

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Pedagogická fakulta

Studijní program: Specializace v pedagogice

Studijní obor: Teorie vzdělávání ve fyzice

POČÍTAČOVÉ MODELY PRO VÝUKU
ELEKTRONIKY

Computer-aided models in teaching electronics

PhDr. Pavel Kratochvíl

Školitel: Doc. Karel Rauner, Katedra matematiky, fyziky a
technické výchovy

Plzeň, 2012

Anotace

Práce se zabývá rozbohem dostupných modelů pro výuku elektroniky, především počítačových animací a simulačních programů. Provádí průzkum míry používání těchto názorných pomůcek a hodnotí jejich pedagogický přínos ve vyučování. Součástí práce je celkem třicet pět vytvořených modelů z oblasti analogové a digitální elektroniky, umístěných na webových stránkách spolu s metodickými návody. 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.

Klíčová slova

Model, elektronika, jevy v polovodičích, unipolární tranzistor, klopný obvod, hradlo, logický obvod, procesor

Abstract

The contents of my dissertation is a complex analysis of using models in teaching electronics at technical secondary schools. It provides the evaluation of freeware as well as commercial software for simulation of physical processes on basis of their mathematical interpretation or on basis of reductive animation models. Furthermore, the dissertation provides a pedagogical research. The aim of the research is to find out the extent of using the didactic aids and computer-aided animations. It also deals with pedagogical and psychological aspects of using models and its pedagogical contribution in teaching. Dissertation deals with the modeling of analog and digital phenomena, devices and circuits. In sum, thirty five animations were created. For this research websites were developed, where created models with its methodological instructions and detailed theory were placed.

Key words

Model, electronics, phenomena in semiconductors, field effect tranzistor, flip-flop circuit, gate, logical circuit, processor.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Západočeská univerzita v Plzni (ZČU) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřeby ZČU.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti ZČU; v tomto případě má ZČU právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem disertační práce a ostatními odborníky v oboru.

V Plzni dne 1.6.2012

Obsah

Anotace	2
Prohlášení.....	3
Obsah	4
1 Úvod.....	6
2 Cíle práce	7
3 Modely ve fyzice	8
3.1 Pojem model	8
3.2 Klasifikace modelů	9
3.3 Modely ve vědě.....	10
3.4 Ideální modely ve vyučování.....	10
3.5 Vyučovací prostředky	13
3.6 Modely a pomůcky používané ve výuce elektroniky	16
3.7 Klasifikace počítačových modelů pro výuku elektroniky	19
3.8 Pedagogicko-psychologický význam modelů v kognitivních procesech	20
3.9 Tvorba animací	23
4 Popis vytvořených analogových modelů	25
4.1 Unipolární tranzistory	25
4.1.1 Unipolární tranzistor s přechodovým hradlem – JFET.....	25
4.1.2 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem s indukovaným kanálem – MOSFET, obohacovací typ	32
4.1.3 Unipolární tranzistor s izolovaným hradlem se zabudovaným kanálem – MOSFET, ochuzovací typ	41
4.2 Usměrňovače	47
4.2.1 Jednocestný usměrňovač.....	47
4.2.2 Dvojcestný usměrňovač.....	49
4.2.2 Můstkový usměrňovač.....	51
4.3 Klopné obvody.....	52
4.3.1 Bistabilní obvod.....	52
4.3.2 Monostabilní obvod	58
4.3.3 Astabilní obvod.....	65
4.4 Jevy v polovodičích	73
4.1.1 Rozhraní polovodič-kov	74
4.1.2 P-N přechod	84
4.1.3 Zenerův jev	95
4.1.4 Lavinový jev	101
4.1.5 Tunelový jev v propustném směru.....	107

4.1.6 Fotoelektrické jevy	112
4.1.7 Tranzistorový jev	117
5 Popis vytvořených digitálních modelů	123
5.1 Hradla.....	123
5.2 Kombinační logické obvody	126
5.2.1 Kodér	126
5.2.2 Dekodér.....	128
5.2.3 Sčítačka.....	130
5.2.4 Registr.....	132
5.2.5 Čítač.....	134
5.3 Sekvenční logické obvody	136
5.3.1 R-S klopný obvod	136
5.3.2 R-S-T klopný obvod	138
5.3.3 D klopný obvod	140
5.3.4 J-K klopný obvod.....	142
5.4 Mikroprocesor.....	144
5.4.1 Stav „programování“	145
5.4.2 Stav „provoz“.....	147
5.4.3 Ukázka programu.....	153
6 Pedagogický výzkum	158
6.1 Kvalitativní a kvantitativní typ výzkumu	158
6.2 Výzkum pomocí webového rozhraní	159
6.3 Organizace a cíle výzkumu	160
6.4 Zpracování a výsledky výzkumu	162
7 Hodnocení výsledků práce a závěr	166
8 Seznam tabulek a obrázků	167
9 Použitá literatura a internetové zdroje	171
10 Přílohy.....	173

1 Úvod

Tato práce navazuje na práci diplomovou a rigorózní. Cílem diplomové práce bylo vytvoření interaktivního modelu čtyřbitového procesoru a modelů jeho jednotlivých součástí, přičemž je možné hierarchicky postupovat až k nejjednodušším stavebním prvkům. Programy byly vytvořeny za účelem počítačové podpory výuky digitální elektroniky na katedře obecné fyziky a byly úspěšně zařazeny do několika předmětů.

Práce rigorózní se zabývala tvorbou modelů z oblasti analogové elektroniky. Ty se staly počítačovou podporou vybraných kapitol pro předmět Elektronika pro učitele SŠ. Programy jsou tvořeny jako doplněk k učebním textům [18], které jsou používány pro tento předmět.

Tyto práce jsou nyní rozšířeny 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. Obsahem třetí části je pedagogický výzkum, zjišťující míru používání různých druhů učebních pomůcek včetně počítačových animací a jejich přínos do edukačního procesu. Vzhledem k tomu, že na gymnáziích je elektronika probírána pouze velmi okrajově, jsou vytvořené modely určeny pro studenty elektrotechnických škol se slaboproudým zaměřením.

2 Cíle práce

Cíle této disertační práce lze shrnout do několika bodů:

1. Vytvořit modely z různých oblastí elektroniky použitelné pro výuku na středních odborných školách s elektrotechnickým zaměřením a na vysokých školách připravujících učitele fyziky.
2. Zhodnotit přínos těchto modelů pro vyučování.
3. Zjistit míru používání učebních pomůcek a počítačových modelů.
4. Zhodnotit pedagogický přínos počítačových modelů v edukačním procesu a možnosti jejich použití; zjistit technické podmínky škol pro jejich používání.
5. Navrhnout klasifikaci počítačových modelů používaných ve vyučování elektroniky.

Popis současného stavu řešeného tématu:

Doba, kdy výuka elektroniky probíhala pouze křídou na tabuli s občasnou ukázkou reálných součástek je nenávratně pryč. V současné době je k dispozici nepřeberné množství učebních pomůcek. Tato práce se zajímá zejména o volně dostupné i komerční programy pro simulaci elektronických obvodů, hardware a software pro napojení měřených obvodů na PC s následnou vizualizací elektrických veličin v jednotlivých částech obvodu. Dále pak animacemi z nejrůznějších oblastí elektroniky volně dostupných na internetu.

Jedním z cílů této práce je zjištění současného stavu míry používání takovýchto pomůcek, zhodnocení jejich přínosu a možností využití. Touto problematikou se zabývá pedagogický výzkum, který je součástí této práce. Výsledky tohoto výzkumu jsou obsahem kapitoly 6.4.

V kapitole 6.4 nalezneme také hodnocení modelů vytvořených v rámci této práce. Popis jejich provedení a funkce, výklad a metodické návody jsou obsahem kapitol 4 a 5.

Posledním cílem této práce je navržení klasifikace počítačových modelů pro elektroniku. Kapitoly 3.2 – 3.5 popisují klasifikaci fyzikálních modelů. Na tuto klasifikaci navazují kapitoly 3.6 a 3.7, ve kterých jsem se pokusil o kategorizaci počítačových modelů, používaných pro výuku elektroniky.

3 Modely ve fyzice

3.1 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 Ptolemaiov 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 [11] 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.“

3.2 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 [24]:

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 nevyklučují. 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 roztřídit do skupin podle [24]:

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.

3.3 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 jí 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.

3.4 Ideální modely ve vyučování

(Zpracováno volně podle [24] 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 [24] na str. 55 uvádí: „Přesně tento pojem definoval Maxwell: Pod pojmem fyzikální analogie rozumím tu dílčí shodu mezi zákony libovolných oblastí vědy, díky jíž 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. Nákres má 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 vztažené 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 zkreslené představy, 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.

3.5 Vyučovací prostředky

(Zpracováno volně podle [24] 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
<ul style="list-style-type: none"> • PŘEDMĚTOVÉ (reálné) • OBRAZOVÉ (ikonické) • ZVUKOVÉ (fonické) • PÍSEMNÉ (literární) 	<ul style="list-style-type: none"> • ZAŘÍZENÍ UČEBEN • STROJE A PŘÍSTROJE • NÁSTORJE A TECHNICKÉ POMŮCKY • MATERIÁL

Tabulka 1 Rozdělení vyučovacích prostředků [11]

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 [24]:

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 nejvýraznější.

Pro demonstraci jevů nedostupných přímému smyslovému vnímání slouží pomůcky nejrůznějších 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 [24] 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 [21] se dále objevují:

Dotykové pomůcky (reliéfové obrazy, slepecké písmo)

Speciální programy pro počítače

Již od dob operačního systému DOS lze vizualizovat nejrůznější 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, ...).

3.6 Modely a pomůcky používané ve výuce elektroniky

Schématu 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 statickost. 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.

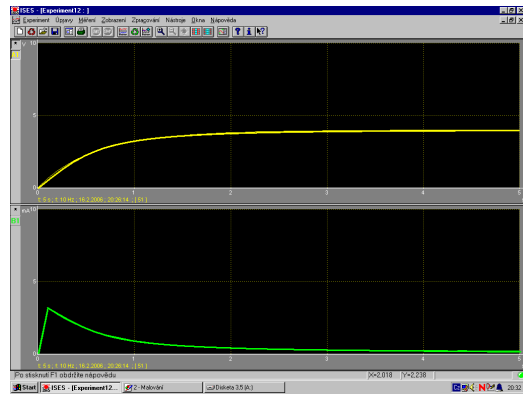
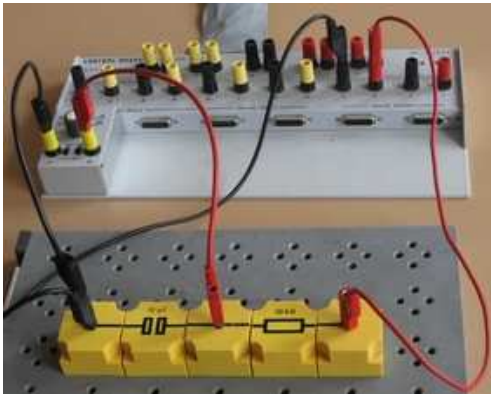
Elektronické stavebnice

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.

Měřící 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

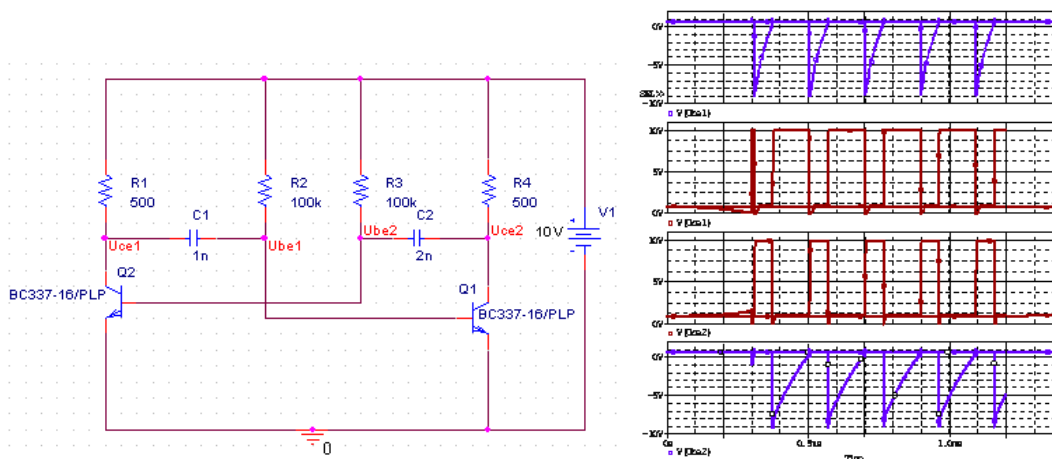
procesoru, což je omezující pouze u starších počítačů. Vhodné je použití tohoto vybavení v kombinaci s elektronickými stavebnicemi (obr. 1.1).



Obr. 1.1 ISES připojený na elektronickou stavebnici

Simulační programy typu ORCAD

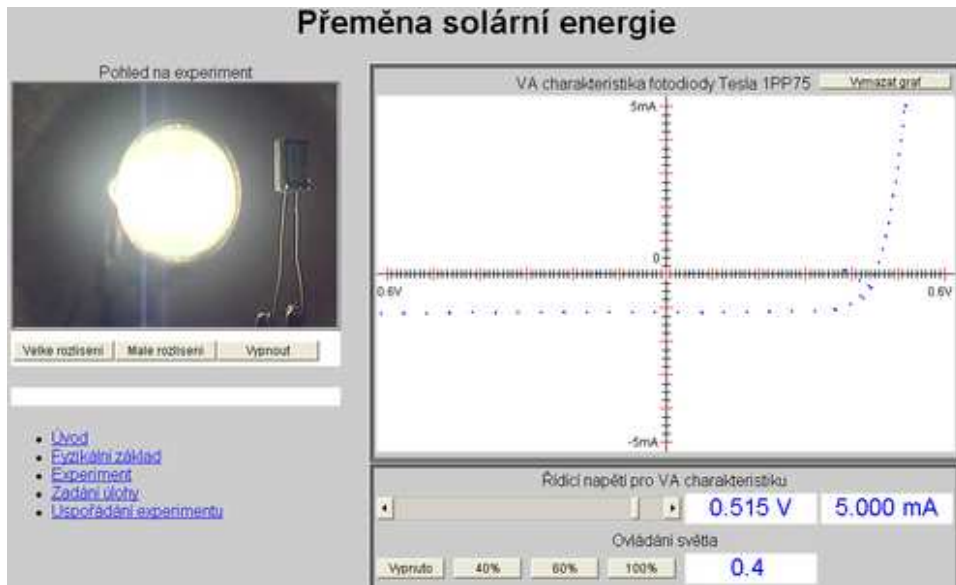
Tyto programy mají obrovské možnosti využití, ať už se jedná o volně stažitelnou demoverzi, výukový program, nebo profesionální software pro navrhování obvodů a plošných spojů. Výhodou je aktualizovatelná databáze součástek. Lze tak sestavit obvod se součástkami libovolných parametrů, dokonce od konkrétních 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 [33]

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

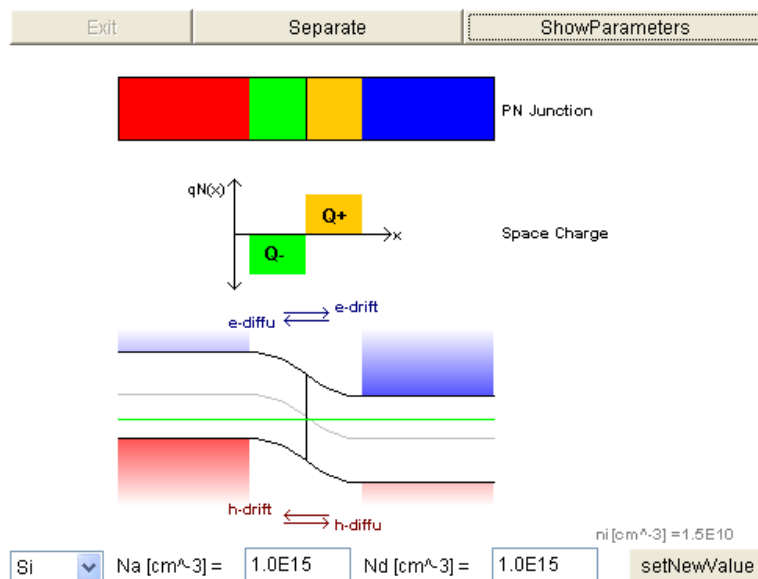
<http://kdt-17.karlov.mff.cuni.cz/pruzina.html>

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

Počítačové animace

Patří sem nejružnější 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 příloženým 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 [36]

3.7 Klasifikace počítačových modelů pro výuku elektroniky

V této kapitole se pokouším o klasifikaci počítačových modelů pro výuku elektroniky. Na první pohled se zdá, že tvoří samostatnou skupinu modelů. Při bližším zkoumání však zjistíme, že (navzdory jejich velkému množství) existuje pouze několik typů, které vykazují podobné znaky jako modely nepočítačové. Je tedy zbytečné zavádět další kategorizaci a počítačové modely lze zařadit do systému ostatních modelů. U této skupiny modelů je specifické, že se jedná vždy o kombinaci ilustrujícího modelu s dalším typem. Předchozí kapitola pojednává o různých typech modelů používaných ve výuce elektroniky. Počítačové z nich lze zařadit do systému klasifikace následovně:

Měřící programy:

Nejedná se o model v pravém slova smyslu. Jde o pomůcky pro sledování fyzikálních veličin (stejně jako např. multimetr nebo osciloskop). Jsou didakticky velmi přínosné. Pro studenty představují důležitý článek mezi teorií a praxí (grafický výstup reálného obvodu).

Simulační programy:

Jde o kombinaci ilustrujícího a matematického (formalizujícího) modelu. Chování každé elektronické součástky lze popsat matematickými vztahy. Pro sestavený obvod tak dostáváme soustavu rovnic. Počítač pak snadno přepočítá po malých diferencích změny elektrických veličin v obvodu. Poté stačí výsledky vhodně vizualizovat.

Animace:

Opět se jedná o kombinaci modelů – ilustrujícího a simulujícího (imitujícího). Tento typ modelu se řídí vlastními zákonitostmi a jako znázorňovaný jev se tváří pouze navenek. Tyto modely se pak od sebe liší stupněm idealizace. Je třeba mít na paměti, že s idealizací dochází ke zkreslení skutečnosti a na tyto rozdílnosti je třeba ve vyučování upozorňovat.

Virtuální laboratoře:

Zpravidla se jedná o kombinaci několika modelů. Základem je reálná učební pomůcka (součástka, obvod) nasnímaná v různých stavech. Je doplněná dalším modelem (např. grafickým). Uživatel má možnost zasahovat do dění pomocí ovládacích prvků.

3.8 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 odstavce.

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. Strukturou 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 zabránovat 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 promyšlet 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, obzvláště pokud se jedná o interaktivní programy, kde se mohou aktivně podílet na průběhu simulovaných dějů.

3.9 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. Proud 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 použít světlejších, neutrálních odstínů na nichž pak vyniknou důležité znaky. Ty pak stačí zvýraznit sytějšími odstíny, 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. Proudny 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 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 cize.

Při výběru vývojového prostředí jsem se rozhodoval mezi prostředím Java a Codegear Delphi. Java aplety 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 Codegear 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.

4 Popis vytvořených analogových modelů

V této kapitole jsou popisovány modely a animace z oblasti analogové elektroniky, které jsem vytvořil v programovacím prostředí Delphi. U každého modelu (až na výjimky) jsou zařazeny podkapitoly: **teorie** – popisující podstatu modelovaných dějů a důležité fyzikální vztahy; **realizace modelu** – popisující postup při tvorbě programu a jeho funkci, obsahuje důležité části zdrojového kódu s komentářem; **metodický návod** – obsahuje doporučený postup při zařazení modelu do vyučování; **výklad** – je obdobou podkapitoly **teorie**, je však již uzpůsoben metodickému postupu pro zařazení do vyučování. Pro každou skupinu modelů je zařazen odstavec **didaktický cíl** – uvádějící požadavky na zobrazované děje.

4.1 Unipolární tranzistory

Didaktický cíl:

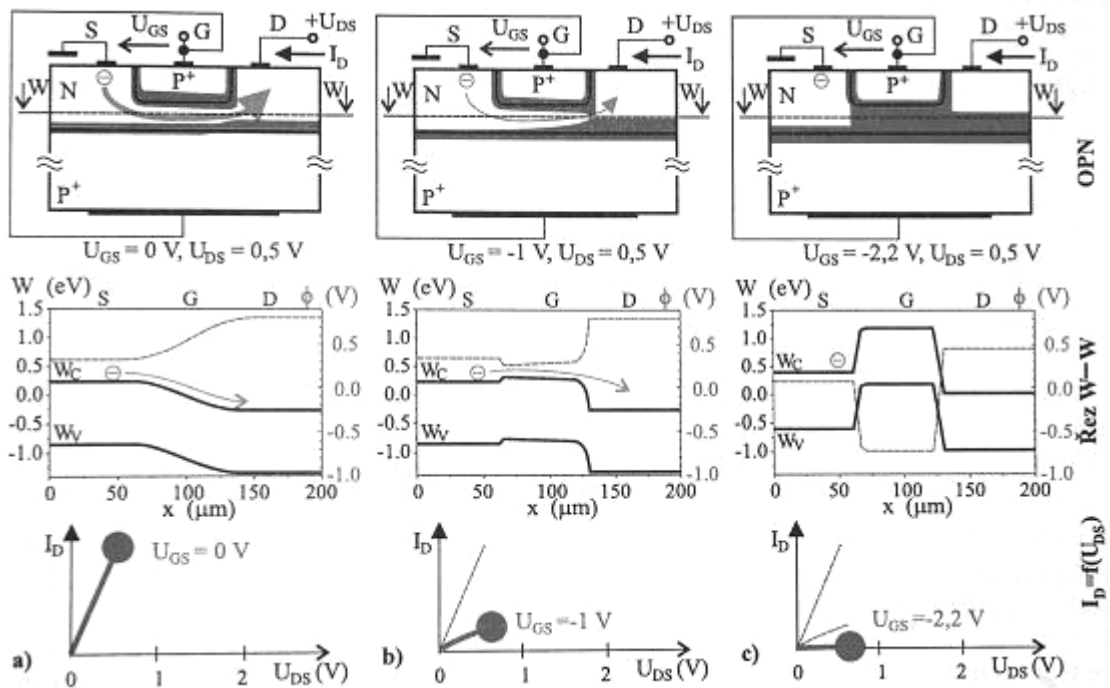
Hlavním cílem této skupiny modelů je znázornění struktury unipolárních tranzistorů a animace kanálů (různých typů u různých součástek), sloužících k průchodu nositelů náboje. Šířka a tvar kanálu se musí měnit v závislosti na velikostech a polaritách připojených napětí. Musí být zřejmá souvislost mezi 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.

4.1.1 Unipolární tranzistor s přechodovým hradlem – JFET

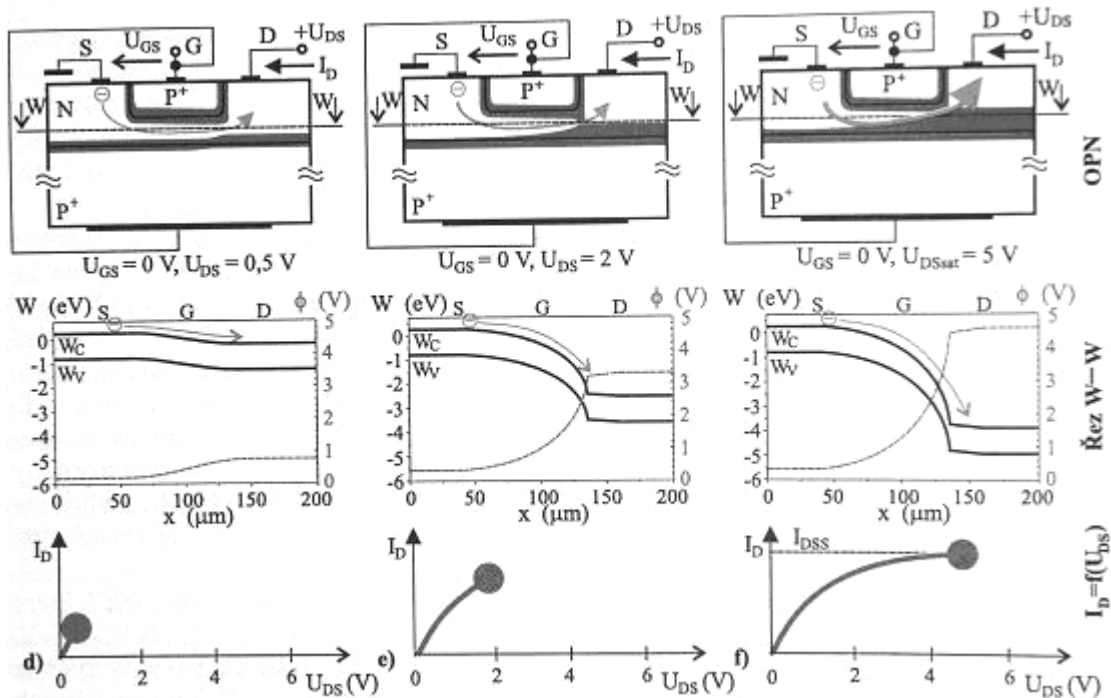
Teorie:

U této součástky se stejně jako u ostatních unipolárních tranzistorů přenos náboje uskutečňuje pouze majoritními nositeli. Struktura tohoto tranzistoru je patrná z obr. 2.1. 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).

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. 2.1 a). Připojením závěrného napětí U_{GS} se rozšíří hradlová vrstva (ve které je poklesem potenciálu ϕ vytvořena energetická bariéra pro průchod elektronů). Vzdělává tak odpor kanálu, což se projeví menší strmostí výstupní charakteristiky (obr. 2.1 b). Dále zvyšujeme napětí U_{GS} . Po dosažení uzavíracího napětí vyplní hradlová vrstva celý průřez kanálu (obr. 2.1 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. 2.1 Zvyšování napětí U_{GS} , při malé hodnotě napětí U_{DS} [28]



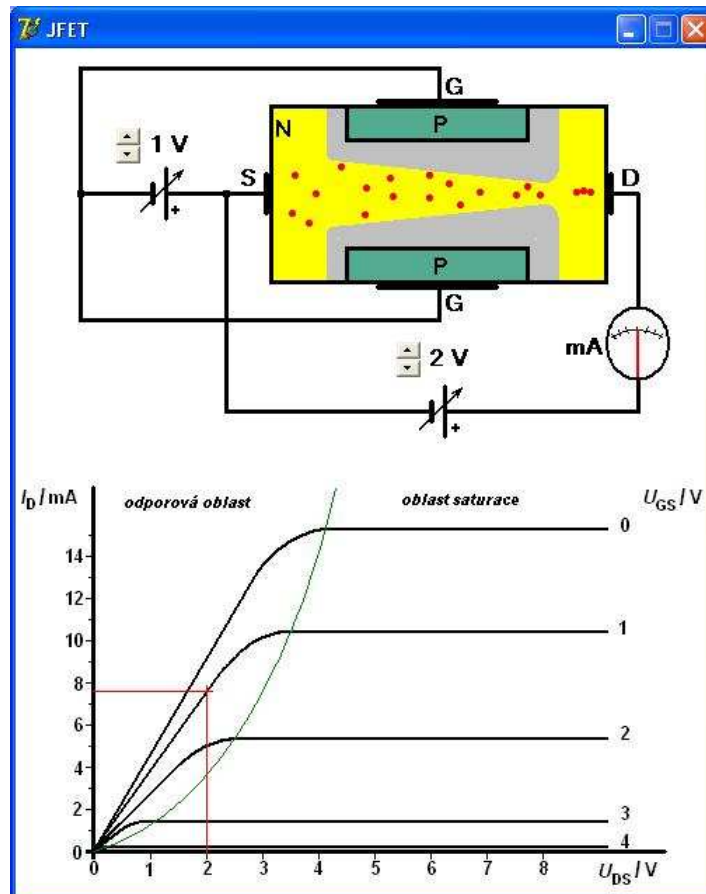
Obr. 2.2 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 0$ V [28]

Uvažujme $U_{GS} = 0$ V. Při malém napětí U_{DS} prochází kanálem malý proud I_D , šířka kanálu je po celé délce zhruba stejná (obr. 2.2 a). Se vzrůstajícím napětím U_{DS} roste i proud I_D a s ním roste i úbytek napětí na kanálu (obr. 2.2 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 zaškrčení vodivého kanálu (obr. 2.2 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 zaškrčení zvětšuje. Přírůstek napětí se spotřebuje pouze v oblasti zaškrčení, na zbytku kanálu se úbytek napětí prakticky nezmění. Zaškrčená 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 modelu:

Provedení je vidět na obr. 2.3. 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 U_{pDown}), 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. 2.3 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;

```

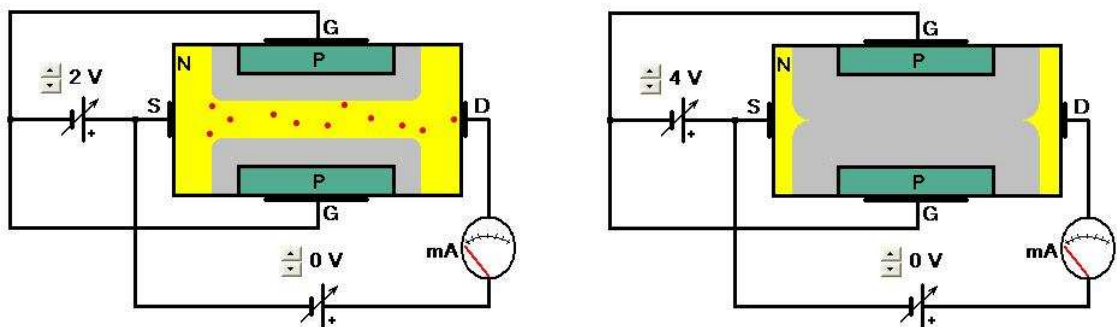
Metodický návod:

1. Spuštění souborem „a-1-1_jfet.exe“. Zobrazena je struktura tranzistoru JFET typu s kanálem N. Na rozhraní 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 . Přejechy 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 zaškrcení kanálu.
6. Při $U_{GS} = 0 \text{ V}$ zvyšování U_{DS} z 4 V na 8 V . Zaškrcení kanálu se rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

Výklad:

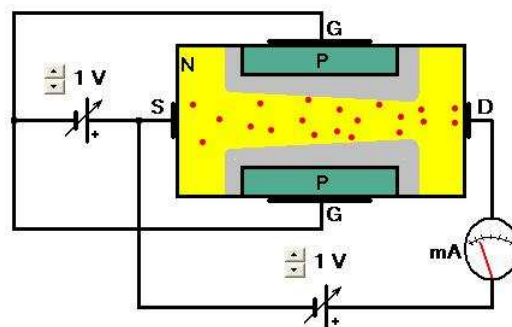
JFET je tvořen kanálem mezi elektrodami S a D a dvěma oblastmi po stranách kanálu opačného typu vodivosti. Elektroda S (Source) dodává do kanálu nositele z vnějšího obvodu. Ti jsou po průchodu kanálem odsáti elektrodou D (Drain). Přívody k oblastem opačného typu vodivosti jsou označeny jako G (Gate) – 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. 2.4.

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. 2.4). 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.

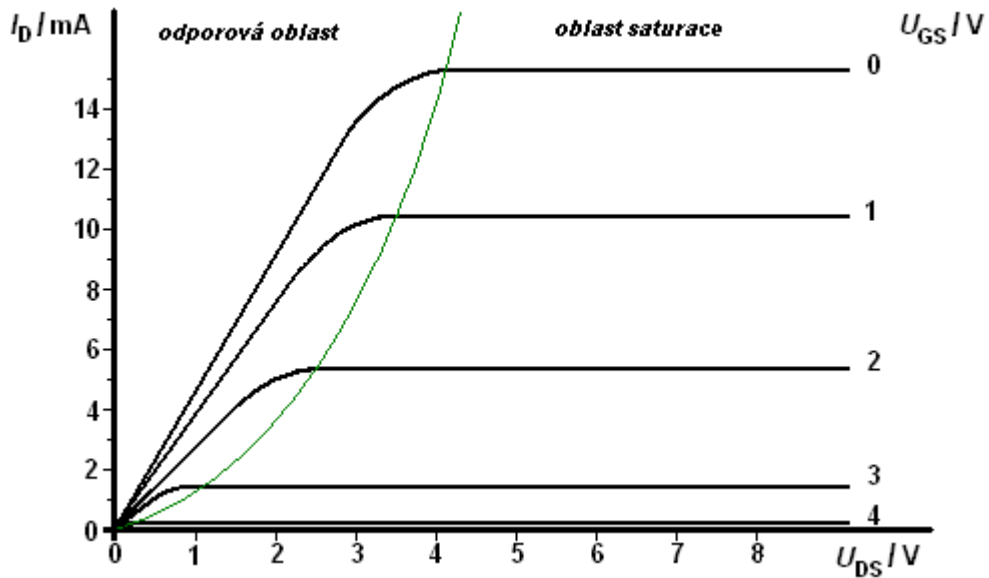


Obr. 2.4 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

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. 2.5). 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. 2.6).

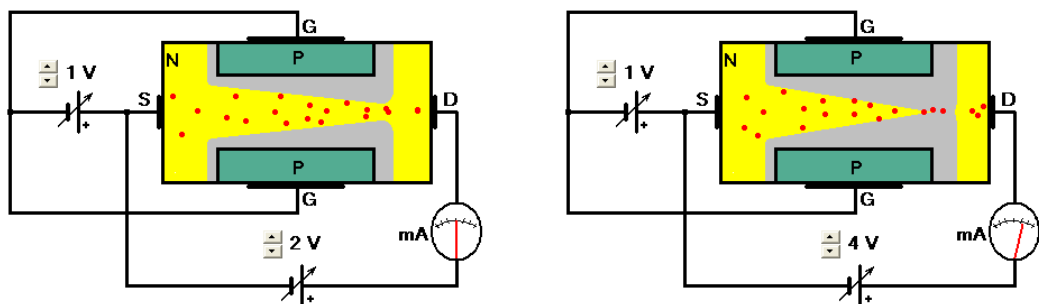


Obr. 2.5 Při malém napětí U_{DS} má kanál po celé délce téměř stejný účinný průřez



Obr. 2.6 V-A charakteristiky tranzistoru JFET

Dále je třeba ukázat, jakým způsobem se mění tvar vodivého kanálu při zvyšujícím se napětí U_{DS} . Volíme $U_{GS} = 0V$. 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. 2.7). 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. 2.6). V této oblasti vzrůstá proud I_D již nepatrně.

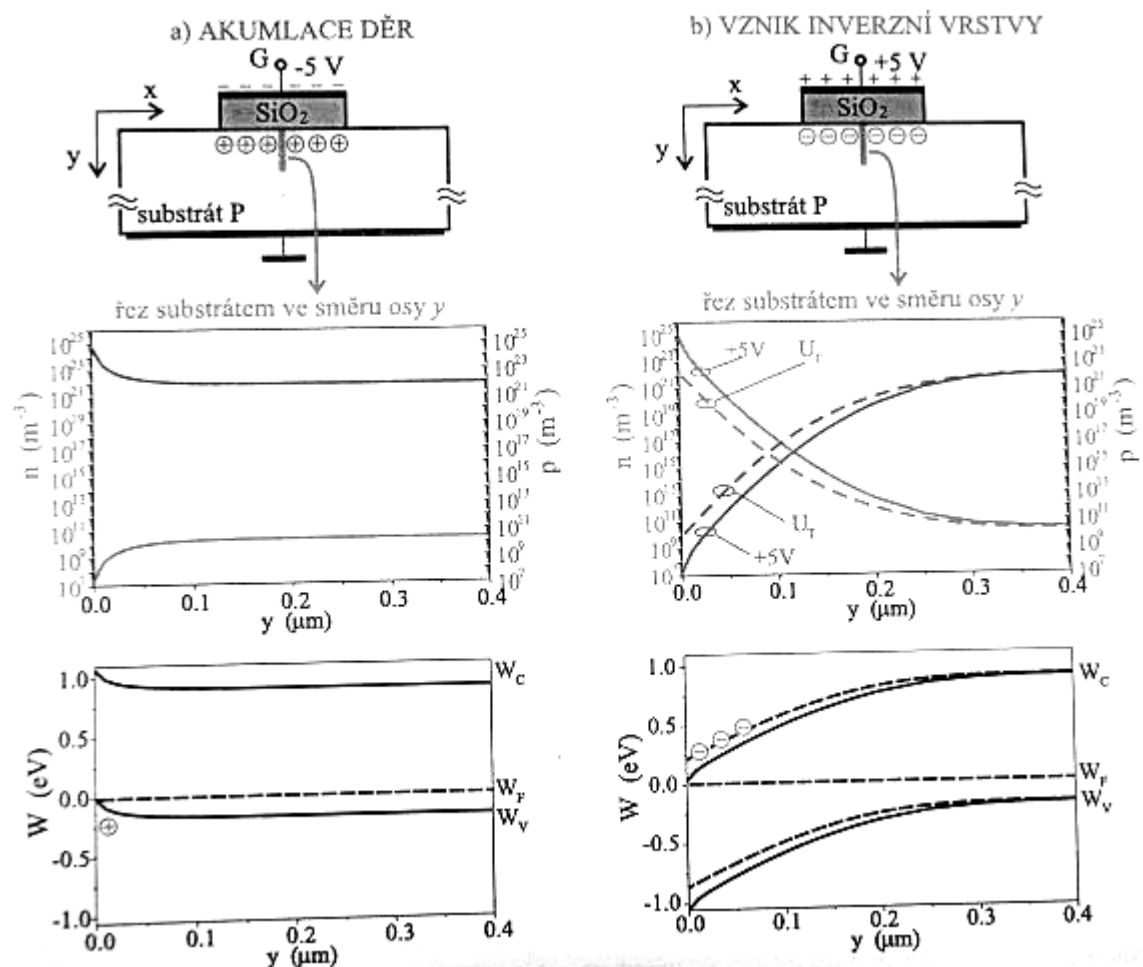


Obr. 2.7 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 1V$

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

Teorie:

Princip činnosti tranzistoru MOSFET lze vysvětlit chováním kondenzátoru znázorněného na obr. 3.1. 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. 3.1 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.



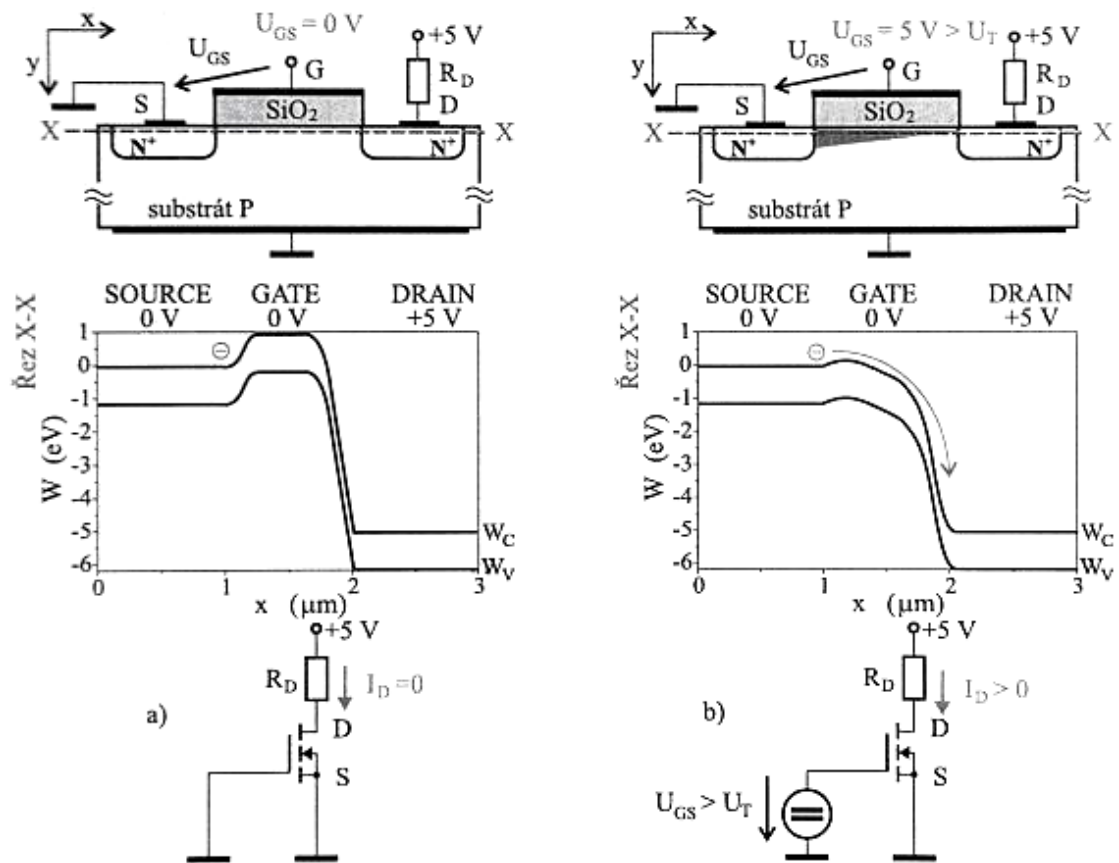
Obr. 3.1 Vznik inverzní vrstvy [28]

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).

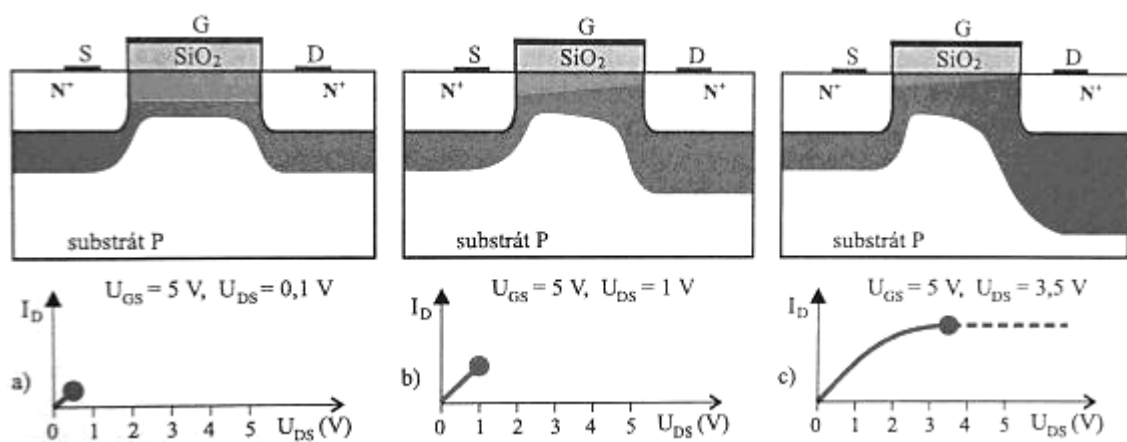
Přidáním dvou oblastí vodivosti N s přívodními kontakty (Source, Drain) dostáváme tranzistor MOSFET s kanálem N. Elektroda S je stejně jako substrát připojena na zem, na elektrodu D je přivedeno kladné napětí. Source i drain jsou tak izolovány od substrátu hradlovou vrstvou. Stejně tak je od substrátu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

Uvažujme napětí $U_{DS} = 5V$, pokud je $U_{GS} < U_T$ (obr. 3.2 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. 3.2 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} .



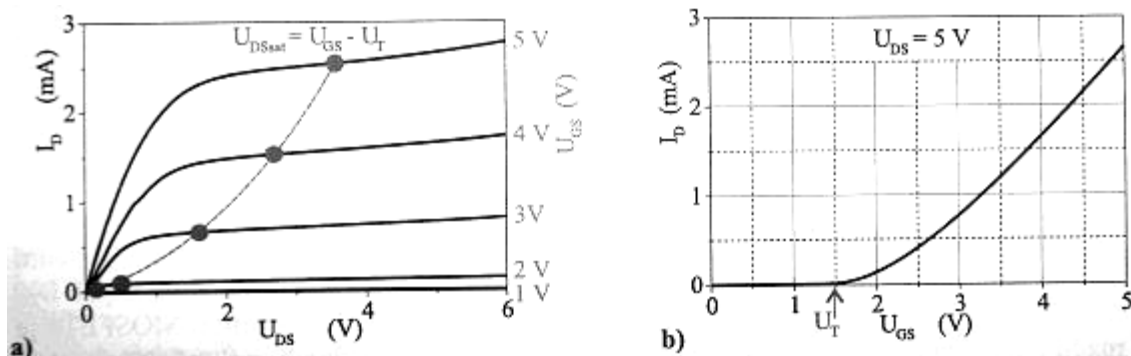
Obr. 3.2 Průchod proudu po překročení prahového napětí [28]

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. 3.3 a). Při větším napětí se již zúžení vodivého kanálu projeví zvětšením odporu a ohybem V-A charakteristiky (obr. 3.3 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 zaškrcení kanálu (obr. 3.3 c). Další zvýšení napětí U_{DS} již prakticky nemá vliv na zvýšení proudu I_D . Zaškrcená oblast se sice zvětšuje, veškerý přírůstek napětí se však projeví jako úbytek na tomto zaškrcení (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. 3.3 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 5V$ [28]

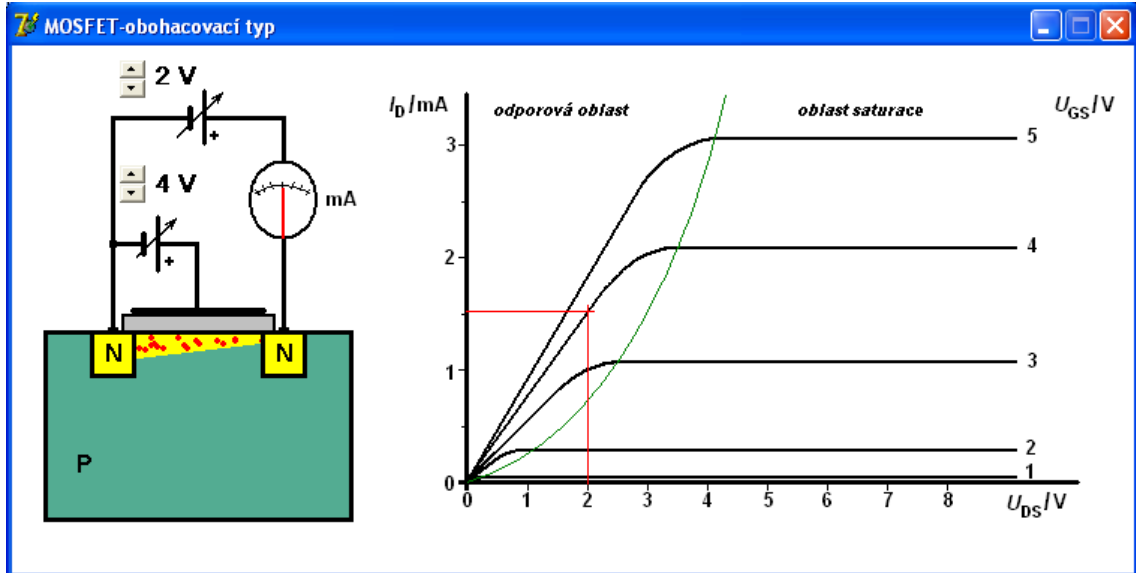
Pro různá napětí U_{GS} tak dostáváme sít' výstupních charakteristik (obr. 3.4 a). Pro $U_{GS} = 1V$ ještě nebylo překonáno prahové napětí U_T , proto je proud tranzistorem nulový pro jakékoliv napětí U_{DS} . Proud začne tranzistorem protékat až po překonání prahového napětí ($U_{GS} = 2V$). V charakteristikách jsou dále vyznačeny body saturace (zaškrcení kanálu), pro které platí: $U_{GS} - U_{DS} = U_T$. Prahové napětí je vyznačeno v převodní charakteristice na obr. 3.4 b), v tomto případě je $U_T = 1,5V$.



Obr. 3.4 Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET [28]

Realizace modelu:

Provedení je vidět na obr. 3.5. 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. 3.5 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 PictureBox 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 PictureBoxu, 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;

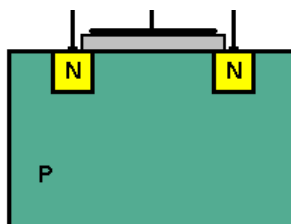
  moveto(20,48);
  lineto(round((265-fpoints2[updown2.position,
        updown1.position].Y)*40/228),
        15+round(abs(150-fpoints2[updown2.position,
        updown1.position].Y)/15));
end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „a-1-2_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 zaškrcení kanálu.
7. Při $U_{GS} = 5 \text{ V}$ zvyšování U_{DS} ze 4 V na 8 V .
Zaškrcení kanálu se nepatrně rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

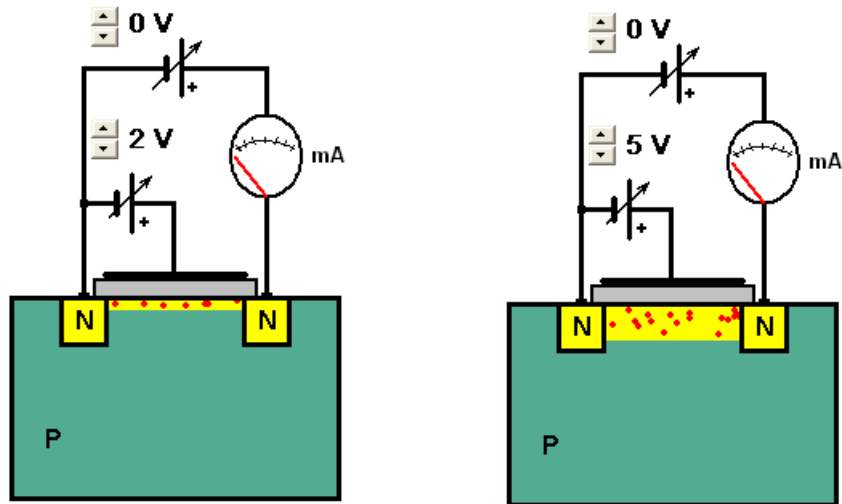
Výklad:

Struktura MOSFETu s indukovaným kanálem je znázorněna na obr. 3.6. 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 řídicí 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.



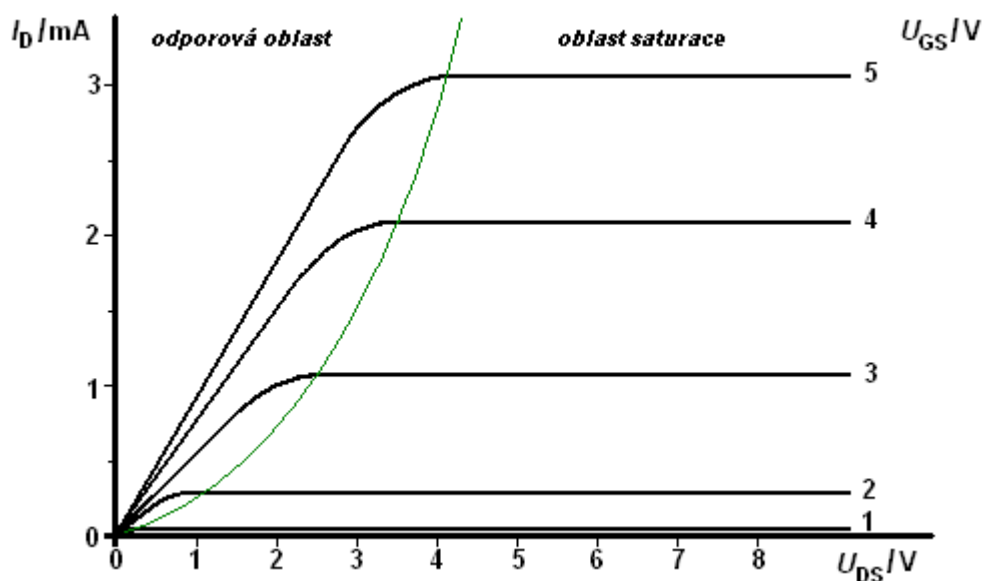
Obr. 3.6 Struktura tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

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. 3.7). Snižuje se tak odpor mezi elektrodami S a D. Protože je $U_{DS} = 0V$, neprochází kanálem proud (elektrony jsou nehybné).



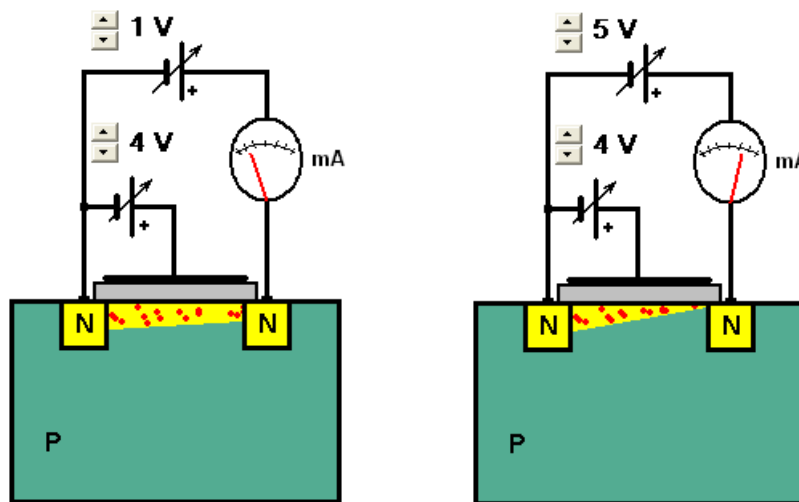
Obr. 3.7 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

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. 3.8). Pro $U_{GS} = 1V$ ($0V$) zaniká indukovaný kanál a odpor rezistoru je nekonečný.



Obr. 3.8 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. 3.8). 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. 3.7). 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. 3.7).

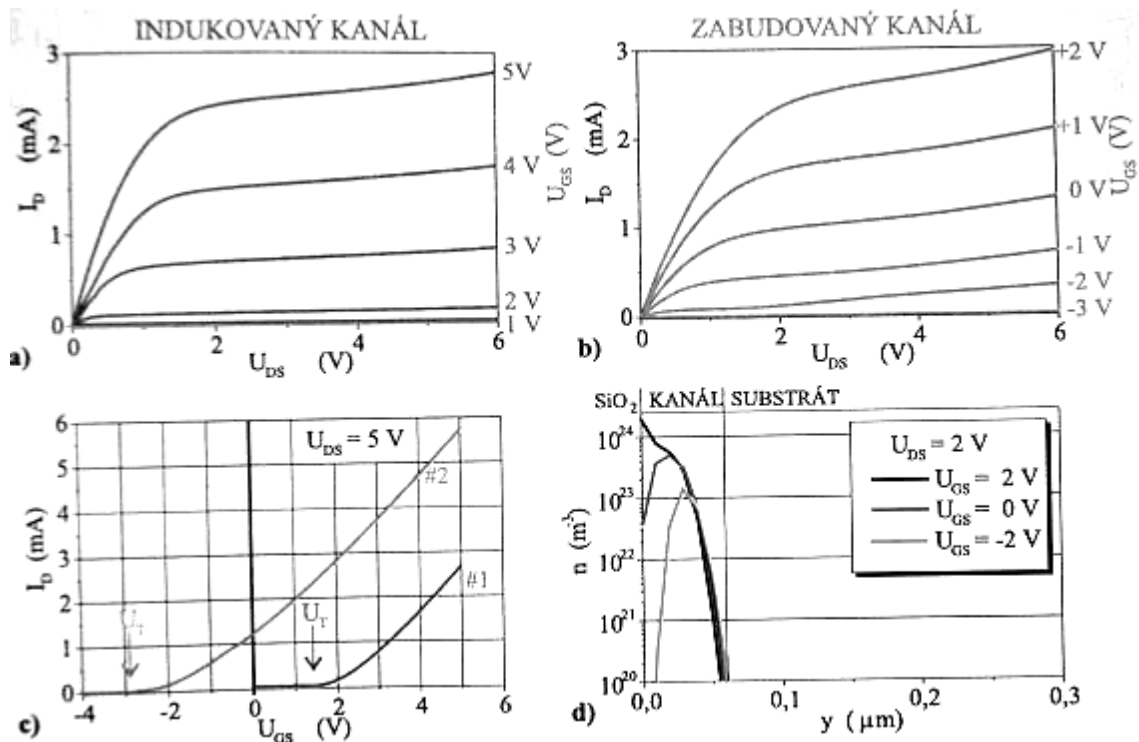


Obr. 3.8 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 4V$

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

Teorie:

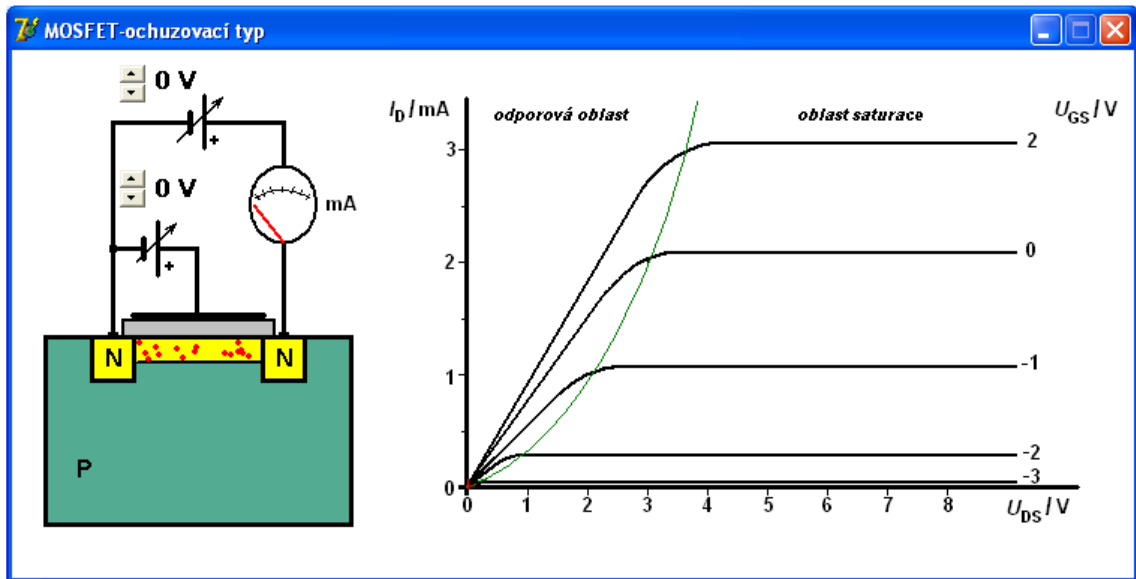
Na rozdíl od obohacovacího typu, u kterého je kanál indukován po překonání prahového napětí $U_T > 0$ (s kanálem typu N), je prahové napětí ochuzovacího typu posunuto do záporných hodnot (převodní charakteristika – obr. 4.1 c). Kanál mezi elektrodami S a D tedy existuje i při $U_{GS} = 0V$. Toho je dosaženo 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. 4.1 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. 4.1 a), b).



Obr. 4.1 Rozdíly tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem a zabudovaným kanálem [28]

Realizace modelu:

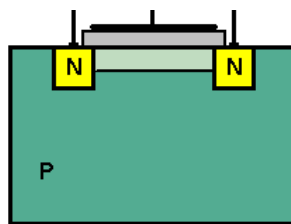
Provedení je prakticky stejné jako u tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem. Rozdíl je pouze v obrázku V-A charakteristik a ve vykreslování kanálu. Obrázek struktury tranzistoru i ovládací prvky zůstávají stejné (obr. 4.2). Napětí U_{DS} lze měnit v rozsahu 0 V až 8 V po 1 V, napětí U_{GS} od -4 V do 2 V po 1 V pro záporné hodnoty a po 2 V pro hodnoty kladné.



Obr. 4.2 Provedení modelu tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem

Kanáal je opět vykreslován v komponentě PaintBox při změně napětí. Nejprve je znázorněn technologicky vytvořený kanál světle zelenou barvou (obr. 4.3):

```
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. 4.3 Provedení zabudovaného kanálu

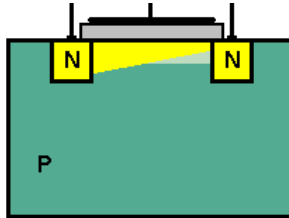
Žlutou barvou je překreslen aktuální tvar kanálu (obr. 4.4) v závislosti na napětích ($UpDown1.position$, $UpDown2.position$):

```
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))]);

```



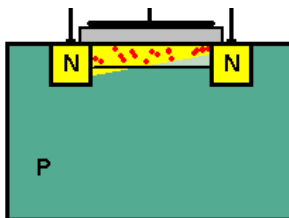
Obr. 4.4 Provedení zabudovaného kanálu

Nakonec dojde k ohraničení vytvořeného kanálu černou čarou, a zobrazení červených teček, znázorňujících elektrony (obr. 4.5):

```

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. 4.5 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:

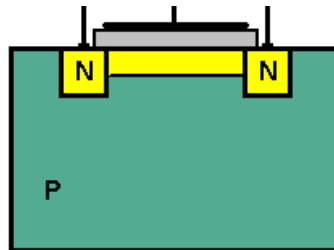
```
with PaintBox3.Canvas do begin  
  Pen.Width := 1;  
  Pen.Color := clred;  
  moveto(fpoints2[updown2.position,updown1.position].X,268);  
  lineto(fpoints2[updown2.position,updown1.position].X,  
        fpoints2[updown2.position,updown1.position].Y-5);  
  moveto(55,fpoints2[updown2.position,updown1.position].Y);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

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-1-3_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 zaškrcení kanálu.
8. Při $U_{GS} = 2\text{ V}$ zvyšování U_{DS} ze 4 V na 8 V .
Zaškrcení kanálu se nepatrně rozšiřuje. Elektrony procházejí touto oblastí s velkým odporem díky urychlení silným elektrickým polem. Proud již dále nenarůstá.

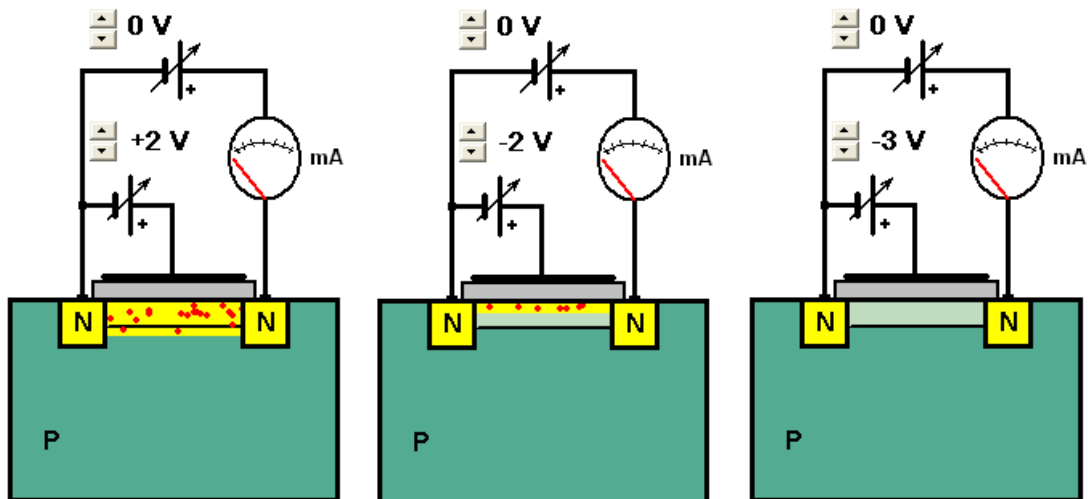
Výklad:

Struktura MOSFETu se zabudovaným kanálem je znázorněna na obr. 4.6. 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 .



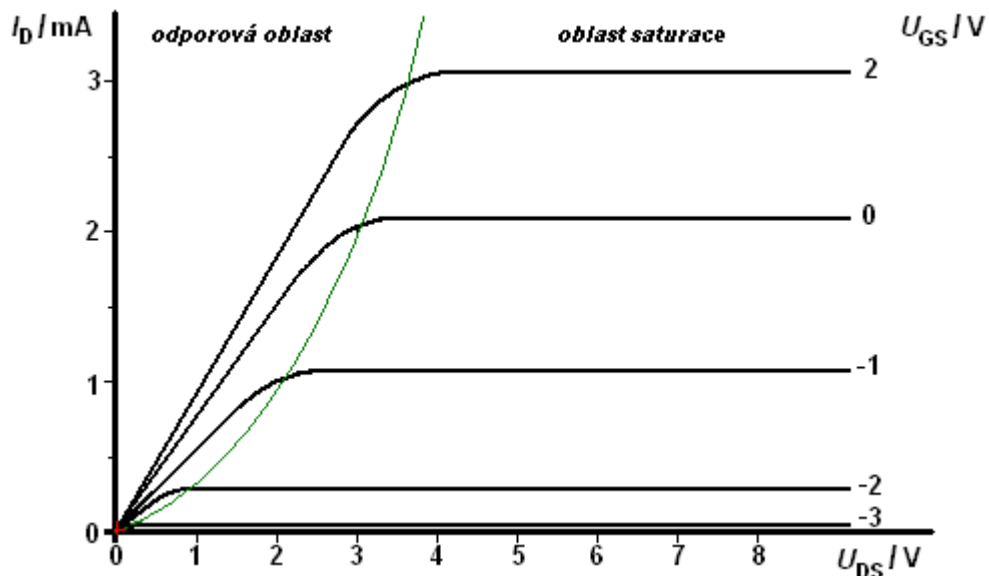
Obr. 4.6 Struktura tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem

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. 4.7). Protože je $U_{DS} = 0V$, neprochází kanálem proud (elektrony jsou nehybné).



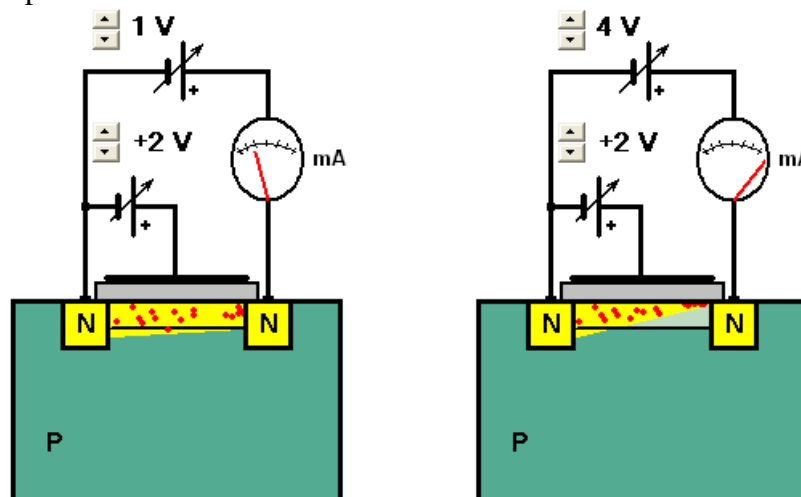
Obr. 4.7 Změna napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0V$

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. 4.8). Pro $U_{GS} = -3V$ a $-4V$ kanál zcela zaniká a odpor rezistoru je nekonečný.



Obr. 4.8 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. 4.9). 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. 4.8). Zaškrcení kanálu se nepatrně posouvá směrem k elektrodě S. Elektronů procházejí ochuzenou oblastí díky velkému napěťovému spádu.



Obr. 4.9 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 2V$

4.2 Usměrňovače

Didaktický cíl:

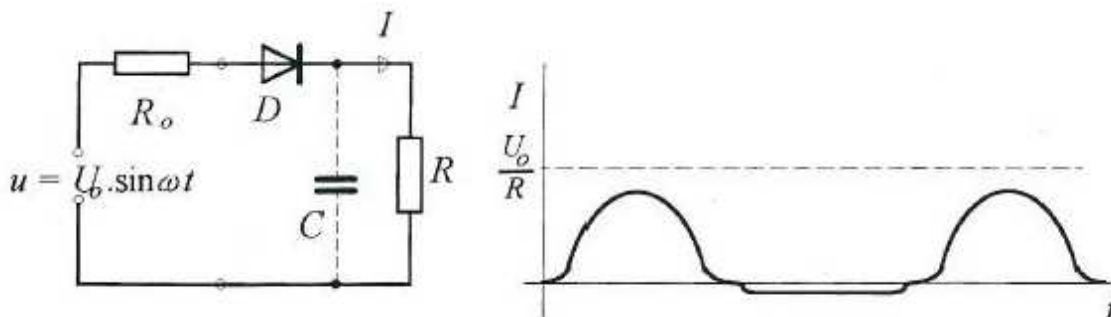
Cílem této skupiny modelů je animace proudů protékajících obvodem a znázornění průběhu vstupního a výstupního napětí.

Vzhledem k jednoduchosti této skupiny animací a nulové možnosti zasahovat do probíhajících dějů nejsou zařazeny podkapitoly **metodický návod** a **výklad**. U těchto modelů je nutno poukázat na zkrácení reality: Pro lepší přehlednost je proud obvodem animován ve fázi s napětím. Ve skutečnosti jsou však, vzhledem k indukční povaze obvodu, jejich průběhy fázově posunuty.

4.2.1 Jednocestný usměrňovač

Teorie:

Je to obvod využívající usměrňovacího jevu P-N přechodu. Na obr. 5.1 je znázorněno jeho zapojení a graf průběhu proudu. Z grafu je zřejmá deformace sinusového průběhu v oblasti vstupního napětí menšího než je difúzní napětí diody. V závěrném směru prochází diodou minimální (závěrný) proud. Amplituda proudu se od hodnoty $\frac{U_0}{R}$ liší o úbytek napětí na diodě a na vnitřním odporu zdroje. Toto zapojení je zpravidla doplněno vyhlazovacím kondenzátorem C .



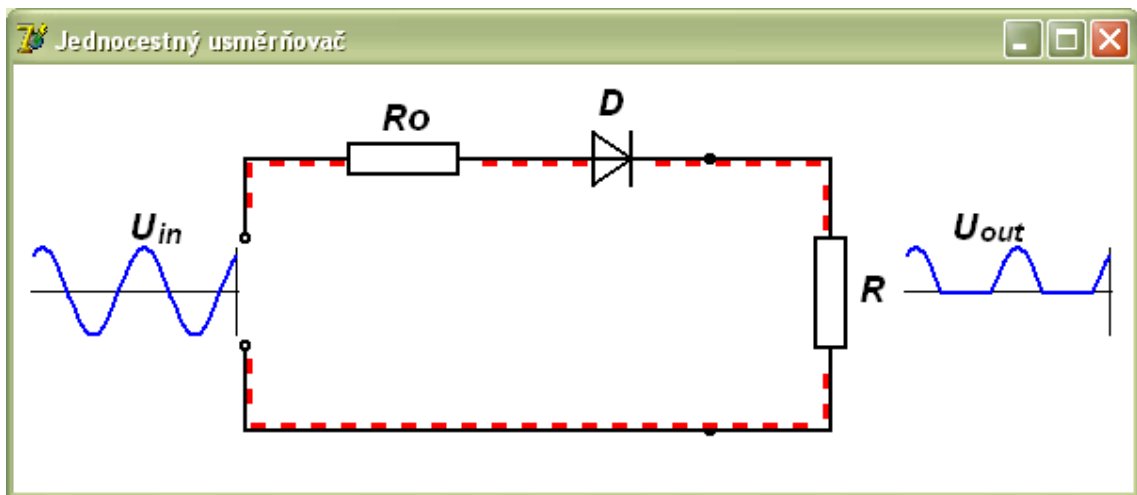
Obr. 5.1 Jednocestný usměrňovač [18]

Realizace modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 5.2. Do okna programu je vložen obrázek zapojení usměrňovače, přes který jsou překreslovány obrázky červených čárkovaných čar, znázorňujících proud obvodem.

Při spuštění programu je spuštěn časovač, provádějící posun těchto čar pomocí proměnné i :

```
i:=i+1;  
image1.Left:=103 - 2*i;  
image10.Top:=52 - 2*i;  
.....atd.
```



Obr. 5.2 Model jednocestného usměrňovače

To znamená, že při každém kroku se hodnota i zvýší o 1 a levý (případně horní) okraj čárkovaných čar se posune o 2 pixely. Čárka posunuta vždy osmkrát a pak se vrací na původní místo.

Zároveň dochází k posouvání grafu vstupní a výstupní sinusovky umístěné v komponentě PaintBox:

```
pamet := Form1.FPoints1[1].Y;
for j:=1 to 100 do
Form1.FPoints1[j].Y:= Form1.FPoints1[j+1].Y;
Form1.FPoints1[100].Y:=pamet;
```

```
with PaintBox1.Canvas do
begin
Pen.Width := 2;
Pen.Color := clBlue;
Polyline(FPoints1);
end
```

Tloušťky čar (velikost proudu) v obvodu jsou dány okamžitou hodnotou výstupního napětí:

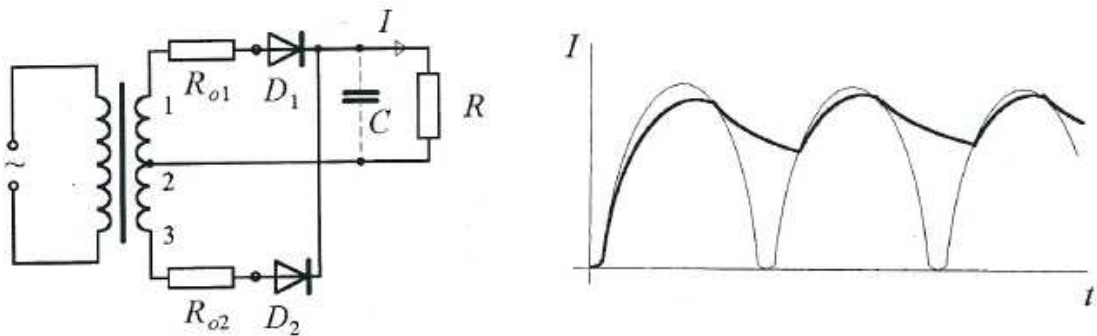
```
image1.Height:=Form1.FPoints2[100].Y*4 div rozsahY;
image10.Width:= Form1.FPoints2[100].Y*4 div rozsahY;
```

Program se spouští souborem „a-2-1_usm_jednocestny.exe“.

4.2.2 Dvojcestný usměrňovač

Teorie:

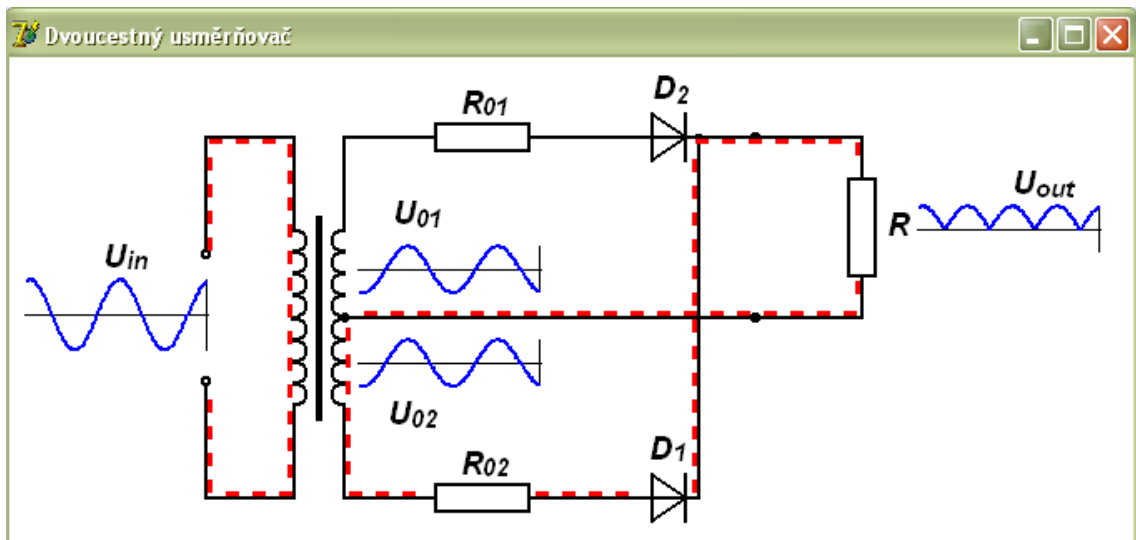
Jedná se o dva jednocestné usměrňovače připojené ke dvěma sériově zapojeným zdrojům. Nejčastěji se používá transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí. Na obr. 6.1 je znázorněno jeho zapojení. Při kladné půlperiodě vstupního napětí prochází proud směrem $1-R_{o1}-D_1-R-2$, při záporné půlperiodě směrem $3-R_{o2}-D_2-R-2$. Na obr. 6.1 je znázorněn průběh proudu zátěží R . Z grafu je zřejmá deformace sinusového průběhu v oblasti vstupního napětí menšího než je difúzní napětí diody. Do grafu je zanesen i průběh proudu při použití vyhlazovacího kondenzátoru C .



Obr. 6.1 Dvojcestný usměrňovač [18]

Realizace modelu:

Model dvoucestného usměrňovače je proveden obdobně jako model usměrňovače jednocestného. Do okna programu je vložen obrázek zapojení usměrňovače, přes který jsou překreslovány obrázky červených čárkovaných čar, znázorňujících proud obvodem (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Model dvoucestného usměrňovače

Při spuštění programu je spuštěn časovač, provádějící posun těchto čar pomocí proměnné *i*:

```
i:=i+1;  
image5.Left:=48 - 2*i;  
image12.Top:=267 + 2*i;  
.....atd.
```

Zároveň dochází k posouvání grafu vstupní a výstupní sinusovky:

```
pamet:= Form1.FPoints1[1].Y;  
for j:=1 to 100 do  
Form1.FPoints1[j].Y:= Form1.FPoints1[j+1].Y;  
Form1.FPoints1[100].Y:=pamet;
```

Tloušťky čar (velikost proudu) v obvodu jsou dány okamžitou hodnotou odpovídajícího napětí:

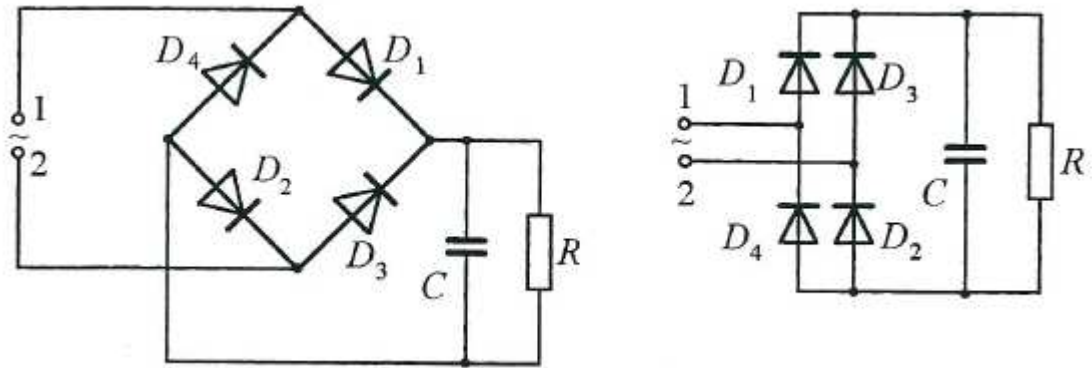
```
Image5.Height:=Form1.FPoints2[100].Y*4 div rozsahY;  
image12.Width:= Form1.FPoints2[100].Y*4 div rozsahY;
```

Program se spouští souborem „**a-2-2_usm_dvoucestny.exe**“.

4.2.2 Můstkový usměrňovač

Teorie:

Můstkový usměrňovač se používá v případě, že není k dispozici dvojitý zdroj střídavého napětí. Jeho zapojení je zřejmé z obr. 7.1. Při kladné půlperiodě vstupního napětí prochází proud směrem $1-D_1-R-D_2-2$, při záporné půlperiodě směrem $2-D_3-R-D_4-1$. Průběh proudu zátěží R a výstupního napětí je shodný jako u dvoucestného usměrňovače. Zapojení bývá opět doplněno vyhlazovacím kondenzátorem C .

