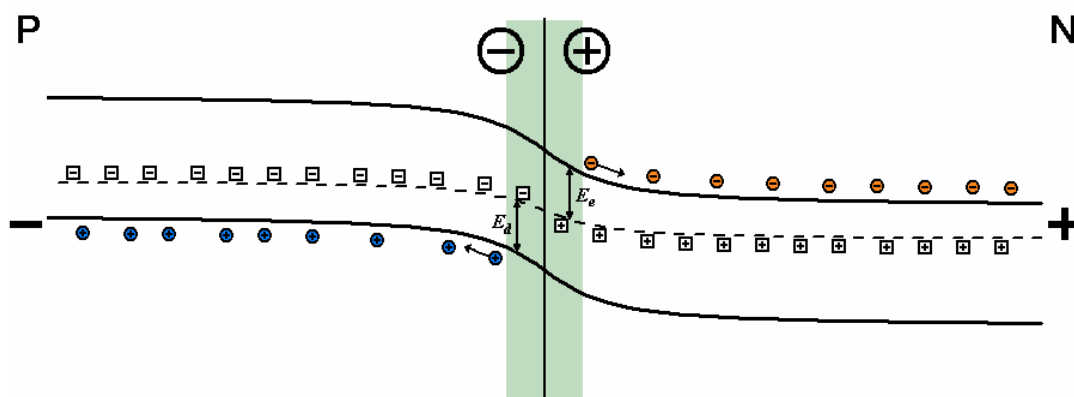
Obr. 3.6 Rovnovážný stav po spojení částí P a N

Koncentrace nositelů náboje je znázorněna v grafu na obr. 3.7. Tlačítkem **STOP** lze oba polovodiče od sebe oddělit a po jejich spojení opět sledovat difúzi a změny energetických hladin.



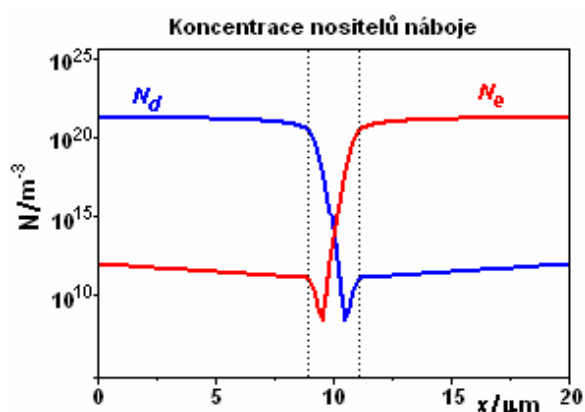
Obr. 3.7 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu

Pokud jsou oba polovodiče spojeny a soustava je v rovnováze, je možné pomocí posuvníku připojit na P-N přechod vnější zdroj napětí.



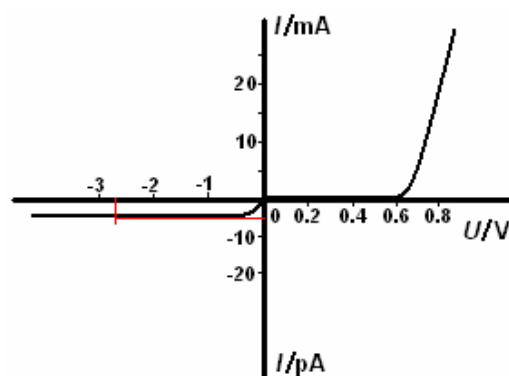
Obr. 3.8 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v závěrném směru

Nejdříve sledujeme změny na P-N přechodu, pokud je připojeno napětí se stejnou polaritou jako difúzní napětí (posuvník vlevo od nulové polohy). Dochází ke zvýšení energetické bariéry. Nositelé náboje putují do energeticky výhodnějších míst. Elektrony do míst s nižší energií, díry do míst s vyšší energií (obr. 3.8). Zároveň se zvyšuje energie E_e , potřebná k přechodu elektronů z donorových příměsí (z Fermiho hladiny) do vodivostního pásu a energie E_d potřebná k vytvoření díry, přechodem elektronů z valenčního pásu do akceptorových příměsí (na Fermiho hladinu). V blízkosti přechodu proto dochází ke snížení koncentrace nositelů náboje (obr. 3.9). Hradlová vrstva se rozšiřuje. Šířka hradlové vrstvy je naznačena v grafu koncentrací čárkovanými čarami. Tato hodnota je pro různé polovodiče různá, závisí především na množství příměsí. Dokonce v rámci jednoho P-N přechodu má část P a část N zpravidla různou šířku hradlové vrstvy.



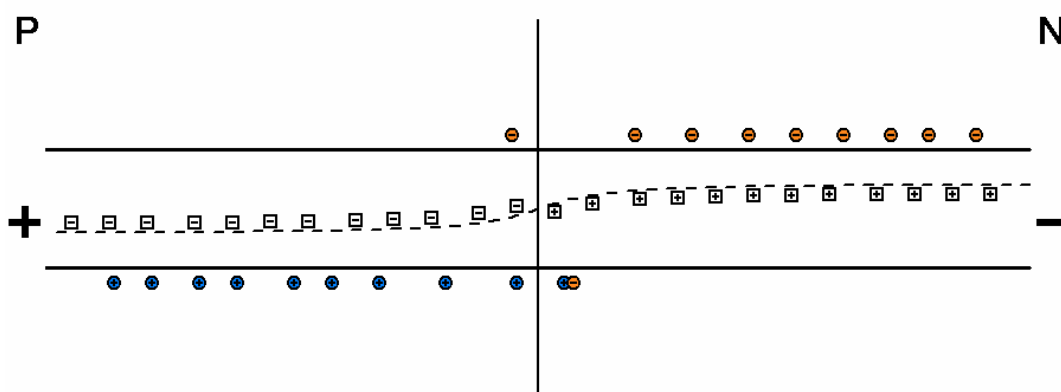
Obr. 3.9 Koncentrace nositelů náboje při závěrném napětí na P-N přechodu

Při této polaritě procházejí přechodem pouze minoritní nositelé, ty nejsou z důvodu přehlednosti v modelu zakresleny. Závěrný proud je znázorněn ve V-A charakteristice (obr. 3.10). Jeho velikost jsou řádově pikoampéry, je téměř zanedbatelný.

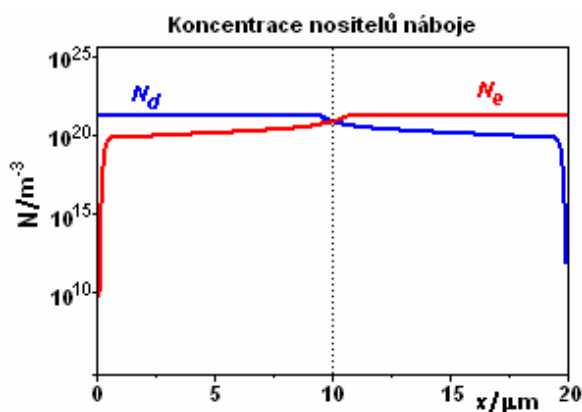


Obr. 3.10 V-A charakteristika P-N přechodu – závěrný proud

Pokud je připojeno napětí opačné polaritý, než je difúzní napětí (posuvník vpravo od nulové polohy), snižuje se energetická bariéra a zmenšuje se šířka hradlové vrstvy. Pokud se tato napětí vyrovnají mohou elektrony volně procházet do polovodiče P, kde rekombinují s majoritními děrami a díry do polovodiče N, kde rekombinují s majoritními elektrony (obr. 3.11). Přechodem prochází proud. Zvýšená koncentrace elektronů v oblasti P a děr v oblasti N je patrná i z grafu na obr. 3.12.

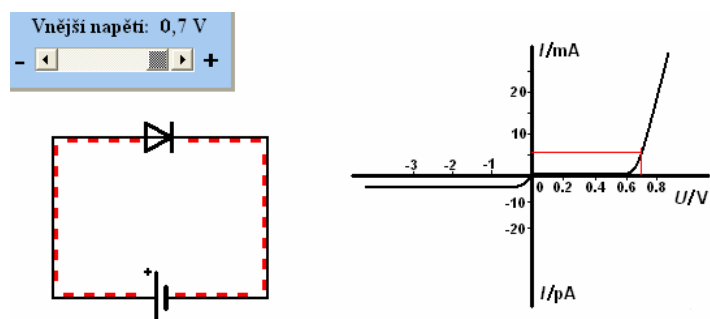


Obr. 3.11 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v propustném směru



Obr. 3.12 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu při průchodu proudem

Model dále nastiňuje využití usměrňujících účinků P-N přechodu v usměrňovacích diodách. V dolní části okna je umístěna její schématická značka, připojení ke zdroji napětí a V-A charakteristika, na níž je zakreslována aktuální situace. Pokud napětí v propustném směru přesáhne hodnotu 0,6V, začne diodou procházet proud, znázorněný čárkovanými čarami (obr. 3.13).



Obr. 3.13 Usměrňovací dioda s V-A charakteristikou

3.1.3 Zenerův jev

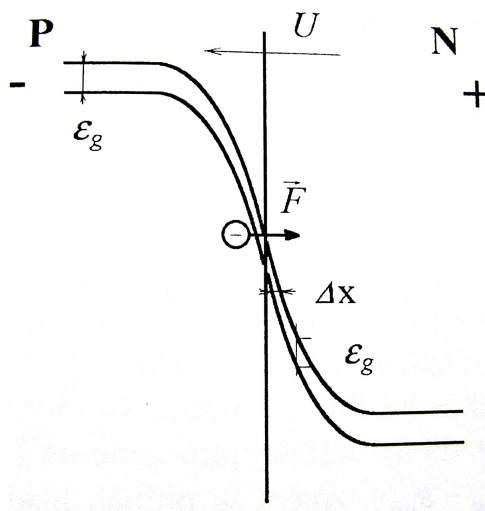
Teorie:

Jedná se o tunelový jev na P-N přechodu v závěrném směru. Tunelový jev znamená, že elektron je schopen překonat potenciálovou bariéru i když má nižší energii než představuje bariéra. Pomocí kvantové mechaniky lze odvodit nenulovou pravděpodobnost tunelování skrz bariéru, pokud je dostatečně tenká:

$$D = \left[1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{U_0^2}{E \cdot (U_0 - E)} \cdot \sinh^2 \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot (U_0 - E)}{\hbar^2}} \cdot a \right]^{-1},$$

kde U_0 je výška bariéry, a její šířka, E je energie částice s hmotností m a $\hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi}$, h je Planckova konstanta.[3] str.25

V případě závěrně polarizovaného P-N přechodu představuje výšku bariéry šířka zakázaného pásu (ϵ_g). V hradlové vrstvě je velká intenzita elektrického pole, působící na elektrony silou $\vec{F}$. Při dostatečně velkém napětí U je šířka bariéry Δx natolik malá, že přes něj mohou elektrony z valenčního pásu polovodiče typu P přejít do vodivostního pásu polovodiče typu N. Tím dochází ke generování páru elektron-díra, což způsobí nárůst závěrného proudu (obr. 4.1).

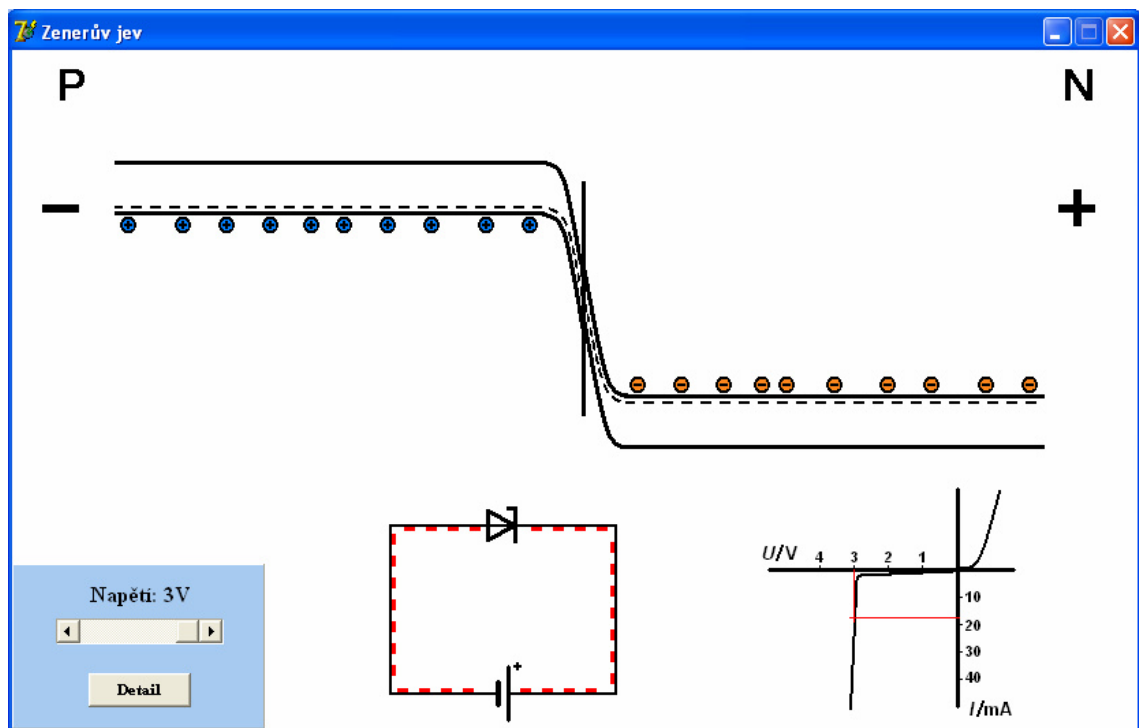


Obr. 4.1 Podstata Zenerova jevu[3]

Zenerova jevu se využívá v Zenerových (stabilizačních) diodách s průrazným napětím do 6V. K tunelování je totiž potřeba vysoká koncentrace nositelů náboje, aby byl přechod dostatečně úzký. Vyšší průrazné napětí vyžaduje nižší koncentraci nositelů, z čehož vyplývá větší tloušťka přechodu a tím i nižší pravděpodobnost tunelování.

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 4.2. Podstatnou část okna zabírá zobrazení pásového modelu energetických hladin. Vlevo dole je umístěn ovládací panel. Nachází se zde Scrollbar, kterým je možné měnit hodnotu vnějšího napětí od 0 V do 3 V po 1 V a tlačítko **Detail**, pro otevření nového okna, ve kterém probíhá Zenerův jev zpomaleně a ve větším měřítku. V dolní části se nachází zapojení stabilizační diody, využívající tunelového jevu, a její V-A charakteristika.



Obr. 4.2 Provedení modelu Zenerova jevu

Při posunutí Scrollbaru je volána procedura, která provádí změnu pásového schématu. U tohoto modelu se energetické hladiny nemění plynule pomocí funkce $\arctg(x)$, ale jsou zde pouze vloženy čtyři obrázky pro napětí 0V, 1V, 2V a 3V. Ty se zviditelňují podle aktuální hodnoty Scrollbaru:

```
image1.Visible:=false;
image2.Visible:=false;
image3.Visible:=false;
image4.Visible:=false;
Form1.FImages2[scrollbar1.position+1].visible:=true;
```

Při změně napětí se dále provádí posunutí polohy obrázků elektronů a děr:

```
if scrollbar1.position=0 then begin
  for i:=11 to 20 do
    Form1.FImages[i].top:=208;
  for i:=1 to 10 do
    Form1.FImages[i].top:=182;
end;

if scrollbar1.position=1 then begin
  for i:=11 to 20 do
    Form1.FImages[i].top:=184;
  for i:=1 to 10 do
    Form1.FImages[i].top:=208;
end;
...atd.
```

Pokud hodnota vnějšího napětí dosáhne 3V, jsou zviditelněny čárky v obvodu, znázorňující protékající proud a je spuštěn časovač:

```
if scrollbar1.position=3 then begin  
    image37.visible:=true;  
    image38.visible:=true;  
    image39.visible:=true;  
    image40.visible:=true;  
    image41.visible:=true;  
    image42.visible:=true;  
    Timer1.Enabled:=true;  
end;
```

Časovač posouvá elektrony a díry vždy o čtyři pixely:

```
for i:=1 to 10 do  
    Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left+4;  
for i:=11 to 20 do  
    Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left-4;
```

Když je díra posunuta až na okraj, přesune se opět doprostřed i s odpovídajícím elektronem:

```
for i:=11 to 20 do  
    if Form1.FImages[i].Left<100 then begin  
        Form1.FImages[i].left:=425;  
        Form1.FImages[i-10].left:=430;  
    end;
```

Za pomoci proměnné j se posouvají čárky v obvodu, znázorňující protékající proud:

```
j:=j+1;  
if j=8 then j:=0;  
image37.top:=350+2*j;  
image38.top:=364-2*j;  
image39.left:=291-2*j;  
image40.left:=384-2*j;  
image41.left:=278+2*j;  
image42.left:=368+2*j;
```

V-A charakteristika je vložena jako čtyři obrázky s různě vyznačenou aktuální hodnotou. Jejich viditelnost se mění v závislosti na poloze Scrollbaru:

```
if scrollbar1.position=0 then begin  
    image33.Visible:=true;  
    image34.Visible:=false;  
    image35.Visible:=false;  
    image36.Visible:=false; end;  
...atd.
```


Pokud je nastaveno vnější napětí 3V, je aktivováno tlačítko **Detail**:

```
if scrollbar1.position=3 then button1.Enabled:=true;
```

Tímto tlačítkem je otevíráno nové okno:

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);  
begin  
Form2.ShowModal;  
end;
```

V tomto okně probíhá Zenerův jev stejným způsobem jako v celkovém modelu pouze zpomaleně. Při každém protunelování elektronu je navíc šipkou znázorněn jeho směr:

```
if (image3.Left>190)and(image3.Left<195)  
then image2.visible:=true  
else image2.visible:=false;
```

Přičemž `image3` je obrázek díry a `image2` šipka.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „4_Zenerův jev.exe“.

Zobrazeno je pásové schéma P-N přechodu, v rovnovážném stavu bez přiloženého vnějšího napětí, majoritní nositelé náboje (elektrony – červené, díry – modré) a Fermiho energetická hladina (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno jednoduchým obvodem se Zenerovou diodou a V-A charakteristikou. Na ovládacím panelu je nyní možné pouze zvyšování vnějšího napětí v závěrném směru pomocí posuvníku.

2. Zvyšování vnějšího **napětí** na 2 V (polarita označena +, – na okrajích pásového schématu).

Dochází k zakřivování energetických hladin. Zároveň se zmenšuje šířka zakázaného pásu.

3. Zvýšení vnějšího **napětí** na 3V.

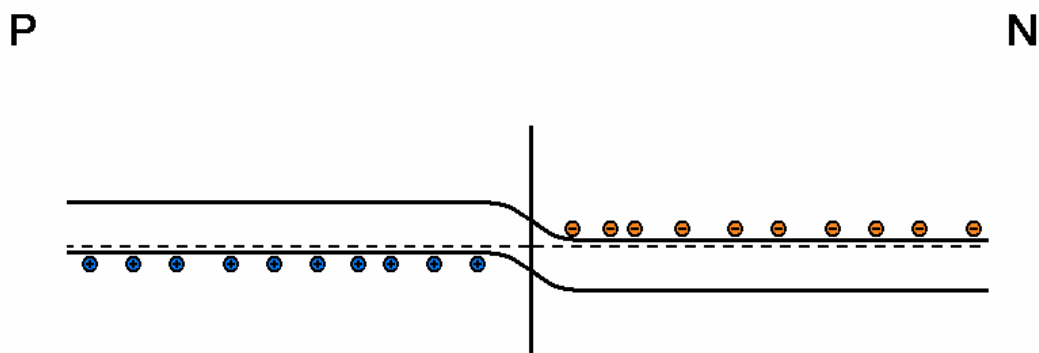
Dojde k dalšímu zakřivení energetických hladin. Zakázaný pás je dostatečně tenký pro tunelování elektronů. Přechodem protéká proud, znázorněný i ve V-A charakteristice a v obvodu pohybujícími se čárkovanými čárkami. Nyní je k dispozici tlačítko **Detail**.

4. Stisknutí tlačítka **Detail**.

Je otevřeno nové okno se zvětšeným výřezem centrální oblasti P a N přechodu. Děje zde probíhají pomaleji, aby byl zřetelně vidět vznik páru elektron-díra a následné protunelování elektronu do vodivostního pásu oblasti N.

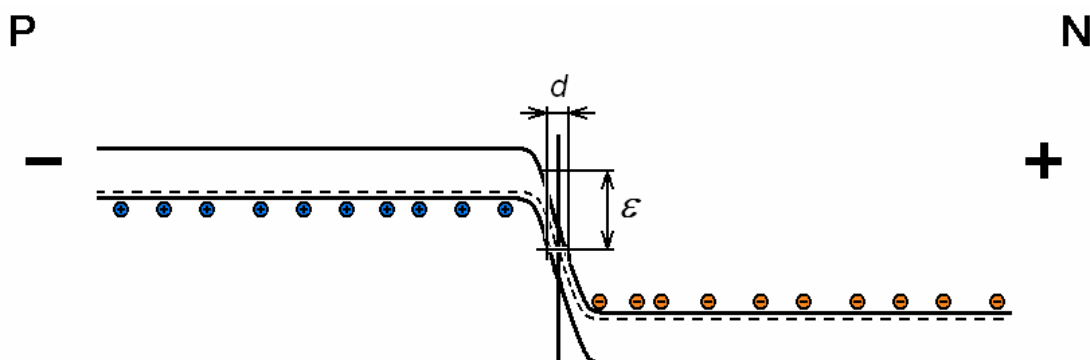
Výklad:

Po spuštění se otevře okno, kde jsou znázorněny energetické hladiny v oblasti přechodu P-N. Na posuvníku je nastaveno vnější napětí 0V, uspořádání energetických hladin odpovídá rovnovážnému stavu přechodu P-N bez přiloženého napětí (jako u modelu „1_P-N“ po spojení obou částí a ustálení) (obr. 4.3). Pro zjednodušení zde nejsou zobrazeni minoritní nositelé, ani ionty příměsí.



Obr. 4.3 P-N přechod bez připojení vnějšího napětí

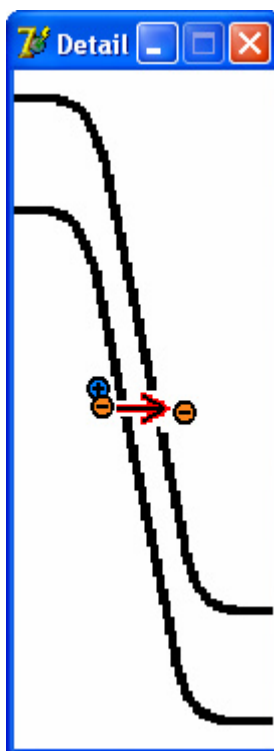
Pomocí posuvníku lze na P-N přechod připojit vnější napětí. Pokud bychom připojili napětí v propustném směru, choval by se stejně jako model „1_P-N“. Propustný směr je však pro vysvětlení Zenerova jevu nepodstatný, proto je možné nastavovat pouze napětí v závěrném směru. Při jeho zvyšování dochází ke zvyšování energetické bariéry ϵ , zároveň se ale zmenšuje šířka zakázaného pásu d (obr. 4.4).



Obr. 4.4 P-N přechod po připojení vnějšího napětí v závěrném směru

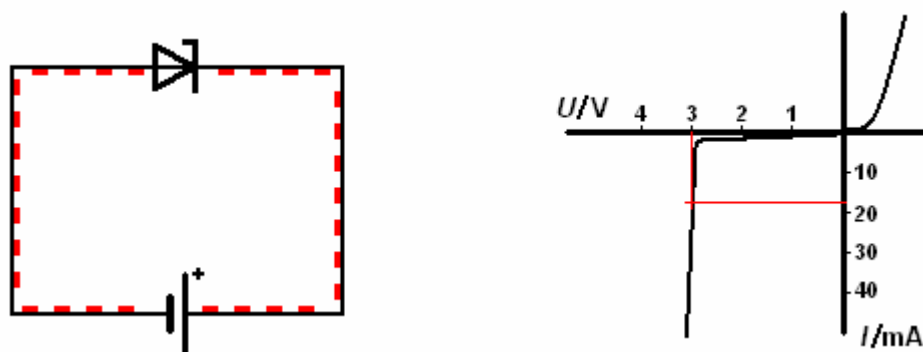
Při určité hodnotě, která se nazývá průrazné napětí (v našem případě 3V), je šířka zakázaného pásu dostatečně malá, aby elektron mohl překonat tuto energetickou bariéru a přeskočit z valenčního pásu oblasti P do vodivostního pásu oblasti N. Zde se již účastní vedení proudu, putováním ke kladnému pólu zdroje. Ve valenčním pásu po něm zůstane prázdná pozice – díra – putující k zápornému pólu. Proud prudce narůstá.

Tento děj je poměrně rychlý, proto je na ovládacím panelu umístěno tlačítko **[Detail]**, které je možné použít, pokud je nastaveno napětí 3V. Po jeho stisknutí se otevře nové okno, ve kterém probíhá děj zpomaleně (obr. 4.5). Je zde vidět, že elektrony přeskakují z valenčního do vodivostního pásu ve vodorovném směru. To znamená, že elektron má stále stejnou energii. Mění se pouze jeho poloha v krystalové mřížce.



Obr. 4.5 Tunelování elektronů přes energetickou bariéru

V modelu je nastíněno využití tohoto jevu ve stabilizačních diodách. Tyto součástky se vyznačují velmi strmou charakteristikou v závěrném směru, proto jsou vhodné ke stabilizaci napětí (obr. 4.6).



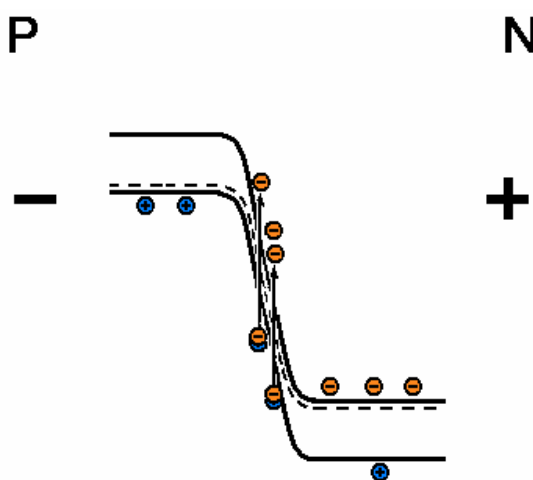
Obr. 4.6 Stabilizační dioda s V-A charakteristikou

Aby docházelo k Zenerovu jevu, musí být šířka zakázaného pásu co nejmenší, proto musí být polovodič silně dotován. Zenerova jevu se využívá u stabilizačních diod s průrazným napětím do 6V. Pro vyšší průrazné napětí je totiž třeba širší zakázaný pás, s tím však souvisí nižší pravděpodobnost tunelování.

3.1.4 Lavinový jev

Teorie:

Při přiložení závěrného napětí, začnou P-N přechodem procházet minoritní nositelé náboje, závěrný proud je však zanedbatelný. S rostoucím napětím roste intenzita elektrického pole na P-N přechodu. Přechod má proti zbytku diody velký odpor a proto se na něm rozloží většina přiloženého napětí. Při dostatečně velkém napětí může elektron urychlovaný silným elektrickým polem získat energii dostatečnou k vyražení valenčního elektronu. Nárazovou ionizací tak vzniká pár elektron-díra (obr. 5.1). Intenzita elektrického pole potřebná ke vzniku nárazové ionizace je kolem 10^7 V/m. Tyto elektrony mohou působit další ionizaci. Dochází tak k lavinovému nárůstu nositelů náboje a tím i proudu.



Obr. 5.1 Podstata lavinového jevu

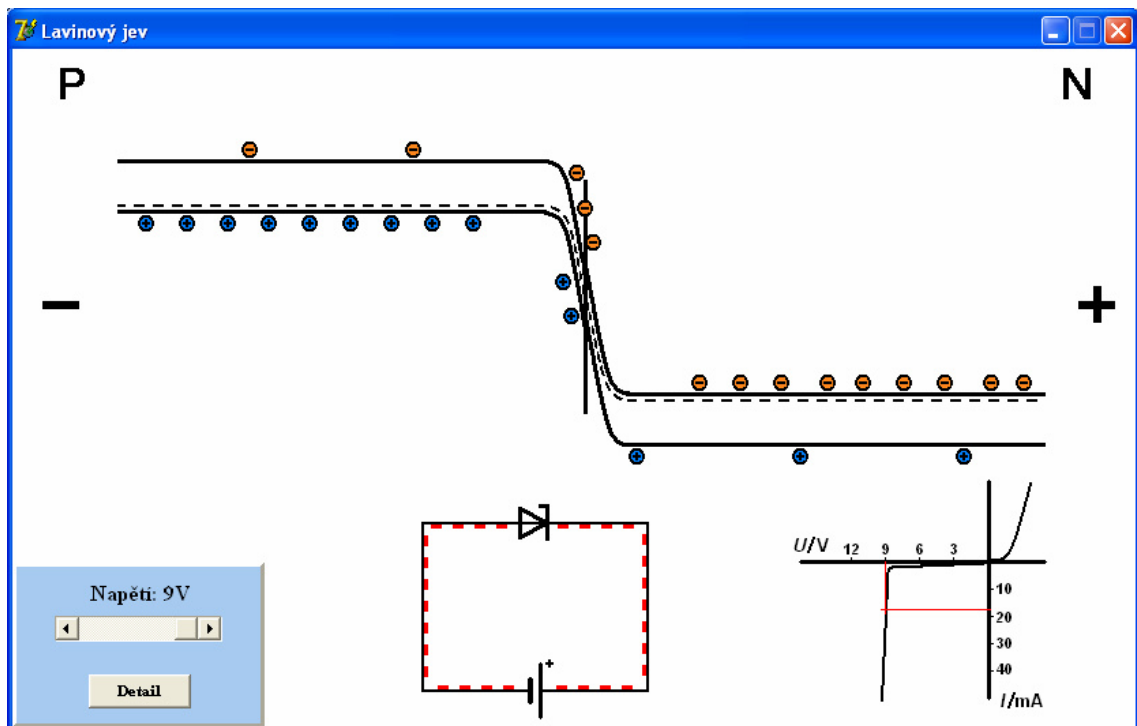
Lavinového jevu se využívá v Zenerových (stabilizačních) diodách s průrazným napětím vyšším než 6V. Při nižším napětí totiž dochází s větší pravděpodobností k Zenerovu jevu.

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 5.2. Podstatnou část okna zabírá zobrazení pásového modelu energetických hladin. Vlevo dole je umístěn ovládací panel. Nachází se zde Scrollbar, kterým je možné měnit hodnotu vnějšího napětí od 0 V do 9 V po 3 V a tlačítko **Detail**, kterým se otevírá nové okno se zpomaleným lavinovým jevem. V dolní části se nachází zapojení stabilizační diody, využívající lavinového jevu, a její V-A charakteristika.

Program pracuje stejně jako model „4_Zenerův jev“. Při posunutí Scrollbaru je volána procedura, která provádí změnu pásového schématu. Energetické hladiny se mění skokově pomocí čtyř obrázků pro napětí 0 V až 3 V. Ty se zviditelňují podle aktuální hodnoty Scrollbaru:

```
image1.Visible:=false;  
image2.Visible:=false;  
image3.Visible:=false;  
image4.Visible:=false;  
Form1.FImages2[scrollbar1.position+1].visible:=true;
```



Obr. 5.2 Provedení modelu lavinového jevu

Pokud je hodnota vnějšího napětí nenulová, je spuštěn první časovač, posouvající elektrony a díry. Majoritních nositelů je čtyřikrát více než minoritních, proto jsou majoritní nositelé posouváni vždy o jeden a minoritní o čtyři pixely. V okamžiku, kdy minoritní nositel dojde doprostřed okna, skočí na počátek. Na jeho původní místo skočí odpovídající majoritní nositel a pokračuje směrem k okraji:

```

for i:=13 to 15 do begin
    Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left+4;
    If Form1.FImages[i].Left=420 then
        Form1.FImages[i].Left:=60;
end;

for i:=1 to 12 do begin
    Form1.FImages[i].Left:=Form1.FImages[i].Left+1;
    if Form1.FImages[i].Left=780 then
        Form1.FImages[i].Left:=420;
end;
...atd.

```

Pokud je hodnota vnějšího napětí 9 V, je první časovač vypnut a zapne se druhý. Ten již posouvá majoritní i minoritní nositele vždy o čtyři pixely. Na každý minoritní elektron, který nyní dojde doprostřed připadají čtyři majoritní. Ty skočí na rozhraní téměř současně.

Za pomoci proměnné *j* se posouvají čárky v obvodu, znázorňující protékající proud:

```
j:=j+1;  
if j=8 then j:=0;  
image37.top:=350+2*j;  
image38.top:=364-2*j;  
image39.left:=291-2*j;  
image40.left:=384-2*j;  
image41.left:=278+2*j;  
image42.left:=368+2*j;
```

V-A charakteristika je vložena jako čtyři obrázky s různě vyznačenou aktuální hodnotou. Jejich viditelnost se mění v závislosti na poloze **Scrollbaru**:

```
if scrollbar1.position=0 then begin  
    image33.Visible:=true;  
    image34.Visible:=false;  
    image35.Visible:=false;  
    image36.Visible:=false; end;  
...atd.
```

Pokud je nastaveno vnější napětí 9V, je aktivováno tlačítko **Detail**:

```
if scrollbar1.position=3 then button1.Enabled:=true;
```

Tímto tlačítkem lze otevřít nové okno:

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);  
begin  
    Form2.ShowModal;  
end;
```

V tomto okně probíhá lavinový jev stejným způsobem jako v celkovém modelu, pouze zpomaleně. Při nárazové ionizaci je navíc šipkou znázorněn směr přeskoku elektronu:

```
image1.Left:=image1.Left+2;  
if (image1.left>122)and(image1.left<126) then begin  
    image4.Left:=118;  
    image5.Left:=114;  
end;  
if (image1.left>123)and(image1.left<128) then  
    image3.Visible:=true  
else image3.Visible:=false;
```

image1 a *image4* jsou obrázky elektronů, *image5* je obrázek díry a *image3* je šipka.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „5_Lavinový jev.exe“.

Zobrazeno je pásové schéma P-N přechodu, v rovnovážném stavu bez přiloženého vnějšího napětí, majoritní i minoritní nositelé náboje (elektrony – červené, díry – modré), Fermiho energetická hladina (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno jednoduchým obvodem se Zenerovou diodou a V-A charakteristikou. Na ovládacím panelu je nyní možné pouze zvyšování vnějšího napětí v závěrném směru pomocí posuvníku.

2. Zvyšování vnějšího **napětí** na **6 V** (polarita označena +, – na okrajích pásového schématu).

Dochází k zakřivování energetických hladin. Přechodem prochází proud v podobě minoritních nositelů, ten je však vzhledem k jejich koncentraci zanedbatelný. Nositelé jsou v blízkosti rozhraní P-N urychlováni silným elektrickým polem.

3. Zvýšení vnějšího **napětí** na **9V**.

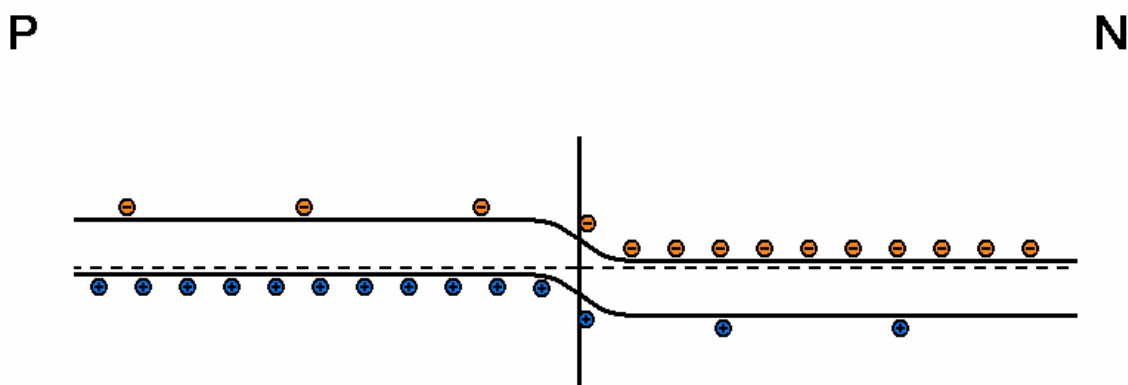
Dojde k dalšímu zakřivení energetických hladin. Elektrony (jejichž pohyblivost je větší než u děr) jsou v blízkosti rozhraní P-N urychlovány natolik, že mohou při nárazu do krystalové mřížky vyrazit další elektron z valenčního do vodivostního pásu. Přechodem protéká proud, znázorněný i ve V-A charakteristice a v obvodu pohybujícími se čárkovanými čárkami. Nyní je k dispozici tlačítko **Detail**.

4. Stisknutí tlačítka **Detail**.

Je otevřeno nové okno se zvětšeným výřezem centrální oblasti P a N přechodu. Děje zde probíhají pomaleji, aby byl zřetelně vidět vznik páru elektron-díra a následný směr pohybu elektronu.

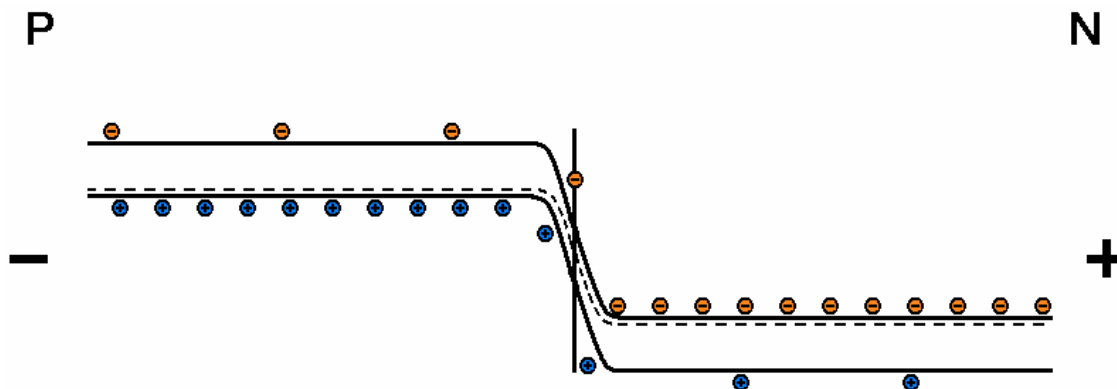
Výklad:

Po spuštění se otevře okno, kde je znázorněno pásové schéma energetických hladin P-N přechodu v rovnovážném stavu (obr. 5.3). Na posuvníku je nastaveno vnější napětí 0V. V tomto modelu jsou narozdíl od ostatních kromě majoritních zobrazeny i minoritní nositelé náboje, kteří při tomto jevu hrají důležitou roli. Je třeba zdůraznit, že počty elektronů a děr ani zdaleka neodpovídají realitě. Ve skutečnosti je minoritních nositelů zhruba 10^{10} krát méně než majoritních.



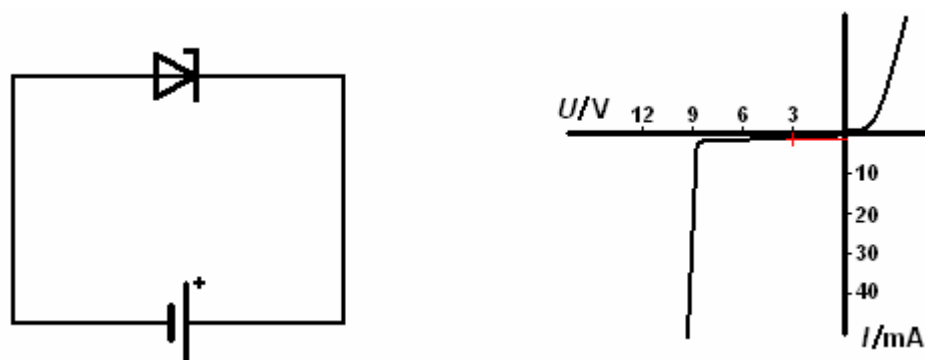
Obr. 5.3 P-N přechod bez vnějšího napětí, zobrazeny jsou i minoritní nositelé

Pomocí posuvníku lze na P-N přechod připojit vnější napětí. Propustný směr je pro vysvětlení lavinového jevu nepodstatný, proto je možné nastavovat pouze napětí v závěrném směru. Při zvyšování vnějšího napětí dochází k zakřivování energetických hladin (obr. 5.4).



Obr. 5.4 P-N přechod se závěrným napětím, přechodem procházejí minoritní nositelé

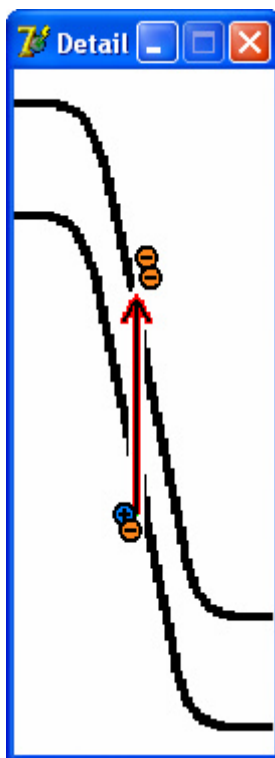
Pokud je hodnota vnějšího napětí nenulová, začnou přechodem procházet minoritní nositelé. Zde dochází ke zkreslení. Z modelu by se dalo soudit, že přechodem prochází proud. Avšak vzhledem k tomu, že minoritních nositelů je o několik řádů méně, je tento proud téměř nulový (řádově pikoampéry). Tuto skutečnost znázorňuje V-A charakteristika a obvod, kterým neprochází proud v podobě čárkovaných čárek (obr. 5.5).



Obr. 5.5 Při menším napětí než je napětí průrazné, stabilizační diodou téměř neprochází proud

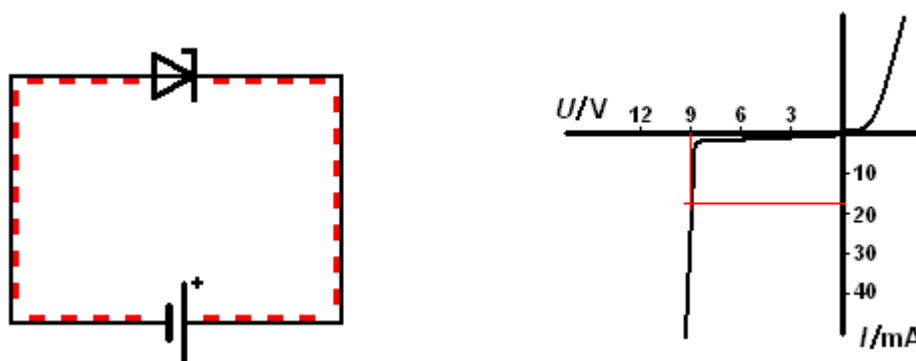
Hradlová vrstva má proti zbytku polovodiče podstatně větší odpor, proto se na něm rozloží většina napětí. V této úzké oblasti proto vzniká silné elektrické pole, které urychluje procházející minoritní nositele. Při určité hodnotě, které se nazývá průrazné napětí, (v našem případě 9 V), jsou elektrony mezi dvěma srážkami s krystalovou mřížkou urychleny natolik, že jejich energie stačí na vyražení dalšího elektronu z valenčního pásu do pásu vodivostního. Ve valenčním pásu po něm zůstává díra. Takto vzniklý volný elektron je také urychlován a způsobuje další ionizaci. Lavinově tak vzniká velký počet nositelů náboje, proud prudce vzrůstá.

Tento děj je poměrně rychlý, proto je na ovládacím panelu umístěno tlačítko **Detail**, které je možné použít, pokud je nastaveno napětí 9V. Po jeho stisknutí se otevře nové okno, ve kterém probíhá děj zpomaleně. Je zde dobře vidět, že elektrony přeskakují z valenčního do vodivostního pásu ve svislém směru (obr. 5.6). To znamená, že elektron se po nárazu nachází stále na stejném místě krystalové mřížky. Srážkou však získá energii na přechod na vyšší energetickou hladinu – do vodivostního pásu, kde mu již nic nebrání v cestě ke kladnému pólu zdroje. Díra putuje k pólu zápornému.



Obr. 5.6 Nárazovou ionizací se elektrony dostávají do vyšších energetických hladin

V modelu je nastíněno využití tohoto jevu ve stabilizačních diodách. Tyto součástky se vyznačují velmi strmou charakteristikou v závěrném směru, proto jsou vhodné ke stabilizaci napětí (obr. 5.7).



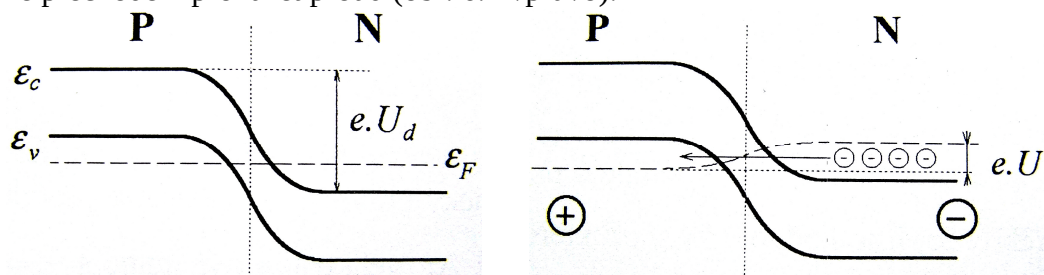
Obr. 5.7 Stabilizační dioda s V-A charakteristikou po dosažení průrazného napětí

Lavinového jevu se využívá ve stabilizačních diodách s průrazným napětím vyšším než 6V. Při nižším napětí totiž dochází s větší pravděpodobností k Zenerovu jevu.

3.1.5 Tunelový jev v propustném směru

Teorie:

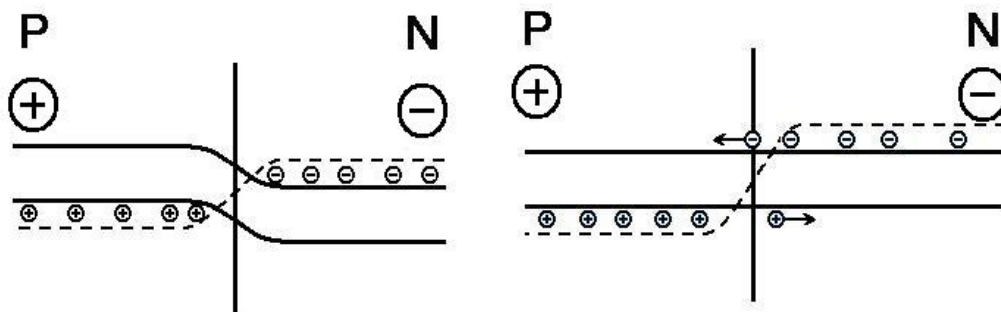
K tomuto jevu dochází v silně dotovaných polovodičích, kde Fermiho energetická hladina přechází u polovodiče typu P do valenčního pásu a u polovodiče typu N do pásu vodivostního (obr. 6.1 vlevo). Vysoká koncentrace elektronů a děr má dále za následek velmi malou šířku ochuzené vrstvy. Přes tak úzkou potenciálovou bariéru mohou elektrony snadno tunelovat. Po připojení malého napětí v propustném směru začne přechodem proházet proud (obr. 6.1 vpravo).



Obr. 6.1 Silně dotovaný P-N přechod a připojení malého napětí v propustném směru [3]

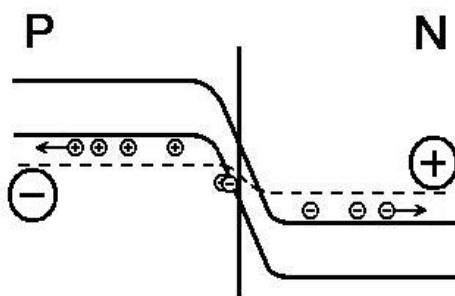
S rostoucím napětím se zvětšuje šířka zakázaného pásu, čímž se zhoršují podmínky pro tunelování. V okamžiku vyrovnání horní hranice valenčního pásu E_v polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu E_c polovodiče N klesá pohyb nositelů náboje na minimum (obr. 6.2 vlevo).

Při dalším zvyšování napětí se tunelová dioda chová jako běžná usměrňovací dioda. Po dosažení difúzního napětí mizí energetická bariéra a proud začne narůstat (obr. 6.2 vpravo).



Obr. 6.2 Zvyšování napětí v propustném směru

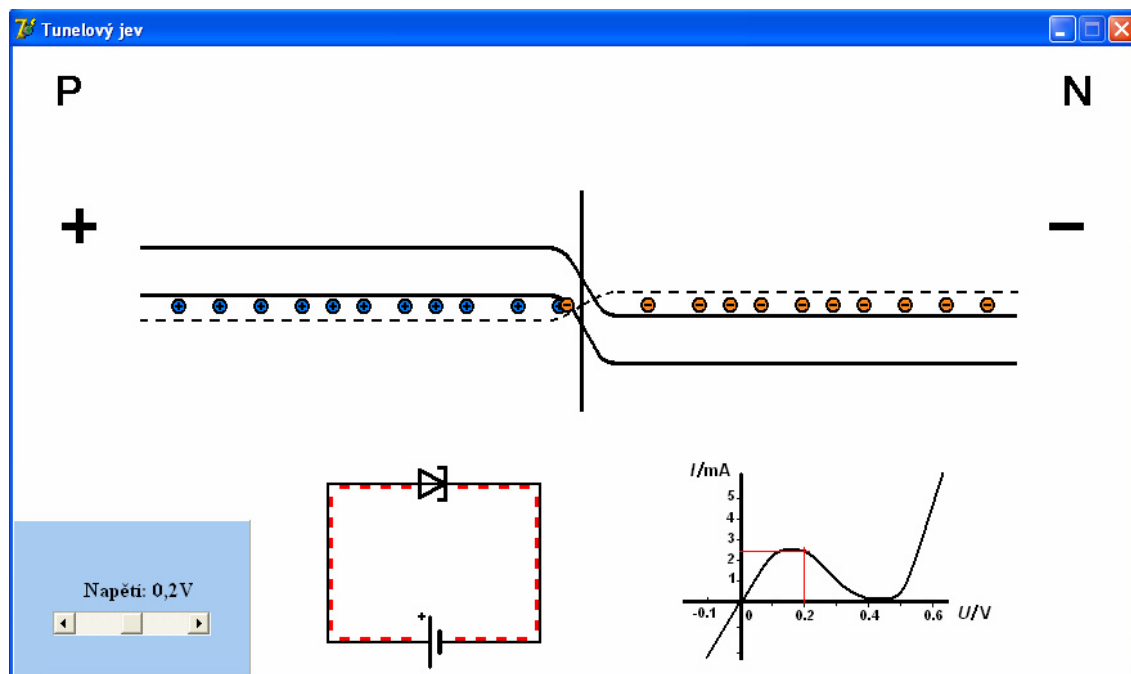
V závěrném směru jsou splněny podmínky pro tunelování, proto dochází k okamžitému nárůstu proudu (obr. 6.3).



Obr. 6.3 Připojení napětí v závěrném směru

Realizace:

Provedení modelu je stejné jako u předchozích (obr. 6.4). V horní části se nachází zobrazení pásového modelu energetických hladin. V dolní části je umístěn ovládací panel se Scrollbarem (rozsah -1 až 3), pro změnu vnějšího napětí v rozsahu $-0,1$ V až $0,6$ V. Dále je zobrazeno zapojení tunelové diody, využívající tunelového jevu a její V-A charakteristika.



Obr. 6.4 Provedení modelu tunelového jevu

Energetické hladiny se při posunutí Scrollbaru mění skokově. Je zde vloženo pět obrázků pro různá napětí, které se zviditelňují podle jeho aktuální hodnoty:

```
if scrollbar1.position=-1 then begin
    label1.Caption:='Napětí: -0,1V';
    image1.Visible:=true;
    image2.Visible:=false;
    image3.Visible:=false;
    image4.Visible:=false;
    image31.Visible:=false;
end;
```

Stejným způsobem je provedena i změna ve V-A charakteristice.

Protože se elektrony a díry pohybují ve třech různých polohách Scrollbaru, jsou zde použity tři časovače. Časovač pro zápornou hodnotu napětí posouvá elektrony doprava a díry doleva, zbylé dva opačně:

```
for i:=1 to 11 do
    Form1.FImage[i].left:=Form1.FImage[i].left+4;
for i:=12 to 22 do
    Form1.FImage[i].left:=Form1.FImage[i].left-4;
...atd.
```

Pokud obvodem protéká proud, jsou zviditelněny obrázky čárkovaných čar. Ty se posouvají pomocí proměnné j :

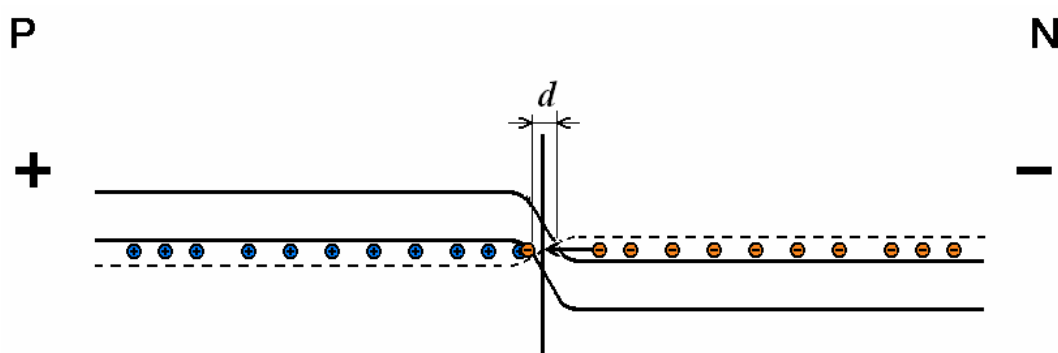
```
j:=j+1;  
if j=8 then j:=0;  
image39.top:=342+2*j;  
image40.top:=358-2*j;  
image41.left:=262-2*j;  
image42.left:=352-2*j;  
image43.left:=246+2*j;  
image44.left:=336+2*j;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**6_Tunelový jev.exe**“.
Zobrazeno je pásové schéma silně dotovaného P-N přechodu, v rovnovážném stavu bez přiloženého vnějšího napětí, majoritní nositelé náboje (elektrony – červené, díry – modré), Fermiho energetická hladina (čárkovaná čára). Pásové schéma je doplněno jednoduchým obvodem se Zenerovou diodou a V-A charakteristikou. Na ovládacím panelu je možné nastavovat hodnotu vnějšího napětí v propustném i závěrném směru pomocí posuvníku.
2. Nastavení vnějšího **napětí: 0,2 V** (polarita označena **+**, **-** na okrajích pásového schématu).
Dochází k vyrovnávání energetických hladin. Díky silné dotaci obou polovodičů, jsou splněny podmínky pro tunelování elektronů. Elektrony v souladu s vnějším napětím tunelují z vodivostního pásu polovodiče N do valenčního pásu polovodiče P, kde dochází k rekombinaci s děrami.
3. Zvýšení vnějšího **napětí na 0,4 V**.
Dojde k dalšímu vyrovnávání energetických hladin. Elektrony přestávají tunelovat, protože došlo k vyrovnávání horní hranice valenčního pásu polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu polovodiče N.
4. Zvýšení vnějšího **napětí na 0,6 V**.
Dojde k vyrovnání energetických hladin. Elektrony mohou volně procházet do oblasti P, díry do oblasti N. V blízkosti rozhraní dochází k jejich rekombinaci.
5. Nastavení vnějšího **napětí: 0 V**.
6. Nastavení vnějšího **napětí: -0,1 V** (polarita označena **+**, **-** na okrajích pásového schématu).
Podmínky pro tunelování jsou splněny. Elektrony mohou snadno procházet přes bariéru v souladu s polaritou vnějšího napětí.

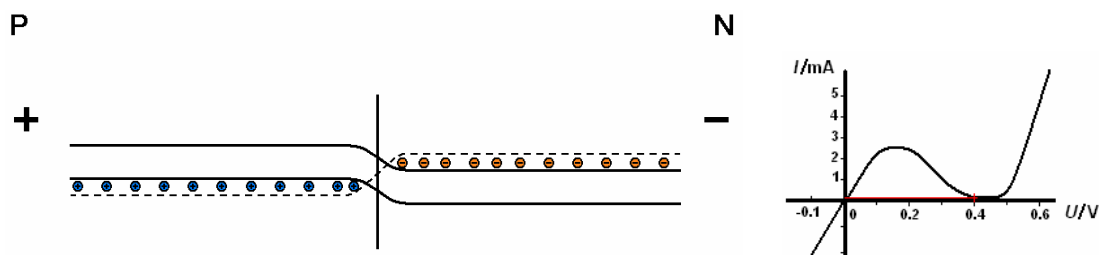
Výklad:

Po spuštění se otevře okno s pásovým znázorněním energetických hladin. Na ovládacím panelu je nastaveno vnější napětí 0 V, obvodem neprochází proud. Přechod P-N je v rovnováze, Fermiho energetické hladiny jsou vyrovnány. Jde o silně dotované polovodiče, proto se Fermiho hladina v polovodiči N nachází až ve vodivostním pásu, v polovodiči P v pásu valenčním. Díky silné dotaci polovodiče je hradlová vrstva dostatečně tenká, aby mohlo docházet k tunelování elektronů přes energetickou bariéru, kterou představuje šířka zakázaného pásu d (obr. 6.5). K tomu také začne docházet ihned po připojení zdroje napětí v propustném směru (posuvník vpravo od nulové polohy). Protunelované elektrony v polovodiči P rekombinují s děrami. Z kladného pólu zdroje jsou dodávány nové díry a ze záporného elektrony. P-N přechodem nyní prochází proud, což je znázorněno i na obvodu v dolní části okna pomocí pohybujících se čárkovaných čárek. Zároveň jsou ve V-A charakteristice vyznačeny aktuální hodnoty proudu a napětí.



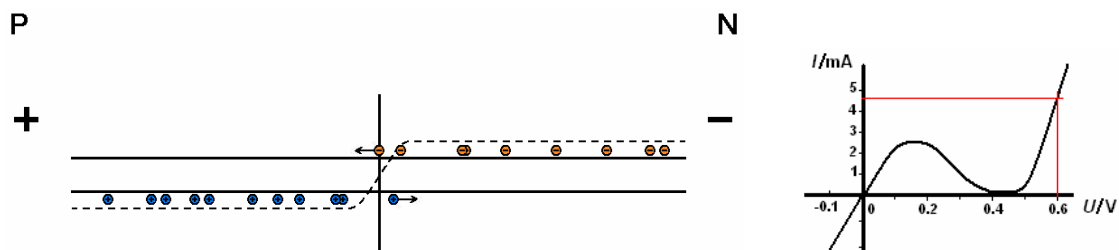
Obr. 6.5 Tunelování elektronů po připojení malého napětí v propustném směru

Při dalším zvýšení napětí dochází k vyrovnávání horní hranice valenčního pásu polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu polovodiče N. Pohyb nositelů náboje klesá na minimum (obr. 6.6).



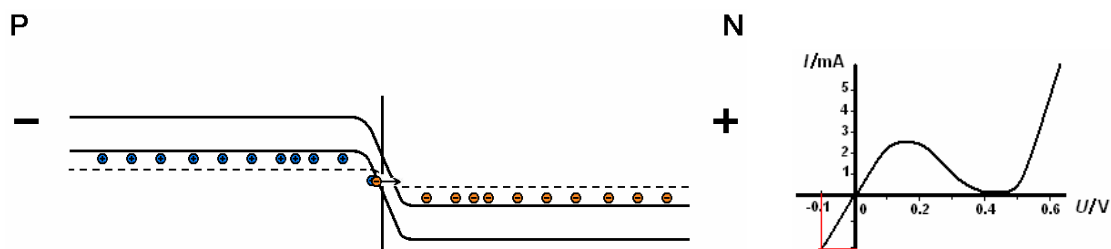
Obr. 6.6 Zvýšení napětí v propustném směru

Při dalším zvýšení napětí dochází k vyrovnání energetických hladin. Elektrony mohou volně procházet do polovodiče P, kde rekombinují s děrami. Díry volně procházejí do polovodiče N kde rekombinují s elektrony (obr. 6.7). Nyní se již tunelová dioda chová jako běžná usměrňovací dioda u níž bylo překročeno difúzní napětí a dochází k rychlému nárůstu proudu.



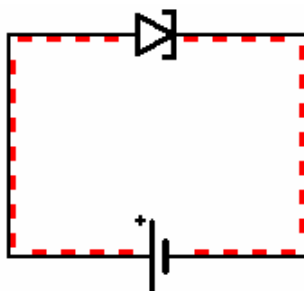
Obr. 6.7 Při dalším zvýšení napětí se struktura chová jako standardní P-N přechod

Protože jsou podmínky pro tunelování splněny již při nulovém napětí, při připojení napětí v závěrném směru (posuvník vlevo od nulové polohy) začne přechodem okamžitě protékat proud (obr. 6.8). Nyní elektrony tunelují v opačném směru, v souladu se směrem elektrického pole a putují ke kladnému pólu zdroje. Po protunelovaném elektronu zůstane ve valenčním pásu díra, která putuje k pólu zápornému.



Obr. 6.8 Po připojení napětí v závěrném směru dochází k tunelování elektronů

Tohoto druhu P-N přechodu se využívá v tunelových diodách. V okně je znázorněna její schématická značka připojená ke zdroji napětí. Proud procházející diodou je znázorněn červenými čárkovanými čarami, které se v souladu s ním pohybují (obr. 6.9).

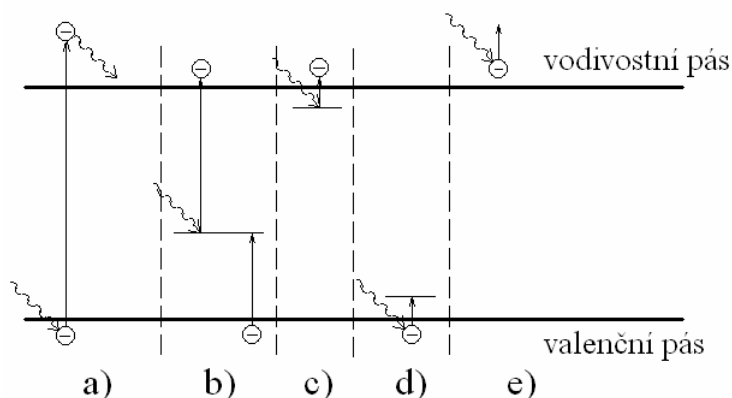


Obr. 6.9 Tunelová dioda připojená ke zdroji napětí

3.1.6 Fotoelektrické jevy

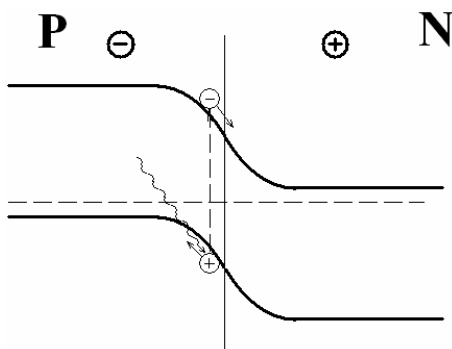
Teorie:

Pokud dopadá na polovodič světlo, může docházet k fotoelektrickým jevům. U čistých polovodičů může být foton pohlcen elektronem ve valenčním pásu. Elektron tak získá energii pro přechod do pásu vodivostního, ve valenčním pásu po něm zůstává díra (obr. 7.1 a). U příměsových polovodičů je více možností. Dopadající foton může být pohlcen elektronem příměsi nacházející se uvnitř zakázaného pásu. Ten přechází do pásu vodivostního a na jeho původní místo přeskočí elektron z valenčního pásu, po kterém opět zůstane ve valenčním pásu díra (obr. 7.1 b). Opět dostáváme dvojici nositelů náboje. Další možností je pohlcení fotonu elektronem příměsi, nacházející se v blízkosti vodivostního pásu (obr. 7.1 c). Jeho původní místo je od valenčního pásu energeticky příliš vzdálené, aby bylo obsazeno jiným elektronem valenčního pásu. Tímto způsobem dochází pouze ke vzniku volných elektronů. Dále může dojít k excitaci elektronu valenčního pásu na energeticky blízkou pozici příměsi (obr. 7.1 d). Tímto způsobem se zvyšuje koncentrace děr. Může dojít i k excitaci elektronu vodivostního pásu na některou vyšší pozici vodivostního pásu (obr. 7.1 e). Tímto způsobem se však koncentrace nositelů náboje nemění.



Obr. 7.1 Různé druhy excitace [3]

Pokud k těmto jevům dochází v hradlové vrstvě P-N přechodu, nově vzniklí nositelé putují díky difúznímu napětí do energeticky výhodnějších míst. Elektrony do části N a díry do části P (obr. 7.2). Tito nositelé mohou tvořit proud ve vnějším obvodu, část N se chová jako záporný pól zdroje, část P jako pól kladný. Tento jev se nazývá fotovoltaický. Vzniklé fotoelektrické napětí způsobuje vyrovnávání energetických hladin, proto je omezeno napětím difúzním.

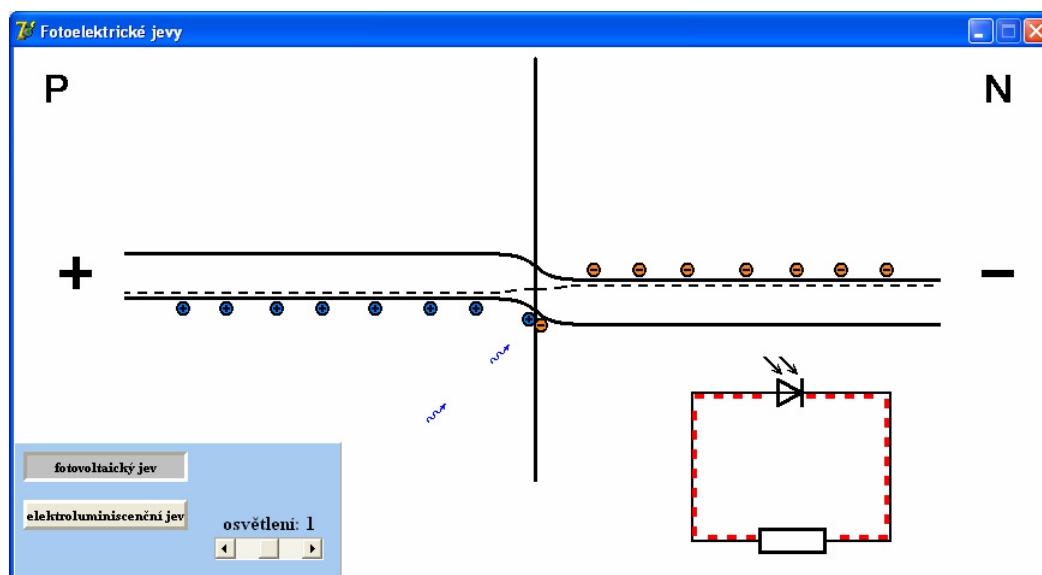


Obr. 7.2 Princip fotovoltaického jevu [3]

Jev opačný k jevu fotovoltaickému se nazývá elektroluminiscenční jev. Pokud dochází u speciálních P-N přechodů v propustném směru k rekombinaci elektronů a děr v rekombinačních centrech, jsou emitovány fotony. Vlnová délka emitovaného světla je dána umístěním energetické hladiny rekombinačního centra uvnitř zakázaného pásu.

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 7.3. Podstatnou část okna zabírá zobrazení pásového modelu energetických hladin. Vlevo dole je umístěn ovládací panel. Nacházejí se zde tlačítka na přepínání mezi fotovoltaickým a elektroluminiscenčním jevem. Dále Scrollbar (s rozsahem 0-2), kterým je možné měnit hodnotu vnějšího napětí při elektroluminiscenčním jevu a osvětlení při jevu fotovoltaickém. V pravé dolní části se nachází buď zapojení fotodiody nebo elektroluminiscenční diody (LED – Light-Emitting Diode).



Obr. 7.3 Provedení modelu fotoelektrických jevů

Pro přepínání mezi dvěma jevy je použita komponenta „panel“, která má na rozdíl od tlačítka „button“ širší možnosti co se týče barevnosti a zvýraznění. Při kliknutí na jeden z panelů dojde k jeho zvýraznění, zviditelnění a skrytí panelů s obvodem (panel4, panel5). Scrollbary jsou zde použity dva, pro každý z jevů jeden, proto dojde při přepnutí na druhý jev k jejich záměně:

```
procedure TForm1.Panel2Click(Sender: TObject);
begin
  if panel2.Color=clbtnface then begin
    timer1.enabled:=false;
    panel2.BevelOuter:=bvlowered;
    panel2.Color:=clsilver;
    panel3.BevelOuter:=bvraised;
    panel3.Color:=clbtnface;
    scrollbar1.Position:=0;
    scrollbar2.Position:=0;
    label1.visible:=true;
  end
```



```

scrollbar1.Visible:=true;
label2.visible:=false;
scrollbar2.Visible:=false;
panel4.Visible:=false;
panel5.Visible:=true;

```

Energetické hladiny se při posunutí Scrollbaru mění skokově. Je zde vloženo několik obrázků pro různá napětí, které se zviditelňují podle jeho aktuální hodnoty. Zároveň se provádí přepsání hodnoty napětí nebo osvětlení:

```

label1.Caption:=
'osvětlení: ' +inttostr(scrollbar1.Position);
if scrollbar1.position=1 then begin
    image30.Visible:=true;
    image1.Visible:=true;
    image4.Visible:=false;

```

Pokud je na Scrollbaru nastavena nenulová hodnota, je spuštěn jeden z časovačů, posouvající elektrony a díry. U elektroluminiscenčního jevu jsou nositelé posouváni do středu struktury, po dosažení rozhraní P-N jsou přemístěni na okraje a posun se znovu opakuje. U fotovoltického jevu jsou nositelé náboje naopak přemístěni vždy doprostřed a putují k okrajům:

```

for i:=1 to 8 do Fimages[i].left:=Fimages[i].left-2;
for i:=17 to 24 do begin
    Fimages[i].left:=Fimages[i].left+2;
    if Fimages[i].left>425 then begin Fimages[i].Left:=101;
                                                Fimages[i-16].Left:=755;
    end;
end;

```

Zároveň dochází k posouvání obrázků fotonů a čárek v obvodu, znázorňujících proud:

```

image16.Left:= image16.Left-round(4/scrollbar2.Position);
image16.top:= image16.top+round(4/scrollbar2.Position);
image17.Left:= image17.Left-round(4/scrollbar2.Position);
image17.top:= image17.top+round(4/scrollbar2.Position);
...atd.

j:=j+1;
if j=8 then j:=0;
image49.Left:=21+2*j;
image50.Left:=114+2*j;
image51.Left:=39-2*j;
...atd.

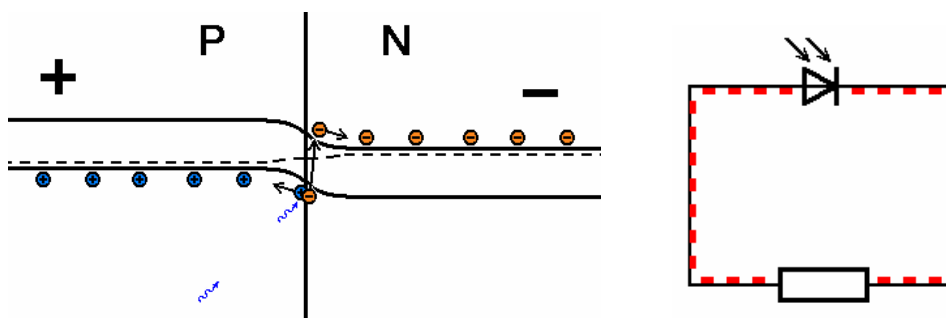
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „7_Fotoelektrické jevy.exe“.
Zobrazeno je pásové schéma P-N přechodu v rovnovážném stavu s majoritními nositeli náboje (elektrony – červené, díry – modré) a Fermiho energetickou hladinou (čárkovaná čára). Na ovládacím panelu je možné tlačítky přepínat mezi fotovoltaiickým a elektroluminiscenčním jevem.
2. Přepnutí do režimu: **fotovoltaiický jev**.
Pomocí posuvníku lze nastavit různé hodnoty osvětlení.
3. Nastavení **osvětlení: 1**.
Na rozhraní P-N dopadají fotony. Při jejich střetu s krystalovou mřížkou dochází k excitaci elektronů z valenčního pásu do pásu vodivostního. Na P-N přechodu vzniká fotovoltaiické napětí (polarita znázorněna +, – na okrajích pásového schématu). Po připojení zátěže začne procházet elektrický proud (schéma jednoduchého obvodu vpravo dole). Vzniklé napětí částečně vyrovnává energetické hladiny.
4. Nastavení **osvětlení: 2**.
Na rozhraní P-N dopadá více fotonů. Vzniká více nositelů náboje, tím pádem i větší napětí, které ještě více vyrovnává zakřivení energetických hladin.
5. Přepnutí do režimu: **elektroluminiscenční jev**.
Pomocí posuvníku lze nastavit různé hodnoty vnějšího napětí.
6. Nastavení **napětí: 1 V** (polarita znázorněna +, – na okrajích pásového schématu).
Dojde k vyrovnání energetických hladin, P-N přechodem začne procházet proud. Při rekombinaci elektronů a děr na rozhraní P-N dochází k emisi fotonů.
7. Nastavení **napětí: 2 V**.
Energetické hladiny se zakříví ve směru pohybu nositelů náboje. Elektrony a díry se díky většímu napěťovému spádu pohybují rychleji a je emitováno více fotonů.

Výklad:

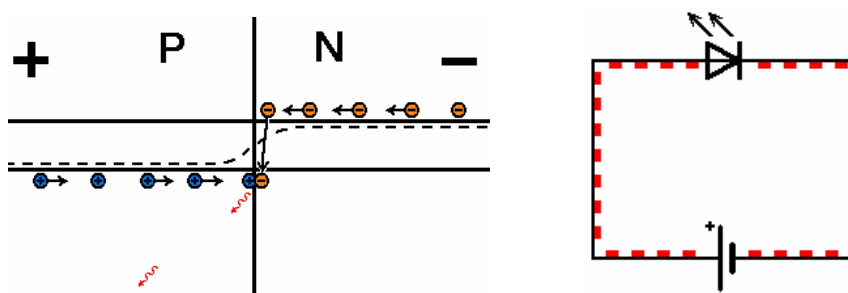
Po spuštění se otevře okno s pásovým znázorněním energetických hladin. Model se nachází v režimu: **fotovoltaický jev**. Na P-N přechod nedopadá světlo (osvětlení: 0), přechod se nachází v rovnovážném stavu s vyrovnanými Fermiho hladinami. Pokud na přechod dopadají fotony (**osvětlení: 1**), začnou vznikat páry elektron-díra. Elektrony putují do energeticky výhodnějších pozic v polovodiči N, díry do polovodiče P. Struktura se chová jako zdroj napětí.



Obr. 7.4 Fotovoltaický jev

Po připojení zátěže začne obvodem protékat proud (obr. 7.4). Při zvýšení osvětlení (**osvětlení: 2**) způsobuje větší množství dopadajících fotonů vznik většího množství nositelů náboje. Fotovoltaické napětí vzroste, dojde však k dalšímu vyrovnání energetických hladin, proto je elektromotorické napětí omezeno napětím difúzním. Tohoto jevu je využíváno ve fotodiodách.

Model **elektrolumiscenčního jevu** znázorňuje inverzní situaci. Při **napětí: 0 V**, je P-N přechod v rovnovážném stavu s vyrovnanými Fermiho hladinami. Po připojení vnějšího napětí v propustném směru o velikosti difúzního napětí (**napětí: 1,7 V** – pro zelenou LED), jsou vyrovnány energetické hladiny a přechodem začnou procházet nositelé náboje. Při jejich rekombinaci jsou emitovány fotony (obr. 7.5). Při dalším zvýšení napětí jsou energetické hladiny zakřiveny ve směru pohybu nositelů náboje, dochází k jejich rychlejšímu pohybu a k emitování většího množství fotonů. Využití tohoto jevu v LED je znázorněno jednoduchým obvodem.



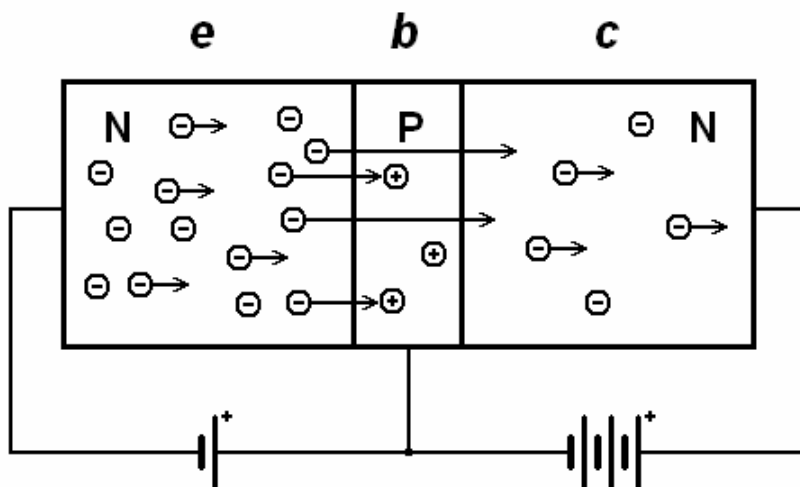
Obr. 7.5 Elektrolumiscenční jev

3.1.7 Tranzistorový jev

Teorie:

Tranzistorový jev se uplatňuje v polovodičových strukturách se dvěma usměrňujícími P-N přechody, vytvořenými v jediném monokrystalu. Může být buď typu NPN, pokud je prostřední oblast vodivosti typu P, nebo PNP, pokud je prostřední oblast vodivosti typu N. Aby docházelo ke vzájemné interakci mezi oběma P-N přechody, musí být jejich vzdálenost menší než je difúzní délka minoritních nositelů střední oblasti – báze (*b*). Proto je velmi malá šířka báze nutnou podmínkou vzniku tranzistorového jevu. Další podmínkou je výrazně větší koncentrace majoritních nositelů náboje v jedné krajní oblasti než v bázi. Tato oblast se nazývá emitor (*e*), druhou krajní oblast nazýváme kolektor (*c*).

Pro pochopení podstaty tranzistorového jevu uvažujeme strukturu NPN, přičemž přechod emitor-báze je polarizován v propustném směru (napětí U_{be}), přechod báze-kolektor (napětí U_{bc}) ve směru závěrném (obr. 8.1). Z báze procházejí díry to emitoru, kde rekombinují s majoritními elektrony. Elektrony z emitoru procházejí do báze. Pokud by báze byla dostatečně široká, všechny elektrony by zrekombinovaly s majoritními děrami. Báze je však užší než je difúzní délka elektronů, která je navíc posílena silnou dotací emitoru. Proto zrekombinuje pouze malá část elektronů, většina je zachycena přechodem kolektor-báze, a putují dále přes kolektor do zdroje (tvoří kolektorový proud I_c).



Obr. 8.1 Princip tranzistorového jevu

Situaci lze (při zanedbání závislosti I_c na U_{bc}) popsat Shockleyho rovnicí:

$$I_c \approx I_e = I_0 \cdot \left(e^{\frac{eU_{be}}{kT}} - 1 \right), [5]$$

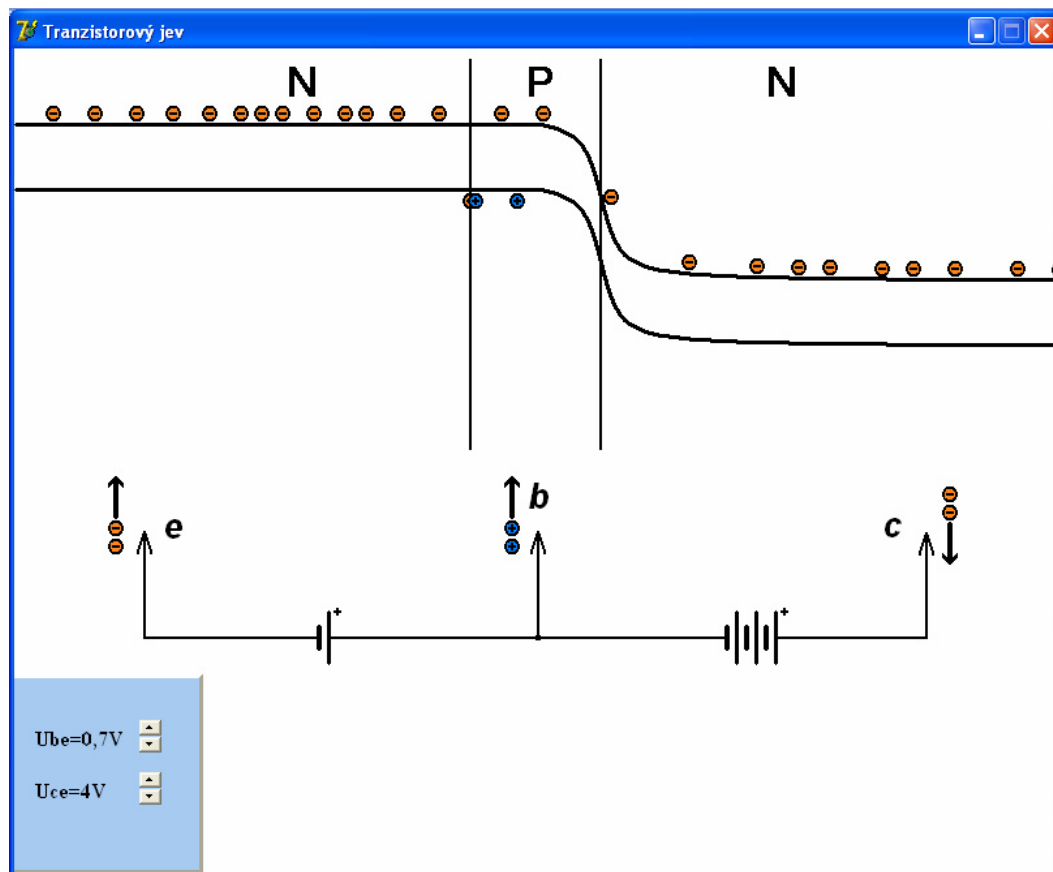
kde e je elementární náboj, k Boltzmannova konstanta, T termodynamická teplota, U_{be} napětí báze-emitor, I_c kolektorový proud, I_e emitorový proud, I_0 limitní proud přechodu báze –emitor v závěrném směru.

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 8.2. Vzhledem k velmi rozsáhlým možnostem využití bipolárních tranzistorů a s tím souvisejícího velkého množství různých zapojení, je tento model z důvodu přehlednosti omezen pouze na vysvětlení tranzistorového jevu pomocí pásového znázornění energetických hladin. Celé okno programu zaujímá pásové schéma doplněné připojenými zdroji napětí. Na ovládacím panelu lze nastavovat pomocí šipek ▲▼ (tlačítka UpDown) napětí U_{be} v rozsahu 0 V až 0,7 V po 0,1 V a napětí U_{bc} v rozsahu 0 V až 10 V po 1 V.

Změnou napětí U_{be} (proměnná $a1$) se mění zakřivení energetických hladin v levé části okna, změnou U_{bc} hladin v části pravé, průběhy jsou vykreslovány pomocí funkce $\arctg(x)$, a jsou vždy posunuty tak, aby se napojovaly v oblasti báze:

```
for i := 0 to High(Form1.FPoints01) do
begin
  Form1.FPoints01[i].X:=Round(x * rozsahX/40);
  Form1.FPoints01[i].Y:=Round((a1-7)*arctan(x)*RozsahY/40);
  x := x + interval;
end;
pocatek1.Y:=50- Form1.FPoints01[High(Form1.FPoints01)].Y;
for i := 0 to High(Form1.FPoints1) do
begin
  Form1.FPoints1[i].X :=pocatek1.X+Form1.FPoints01[i].X;
  Form1.FPoints1[i].Y :=pocatek1.Y+Form1.FPoints01[i].Y;
end;    ...atd.
```



Obr. 8.2 Provedení modelu tranzistorového jevu

Energetické hladiny jsou po spočtení vykresleny do komponenty `PaintBox`:

```
with PaintBox1.Canvas do  
  begin  
    Pen.Width := 2;  
    Pen.Color := clBlack;  
  
    moveto(350,0);  
    lineto(350,300);  
  
    moveto(450,0);  
    lineto(450,300);  
  
    Pen.Width := 3;  
    Pen.Color := clBlack;  
  
    Polyline(FPoints1);  
    Polyline(FPoints2);  
    Polyline(FPoints3);  
    Polyline(FPoints4);  
end;
```

Pokud je nastaveno napětí $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, je spuštěn časovač posouvající elektrony a díry mezi bází a emitorem. Nositelé, kteří dorazí k přechodu, jsou přemístěni na začátek a opět putují ke středu:

```
for i:=1 to 3 do begin  
  FImages[i].Left:=FImages[i].Left-2;  
  if FImages[i].Left=300 then FImages[i].Left:=400;  
end;  
for i:=4 to 19 do begin  
  FImages[i].Left:=FImages[i].Left+4;  
  if FImages[i].Left=404 then FImages[i].Left:=4;  
end;
```

V případě nenulového napětí U_{bc} , je spuštěn i druhý časovač, posouvající elektrony mezi bází a kolektorem, přičemž elektron, který dojde na konec kolektoru je přesunut do báze v okamžiku, kdy je elektron přicházející z emitoru do báze přemístěn zpět na začátek emitoru. Vzniká tak dojem že elektron projde bází a plynule pokračuje do kolektoru:

```
for i:=20 to 29 do  
  fimages[i].Left:=fimages[i].Left+4;  
  
if a2<>0 then  
  for i:=10 to 19 do  
    if FImages[i].Left=400 then  
      begin  
        FImages[i+10].left:=400;  
        FImages[i+10].visible:=FImages[i].visible;  
      end;
```

Pokud se napětí U_{be} sníží z 0,7 V nebo je nastaveno $U_{bc} = 0$ V, doběhnou ještě elektrony v kolektoru na energeticky výhodnější místa a pak je časovač zastaven:

```

if (a1<7)or(a2=0) then begin
if (fimages[20].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[21].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[22].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[23].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[24].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[25].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[26].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[27].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[28].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and
    (fimages[29].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)
then timer2.enabled:=false;
end;

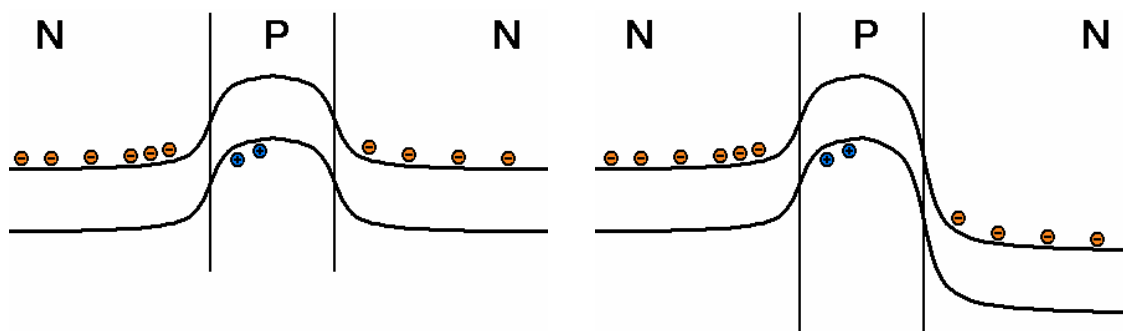
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „8_Tranzistorový jev.exe“.
Zobrazeno je pásové schéma struktury NPN v rovnovážném stavu s majoritními nositeli náboje (elektrony – červené, díry – modré). Na ovládacím panelu je možné nastavovat tlačítka ▲ ▼ napětí U_{be} a U_{bc} .
2. Při $U_{be} = 0$ V zvyšování napětí U_{bc} na 10 V.
Zvyšuje se energetická bariéra závěrně polarizovaného přechodu báze-kolektor.
3. Nastavení $U_{be} = 0$ V , $U_{bc} = 0$ V.
4. Při $U_{bc} = 0$ V postupné zvyšování napětí U_{be} na 0,6 V.
Je snižována energetická bariéra na rozhraní báze-emitor.
5. Nastavení $U_{bc} = 0$ V , $U_{be} = 0,7$ V.
Bariéra na rozhraní báze emitor zanikla. Přechodem prochází proud.
6. Při $U_{be} = 0,7$ V zvyšování U_{bc} na 10 V.
Elektrony z báze pokračují do kolektoru. Přechodem báze-kolektor prochází proud.

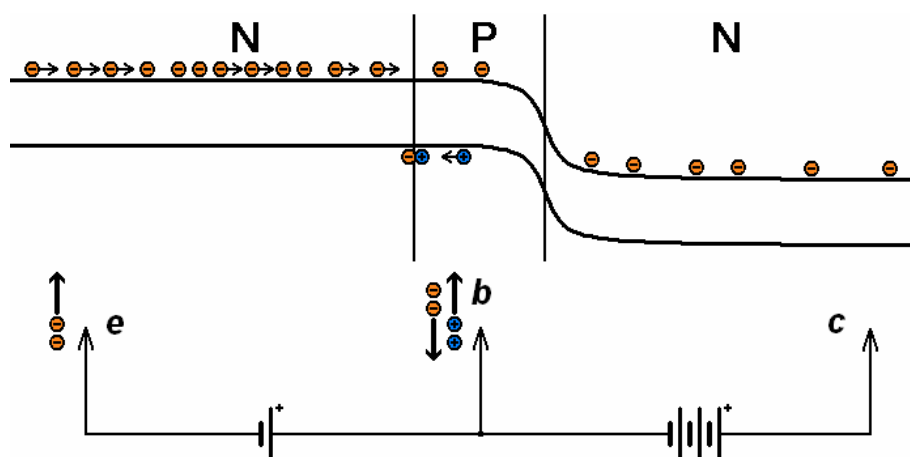
Výklad:

Po spuštění se otevře okno s pásovým znázorněním energetických hladin. Ani na jednu část není připojeno vnější napětí, oba P-N přechody se nacházejí v rovnovážné poloze. Při zvyšování napětí mezi bází a kolektorem v závěrném směru, dochází ke zvyšování bariéry (obr. 8.3), strukturou neprochází proud.



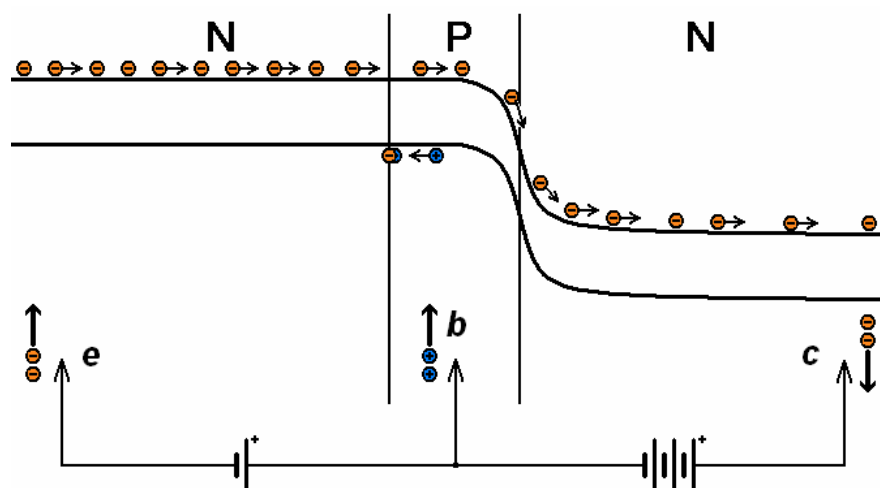
Obr. 8.3 Zvyšování závěrného napětí na přechodu báze-kolektor

Pokud při nulovém napětí mezi bází a kolektorem zvyšujeme napětí mezi bází a emitorem v propustném směru, dochází k vyrovnávání energetických hladin. Při překonání difúzního napětí (0,7 V u křemíku) mizí bariéra a přechodem báze-emitor prochází proud. Díry procházejí do emitoru, kde rekombinují s elektrony, elektrony procházejí do báze, kde jich část rekombinuje s děrami. Protože je v emitoru podstatně vyšší koncentrace elektronů než děr v bázi, zrekombinuje pouze malé množství elektronů. Zbytek putuje do kladného pólu zdroje, odsáváním elektronů kladným pólem navíc vznikají nové díry, ze záporného pólu zdroje jsou dodávány nové elektrony (obr. 8.4).



Obr. 8.4 $U_{bc} = 0 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, přechodem báze-emitor prochází proud

Díky malé šířce báze a silné dotaci emitoru se nyní nachází v oblasti báze velké množství elektronů. Pokud připojíme na přechod báze-kolektor napětí v závěrném směru, mohou elektrony z báze procházet v souladu s elektrickým polem do kolektoru a odtud do kladného pólu zdroje (obr. 8.5).



Obr. 8.5 $U_{bc} = 10 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, elektrony z emitoru procházejí přes tenkou bázi do kolektoru

3.2 Unipolární tranzistory

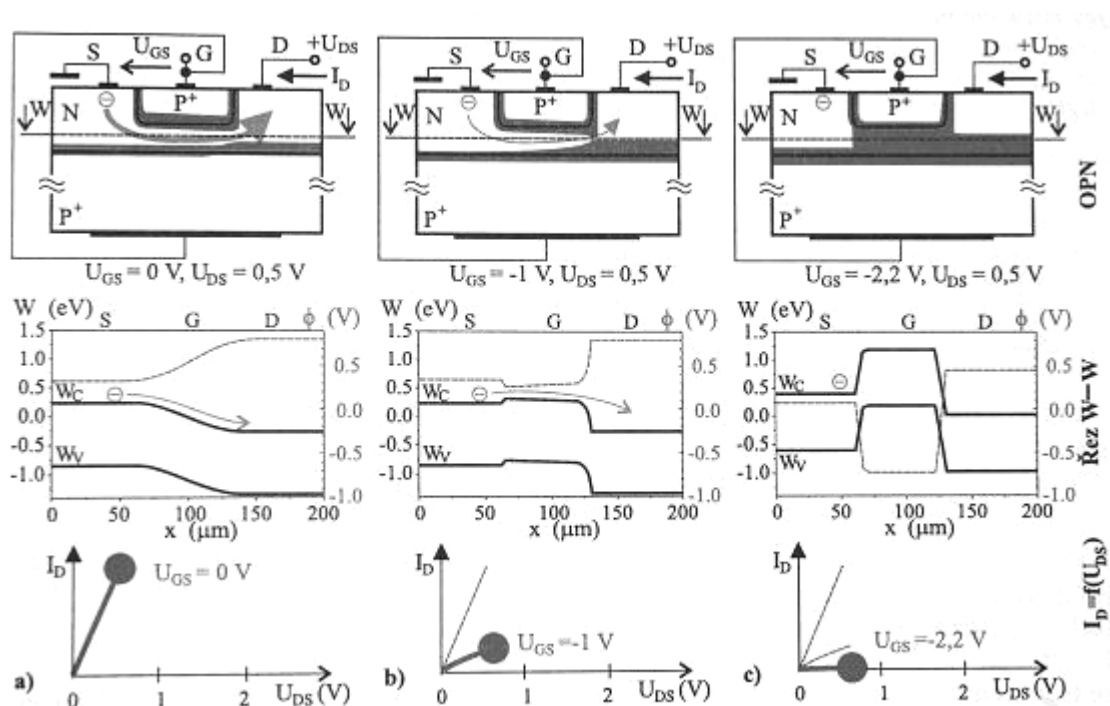
Didaktický cíl:

Hlavním cílem této skupiny modelů je znázornění struktury unipolárních tranzistorů a animace kanálů (různých typů u různých součástek), sloužících k průchodu nositelů náboje. Šířka a tvar kanálu se musí měnit v závislosti na velikostech a polaritách připojených napětí. Musí být zřejmá souvislost mezi šířkou kanálu a tvarem V-A charakteristik. Z modelu musí být patrná základní vlastnost unipolárního tranzistoru: vedení proudu pouze jedním druhem nositelů náboje. Dále musí být zřejmé zapojení zdrojů co se týče polarit.

3.2.1 Unipolární tranzistor s přechodovým hradlem – JFET

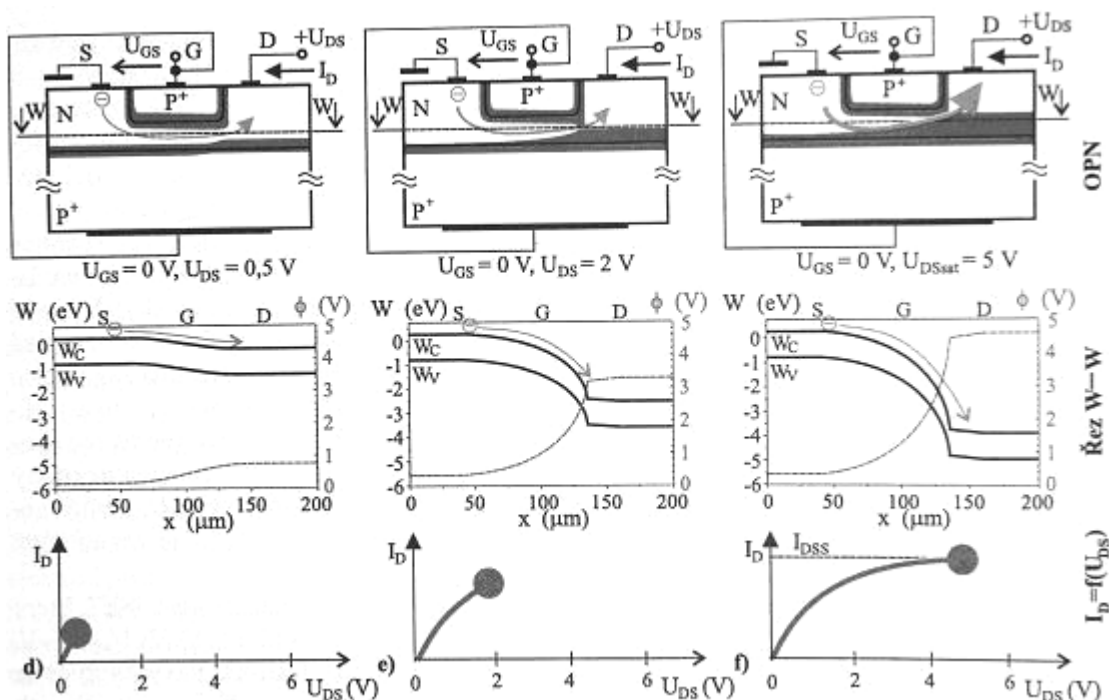
Teorie:

U této součástky se stejně jako u ostatních unipolárních tranzistorů přenos náboje uskutečňuje pouze majoritními nositeli. Struktura tohoto tranzistoru je patrná z obr. 9.1. JFET je tvořen kanálem mezi elektrodami S a D, po stranách kanálu jsou vytvořeny oblasti opačného typu vodivosti než je kanál. Elektroda S (Source) dodává do kanálu nositele z vnějšího obvodu. Ti jsou po průchodu kanálem odsáti elektrodou D (Drain). Příklady k oblastem opačného typu vodivosti jsou označeny jako G (Gate) – řídicí elektroda. Napětí U_{DS} a U_{GS} musí být takové polarity, aby P-N přechod mezi hradlem a kanálem byl vždy polarizován v závěrném směru. Připojením napětí na řídicí elektrodu dochází k rozšíření hradlové vrstvy – zmenšení účinného průřezu vodivého kanálu. Kanál musí mít šířku srovnatelnou s šířkou hradlové vrstvy (cca 1 μm).



Obr. 9.1 Zvyšování napětí U_{GS} , při malé hodnotě napětí U_{DS} [5]

Uvažujme nyní malé napětí $U_{DS} = 0,5V$. Při $U_{GS} = 0V$ má hradlová vrstva nejmenší možnou šířku. Elektrony procházejí kanálem ve směru nárůstu potenciálu ϕ (obr. 9.1 a). Připojením závěrného napětí U_{GS} se rozšíří hradlová vrstva (ve které je poklesem potenciálu ϕ vytvořena energetická bariéra pro průchod elektronů). Vzrůstá tak odpor kanálu, což se projeví menší strmostí výstupní charakteristiky (obr. 9.1 b). Dále zvyšujeme napětí U_{GS} . Po dosažení uzavíracího napětí vyplní hradlová vrstva celý průřez kanálu (obr. 9.1 c). Pod celým hradlem dojde k poklesu potenciálu. Pro elektrony tak vznikne nepřekonatelná energetická bariéra. To má za následek pokles proudu I_D na nulu.

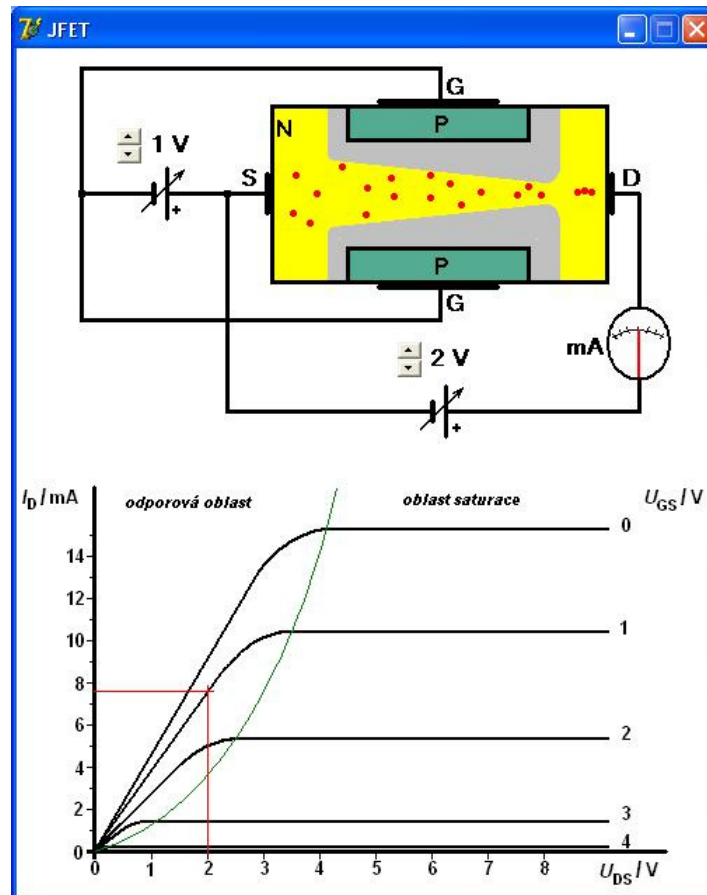


Obr. 9.2 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 0 V$ [5]

Uvažujme $U_{GS} = 0V$. Při malém napětí U_{DS} prochází kanálem malý proud I_D , šířka kanálu je po celé délce zhruba stejná (obr. 9.2 a). Se vzrůstajícím napětím U_{DS} roste i proud I_D a s ním roste i úbytek napětí na kanálu (obr. 9.2 b). Napětí (závěrné polarity) mezi hradlem a kanálem se zvětšuje směrem k elektrodě D a tímto směrem také dochází k rozšiřování hradlové vrstvy, odpor kanálu vzrůstá. V této oblasti již proud I_D neroste lineárně s napětím, ale jeho přírůstek klesá. Pokud se dále zvýší napětí U_{DS} , dojde k zaškrvení vodivého kanálu (obr. 9.2 c). Tato oblast však pro nositele náboje nepředstavuje potenciálovou bariéru, ale pouze oblast s velkým odporem, kterou překonávají díky urychlení silným elektrickým polem. Při dalším zvýšení napětí U_{DS} se zaškrvení zvětšuje. Přírůstek napětí se spotřebuje pouze v oblasti zaškrvení, na zbytku kanálu se úbytek napětí prakticky nezmění. Zaškrvená oblast s velkým odporem se tak zvětšuje, zároveň zde však vzrůstá intenzita elektrického pole a nositelé náboje jsou touto oblastí více urychlováni. Proud I_D se již zvětšuje pouze nepatrně.

Realizace:

Provedení je vidět na obr. 9.3. V horní části okna je vložen obrázek s idealizovanou strukturou tranzistoru JFET s kanálem typu N. Ke struktuře jsou připojeny zdroje napětí s polaritou odpovídající jedinému možnému zapojení. U zdrojů jsou vloženy ovládací tlačítka ▲ ▼ (komponenta UpDown), jimiž je možné nastavovat napětí U_{DS} od 0 V do 8 V po 1 V a U_{GS} od 0 V do 4 V po 1 V. Výstupní V-A charakteristiky jsou do spodní části okna vloženy jako obrázek.



Obr. 9.3 Provedení modelu tranzistoru JFET

Přes obrázek tranzistoru je vložena komponenta PaintBox, umožňující kreslení jednoduchých tvarů. Při změně napětí jsou zde vykreslovány tvary, znázorňující hradlovou vrstvu:

```
with PaintBox1.Canvas do
begin
  Brush.Color := clsilver;
  Brush.Style := bsSolid;
  Pen.Width := 1;
  Pen.Color := clsilver;
  Polygon([point(46 - 4*u1 , -1),
            point(187 + 4*u1 + u2 , -1),
            point(187 + 4*u1 + b*u2 ,
                  8*u1 + 8*u2 - a*7*(u1+u2-4)-1),
            point(46 - 4*u1 , 8*u1 - 1)]);
```

```

Ellipse(46-8*u1, 0, 46, 8*u1);
Ellipse(188+8*u1+b*(4*u2-a*3*(u1+u2-4)), 0,
        187, 8*u1+b*(8*u2));
...atd.

```

u_1 a u_2 jsou hodnoty napětí U_{GS} a U_{DS} .

Pokud je hodnota U_{DS} nenulová, je spuštěn časovač, který posouvá tečky, znázorňující elektrony, tečky které dorazí na konec vodivého kanálu jsou přesunuty na začátek a opět pokračují doprava. Jejich ypsilonová poloha je počítána za pomoci proměnných u_1 , u_2 (U_{GS} , U_{DS}):

```

for i := 0 to High(Form1.Fshapes) do
begin
  Fshapes[i].left:=Fshapes[i].left+1;
  if Fshapes[i].left > 415 then Fshapes[i].left := 184;

  Fshapes[i].top:=pocatek[i]+round((Fshapes[i].left-
  230+4*u1)*(100-(a-1)*((pocatek[i]-100)*(28-8*u1-8*u2+
  7*a*(u1+u2-4))/(28-8*u1))-pocatek[i])/(140+8*u1+b*u2));

end;

```

Přes obrázek V-A charakteristik je také vložena komponenta `PaintBox`, do které jsou zakreslovány souřadnice aktuálního stavu:

```

with PaintBox2.Canvas do
begin
  Pen.Width := 1;
  Pen.Color := clred;
  moveto(Fpoints[u1,u2].X, 268);
  lineto(Fpoints[u1,u2].X, Fpoints[u1,u2].Y-5);
  moveto(55, Fpoints[u1,u2].Y);
  lineto(Fpoints[u1,u2].X+5, Fpoints[u1,u2].Y);
end;

```

`Fpoints` je pole bodů s parametry u_1 , u_2 . Jejich souřadnice jsou zadány při spuštění programu:

```

for i := 0 to 8 do begin
  for j := 0 to 4 do
    FPoints[j,i].X := 56+i*40
  end;
for i := 0 to 4 do FPoints[i,0].Y := 265;
for i := 1 to 8 do FPoints[4,i].Y := 263;
for i := 1 to 8 do FPoints[3,i].Y := 245;
...atd.

```

V obvodu je znázorněn ampérmetr, pro měření proudu vodivým kanálem I_D . Zde je opět použita komponenta `PaintBox`, do které je červeně vykreslena ručka. Její poloha je dána ypsilonovou souřadnicí aktuálního bodu `Fpoints[u1, u2]`.

```
with PaintBox3.Canvas do
begin
    Pen.Color := clred;
    pen.width := 2;
    moveto(20,48);
    lineto(round((265-Fpoints[u1,u2].Y)*40/228),
            15+round(abs(150-Fpoints[u1,u2].Y)/15));
end;
```

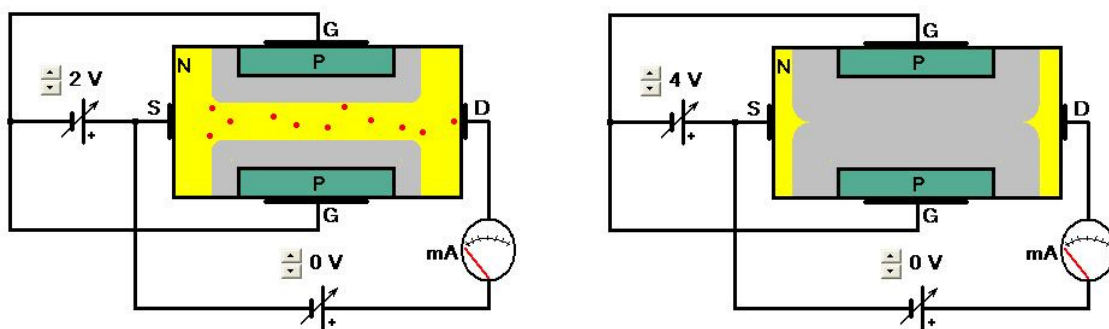
Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**1_JFET.exe**“.
Zobrazena je struktura tranzistoru JFET typu s kanálem N. Na rozhraních polovodičů se nachází hradlová vrstva. Obě napětí jsou nulová, tranzistorem neprochází proud – červené tečky znázorňující elektrony se nepohybují.
2. Při $U_{DS} = 0 \text{ V}$ zvyšování napětí U_{GS} z 0 V na 4 V .
Přechody P-N jsou polarizovány v závěrném směru. Dochází k rozšiřování hradlové vrstvy – zmenšování účinného průřezu kanálu. Protože je $U_{DS} = 0 \text{ V}$, neprochází tranzistorem proud (elektrony jsou nehybné).
3. Při $U_{DS} = 1 \text{ V}$ zvyšování napětí U_{GS} z 0 V na 4 V .
Vodivým kanálem prochází proud. Při takto malých hodnotách U_{DS} je po celé délce kanálu téměř stejný účinný průřez, tranzistor se chová jako napětím U_{GS} řízený lineární odpor (při $U_{GS} = 4 \text{ V}$ je odpor „nekonečný“).
4. Při $U_{GS} = 0 \text{ V}$ zvyšování U_{DS} z 0 V na 3 V .
Elektrony se dávají do pohybu. Díky úbytku napětí na vodivém kanále se hradlová vrstva rozšiřuje směrem k elektrodě D.
5. Nastavení $U_{GS} = 0 \text{ V}$, $U_{DS} = 4 \text{ V}$.
Dochází k zaškrvení kanálu.
6. Při $U_{GS} = 0 \text{ V}$ zvyšování U_{DS} z 4 V na 8 V .
Zaškrvení kanálu se rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

Výklad:

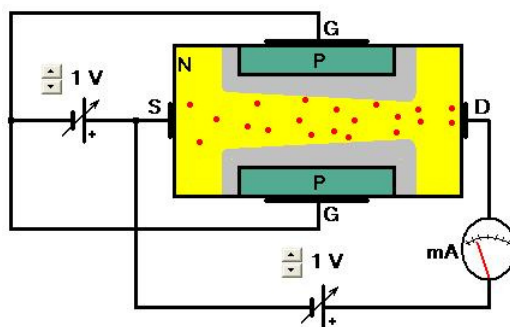
JFET je tvořen kanálem mezi elektrodami S a D a dvěma oblastmi po stranách kanálu opačného typu vodivosti. Elektroda S (Source) dodává do kanálu nositele z vnějšího obvodu. Ti jsou po průchodu kanálem odsáti elektrodou D (Drain). Přívody k oblastem opačného typu vodivosti jsou označeny jako G (Gate) – řídicí elektroda. Napětí U_{DS} a U_{GS} musí být takové polarity, aby P-N přechody mezi hradlem a kanálem byly vždy polarizovány v závěrném směru. Protože se napětí U_{GS} pohybuje řádově v jednotkách voltů a napětí U_{DS} může nabývat i několika desítek voltů, je jediné přípustné zapojení podle obr. 9.4.

Při zařazení do výuky je třeba demonstrovat změny rozměrů hradlové vrstvy v závislosti na obou napětích. Je vhodné nejprve nastavit $U_{DS} = 0V$ a měnit pouze U_{GS} . Při zvyšování tohoto napětí je vidět rozšiřování hradlové vrstvy (obr. 9.4). Tím se zmenšuje účinný průřez vodivého kanálu a zvyšuje se odpor tranzistoru. Při dostatečném napětí ($U_{GS} = 4V$) se vodivý kanál zcela uzavírá. Protože je nastaveno napětí $U_{DS} = 0V$, neprochází vodivým kanálem proud, červené tečky znázorňující elektrony se nepohybují.

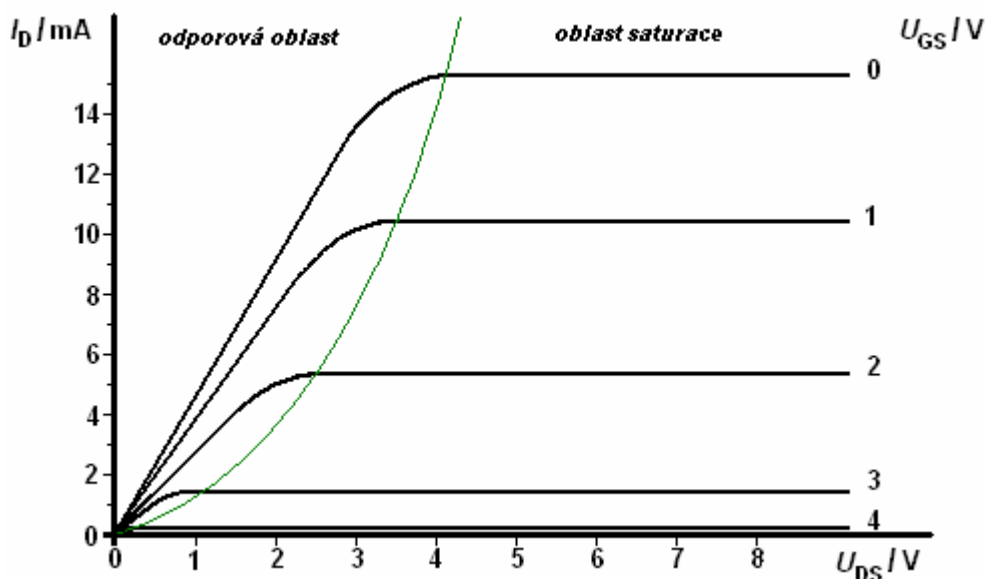


Obr. 9.4 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

Poté volíme hodnotu napětí $U_{DS} = 1V$. Červené tečky se dávají do pohybu – kanálem prochází proud. Při takto malém napětí se téměř neuplatňuje úbytek napětí na vodivém kanále a kanál má tak po celé délce téměř stejný účinný průřez (obr. 9.5). Tranzistor se při takovýchto malých hodnotách U_{DS} chová jako lineární rezistor řízený napětím U_{GS} . To je vidět i na V-A charakteristikách, které mají pro malá napětí lineární průběh (odporová oblast – obr. 9.6).

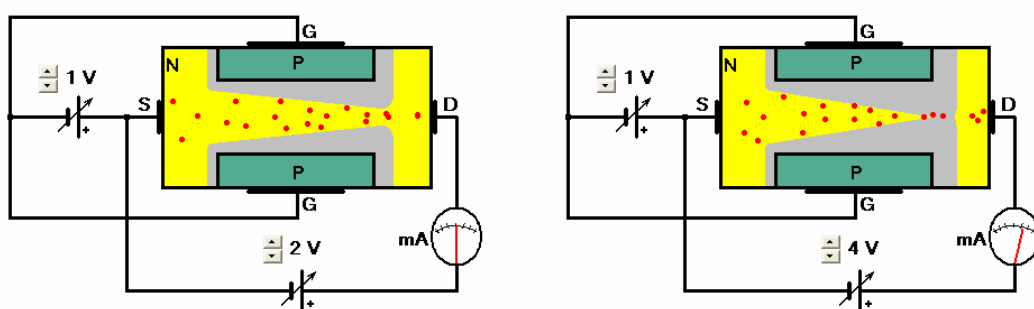


Obr. 9.5 Při malém napětí U_{DS} má kanál po celé délce téměř stejný účinný průřez



Obr. 9.6 V-A charakteristiky tranzistoru JFET

Dále je třeba ukázat, jakým způsobem se mění tvar vodivého kanálu při zvyšujícím se napětí U_{DS} . Volíme $U_{GS} = 0$ V. Napětí U_{DS} se rozloží podél celého kanálu. Zatímco nejbližší k elektrodě S je na PN přechodu závěrné napětí U_{GS} , u elektrody D je to již $U_{GS} + U_{DS}$. Proto se kanál při rostoucím U_{DS} směrem k elektrodě D zužuje (obr. 9.7). Jak je vidět z V-A charakteristik, při nízkých hodnotách U_{DS} proud stoupá lineárně s napětím. V okamžiku, kdy dojde k přiškrcení kanálu, se odpor tranzistoru zvyšuje a nedochází již při dalším zvýšení napětí k lineárnímu růstu proudu (ohyb V-A charakteristik). Při dalším zvýšení U_{DS} se zaškrvení sice dále rozšiřuje, elektrony jsou však touto oblastí mohou procházet. Tato oblast má totiž větší odpor, proto zde vzniká velký úbytek napětí. Tento napěťový spád urychluje procházející elektrony. Dochází k nasycení (oblast saturace – obr. 9.6). V této oblasti vzrůstá proud I_D již nepatrně.

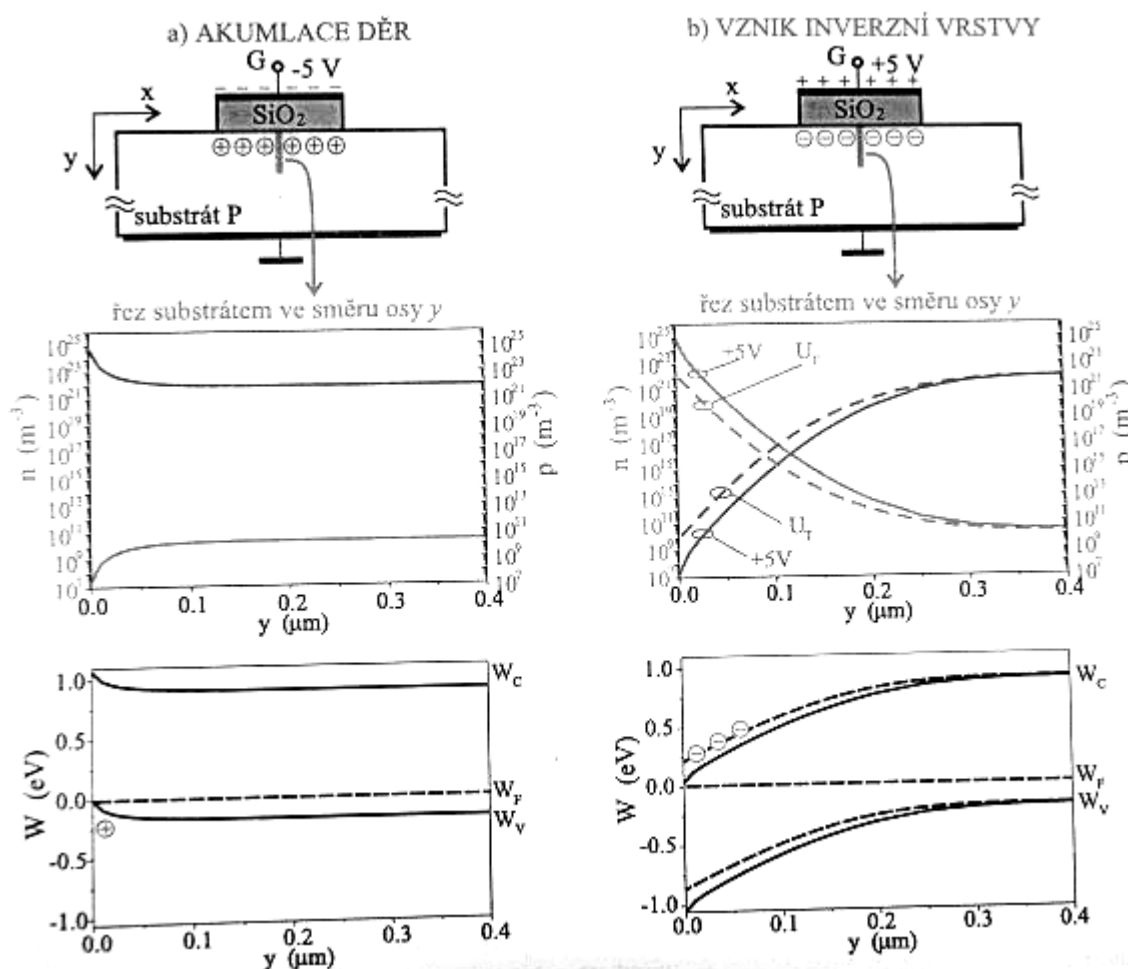


Obr. 9.7 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 1$ V

3.2.2 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem s indukovaným kanálem – MOSFET, obohacovací typ

Teorie:

Princip činnosti tranzistoru MOSFET lze vysvětlit chováním kondenzátoru znázorněného na obr. 10.1. Jednou elektrodou je řídicí elektroda G, druhá elektroda je tvořena polovodičovým substrátem (v našem případě typu vodivosti P) spojeným se zemí. Jako dielektrikum je použita vrstva SiO_2 . Pokud je na řídicí elektrodu přivedeno záporné napětí (obr. 10.1 a), dojde v souladu se směrem elektrického pole k akumulaci děr u rozhraní polovodič-dielektrikum. V pásovém diagramu je zřejmé zakřivení energetických hladin v blízkosti rozhraní díky elektrickému poli a nahromaděnému kladnému náboji. Z grafu koncentrací nositelů je navíc vidět snížená koncentrace minoritních elektronů, které zaujímají energeticky výhodnější místa dále od rozhraní.



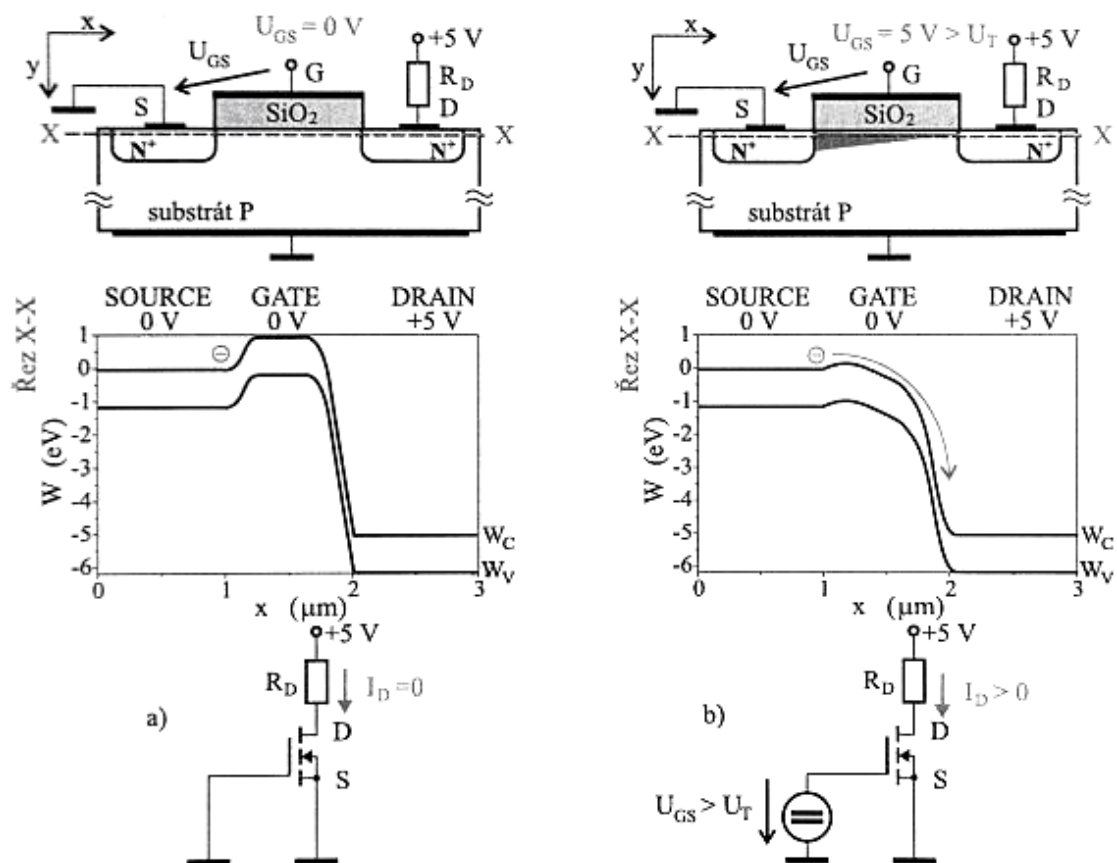
Obr. 10.1 Vznik inverzní vrstvy [5]

Pokud je na řídicí elektrodu připojeno kladné napětí (obr. 10.1 b), působí elektrické pole opačným směrem a majoritní díry jsou odpuzovány od rozhraní. Nábojové rozlišení způsobuje ohyb energetických hladin opačným směrem. Kladný náboj nahromaděný na řídicí elektrodě je kompenzován záporným nábojem ionizovaných akceptorů v polovodiči a minoritními elektrony. Při zvýšení napětí dojde díky nahromadění kladného náboje na řídicí elektrodě k jeho kompenzaci rozšířením nábojové vrstvy u rozhraní. Při dalším zvýšení napětí již ke kompenzaci kladného náboje nestačí

záporný náboj ionizovaných akceptorů a dochází ke zvyšování koncentrace volných elektronů. Ty mohou být generovány v oblasti prostorového náboje (pod řídicí elektrodou), tepelnou generací na rozhraní polovodič dielektrikum apod. Při dosažení tzv. prahového napětí U_T (čárkovaná čára) je koncentrace volných elektronů na povrchu polovodiče stejná jako koncentrace děr uvnitř polovodiče. S dalším zvýšením napětí se již zakřivení energetických hladin ani šířka prostorového náboje příliš nemění. Koncentrace volných elektronů je však podle Maxwellovy-Boltzmannovy rozdělovací funkce s nárůstem potenciálu exponenciální, což znamená řádové změny. Znamená to že při napětí $U_G > U_T$ bude koncentrace elektronů mnohonásobně větší než koncentrace děr $n \gg p$. Dojde k přeměně vrstvy původního polovodiče P na typ vodivosti N (tzv. inverzní vrstva).

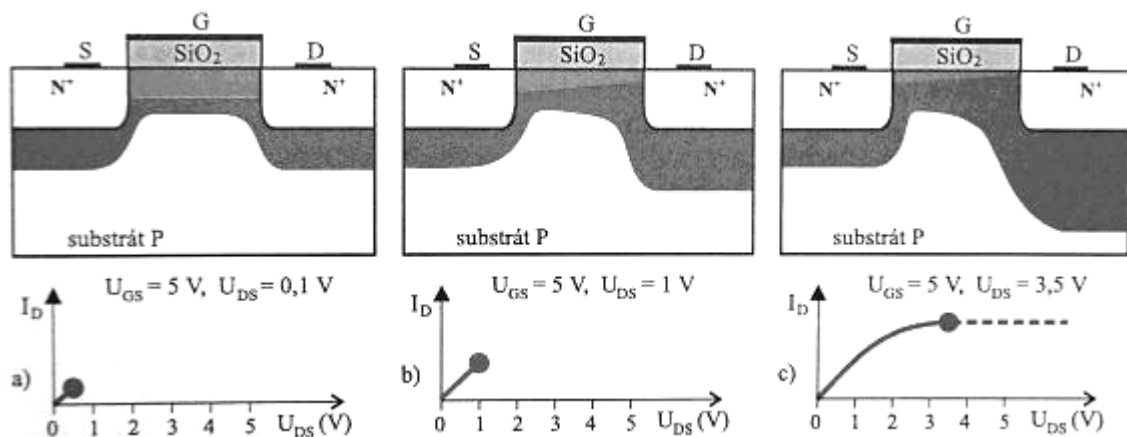
Přidáním dvou oblastí vodivosti N s přívodními kontakty (Source, Drain) dostáváme tranzistor MOSFET s kanálem N. Elektroda S je stejně jako substrát připojena na zem, na elektrodu D je přivedeno kladné napětí. Source i drain jsou tak izolovány od substrátu hradlovou vrstvou. Stejně tak je od substrátu odizolována i inverzní vrstva.

Uvažujme napětí $U_{DS} = 5V$, pokud je $U_{GS} < U_T$ (obr. 10.2 a), brání elektronům v průchodu ze source do drain energetická bariéra P-N přechodu source-substrát. Tato bariéra zaniká po překonání $U_{GS} > U_T$ (obr. 10.2 b), pod řídicí elektrodou vznikne inverzní vrstva vodivě propojující source a drain, kudy mohou elektrony volně procházet. Napětím U_{GS} je regulována energetická bariéra a koncentrace elektronů v indukovaném kanále. Princip činnosti tohoto tranzistoru tedy spočívá v modulaci proudu kanálem I_D hradlovým napětím U_{GS} .



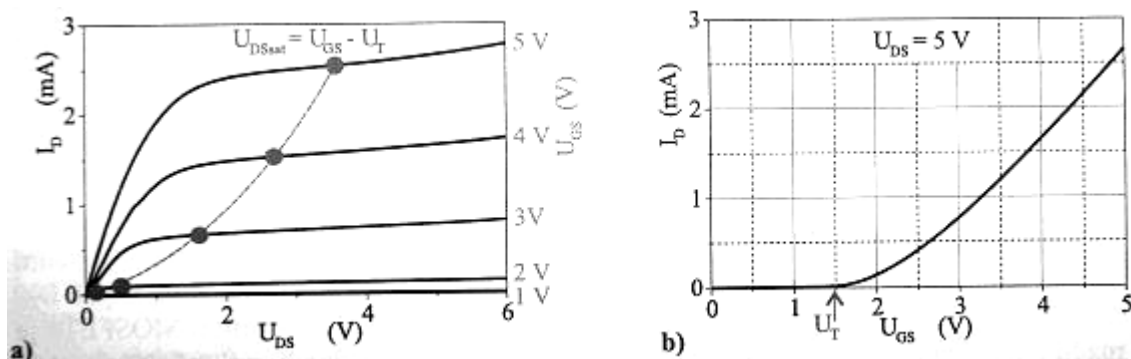
Obr. 10.2 Průchod proudu po překročení prahového napětí [5]

Uvažujme nyní stálé napětí $U_{GS} = 5V$. Při zvyšování napětí U_{DS} roste proud I_D a vzniká úbytek napětí podél kanálu. Napětí mezi řídicí elektrodou a kanálem klesá z hodnoty U_{GS} u elektrody S na hodnotu $U_{GS} - U_{DS}$ u elektrody D. Pro malá napětí U_{DS} je tento úbytek zanedbatelný, odpor kanálu se příliš nemění, V-A charakteristika má lineární průběh (obr. 10.3 a). Při větším napětí se již zúžení vodivého kanálu projeví zvětšením odporu a ohybem V-A charakteristiky (obr. 10.3 b). Vodivý kanál je vyznačen světleji, tmavší barva vyznačuje hradlovou vrstvu. Dosáhne-li rozdíl $U_{GS} - U_{DS}$ hodnoty prahového napětí U_T , dochází k zaškrvení kanálu (obr. 10.3 c). Další zvýšení napětí U_{DS} již prakticky nemá vliv na zvýšení proudu I_D . Zaškrvená oblast se sice zvětšuje, veškerý přírůstek napětí se však projeví jako úbytek na tomto zaškrvení (z důvodu jeho velkého odporu). V této oblasti jsou elektrony přenášeny silným elektrickým polem. Proud I_D již vzrůstá pouze nepatrně, tranzistor dosahuje nasyceného stavu.



Obr. 10.3 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 5V$ [5]

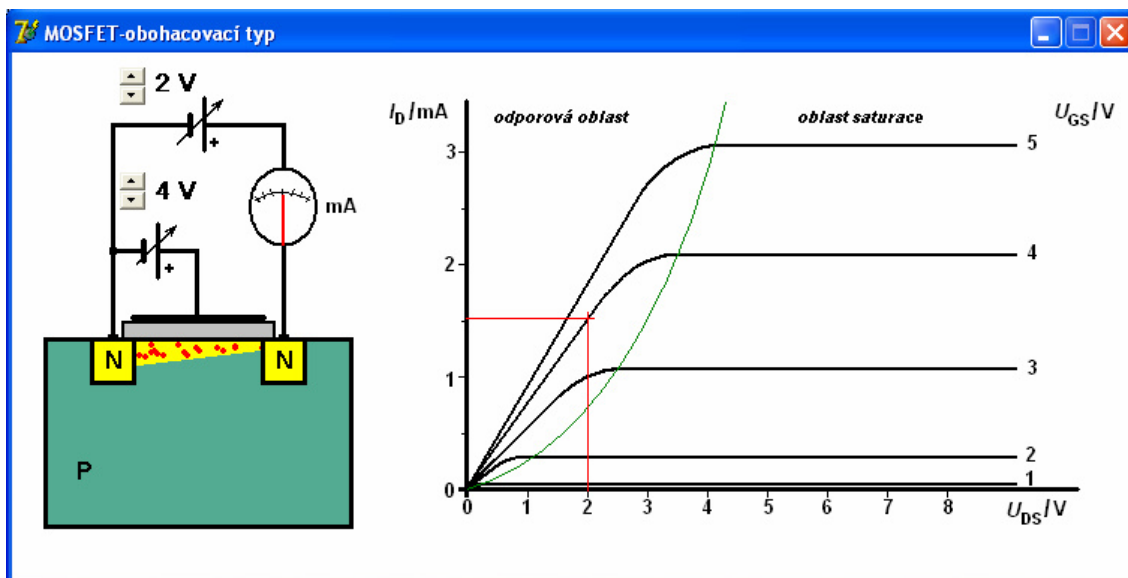
Pro různá napětí U_{GS} tak dostáváme sít' výstupních charakteristik (obr. 10.4 a). Pro $U_{GS} = 1V$ ještě nebylo překonáno prahové napětí U_T , proto je proud tranzistorem nulový pro jakékoliv napětí U_{DS} . Proud začne tranzistorem protékat až po překonání prahového napětí ($U_{GS} = 2V$). V charakteristikách jsou dále vyznačeny body saturace (zaškrvení kanálu), pro které platí: $U_{GS} - U_{DS} = U_T$. Prahové napětí je vyznačeno v převodní charakteristice na obr. 10.4 b), v tomto případě je $U_T = 1,5V$.



Obr. 10.4 Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET [5]

Realizace:

Provedení je vidět na obr. 10.5. V levé části okna je vložen obrázek struktury tranzistoru MOSFET s kanálem typu N, připojené ke zdrojům napětí. U zdrojů jsou vloženy ovládací tlačítka ▲ ▼ (komponenta UpDown), jimiž je možné nastavovat napětí U_{DS} od 0 V do 8 V po 1 V a U_{GS} od 0 V do 5 V po 1 V. Výstupní V-A charakteristiky jsou do pravé části okna vloženy jako obrázek.



Obr. 10.5 Provedení modelu tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

Přes obrázek tranzistoru je vložena komponenta PaintBox, umožňující kreslení jednoduchých tvarů. Při změně napětí jsou zde vykreslovány tvary, znázorňující indukovaný kanál:

```
with PaintBox1.Canvas do  
begin
```

```
    Brush.Color := clteal;  
    Brush.Style := bsSolid;  
    Pen.Width := 1;  
    Pen.Color := clteal;  
    if updown2.position-updown1.position+1>0  
    then a:=1 else a:=0;  
    if updown2.position<>0 then  
    Polygon([  
        point(0, -1),  
        point(PaintBox1.Width, -1),  
        point(PaintBox1.Width,  
            a*(5*(updown2.position-1)-5*updown1.position)),  
        point(0, 5*(updown2.position-1))]);
```

```
end;
```

UpDown2.position a UpDown1.position jsou hodnoty napětí U_{GS} a U_{DS} . Je zde použita pomocná proměnná a , která zajišťuje, že se tvar kanálu již nemění, pokud dojde k jeho zaškrcení.

Do komponenty `PaintBox` jsou též vykresleny červené tečky znázorňující volné elektrony. Vykresleny jsou pouze tečky splňující podmínku: jejich ypsilonová souřadnice není větší než vykreslený kanál:

```
Pen.Width := 3;
Pen.Color := clred;
for i:=0 to High(Form1.FPoints) do
  if Fpoints[i].Y+3<5*(updown2.position-1)-
    5*(updown2.position-1)-a*(5*(updown2.position-1)-
    5*updown1.position))*Fpoints[i].X/83
  then
    ellipse(Fpoints[i].X+1,
            Fpoints[i].Y+1,
            Fpoints[i].X+3,
            Fpoints[i].Y+3);
```

Souřadnice elektronů jsou náhodně vygenerovány při spuštění programu:

```
for i := 0 to High(Form1.FPoints) do
begin
  Form1.FPoints[i].X := random(Form1.paintbox1.Width - 3);
  Form1.FPoints[i].Y := random(Form1.paintbox1.Height - 3);
end;
```

Pokud hodnoty napětí odpovídají průchodu proudu, je spuštěn časovač, který elektrony posouvá:

```
if (updown2.position>1) and (updown1.Position>0)
  then timer1.enabled:=true
  else timer1.enabled:=false;
```

Elektrony jsou posouvány vždy o dva pixely doprava, když dojdou na konec `PaintBoxu`, jsou přemístěny na začátek a opět pokračují doprava. Jejich ypsilonová souřadnice je počítána podle naklonění kanálu:

```
for i := 0 to High(Form1.FPoints) do begin
  FPoints[i].X:=Form1.FPoints[i].X+2;
  FPoints[i].Y:=round(pocatek[i]-((5*(updown2.position-1)-
    a*(5*(updown2.position-1)5*updown1.position))*
    FPoints[i].X/60)*pocatek[i]/
    (5*(updown2.position-1))));
  if Form1.FPoints[i].X > 82 then
  begin
    Form1.FPoints[i].X := 0;
    Form1.FPoints[i].Y:= pocatek[i];
  end;
end;
```

Přes obrázek V-A charakteristik je také vložena komponenta `PaintBox`, do které jsou zakreslovány souřadnice aktuálního stavu:

```
with PaintBox3.Canvas do begin
  Pen.Width := 1;
  Pen.Color := clred;

  moveto(Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].X, 268);
  lineto(Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].X,
        Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].Y-5);

  moveto(55, Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].Y);
  lineto(Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].X+5,
        Fpoints2[UpDown2.position, UpDown1.position].Y);
end;
```

`Fpoints2` je pole bodů s parametry `UpDown1.Position` a `UpDown2.Position`, což jsou nastavená napětí U_{GS} a U_{DS} . Souřadnice bodů jsou zadány při spuštění programu:

```
for i := 0 to 8 do
begin
  for j := 0 to 5 do FPoints2[j,i].X := 56+i*40
end;
for i := 0 to 5 do
  FPoints2[i,0].Y := 266;
for i := 1 to 8 do
  FPoints2[0,i].Y := 266;
...atd.
```

V obvodu je znázorněn ampérmetr, pro měření proudu indukovaným kanálem I_D . Zde je opět použita komponenta `PaintBox`, do které je červeně vykreslena ručka. Její poloha je dána ypsilonovou souřadnicí aktuálního bodu `Fpoints2[ ]`.

```
with PaintBox2.Canvas do
begin
  Pen.Color := clred;
  pen.width := 2;

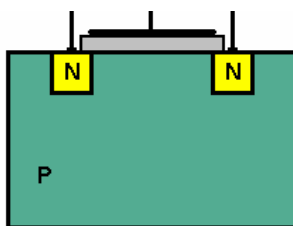
  moveto(20, 48);
  lineto(round((265-fpoints2[updown2.position,
        updown1.position].Y)*40/228),
        15+round(abs(150-fpoints2[updown2.position,
        updown1.position].Y)/15));
end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „2_MOSFET-obohacovací typ.exe“.
Zobrazena je struktura obohacovacího typu tranzistoru MOSFET s kanálem typu N, připojená ke zdrojům napětí. Obě napětí jsou nulová, tranzistorem neprochází proud.
2. Nastavení: $U_{DS} = 0\text{ V}$, $U_{GS} = 1\text{ V}$.
Nebylo překročeno prahové napětí – indukovaný kanál není vytvořen.
3. Při $U_{DS} = 0\text{ V}$ zvyšování napětí U_{GS} z 1 V na 5 V .
Prahové napětí bylo překročeno – je vytvořen indukovaný kanál, který se rozšiřuje se zvyšujícím se napětím U_{GS} . Protože je $U_{DS} = 0\text{ V}$, neprochází tranzistorem proud (elektrony jsou nehybné).
4. Při $U_{DS} = 1\text{ V}$ snižování napětí U_{GS} z 5 V na 2 V .
Vodivým kanálem prochází proud. Při takto malých hodnotách U_{DS} je šířka indukovaného kanálu po celé délce téměř stejná, tranzistor se chová jako napětím U_{GS} řízený lineární odpor (při $U_{GS} = 1\text{ V}$ (0 V) je odpor „nekonečný“).
5. Při $U_{GS} = 5\text{ V}$ zvyšování U_{DS} z 0 V na 3 V .
Elektrony se dávají do pohybu. Díky úbytku napětí se indukovaný kanál zužuje směrem k elektrodě D.
6. Nastavení $U_{GS} = 5\text{ V}$, $U_{DS} = 4\text{ V}$.
Dochází k zaškrvení kanálu.
7. Při $U_{GS} = 5\text{ V}$ zvyšování U_{DS} ze 4 V na 8 V .
Zaškrvení kanálu se nepatrně rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

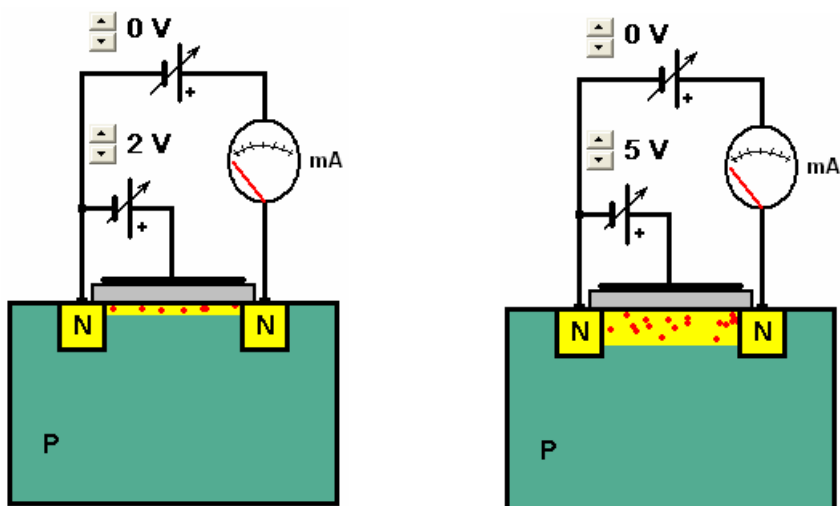
Výklad:

Struktura MOSFETu s indukovaným kanálem je znázorněna na obr. 10.6. V substrátu (v našem případě s typem vodivosti P) jsou vytvořeny dvě oblasti s opačným typem vodivosti (N). K těmto oblastem je přivedena elektroda S (Source), dodávající nositele z vnějšího obvodu a elektroda D (Drain), která nositele po průchodu indukovaným kanálem odsává. Řídící elektroda G (Gate) je od substrátu odizolována vrstvou SiO_2 . Pokud není na řídící elektrodu připojeno žádné napětí, existují mezi elektrodami S a D dvě antisériově zapojené diody. Vždy jeden z těchto P-N přechodů je zapojen v závěrném směru.



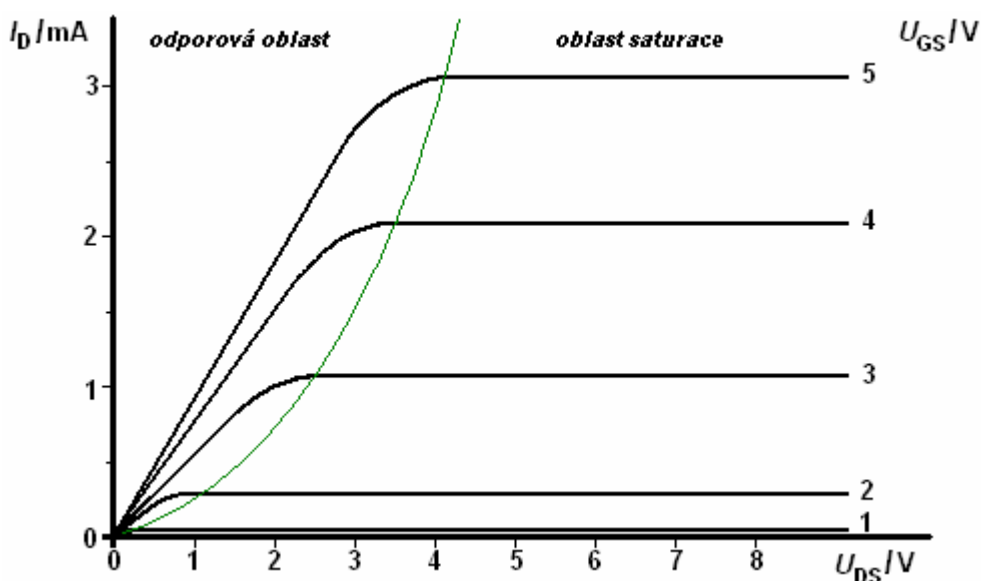
Obr. 10.6 Struktura tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

Při zařazení do výuky je třeba demonstrovat změny tvaru indukovaného kanálu v závislosti na obou napětích. Je vhodné nejprve nastavit $U_{DS} = 0V$ a měnit pouze U_{GS} . Pokud napětí U_{GS} nepřesáhne hodnotu prahového napětí (v našem případě 1 V), žádná změna nestane. Při dalším zvyšování tohoto napětí je vidět vytvoření a rozšiřování indukovaného kanálu s narůstající koncentrací volných elektronů (červené tečky na obr. 10.7). Snižuje se tak odpor mezi elektrodami S a D. Protože je $U_{DS} = 0V$, neprochází kanálem proud (elektrony jsou nehybné).



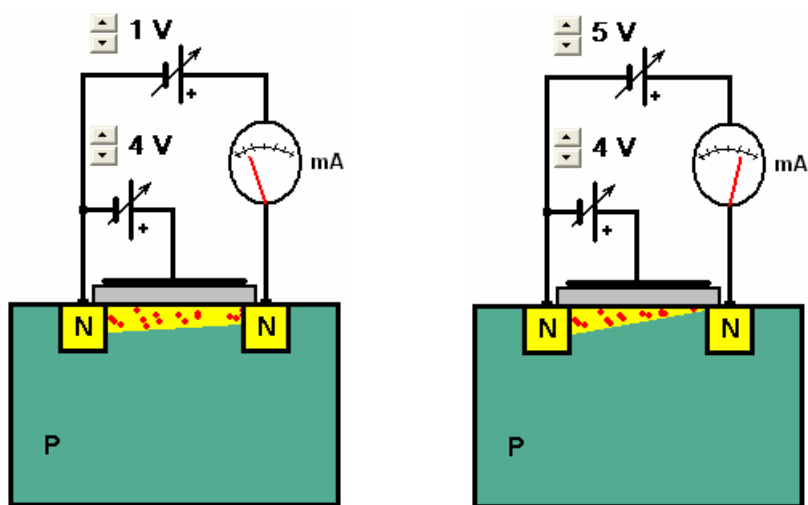
Obr. 10.7 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

Pak volíme hodnotu napětí $U_{DS} = 1V$. Napětí U_{GS} měníme v rozsahu 2 V až 5 V. Indukovaným kanálem prochází proud (červené tečky znázorňující elektrony se pohybují kanálem). Při takto malém napětí U_{DS} se téměř neuplatňuje úbytek napětí na indukovaném kanále a kanál má tak po celé délce téměř stejný průřez. Tranzistor se pro malé hodnoty U_{DS} chová jako rezistor řízený napětím U_{GS} . To je vidět i na V-A charakteristikách, které mají pro takto malá napětí lineární průběh (odporová oblast – obr. 10.8). Pro $U_{GS} = 1V$ (0V) zaniká indukovaný kanál a odpor rezistoru je nekonečný.



Obr. 10.8 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

Dále je třeba ukázat, jakým způsobem se mění tvar indukovaného kanálu při zvyšujícím se napětí U_{DS} . Proto volíme $U_{GS} = 5V$. Napětí U_{DS} se rozloží podél celého kanálu. Zatímco u elektrody S je mezi kanálem a řídicí elektrodou hodnota napětí U_{GS} , u elektrody D je to již $U_{GS} - U_{DS}$. Proto se kanál při rostoucím U_{DS} směrem k elektrodě D zužuje (obr. 10.8). Jak je vidět z V-A charakteristik, při nízkých hodnotách U_{DS} proud stoupá lineárně s napětím. V okamžiku, kdy dojde k přiškrcení kanálu, se odpor tranzistoru zvyšuje a nedochází již při dalším zvýšení napětí k lineárnímu růstu proudu (ohyb V-A charakteristik – obr. 10.7). Pokud $U_{GS} - U_{DS}$ klesne pod hodnotu prahového napětí, dojde k úplnému zaškrcení indukovaného kanálu a nárůstu jeho odporu. Při dalším zvýšení napětí se tento přírůstek objeví na zaškrcení (oblasti s největším odporem). Zaškrcení kanálu se nepatrně posouvá směrem k elektrodě S. Elektrony procházejí ochuzenou oblastí díky velkému napěťovému spádu. Dochází již pouze k nepatrnému nárůstu proudu (oblast saturace – obr. 10.7).

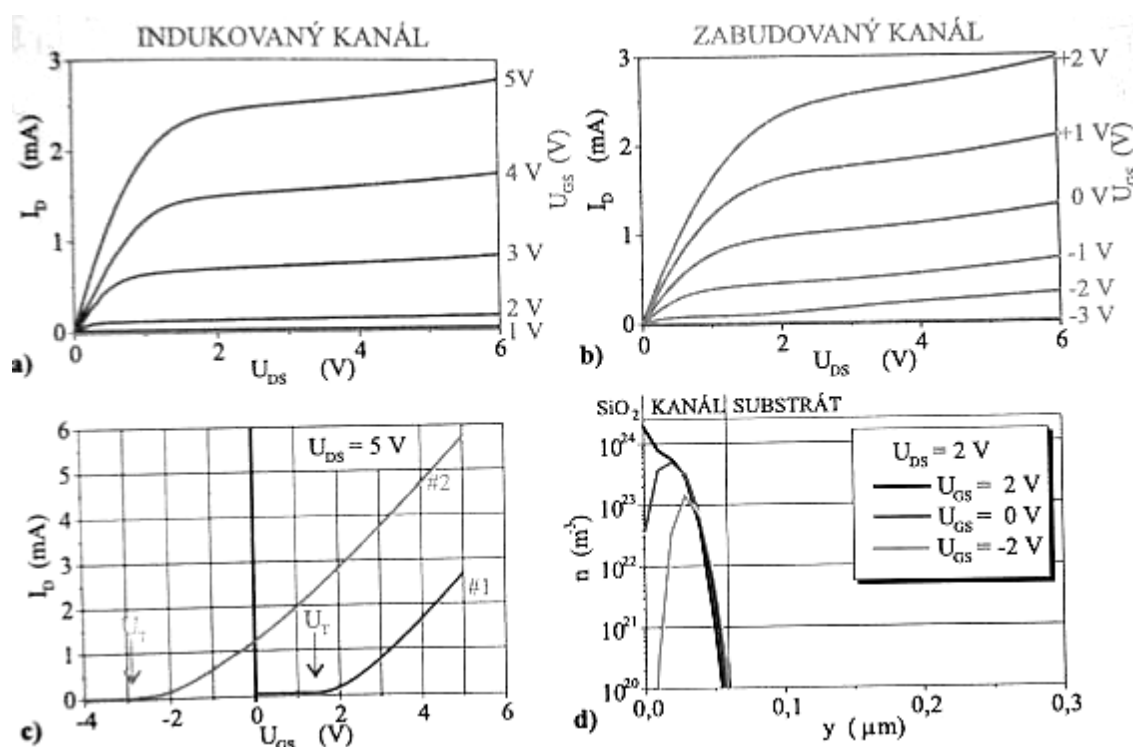


Obr. 10.8 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 4V$

3.2.3 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem se zabudovaným kanálem – MOSFET, ochuzovací typ

Teorie:

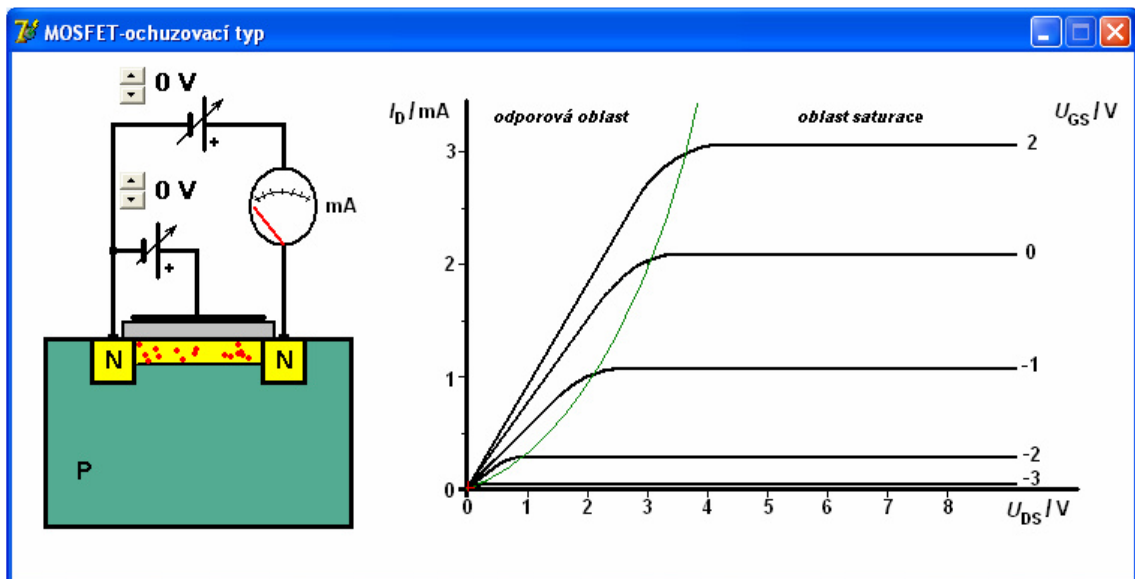
Na rozdíl od obohacovacího typu, u kterého je kanál indukován po překonání prahového napětí $U_T > 0$ (s kanálem typu N), je prahové napětí ochuzovacího typu posunuto do záporných hodnot (převodní charakteristika – obr. 11.1 c). Kanál mezi elektrodami S a D tedy existuje i při $U_{GS} = 0V$. Toho je dosaženo zabudováním kanálu při výrobě. Tento typ tranzistoru umožňuje kromě řízení kladným napětím U_{GS} (obohacovací režim) také řízení napětím záporným (ochuzovací režim), kdy dochází k rekombinaci odpuzovaných elektronů s přitahovanými děrami. Nárůst koncentrace nositelů náboje při kladném napětí U_{GS} a její pokles při napětí záporném je zřejmý z grafu na obr. 11.1 d). Při $U_{GS} < U_T$ klesá koncentrace volných elektronů v kanálu (tranzistor s kanálem typu N) pod hodnotu koncentrace děr ve zbytku substrátu, kanál tak zaniká. Výstupní charakteristiky obohacovacího a ochuzovacího typu MOSFETu jsou znázorněny na obr. 11.1 a), b).



Obr. 11.1 Rozdíly tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem a zabudovaným kanálem [5]

Realizace:

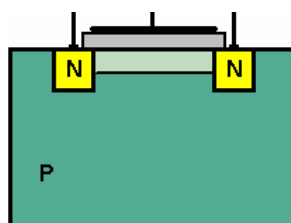
Provedení je prakticky stejné jako u tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem. Rozdíl je pouze v obrázku V-A charakteristik a ve vykreslování kanálu. Obrázek struktury tranzistoru i ovládací prvky zůstávají stejné (obr. 11.2). Napětí U_{DS} lze měnit v rozsahu 0 V až 8 V po 1 V, napětí U_{GS} od -4 V do 2 V po 1 V pro záporné hodnoty a po 2 V pro hodnoty kladné.



Obr. 11.2 Provedení modelu tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem

Kanál je opět vykreslován v komponentě PaintBox při změně napětí. Nejprve je znázorněn technologicky vytvořený kanál světle zelenou barvou (obr. 11.3):

```
Brush.Color := clmoneygreen;
Brush.Style := bsSolid;
Pen.Width := 1;
Pen.Color := clmoneygreen;
Polygon([point(0,15),
        point(paintbox1.Width,15),
        point(paintbox1.Width,
              a*(5*(updown2.position+3)-5*updown1.position)),
        point(0,5*(updown2.position+3))]);
```



Obr. 11.3 Provedení zabudovaného kanálu

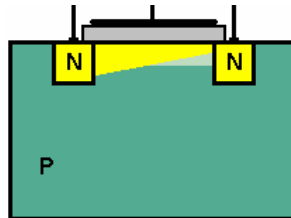
Žlutou barvou je překreslen aktuální tvar kanálu (obr. 11.4) v závislosti na napětích (UpDown1.position, UpDown2.position):

```
Brush.Color := clteal;
Brush.Style := bsSolid;
Pen.Width := 1;
Pen.Color := clteal;
if 5*(updown2.position+4)-5*updown1.position-4>0 then a:=1
else a:=0;
```

```

if updown2.position<>-4 then
  Polygon([point(0, -1),
    point(paintbox1.Width, -1),
    point(paintbox1.Width,
      a*(5*(updown2.position+3)-5*updown1.position)),
    point(0,5*(updown2.position+3))]);

```



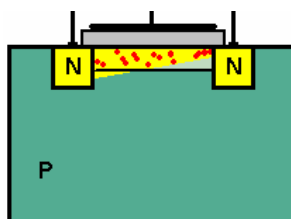
Obr. 11.4 Provedení zabudovaného kanálu

Nakonec dojde k ohrazení vytvořeného kanálu černou čarou, a zobrazení červených teček, znázorňujících elektrony (obr. 11.5):

```

Pen.Width := 2;
Pen.Color := clblack;
moveto (0,15);
lineto (paintbox1.Width,15);
Pen.Width := 3;
Pen.Color := clred;
for i:=0 to High(Form1.FPoints) do
  ellipse(Fpoints[i].X+1,
    Fpoints[i].Y+1,
    Fpoints[i].X+3,
    Fpoints[i].Y+3);

```



Obr. 11.5 Provedení zabudovaného kanálu

Pokud je hodnota U_{DS} nenulová, je spuštěn časovač, který posouvá tečky, znázorňující elektrony:

```

for i := 0 to High(Form1.FPoints) do begin
  FPoints[i].X:=Form1.FPoints[i].X+2;
  FPoints[i].Y:=round(pocatek[i]-((5*(updown2.position-1)-
    a*(5*(updown2.position-1)5*updown1.position))*
    FPoints[i].X/60)*pocatek[i]/(5*(updown2.position-1)));
  if Form1.FPoints[i].X > 82 then begin
    Form1.FPoints[i].X := 0;
    Form1.FPoints[i].Y:= pocatek[i]; end; end;

```

Přes obrázek V-A charakteristik je stejně jako u modelu obohacovacího typu také vložena komponenta `PaintBox`, kam se zakreslují souřadnice aktuálního stavu:

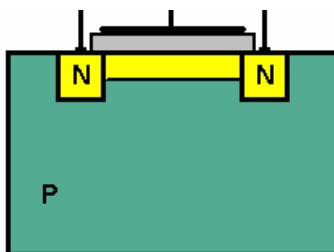
```
with PaintBox3.Canvas do begin
  Pen.Width := 1;
  Pen.Color := clred;
  moveto(fpoints2[updown2.position,updown1.position].X,268);
  lineto(fpoints2[updown2.position,updown1.position].X,
        fpoints2[updown2.position,updown1.position].Y-5);
  moveto(55,fpoints2[updown2.position,updown1.position].Y);
  lineto(fpoints2[updown2.position,updown1.position].X+5,
        fpoints2[updown2.position,updown1.position].Y);
end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „3_MOSFET-ochuzovací typ.exe“.
Zobrazena je struktura ochuzovacího typu tranzistoru MOSFET s kanálem typu N, připojená ke zdrojům napětí. Obě napětí jsou nulová, tranzistorem neprochází proud.
2. Nastavení: $U_{DS} = 0\text{ V}$, $U_{GS} = 2\text{ V}$.
Dochází k rozšíření zabudovaného kanálu a zvětšení počtu elektronů. Protože je $U_{DS} = 0\text{ V}$, neprochází tranzistorem proud (elektrony jsou nehybné).
3. Při $U_{DS} = 0\text{ V}$ snižování napětí U_{GS} ze 2 V na -2 V .
Dochází ke zúžení zabudovaného kanálu a zmenšení počtu elektronů. Protože je $U_{DS} = 0\text{ V}$, neprochází tranzistorem proud (elektrony jsou nehybné).
4. Při $U_{DS} = 0\text{ V}$ snížení napětí U_{GS} na -3 V a -4 V .
 U_{GS} pokleslo pod hodnotu prahového napětí – kanál zcela zaniká.
5. Při $U_{DS} = 1\text{ V}$ zvyšování napětí U_{GS} z -4 V na 2 V .
Po překonání prahového napětí začne kanálem procházet proud. Při takto malých hodnotách U_{DS} je šířka kanálu po celé délce téměř stejná, tranzistor se chová jako napětím U_{GS} řízený lineární odpor (při $U_{GS} = -3\text{ V}$ a -4 V je odpor „nekonečný“).
6. Při $U_{GS} = 2\text{ V}$ zvyšování U_{DS} z 0 V na 3 V .
Elektrony se dávají do pohybu. Díky úbytku napětí se indukovaný kanál zužuje směrem k elektrodě D.
7. Nastavení $U_{GS} = 2\text{ V}$, $U_{DS} = 4\text{ V}$
Dochází k zaškrvení kanálu.
8. Při $U_{GS} = 2\text{ V}$ zvyšování U_{DS} ze 4 V na 8 V .
Zaškrvení kanálu se nepatrně rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

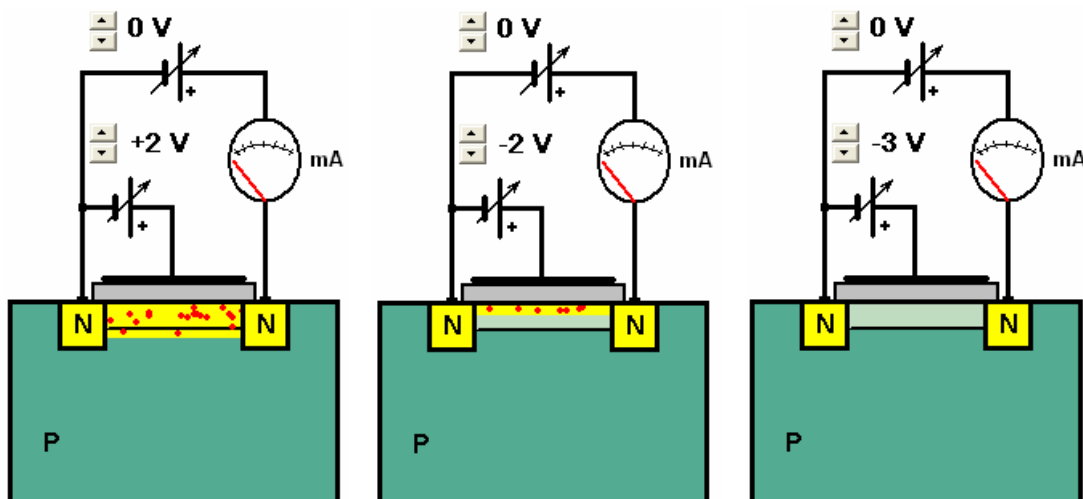
Výklad:

Struktura MOSFETu se zabudovaným kanálem je znázorněna na obr. 11.6. V substrátu (v našem případě s typem vodivosti P) jsou vytvořeny dvě oblasti s opačným typem vodivosti (N), propojené technologicky vytvořeným kanálem (též typu N). K těmto oblastem je přivedena elektroda S (Source), dodávající nositele z vnějšího obvodu a elektroda D (Drain), která nositele po průchodu indukovaným kanálem odsává. Řídící elektroda G (Gate) je od substrátu odizolována vrstvou SiO_2 .



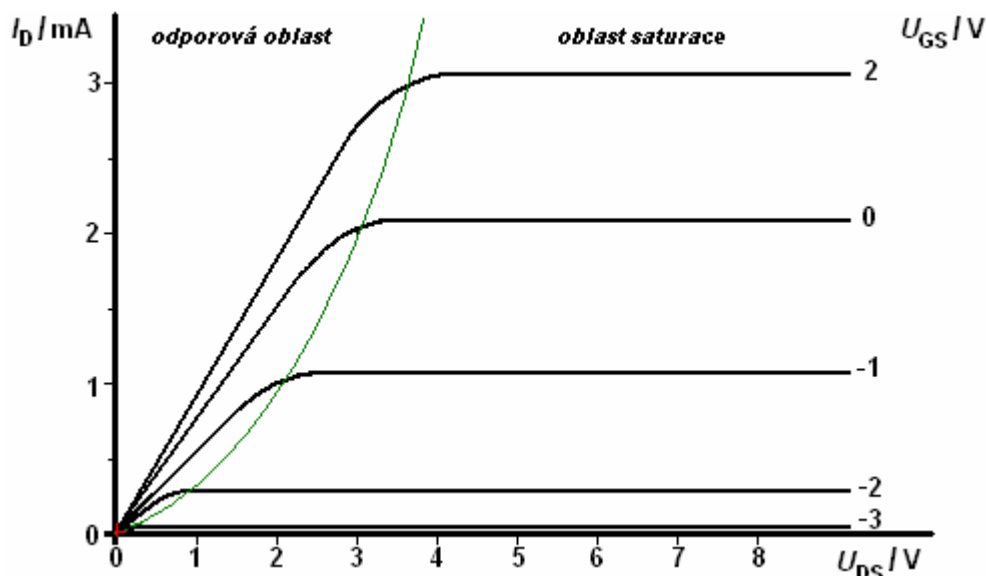
Obr. 11.6 Struktura tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem

Postup při použití ve výuce je obdobný jako u předchozího modelu. Je třeba demonstrovat změny tvaru kanálu v závislosti na obou napětích. Vhodné je nejprve nastavit $U_{DS} = 0V$ a měnit pouze U_{GS} . Při kladném napětí se již vytvořený kanál dále rozšiřuje a zvyšuje se koncentrace elektronů (červené tečky). Snižuje se tak odpor mezi elektrodami S a D. Při záporném napětí se kanál zužuje, počet elektronů klesá, odpor mezi elektrodami S a D se zvyšuje. Pokud napětí U_{GS} klesne pod hodnotu prahového napětí (v našem případě $-3V$), vodivý kanál zcela zaniká (obr. 11.7). Protože je $U_{DS} = 0V$, neprochází kanálem proud (elektrony jsou nehybné).



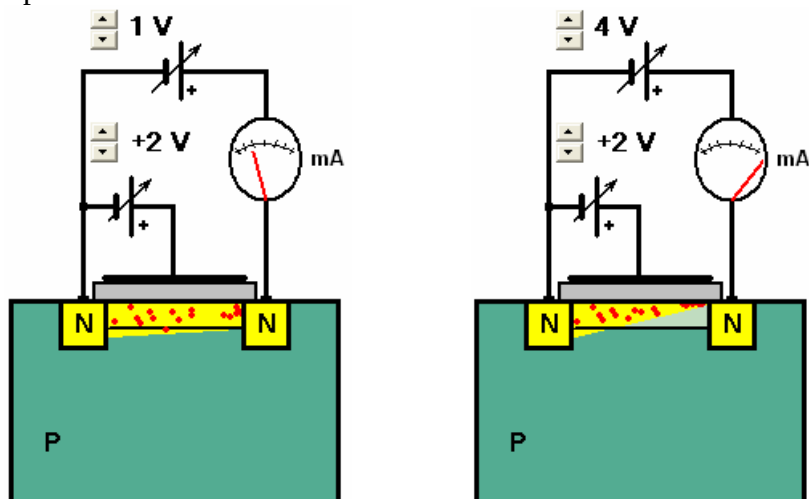
Obr. 11.7 Změna napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

Poté volíme hodnotu napětí $U_{DS} = 1V$. Napětí U_{GS} měníme v rozsahu $-2V$ až $2V$. Při takto malém napětí se téměř neuplatňuje úbytek napětí na indukovaném kanále a kanál má tak po celé délce téměř stejný průřez. Tranzistor se při této hodnotě U_{DS} chová jako rezistor řízený napětím U_{GS} . To je vidět i na V-A charakteristikách, které mají pro takto malá napětí lineární průběh (odporová oblast – obr. 11.8). Pro $U_{GS} = -3V$ a $-4V$ kanál zcela zaniká a odpor rezistoru je nekonečný.



Obr. 11.8 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem

Dále je třeba ukázat, jakým způsobem se mění tvar vodivého kanálu při zvyšujícím se napětí U_{DS} . Proto volíme $U_{GS} = +2V$. Napětí U_{DS} se rozloží podél celého kanálu. Zatímco nejbližší k elektrodě S je mezi kanálem a řídicí elektrodou hodnota napětí U_{GS} , u elektrody D je to již $U_{GS} - U_{DS}$. Proto se kanál při rostoucím U_{DS} směrem k elektrodě D zužuje (obr. 11.9). Jak je vidět z V-A charakteristik, při nízkých hodnotách U_{DS} proud stoupá lineárně s napětím. V okamžiku, kdy dojde k přiškrcení kanálu, se odpor tranzistoru zvyšuje a nedochází již při dalším zvýšení napětí k lineárnímu růstu proudu (ohyb V-A charakteristik). Pokud $U_{GS} - U_{DS}$ klesne pod hodnotu prahového napětí, dojde k úplnému zaškrcení kanálu. Při dalším zvýšení napětí již dochází pouze k nepatrnému nárůstu proudu (oblast saturace – obr. 11.8). Zaškrcení kanálu se nepatrně posouvá směrem k elektrodě S. Elektrony procházejí ochuzenou oblastí díky velkému napěťovému spádu.



Obr. 11.9 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 2 V$

3.3 Klopné obvody

Didaktický cíl:

Cílem těchto modelů je animace proudů a napětí v jednotlivých částech obvodu. Musí být rozebrána situace v okamžiku připojení zdroje napětí, kdy dochází (při symetrii obvodu) k diferenciaci báзовých proudů a obvod se díky kladné zpětné vazbě překlápí do stabilního, případně kvazistabilního stavu. Je třeba zvýraznit pouze dva možné stavy, ve kterých se mohou obvody nacházet: T_1 otevřen- T_2 uzavřen, nebo T_2 otevřen- T_1 uzavřen.

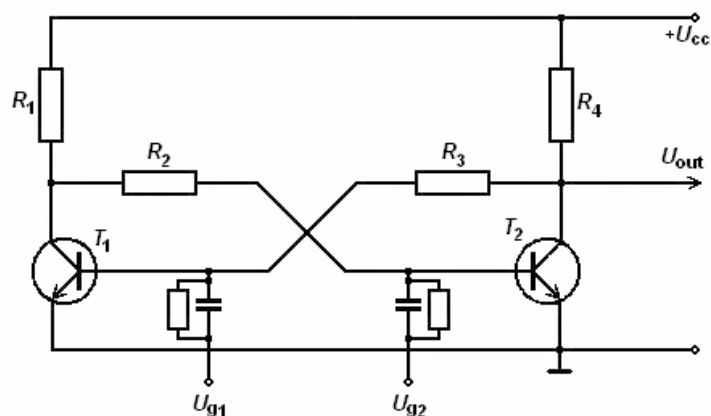
U bistabilního obvodu jsou umožněny různé způsoby řízení, z čehož vyplývá i praktické využití. Musí být vykresleny změny proudů a napětí při přivedení řídicích signálů.

V modelech monostabilního a astabilního obvodu musí být vzhledem k plynulé změně veličin (tloušťkou čárkované čáry dostatečně nezachytitelné), vykreslovány jejich časové průběhy. Programy musí také umožňovat změnu délky trvání kvazistabilních stavů změnou parametrů součástek.

3.3.1 Bistabilní obvod

Teorie:

Je to symetrický obvod se dvěma tranzistory, propojenými kladnou zpětnou vazbou (obr. 12.1). Báзовý proud každého z nich je určen kolektorovým napětím druhého. Pokud je T_1 otevřen, je jeho kolektorové napětí U_{ce1} téměř nulové, proto je nulový i báзовý proud I_{b2} tranzistoru T_2 a ten je uzavřen. Jeho kolektorové napětí U_{ce2} nabývá hodnoty téměř U_{cc} a zajišťuje otevření tranzistoru T_1 báзовým proudem I_{b1} . Analogická situace nastane pro T_2 otevřen, T_1 uzavřen. To jsou dva stabilní stavy, ve kterých se může obvod nacházet. Výstupem je kolektorové napětí U_{ce2} , nabývající saturačního napětí (setiny až desetiny voltu) nebo napětí blízkého se napětí napájecímu.



Obr. 12.1 Bistabilní obvod

Po připojení napájecího napětí začnou obvodem procházet báзовé proudy, které mají při symetrii obvodu v prvních okamžicích stejné hodnoty. I nepatrný rozdíl proudových zesilovacích činitelů však způsobí rozdílnost kolektorových proudů a tím i kolektorových napětí, která jsou určující pro báзовé proudy. Kladnou zpětnou vazbou se obvod dostane do jednoho ze stabilních stavů. Nesymetrií hodnot odporů lze dosáhnout jednoznačného stavu po připojení zdroje napětí.

Překlápění obvodu mezi dvěma stabilními stavy se provádí řídicími impulsy přiváděnými na báze tranzistorů přes oddělovací kondenzátory. Paralelně ke kondenzátorům jsou připojeny rezistory, zajišťující vybití kondenzátoru před dalším řídicím impulsem. Nabízí se několik možností řízení tohoto obvodu (platí pro tranzistory typu NPN):

- a) Řízení kladným impulsem přivedeným na bázi uzavřeného tranzistoru.
- b) Řízení záporným impulsem přivedeným na bázi otevřeného tranzistoru.
- c) Řízení impulsy se střídavými polaritami, přiváděnými na jeden vstup.
- d) Přivedením střídavého napětí (s dostatečnou amplitudou a frekvencí) na jeden vstup, na výstupu dostaneme obdélníkový průběh napětí se stejnou frekvencí jako napětí vstupní. Obvod tak pracuje jako tvarovač střídavého signálu.
- e) Řízení kladným nebo záporným impulsem přivedeným na propojené vstupy. Impulsy obou polarit mají stejný vliv na překlopení obvodu, protože kladný impuls ovlivní pouze uzavřený tranzistor a záporný impuls pouze tranzistor otevřený.
- f) Přivedením obdélníkového napětí na propojené vstupy, obvod se překlápí s každou náběžnou hranou. Na výstupu tak dostáváme obdélníkový průběh napětí s poloviční frekvencí. Obvod pracuje jako dělič kmitočtu.

Realizace:

Provedení modelu je patrné z obr. 13.3 a)-f). V pravé části se nachází obvod, ten je do okna programu vložen jako obrázek. Vlevo je umístěn ovládací panel, kde je možné přepínat mezi jednotlivými, již zmíněnými, způsoby řízení obvodu. Podle zvoleného způsobu ovládání se u obvodu zviditelňují další obrázky a tlačítka, představující ovládací prvky a průběhy řídicích signálů.

Tlačítko **START** (**STOP**) představuje připojení (odpojení) obvodu ke zdroji napětí. Po jeho stisknutí se zviditelní obrázky čárkovaných čar, představující protékající proudy, zároveň je spuštěn časovač, který ve zvoleném intervalu provádí posun těchto čar, pomocí proměnné *i*:

```
i:=i+1;
image1.Left:=207 - 2*(i mod 8);
image10.Left:=207 - 2*(i mod 8);
image7.Left:=523 - 2*(i mod 8);
.....atd.
```

To znamená, že při každém kroku se hodnota *i* zvýší o 1 a levý okraj čárkovaných čar se posune o 2 pixely. **mod** znamená zbytek po celočíselném dělení, takže je čárka posunuta vždy osmkrát a pak se vrací na původní místo. Pomocí proměnné *i* se určují i tloušťky čar, znázorňující velikosti proudů. Jsou zde pro zjednodušení použity proměnné *r1*, *r2*, *r3*, *r4*, *t1*, *t2*, představující velikost proudu v jednotlivých částech obvodu:

```
if(i < 5)then begin
    r1 := 2;   t1 := 2;
    r4 := 2;   t2 := 2;
    r2 := 2;   r3 := 2; end;
if((i > 4)and(i < 9)) then begin
    r1 := 3;   t1 := 3;
    r4 := 2;   t2 := 2;
    r3 := 2;   r2 := 2; end;
.....atd.
```

Nakonec dojde k přiřazení těchto proměnných k tloušťkám čar:

```
image1.Height:=r1;  
image12.Width:=r1;  
image13.Width:=r4;  
image19.Width:=r1;  
....atd.
```

Na počátku je nastaveno $i:=0$; . Tato hodnota odpovídá připojení zdroje napětí, v obou polovinách obvodu protékají stejné proudy. Se zvyšující se hodnotou i dochází k překlápění obvodu a hodnota $i=13$ znamená úplné překlopení do prvního stabilního stavu. Pak se hodnota i mění stále od 13 do 20, což odpovídá prvnímu stabilnímu stavu: T_1 otevřen, T_2 uzavřen. Překlopení obvodu do druhého stabilního stavu se provede nastavením $i:=21$; , potom se i mění stále od 21 do 28, což odpovídá druhému stabilnímu stavu T_1 uzavřen, T_2 otevřen:

```
i:=i+1;  
if i=21 then i:=13;  
if i=29 then i:=21;
```

Při stisku tlačítka pro přivedení řídicího impulsu tedy stačí změnit hodnotu i a obvod se překlápí do požadovaného stavu:

```
i:=13;      nebo      i:=21;
```

Pokud obvod pracuje jako tvarovač, není řízení prováděno tlačítky, ale vstupním signálem:

```
if (Form1.FPoints[1].Y<11) and (Form1.FPoints[1].Y>8) and  
Form1.FPoints[1].Y-Form1.FPoints[2].Y<0) then i:=13;  
if (Form1.FPoints[1].Y>44) and (Form1.FPoints[1].Y<47) and  
(Form1.FPoints[1].Y-Form1.FPoints[12].Y>0) then i:=21;
```

Form1.FPoints[1].Y znamená ypsilonovou souřadnici prvního bodu vstupní sinusovky a Form1.FPoints[2].Y bod druhý. Znamená to, že k překlopení obvodu dojde, pokud dosáhne okamžitá hodnota vstupního signálu určité hodnoty.

Podobně je tomu u děliče kmitočtu. Zde dochází ke změně stavu s náběžnou hranou vstupního signálu:

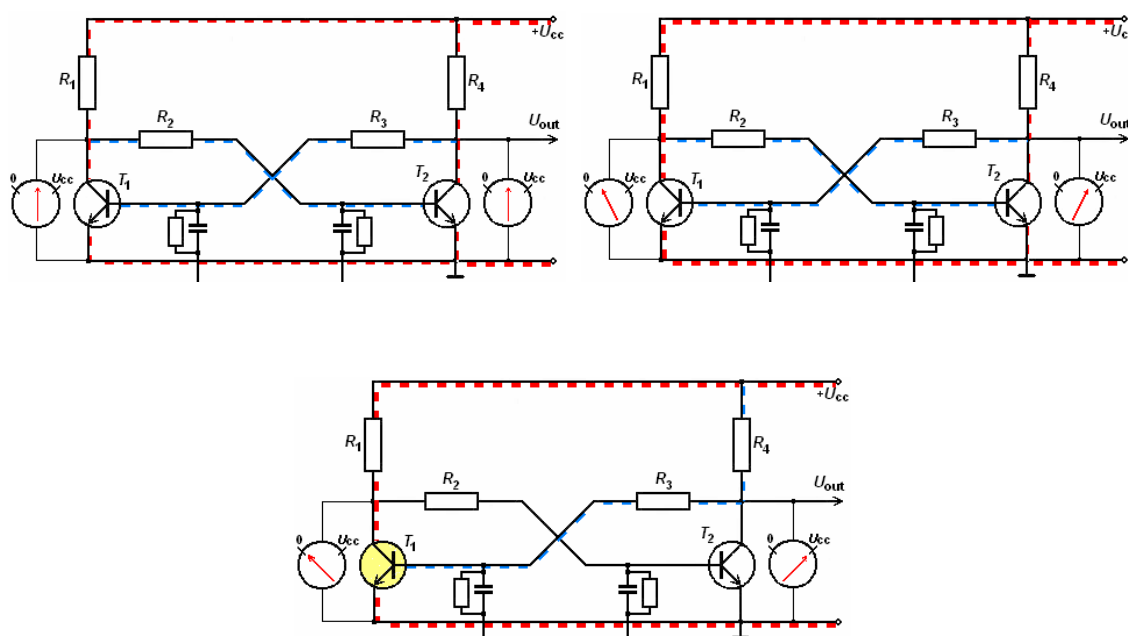
```
if (Form1.FPoints[1].Y)<(Form1.FPoints[2].Y)  
then begin if i<21 then i:=21 else i:=13; end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „1_Bistabilní obvod“.
Obvod není připojen ke zdroji napětí – neprocházejí jím proudy. Model je přepnut do režimu řízení kladným impulsem.
2. Stisknutí tlačítka **START** – připojení napájecího napětí.
Dochází k rozlišení zpočátku stejných proudů v levé a pravé části symetrického obvodu. Kladnou zpětnou vazbou se obvod překlápí do stabilního stavu.
3. Stisknutí tlačítka **STOP**.
Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k odpojení napájecího napětí. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po připojení napětí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.
4. Přivádění řídicích impulsů tlačítky **1**, **2**.
(model je v režimu řízení kladným impulsem – tlačítko **kladný impuls**)
Kladný impuls způsobí překlopení obvodu pouze pokud je přiveden na uzavřený tranzistor.
5. Přepnutí do režimu řízení záporným impulsem – tlačítko **záporný impuls** a stisknutí tlačítka **START** – připojení napájecího napětí.
6. Přivádění řídicích impulsů tlačítky **1**, **2**.
Záporný impuls způsobí překlopení obvodu pouze pokud je přiveden na otevřený tranzistor.
7. Přepnutí do režimu řízení jedním vstupem – tlačítko **jeden vstup** a stisknutí tlačítka **START** – připojení napájecího napětí.
8. Přivádění řídicích impulsů tlačítky **+**, **-**.
K překlopení obvodu dojde přivedením kladného impulsu, pokud je T_1 uzavřený a záporného, pokud je T_1 otevřen.
9. Přepnutí do režimu **tvarovač** a stisknutí tlačítka **START**.
Ukazuje praktické využití obvodu při řízení jedním vstupem. Harmonický průběh na vstupu je vytvarován do průběhu obdélníkového.
10. Přepnutí do režimu řízení společným vstupem – tlačítko **společný vstup** a stisknutí tlačítka **START**.
11. Přivádění řídicích impulsů tlačítky **+**, **-**.
K překlopení obvodu dojde vždy. Na kladný impuls reaguje uzavřený tranzistor, na záporný otevřený tranzistor.
12. Přepnutí do režimu **dělič kmitočtu** a stisknutí tlačítka **START**.
Ukazuje praktické využití obvodu při společném vstupem. Obvod je překlopen vždy při náběžné hraně. Na výstupu má průběh poloviční frekvenci.

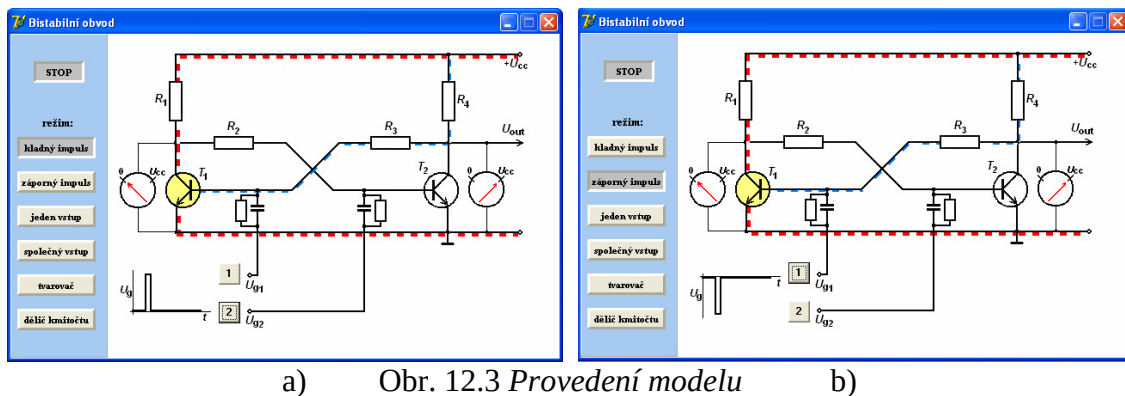
Výklad:

Při zařazení do výuky je třeba nejprve demonstrovat děje probíhající po připojení zdroje napětí. K tomuto účelu jsou vhodné všechny režimy, kromě *tvarovače* a *děliče kmitočtu*, kdy se řízení provádí vstupním signálem. Připojení zdroje napětí se provádí tlačítkem **START**. Zpočátku jsou proudy v levé a pravé polovině obvodu vyrovnané, oba tranzistory se začínají otevírat stejně rychle a kolektorová napětí jsou vyrovnaná. Díky i nepatrnému rozdílu proudových zesilovacích činitelů se jeden z tranzistorů začne otevírat rychleji, v našem případě je to T_1 . Dojde k rozlišení kolektorových napětí: $U_{ce1} < U_{ce2}$. Tato napětí jsou však určující pro bazové proudy: $I_{b1} > I_{b2}$. Proto se T_1 otevírá stále rychleji a T_2 se uzavírá. Kladnou zpětnou vazbou se dosahuje prvního stabilního stavu (obr. 12.2). Tento proces je velmi rychlý, proto i v modelu trvá tato fáze krátkou dobu (asi 2 sekundy). Tlačítkem **STOP** je možné provést odpojení obvodu od zdroje a znovu ho připojit tlačítkem **START**. Pro větší názornost je otevřený tranzistor vždy podbarven žlutě.

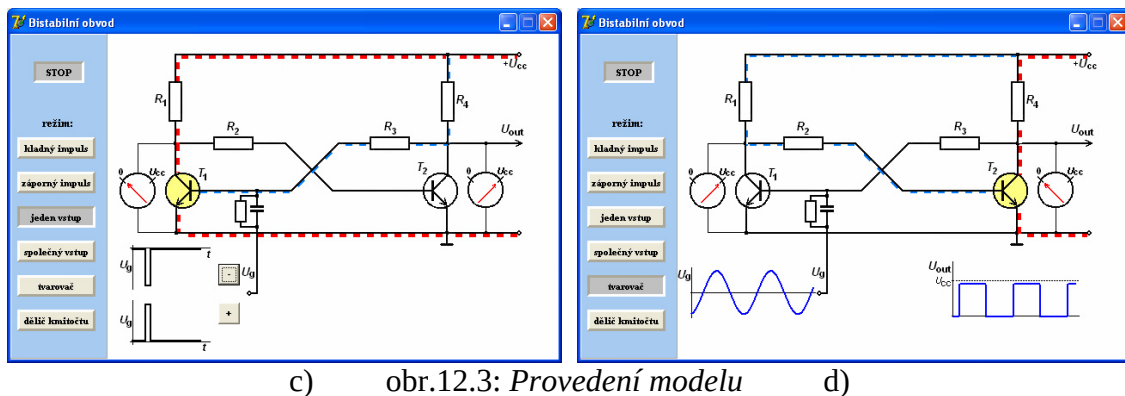


Obr. 12.2 Překlápění bistabilního obvodu do stabilního stavu po připojení zdroje

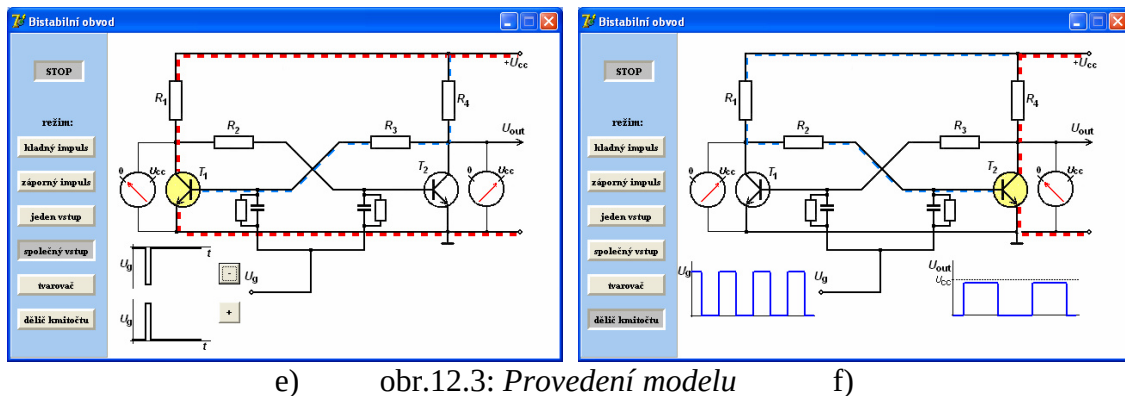
Model nabízí různé způsoby ovládání, pokud dojde k přepnutí do jiného režimu, je obvod odpojen od zdroje a musíme znovu použít tlačítko **START**. Nejprve proběhne počáteční fáze překlápění do stabilního stavu a teprve pak můžeme obvod ovládat. První dva režimy jsou ovládání kladným impulsem (tlačítko **kladný impuls**, obr. 12.3 a) a ovládání záporným impulsem (tlačítko **záporný impuls**, obr. 12.3 b). V obou případech jsou k dispozici tlačítka **1** a **2**, kterými se přivádí impuls přes oddělovací kondenzátor na bázi tranzistoru T_1 nebo T_2 . Kladný impuls způsobí překlápění obvodu, pokud je přiveden na uzavřený tranzistor. Záporný impuls musí být naopak přiveden na otevřený tranzistor.



Další možností, jak obvod ovládat, je přivádění střídavě kladného a záporného impulsu pouze na jeden vstup (tlačítko **jeden vstup**, obr. 12.3 c). Situace je stejná jako v prvních dvou případech. K překlopení obvodu dojde při přivedení kladného impulsu, pokud je tranzistor uzavřený, nebo záporného impulsu, pokud je tranzistor otevřený. Tohoto zapojení lze využít jako tvarovače signálu (tlačítko **tvarovač**). Pokud je na vstup přiveden střídavý signál s dostatečnou frekvencí a amplitudou, obvod se překlápá se stejnou frekvencí jakou má tento signál a na výstupu sledujeme obdélníkový průběh (obr. 12.3 d).



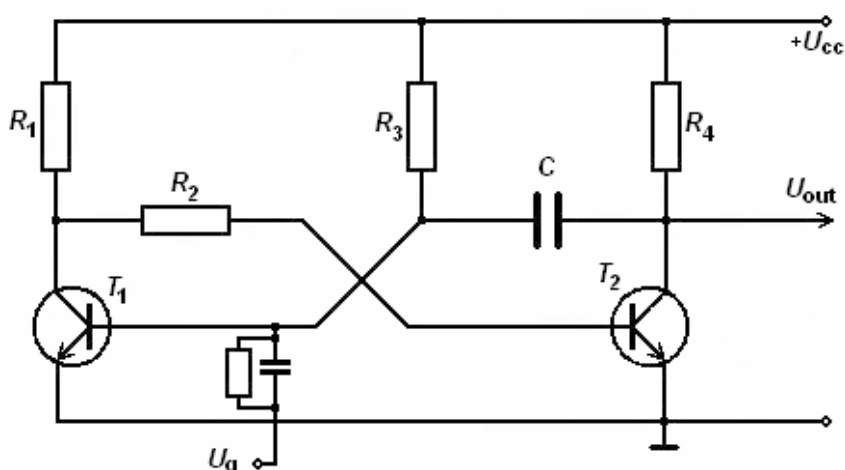
Posledním způsobem řízení, který model umožňuje je přivádění kladného nebo záporného impulsu na propojené vstupy (tlačítko **společný vstup**, obr. 12.3 e). Kladný impuls opět ovlivňuje pouze uzavřený tranzistor, záporný impuls tranzistor otevřený. Tohoto zapojení se využívá i jako děliče kmitočtu (tlačítko **dělič kmitočtu**). Po přivedení obdélníkového napětí na vstup dochází k překlápění obvodu s náběžnou hranou tohoto signálu. Na výstupu je proto obdélníkový průběh s poloviční frekvencí (obr. 12.3 f).



3.3.2 Monostabilní obvod

Teorie:

Tento obvod, jehož zapojení je na obr. 13.1, má pouze jeden stabilní stav: T_1 otevřen, T_2 uzavřen. Při tomto stavu je kolektorové napětí U_{ce1} tranzistoru T_1 téměř nulové (saturační napětí). Je tak zajištěno uzavření tranzistoru T_2 , neboť tímto napětím je určen bázev proud I_{b2} . Do báze tranzistoru T_1 teče proud I_{b1} , ovlivňovaný nabíjením kondenzátoru C .



Obr. 13.1 Monostabilní obvod

Po připojení napájecího napětí začnou protékat bázevé proudy I_{b1} a I_{b2} . Proud I_{b2} teče přes rezistory R_1 a R_2 . Proud I_{b1} je mnohem větší, protože je dán součtem proudu přes R_3 a nabíjecího proudu kondenzátoru C přes R_4 . Tranzistor T_1 se otevírá rychleji a zmenšuje se jeho kolektorové napětí, které je určující pro bázev proud I_{b2} tranzistoru T_2 . Dochází proto k uzavírání tranzistoru T_2 . Obvod se dostává do svého stabilního stavu: T_1 otevřen T_2 uzavřen. Kondenzátor C se rychle nabije na napětí blízké U_{cc} .