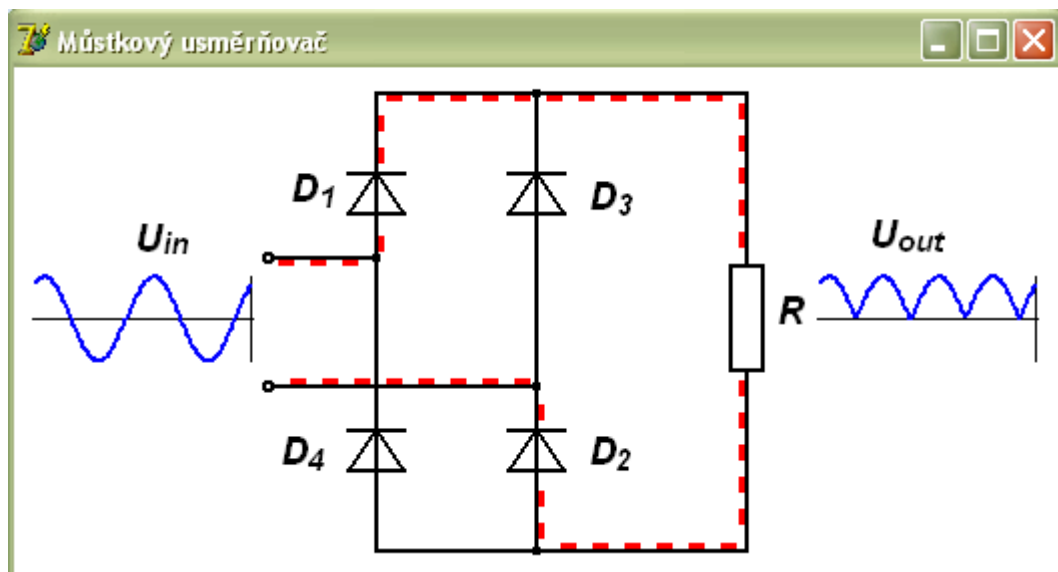


Obr. 7.1 Můstkový usměrňovač [18]

Realizace modelu:

Model je proveden stejným způsobem jako předchozí modely usměrňovačů. Přes obrázek obvodu jsou překreslovány obrázky červených čárkovaných čar, znázorňujících proud. Na vstupu a výstupu jsou v komponentě PaintBox vloženy sinusovky. Vše je posouváno časovačem (obr. 7.2).

Program se spouští souborem „a-2-3_usm_mustek.exe“.



Obr. 7.2 Model můstkového usměrňovače

4.3 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 bazových proudů a obvod se díky kladné zpětné vazbě překlápí do stabilního, případně kvazistabilního stavu. Je třeba zdůraznit pouze dva možné stavy, ve kterých se mohou obvody nacházet: T_1 otevřen- T_2 uzavřen, nebo T_2 otevřen- T_1 uzavřen.

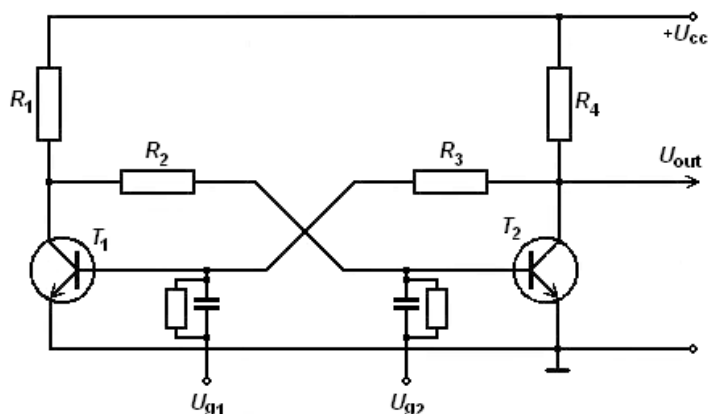
U bistabilního obvodu jsou umožněny různé způsoby řízení, z čehož vyplývá i praktické využití. Musí být vykresleny změny proudů a napětí při přivedení řídicích signálů.

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.

4.3.1 Bistabilní obvod

Teorie:

Je to symetrický obvod se dvěma tranzistory, propojenými kladnou zpětnou vazbou (obr. 8.1). Bazový 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 bazový 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 bazovým 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. 8.1 Bistabilní obvod

Po připojení napájecího napětí začnou obvodem procházet bazové 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 bazové 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 modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 8.3 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;  
image2.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;
```

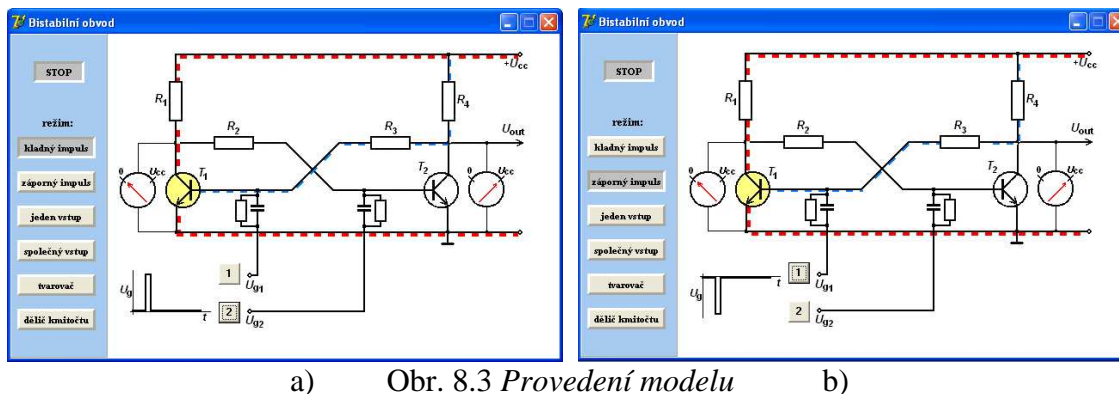
Form1.FPoints[1].Y znamená ypsilonovou souřadnici prvního bodu vstupní sinusovky a Form1.FPoints[2].Y bod druhý. Znamená to, že k překlopení obvodu dojde, pokud dosáhne okamžitá hodnota vstupního signálu určité hodnoty.

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;
```

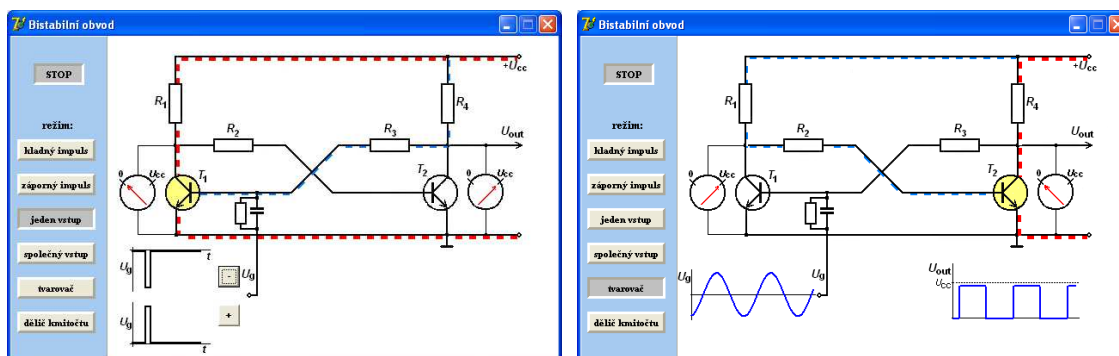
Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-3-1_bistabilni_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 tlačítka **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 tlačítka **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 tlačítka **+** , **-** .
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 vytvářen do průběhu obdélníkového.
10. Přepnutí do režimu řízení společným vstupem – tlačítko **společný vstup** a stisknutí tlačítka **START** .
11. Přivádění řídicích impulsů tlačítka **+** , **-** .
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 překlápěn vždy při náběžné hraně. Na výstupu má průběh poloviční frekvenci.



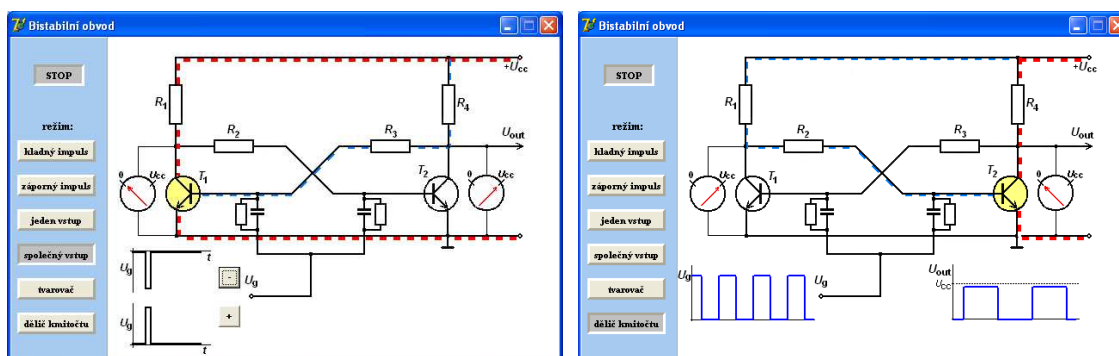
a) Obr. 8.3 Provedení modelu b)

Další možností, jak obvod ovládat, je přivádění střídavě kladného a záporného impulsu pouze na jeden vstup (tlačítko **jeden vstup**, obr. 8.3 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. 8.3 d).



c) Obr.8.3 Provedení modelu d)

Posledním způsobem řízení, který model umožňuje je přivádění kladného nebo záporného impulsu na propojené vstupy (tlačítko **společný vstup**, obr. 8.3 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. 8.3 f).

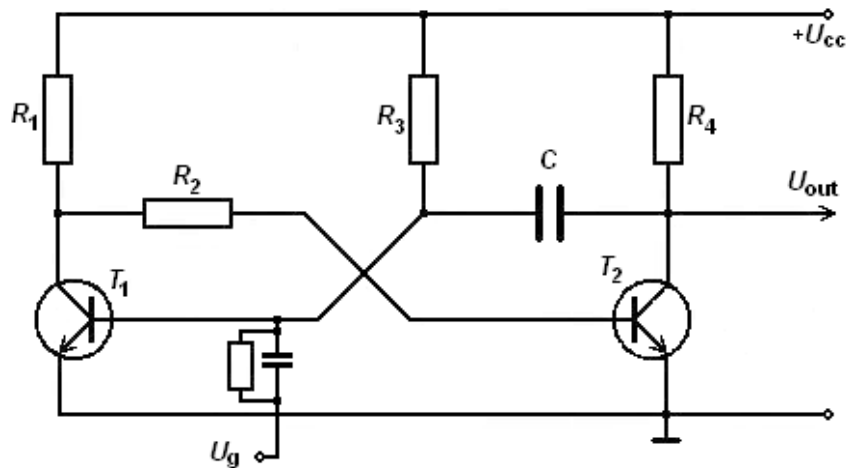


e) Obr.8.3 Provedení modelu f)

4.3.2 Monostabilní obvod

Teorie:

Tento obvod, jehož zapojení je na obr. 9.1, 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. 9.1 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} .

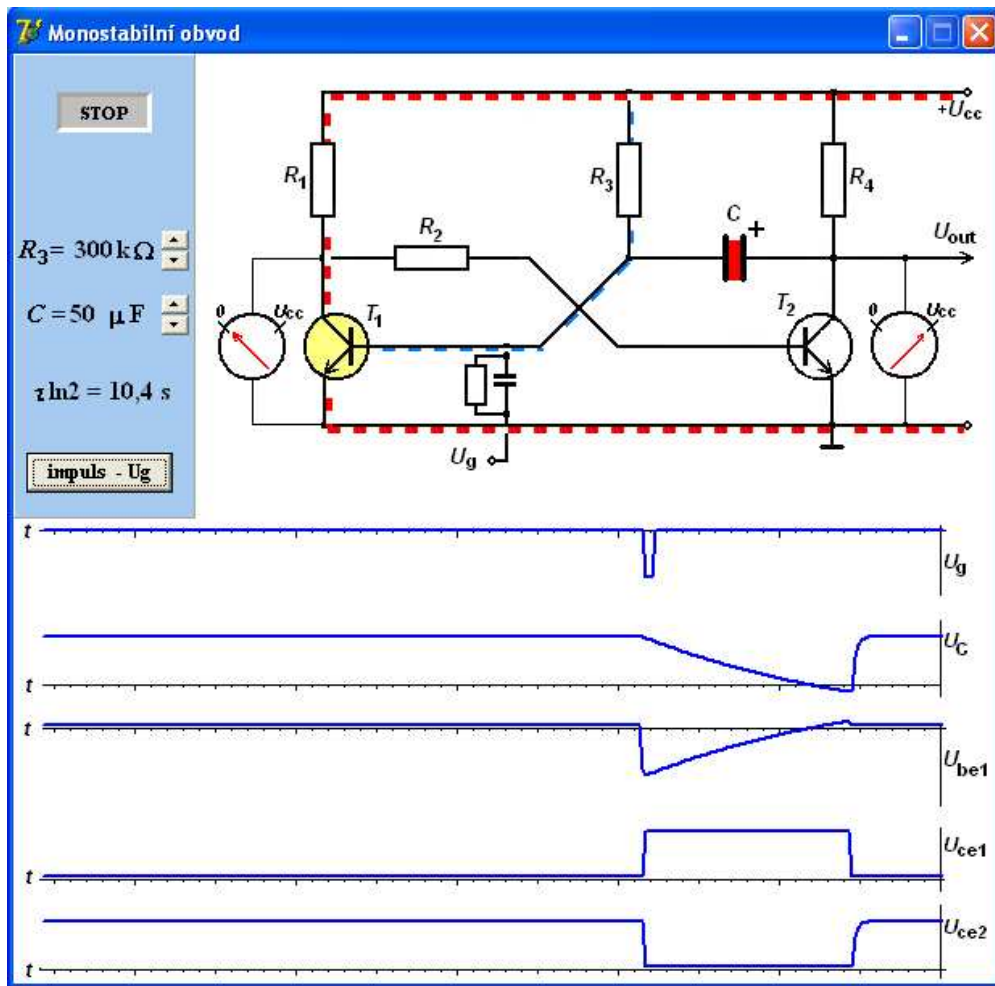
Po přivedení záporného řídicího impulsu na bázi otevřeného tranzistoru T_1 , se tento tranzistor uzavře. Jeho kolektorové napětí vrostne, tím se otevře tranzistor T_2 a uzemní kladný pól kondenzátoru C . Na bázi tranzistoru T_1 se nyní nachází záporné napětí kondenzátoru C , které brání jeho otevření. 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 vybití oddělovací kondenzátor na vstupu, to je zajištěno paralelně připojeným rezistorem.

Realizace modelu:



Obr. 9.2 Provedení modelu monostabilního obvodu

Provedení modelu je patrné z obr. 9.2. 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** – U_g 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 :

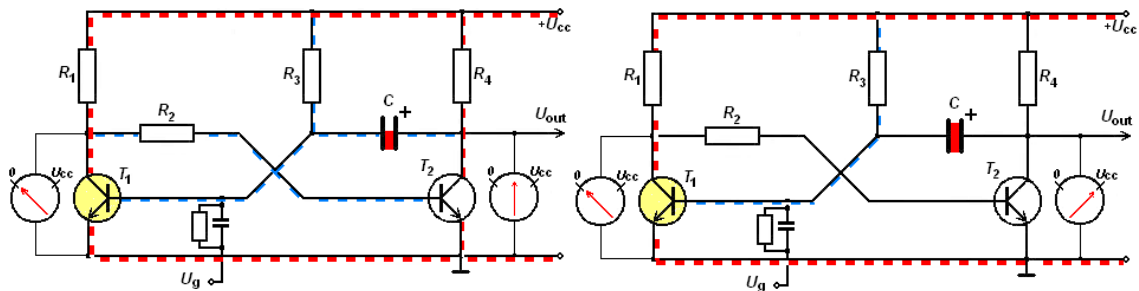
```
if fpoints4[280].Y>44 then begin k:=1; T:=0;
end;
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-3-2_monostabilni_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 polarity 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 .

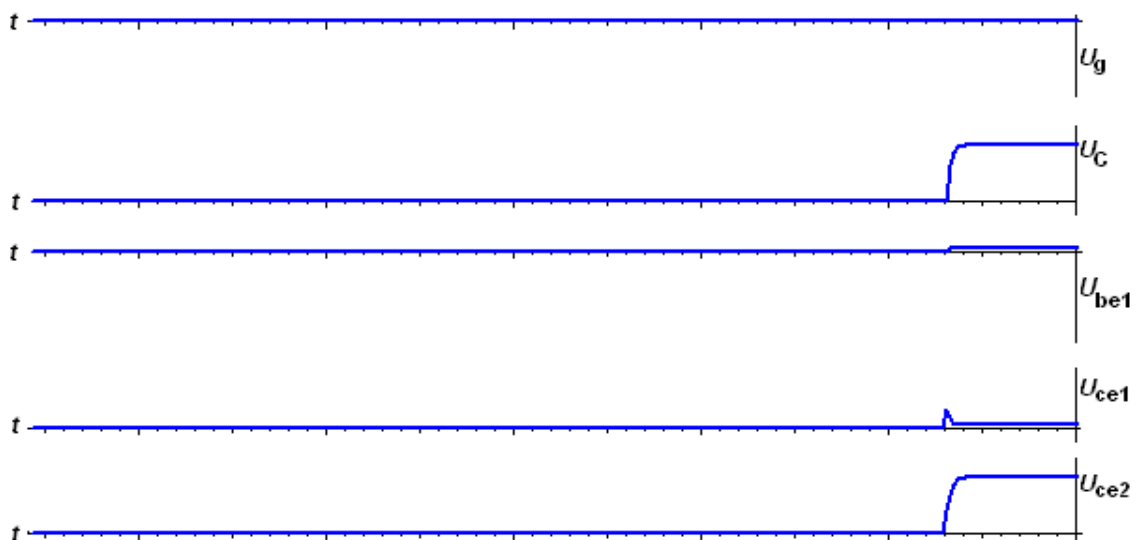
Výklad:

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. 9.3).



Obr. 9.3 Překlápění monostabilního obvodu do stabilního stavu po připojení zdroje

Na obr. 9.4 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 nabíjecím se kondenzátorem C téměř na hodnotu napájecího napětí U_{cc} . Toto napětí je zároveň napětím výstupním.

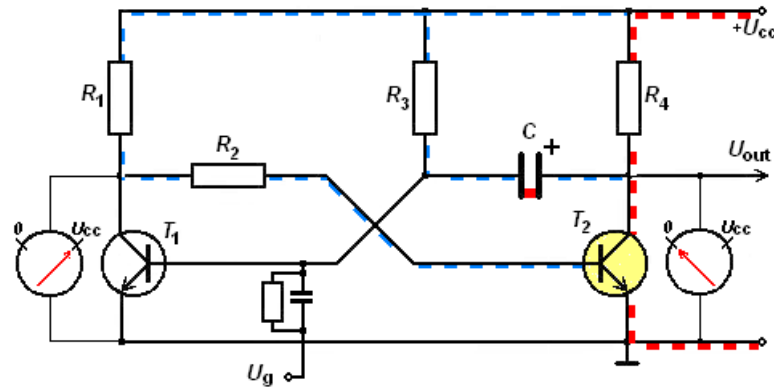


Obr. 9.4 Průběhy napětí po připojení zdroje

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.

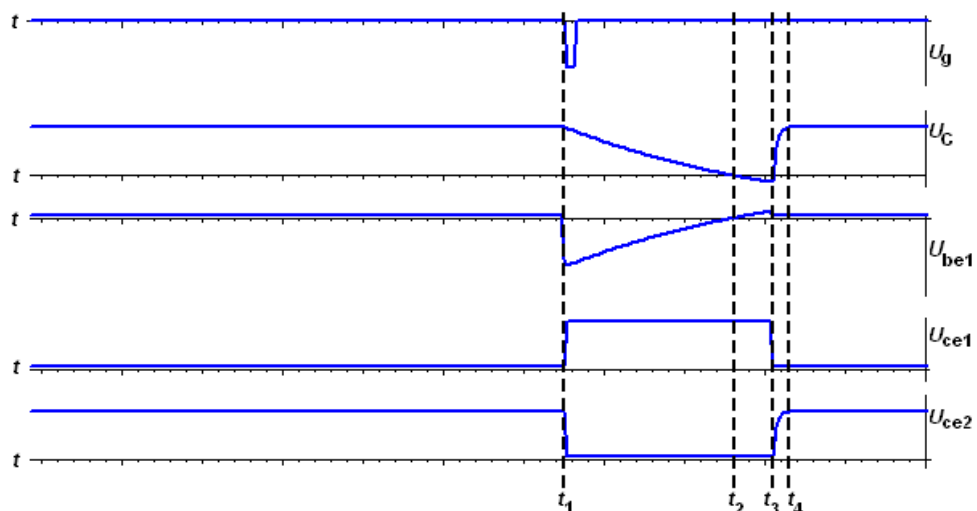
Překlopení obvodu se provádí přivedením záporného impulsu na bázi otevřeného tranzistoru přes oddělovací kondenzátor (tlačítko **impuls** - U_g). K oddělovacímu kondenzátoru je paralelně připojen rezistor, zajišťující jeho vybití před přivedením dalšího řídicího impulsu.

Okamžik přivedení řídicího impulsu $-U_g$ je na obr. 9.6 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 bázový 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. 9.5).



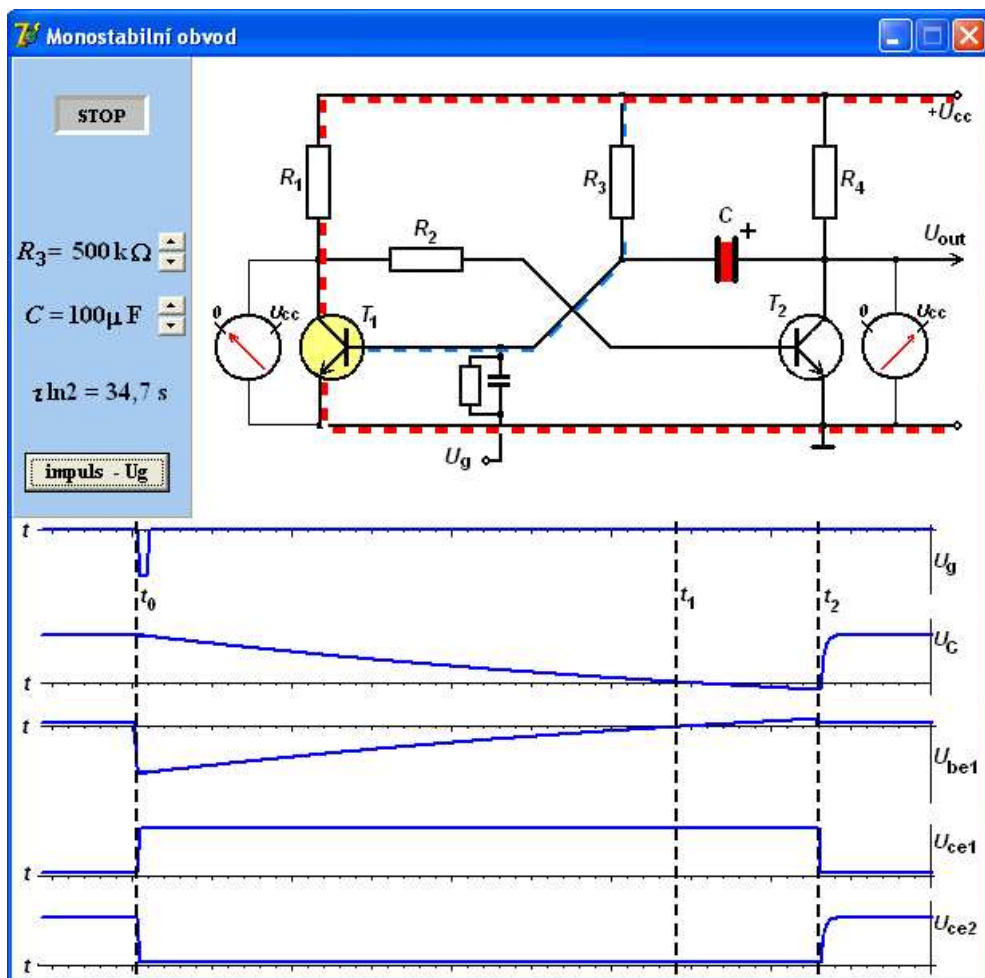
Obr. 9.5 Kvazistabilní stav

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. 9.6) 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. 9.6 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. 9.7 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.

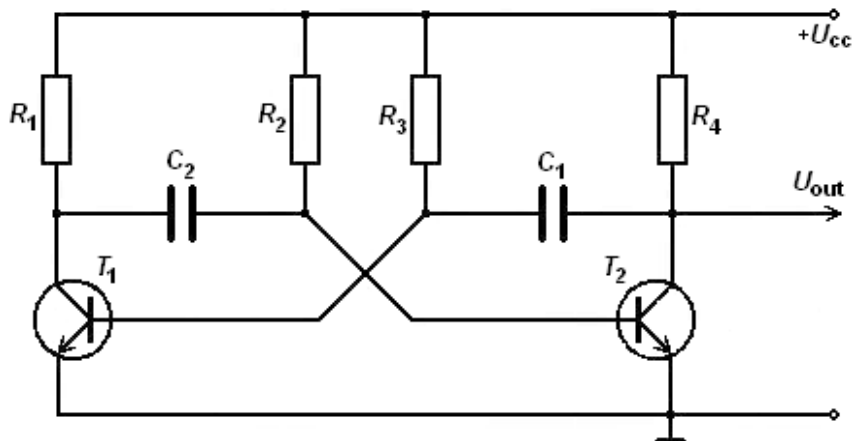


Obr. 9.7 Doba trvání kvazistabilního stavu

4.3.3 Astabilní obvod

Teorie:

Jak již název napovídá, tento obvod, jehož zapojení je na obr. 10.1, 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. 10.1 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} .

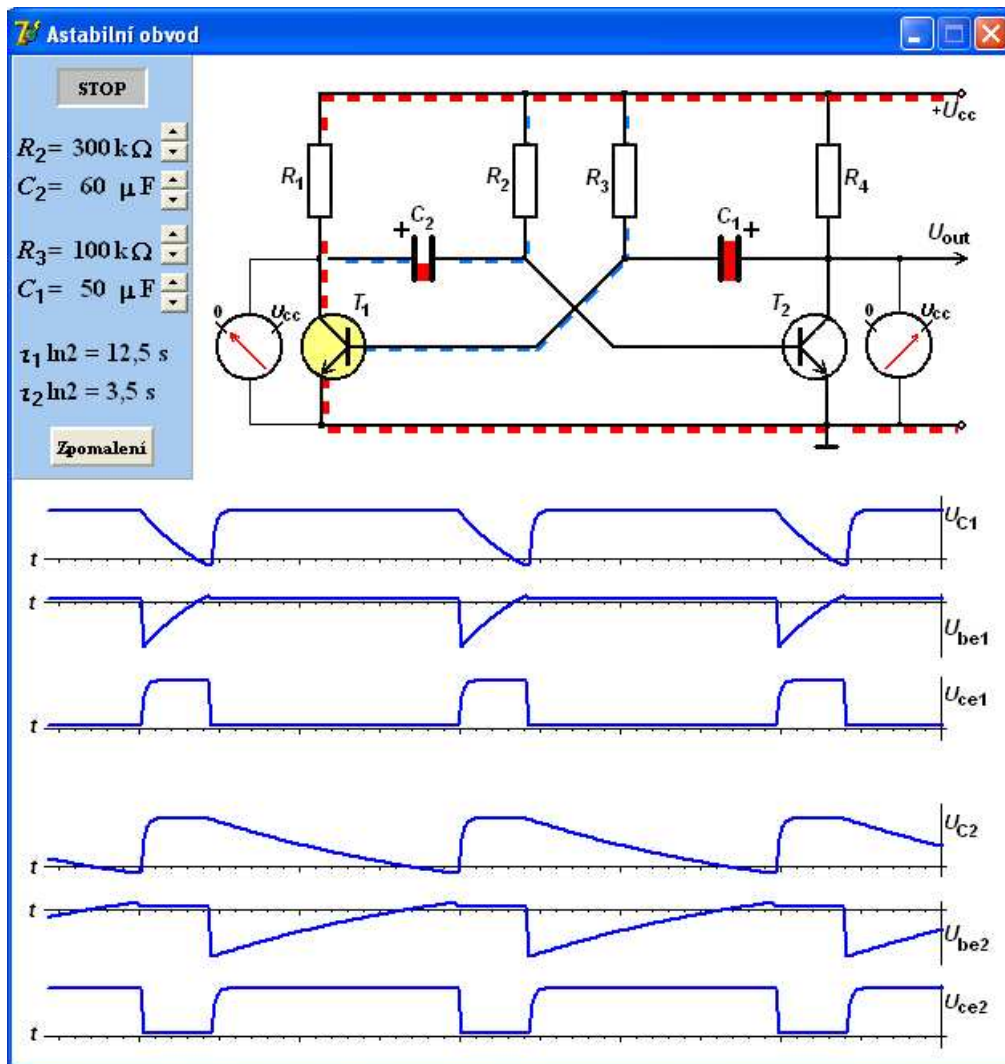
Kondenzátor C_2 se začne vybíjet přes rezistor R_2 a otevřený tranzistor T_1 s časovou konstantou $\tau_1 = R_2 \cdot C_2$. Nejdříve se vybije na 0V, pak se začne nabíjet na opačnou polaritu. V okamžiku, kdy se nabije na napětí asi 0,5 V (u křemíkových tranzistorů), se nachází na bázi tranzistoru T_2 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 modelu:



Obr. 10.2 Provedení modelu astabilního obvodu

Provedení modelu je patrné z obr. 10.2. 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 μF až 100 μF

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 k_1 a k_2 , symbolizující stavy: Vybíjení kondenzátoru C_1 přes rezistor R_3 ($k_1=1$), nabíjení kondenzátoru C_1 přes R_4 ($k_1=2$), počáteční stav diferenciace bázových proudů v případě rychlejšího otevírání tranzistoru T_2 ($k_1=3$), vybíjení kondenzátoru C_2 přes rezistor R_2 ($k_2=1$), nabíjení kondenzátoru C_2 přes R_1 ($k_2=2$), počáteční stav diferenciace bázových proudů v případě rychlejšího otevírání tranzistoru T_1 ($k_2=3$).

Po připojení zdroje napětí (tlačítko **START**) dojde k nastavení k_1 a k_2 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 bázových proudů:

```
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;

```

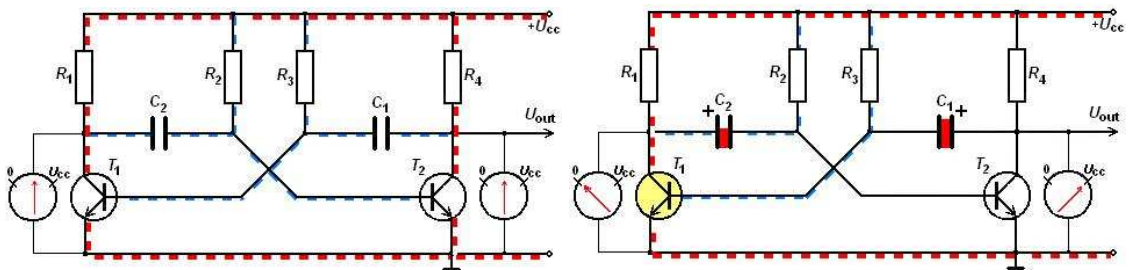
Takto se celý cyklus neustále opakuje.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-3-3_astabilni_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 .

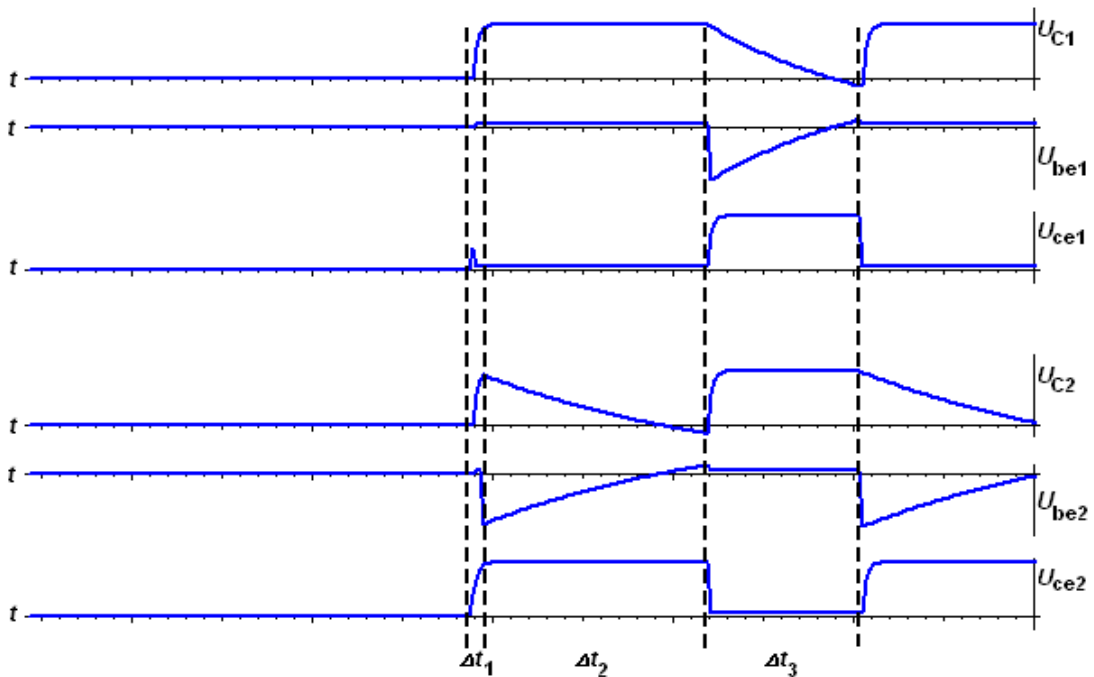
Výklad:

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 saturovaného 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 bázové proudy $I_{b1} > I_{b2}$ a tranzistor T_1 se otevírá rychleji než T_2 . Pro kolektorová napětí platí: $U_{ce1} < U_{ce2}$ (obr. 10.3). Protože nabíjecí proudy kondenzátorů tvoří převážnou část bázových proudů, je kolektorové napětí U_{ce1} určující pro bázový proud tranzistoru T_2 a U_{ce2} určuje bázový 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 bázové proudy vyrovnány, tranzistor T_2 má však nepatrně větší proudový zesilovací činitel, proto nastává opět situace: T_1 uzavřen, T_2 otevřen.



Obr. 10.3 Diferenciace bázových 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.

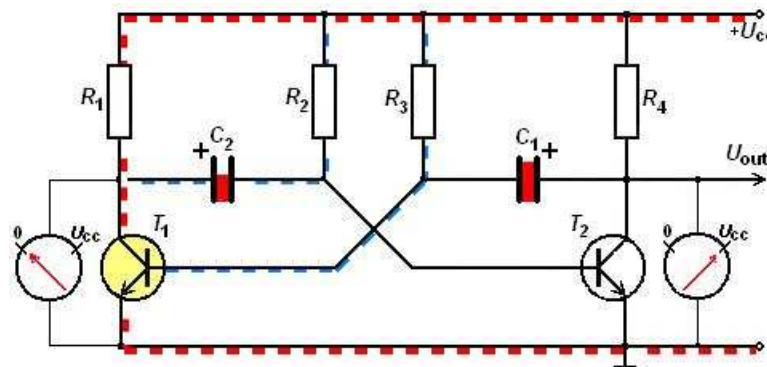


Obr. 10.4 Průběhy napětí: Δt_1 – připojení zdroje, Δt_2 – 1. kvazistabilní stav, Δt_3 – 2. kvazistabilní stav

Na obr. 10.4 jsou znázorněny průběhy napětí v důležitých částech obvodu. V tomto případě bylo zvoleno $R_2 > R_3$.

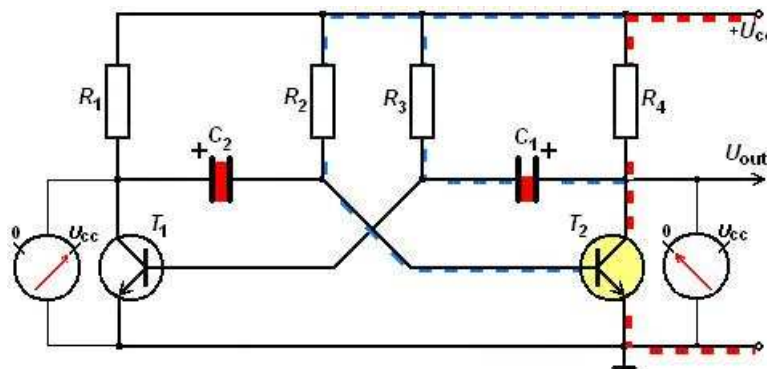
První okamžiky po připojení napájecího napětí jsou označeny Δt_1 . Oba kondenzátory se ihned začínají rychle nabíjet, U_{C1} a U_{C2} roste. Zpočátku se otevírají oba tranzistory, kolektorová napětí U_{ce1} i U_{ce2} nabývají nenulových hodnot. Tranzistor T_1 se však otevírá rychleji, proto napětí U_{ce1} 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. 10.5 1. Kvazistabilní stav

Obvod se nyní nachází v druhém kvazistabilním stavu, který je na obr. 10.4 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. 10.6).

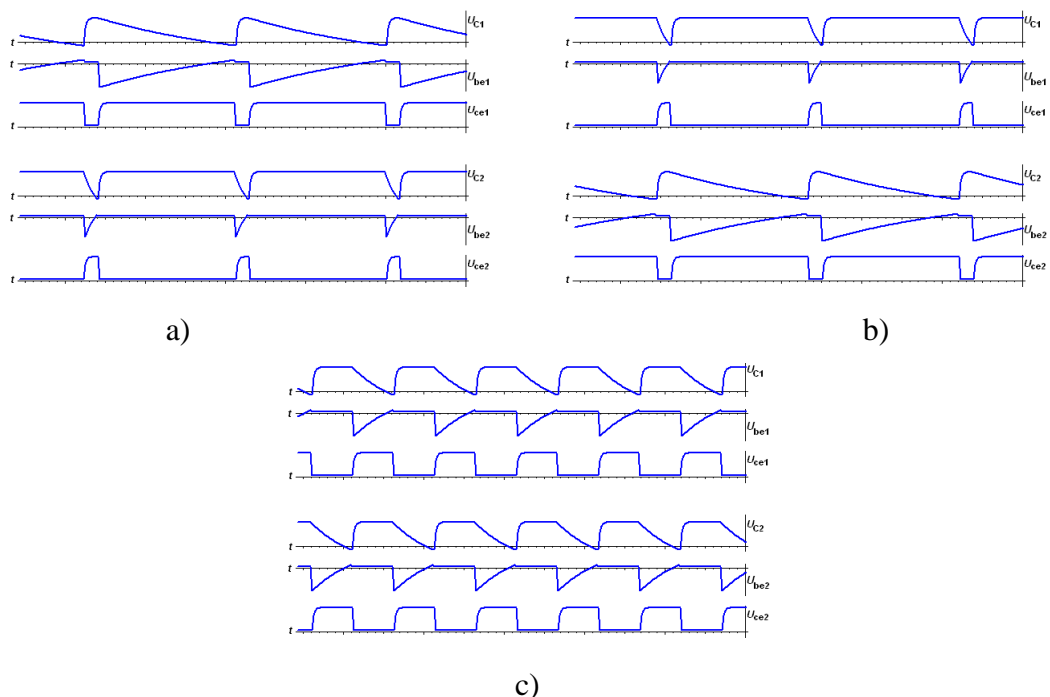


Obr. 10.6 2. kvazistabilní stav

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

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



Obr. 10.7 Průběhy napětí při různých parametrech

4.4 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 vytvoření 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 nabízejí 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*.

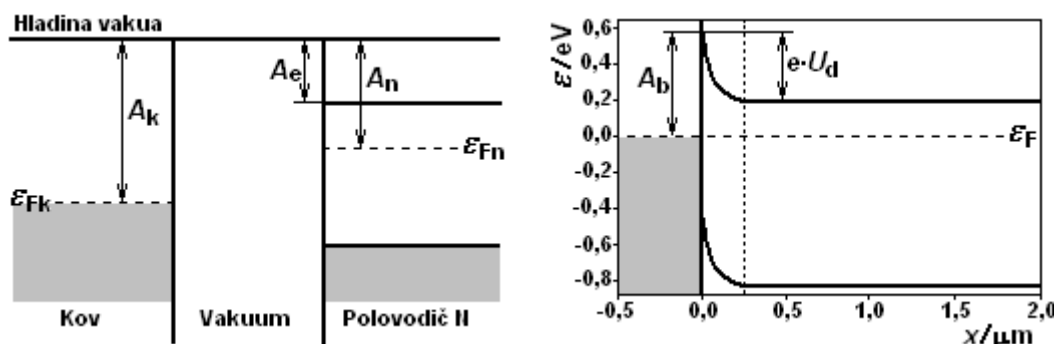
4.1.1 Rozhraní polovodič-kov

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.

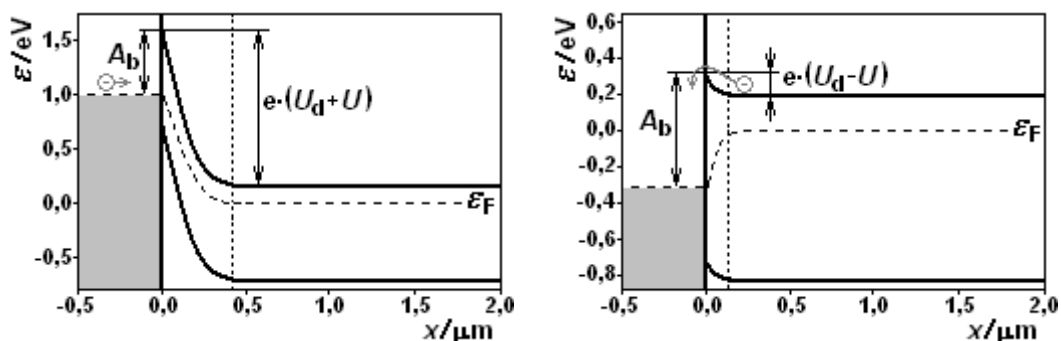
Polovodič N-kov:

Na obr. 11.1 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. 11.1 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. 11.1 vpravo je ohraničena tečkovanou čarou.



Obr. 11.1 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič N [28]

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. 11.2 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. 11.3 Struktura kov-polovodičů při vnějším napětí v závěrném a propustném směru [28]

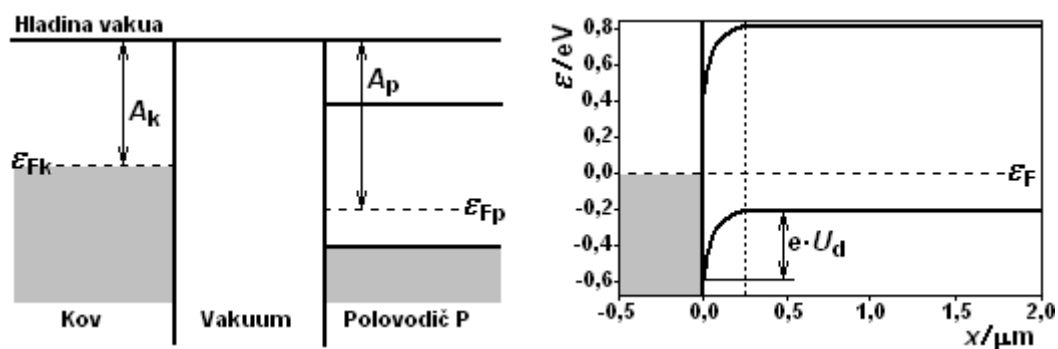
Proudovou hustotu přechodu lze vyjádřit Schottkyho vztahem: $J = J_0 \cdot \left(e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right)$.

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. [18].

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.

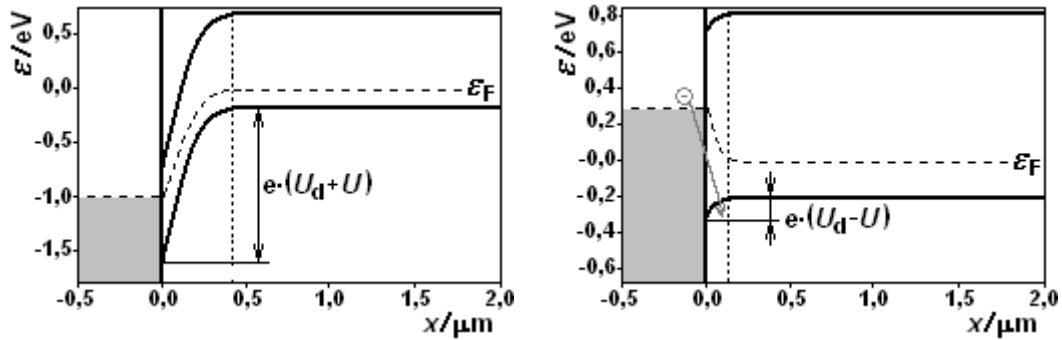
Polovodič P-kov:

Na obr. 11.3 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. 11.3 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. 11.3 vpravo je ohraničena tečkovanou čarou.



Obr. 11.3 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič P [28]

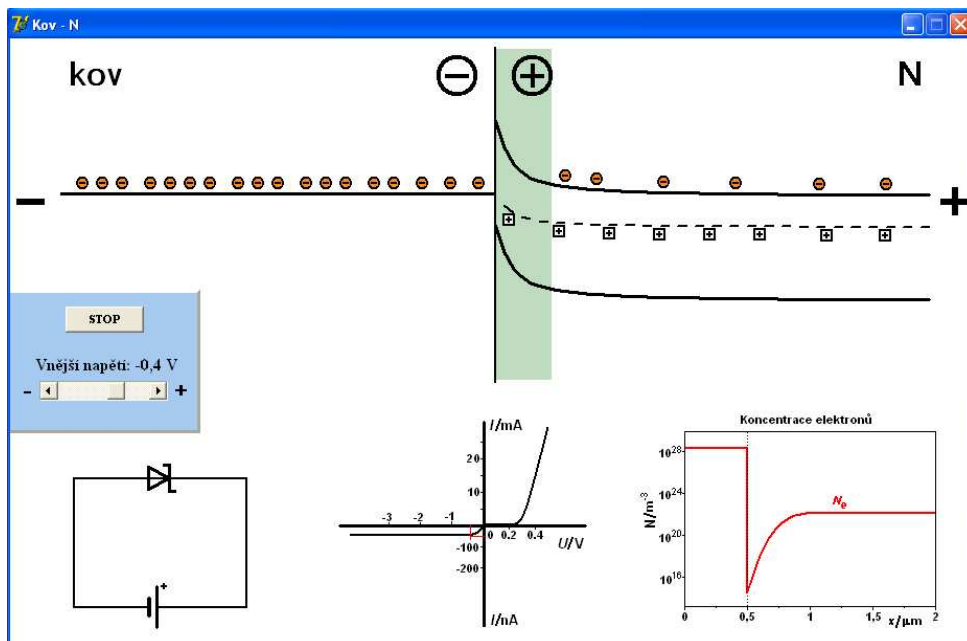
Připojení vnějšího napětí se stejnou polaritou jako napětí difúzní opět způsobuje zvýšení energetické bariéry a rozšíření hradlové vrstvy (obr. 11.4 vlevo). Napětí s opačnou polaritou než napětí difúzní energetickou bariéru snižuje (obr. 11.4 vpravo). Po vyrovnání vnějšího a difúzního napětí díry procházejí 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. 11.4 Struktura kov-polovodič P při vnějším napětím v závěrném a propustném směru [28]

Realizace modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 11.5. 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. 11.5 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:

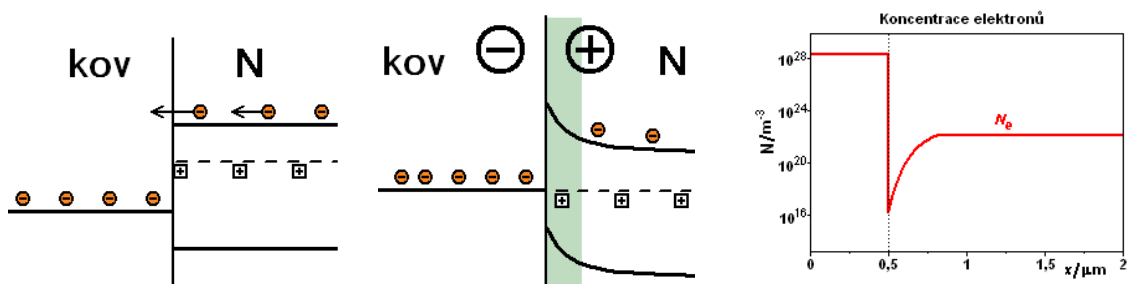
Tato část je vzhledem k analogii a stejnému provedení modelů přechodu kov-polovodič N a kov-polovodič P společná. V případě odlišností je popis modelu kov-polovodič P uveden v závorce.

1. Spuštění souborem „**a-4-1_kov-n.exe**“ („**a-4-2_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 vyrovnání 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 zakřivování 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 vyrovnávání 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:

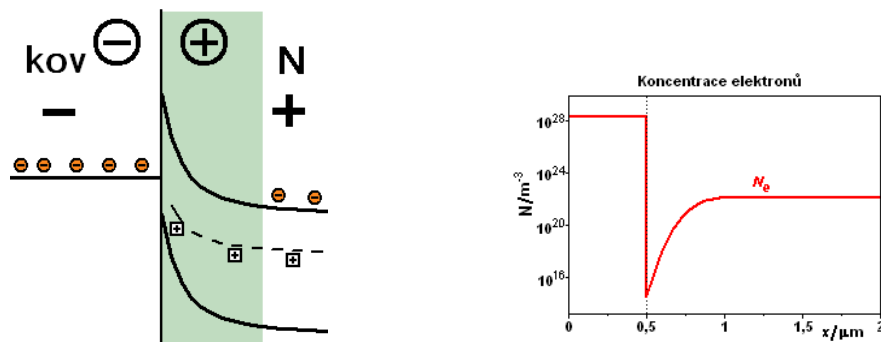
Polovodič N-kov:

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. 11.6 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. 11.6 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. 11.6 vpravo).



Obr. 11.6 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-N

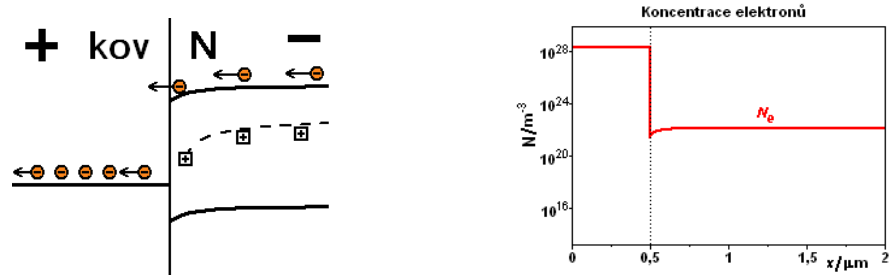
Model dále umožňuje připojení vnějšího napětí pomocí posuvníku. Pokud má napětí stejnou polaritu jako napětí difúzní, dochází ke zvýšení energetické bariéry a rozšíření hradlové vrstvy. V hradlové vrstvě navíc dojde ke snížení koncentrace nositelů náboje (obr. 11.7).



Obr. 11.7 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. 11.8). Ze zdroje jsou dodávány stále nové elektrony, přechodem prochází stálý proud.

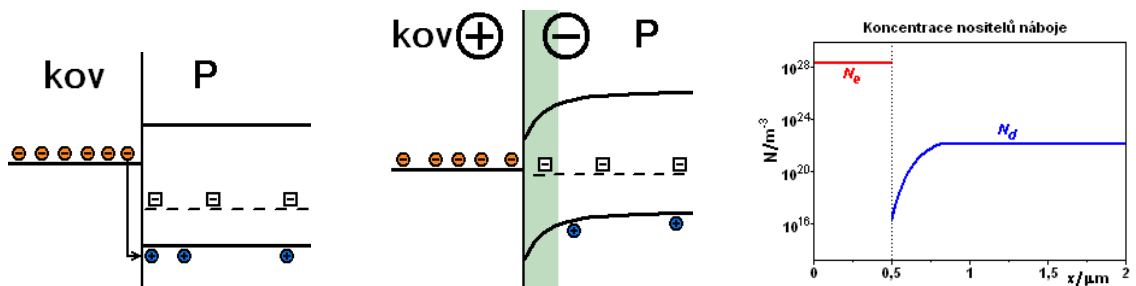
Vzhledem v řádově větší rezistivitě polovodiče než kovu se zakřivení energetických hladin projevuje prakticky pouze v polovodiči, v kovu není patrné.



Obr. 11.8 Připojení vnějšího napětí v propustném směru

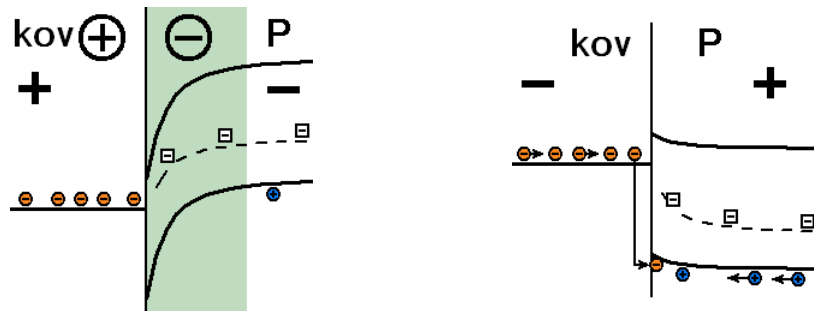
Polovodič P-kov:

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. 11.9 vlevo). Kov se díky odcházejícím elektronům začne nabíjet kladně, polovodiči 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. 11.9 vpravo).



Obr. 11.9 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-P

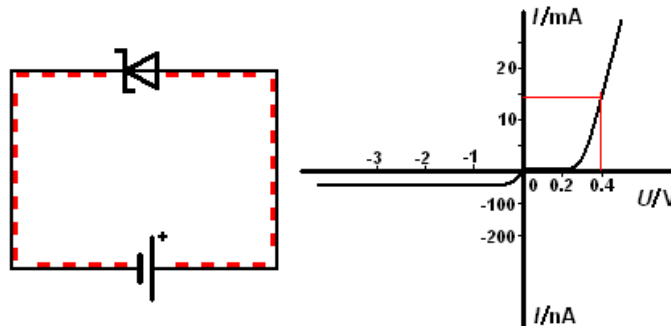
Připojení vnějšího napětí má stejné účinky jako u struktury kov-polovodič N. Napětí se stejnou polaritou jako napětí difúzní způsobuje další zakřivení hladin, úbytek děr a rozšíření hradlové vrstvy (obr. 11.10 vlevo).



Obr. 11.10 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 nabízí volné pozice elektronům z kovu (obr. 11.10 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. 11.11).

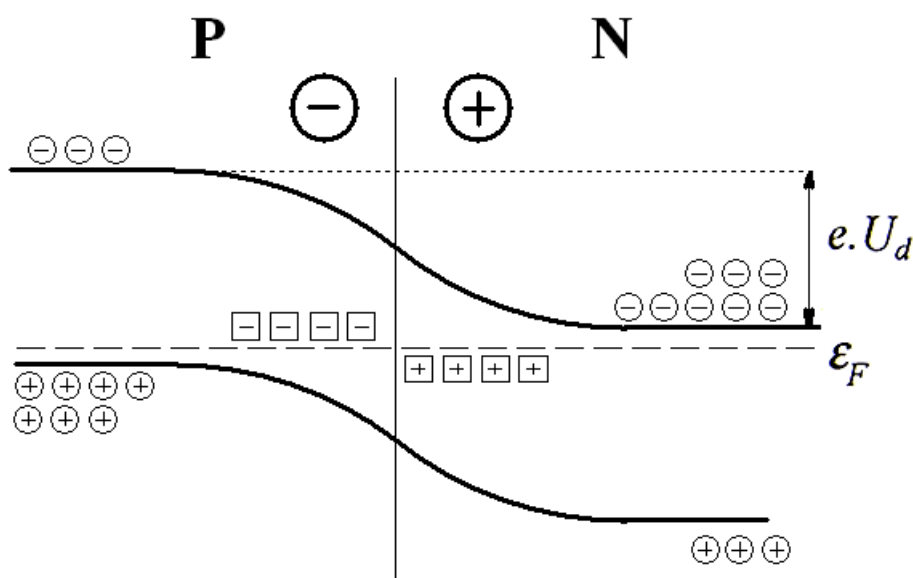


Obr. 11.11 Schottkyho dioda s V-A charakteristikou

4.1.2 P-N přechod

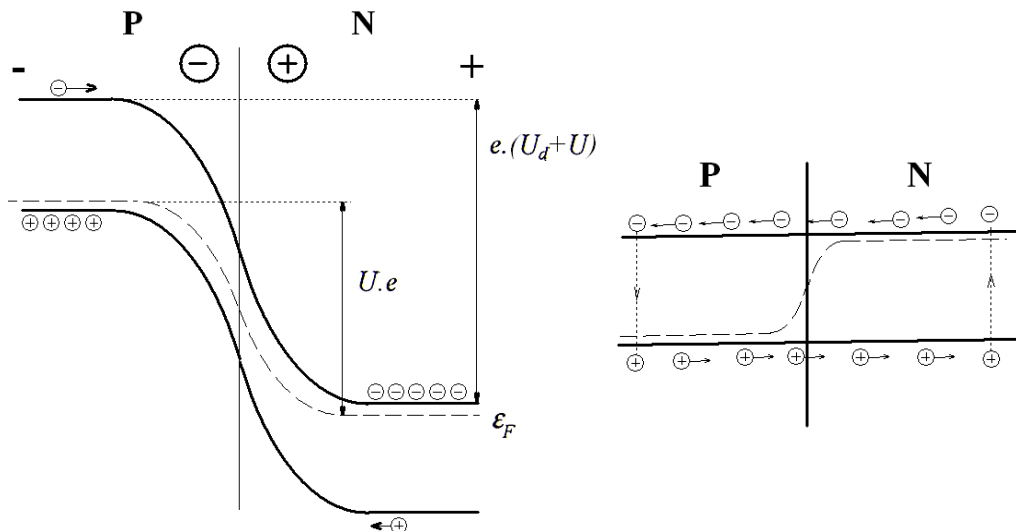
Teorie:

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 zanechávají nevykompenzované ionizované akceptory, elektrony zanechávají nevykompenzované ionizované donory. Tyto nepohyblivé náboje jsou znázorněny čtverečky (obr. 12.1). Vzniká tak nábojová dvojrstva 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. 12.1 Energetické hladiny struktury P-N v rovnovážném stavu bez vnějšího napětí [18]

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. 12.2 vlevo).



Obr. 12.2 Struktura P-N s vnějším napětím v závěrném a propustném směru [18]

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. 12.2 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

$$\text{vztahem: } J = J_0 \cdot \left(e^{\pm \frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad [18]$$

Limitní proudová hustota v závěrném směru lze vyjádřit: $J_0 \approx e^{-\frac{\epsilon_g}{kT}}$ [18],

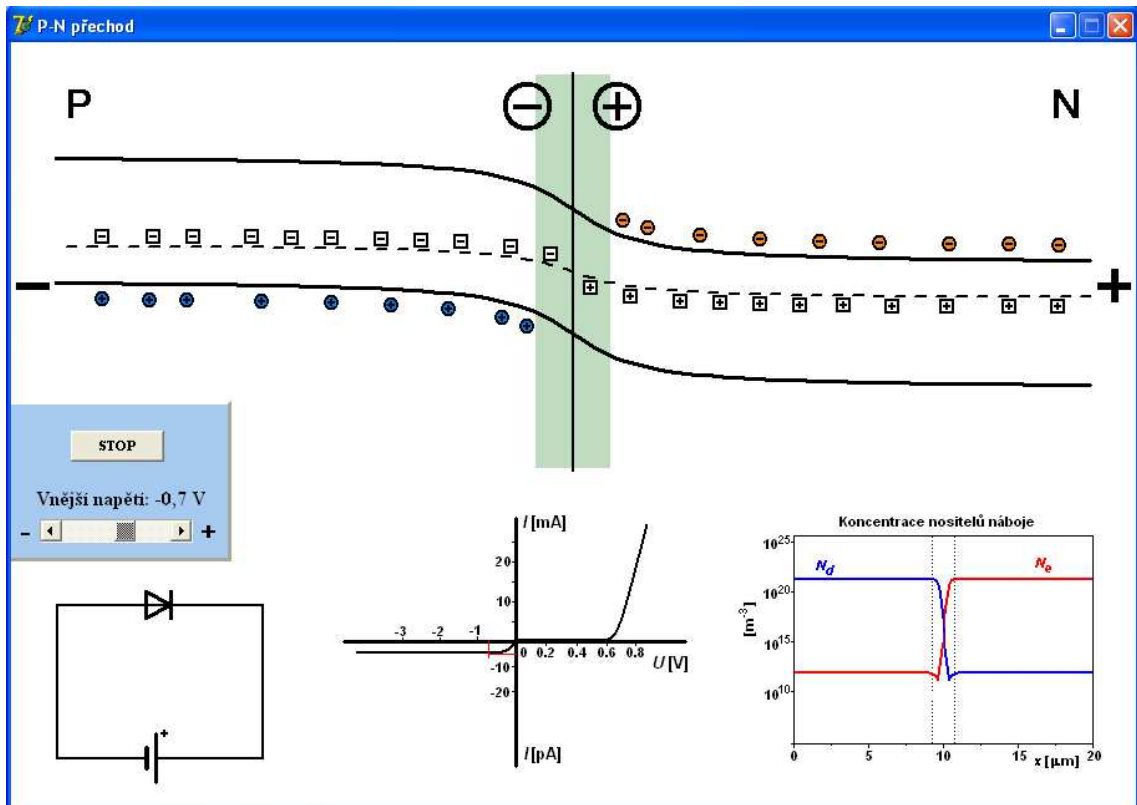
kde ϵ_g je šířka zakázaného pásu.

Realizace modelu:

Celkové provedení programu je patrné z obr. 12.3. Horní polovinu okna zabírá pásový model energetických hladin P-N přechodu. Na ovládacím panelu se nachází tlačítko **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. 12.3 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 využít 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);  
  end
```

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.
```

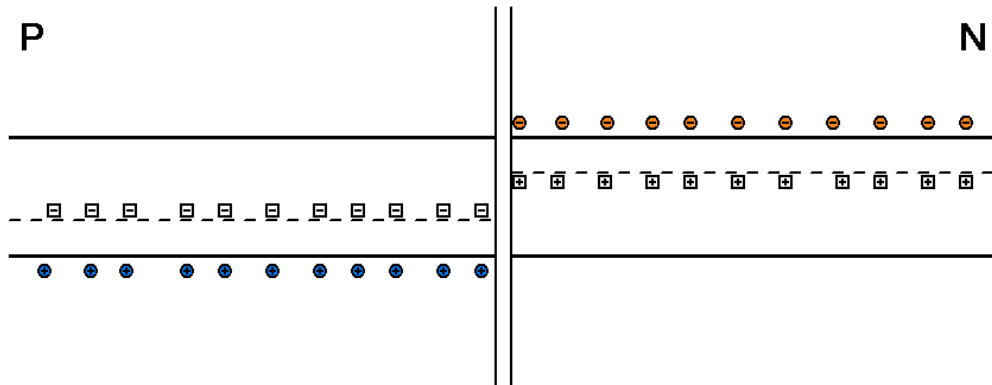
V jakékoli fázi vykonávání programu lze použít tlačítko **STOP**, představující oddělení obou částí. Po jeho stisknutí je nastaven počáteční stav, jako při spuštění programu.

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-4-3_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 vyrovnání 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 vyrovnávání 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.

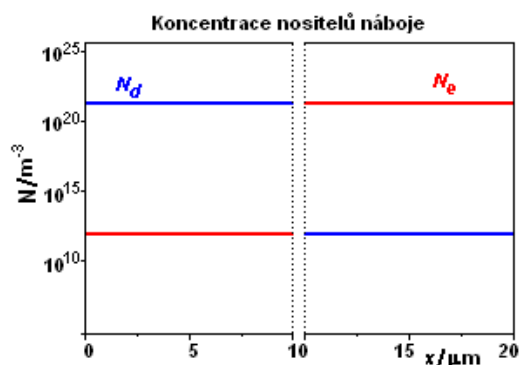
Výklad:

Po spuštění jsou v okně programu zobrazeny dva oddělené polovodiče (obr. 12.4). Polovodič typu **P** obsahuje příměsi s volnými elektronovými pozicemi energeticky blízkými valenčnímu pásu. Elektrony valenčního pásu proto mohou snadno přeskocit 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 přeskocit. 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.



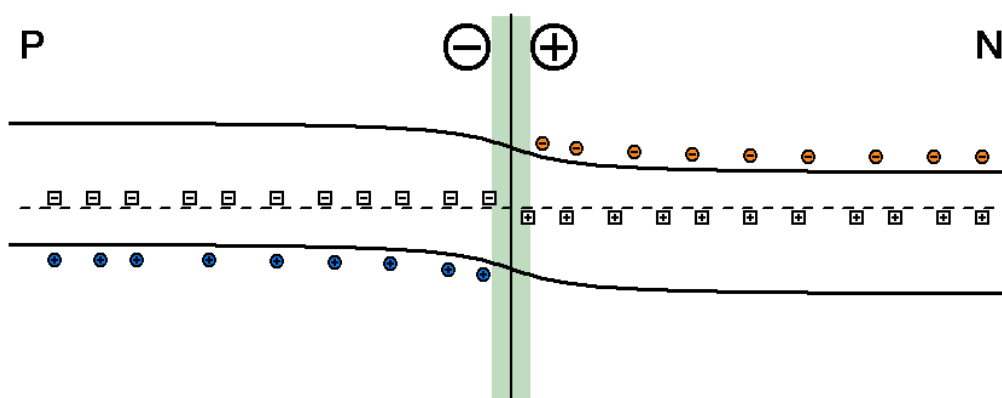
Obr. 12.4 Oddělené části polovodič **P**, polovodič **N**

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. 12.5). Protože minoritní nositelé náboje nehrají v tomto případě tak důležitou roli, jsou v animaci znázorněni pouze nositelé majoritní (obr. 12.4).



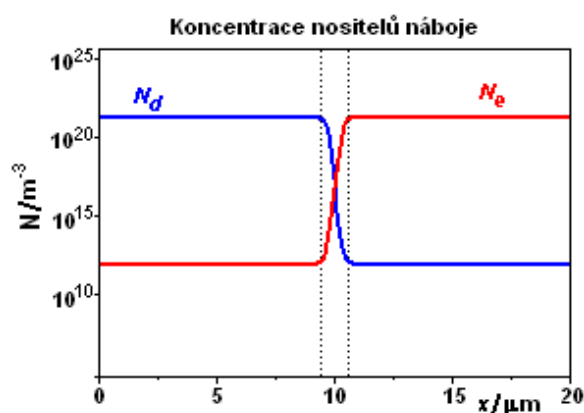
Obr. 12.5 Koncentrace nositelů náboje v oddělených částech **P** a **N**

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. 12.6 je znázorněna zeleně). Takto již vypadá i skutečná situace na P-N přechodu, pokud neuvažujeme původně rozdělené oblasti P a N.



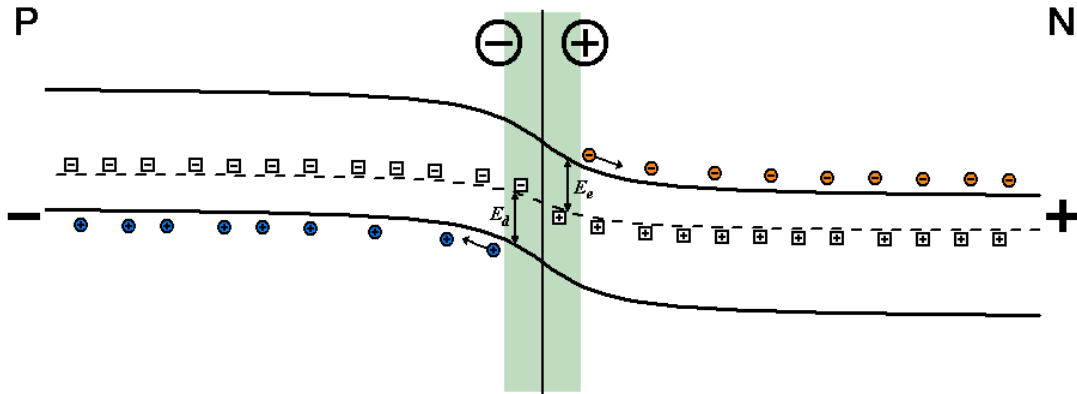
Obr. 12.6 Rovnovážný stav po spojení částí P a N

Koncentrace nositelů náboje je znázorněna v grafu na obr. 12.7. Tlačítkem **STOP** lze oba polovodiče od sebe oddělit a po jejich spojení opět sledovat difúzi a změny energetických hladin.



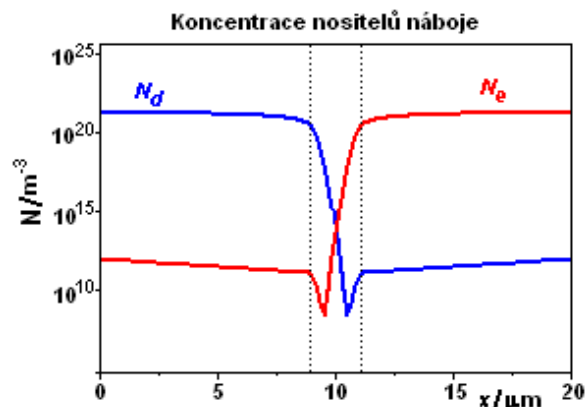
Obr. 12.7 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu

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



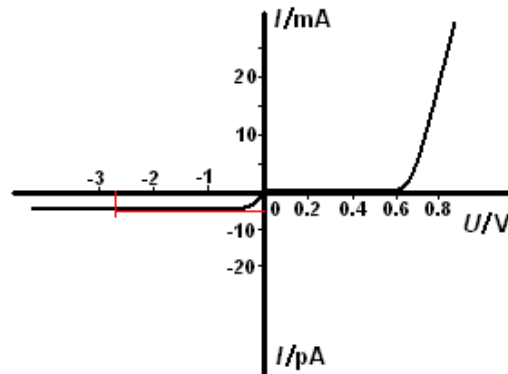
Obr. 12.8 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v závěrném směru

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. 12.8). Zároveň se zvyšuje energie E_c , 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. 12.9). 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.



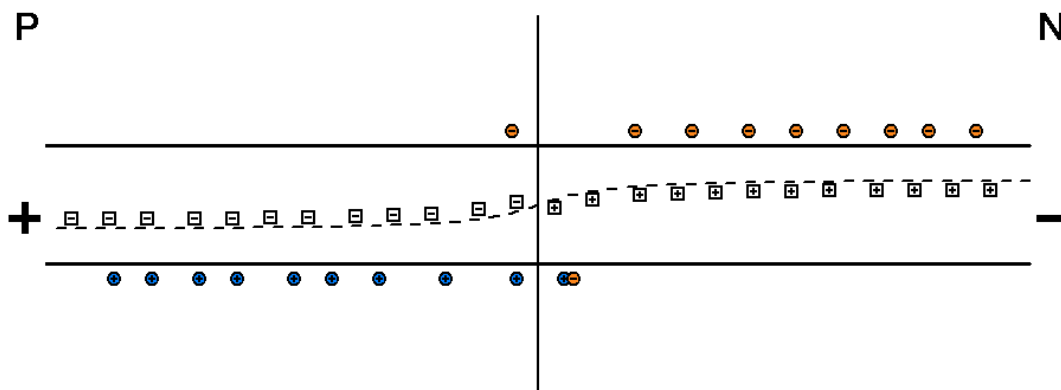
Obr. 12.9 Koncentrace nositelů náboje při závěrném napětí na P-N přechodu

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. 12.10). Jeho velikost jsou řádově pikoampéry, je téměř zanedbatelný.

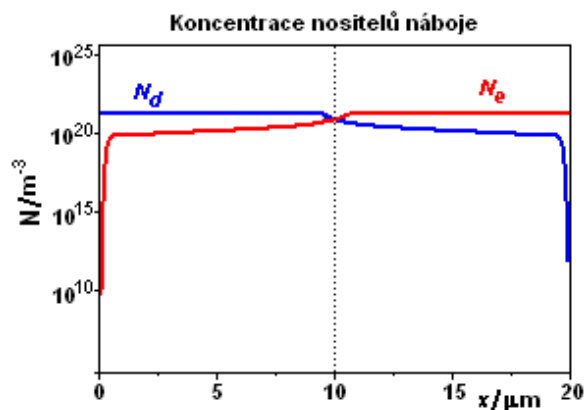


Obr. 12.10 V-A charakteristika P-N přechodu – závěrný proud

Pokud je připojeno napětí opačné polarity, 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. 12.11). Přechodem prochází proud. Zvýšená koncentrace elektronů v oblasti P a děr v oblasti N je patrná i z grafu na obr. 12.12.

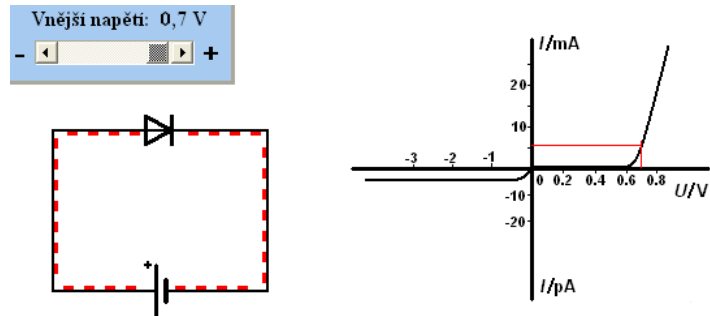


Obr. 12.11 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v propustném směru



Obr. 12.12 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. 12.13).



Obr. 12.13 Usměrňovací dioda s V-A charakteristikou

4.1.3 Zenerův jev

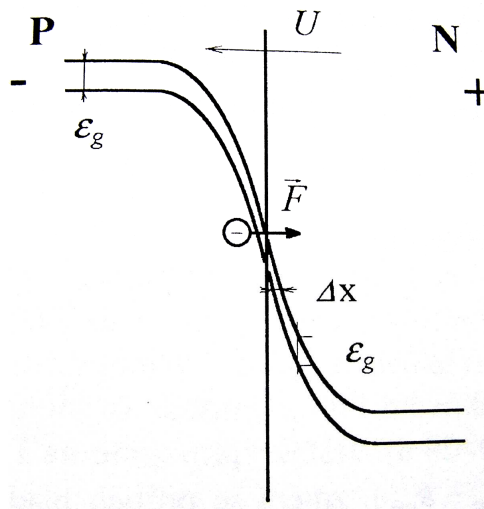
Teorie:

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.[18]

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. 13.1).

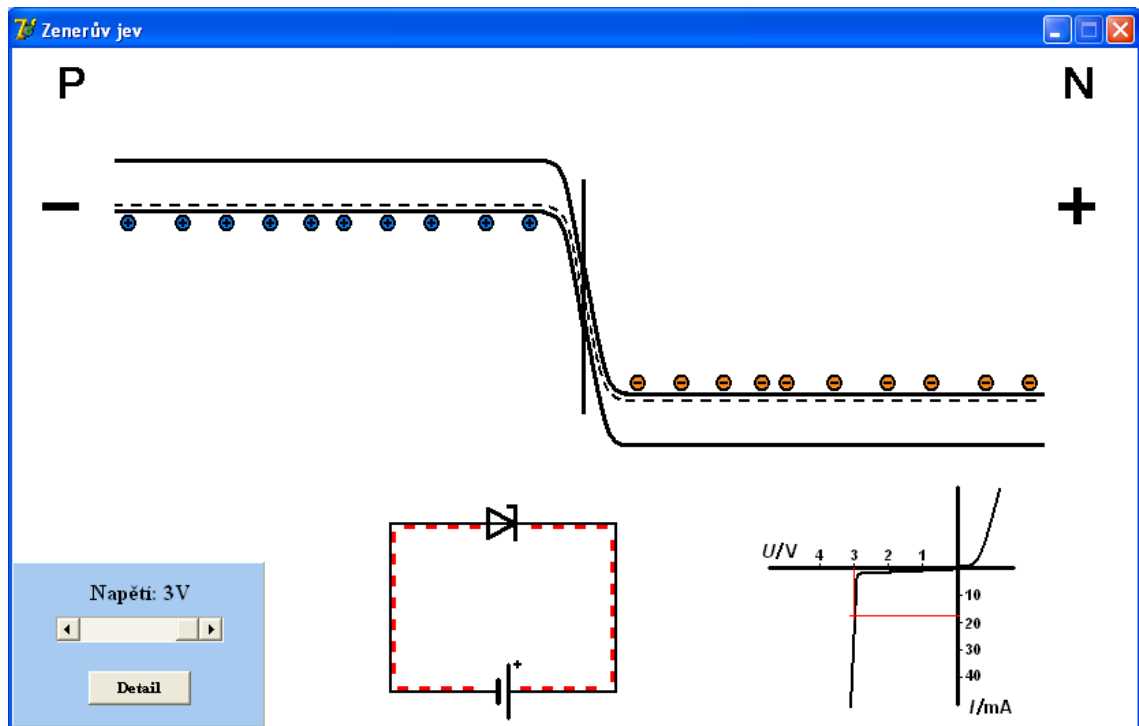


Obr. 13.1 Princip Zenerova jevu [18]

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 modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 13.2. 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. 13.2 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;
```

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

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „a-4-4_zeneruv_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**.

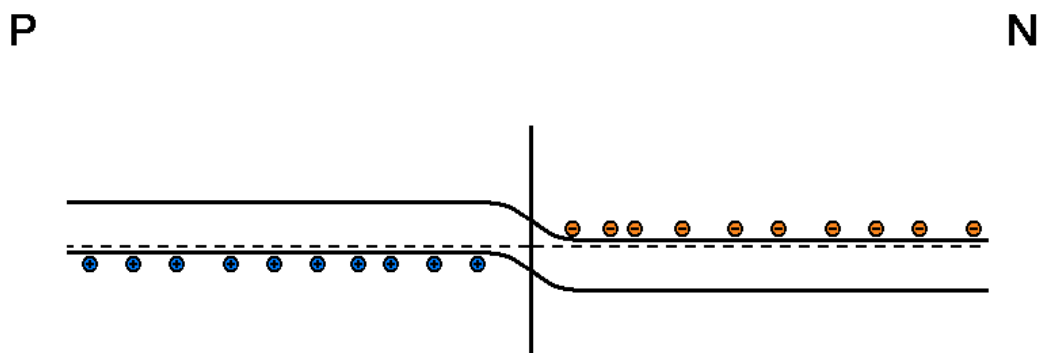
Dojde k dalšímu zakřivení energetických hladin. Zakázaný pás je dostatečně tenký pro tunelování elektronů. Přechodem protéká proud, znázorněný i ve V-A charakteristice a v obvodu pohybujícími se čárkovanými čárkami. Nyní je k dispozici tlačítko **Detail** .

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.

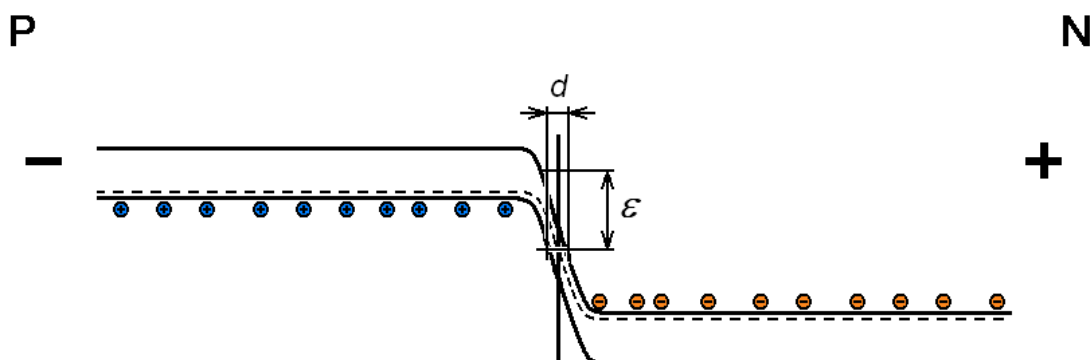
Výklad:

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. 13.3). Pro zjednodušení zde nejsou zobrazeni minoritní nositelé, ani ionty příměsí.



Obr. 13.3 P-N přechod bez připojení vnějšího napětí

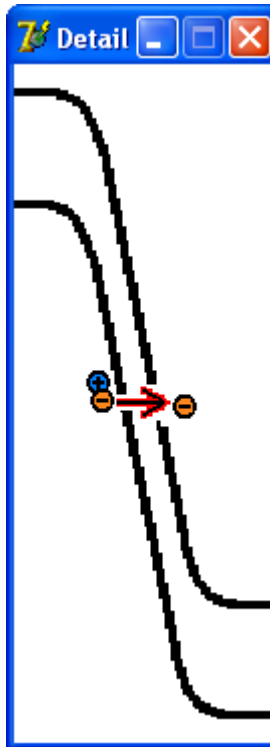
Pomocí posuvníku lze na P-N přechod připojit vnější napětí. Pokud bychom připojili napětí v propustném směru, choval by se stejně jako model „1_P-N“. Propustný směr je však pro vysvětlení Zenerova jevu nepodstatný, proto je možné nastavovat pouze napětí v závěrném směru. Při jeho zvyšování dochází ke zvyšování energetické bariéry ϵ , zároveň se ale zmenšuje šířka zakázaného pásu d (obr. 13.4).