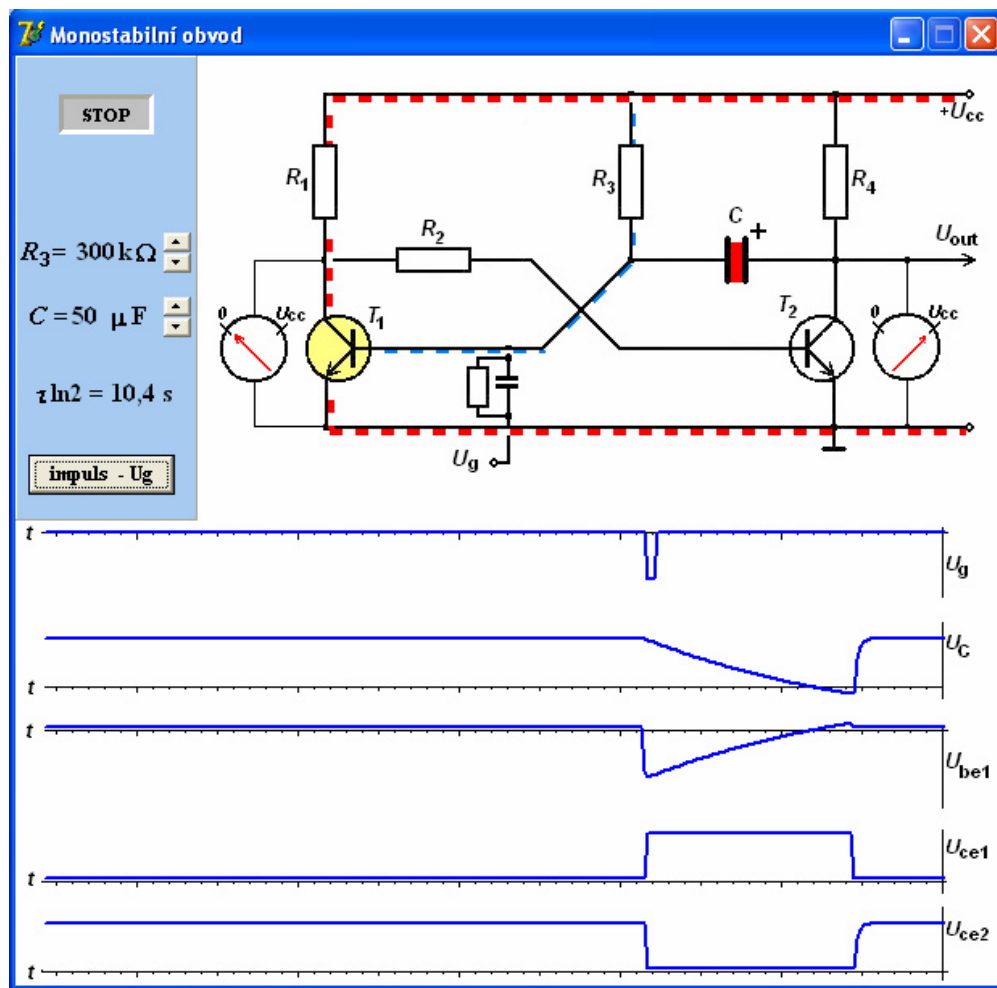
Po přivedení záporného řídicího impulsu na bázi otevřeného tranzistoru T_1 , se tento tranzistor uzavře. Jeho kolektorové napětí vrosté, tím se otevře tranzistor T_2 a uzemní kladný pól kondenzátoru C . Na bázi tranzistoru T_1 se nyní nachází záporné napětí kondenzátoru C , které brání jeho otevření. T_1 se začne otevírat až po vybití a nabití kondenzátoru C na asi 0,5 V opačné polarity (křemíkový tranzistor). Jeho otevření způsobí uzavření tranzistoru T_2 a obvod se opět nachází ve stabilním stavu. Vybíjení kondenzátoru C můžeme popsat rovnicí:

$$U_C = U_{cc} \left(1 - 2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \tau = R_3 \cdot C.$$

Vybití z U_{cc} na 0V trvá $T = \tau \cdot \ln 2$ sekund. Čas trvání kvazistabilního stavu je o něco delší, protože kondenzátor je třeba nabít ještě na 0,5 V opačné polarity. Tento rozdíl je tím větší, čím menší je napájecí napětí.

Poté probíhá regenerace – nabití kondenzátoru C na napětí blízké U_{cc} . Po skončení tohoto procesu je obvod opět připraven na překlopení. Aby se dal obvod znovu překlopit, je třeba vybit oddělovací kondenzátor na vstupu, to je zajištěno paralelně připojeným rezistorem.

Realizace:



Obr. 13.2 Provedení modelu monostabilního obvodu

Provedení modelu je patrné z obr. 13.2. V horní části se nachází schéma obvodu. To je do okna programu vloženo jako obrázek. V dolní části jsou zobrazovány průběhy napětí v různých částech obvodu. Časová osa je opatřena stupnicí, jejíž nejmenší dílek odpovídá času 1 s. Vlevo nahoře je umístěn ovládací panel. Zde je možné tlačítky ▲▼ (komponenta UpDown) měnit hodnotu C od $50 \mu\text{F}$ do $100 \mu\text{F}$ po $10 \mu\text{F}$ a R_3 od $100 \text{k}\Omega$ do $500 \text{k}\Omega$ po $100 \text{k}\Omega$. Zároveň dochází k přepočítání doby trvání kvazistabilního stavu, ta se pohybuje v rozmezí $0,7 \text{ s}$ až $34,7 \text{ s}$. Dále se zde nachází tlačítko pro přivedení záporného řídicího impulsu **impuls - Ug** a tlačítko **START** (**STOP**), představující připojení (odpojení) obvodu ke zdroji napětí. Po jeho stisknutí se zviditelní obrázky čárkovaných čar, představující protékající proudy, zároveň je spuštěn časovač, který provádí posun těchto čar pomocí proměnné i :

```
i:=i+1;
if i=9 then i:=1;
image1.Left:=207 - 2*i;
image16.Left:=207 - 2*i;
image5.Left:=523 - 2*i;
.....atd.
```

To znamená, že při každém kroku se hodnota i zvýší o 1 a čárkované čáry jsou posunuty o 2 pixely. Hodnota i se mění od 1 do 8, takže se čárka posune vždy osmkrát a pak se vrací na původní místo.

Pro funkci celého modelu je klíčový průběh napětí na kondenzátoru C (U_C). Je zde použita pomocná proměnná k , která symbolizuje stavy: nabíjení kondenzátoru C přes R_4 ($k=1$), vybíjení kondenzátoru C přes rezistor R_3 ($k=2$). Po připojení zdroje napětí (tlačítko **START**) je nastaveno $k:=1$; a začnou se počítat okamžité hodnoty důležitých napětí. Probíhá překlopení do stabilního stavu:

```
if k=1 then begin
  fpoints2[280].Y:=3;
  if fpoints3[279].Y<37 then
    fpoints3[280].Y:=fpoints3[279].Y+4
  else fpoints3[280].Y:=38;
  if fpoints4[279].Y>10 then
    fpoints4[280].Y:=40-round(30*(1-exp(-T)))
  else begin fpoints4[280].Y:=10; T:=0;end;
  if fpoints5[279].Y>10 then
    fpoints5[280].Y:=38-round(28*(1-exp(-T)));
  else fpoints5[280].Y:=10;
end;
```

fpoints2[280].Y znamená okamžitou hodnotu napětí U_{be1} .

fpoints3[280].Y znamená okamžitou hodnotu napětí U_{ce1} .

fpoints4[280].Y znamená okamžitou hodnotu napětí U_C .

fpoints5[280].Y znamená okamžitou hodnotu napětí U_{ce2} .

Při stisku tlačítka **impuls – Ug** dojde k nastavení $k=2$ a vynulování proměnné T , znázorňující čas:

$k:=2$;

$T:=0$;

Při každém kroku se zvýší hodnota T o 1 a dojde opět k počítání hodnot napětí:

```
T:=T+1;
if k=2 then begin
  if T<4 then fpoints1[280].Y:=30
    else fpoints1[280].Y:=1;
  fpoints3[280].Y:=10;
  fpoints4[280].Y:=10+round(60*(1-
    exp(-200*T/(updown1.position*updown2.position))));
  fpoints2[280].Y:=45-fpoints4[280].Y;
  fpoints5[280].Y:=38;
end;
```


Napětí na kondenzátoru má exponenciální průběh závislý na parametrech `updown1.position` a `updown2.position`, představující nastavené hodnoty C a R_3 .

V okamžiku, kdy napětí na kondenzátoru dosáhne požadované hodnoty, dochází k překlopení obvodu změnou proměnné k . Zároveň je vynulován čas T :

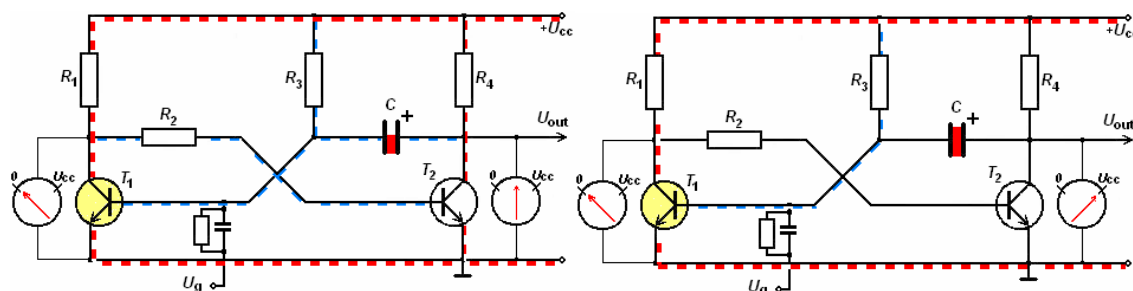
```
if fpoints4[280].Y>44 then begin k:=1; T:=0;
end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „2_Monostabilní obvod“.
Obvod není připojen ke zdroji napětí – neprocházejí jím proudy. Nastaveno $R_3 = 300k\Omega$, $C = 50\mu F$.
2. Stisknutí tlačítka **START** – připojení napájecího napětí.
Obvodem začnou protékat proudy. Bázový proud tranzistoru I_{b1} je větší, T_1 se otevírá rychleji. Kladnou zpětnou vazbou se obvod překlopí do stabilního stavu. Kondenzátor je nabit na hodnotu napájecího napětí.
3. Stisknutí tlačítka **STOP**.
Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k odpojení napájecího napětí. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po připojení napětí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.
4. Přivedení řídicího impulsu tlačítkem **impuls – Ug**.
Obvod je překlopen do kvazistabilního stavu. Kondenzátor se vybíjí. Po jeho vybití a nabití na 0,5 V opačné polaritě je obvod překlopen do stabilního stavu.
5. Nastavení hodnot: $R_3 = 100k\Omega$, $C = 50\mu F$. Stisk tlačítka **impuls – Ug**.
Čas trvání kvazistabilního stavu je nyní 0,7 s.
6. Nastavení hodnot: $R_3 = 500k\Omega$, $C = 100\mu F$. Stisk tlačítka **impuls – Ug**.
Čas trvání kvazistabilního stavu je nyní 34,7 s.
7. Stisk tlačítka **impuls – Ug** během trvání kvazistabilního stavu.
Nenastává žádná změna. Obvod po dobu kvazistabilního stavu a regenerace (nabití kondenzátoru na hodnotu napájecího napětí) na řídicí impulsy nereaguje.
8. Po překlopení do stabilního stavu stisknutí tlačítka **STOP**.
Dochází k odpojení napájecího napětí. Obvodem přestávají téci proudy, průběhy napětí však zůstávají zobrazeny. Z časové osy je možné odečíst dobu trvání kvazistabilního stavu.
9. Nastavování libovolných hodnot R_3 a C .

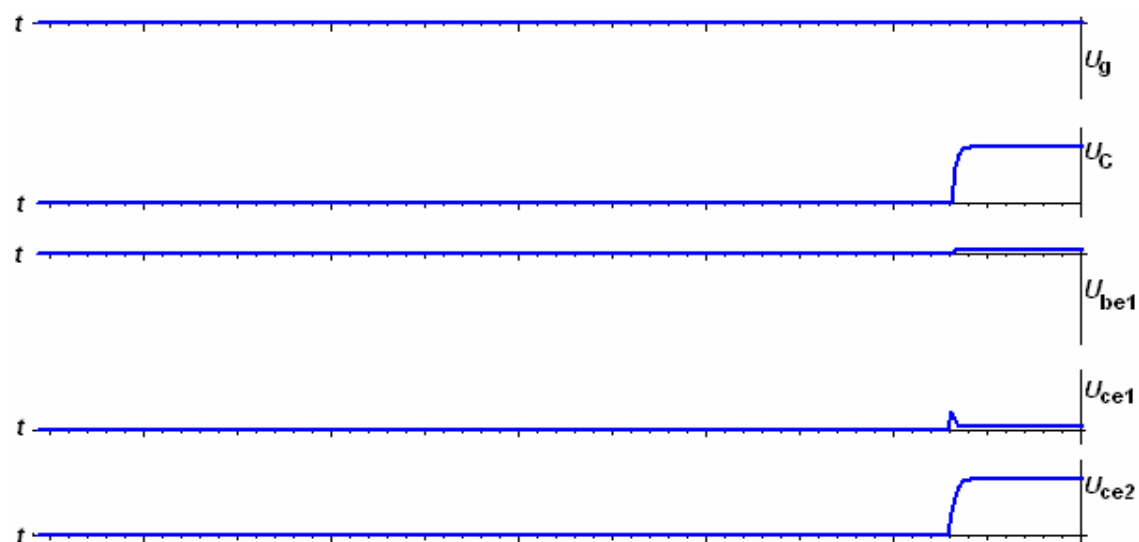
Výklad:

Při zařazení do výuky je třeba nejprve demonstrovat děje probíhající po připojení zdroje napětí (tlačítko **START**). Bázový proud I_{b2} tranzistoru T_2 protéká přes rezistory R_1 a R_2 . Proud I_{b1} je mnohem větší, protože je dán součtem proudu přes R_3 a nabíjecího proudu kondenzátoru C přes R_4 . Tranzistor T_1 se otevírá rychleji a zmenšuje se jeho kolektorové napětí, které je určující pro bázový proud I_{b2} tranzistoru T_2 . Dochází proto k jeho uzavírání. Obvod se rychle dostává do svého stabilního stavu: T_1 otevřen T_2 uzavřen. Kondenzátor C se rychle nabije přes rezistor R_4 a otevřený T_1 na napětí blízké U_{cc} (obr. 13.3).



Obr. 13.3 Překlápění monostabilního obvodu do stabilního stavu po připojení zdroje

Na obr. 13.4 jsou znázorněny průběhy napětí v jednotlivých částech obvodu: Tranzistor T_1 se rychle otevírá, proto napětí mezi jeho kolektorem a emitorem U_{ce1} rychle klesá téměř na nulu (saturační napětí), taktéž napětí mezi báží a emitorem U_{be1} odpovídá otevřenému tranzistoru. V důsledku otevírání tranzistoru T_1 , se tranzistor T_2 uzavírá, a proto napětí mezi jeho kolektorem a emitorem U_{ce2} vzroste s nabíjejícím se kondenzátorem C téměř na hodnotu napájecího napětí U_{cc} . Toto napětí je zároveň napětím výstupním.

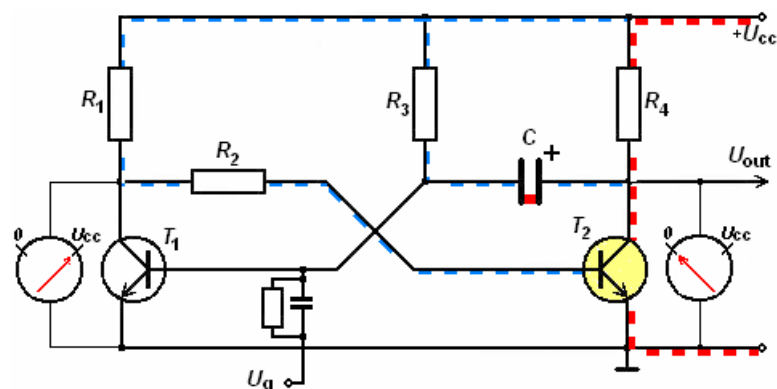


Obr. 13.4 Průběhy napětí po připojení zdroje

Procesy po připojení U_{cc} jsou velmi rychlé, proto je k dispozici tlačítko **STOP**, kterým je možné provést odpojení obvodu od zdroje a znovu ho připojit tlačítkem **START**. Pro větší názornost je otevřený tranzistor vždy podbarven žlutě.

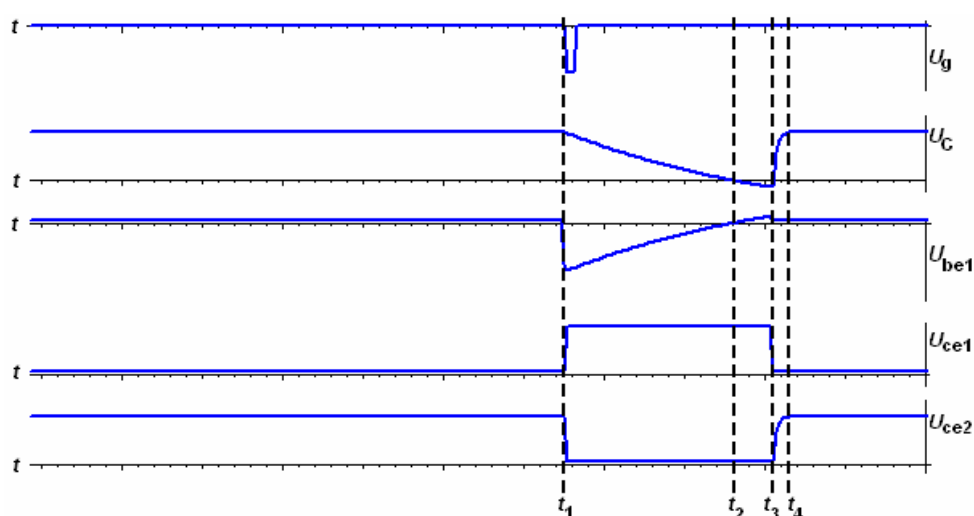
Překlopení obvodu se provádí přivedením záporného impulsu na bázi otevřeného tranzistoru přes oddělovací kondenzátor (tlačítko **impuls – Ug**). K oddělovacímu kondenzátoru je paralelně připojen rezistor, zajišťující jeho vybití před přivedením dalšího řídicího impulsu.

Okamžik přivedení řídicího impulsu $-U_g$ je na obr. 13.6 vyznačen jako čas t_1 . Řídicí impuls způsobí uzavření tranzistoru T_1 , napětí mezi jeho kolektorem a emitorem U_{ce1} vzroste. Toto napětí je však určující pro bázevý proud tranzistoru T_2 . Proto dojde k jeho otevření a napětí mezi jeho kolektorem a emitorem klesne na hodnotu saturačního napětí. Dochází k uzemnění kladného pólu kondenzátoru C . Na bázi tranzistoru T_1 se nyní nachází záporné napětí U_{be1} kondenzátoru C , které brání jeho otevření (obr. 13.5).



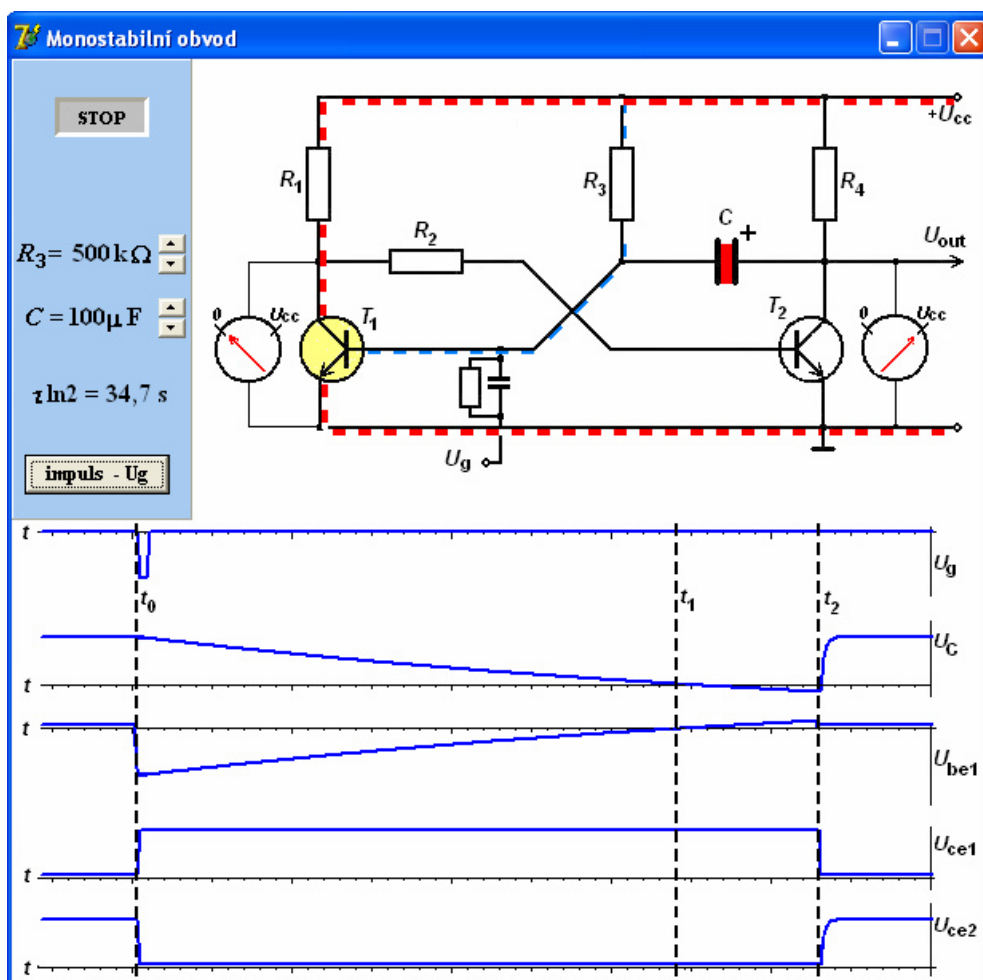
Obr. 13.5 Kvazistabilní stav

Kondenzátor C se začne vybíjet přes rezistor R_3 a otevřený T_2 s časovou konstantou $\tau = R_3 \cdot C$. Jak klesá napětí U_C na kondenzátoru C , zvyšuje se napětí U_{be1} na bázi tranzistoru T_1 . V okamžiku t_2 (obr. 13.6) obě tato napětí dosahují nulové hodnoty, to však ještě k otevření tranzistoru T_1 nestačí. Kondenzátor C se nabíjí dále na opačnou polaritu. V okamžiku t_3 dosahuje napětí na kondenzátoru U_C hodnoty asi 0,5 V. Napětí U_{be1} na bázi tranzistoru T_1 je dáno součtem tohoto napětí a saturačního napětí tranzistoru T_2 . Napětí U_{be1} proto dosahuje hodnoty 0,6 V, což je napětí potřebné k otevření tranzistoru T_1 (křemíkový tranzistor). Napětí U_{ce1} skokově klesne na hodnotu saturačního napětí. Tranzistor T_2 se uzavře. Napětí U_{ce2} vzroste na hodnotu napájecího napětí až po nabití kondenzátoru C přes rezistor R_4 a otevřený T_1 . Nyní je obvod opět připraven na překlopení (t_4).



Obr. 13.6 Průběhy napětí při kvazistabilním stavu

Čas trvání kvazistabilního stavu závisí na volbě hodnot R_3 a C . Model umožňuje změny těchto parametrů v rozsahu: $R_3 = 100\text{k}\Omega$ až $500\text{k}\Omega$ a $C = 10\mu\text{F}$ až $100\mu\text{F}$. Lze tedy měnit dobu překlopení od 0,7 s do 34,7 s. Tyto parametry lze měnit pouze, pokud je obvod ve stabilním stavu. Je třeba podotknout, že tato doba odpovídá vybití kondenzátoru na 0V, skutečná doba kvazistabilního stavu je o něco delší, protože kondenzátor je třeba nabít ještě na 0,5 V opačné polarity. Časové osy průběhů napětí jsou opatřeny stupnicí. Tlačítkem **STOP** lze zastavit činnost a snadno spočítat dobu překlopení obvodu. Nejmenší dílek znázorňuje 1 s. Na obr. 13.7 jsou nastaveny hodnoty: $R_3 = 500\text{k}\Omega$ a $C = 100\mu\text{F}$, což odpovídá době 34,7 s. t_0 je okamžik přivedení řídicího impulsu, t_1 okamžik vybití kondenzátoru na 0 V (34,7 s), t_2 je okamžik překlopení zpět do stabilního stavu.

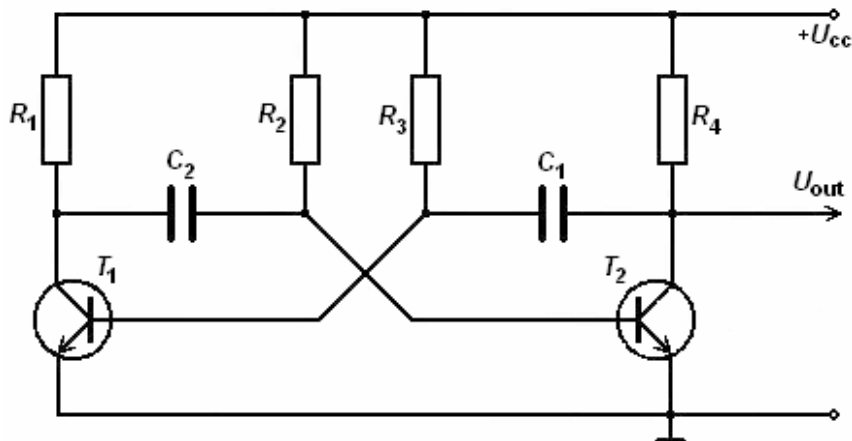


Obr. 13.7 Doba trvání kvazistabilního stavu

3.3.3 Astabilní obvod

Teorie:

Jak již název napovídá, tento obvod, jehož zapojení je na obr. 14.1, nemá žádný stabilní stav. Pravidelně se střídají dva kvazistabilní stavy: T_1 otevřen- T_2 uzavřen a T_2 otevřen- T_1 uzavřen. Na výstupu se tak střídá napětí U_{cc} a saturační napětí. Obvod funguje jako generátor obdélníkového napětí.



Obr. 14.1 Astabilní obvod

Po připojení napájecího napětí se začnou oba tranzistory otevírat. Bázový proud I_{b1} tranzistoru T_1 je dán součtem proudu rezistorem R_3 a nabíjecího proudu kondenzátoru C_1 přes rezistor R_4 . Bázový proud I_{b2} tranzistoru T_2 je dán součtem proudu rezistorem R_2 a nabíjecího proudu kondenzátoru C_2 přes rezistor R_1 . Podle volby parametrů součástek se bude jeden z tranzistorů otevírat rychleji. V případě symetrie obvodu, i nepatrný rozdíl proudových zesilovacích činitelů tranzistorů T_1 a T_2 způsobí rychlejší otevírání jednoho z nich.

Předpokládejme, že se rychleji otevírá tranzistor T_1 . Dochází k rozlišení kolektorových napětí: $U_{ce1} < U_{ce2}$. Protože $R_1 \ll R_2$ a $R_4 \ll R_3$, tvoří nabíjecí proudy kondenzátorů převážnou část bázových proudů. Proto je kolektorové napětí prvního tranzistoru určující pro bázový proud tranzistoru druhého a naopak. Dochází k odlišení bázových proudů: $I_{b1} > I_{b2}$, což má za následek další zvýšení rozdílu $U_{ce1} < U_{ce2}$. Kladnou zpětnou vazbou dojde k uzavření tranzistoru T_2 a otevření tranzistoru T_1 . Kondenzátor C_1 se rychle nabije přes rezistor R_4 na napětí téměř U_{cc} . Toto napětí je zároveň výstupní hodnotou. Kondenzátor C_2 je po tomto počátečním procesu nabit na poměrně velké napětí. Jeho kladný pól je uzemněn otevřeným tranzistorem T_1 , a zajišťuje tak záporným napětím uzavření tranzistoru T_2 . Obvod se nachází v prvním kvazistabilním stavu: T_1 otevřen- T_2 uzavřen, výstupní napětí téměř U_{cc} .

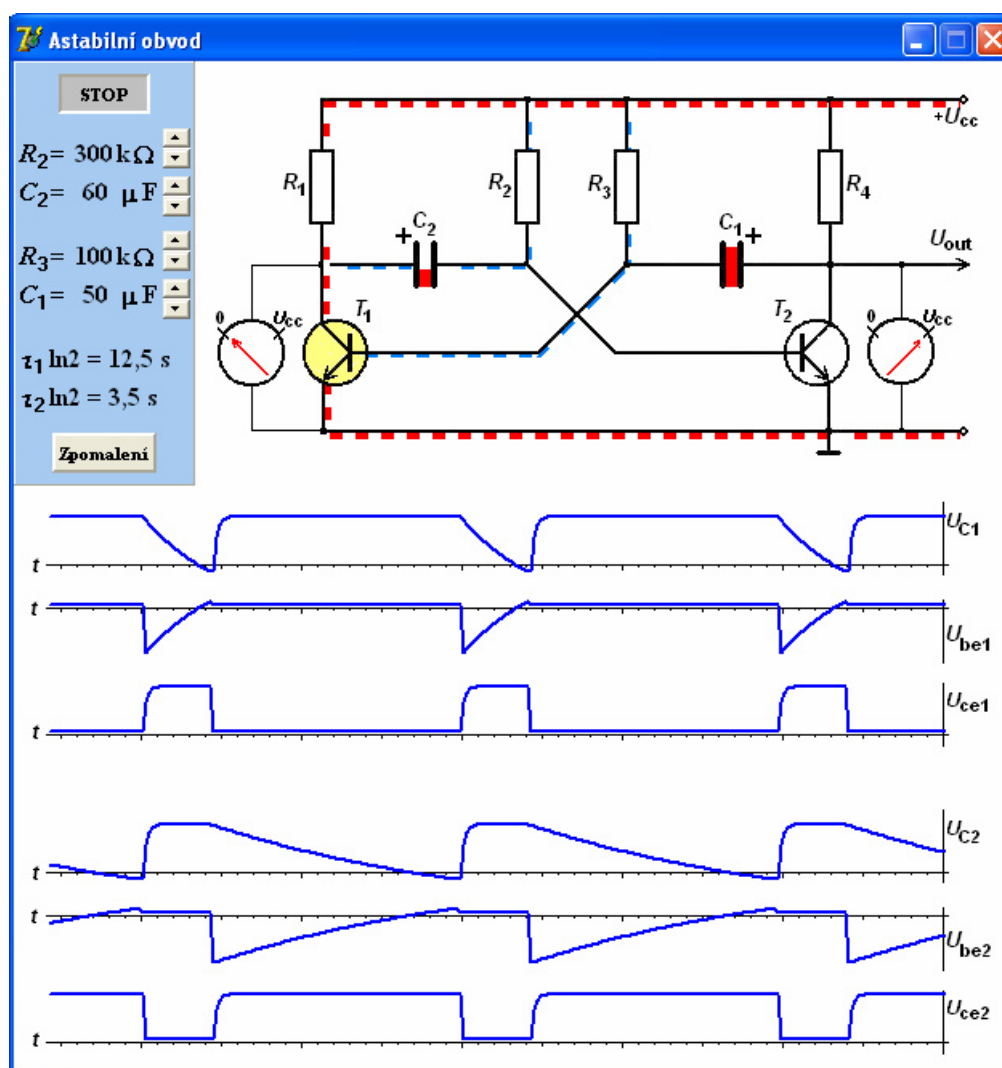
Kondenzátor C_2 se začne vybíjet přes rezistor R_2 a otevřený tranzistor T_1 s časovou konstantou $\tau_1 = R_2 \cdot C_2$. Nejprve se vybije na 0V, pak se začne nabíjet na opačnou polaritu. V okamžiku, kdy se nabije na napětí asi 0,5 V (u křemíkových tranzistorů), se nachází na bázi tranzistoru T_2 dostatečně velké napětí pro jeho otevření. Jeho kolektorové napětí U_{ce2} se začne snižovat. Proto se snižuje i napětí U_{be1} na bázi tranzistoru T_1 ($U_{be1} = U_{ce2} + U_{C1}$). Ten se začne uzavírat, jeho kolektorové napětí U_{ce1} roste. Vzrůstá i napětí U_{be2} na bázi tranzistoru T_2 ($U_{be2} = U_{ce1} + U_{C2}$). Tranzistor T_2 se dále otevírá. Kladnou zpětnou vazbou se obvod dostává do druhého kvazistabilního

stavu: T_1 uzavřen, T_2 otevřen, výstupní napětí téměř 0 V (saturační napětí). Kondenzátor C_1 je nabit na napětí téměř U_{cc} . Jeho kladný pól je uzemněn otevřeným tranzistorem T_2 a zajišťuje tak záporným napětím uzavření tranzistoru T_1 . Kondenzátor C_2 se rychle nabije přes rezistor R_1 na napětí téměř U_{cc} .

Protože se jedná o symetrický obvod, začnou probíhat děje symetricky převrácené, dějům předchozím. Kondenzátor C_1 se začne vybíjet přes rezistor R_3 a otevřený tranzistor T_2 s časovou konstantou $\tau_2 = R_3 \cdot C_1$. Po jeho vybití a nabití na asi 0,5V opačné polarity se začne otevírat tranzistor T_1 . Kladnou zpětnou vazbou se obvod opět dostává do prvního kvazistabilního stavu. Celý děj se periodicky opakuje.

Vybití kondenzátorů z U_{cc} na 0 V trvá $T_1 = R_2 \cdot C_2 \cdot \ln 2$ a $T_2 = R_3 \cdot C_1 \cdot \ln 2$ sekund. Čas trvání kvazistabilních stavů je o něco delší, protože kondenzátory je třeba nabít ještě na 0,5 V opačné polarity. Tento rozdíl je tím větší, čím menší je napájecí napětí.

Realizace:



Obr. 14.2 Provedení modelu astabilního obvodu

Provedení modelu je patrné z obr. 14.2. v horní části se nachází obvod, který je do okna programu vložen jako obrázek. V dolní části jsou zobrazovány průběhy napětí v různých částech obvodu. Vlevo nahoře je umístěn ovládací panel. Zde je možné pomocí tlačítek ▲ ▼ (komponenta UpDown) měnit hodnoty C_1 a C_2 (20 μ F až 100 μ F

po 10 μF), R_2 a R_3 (100 $\text{k}\Omega$ až 500 $\text{k}\Omega$ po 100 $\text{k}\Omega$) zároveň dochází k přepočítání doby trvání kvazistabilních stavů (1,4 s až 34,7 s). Nachází se zde tlačítko **Zpomalení**. Pokud je stisknuto, probíhají pro větší přehlednost všechny děje třikrát pomaleji. Dále je zde umístěno tlačítko **START** (**STOP**), představující připojení (odpojení) obvodu ke zdroji napětí. Po jeho stisknutí se zviditelní obrázky čárkovaných čar, představující protékající proudy, zároveň je spuštěn časovač, který ve zvoleném intervalu provádí posun těchto čar, pomocí proměnné i :

```
i:=i+1;
if i=9 then i:=1;
image1.Left:=207 - 2*i;
image16.Left:=207 - 2*i;
image5.Left:=523 - 2*i;
.....atd.
```

Při každém kroku se tedy hodnota i zvýší o 1 a čárkované čáry jsou posunuty o 2 pixely. Hodnota i se mění od 1 do 8, takže se čárka posune vždy osmkrát a pak se vrací na původní místo.

Pro funkci celého modelu jsou klíčové průběhy napětí na kondenzátorech C_1 a C_2 (U_{C1} a U_{C2}). Jsou zde použity pomocné proměnné $k1$ a $k2$, symbolizující stavy: Vybíjení kondenzátoru C_1 přes rezistor R_3 ($k1=1$), nabíjení kondenzátoru C_1 přes R_4 ($k1=2$), počáteční stav diferenciace báze tranzistoru T_2 ($k1=3$), vybíjení kondenzátoru C_2 přes rezistor R_2 ($k2=1$), nabíjení kondenzátoru C_2 přes R_1 ($k2=2$), počáteční stav diferenciace báze tranzistoru T_1 ($k2=3$).

Po připojení zdroje napětí (tlačítko **START**) dojde k nastavení $k1$ a $k2$ podle aktuálních hodnot R_2 a R_3 (UpDown2.Position a UpDown4.position).