Obr. 13.4 P-N přechod po připojení vnějšího napětí v závěrném směru

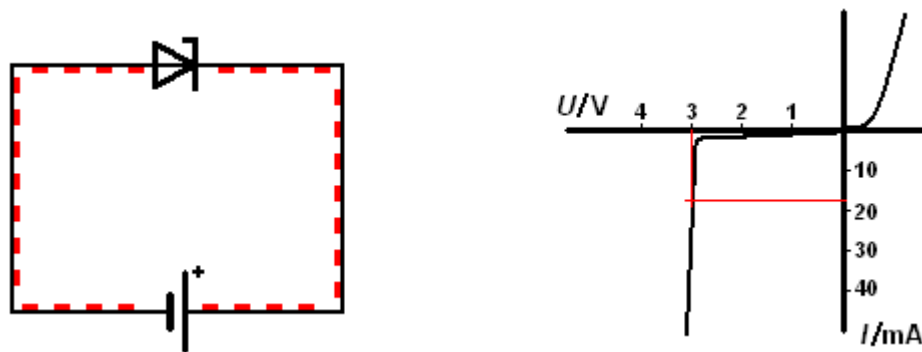
Při určité hodnotě, která se nazývá průrazné napětí (v našem případě 3V), je šířka zakázaného pásu dostatečně malá, aby elektron mohl překonat tuto energetickou bariéru a přeskočit z valenčního pásu oblasti P do vodivostního pásu oblasti N. Zde se již účastní vedení proudu, putováním ke kladnému pólu 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. 13.5). 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. 13.5 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. 13.6).



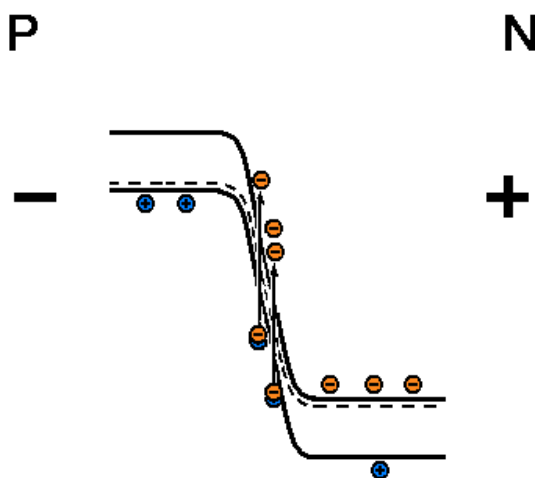
Obr. 13.6 Stabilizační dioda s V-A charakteristikou

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.

4.1.4 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. 14.1). 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. 14.1 *Princip lavinového jevu*

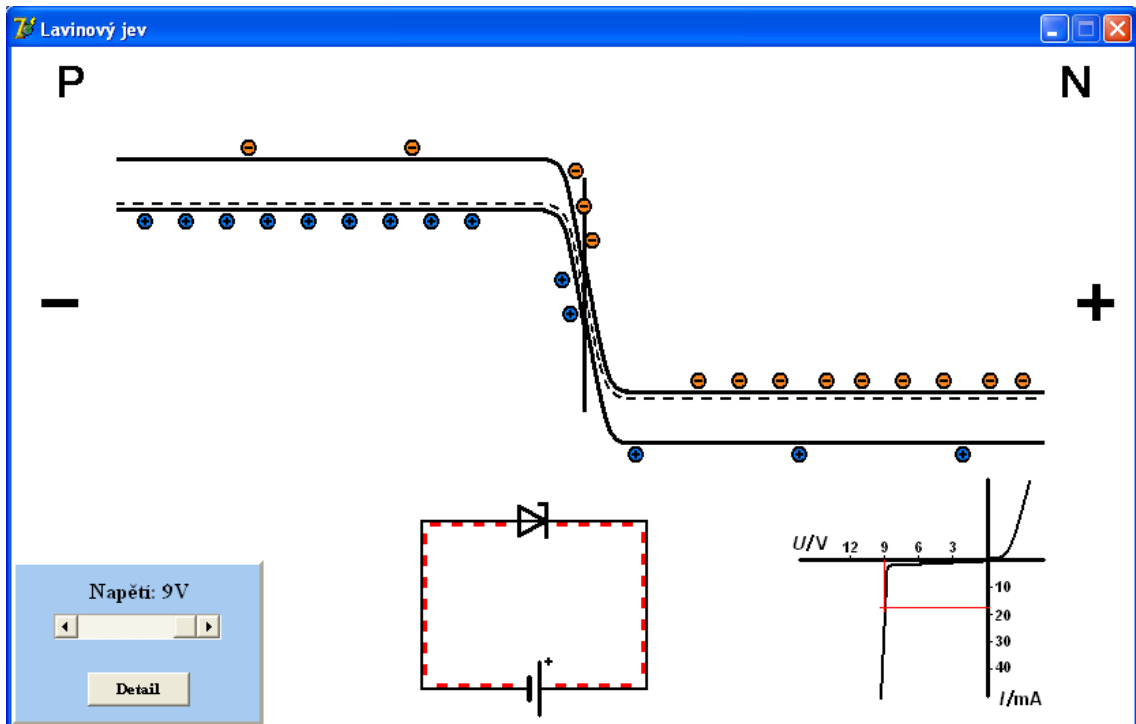
Lavinového jevu se využívá v Zenerových (stabilizačních) diodách s průrazným napětím vyšším než 6V. Při nižším napětí totiž dochází s větší pravděpodobností k Zenerovu jevu.

Realizace modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 14.2. 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. 14.2 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 přeskočení 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 „a-4-5_lavinovy_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**.

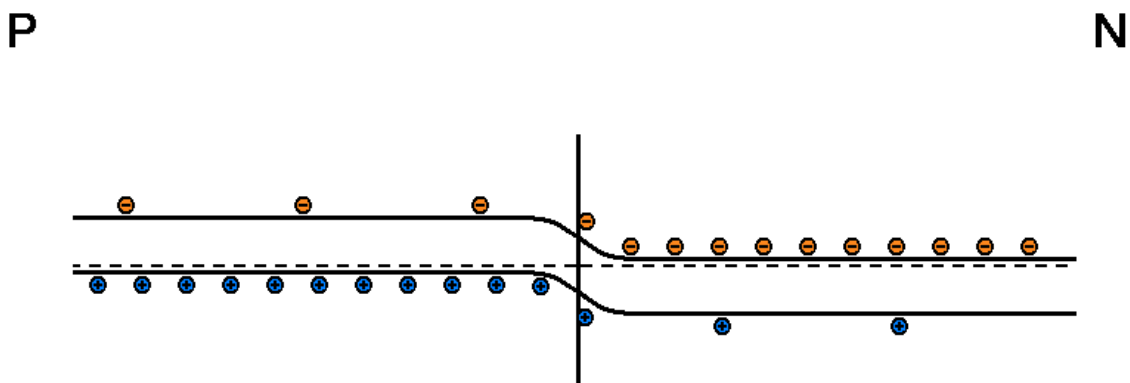
Dojde k dalšímu zakřivení energetických hladin. Elektrony (jejichž pohyblivost je větší než u děr) jsou v blízkosti rozhraní P-N urychlovány natolik, že mohou při nárazu do krystalové mřížky vyrazit další elektron z valenčního do vodivostního pásu. Přechodem protéká proud, znázorněný i ve V-A charakteristice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

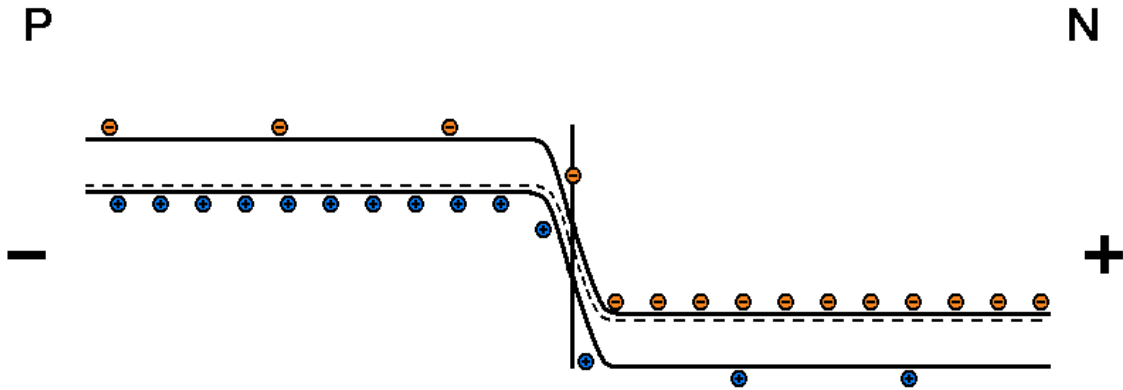
Výklad:

Po spuštění se otevře okno, kde je znázorněno pásové schéma energetických hladin P-N přechodu v rovnovážném stavu (obr. 14.3). 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.



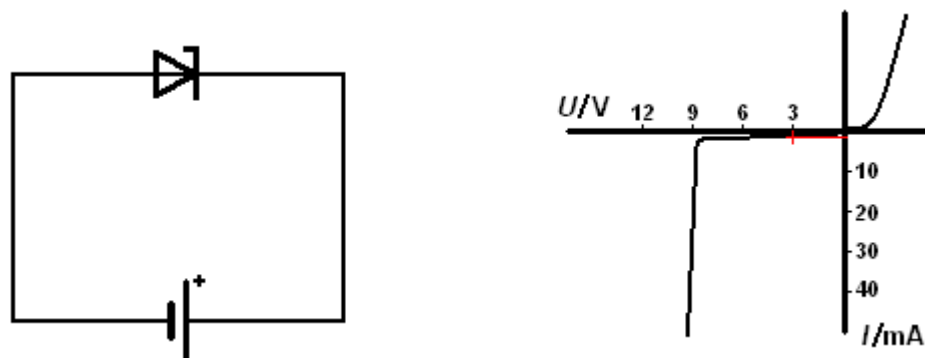
Obr. 14.3 P-N přechod bez vnějšího napětí, zobrazeny jsou i minoritní nositelé

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. 14.4).



Obr. 14.4 P-N přechod se závěrným napětím, přechodem procházejí minoritní nositelé

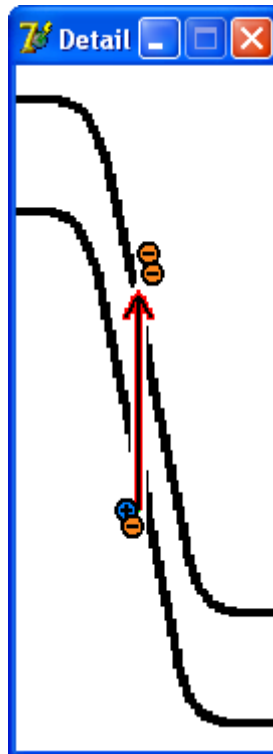
Pokud je hodnota vnějšího napětí nenulová, začnou přechodem procházet minoritní nositelé. Zde dochází ke zkreslení. Z modelu by se dalo soudit, že přechodem prochází proud. Avšak vzhledem k tomu, že minoritních nositelů je o několik řádů méně, je tento proud téměř nulový (řádově pikoampéry). Tuto skutečnost znázorňuje V-A charakteristika a obvod, kterým neprochází proud v podobě čárkovaných čárek (obr. 14.5).



Obr. 14.5 Při menším napětí než je napětí průrazné, stabilizační diodou téměř neprochází proud

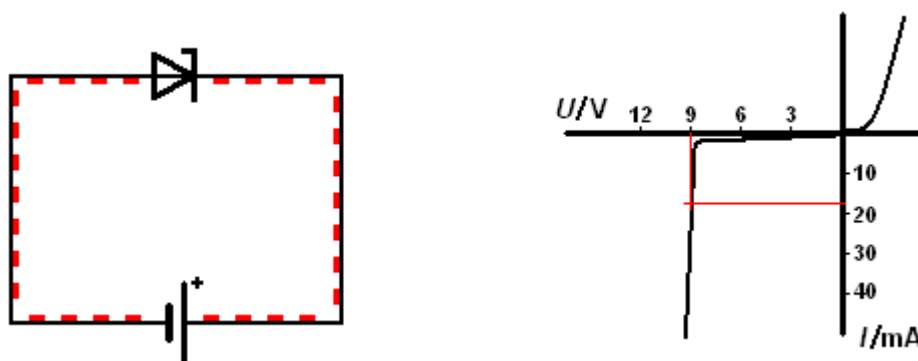
Hradlová vrstva má proti zbytku polovodiče podstatně větší odpor, proto se na něm rozloží většina napětí. V této úzké oblasti proto vzniká silné elektrické pole, které urychluje procházející minoritní nositele. Při určité hodnotě, které se nazývá průrazné napětí, (v našem případě 9 V), jsou elektrony 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 zpomalně. Je zde dobře vidět, že elektrony přeskakují z valenčního do vodivostního pásu ve svislém směru (obr. 14.6). 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. 14.6 *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. 14.7).



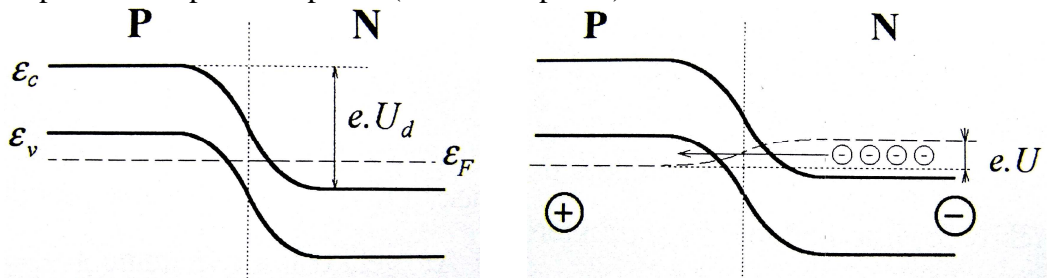
Obr. 14.7 *Stabilizační dioda s V-A charakteristikou po dosažení průrazného napětí*

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

4.1.5 Tunelový jev v propustném směru

Teorie:

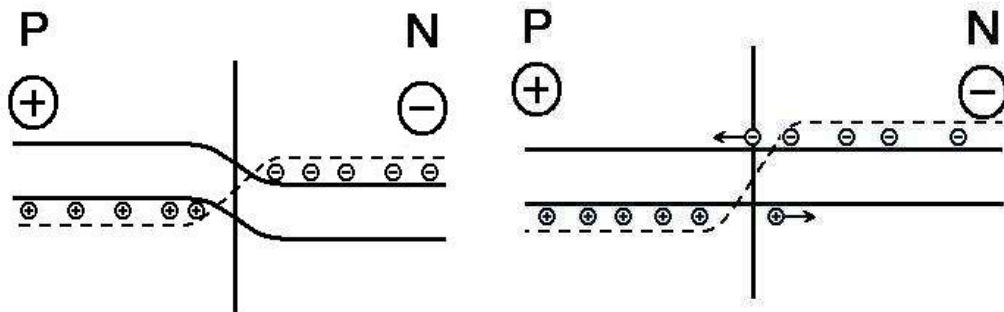
K tomuto jevu dochází v silně dotovaných polovodičích, kde Fermiho energetická hladina přechází u polovodiče typu P do valenčního pásu a u polovodiče typu N do pásu vodivostního (obr. 15.1 vlevo). Vysoká koncentrace elektronů a děr má dále za následek velmi malou šířku ochuzené vrstvy. Přes tak úzkou potenciálovou bariéru mohou elektrony snadno tunelovat. Po připojení malého napětí v propustném směru začne přechodem proházet proud (obr. 15.1 vpravo).



Obr. 15.1 Silně dotovaný P-N přechod a připojení malého napětí v propustném směru [18]

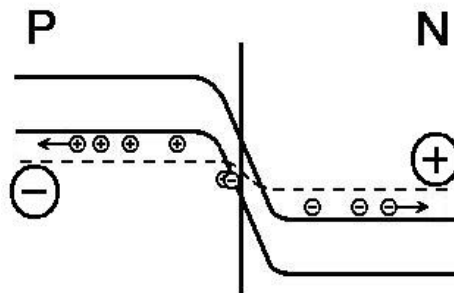
S rostoucím napětím se zvětšuje šířka zakázaného pásu, čímž se zhoršují podmínky pro tunelování. V okamžiku vyrovnání horní hranice valenčního pásu ϵ_v polovodiče P s dolní hranicí vodivostního pásu ϵ_c polovodiče N klesá pohyb nositelů náboje na minimum (obr. 15.2 vlevo).

Při dalším zvyšování napětí se tunelová dioda chová jako běžná usměrňovací dioda. Po dosažení difúzního napětí mizí energetická bariéra a proud začne narůstat (obr. 15.2 vpravo).



Obr. 15.2 Zvyšování napětí v propustném směru

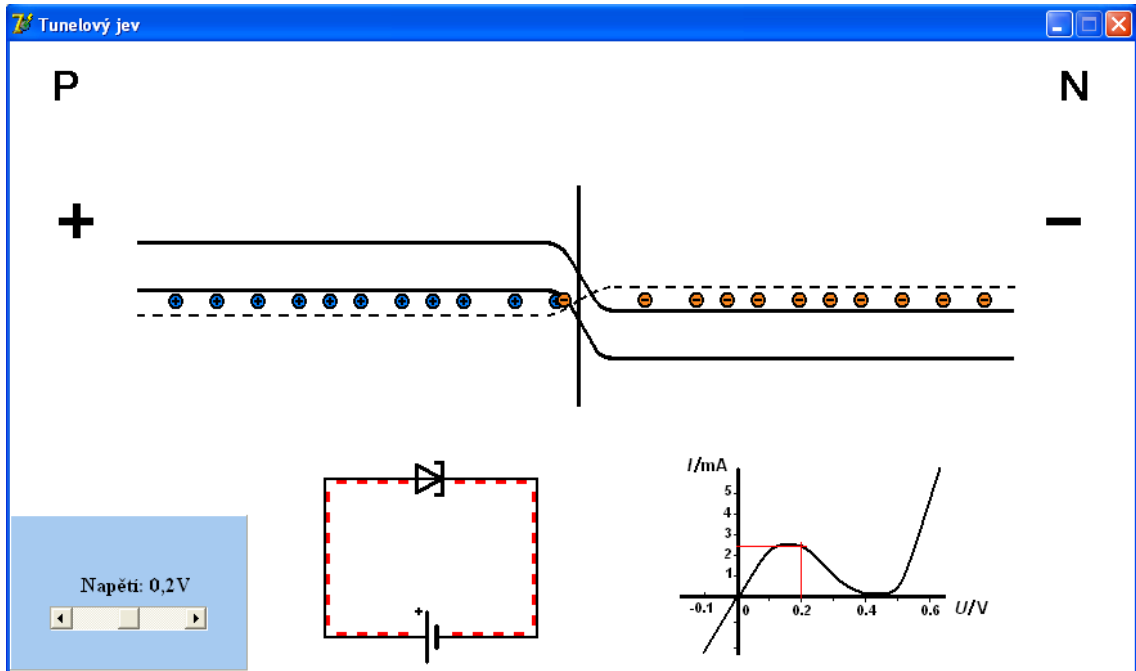
V závěrném směru jsou splněny podmínky pro tunelování, proto dochází k okamžitému nárůstu proudu (obr. 15.3).



Obr. 15.3 Připojení napětí v závěrném směru

Realizace modelu:

Provedení modelu je stejné jako u předchozích (obr. 15.4). 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. 15.4 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 „a-4-6_tunelovy_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.

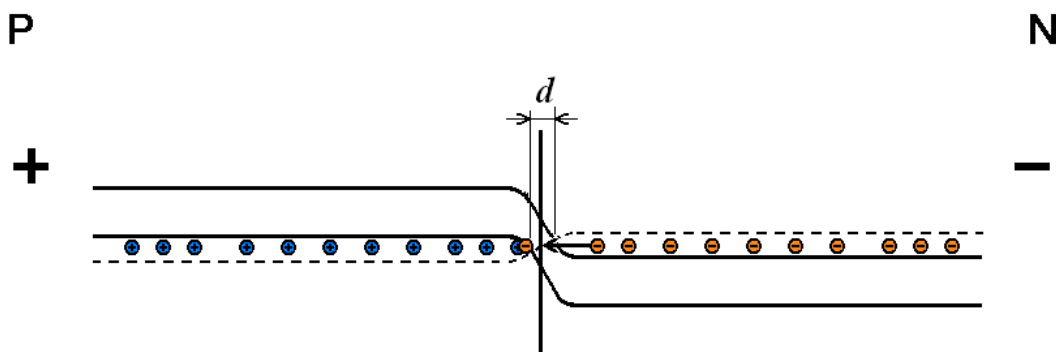
5. Nastavení vnějšího **napětí: 0 V**.

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.

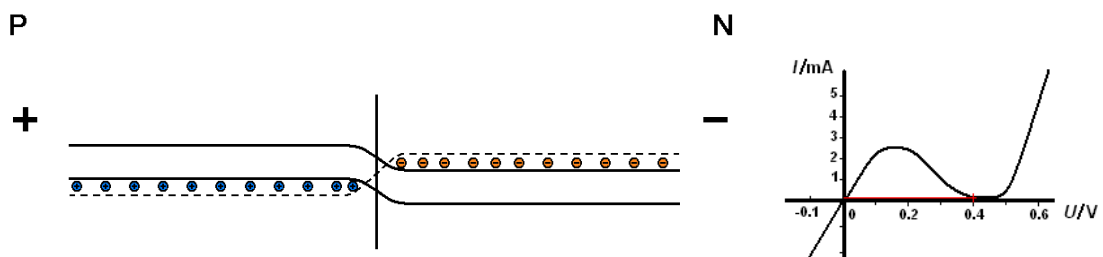
Výklad:

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. 15.5). 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.



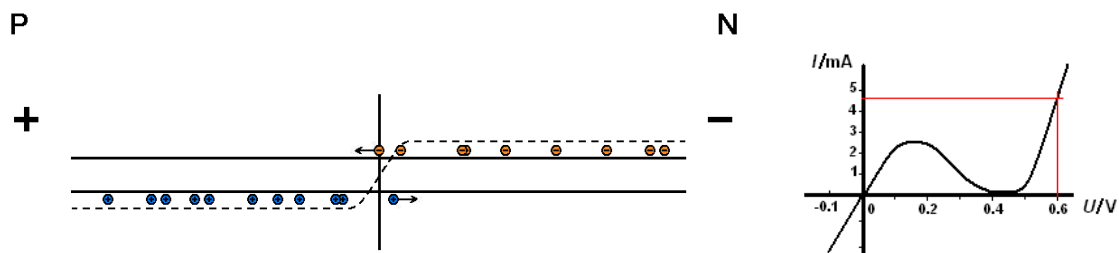
Obr. 15.5 Tunelování elektronů po připojení malého napětí v propustném směru

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. 15.6).



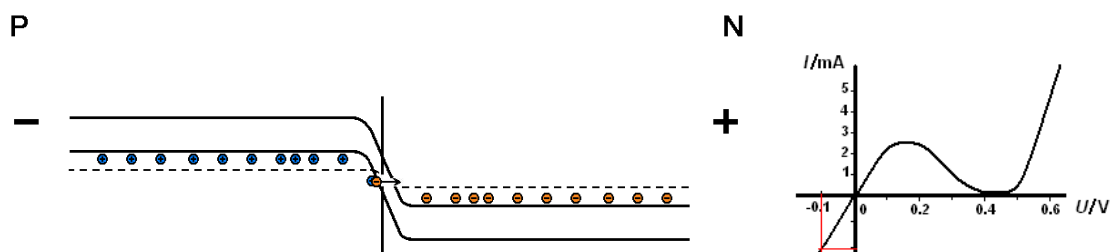
Obr. 15.6 Zvýšení napětí v propustném směru

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. 15.7). Nyní se již tunelová dioda chová jako běžná usměrňovací dioda u níž bylo překročeno difúzní napětí a dochází k rychlému nárůstu proudu.



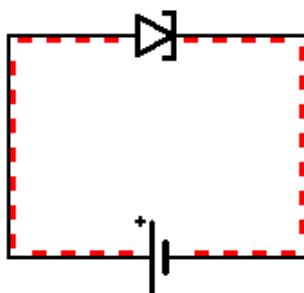
Obr. 15.7 Při dalším zvýšení napětí se struktura chová jako standardní P-N přechod

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. 15.8). 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. 15.8 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. 15.9).

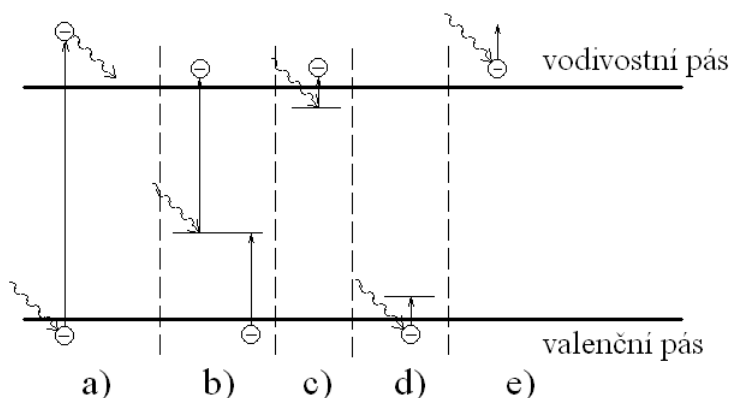


Obr. 15.9 Tunelová dioda připojená ke zdroji napětí

4.1.6 Fotoelektrické jevy

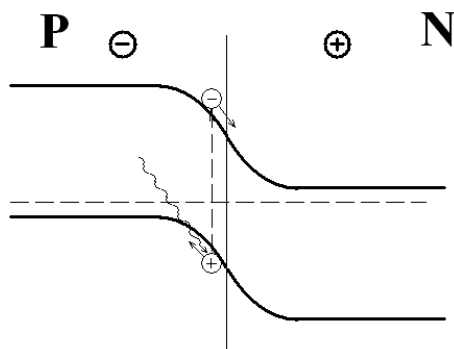
Teorie:

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. 16.1 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. 16.1 b). Opět dostáváme dvojici nositelů náboje. Další možností je pohlcení fotonu elektronem příměsi, nacházející se v blízkosti vodivostního pásu (obr. 16.1 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. 16.1 d). Tímto způsobem se zvyšuje koncentrace děr. Může dojít i k excitaci elektronu vodivostního pásu na některou vyšší pozici vodivostního pásu (obr. 16.1 e). Tímto způsobem se však koncentrace nositelů náboje nemění.



Obr. 16.1 Různé druhy excitace [18]

Pokud k těmto jevům dochází v hradlové vrstvě P-N přechodu, nově vzniklé nositelé putují díky difúznímu napětí do energeticky výhodnějších míst. Elektrony do části N a díry do části P (obr. 16.2). 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.

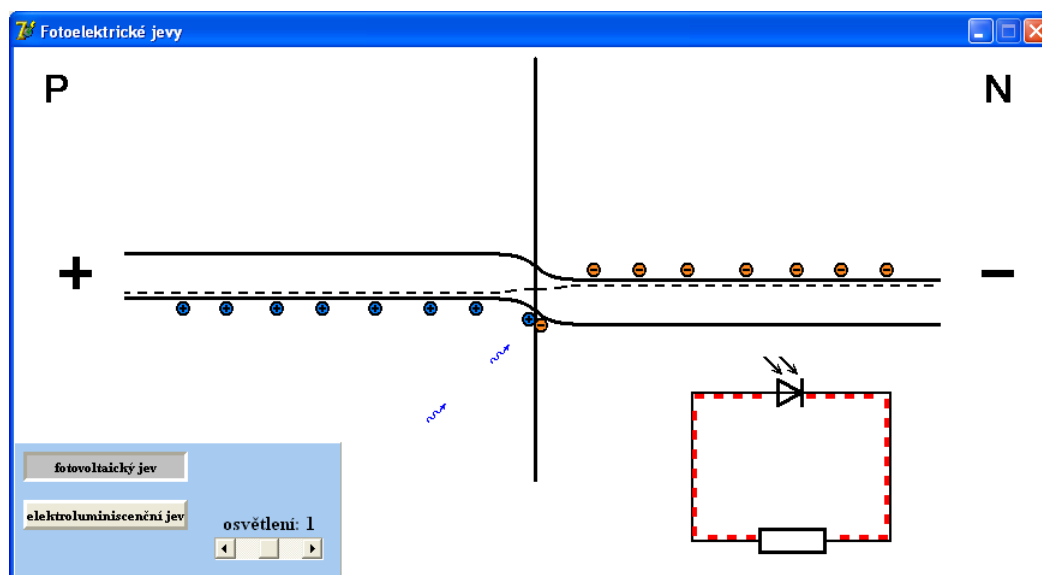


Obr. 16.2 Princip fotovoltaického jevu [18]

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 modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 16.3. 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. 16.3 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;

```

```

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 fotovoltaického 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.

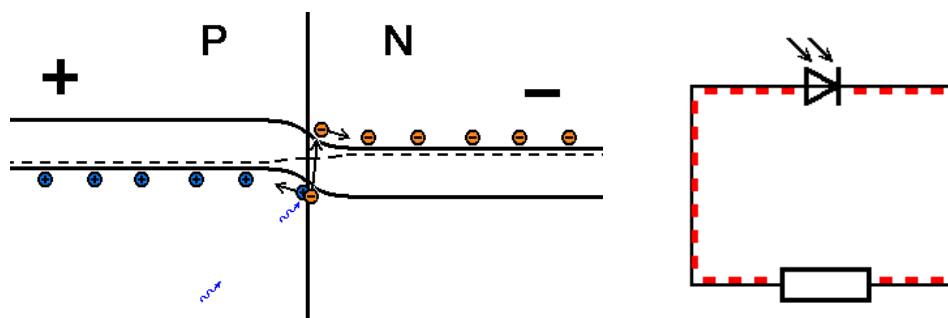
```

Metodický návod:

1. Spuštění souborem „**a-4-7_fotoelektricke_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:

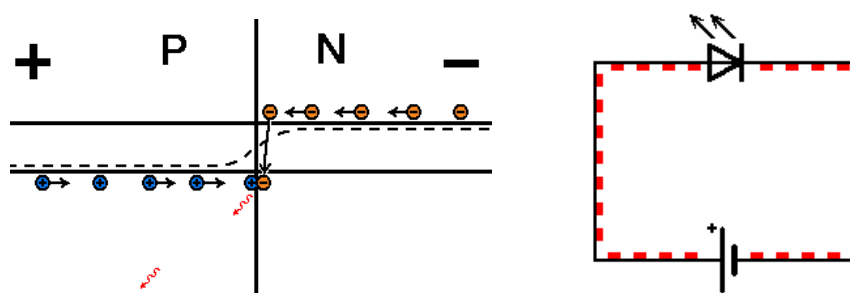
Po spuštění se otevře okno s pásovým znázorněním energetických hladin. Model se nachází v režimu: **fotovoltaický jev**. Na P-N přechod nedopadá světlo (osvětlení: 0), přechod se nachází v rovnovážném stavu s vyrovanými Fermiho hladinami. Pokud na přechod dopadají fotony (**osvětlení: 1**), začnou vznikat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



Obr. 16.4 Fotovoltaický jev

Po připojení zátěže začne obvodem protékat proud (obr. 16.4). Při zvýšení osvětlení (**osvětlení: 2**) způsobuje větší množství dopadajících fotonů vznik větší 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 vyrovanými 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. 16.5). 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.



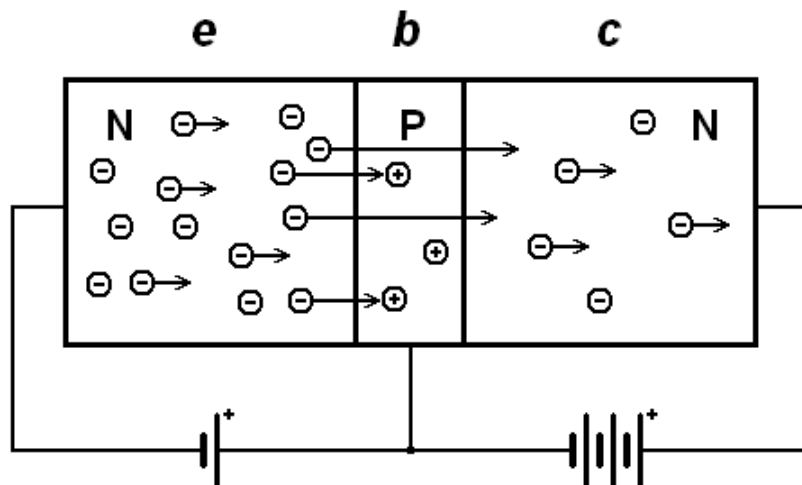
Obr. 16.5 Elektrolumiscenční jev

4.1.7 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. 17.1). 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. 17.1 Princip tranzistorového jevu

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

$$I_c \approx I_e = I_0 \cdot \left(e^{\frac{eU_{be}}{kT}} - 1 \right), [28]$$

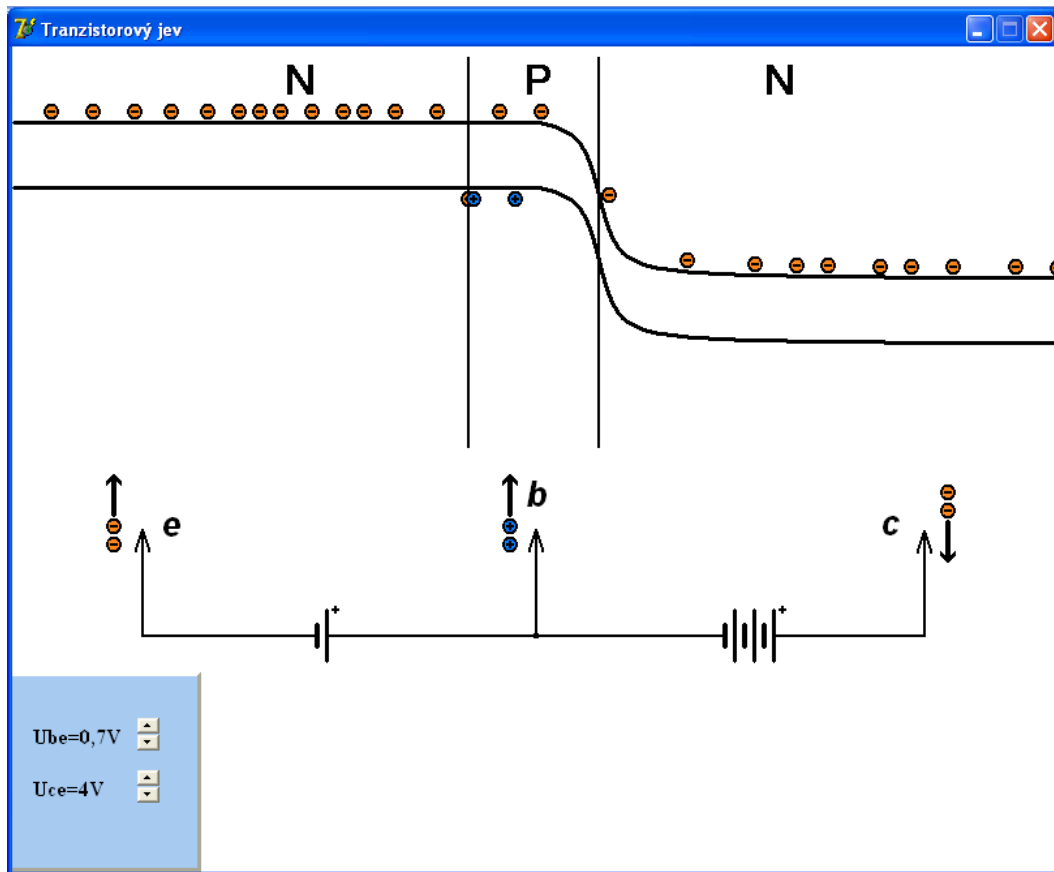
kde e je elementární náboj, k Boltzmannova konstanta, T termodynamická teplota, U_{be} napětí báze-emitor, I_c kolektorový proud, I_e emitorový proud, I_0 limitní proud přechodu báze –emitor v závěrném směru.

Realizace modelu:

Provedení modelu je patrné z obr. 17.2. 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. 17.2 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:

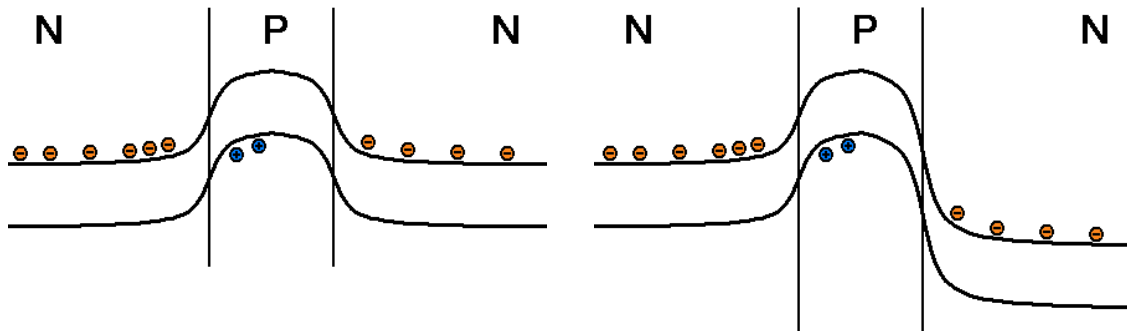
```
if (a1<7)or(a2=0) then begin  
if (fimages[20].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[21].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[22].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[24].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[24].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[25].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[26].top>FPoints3[High(FPoints3)].Y-23)and  
  (fimages[28].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 „a-4-8_tranzistorovy_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.

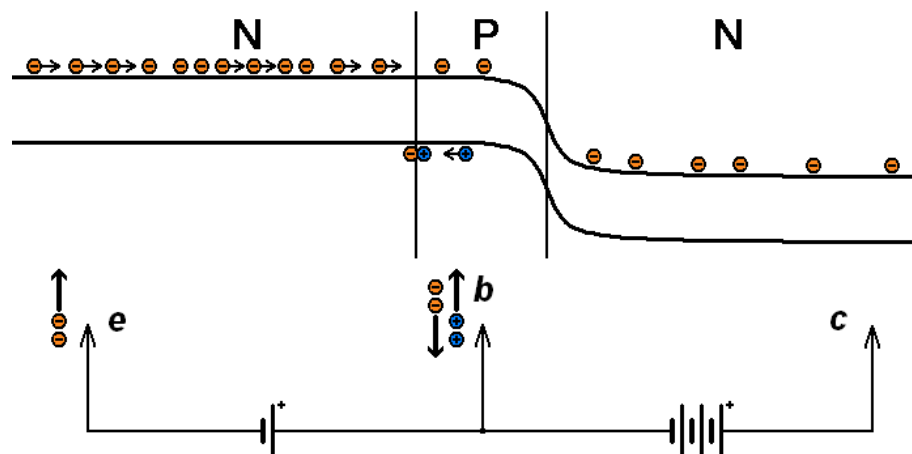
Výklad:

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. 17.3), strukturou neprochází proud.



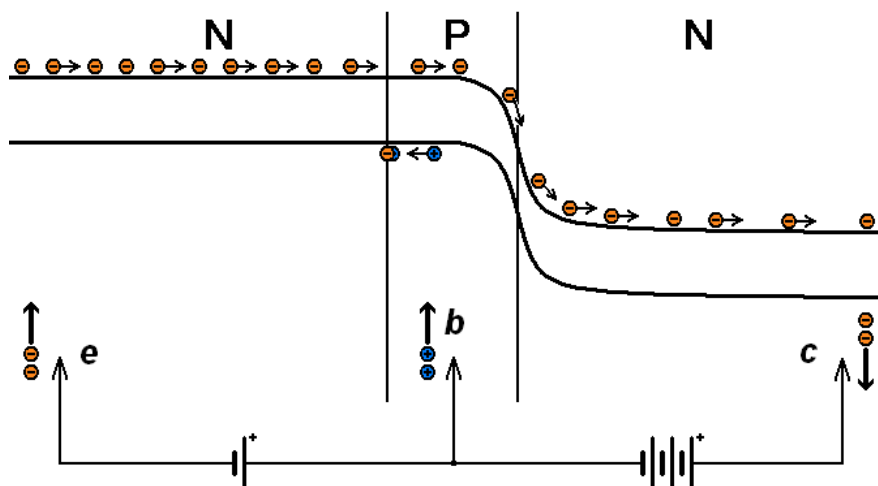
Obr. 17.3 Zvyšování závěrného napětí na přechodu báze-kolektor

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. 17.4).



Obr. 17.4 $U_{bc} = 0 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, 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. 17.5).



Obr. 17.5 $U_{bc} = 10 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, elektrony z emitoru procházejí přes tenkou bázi do kolektoru

5 Popis vytvořených digitálních modelů

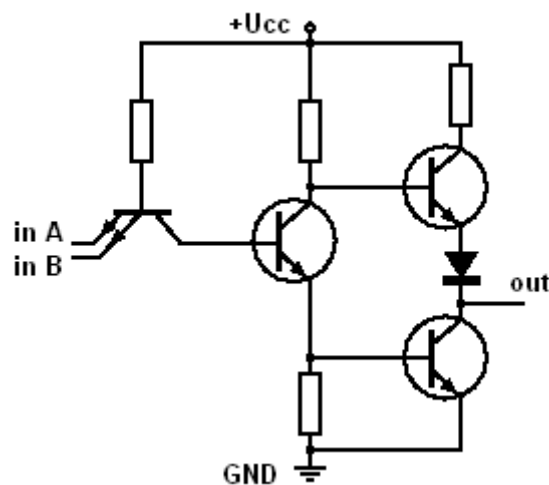
5.1 Hradla

Didaktický cíl:

Hlavním cílem této skupiny modelů je vyobrazení hradel jako základních stavebních prvků digitální elektroniky. Dále rozlišení jednotlivých typů a znázornění jejich funkce.

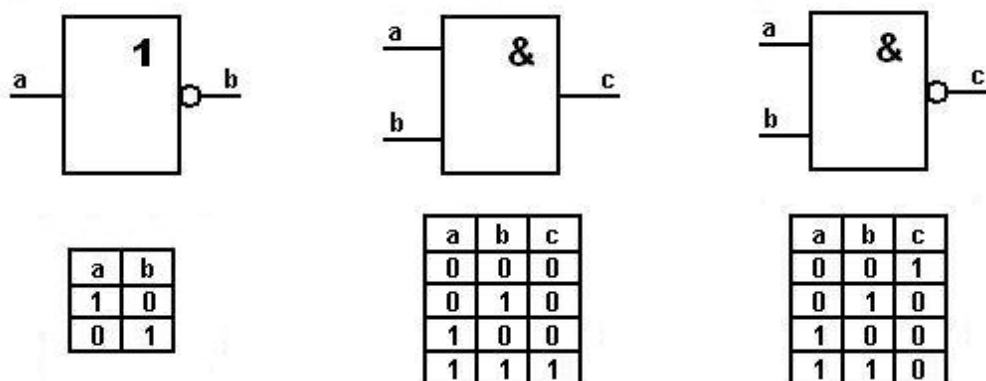
Teorie:

Tyto součástky jsou provedeny jako integrované obvody, přičemž v jednom pouzdře je obsaženo zpravidla několik hradel. Vnitřní struktura hradla NAND je patrná z obr. 18.1. Hradla jsou sestavena z analogových součástek, dále však jejich analogový původ neuvažujeme a hradla jsou brána za základní jednotky digitální elektroniky.

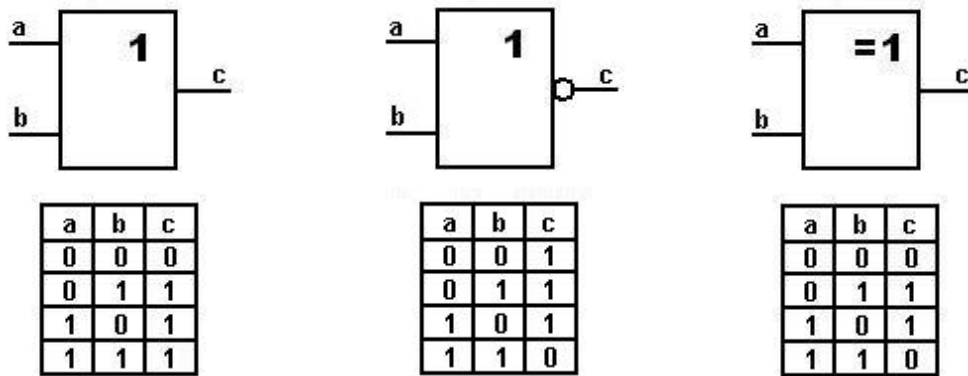


Obr. 18.1 Vnitřní struktura hradla NAND [38]

Napětí na vstupech a výstupech těchto součástek může nabývat pouze dvou hodnot: 0V - nazýváme úroveň logická nula (0), nebo 5V - nazýváme úroveň logická jednička (1). Stav na jeho výstupu závisí pouze na okamžitých kombinacích vstupních proměnných. Schematické značky jednotlivých typů hradel a jejich pravdivostní tabulky jsou znázorněny na obr. 18.2 a obr. 18.3.



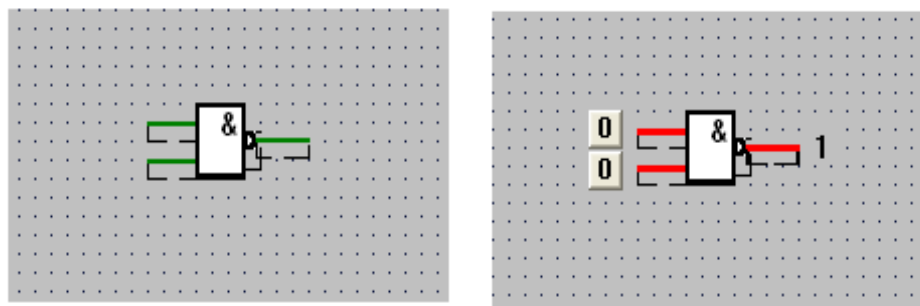
Obr. 18.2 Typy hradel a jejich pravdivostní tabulky - zleva NOT, AND, NAND



Obr. 18.3 Typy hradel a jejich pravdivostní tabulky - zleva OR, NOR, XOR

Realizace modelů:

Po vložení obrázků hradla a zelených čar představujících hodnotu $\log 0$ na vstupech a výstupu byla vložena tlačítka pro změnu logické úrovně na vstupech s popisem aktuálního stavu, popis stavu na výstupu a obrázky červených čar představujících stav $\log 1$, které překrývají čáry zelené viz. obr. 18.4.



Obr. 18.4 Realizace modelu hradla NAND

Zelené čáry mají nastavenou stále kladnou viditelnost, zatímco u červených se viditelnost mění. Ve výsledku je pak vidět buď zelená nebo červená čára. Výhodou je, že s viditelností obrázku lze pracovat jako s proměnnou typu *boolean*.

Stisknutí tlačítek na vstupu vyvolá proceduru, která změní viditelnost příslušné červené čáry a popis tlačítka:

```
image6.Visible:= not image6.Visible;
if image6.Visible then
    button1.Caption:='1'
else button1.Caption:='0';
```

Pro viditelnost červené čáry na výstupu lze použít vztah:

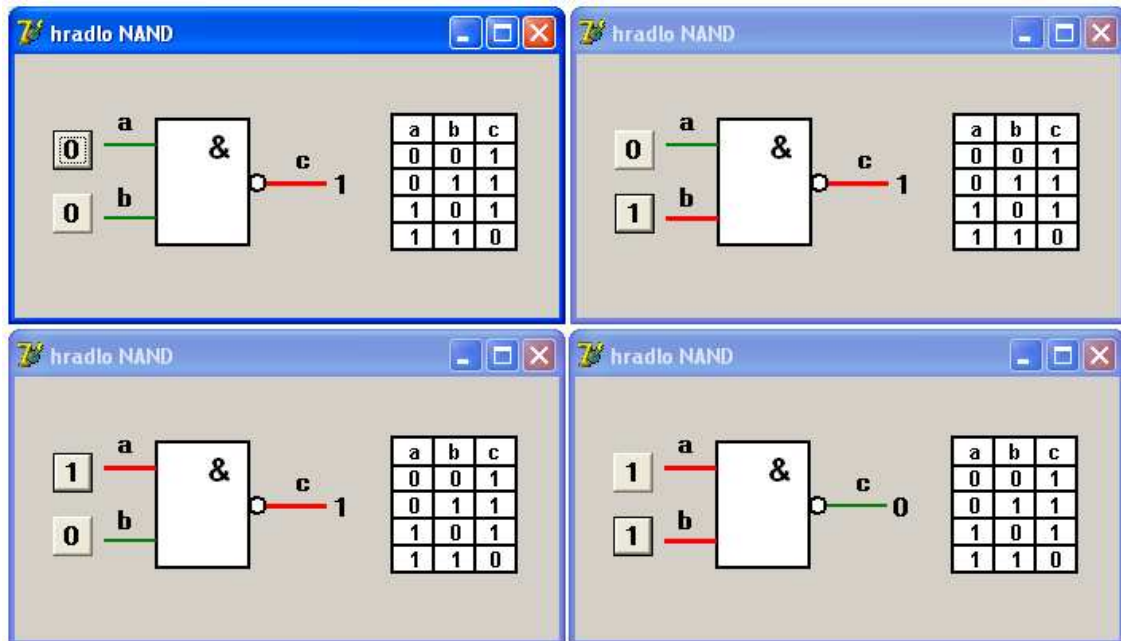
```
image8.visible:= not (image7.visible and image6.visible)
```

kde `image7.visible` a `image6.visible` jsou viditelnosti červených čar na vstupu.

Pro popis stavu na výstupu použijeme příkazy:

```
if image8.Visible then
    label1.Caption:=('1')
else label1.Caption:=('0');
```

Na obr. 18.5 je vidět provedení modelu hradla NAND s vyobrazením všech jeho možných stavů .



Obr. 18.5 Model hradla NAND

Metodický návod:

1. Spuštění: NOT.. „d-1-1_hradlo_not.exe“
AND.. „d-1-2_hradlo_and.exe“
NAND..„d-1-3_hradlo_nand.exe“
OR... „d-1-4_hradlo_or.exe“
NOR...„d-1-5_hradlo_nor.exe“
XOR...„d-1-6_hradlo_xor.exe“
2. Pomocí tlačítek nastavovat různé kombinace logických úrovní na vstupech. Výslednou logickou úroveň na výstupu porovnávat s pravdivostní tabulkou.

5.2 Kombinační logické obvody

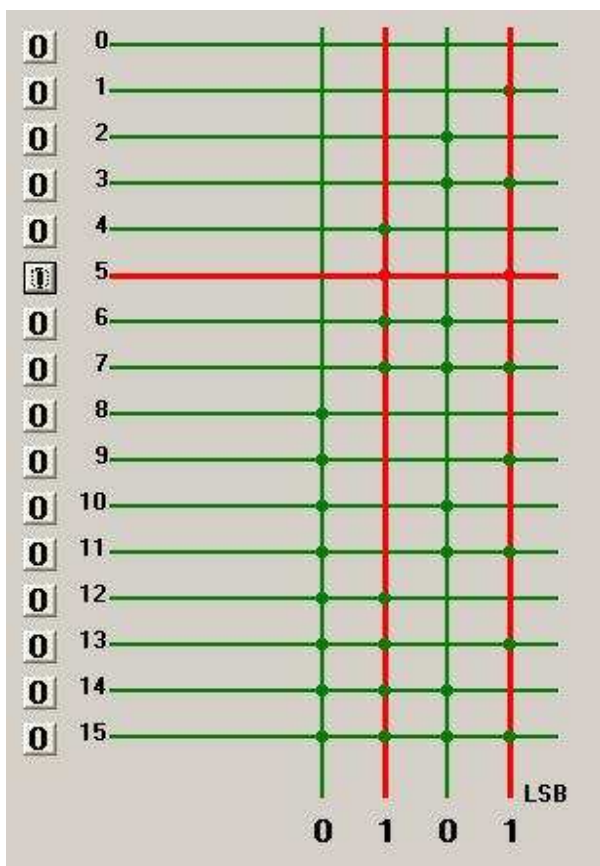
Didaktický cíl:

Hlavním cílem této skupiny modelů je názorné vyobrazení jejich zapojení a funkce. Dále pak zvýraznění jejich společné vlastnosti – výstupní hodnota závisí pouze na aktuální kombinaci hodnot na vstupech.

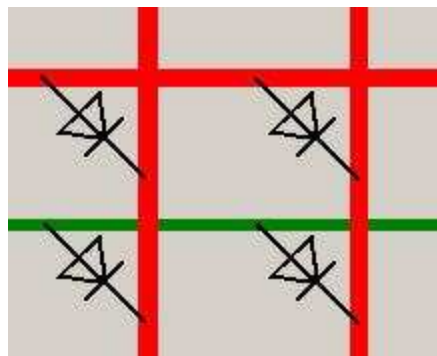
5.2.1 Kodér

Teorie:

V oblasti logických obvodů se velmi často používá obvod zvaný kodér. Jeho hlavním úkolem je „překlad“ dat ze systému, který je bližší uživateli do systému, který je bližší digitálnímu zařízení. Kodér má určitý počet vstupů, z jejichž počtu je odvozeno i množství výstupních bitů. Zpravidla je to 2^n vstupů a pro n výstupů. Ačkoliv může mít kodér specifickou pravdivostní tabulku, nejčastěji se používá BCD kód. Jeho funkce je zřejmá z obr. 19.1. Úroveň *log1* aktivního vstupu je přenesena na konkrétní výstupy (písmeny LSB je označen nejnižší bit). Kódování je dáno umístěním propojů v mřížce vstupů a výstupů. Propoje musí být provedeny jednosměrně viz. obr. 19.2 (například v obr. 19.1 by byly přes další spoje aktivovány i zbylé dva výstupy).



Obr. 19.1 Kodér



Obr. 19.2 Detail propojů kodéru

Realizace modelu:

Jako podklad jsou vloženy zelené vodiče a uzly znázorňující úroveň *log0*. Ty jsou poté překrývány červenými čarami a uzly znázorňující úroveň *log1*. Při stisku tlačítka je nejprve volána procedura *vynulovat*, která všem červeným čarám nastaví viditelnost *false* a vynuluje popisy vstupů a výstupů. Poté jsou zviditelněny pouze potřebné vodiče a popsány aktivní vstupy a výstupy:

```
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
begin

    vynulovat;

    image63.visible:=true;
    image55.visible:=true;
    image56.visible:=true;
    image80.visible:=true;
    image81.visible:=true;

    button4.Caption:='1';
    label3.Caption:='1';
    label4.Caption:='1';

end;
```

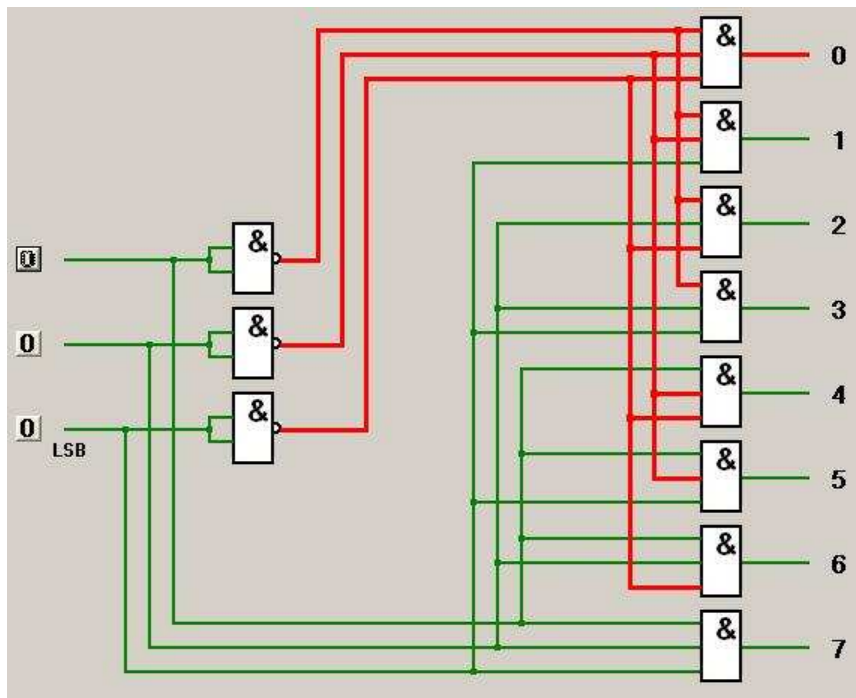
Metodický návod:

1. Spuštění: „**d-2-1_koder.exe**“
2. Pomocí tlačítek aktivovat jednotlivé vstupy. Sledovat výstupní hodnotu.

5.2.2 Dekodér

Teorie:

Dekodér je zařízení, které převádí data z podoby bližší digitálnímu zařízení do tvaru, který je bližší uživateli. Zpravidla má 2^n výstupů pro n vstupů. Číslo aktivního výstupu odpovídá binární hodnotě kombinace přivedené na vstupy. Obvodu se používá pro výběr jednoho z 2^n prvků.



Obr. 20.1 Tříbitový dekodér

Realizace modelu:

Jako podklad jsou vloženy zelené vodiče a uzly znázorňující úroveň $\log 0$. Ty jsou poté překrývány červenými čarami a uzly znázorňující úroveň $\log 1$. S jejich viditelností lze pracovat jako s proměnnou typu *boolean*. Jsou zde použity tři proměnné *a*, *b*, *c* reprezentující logickou úroveň tří vstupů. Při stisku tlačítka je změněna hodnota příslušné proměnné, která je poté přiřazena viditelnosti příslušných čar:

```
a:=not a
```

```
image152.Visible:=a;      image104.Visible:=not a;  
image129.Visible:=a;      image74.Visible:=not a;  
image90.Visible:=a;       image92.Visible:=not a;
```

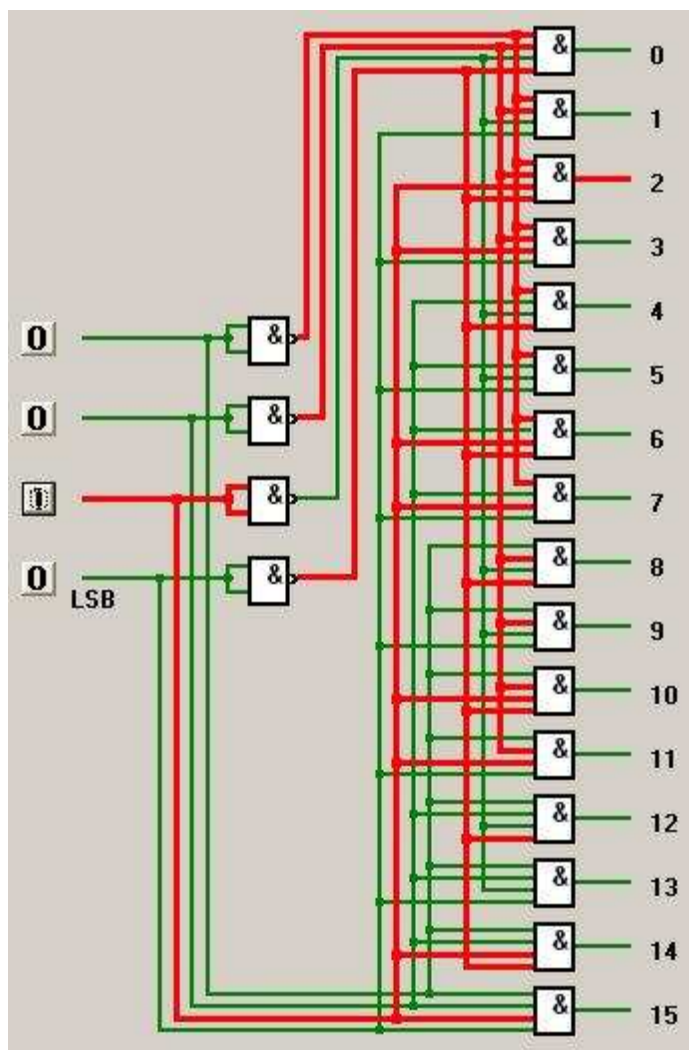
```
atd...
```

Obarvení výstupů je vypočteno z kombinace proměnných *a*, *b*, *c*.

```
image121.Visible:=(not a)and(not b)and(not c);  
image122.Visible:=(not a)and(not b)and c;
```

```
atd...
```


Pro lepší pochopení funkce obvodu je vytvořen i jednodušší dekodér 1 z 8 se třemi vstupy (obr. 20.1). Na obr. 20.2 je vyobrazen model dekodéru 1 ze 16 se čtyřmi vstupy.



Obr. 20.2 Čtyřbitový dekodér

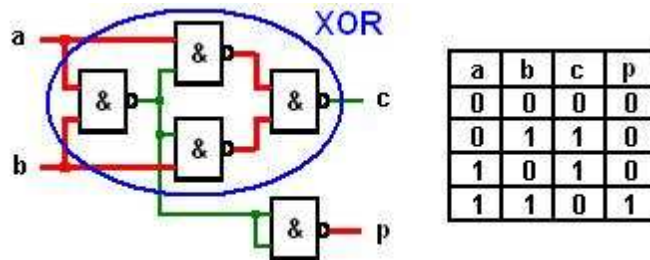
Metodický návod:

1. Spuštění: „d-2-2_dekoder_1z8.exe“...pro tříbitový dekodér
„d-2-3_dekoder_1z16.exe“...pro čtyřbitový dekodér
2. Pomocí tlačítek aktivovat jednotlivé vstupy. Sledovat výstupní hodnoty a princip zapojení.

5.2.3 Sčítačka

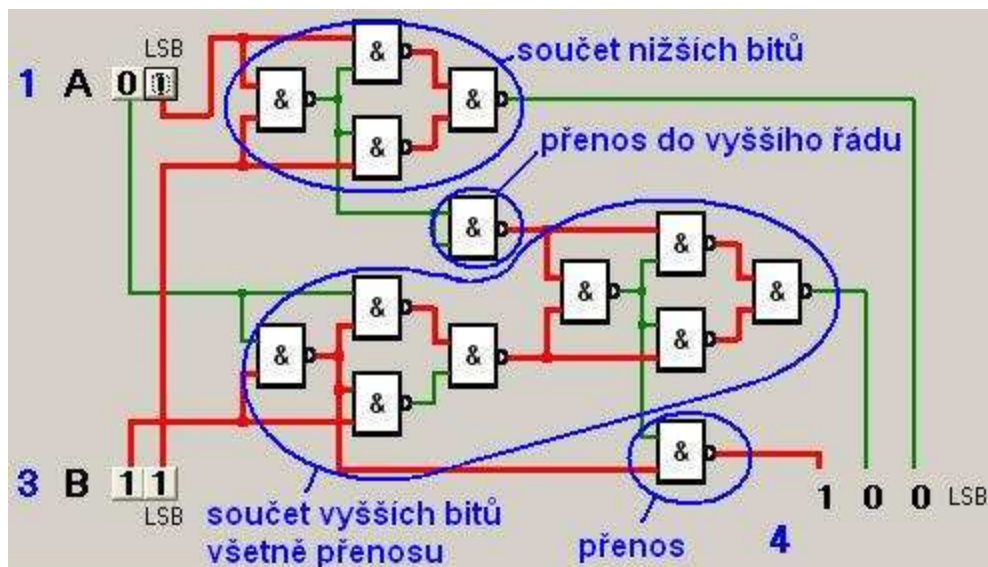
Teorie:

Základním stavebním prvkem sčítačky je hradlo XOR. Na obr. 21.1 je vyobrazeno toto hradlo sestavené z hradel NAND, tak aby byl vyveden ještě jeden výstup p – tzv. přenos do vyššího řádu. Tento jednoduchý obvod tvoří jednobitovou sčítačku. Přenos má úroveň $log1$ pouze v případě obou vstupů ve stavu $log1$.



Obr. 21.1 Jednobitová sčítačka

Při sčítání dvou dvoubitových čísel A a B jsou nejprve sečteny nižší bity obou čísel (označení LSB). Přenos z tohoto součtu je přičten k součtu vyšších bitů obou čísel. Přenos ze součtu vyšších bitů je nejvyšším bitem výsledné hodnoty. Součet dvou dvoubitových čísel totiž může být číslo tříbitové (obr. 21.2).



Obr. 21.2 Dvoubitová sčítačka

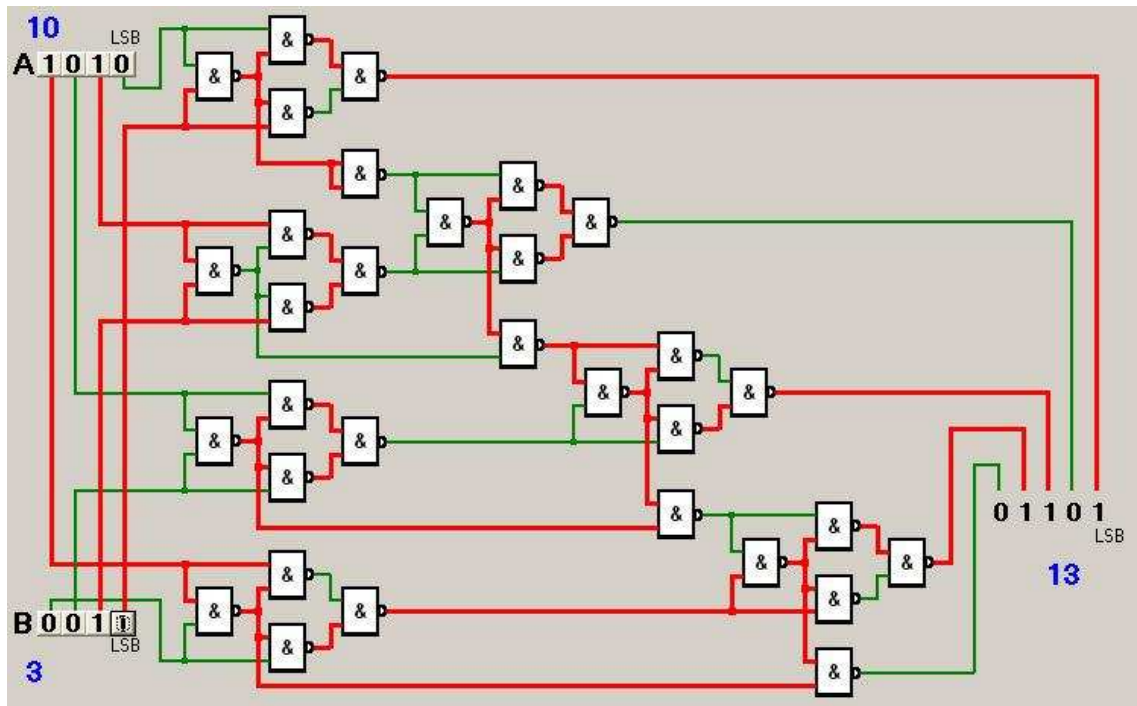
Stejným způsobem lze sestavit libovolnou vícebitovou sčítačku. Přenos ze součtu nižších bitů je vždy přičten k vyšším bitům.

Realizace modelů:

Vyrobeny jsou modely čtyřbitové a pro lepší názornost i dvoubitové sčítačky. Jedná se o obvody sestavené pouze z hradel NAND, jejich zapojení jsou znázorněna na obr. 21.2 a obr. 21.3. V těchto modelech nejsou použity žádné proměnné pro popis stavů v jednotlivých částech obvodu, ale přímo se zde pracuje s viditelností červených čar.

Funkce hradel NAND je reprezentována příkazy:

```
image185.Visible:=not (image184.Visibleandimage183.Visible);  
image187.Visible:=not (image178.Visibleandimage194.Visible);  
atd...
```



Obr. 21.3 Čtyřbitová sčítačka

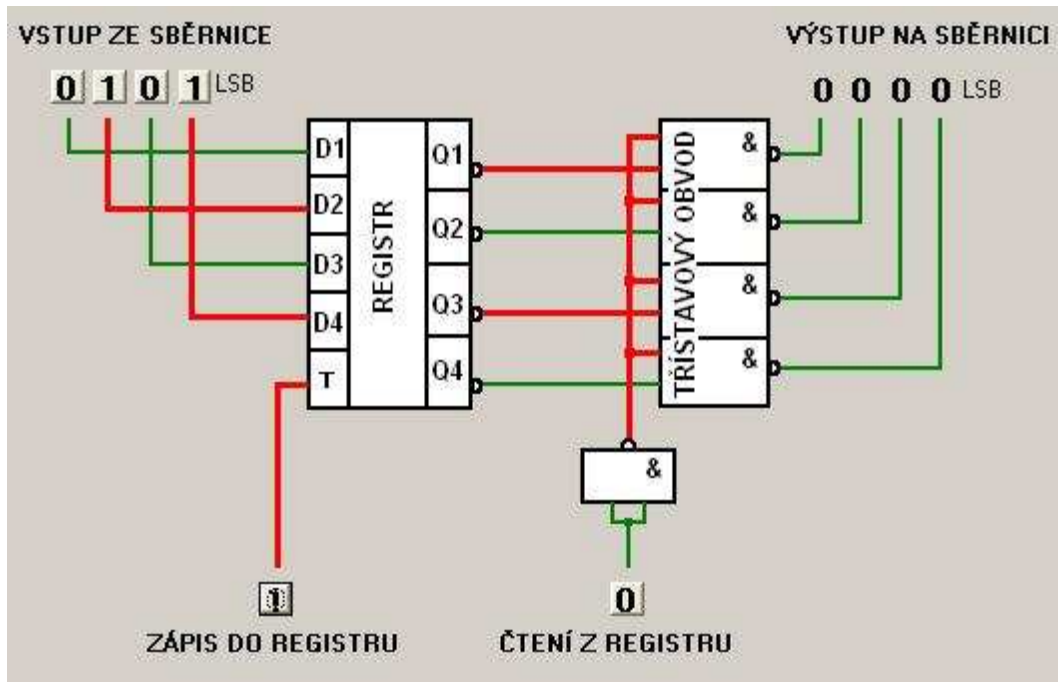
Metodický návod:

1. Spuštění: „d-2-4_scitacka_2bit.exe“ ...pro dvoubitovou sčítačku
„d-2-5_scitacka_4bit.exe“ ...pro čtyřbitovou sčítačku
2. Pomocí tlačítek měnit hodnoty sčítaných čísel A a B. Sledovat výstupní hodnoty a princip přenosu do vyšších řádů.

5.2.4 Registr

Teorie:

Registr je elektronický obvod pro uchování vícebitového slova. Čtyřbitový registr je složen ze čtyř D - klopných obvodů s propojenými vstupy T, sloužících jako společný vstup pro příkaz zápisu do registru. Jestliže je na vstup pro zápis přiveden impuls $log1$, pak se hodnoty nastavené tlačítky na vstupu přepíše do registru (obr. 22.1). U D - klopných obvodů je použit negovaný výstup z důvodu použití třístavového obvodu typu NAND, které hodnotu opět neguje.



Obr. 22.1 Čtyřbitový registr

Pro čtení dat z registru slouží tzv. třístavové hradlo NAND, které pro úroveň $log1$ na vstupu a vykazuje velký odpor výstupu – výstup odpojen. Pro úroveň $log0$ na vstupu a přepisuje na výstup negaci vstupu b (obr. 22.2).



Obr. 22.2 Třístavové hradlo NAND

Realizace modelu:

V modelu je použito několik proměnných typu *boolean*: a, b, c, d pro vstupy do registru, a1, b1, c1, d1 pro hodnoty registru, a2, b2, c2, d2 pro výstupy z registru, w pro signál zápisu do registru, r pro signál čtení z registru.

```
if w=true then begin      a1:=not a;
                          b1:=not b;
                          c1:=not c;
                          d1:=not d;  end;
if r=false then begin    a2:=not a1;
                          b2:=not b1;
                          c2:=not c1;
                          d2:=not d1; end;
```

Následuje vybarvení vodičů podle hodnot proměnných:

```
mage52.Visible:=c1;
image56.Visible:=d1;      atd...
```

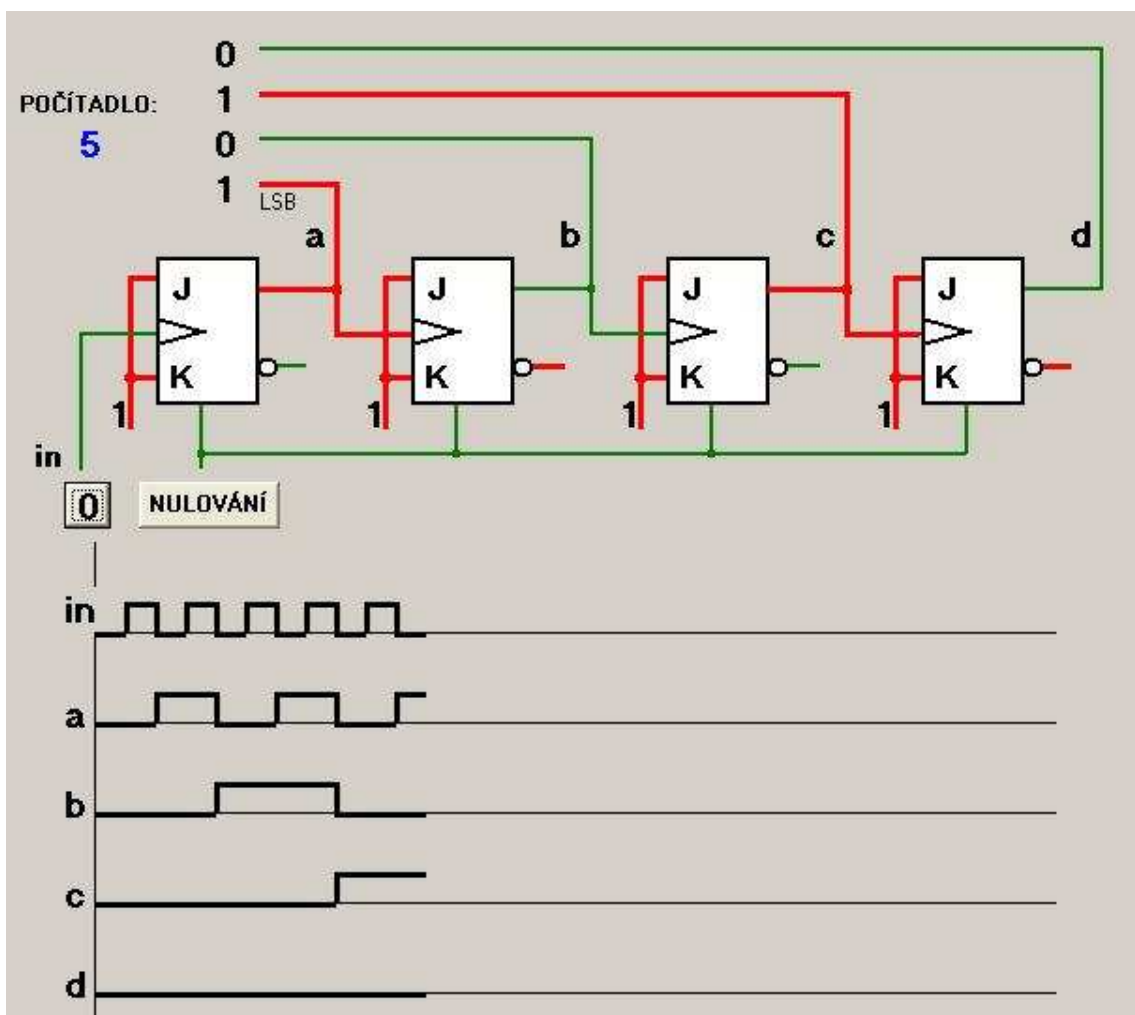
Metodický návod:

1. Spuštění: „d-2-6_registr.exe“
2. Pomocí tlačítek „vstup ze sběrnice“ nastavit libovolnou hodnotu.
3. Tlačítkem „zápis do registru“ nastavit *log1* – vstupní hodnota je přepsána do registru.
4. Tlačítkem „zápis do registru“ nastavit *log0*. Číslo je nyní uloženo v registru – změna hodnoty na vstupu nemá na uložené číslo žádný vliv.
5. Vyvolání uloženého čísla se provádí nastavením *log1* na vstupu „čtení z registru“.

5.2.5 Čítač

Teorie:

Jednou z možností realizace čítače je sériové řazení J-K klopných obvodů (obr. 23.1), jehož funkce je popsána v kapitole 5.3.4. Vstup prvního klopného obvodu slouží jako vstup čítače, jeho výstup je jednak vyveden jako výstup čítače pro nejnižší řád čísla udávajícího počet prošlých pulsů a jednak je veden na vstup následujícího J-K klopného obvodu. Výstup každého dalšího klopného obvodu je opět připojen na vstup následujícího a zároveň slouží jako výstup čítače pro vyšší bity. Vstupy J a K všech klopných obvodů jsou spojené a mají úroveň $\log 1$. J-K klopné obvody mají tu vlastnost, že hodnota na jejich výstupu se mění se sestupnou hranou vstupního signálu, což má za následek, že se na výstupech čítače znázorní v binárním kódu počet prošlých pulsů na vstupu.



Obr. 23.1 Čtyřbitový čítač

Realizace modelu:

Na tlačítko vstupu je navázána procedura, měnicí vstupní logickou hodnotu. Je zde použito několik proměnných: t pro vstupní signál, q_1 , q_2 , q_3 , q_4 pro hodnoty na výstupech, q_{1p} , q_{2p} , q_{3p} vyjadřující stav prvních tří výstupů před jejich změnou.

Před přepočítáním aktuálních hodnot výstupů je provedeno jejich načtení do proměnných q_{1p} , q_{2p} , q_{3p} :

```
q1p:=q1;  q2p:=q2;  q3p:=q3;
```

Poté dojde k přepočítání aktuálních hodnot. Změna výstupů J-K klopných obvodů se sestupnou hranou jejich vstupů se děje pomocí příkazů:

```
if t=false then q1:=not q1;
if q1=false then begin if q1p=true then q2:=not q2; end;
if q2=false then begin if q2p=true then q3:=not q3; end;
if q3=false then begin if q3p=true then q4:=not q4; end;
```

Poté dojde k obarvení jednotlivých vodičů podle hodnot proměnných a ke znázornění stavů na vstupu a výstupech v grafu. Při stisku tlačítka *nulování* dojde k vynulování všech proměnných a k obarvení vodičů na hodnotu *log0*. Z důvodu přehlednosti není umožněn zápis do čítače. Tento nedostatek je vykompenzován níže popsaným modelem J-K klopného obvodu, kde se tato operace provádí nulovacím a nastavovacím vstupem.

Metodický návod:

1. Spuštění: „d-2-7_citac.exe“
2. Tlačítkem in simulovat počítané impulsy. Počet prošlých impulsů je zaznamenáván v levém horním rohu – údaj „počítadlo“. Tento údaj odpovídá binárnímu číslu napočítanému klopnými obvody.
3. Z grafů je vidět, že J-K klopný obvod funguje jako dělička dvěma.

5.3 Sekvenční logické obvody

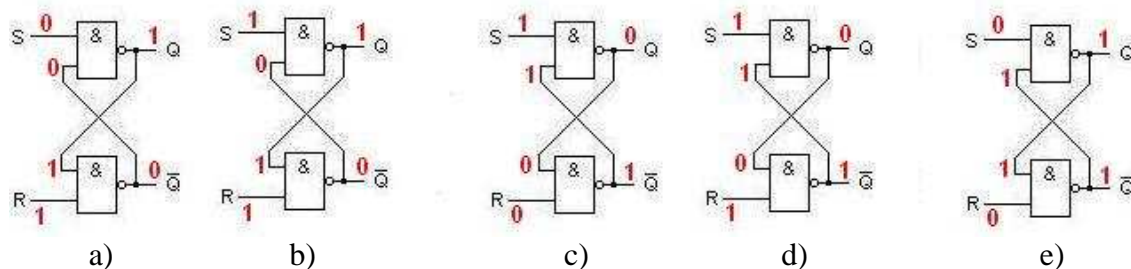
Didaktický cíl:

Hlavním cílem této skupiny modelů je vyobrazení jejich zapojení a funkce. Dále pak zvýraznění jejich paměťové schopnosti – hodnota na výstupu není závislá pouze na aktuální kombinaci hodnot na vstupech, ale i na předchozích stavech.

5.3.1 R-S klopný obvod

Teorie:

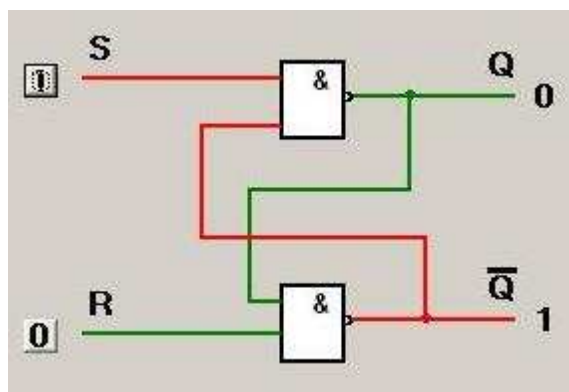
Tento klopný obvod lze sestavit ze dvou hradel NAND se zpětnou vazbou. Jeho funkce je zřejmá z obr. 24.1. Nejprve uvažujeme na vstupu **S** (set) úroveň $\log 0$ a na vstupu **R** (reset) úroveň $\log 1$. V tomto případě je hodnota na výstupech **Q** a \overline{Q} jednoznačně určena (obr. 24.1-a). Pokud z tohoto stavu přejdeme na **S-log 1** a **R-log 1**, hodnoty na výstupu se nezmění (obr. 24.1-b). Analogicky jsou jednoznačně určeny hodnoty výstupu při **S-log 1** a **R-log 0** (obr. 24.1-c). Při přechodu na **S-log 1** a **R-log 1** je opět hodnota výstupu zachována (obr. 24.1-d). Tento stav nazýváme stav pamatování, protože výstupní hodnota je dána předchozím stavem. Obr. 24.1-e zachycuje tzv. zakázaný stav při **S-log 0** a **R-log 0**, při kterém by byla na negovaném výstupu stejná hodnota jako na nenegovaném.