```
if updown2.Position>updown4.position then begin k2:=3;
                                                    k1:=2;
                                                    end else begin
                                                    k2:=2;
                                                    k1:=3;
                                                    end;
```

Pak je spuštěn časovač. V pravidelných časových intervalech se zvyšuje hodnota proměnných T_1 a T_2 , představujících čas a dochází k přepočítávání okamžité hodnoty napětí na kondenzátorech a v ostatních částech obvodu. Nejdříve dochází k diferenciaci báze tranzistoru T_1 :

```
T1:=T1+1;
T2:=T2+1;
if k2=2 then begin
    fpoints4[280].Y:=3;
    if fpoints2[279].Y>10 then begin
        fpoints2[280].Y:=44-round(34*(1-exp(-T2)));
        fpoints5[280].Y:=38-round(28*(1-exp(-T2)));
    end else begin
        fpoints2[280].Y:=10;
        fpoints5[280].Y:=10;
    end; end;
```

Kondenzátor C_2 (fpoints2[280].Y) se nejprve nabíjí. V okamžiku, kdy jeho napětí U_{C2} dosáhne fpoints2[280].Y:=10 se jeho hodnota již nemění. Stejně tak i napětí U_{ce1} (fpoints5). Bázové napětí U_{be2} (fpoints4) odpovídá otevřenému tranzistoru.

```

if k1=3 then begin
  fpoints6[280].Y:=38;
  if T1<3 then begin
    fpoints1[280].Y:=44-round(34*(1-exp(-T1)));
    fpoints3[280].Y:=3;
  end else begin
    fpoints1[280].Y:=10+round(60*(1-
      exp(-200*T1/(updown4.position*updown5.position))));
    fpoints3[280].Y:=45-fpoints1[280].Y;
  end;
  if fpoints1[280].Y>44 then begin
    k1:=2;
    k2:=1;
    T1:=0;
    T2:=0;
  end;
end;

```

Kondenzátor C_1 (fpoints1[280].Y) se do času $T1=3$ nabíjí, poté jeho napětí U_{C1} klesá v závislosti na nastavených hodnotách R_3 a C_1 (UpDown4.position a UpDown5.position). Bázové napětí U_{be1} (fpoints3) do času $T1=3$ odpovídá otevřenému tranzistoru, pak se jeho hodnota rovná hodnotě U_{C1} opačné polarity. Napětí U_{ce2} (fpoints6) odpovídá otevřenému tranzistoru.

Jakmile klesne napětí U_{C1} na požadovanou hodnotu (fpoints1[280].Y>44), dojde k nastavení $k1=2$, $k2=1$ a vynulování času. Obvod se překloupil do druhého kvazistabilního stavu.

Kondenzátor C_1 (fpoints1[280].Y) se rychle nabíjí. Stejně rychle stoupá U_{ce2} (fpoints6[280].Y). Kondenzátor C_2 (fpoints2[280].Y) se vybíjí v závislosti na nastavených hodnotách R_2 a C_2 (UpDown2.position a UpDown3.position). Stejně hodnoty napětí, ale opačné polarity, je U_{be2} (fpoints4[280].Y). Po klesnutí napětí U_{C2} na požadovanou hodnotu (fpoints2[280].Y>44), dojde k nastavení $k1=1$, $k2=2$:

```

if k1=2 then begin
  fpoints3[280].Y:=3;
  if fpoints1[279].Y>10 then begin
    fpoints1[280].Y:=44-round(34*(1-exp(-T1)));
    fpoints6[280].Y:=38-round(28*(1-exp(-T1)));
  end else begin
    fpoints1[280].Y:=10;
    fpoints6[280].Y:=10;
  end; end;

```



```

if k2=1 then begin
  fpoints2[280].Y:=10+round(60*(1-
  exp(-200*T2/(updown2.position*updown3.position))));
  fpoints4[280].Y:=45-fpoints2[280].Y;
  fpoints5[280].Y:=38;
  if fpoints2[280].Y>44 then begin
    k2:=2;
    k1:=1;
    T2:=0;
    T1:=0;
  end;
end;

```

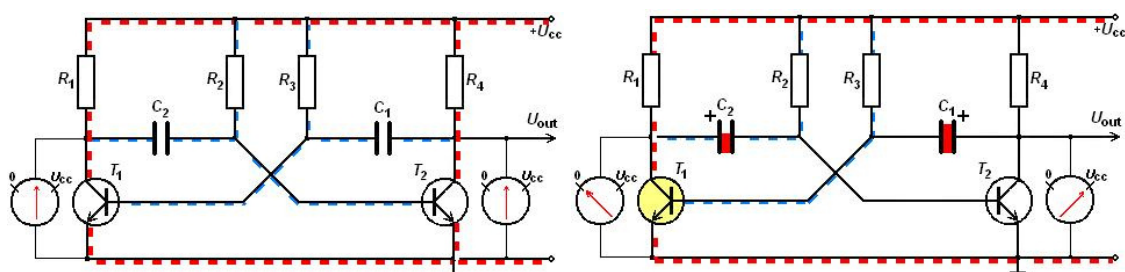
Takto se celý cyklus neustále opakuje.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „3_Astabilní obvod“.
Obvod není připojen ke zdroji napětí – neprocházejí jím proudy. Nastaveno $R_2 = 300k\Omega$, $R_3 = 200k\Omega$, $C_1 = C_2 = 50\mu F$.
2. Stisknutí tlačítka **Zpomalení** a **START** – připojení napájecího napětí.
Zpomaleně probíhá diferenciace bazových proudů a překlápění obvodu do kvazistabilního stavu. Protože je nastaveno $R_2 > R_3$, je první kvazistabilní stav: T_1 otevřen- T_2 uzavřen. Pak dochází k pravidelnému překlápění obvodu.
3. Stisknutí tlačítka **STOP**.
Tlačítko slouží k opakovanému provedení bodu 2. Je možné ho stisknout kdykoli v průběhu programu. Po jeho stisknutí dojde k odpojení napájecího napětí. Pak se vracíme k bodu 2. Pokud jsou procesy po připojení napětí vysvětleny, přecházíme k bodu 4.
4. Nastavení: $R_2 = 300k\Omega$, $C_2 = 100\mu F$, $R_3 = 200k\Omega$, $C_1 = 30\mu F$. Stisknutí **START**.
Tyto hodnoty odpovídají délkám trvání kvazistabilních stavů 20,8 s a 4,2 s.
5. Po několika cyklech stisknutí tlačítka **STOP**.
Dochází k odpojení napájecího napětí. Obvodem přestávají téci proudy, průběhy napětí však zůstávají zobrazeny. Z časové osy je možné odečíst doby trvání kvazistabilních stavů.
6. Nastavování libovolných hodnot R_2 , R_3 , C_1 a C_2 .

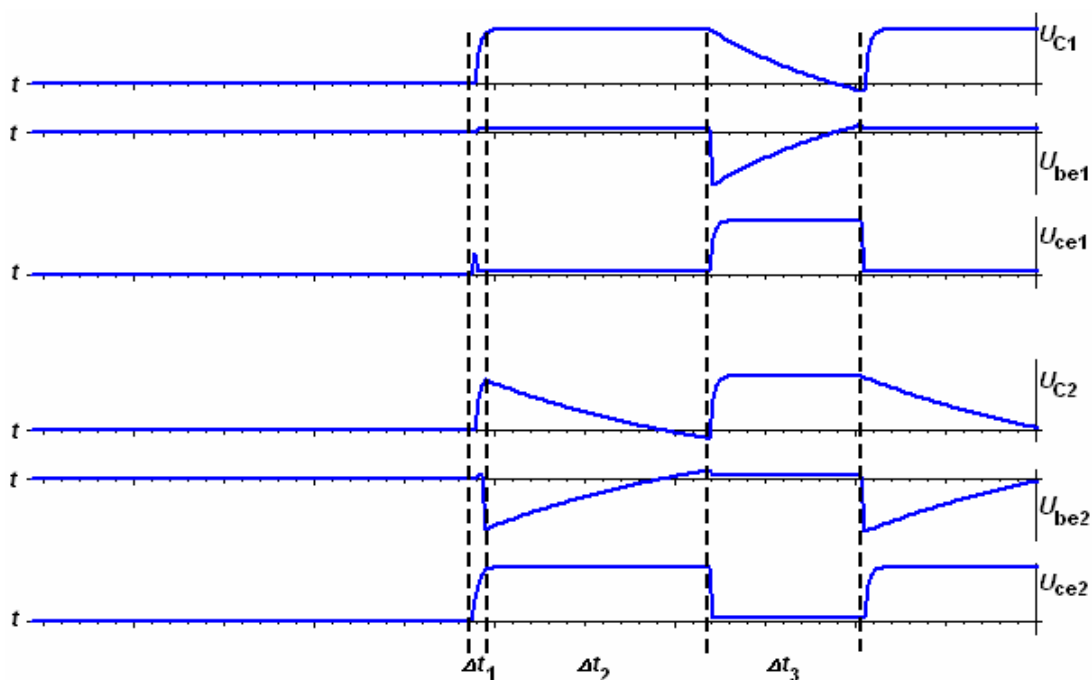
Výklad:

Při zařazení do výuky je třeba nejprve demonstrovat děje probíhající po připojení zdroje napětí (tlačítko **START**). Předpokládáme, že rezistory R_1 a R_4 mají stejnou hodnotu odporu. Který z tranzistorů přejde do saturevaného stavu proto závisí pouze na hodnotách odporů R_2 a R_3 . Zpočátku se začínají otevírat oba tranzistory. Pokud je nastaveno $R_2 > R_3$, jsou báze proudy $I_{b1} > I_{b2}$ a tranzistor T_1 se otevírá rychleji než T_2 . Pro kolektorová napětí platí: $U_{ce1} < U_{ce2}$ (obr. 14.3). Protože nabíjecí proudy kondenzátorů tvoří převážnou část bázevých proudů, je kolektorové napětí U_{ce1} určující pro bázevý proud tranzistoru T_2 a U_{ce2} určuje bázevý proud tranzistoru T_1 . Proto dochází k ještě většímu rozlišení $U_{ce1} < U_{ce2}$. Obvod se tak rychle dostává do stavu: T_1 otevřen, T_2 uzavřen. Pokud je nastaveno $R_2 < R_3$, nastává opačná situace: T_1 uzavřen, T_2 otevřen. Při hodnotách $R_2 = R_3$ jsou zpočátku bázevých proudů vyrovnány, tranzistor T_2 má však nepatrně větší proudový zesilovací činitel, proto nastává opět situace: T_1 uzavřen, T_2 otevřen.



Obr. 14.3 Diferenciace bázevých proudů po připojení zdroje napětí

Tyto procesy probíhají velmi rychle, proto je na ovládacím panelu k dispozici tlačítko **Zpomalení**. Pokud je stisknuté, probíhají veškeré děje třikrát pomaleji.

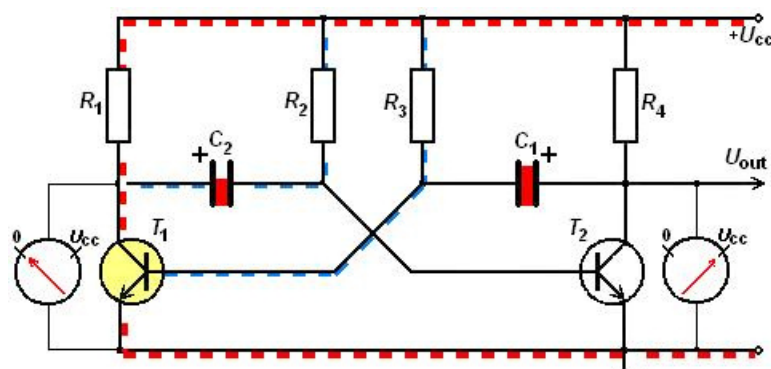


Obr. 14.4 Průběhy napětí: Δt_1 – připojení zdroje, Δt_2 – 1. kvazistabilní stav, Δt_3 – 2. kvazistabilní stav

Na obr. 14.4 jsou znázorněny průběhy napětí v důležitých částech obvodu. V tomto případě bylo zvoleno $R_2 > R_3$.

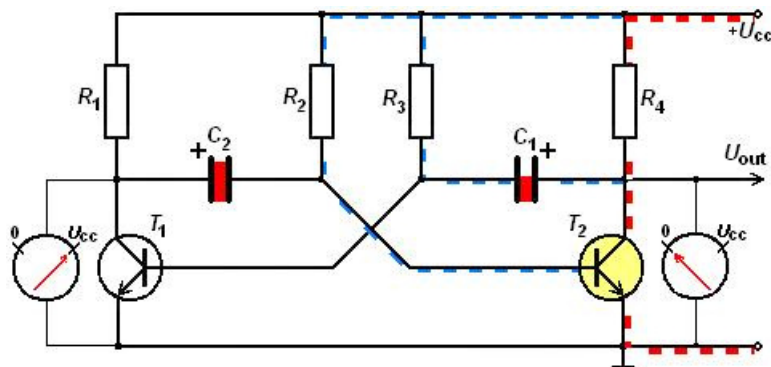
První okamžiky po připojení napájecího napětí jsou označeny Δt_1 . Oba kondenzátory se ihned začínají rychle nabíjet, U_{C1} a U_{C2} roste. Zpočátku se otevírají oba tranzistory, kolektorová napětí U_{ce1} i U_{ce2} nabývají nenulových hodnot. Tranzistor T_1 se však otevírá rychleji, proto napětí U_{ce1} rychle klesá téměř na nulu (saturační napětí), zatímco tranzistor T_2 se rychle uzavírá a napětí U_{ce2} dosáhne téměř hodnoty napájecího napětí U_{cc} . Kondenzátor C_2 je nabit na poměrně velké napětí. Jeho kladný pól je postupně uzemněn otevřeným tranzistorem T_1 , proto na konci Δt_1 nabývá napětí U_{be2} na bázi T_2 záporné hodnoty, odpovídající napětí U_{C2} . Je tak zajištěno uzavření tranzistoru T_2 . Napětí U_{be1} odpovídá otevřenému tranzistoru T_1 .

Obvod se dostal do prvního kvazistabilního stavu, který je označen Δt_2 , kondenzátor C_1 se na počátku tohoto intervalu ještě dobije na hodnotu U_{cc} . Hodnoty U_{be1} a U_{ce1} odpovídají otevřenému tranzistoru T_1 . Tranzistor T_2 je uzavřen ($U_{ce2} = U_{cc}$), protože se na jeho bázi nachází záporné napětí U_{be2} . Kondenzátor C_2 se během tohoto intervalu vybíjí přes rezistor R_2 a otevřený T_1 . Jak klesá jeho napětí U_{C2} , snižuje se i záporné napětí U_{be2} na bázi T_2 (obr. 14.5). Kondenzátor se vybije na 0 V a začne se nabíjet na opačnou polaritu. To už nabývá U_{be2} kladné hodnoty. Na konci intervalu Δt_2 již dosahuje hodnoty dostatečné k otevření tranzistoru T_2 . Jeho kolektorové napětí U_{ce2} skokově klesá na saturační hodnotu. Čímž se uzemní kladný pól kondenzátoru C_1 . Napětí U_{be1} na bázi tranzistoru T_1 proto klesne na hodnotu U_{cc} záporné polarity a způsobí jeho uzavření.



Obr. 14.5 1. kvazistabilní stav

Obvod se nyní nachází v druhém kvazistabilním stavu, který je na obr. 14.4 označen jako Δt_3 . Tento stav je symetricky převrácený stavu na počátku intervalu Δt_2 . Budou proto analogicky probíhat stejné děje, pouze symetricky převrácené (obr. 14.6).

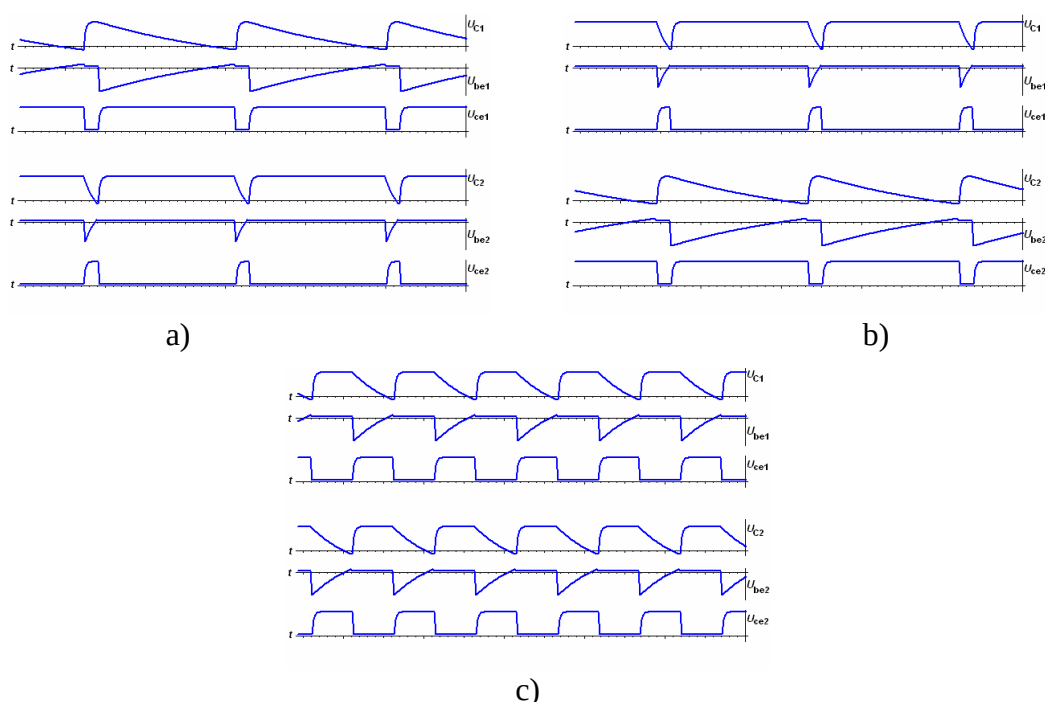


Obr. 14.6 2. kvazistabilní stav

Časy trvání kvazistabilních stavů závisejí na volbě hodnot R_2 , R_3 , C_1 a C_2 . Model umožňuje změny těchto parametrů v rozsahu: $R_2, R_3 = 100k\Omega$ až $500k\Omega$, a $C_1, C_2 = 20\mu F$ až $100\mu F$. Lze tedy měnit dobu překlopení od 1,4 s do 34,7 s. Je třeba podotknout, že tato doba odpovídá vybití kondenzátoru na 0 V, skutečná doba kvazistabilního stavu je o něco delší, protože kondenzátor je třeba nabít ještě na 0,5 V opačné polarity. Časové osy průběhů napětí jsou opatřeny stupnicí. Tlačítkem **STOP** lze zastavit činnost a snadno spočítat doby překlopení obvodu. Nejmenší dílek znázorňuje 1 s. Pokud dojde ke změně některého parametru, činnost modelu se zastaví a je třeba jej znovu spustit tlačítkem **START**.

Na obr. 14.7 jsou vidět různé průběhy výstupního napětí (U_{ce2}) v závislosti na nastavených hodnotách:

- a) $R_2 = 100k\Omega$, $C_2 = 20\mu F$, $R_3 = 200k\Omega$, $C_1 = 100\mu F$,
což odpovídá dobám 1,4s a 13,9s.
- b) $R_2 = 200k\Omega$, $C_2 = 100\mu F$, $R_3 = 100k\Omega$, $C_1 = 20\mu F$,
což odpovídá dobám 13,9s a 1,4s.
- c) $R_2 = 200k\Omega$, $C_2 = 30\mu F$, $R_3 = 200k\Omega$, $C_2 = 30\mu F$,
což odpovídá dobám 4,2s a 4,2s.



Obr. 14.7 Průběhy napětí při různých parametrech

4 Závěr

Tato práce se zabývá tvorbou počítačových modelů pro výuku elektroniky. Má dva hlavní cíle: 1) Vytvoření modelů vhodných pro zařazení do výuky elektroniky na pedagogické fakultě. 2) Zpracování umožňující použití vytvořených programů jako vzorových příkladů pro tvorbu dalších animací.

V první části byly rozebrány obecné otázky týkající se modelů: jejich klasifikace, funkce modelů ve vědě a ve vyučování, pedagogicko-psychologický význam v kognitivních procesech. Dále je zařazena kapitola týkající se výběru obvodů a součástek, idealizace skutečnosti, barevného zpracování a výběru vhodného programovacího prostředí.

Druhá část obsahuje popisy vytvořených modelů. Aby byly zřejmé široké možnosti využití, byly vybrány tři odlišné oblasti elektroniky: 1) Jevy v polovodičích na základě pásové teorie, 2) Unipolární tranzistory, 3) Klopné obvody. U každé skupiny je zařazena kapitola „Didaktický cíl“ uvádějící požadavky na zobrazované děje. Tato část může pomoci učiteli při stanovování výukových cílů. Každá kapitola je dále rozdělena na podkapitoly: „Teorie“ – vysvětlující podstatu funkce a matematické vztahy mezi veličinami. „Realizace“ – s komentovanými částmi výpisů zdrojového kódu. „Metodický návod“ – pokyny pro učitele při zařazení modelů do výuky. „Výklad“ – vzorový výklad jako doplněk k metodickému návodu.

Pro případné zájemce jsou na CD přiloženy i všechny soubory potřebné k otevření v programovacím prostředí Delphi. Programy lze k vytváření dalších modelů použít spíše jako vzor. Přeprogramování programů by bylo vzhledem k velkému množství zdrojového kódu poměrně náročné.

Při výběru prostředků jsem se rozhodl mezi prostředím Java a Delphi. Nakonec jsem se rozhodl pro programování v jazyce Delphi. Nevýhodou oproti Java appletům je nemožnost přímého umístění na internetové stránky. Výhody jsou pak: jednodušší jazyk, snadnější spuštění bez připojení na internet, nenáročnost na technické parametry počítače. Programy fungují již při konfiguraci: Pentium 150 MHz, 32 MB RAM, Windows 95, bez potřeby instalace jakéhokoli softwaru.

Ačkoliv jsou programy primárně určeny pro vysokoškolské potřeby, budou použity i v práci disertační, zabývající se tvorbou elektronických modelů pro střední školy. Unipolární tranzistory i klopné obvody jsou na elektrotechnických školách se slaboproudým zaměřením běžně probírány. Zařazeny budou další modely jednodušších obvodů. Otázkou zůstává použitelnost modelů jevů v polovodičích například pro nadané studenty.

Programy budou zařazeny do výuky na VŠ, dále budou testovány na studentech středních odborných škol se zaměřením na elektroniku.

Pro zájemce budou programy umístěny na internetových stránkách doktorského studia, kde se nacházejí různé materiály volně ke stažení:

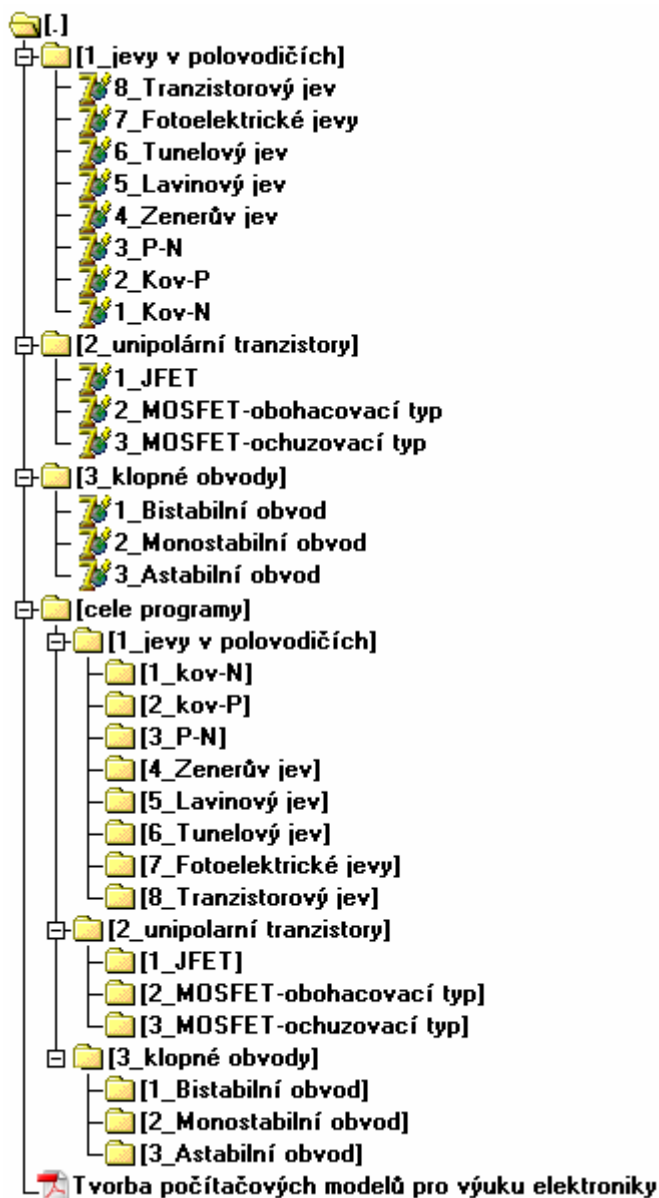
<http://pluto.fpe.zcu.cz/DrWeb/Default.aspx>

5 Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] SVOBODA, E., KOLÁŘOVÁ, R. 2006. Didaktika fyziky základní a střední školy, Vybrané kapitoly. Karolinum. Praha.
- [2] FONTANA, D. 1997. Psychologie ve školní praxi. Portál. Praha.
- [3] RAUNER, K. 2001. Elektronika (analogová část). ZČU. Plzeň.
- [4] VACHEK, J., LEPIL, O. 1980. Modelování a modely ve vyučování fyzice. SPN. Praha.
- [5] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. 2005. Elektronika - Součástky a obvody, principy a příklady. Grada publishing. Praha.
- [6] VANÍČEK, F. 2004. Elektronické součástky - Principy, vlastnosti, modely. ČVUT. Praha.
- [7] CANTÚ, M. 1999. Delphi 4. Grada publishing. Praha.
- [8] CANTÚ, M. 1995. Mistrovství v Delphi. Computer Press.
- [9] KALHOUS, Z., OBST, O. 2002. Školní didaktika. Portál. Praha.
- [10] KAŠPAR, E. 1978. Didaktika fyziky. SPN. Praha.
- [11] SKALKOVÁ, J. 2007. Obecná didaktika. Grada Publishing. Praha.
- [12] PRŮCHA, J. 2002. Moderní pedagogika. Portál. Praha.
- [13] VALIŠOVÁ, A., KASÍKOVÁ, H. 2007. Pedagogika pro učitele. Grada publishing. Praha.
- [14] VÁGNEROVÁ, M. 2002. Kognitivní a sociální psychologie žáka základní školy. Karolinum. Praha.
- [15] MAREŠ, J., GAVORA, P. 1999. Anglicko-český pedagogický slovník english-czech educational dictionary. Portál. Praha.
- [16] ČÁP, J., MAREŠ, J. 2001. Psychologie pro učitele. Portál. Praha.
- [18] SZACHTOVÁ, A. a kol. 2000. Vybrané kapitoly z pedagogické psychologie. ZČU. Plzeň.
- [19] PRŮCHA, J. 2000. Přehled pedagogiky. Portál. Praha.
- [20] <http://remote1.kev.zcu.cz/>
- [21] <http://www.ises.info/index.php/en/ises>
- [22] <http://www.ni.com/webappdemos/tempcontroldemo.htm>
- [23] <http://remote1.kev.zcu.cz/ro/robo.htm>
- [24] http://kdt-4.karlov.mff.cuni.cz/vacharakteristika_2.html
- [25] <http://kdt-17.karlov.mff.cuni.cz/pruzina.html>
- [26] <http://kdt-20.karlov.mff.cuni.cz/>
- [27] <http://jas.eng.buffalo.edu/>
- [28] <http://elektrotechnickestavebnice.xf.cz/>

6 Příloha

CD-ROM (na vnitřní straně desek), obsahující vytvořené programy a elektronickou podobu textové části práce.



Resume

This work deals with a creating of computer models for teaching electronics. It had two main goals. The first goal is to create the electronics models. They supposed to have an explanation and motivation functions in education process in the faculty of education. The second goal is their processing as a simple program for creating another models.

The first part deals with general questions about models, the partitions, their meaning in science and education, pedagogic-psychological contribution for cognitive processes. There is also a chapter about circuits and electronic components selection, idealization of reality, graphic and color processing and the programming language selection.

The second part deals with the creation of these models. I chose three different sections of electronics to show the versatile spectrum of using: 1) The semiconductor effects based on the band theory, 2) Models of Unipolar transistors, 3) Models of flip-flop circuits. Models of semiconductor effects illustrate the equilibrium state on the P-N junction, the barrier layer creation, its changing by external voltage and moving the current carriers at the several effects. Models of Unipolar transistors animate their structures, creating (demising) the conductive channel and its changing by external voltages, moving the current carriers and current-voltage characteristic. Models of flip-flop circuits animate currents at each part of circuits, charging and discharging the condensers, changing over between stable (quasi-stable) states. It's animating the time behavior of the most important voltages.

In each section is introduced a paragraph: "Didactic aim" with animation requirements. It could be a teacher's help for education goals formulation. Each chapter is divided into the subchapters: "Theory" – explaining a physical principles, "Realization" – with commented parts of source code, "Methodical instructions" – instructions for teacher in case of introducing models into the lessons, "Explication" – Exemplary commentary as a methodical instruments supplement.

There are all the necessary files to open the programs in Delphi saved on CD. Programs can be used as example rather than rewriting to other models. Rewriting would be so difficult due to the source code plurality.

According to my own evaluation to both Java and Delphi environment development I would choose Delphi environment despite the fact that it has a disadvantage of the programs that can not be directly located on the web site as a Java applets. But advantages are quite numerous such as simple programming language, easy startup without internet connection, computer configuration undemanding.

Models are primarily determined for university needs. They will be used also in thesis, deals with creating models for high school needs. Unipolar transistors and flip-flop circuits are commonly taught in electro technical high schools. Some other models will be introduced of simple circuits. The semiconductor models could be used for talented students.

Programs will be tested on university students at first, and then on students of electrotechnical high schools. They will be located on the web site of Ph. D. study, where are located many various study materials for download.