Obr. 24.1 Funkce RS klopného obvodu

Realizace modelu:

Tato animace je provedena obdobným způsobem jako modely hradel. Jsou zde vloženy obrázky hradel NAND, zelené a červené vodiče. Je zde použito několik proměnných typu *boolean* (*s*, *r*, *q1*, *q2*) představujících logické úrovně v jednotlivých částech obvodu podle obr. 24.2.



Obr. 24.2 Realizace RS klopného obvodu

Stisknutí tlačítek jsou přiřazeny procedury, které změni logickou hodnotu příslušného vstupu, nastaví hodnoty proměnných, proměnné přepočítá a přiřadí je viditelnosti vodičů:

```
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);  
begin  
  image19.Visible:=not image19.Visible;  
  
  s:=image19.Visible;  
  r:=image25.Visible;  
  q1:=image26.Visible;  
  q2:=image27.Visible;
```

Mezi těmito proměnnými platí vztahy: $q1 := \text{not}(s \text{ and } q2);$
 $q2 := \text{not}(r \text{ and } q1);$

V programu je třeba použít tyto dva vztahy dvakrát, protože výstupy hradel ovlivňují své vstupy.

Červeným vodičům pak můžeme jako viditelnost přiřadit hodnoty těchto proměnných:

```
  image23.Visible:=q1;      image27.Visible:=q2;  
  image24.Visible:=q1;      image32.Visible:=q2;      atd...
```

Popis tlačítek a hodnot na výstupu se provádí příkazy:

```
if s=true then button1.Caption:=inttostr(1);  
if s=false then button1.Caption:=inttostr(0);  
if q1=true then label5.Caption:=inttostr(1);  
if q1=false then label5.Caption:=inttostr(0);
```

Metodický návod:

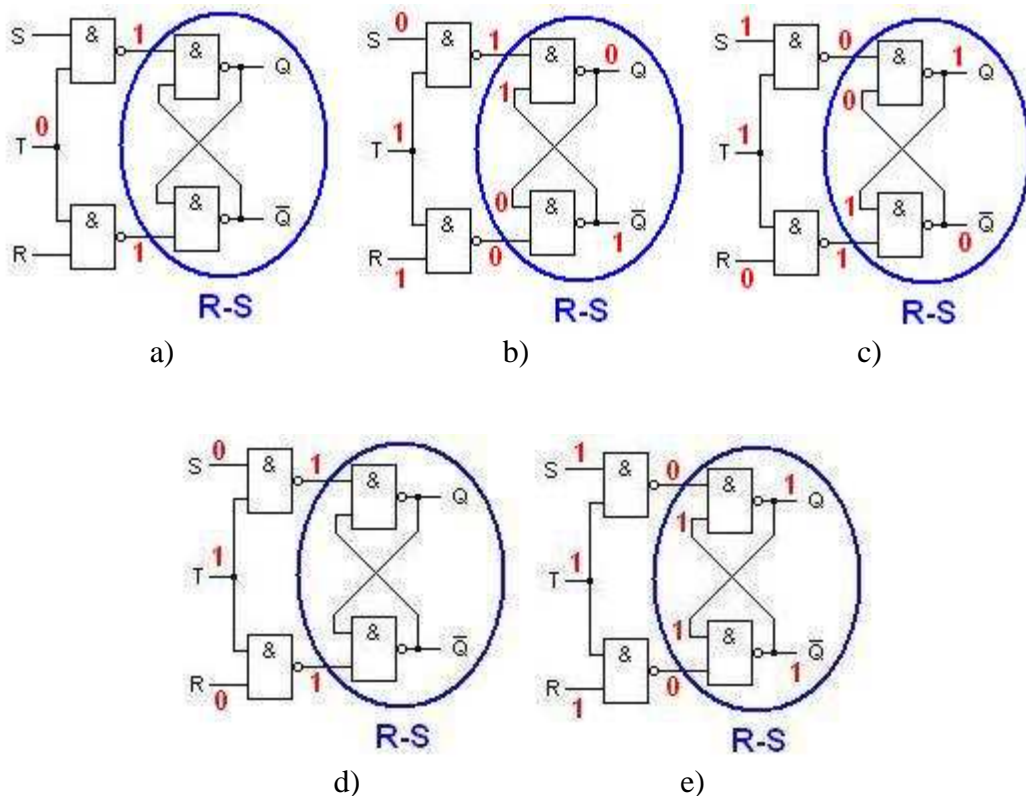
1. Spuštění: „d-3-1_klop_rs.exe“
2. Logické úrovně na vstupech: $S = 1$, $R = 0$ jednoznačně určují hodnotu výstupu: $Q = 0$.
3. Tlačítka změnit vstupní úrovně: $S = 1$, $R = 1$, výstupní hodnota zůstává zachována.
4. Nastavit vstupy: $S = 0$, $R = 1$. Výstupní hodnota je jednoznačně určena: $Q = 1$.
5. Změnit vstupní úrovně: $S = 1$, $R = 1$, výstupní hodnota opět zůstává zachována.
6. Nastavit vstupní hodnoty $S = 0$, $R = 0$. Obvod se nyní nachází v tzv. zakázaném stavu, protože výstup a negovaný výstup mají stejnou logickou úroveň.

5.3.2 R-S-T klopný obvod

Teorie:

R-S-T klopný obvod vznikne připojením dvou hradel NAND na vstupy R-S klopného obvodu – dostáváme tak další vstup **T** (vstup pro hodinový signál). Funkce obvodu je zřejmá ze zapojení na obr. 25.1. Pokud je vstup **T** na úrovni $\log 0$, je na vstupech části R-S $\log 1$, a to bez ohledu na vstupech **R** a **S**. To odpovídá stavu pamatování (obr. 25.1-a). Pokud je nastaveno **T** = 1, je možné obvod ovlivňovat zbylými dvěma vstupy. Pro rozdílné logické úrovně na vstupech **R** a **S** je jednoznačně určena hodnota na výstupu (obr. 25.1-b, c).

Zbylé dva obrázky zachycují prakticky nevýznamné stavy obvodu. Na obr. 25.1-d je obvod ve stavu pamatování, výsledek je stejný jako při zapojení dle bodu a). Na obr. 25.1-e se obvod nachází v zakázaném stavu, kdy je na výstupu stejná hodnota jako na vstupu negovaném.



Obr. 25.1 Funkce R-S-T klopného obvodu

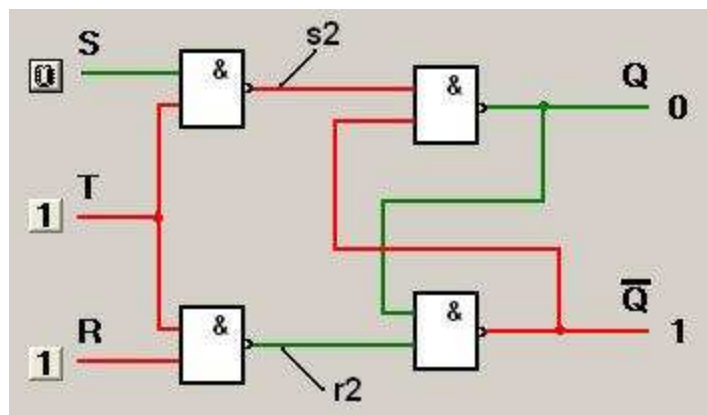
Realizace modelu:

Tato animace je provedena stejným způsobem jako modely R-S klopného obvodu. Jsou zde vloženy obrázky hradel NAND, zelené a červené vodiče. Je zde použito několik proměnných typu *boolean* (*s*, *r*, *t*, *s2*, *r2*, *q1*, *q2*) představujících logické úrovně v jednotlivých částech obvodu podle obr. 25.2.

Mezi těmito proměnnými platí vztahy:

```
r2:=not (r and t);  
s2:=not (s and t);  
q1:=not (s2 and q2);  
q2:=not (r2 and q1);
```

V programu je třeba použít poslední dva vztahy dvakrát, protože výstupy hradel ovlivňují své vstupy.



Obr. 25.2 Realizace R-S-T klopného obvodu

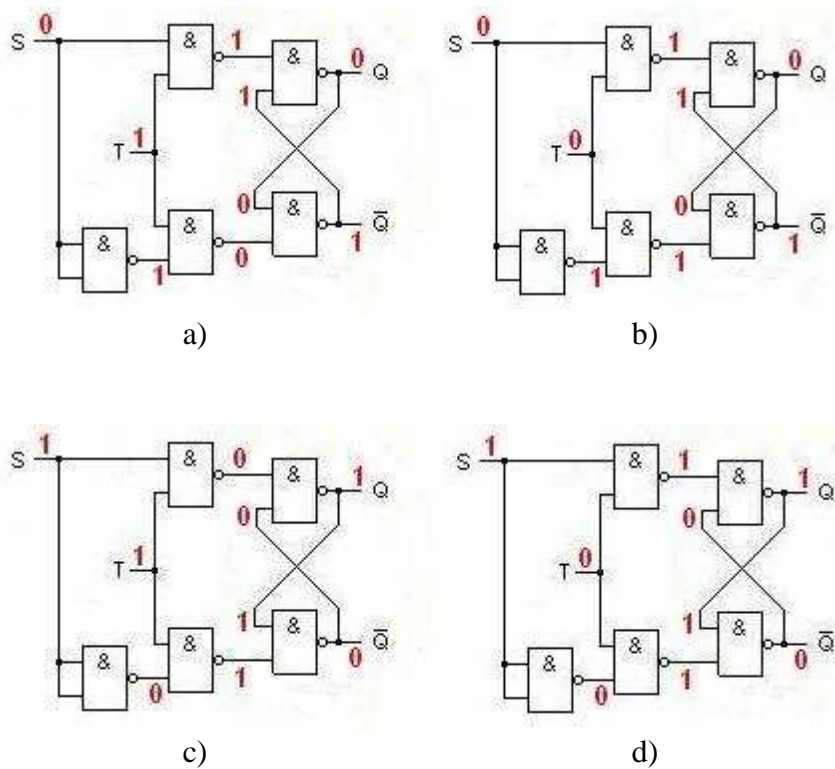
Metodický návod:

1. Spuštění: „d-3-2_klop_rst.exe“
2. Logické úrovně na vstupech: $S = 0$, $R = 1$, $T = 1$ jednoznačně určují hodnotu výstupu: $Q = 0$.
3. Nastavit vstup $T = 0$. Obvod je ve stavu pamatování – následná změna vstupů R a S nemá vliv na výstupní hodnotu.
4. Nastavit vstup $T = 1$. Nastavením $S = 1$, $R = 0$ je jednoznačně určena hodnota výstupu: $Q = 1$.
5. Nastavit vstup $T = 0$. Obvod je ve stavu pamatování – následná změna vstupů R a S nemá vliv na výstupní hodnotu.
6. Nastavit: $S = 0$, $R = 1$, $T = 1$. Hodnota výstupu je: $Q = 0$. Změnit vstupní úroveň: $S = 0$, $R = 0$, výstupní hodnota opět zůstává zachována – stav pamatování.
7. Nastavit vstupní hodnoty: $T = 1$, $S = 1$, $R = 1$. Obvod se nyní nachází v tzv. zakázaném stavu, protože výstup má stejnou logickou úroveň jako výstup negovaný.

5.3.3 D klopný obvod

Teorie:

D klopný obvod vznikne z R-S-T klopného obvodu připojením invertoru mezi vstupy R a S. Tento obvod funguje stejně jako obvod R-S-T, s tím rozdílem, že na vstupu R je vždy opačná hodnota než na vstupu S. Tímto způsobem je zajištěno, že se obvod může nacházet pouze v prakticky využitelných stavech (je vyloučen zakázaný stav). Funkce obvodu je zřejmá ze zapojení na obr. 26.1. Pokud je vstup T na úrovni *log1*, je hodnota výstupu jednoznačně dána vstupní hodnotou S (obr. 26.1-a, c). Pokud je nastaveno $T = 0$, zůstává na výstupu poslední nastavená hodnota, bez ohledu na změny vstupu S. Obvod se nachází ve stavu pamatování. Obr. 26.1-b zachycuje přechod do stavu pamatování ze stavu na obr. 26.1-a, obr. 26.1-d zachycuje přechod do stavu pamatování ze stavu na obr. 26.1-c.



Obr. 26.1 Funkce D klopného obvodu

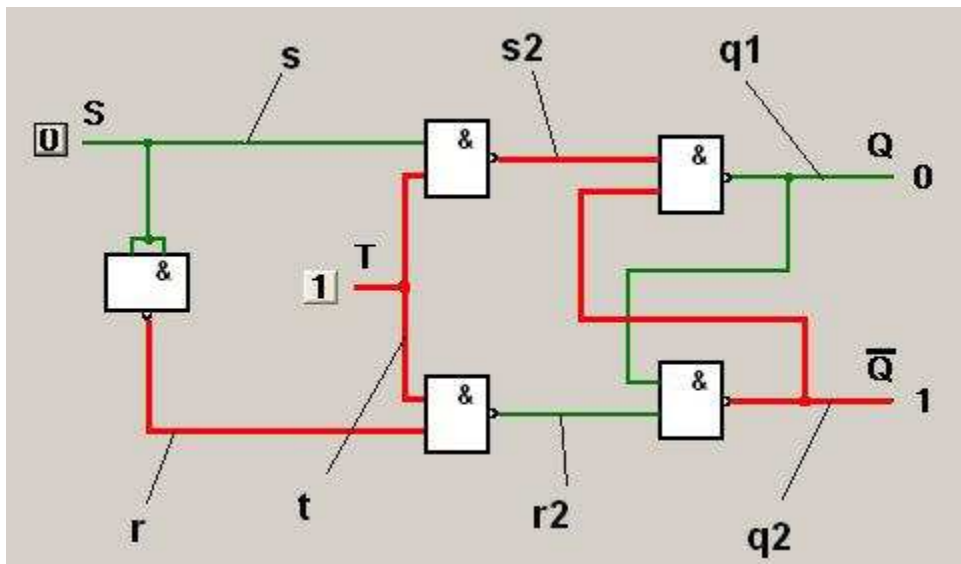
Realizace modelu:

D klopný obvod je proveden stejným způsobem jako předchozí model. Jsou zde vloženy obrázky hradel NAND, zelené a červené vodiče. Je zde použito několik proměnných typu *boolean* představujících logické úrovně v jednotlivých částech obvodu podle obr. 26.2.

Mezi těmito proměnnými platí vztahy:

```
r:=not s;  
r2:=not (r and t);  
s2:=not (s and t);  
q1:=not (s2 and q2);  
q2:=not (r2 and q1);
```

V programu je třeba použít poslední dva vztahy dvakrát, protože výstupy hradel ovlivňují své vstupy.



Obr. 26.2 Realizace D klopného obvodu

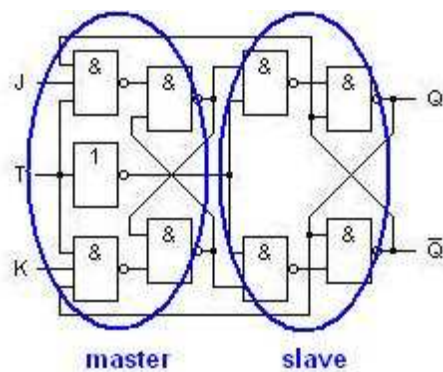
Metodický návod:

1. Spuštění: „d-3-3_klop_d.exe“
2. Logické úrovně na vstupech: $T = 1$, $S = 0$. Hodnota výstupu je jednoznačně určena: $Q = 0$.
3. Nastavit vstup $T = 0$. Obvod je ve stavu pamatování – následná změna vstupu S nemá vliv na výstupní hodnotu.
4. Nastavit vstup $T = 1$. Nastavením $S = 1$ je jednoznačně určena hodnota výstupu: $Q = 1$.
5. Nastavit vstup $T = 0$. Obvod je ve stavu pamatování – následná změna vstupu S nemá vliv na výstupní hodnotu.

5.3.4 J-K klopný obvod

Teorie:

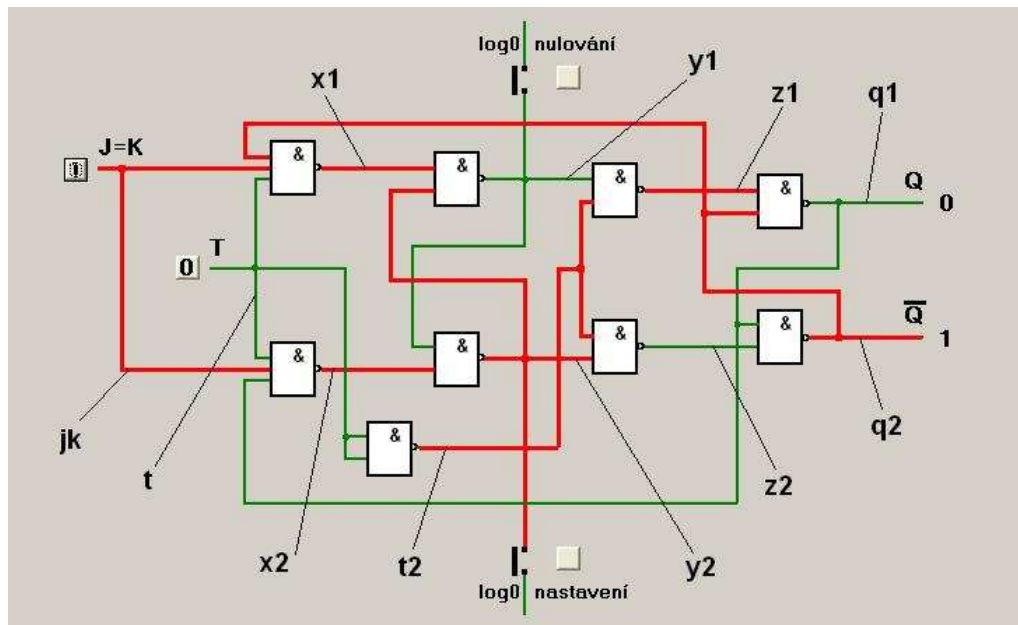
J-K klopný obvod je tvořen dvěma klopnými obvody R-S-T (obr. 27.1). První *master* (nadřizovaný člen), druhý *slave* (podřizovaný člen). Pro použití obvodu jako děličky se používá v zapojení $J = K = 1$, na vstup *T* *master*-členu je přiveden hodinový signál, na vstup *T* *slave*-členu jeho negace. Princip činnosti spočívá v tom, že *master* reaguje na vzestupnou hranu, *slave* na sestupnou hranu společného signálu. *Master* má výstupy přivedeny na vstupy *slave*. Výstupy *slave* sloužící jako výstup celého klopného obvodu jsou zároveň přivedeny na vstupy *master*. Při vzestupné hraně obvod čte data, ale na výstupu se objeví až při hraně sestupné. Obvod tedy funguje jako dělička dvěma. J-K klopný obvod má navíc nulovací a nastavovací vstup pro nastavení počátečních výstupních hodnot. Toto nastavení musí být prováděno při $T = 0$.



Obr. 27.1 JK klopný obvod

Realizace modelu:

Model J-K klopného obvodu je proveden stejným způsobem jako předchozí modely sekvenčních logických obvodů. Jsou zde vloženy obrázky hradel NAND, zelené a červené vodiče. Je zde použito několik proměnných typu *boolean* představujících logické úrovně v jednotlivých částech obvodu podle obr. 27.2.



Obr. 27.2 Realizace J-K klopného obvodu

Mezi těmito proměnnými platí vztahy:

```
x1:=not (jk and t and q2 );   y1:=not (x1 and y2);  
x2:=not (jk and t and q1 );   y2:=not (x2 and y1);  
z1:=not (y1 and t2);          q1:=not (z1 and q2);  
z2:=not (y2 and t2);          q2:=not (z2 and q1);  
t2:=not t;
```

J-K klopný obvod má nulovací a nastavovací vstup. Při stisknutí těchto tlačítek se provede natavení proměnné y_1 resp. y_2 na hodnotu $log0$:

```
y1:=false;
```

Poté opět následuje přepočítání všech proměnných a zviditelnění příslušných čar, což má za následek změnu hodnot na výstupu.

Metodický návod:

1. Spuštění: „d-3-4_klop_jk.exe“
2. Logické úrovně na vstupech: $J = K = 1$. Měnit hodnotu na vstupu T. Hodnota výstupu se mění se sestupnou hranou vstupního signálu (Obvod pracuje jako dělička dvěma).

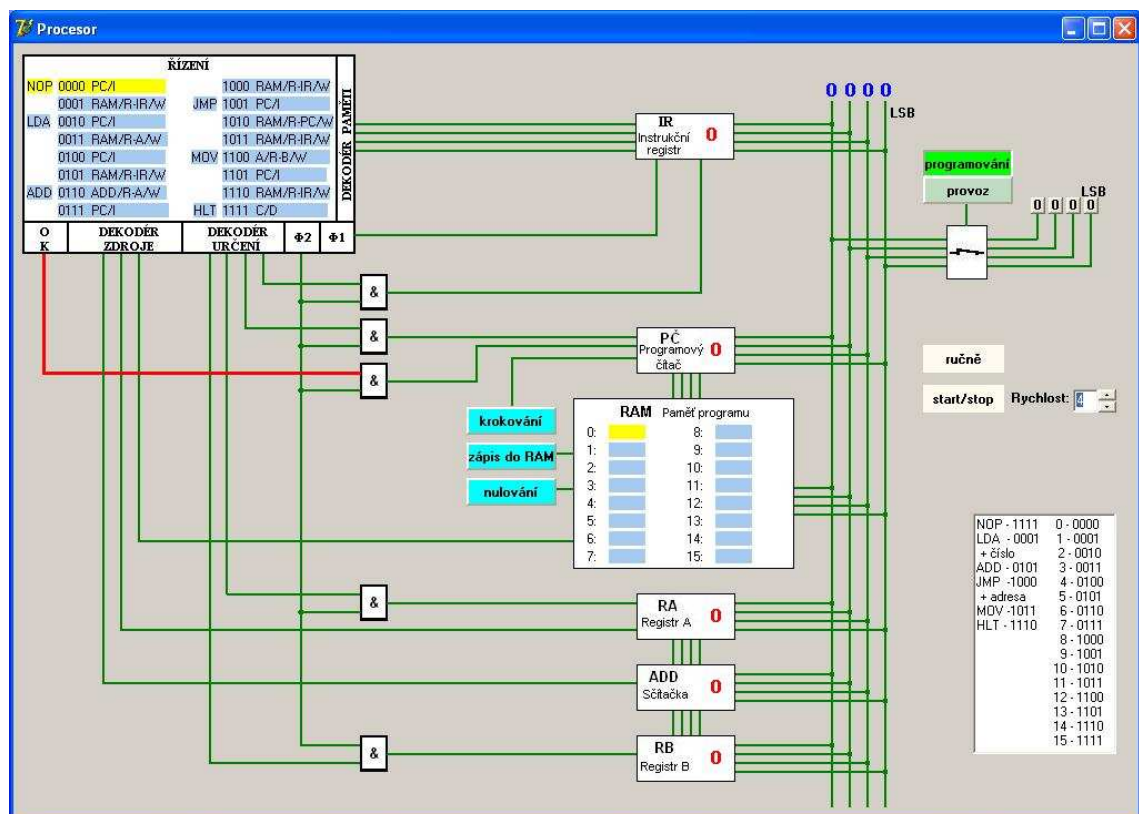
5.4 Mikroprocesor

Didaktický cíl:

Hlavním cílem tohoto modelu je znázornění principu činnosti mikroprocesoru. Klíčové je pochopení funkce řídicích obvodů, kde jsou uloženy mikroinstrukce, kterými procesor disponuje. Z těchto obvodů vycházejí řídicí signály pro pohyb dat mezi jednotlivými částmi procesoru. Model by měl znázorňovat vnitřní strukturu jednoduchého mikroprocesoru a funkci jeho jednotlivých částí.

Tato kapitola je vzhledem k velkému rozsahu a větší náročnosti na pochopení tříděna jinak než kapitoly předchozí. Teorie je rozdělena do několika podkapitol. Namísto metodického návodu je zařazena kapitola „ukázka programu“.

Provedení modelu je vidět na obr. 28.1. Jedná se o blokové schéma mikroprocesoru složené z řídicích obvodů, dvou registrů, sčítačky a paměti RAM sloužící pro uložení programu. Vzhledem k tomu, že jde o čtyřbitový mikroprocesor, jsou jeho schopnosti značně omezené. K dispozici jsou tyto operace: NOP – operace „nicnedělán“, LDA – načtení dat z paměti RAM do registru A, ADD – sečtení obsahu registrů A a B (výsledek je uložen do registru A), JMP – skok na libovolnou pozici paměti RAM, MOV – přesun dat z registru A do registru B, HLT – ukončení činnosti.

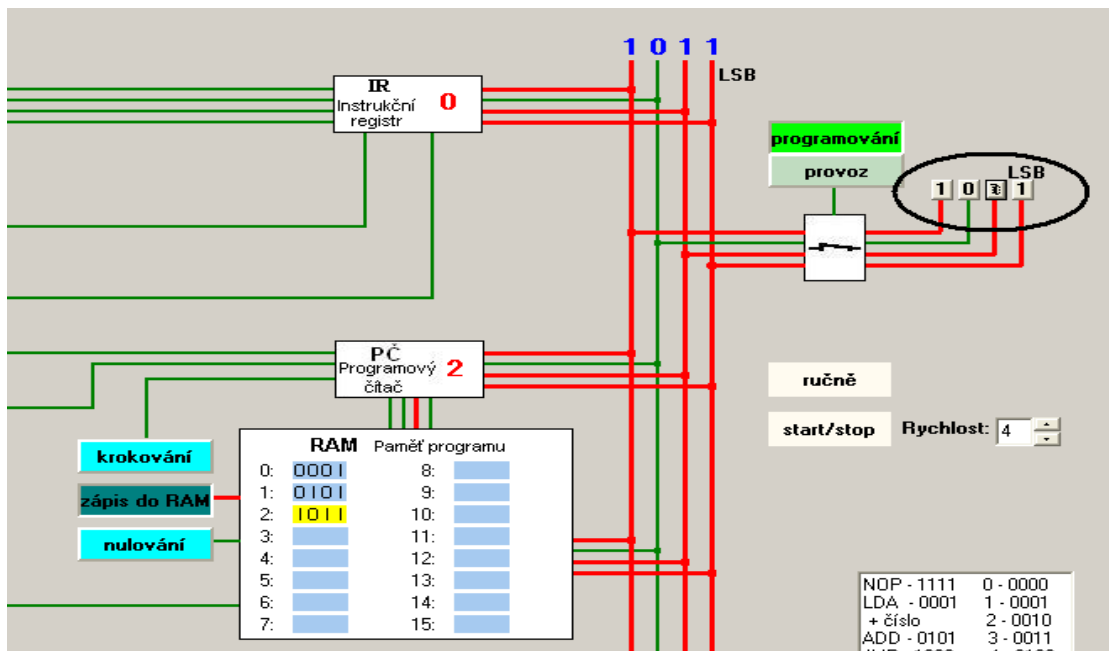


Obr. 28.1 Model mikroprocesoru

5.4.1 Stav „programování“

Přepínání mezi stavy *programování* a *provoz* se provádí tlačítky v pravém horním rohu.

Stav programování umožňuje zápis programu do paměti RAM. K tomu slouží tlačítka *krokování*, *zápis do RAM* a *nulování*. Při stisku tlačítka *zápis do RAM* je do aktivního pole paměti přepsána hodnota na sběrnici, nastavená tlačítky v pravé horní části okna (obr. 28.2). Tlačítkem *krokování* aktivujeme následující paměťové místo, do kterého můžeme opět zapsat příkaz nebo data. Pro vymazání celého obsahu paměti RAM slouží tlačítko *nulování*.



Obr. 28.2 Zápis programu do paměti

Realizace:

Při stisku tlačítka *krokování* se provede zvýšení obsahu programového čítače o jedničku a změna barvy příslušného místa v paměti RAM. Navíc dojde ke změně barvy vodičů vedoucích od programového čítače k paměti RAM na aktuální stav čítače. Ten je realizován pomocí proměnné *p*.

```

p:=p+1;
if p=16 then p:=0;
label2.caption:=inttostr(p);

if p=0 then label35.Color:=clyellow;
if p=1 then begin label36.Color:=clyellow;
image17.Visible:=true; end;
if p=2 then begin label37.Color:=clyellow;
image16.Visible:=true; end;
atd...

```

V proceduře přiřazené stisknutí tlačítka *zápis do RAM* je použito několik proměnných:

```

popisram:string;
rampopis:array [0..15] of string;
s:integer;
ram:array [1..16] of integer;

```

Při stisknutí tohoto tlačítka dojde k zapsání aktuálního stavu na sběrnici do proměnných popisram a s:

```
if ((not image236.Visible)and(not image235.Visible)and
    (not image237.Visible)and(not image238.Visible))= true
then begin
    s:=0;
    popisram:='0000';
end;

if (image236.Visible and(not image235.Visible)and
    (not image237.Visible)and(not image238.Visible))= true
then begin
    s:=8;
    popisram:=' 1 000';
end;
```

atd...

kde image236.Visible, image235.Visible, image237.Visible a image238.Visible jsou viditelnosti červených čar představujících logické úrovně na sběrnici.

Dále je obsah proměnné popisram zařazen do pole proměnných rampopis a hodnota s do pole proměnných ram a to na p-tou (p+1) pozici, kde p je aktuální stav programového čítače:

```
rampopis[p]:=popisram;
ram[p+1]:=s;
```

Nakonec následuje popsání buněk paměti RAM:

```
label35.Caption:=rampopis[0];
label36.Caption:=rampopis[1];
label37.Caption:=rampopis[2];      atd...
```

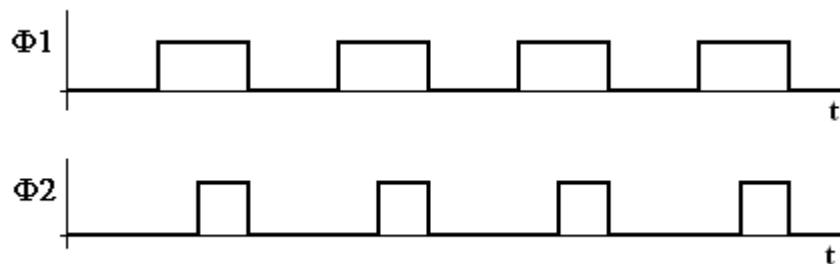
S polem ram se pracuje dále při vykonávání programu, pole rampopis slouží pouze k popisu buněk paměti RAM.

5.4.2 Stav „provoz“

V tomto stavu je možné používat tlačítko *ručně*, které slouží ke krokování programu a tlačítko *start/stop*, kterým se program spouští a zastavuje, přičemž si můžeme zvolit rychlost vykonávání jednotlivých kroků. Veškeré procedury jsou vázány na tlačítko *ručně*, po stisknutí tlačítka *start/stop* se pouze spustí časovač, který toto tlačítko mačká v nastavených intervalech.

Generátor hodinových pulsů

Pro správnou činnost mikroprocesoru jsou třeba dvoufázové hodiny. Ty dodávají dvě skupiny impulsů se stejnou frekvencí, ale s různým fázovým posuvem a dobou trvání úrovně *log1*. Funkce těchto dvoufázových hodin zajišťuje, že s příchodem náběžné hrany hodin $\Phi 1$ dojde ke čtení dat na sběrnici z registru, sčítačky, nebo z paměti RAM a teprve příchodem náběžné hrany hodin $\Phi 2$ dojde k jejich zápisu do jiného registru a k inkrementaci programového čítače.[14]



Obr. 28.3 Dvoufázové hodiny

Realizace:

Tyto hodinové impulsy jsou realizovány pomocí proměnných $a1$, $a2$. Při každém stisknutí tlačítka *ručně* se změní jejich hodnoty a obarví se příslušné vodiče. Jejich průběh je vidět na obr. 28.3.

```
if (not a1) then a1:=true;
else
if (a1 and not a2) then a2:=true;
else begin
a1:=false;
a2:=false;
end;

image16.Visible:=a1;
image18.Visible:=a2;
image102.Visible:=a2; atd.
```

Registr instrukcí

Je to čtyřbitový čítač, který pracuje i jako čtyřbitový registr. Na jeho vstupy se přivádí instrukce z programové paměti, což je ve skutečnosti adresa řádku řídicí paměti ROM. Povelům pro zápis do registru instrukcí se objeví i na jeho výstupu a přes dekodér adres ukazují na příslušný řádek řídicí paměti ROM. Tento registr má trojici řídicích vstupů. Je-li přítomen povel na řídicím vstupu pro zápis do instrukčního registru, zaznamenává se při příchodu hodinového pulsu $\Phi 2$ stav na sběrnici do registru instrukcí. Hodinové signály $\Phi 1$ na druhém vstupu určují inkrementaci obsahu registru instrukcí (zvýšení čísla na výstupu o jedničku od nastavené hodnoty). Tím způsobí, že po dekódování v dekodéru adres se postupuje po řádcích v řídicí paměti ROM. Je-li na třetím řídicím vstupu povel pro nulování, pak je registr instrukcí vynulován na stav výstupu 0000.[14]

Realizace:

Obsah registru instrukcí představuje proměnná *ir*. Zápis do registru instrukcí se provádí příkazem:

```
if u41 then begin
  ir:=s;
```

kde *s* je hodnota na sběrnici a *u41* je povel pro zápis do instrukčního registru.

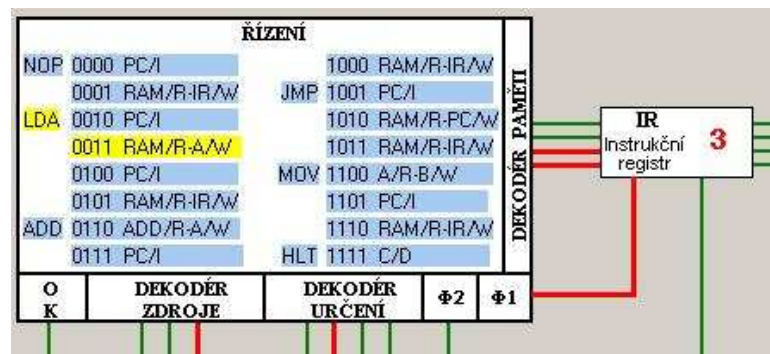
Zvýšení jeho obsahu při příchodu $\Phi 1$ o jedničku je prováděno příkazem:

```
if (a1 and not a2) then
  ir:=ir+1;
if ir=16 then ir:=0;
```

Nulování je prováděno automaticky při přepínání stavů *programování*, *provoz*.

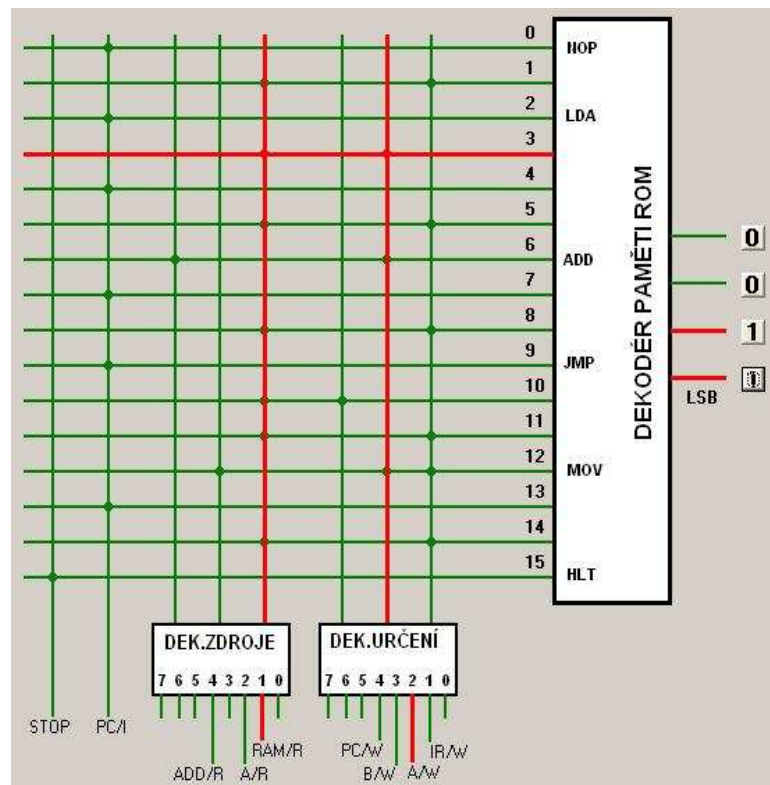
Řízení

Řídicí obvody se skládají z dekodéru adres, řídicí paměti mikroprogramu ROM, dekodéru zdroje a dekodéru určení. Dekodér adres je dekodér 1 ze 16, který aktivuje příslušné adresy v řídicí paměti ROM jako odpověď na přicházející data z registru instrukcí. Řídicí paměť mikroprogramu je 128 bitová paměť ROM, organizovaná jako 16 osmibitových bytů. Každý byte má přidělenou jednu adresu a obsahuje jednu mikroinstrukci. Výstupy dat z paměti ROM jsou připojeny na dva dekodéry 1 z 8, a to dekodér zdroje a dekodér určení. Tyto dekodéry přeměňují mikroinstrukce zakódované ve vybrané adrese paměti ROM na povely zápis a čtení z registrů nebo paměti. Zbylé dva bity vykonávají povel stop hodinových pulsů tedy zastavení činnosti procesoru a povel pro inkrementování programového čítače (zvýšení stavu na jeho výstupu o jedničku).[14]



Obr. 28.4 Řídicí obvody

Na obr. 28.4 je znázorněn stav, při němž do řídicích obvodů přichází binární číslo 0011. To je dekodováno a je aktivovaný třetí řádek paměti ROM. V tomto řádku je uložena část instrukce LDA, tou je mikroinstrukce, která je v dekodéru zdroje a dekodéru určení dekodována na povely čtení z paměti RAM a zápis do registru A.



Obr. 28.5 Struktura řídicích obvodů

Na obr. 28.5 je tato situace rozkreslena ve vnitřní struktuře řídicích obvodů. Činnost kodéru a dekodéru byla popsána v kapitolách 5.2.1 a 5.2.2. Podrobný popis jednotlivých instrukcí bude proveden v následujících kapitolách.

Realizace:

Činnost řídicích obvodů je představována příkazy:

```

if (a1 and not a2) then begin
    if ir=0 then begin label13.Color:=clyellow;
                        label14.Color:=clyellow;
                        ok:=true;
                                end;
    if ir=1 then begin label13.Color:=clyellow;
                        label15.Color:=clyellow;
                        z3:=true; u4:=true;
                        image54.Visible:=true;
                                end;
    if ir=2 then begin label16.Color:=clyellow;
                        label30.Color:=clyellow;
                        ok:=true;
                        image55.Visible:=true;
                                end;          atd...

```

To znamená, že pro každý stav instrukčního registru (proměnná *ir*) je zadáno jaké řídicí povely se mají vykonávat. Proměnné *z1*, *z2*, *z3* znamenají povely pro čtení ze sčítačky, registru A a z paměti RAM na sběrnici, proměnné *u1*, *u2*, *u3*, *u4* představují povely pro zápis hodnoty ze sběrnice do programového čítače, registru B, registru A a registru instrukcí. Dále se zde vyskytuje proměnná *ok*, což je povel pro inkrementování programového čítače. Zároveň se provádí znázornění binárního kódu, který je posílán z registru instrukcí k řídicí jednotce a vybarvování aktivních políček v paměti ROM žlutě. Povel pro zastavení procesoru je realizován pomocí příkazů, které zastaví časovače a zruší zvýraznění ovládacích tlačítek:

```
if ir=15 then begin
    timer1.Enabled:=false;
    timer5.Enabled:=false;
    panel1.color:=clcream;
    panel2.Color:=clcream;
    panel1.bevelinner:=bvnone;
    panel2.bevelinner:=bvnone;
    panel1.bevelouter:=bvnone;
    panel2.bevelouter:=bvnone;
    edit17.Visible:=false;
end;
```

Výraz **if** (*a1 and not a2*) **then begin** zde zastává funkci vyrovnávacího registru, který zasílá obsah instrukčního registru k řídicím obvodům pouze s náběžnou hranou $\Phi 1$. Poslední mikroinstrukcí každého příkazu je totiž povel pro čtení následujícího příkazu z paměti RAM a jeho zápis do instrukčního registru. Při této operaci se nastaví obsah instrukčního registru na hodnotu o jedničku menší než je adresa následujícího příkazu v paměti ROM. Tuto hodnotu však vyrovnávací registr k řídicím obvodům nepošle. K řídicím obvodům se zašle až s náběžnou hranou $\Phi 1$, ale ta je již zvětšena o jedničku a ukazuje tudíž na první řádek požadovaného příkazu. U většiny příkazů by se nic zvláštního nedělo, protože končí stejnou mikroinstrukcí: čtení z RAM - zápis do instrukčního registru. Komplikace by nastala pouze u příkazu NOP (no operation). Před jeho vykonáním je totiž instrukční registr nastaven na hodnotu 1111, což je povel pro ukončení programu. Kdyby tuto hodnotu zaslal instrukční registr k řídicím obvodům, byla by činnost procesoru zastavena.

Protože k zápisu do programového čítače, registru B, registru A, registru instrukcí a k inkrementování programového čítače dochází až s náběžnou hranou hodinového signálu $\Phi 2$, reaguje zapisování hodnot na proměnné *u11*, *u21*, *u31*, *u41* a *ok1*, pro které platí:

```
u11:=u1 and a2;
u21:=u2 and a2;
u31:=u3 and a2;
u41:=u4 and a2;
ok1:=ok and a2;
```

Tyto zápisy představují hradla AND.

Paměť programu RAM

V modelu mikroprocesoru je použita paměť RAM, která je organizována jako šestnáct čtyřbitových slov. Program je zapsán v poli proměnných **array** [1..16] **of integer**; Paměť má vestavěný dekodér adres jeden ze šestnácti. Vstupem do dekodéru adres je čtyřbitové slovo z výstupu programového čítače.

Stav programového čítače je reprezentován proměnnou *p*, nabývající hodnot 0-15. Běžně postupuje čítač programem vždy o jeden krok vpřed, a to při povelu PC/I, který zastupuje proměnná *ok*. Jelikož k inkrementaci dochází až s náběžnou hranou $\Phi 2$, je zde použita proměnná *ok1*.

```
ok1:=ok and a2;  
if ok1=true then p:=p+1;
```

Jestliže je z řídicích obvodů vyslán povel pro zápis do programového čítače (proměnná *u31*), zapíše se do čítače slovo, nacházející se na sběrnici. To je možné při příkazu JMP (jump), který umožňuje skok do jiné části programu:

```
if u31=true then p:=s;
```

U paměti RAM je použita proměnná *rm*, do které se zaznamenává hodnota uložená v aktivním řádku paměti RAM, zároveň dochází k jeho obarvení a ke zobrazení slova v binárním kódu posílaného z čítače do paměti RAM:

```
if p=0 then begin  rm:=ram[1];  
    label35.Color:=clyellow end;  
if p=1 then begin  rm:=ram[2];  
    label36.Color:=clyellow;  
    image117.Visible:=true; end;  
if p=2 then begin  rm:=ram[3];  
    label37.Color:=clyellow;  
    image116.Visible:= true; end;    atd...
```

Paměť RAM je připojena ke společné sběrnici přes třístavový oddělovač. Uložená data nebo instrukce se na sběrnici dostanou povelům pro čtení, který je reprezentován proměnnou *z3*:

```
if z3 then s:=rm;
```

S proměnnou *s* se pracuje dále jako s hodnotou na sběrnici.

Pohyb dat po sběrnici

Dekodér zdroje a dekodér určení v řídicích obvodech vydávají signály pro zápis dat na sběrnici a signály pro čtení dat ze sběrnice. Čtení z RAM na sběrnici se provádí příkazem:

```
if z3 then s:=rm;
```

z3 představuje povel pro čtení z RAM, rm je číslo představující binární slovo v aktuální buňce paměti RAM a s je číslo představující binární slovo na sběrnici. Stejným způsobem je provedeno čtení z registru A:

```
if z2 then s:=a;
```

Před čtením ze sčítačky je provedeno sečtení obsahů registrů A a B a vypsání jeho obsahu:

```
add:=a+b;  
label9.Caption:=inttostr(add);  
if z1 then s:=add;
```

Čtení ze sběrnice se provádí až s náběžnou hranou Φ_2 , proto jsou použity proměnné:

```
u11:=u1 and a2;    u31:=u3 and a2;  
u21:=u2 and a2;    u41:=u4 and a2;
```

Načtení hodnoty ze sběrnice do programového čítače se provádí povelom u31, následuje vypsání hodnoty:

```
if u31 then p:=s;  
label2.Caption:=inttostr(p);
```

Stejným způsobem se provádí čtení ze sběrnice do registrů A, B a do instrukčního registru:

```
if u21 then a:=s;  label5.Caption:=inttostr(a);  
if u11 then b:=s;  label10.Caption:=inttostr(b);  
if u41 then ir:=s;
```

U registrů A, B dochází ještě k obarvování vodičů vedoucích do sčítačky:

```
if a=1 then begin  image181.Visible:=true; end;  
if a=2 then begin  image180.Visible:=true; end;  
if a=3 then begin  image180.Visible:=true;  
                  image181.Visible:=true; end;  
  
atd...
```

Nakonec dochází k obarvení vodičů na sběrnici, pomocí proměnných s1, s2, s3, s4:

```
if s div 8=1 then s4:=true else s4:=false;  
if (s-(8*(s div 8)))div 4=1 then s3:=true else s3:=false;  
if (s-(8*(s div 8))-(4*((s-(8*(s div 8)))div 4)))div 2=1  
then s2:=true else s2:=false;  
if s mod 2=1 then s1:=true else s1:=false;  
  
image121.Visible:=s1;  
image129.Visible:=s1;  
image124.Visible:=s1;  
atd...
```


5.4.3 Ukázka programu

Jako pomůcka jsou v pravém dolním rohu vypsány binární kódy čísel od 0 do 15 a binární kódy příkazů, které máme dispozici (obr. 28.6).

NOP - 1111	0 - 0000
LDA - 0001	1 - 0001
+ číslo	2 - 0010
ADD - 0101	3 - 0011
JMP - 1000	4 - 0100
+ adresa	5 - 0101
MOV - 1011	6 - 0110
HLT - 1110	7 - 0111
	8 - 1000
	9 - 1001
	10 - 1010
	11 - 1011
	12 - 1100
	13 - 1101
	14 - 1110
	15 - 1111

Obr. 28.6 Dostupné příkazy a binární kódy čísel

NOP (no operation) – Příkaz pro „nicnedělání“. Používá se k přidání časového zpoždění k programu, pro rezervování místa v programu k pozdějšímu přidání instrukce, nebo při odstranění instrukce aniž bychom přepisovali celý program.

LDA (load accumulator) – Příkaz pro načtení čísla do registru A. Po tomto příkazu následuje číslo v binárním kódu, které chceme načíst.

ADD (addition) – Příkaz pro sečtení obsahu registrů A a B. Výsledek se vkládá do registru A.

JMP (jump) – Příkaz, který nařizuje programovému čítači, aby skočil k požadované adrese v programové paměti. Po tomto příkazu následuje číslo v binárním kódu (0-15), označující požadovanou adresu v paměti RAM.

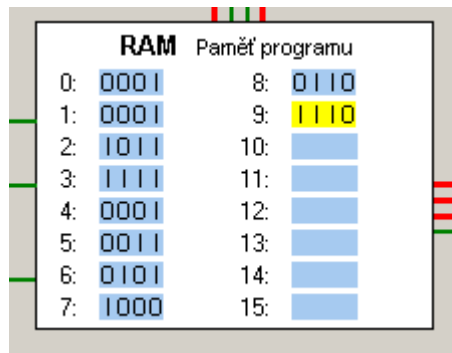
MOV (move) – Příkaz pro načtení obsahu registru A do registru B.

HLT (halt) – Příkaz, který vyřazuje z činnosti hodinové pulsy. Umisťuje se nakonec programu.[14]

Jako příklad pro pochopení činnosti mikroprocesoru je zvolen program, který načte do registru číslo 3 a k tomuto číslu neustále přičítá jedničku.

Mikroprocesor přepneme do stavu programování. Na první místo (řádek 0) v paměti RAM vložíme příkaz LDA pro načtení čísla do registru A. Tlačítka vedle přepínání stavů *programování-provoz*, nastavíme hodnotu 0001. Tlačítkem *zápis do RAM* se provede zapsání tohoto čísla do aktivního (žlutého) řádku paměti RAM. Tlačítkem *krokování* se postoupí na další řádek paměti. Dále následuje číslo 0001, což je číslo 1, které budeme přičítat. Toto číslo přesuneme z registru A do registru B příkazem MOV – 1011. Aby bylo vysvětleno provádění všech dostupných příkazů, je v řádku 3 vložena instrukce NOP – 1111. Dále následují kódy 0001 a 0011, které představují načtení čísla 3 do registru A (LDA, 3). Příkaz ADD (0101) provede sečtení obsahu registrů a zapsání výsledku do registru A. Do dalších řádků paměti vložíme příkaz JMP – 1000 s adresou 0110, která značí, že se má provést skok na 6. řádek paměti. Na tomto řádku se nachází instrukce ADD, která opakovaně přičítá obsah registru B (číslo 1) k obsahu registru A. Na posledním řádku se nachází příkaz HLT – 1110 pro zastavení činnosti mikroprocesoru. Tato instrukce se však provádět nebude,

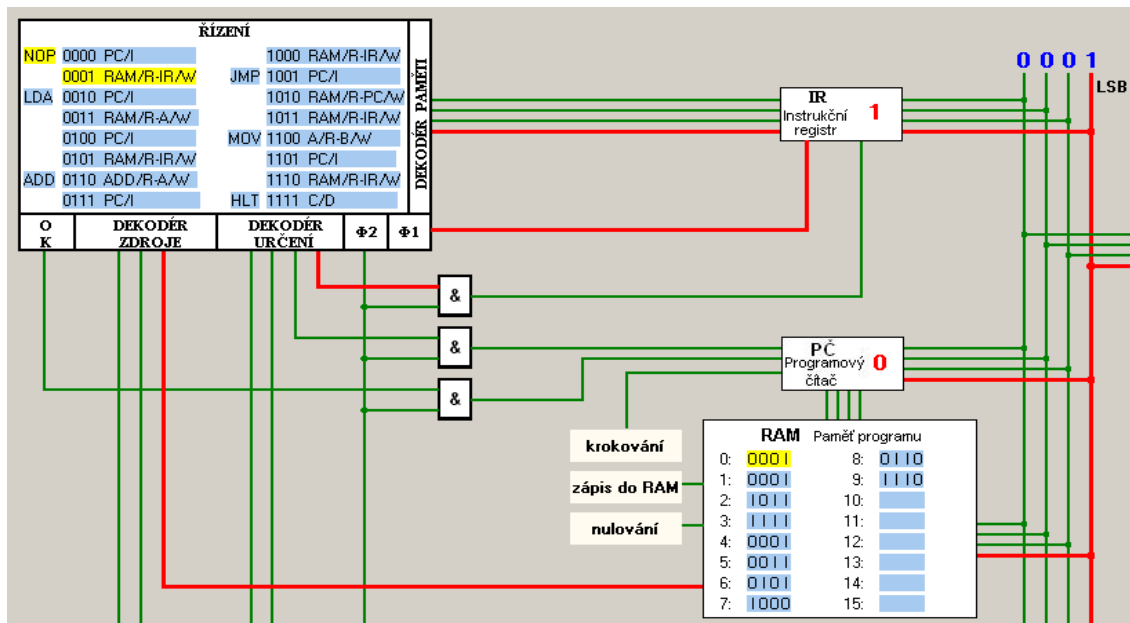
protože se díky příkazu JMP bude neustále provádět přičítání jedničky k obsahu registru A. Zastavení činnosti se v tomto případě musí provést ručně. Na obr. 28.7 je znázorněn program zapsaný v paměti RAM.



Obr. 28.7 Program zapsaný v paměti RAM

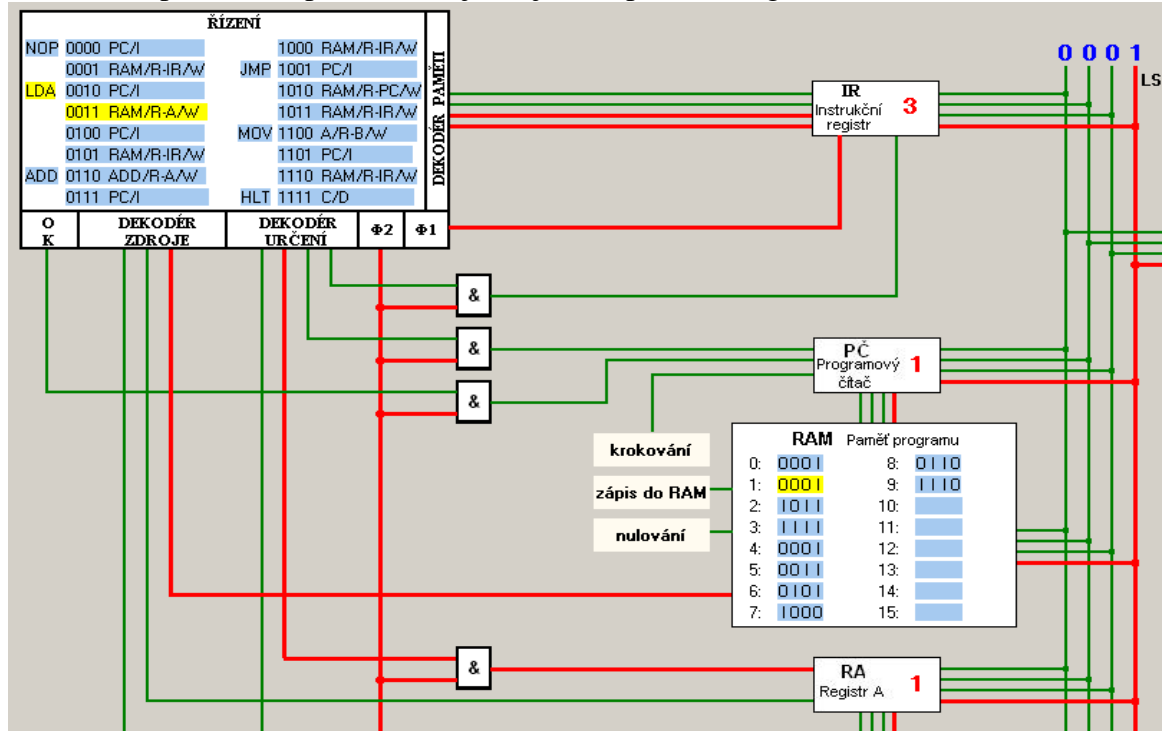
Tímto je programování dokončeno a můžeme přejít k vykonávání programu. Mikroprocesor přepneme do stavu provoz. Tlačítkem *start/stop* se mikroprocesor uvede do činnosti. Máme k dispozici sedm rychlostí vykonávání programu. Program se dále může odkrokovat tlačítkem *ručně*.

Na začátku vykonávání programu je registr instrukcí i programový čítač vynulován. Registr instrukcí tudíž ukazuje na řádek 0000 v paměti ROM. Zde je uložena mikroinstrukce inkrementace programového čítače. Na tuto mikroinstrukci však procesor nereaguje, protože k tomu je třeba hodinový impuls $\Phi 2$ ve stavu *log1*. Příchodem prvního hodinového pulsu $\Phi 1$ dojde ke zvýšení obsahu registru instrukcí o 1, tím je v paměti ROM aktivován řádek 0001, obsahující mikroinstrukci čtení z paměti RAM – zápis do instrukčního registru (obr. 28.8). Z dekodéru zdroje a dekodéru určení jsou vyslány povely pro tyto operace. V paměti RAM je na nulté pozici umístěn příkaz LDA (0001). Toto číslo se ihned načte na sběrnici a s příchodem pulsu $\Phi 2$ (díky hradlu AND) se provede jeho zapsání do instrukčního registru. V tomto případě žádná změna nenastane, protože instrukční registr je na tuto hodnotu již nastaven.



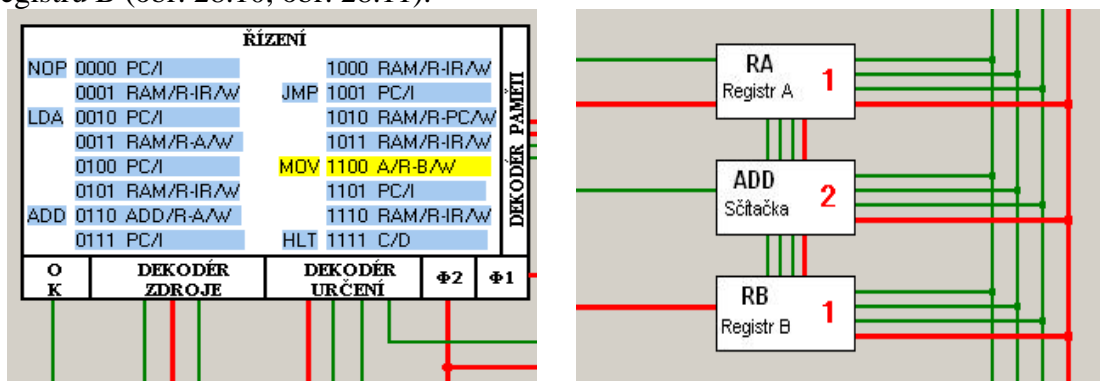
Obr. 28.8 Čtení prvního příkazu z paměti RAM

S příchodem dalšího pulsu $\Phi 1$ se zvýší obsah instrukčního registru na hodnotu 2 a je aktivován řádek 0010 v paměti ROM, s mikroinstrukcí inkrementace programového čítače. S pulsem $\Phi 2$ se zvýší jeho obsah o 1, tím je aktivován následující řádek v paměti RAM. Při dalším kroku se opět postoupí v paměti ROM o řádek dále na mikroinstrukci čtení z paměti RAM – zápis do registru A. Číslo 0001 z paměti RAM se zapíše na sběrnici a s příchodem pulsu $\Phi 2$ dojde k jeho zapsání do registru A (obr. 28.9).



Obr. 28.9 Zápis čísla zRAM do registru A

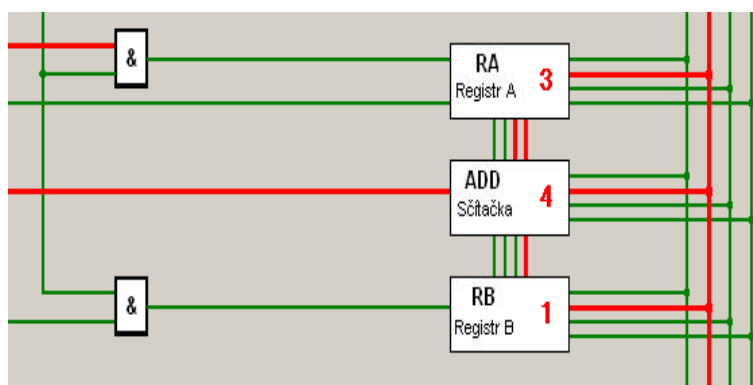
Paměti ROM se pokračuje dále na mikroinstrukce 0100 – inkrementace programového čítače a 0101 – čtení z RAM – zápis do instrukčního registru. Tím skočí čítač programu na následující buňku paměti RAM. Zde je zapsána další instrukce, tou je MOV (1011). Toto číslo se přepíše při $\Phi 2$ do instrukčního registru. 1011 je číslo řádku, který předchází prvnímu řádku s instrukcí MOV. Registr instrukcí obsahuje vyrovnávací registr, který zasílá jeho obsah k řídicím obvodům až s náběžnou hranou $\Phi 1$, to už ale dojde k inkrementaci instrukčního registru, a tudíž aktivuje první mikroinstrukci instrukce MOV. Tou je mikroinstrukce čtení z registru A – zápis do registru B (obr. 28.10, obr. 28.11).



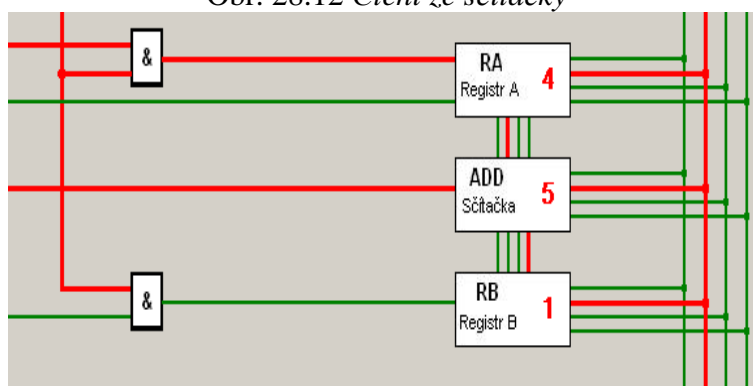
Obr. 28.10 Přepsání obsahu registru A do registru B Obr. 28.11

Po přepsání obsahu registru A do registru B následují opět mikroinstrukce inkrementace programového čítače a zapsání dalšího příkazu do instrukčního registru.

Tímto příkazem je NOP (1111), obsahující pouze dvě mikroinstrukce: inkrementaci programového čítače a načtení další instrukce z RAM do instrukčního registru. Následuje příkaz načtení čísla 3 do registru A (0001, 0011). Operace LDA byla popsána již dříve. Nyní registr A obsahuje číslo 3 a registr B číslo 1, můžeme tudíž přistoupit k jejich sečtení. Výstupy registrů A a B jsou trvale připojeny ke sčítačce, která neustále provádí součet jejich obsahů, proto stačí přepsat obsah sčítačky do registru A. K tomu slouží příkaz ADD (0101), jehož první mikroinstrukce je čtení ze sčítačky – zápis do registru A. Na obr. 28.12 je vidět čtení ze sčítačky na sběrnici. Z řídicích obvodů přichází i povel pro zápis do registru A, ale čeká se na impuls $\Phi 2$ (obr. 28.13).

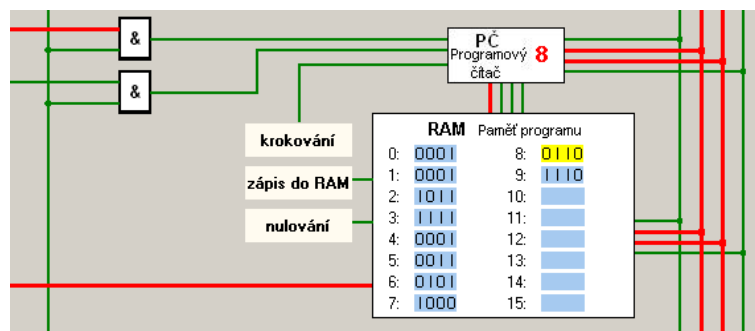


Obr. 28.12 Čtení ze sčítačky

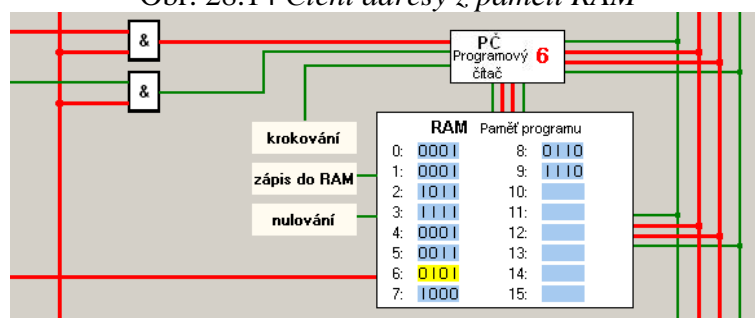


Obr. 28.13 Zápis do registru A

Opět následují mikroinstrukce inkrementace programového čítače a zápis dalšího příkazu do instrukčního registru. Jelikož chceme přičítat k výsledku jedničku, stačí stále opakovat příkaz ADD. K tomu nám poslouží příkaz JMP (1000), umožňující skok na libovolnou buňku v paměti RAM. První mikroinstrukcí tohoto příkazu je inkrementace programového čítače, tím se v paměti RAM aktivuje následující řádek, v němž je uložena adresa, kterou má procesor pokračovat. My potřebujeme skočit zpět na příkaz ADD, který je umístěn na 6. řádku, a proto je zde uloženo číslo 0110. Následuje mikroinstrukce čtení z paměti RAM – zápis do programového čítače. Na obr. 28.14 je vidět čtení požadované adresy na sběrnici, s příchodem $\Phi 2$ se provede zápis této adresy do programového čítače a aktivování požadovaného řádku v paměti RAM (obr. 28.15). Poslední mikroinstrukcí je čtení z paměti RAM – zápis do instrukčního registru. Při této operaci dochází k načtení požadovaného příkazu do řídicích obvodů.



Obr. 28.14 Čtení adresy z paměti RAM



Obr. 28.15 Zápis adresy do programového čítače

Poslední instrukcí, která nebyla zmíněná je HLT. Je to příkaz obsahující pouze jednu mikroinstrukci – zastavení činnosti dvoufázových hodin. Tento příkaz se umísťuje na konec programu. V tomto případě se však procesor až na konec programu nedostane díky příkazu JMP. Zastavení činnosti procesoru se zde musí provést ručně.

Model mikroprocesoru lze spustit buď souborem „d-4-1_procesor.exe“ umístěným ve složce „8_procesor“, nebo souborem „1START.exe“, umístěným ve složce „8_procesor/procesor“. V prvním případě se jedná o samostatný model procesoru. V druhém případě jde o totožný model s tím rozdílem, že po kliknutí na jednotlivé části blokového schéma jsou spuštěny modely těchto součástí. Lze tak postupovat od složitých obvodů až k základním stavebním prvkům.

6 Pedagogický výzkum

6.1 Kvalitativní a kvantitativní typ výzkumu

Existují dva typy pedagogického výzkumu: kvalitativní a kvantitativní. Kvantitativní výzkum pracuje s číselnými údaji, které se dají matematicky zpracovat. Výběr osob je prováděn náhodně, tak aby co nejlépe odpovídal teorii pravděpodobnosti. Výsledkem jsou přesné statistické údaje, které lze zobecnit na celou populaci. Důležitým předpokladem pro kvantitativní výzkum je velký zkoumaný vzorek, aby výsledná statistika měla dostatečnou vypovídací hodnotu. Většinou se používá testovaný a srovnávací vzorek pro zjištění efektu pedagogického působení.

Kvalitativní výzkum uvádí výsledek ve slovní podobě. Zkoumá jevy, které se číselně nedají zachytit. Je zaměřen na určitou skupinu lidí a specifické podmínky. Proto je výběr prováděn cíleně a výsledky nelze zobecňovat.

Tato disertační práce provádí pedagogický výzkum, jehož cílem je zjištění, v jaké míře se používají názorné učební pomůcky a počítačové animace ve výuce elektroniky na technických středních školách. Dále pak hodnocení vytvořených modelů, jejich přínos na motivaci a výsledky studentů. V neposlední řadě výzkum zjišťuje, zda jsou školy technicky vybaveny pro tento způsob vyučování. V tomto případě nebyl předpokládán dostatečně velký vzorek k provedení kvantitativního výzkumu. Navíc byl předpokládán největší vliv učebních pomůcek na motivaci studentů, jež se dá těžko kvantifikovat. Vzhledem k předpokládanému malému počtu respondentů by byl problém i se srovnávacím vzorkem. Z těchto důvodů byl proveden kvalitativní typ výzkumu.

Kvalitativní výzkum vyžaduje určitý stupeň participace pozorovatele. Pozorovatel musí získat přehled o fungování pozorované skupiny, aby mohl objektivně posuzovat pozorované jevy. V našem případě je čas pozorování v jednotlivých třídách pouze několik málo vyučovacích hodin. Je to natolik krátká doba, že by cizí pozorovatel neměl dostatek času proniknout do vzorců chování jednotlivce a skupiny. Jeho účast by působila ve vyučování spíše rušivě. Proto je zde využito zprostředkovaného pozorovatele – učitele, který má přehled o chování a výkonech jednotlivých studentů.

6.2 Výzkum pomocí webového rozhraní

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, je v tomto výzkumu jako pozorovatel využit učitel, který má přehled o dění ve třídě, o výkonech a chování jednotlivých studentů. Může tak objektivně posoudit motivační a výkonnostní vliv použitých animací. Z důvodu zefektivnění výzkumu jsem vytvořil webové stránky, na kterých jsou umístěny vytvořené modely s metodickými návody. Na těchto stránkách je možno vyplnit elektronické dotazníky, které jsou automaticky odesílány ke zpracování. Učitel je tak poskytnut dostatečný prostor pro použití modelů v nejuhodnější chvíli. Výzkumníkovi tak odpadá časově náročné obcházení škol. Vzhledem k širokému spektru testovaných animací by i plánování časového harmonogramu bylo náročné. Adresa stránek je: <http://elektronicke-modely.ic.cz>. Struktura webových stránek je patrná z obr. 29.1.

The image shows two screenshots of a website titled "Elektronické modely".

The top screenshot displays the main navigation menu on the left, including: Úvod, Výzkum, Dotazník pro učitele, Dotazník pro studenty, Návody, Programy analogové (with sub-items: unipolární tranzistory, usměrňovače, klopné obvody, jevy v polovodičích), Programy digitální (with sub-items: hradla, klopné obvody, složitější obvody, procesor). The main content area is titled "Programy analogové - klopné obvody" and includes a note: "Pro otevírání animací doporučuji použít prohlížeč Internet Explorer, nebo Opera, umožňující "spuštění souboru z aktuálního umístění". Below this are two circuit diagrams: "Bistabilní obvod" and "Monostabilní obvod".

The bottom screenshot shows the "Dotazník pro studenty" (Student Survey) section. It features a navigation menu on the left with the same structure as the top screenshot. The main content area contains a survey form with several input fields and checkboxes. The questions are: "Škola - obor", "Ročník", "Používáte v hodinách elektroniky názorné pomůcky? Jaké? (reálné součástky, elektronické stavebnice...)", "Jak často používáte názorné pomůcky? (odhad v % z celkové hodinové dotace)", and "Používáte v hodinách elektroniky 'počítačové pomůcky'? Jaké? (počítačové animace, simulační programy...)".

Obr. 29.1 Struktura webových stránek

6.3 Organizace a cíle výzkumu

Dotazníky jsou rozděleny na dvě části. Cílem první části je zjištění, v jaké míře se při výuce elektroniky používají reálné názorné pomůcky a učební pomůcky virtuální (počítačové). Jaké jsou technické podmínky pro používání počítačových pomůcek. Jaký vliv má na studenty používání těchto učebních pomůcek (motivační, vědomostní). Cílem druhé části je zjištění použitelnosti animací vytvořených v této disertační práci a hodnocení jejich přínosu do vyučování.

Předpokládal jsem, že pohled učitele a studenta se v otázkách používání učebních pomůcek a jejich pedagogického přínosu bude lišit. Z tohoto důvodu jsem dotazníky vyhotovil ve dvou variantách: dotazník pro studenty – dotazník pro učitele. Studentský dotazník je na výše uvedených webových stránkách volně přístupný. Učitelův dotazník je chráněn proti zneužití studenty zaheslováním. Heslo pro přístup do učitelův dotazníku je „traktor“. Výzkum si mimo jiné klade za cíl porovnat názory učitele a studenta na používání různých typů učebních pomůcek.

Otázky v dotazníku pro studenty:

- Škola - obor
- Ročník
- Používáte v hodinách elektroniky názorné pomůcky? Jaké?
(reálné součástky, elektronické stavebnice...)
- Jak často používáte názorné pomůcky? (odhad v % z celkové hodinové dotace)
- Používáte v hodinách elektroniky "počítačové pomůcky"? Jaké?
(počítačové animace, simulační programy...)
- Jak často používáte "počítačové pomůcky"?
(odhad v % z celkové hodinové dotace)
- Vliv používaných názorných učebních prostředků
(zajímavější vyučování, větší porozumění, lepší výsledky...)

- Použité modely
- Způsob použití (ve škole x samostudium doma...)
- Zaujetí (Bylo vyučování/učení zajímavější/snesitelnější...?)
- Porozumění (Měly animace vliv na lepší pochopení problematiky...?)
- Čas strávený učením (Trvalo učení kratší/delší dobu...?)
- Obtížnost (Jsou animace přehledné, nebo zbytečně složité..? Popř. které..?)
- Další postřehy, připomínky, dotazy (Co v dotazníku chybí...?)

Otázky v dotazníku pro učitele:

- Škola - obor
- Váš věk
- Délka Vaší učitelské praxe
- Používáte v hodinách elektroniky názorné pomůcky? Jaké?
(reálné součástky, elektronické stavebnice...)

- Jak často používáte názorné pomůcky? (odhad v % celkové hodinové dotace)
- Používáte v hodinách elektroniky "počítačové pomůcky"? Jaké?
(počítačové animace, simulační programy...)
- Technické podmínky pro používání "počítačových pomůcek"
(data-projektor, počítačová učebna...,případné technické obtíže)
- Jak často používáte "počítačové pomůcky"? (odhad v % celkové hodinové dotace)
- Vliv používaných názorných učebních prostředků na studenty
(motivace, pozornost, porozumění, výsledky...)

- Použité modely
- Ročník, ve kterém byly animace použity
- Způsob použití (motivační, výklad, samostudium...)
- Motivační vliv na studenty (pozornost/nepozornost, vliv na problémové studenty)
- Vědomostní vliv na studenty (prokazatelně lepší/horší, bez vlivu...)
- Obtížnost použitých modelů
(přiměřenost vzhledem k typu školy, ročníku...,přehlednost jednotlivých modelů...)
- Další postřehy, připomínky, dotazy (Co v dotazníku chybí...?)

Celkem bylo osloveno 75 učitelů elektroniky z 34 odborných škol zaměřených na elektrotechniku. Seznam kontaktů je obsahem přílohy B.

Sběr dat probíhal jeden školní rok. Zkušební provoz byl spuštěn začátkem června 2011. Další výzva k vyplnění dotazníků byla rozeslána na začátku školního roku 2011/2012. Sběr dat byl ukončen na konci května 2012.

6.4 Zpracování a výsledky výzkumu

Dle očekávání nebyla účast příliš vysoká. Z celkového počtu 75 oslovených odeslalo vyplněné dotazníky 23 učitelů. Data jsou obsahem přílohy C. Dotazníky pro studenty nebyly zpracovány z důvodu jejich malého počtu a nedostatečné vypovídající schopnosti. I přes nízkou účast přináší tento výzkum několik závěrů.

V průběhu výzkumu byly na základě došlých dotazníků zformulovány následující hypotézy.

A) Hypotézy týkající se obecně používání názorných pomůcek a počítačových modelů:

1. Míra používání počítačových modelů je závislá na věku a délce praxe učitele. (Děle sloužící učitelé se přiklánějí spíše k tradičním výukovým metodám pomocí reálných součástek a obvodů.)
2. Technické vybavení škol je dostatečné pro používání počítačových modelů.
3. Počítačové modely a animace mají vliv především na zvýšení pozornosti studentů.
4. Na vědomosti nemají tyto modely zásadní vliv.

B) Hypotézy týkající se modelů vytvořených v rámci disertační práce:

1. Tyto modely jsou použitelné pro vyučování elektroniky na středních odborných školách.
2. Tyto modely a animace mají vliv především na zvýšení pozornosti studentů.
3. Na vědomosti nemají tyto modely vliv.

add A1

Tato část je kvantitativního charakteru a je statisticky zpracována. Je zde ověřována závislosti míry používání počítačových a reálných modelů na věku a délce praxe učitele. Dále jsou v této části vypočítány průměrné hodnoty míry používání reálných učebních pomůcek a pomůcek virtuálních.

Věk učitele	Délka praxe	Reálné pomůcky	PC pomůcky	Poměr PC/real
31	11	15	50	3,33
44	11	20	25	1,25
48	23	25	15	0,60
50	6	40	15	0,38
62	10	30	30	1,00
45	21	25	25	1,00
28	3	30	40	1,33
41	17	15	20	1,33
56	14	20	30	1,50
38	9	50	15	0,30
26	2	20	10	0,50
47	18	25	30	1,20
53	19	15	10	0,67

32	6	25	25	1,00
29	3	30	40	1,33
39	8	20	30	1,50
42	17	30	40	1,33
59	6	50	15	0,30
37	12	15	50	3,33

Tabulka 2 *Používání učebních pomůcek v závislosti na věku učitele*

Při náhodném výběru rozsahu n z dvourozměrného normálního rozdělení se pro test hypotézy $H_0: \rho = 0$

používá testové kritérium $\frac{R\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-R^2)}}$,

kde R je výběrový korelační koeficient.

Tato veličina má při platnosti H_0 rozdělení $t(n-2)$

Předpokládáme, že dvourozměrné rozdělení veličin X a Y je alespoň přibližně normální. Testujeme hypotézu $H_0: \rho = 0$ (Mezi věkem učitele a mírou používání reálných učebních pomůcek neexistuje korelace.) proti alternativní hypotéze $H_1: \rho \neq 0$ (Existuje korelace). Výběrový korelační koeficient vypočítáme podle vzorce

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}}$$

Po dosazení dostáváme $r_{xy} = \frac{473}{\sqrt{(2033 \cdot 2042)}} = 0,23$

Po dosazení do testového kritéria dostáváme $\frac{0,23\sqrt{(19-2)}}{\sqrt{(1-0,23^2)}} = 1,04$

Kritický obor je vymezen intervalem $(t_{1-\alpha}; \infty)$. Kvantil $t_{(0,95)}$ pro $n-2=17$ stupňů volnosti je roven 1,74. Hodnota testového kritéria 1,04 nepatří do kritického oboru, takže s pravděpodobností 0,95 neexistuje korelace mezi věkem učitele a mírou používání reálných učebních pomůcek.

Výše uvedeným způsobem bylo otestováno celkem šest možných závislostí mezi zjištěnými daty:

- 1) Závislost mezi věkem učitele a mírou používání reálných učebních pomůcek.
- 2) Závislost mezi věkem učitele a mírou používání PC učebních pomůcek.
- 3) Závislost mezi věkem učitele a poměrem používání PC/reálných učebních pomůcek.
- 4) Závislost mezi délkou praxe učitele a mírou používání reálných učebních pomůcek.
- 5) Závislost mezi délkou praxe učitele a mírou používání PC učebních pomůcek.

- 6) Závislost mezi délkou praxe učitele a poměrem používání PC/reálných učebních pomůcek.

Z výsledků testů vyplývá že ani v jednom případě na hladině pravděpodobnosti 0,95 neexistuje korelace mezi těmito veličinami. Kompletní výpočty a výsledky jsou obsahem přílohy D.

Dále z těchto dat vyplývá, že reálné i počítačové učební pomůcky jsou používány přibližně stejnou měrou – průměrně ve 26% vyučovacích hodin.

add A2

Z průzkumu vyplývá, že technická vybavenost škol pro používání počítačových modelů je vesměs dostatečná. Na každé škole je k dispozici počítačová učebna, data-projektor, případně interaktivní tabule.

add A3

Téměř jednoznačně se učitelé shodují, že počítačové modely mají vliv na motivaci studentů, především ve formě zvýšení jejich pozornosti.

Zde cituji jednu odpověď, která mluví za všechny:

„...samozřejmě je používám, ale jednak jen v poměrně omezené míře, a jednak daleko raději "on the fly" než předem připravené (pochopitelně jsou i kapitoly na které mám připravené věci a vím proč to tak dělám). Vynikající je na to například software Wolfram Mathematica a samozřejmě i web Wolfram Alpha. Je úžasné, že můžete na přímý a často dost komplikovaný dotaz studenta otevřít Mathematicu nebo Alpha a během minuty – dvou zcela zřetelně na plátně demonstrovat požadovaný jev. To pak ve třídě nastává jak já to nazývám "efekt otevřených hub" a ozývá se pro pedagoga slastné: "ty vole (to samozřejmě říká student svému spolužákovi, ne mne), konečně po třech letech jsem to pochopil.“

add A4

Vliv počítačových modelů na vědomosti studentů nelze potvrdit ani vyvrátit. Polovina učitelů není schopna zhodnotit rozdíl ve výkonech studentů s použitím PC modelů a bez nich. Přibližně 35% učitelů uvádí lepší porozumění vlivem zvýšené pozornosti a názornosti. Zbytek (15%) učitelů je skeptický vůči vlivu těchto pomůcek na výkony studentů.

Zde cituji dvě odpovědi:

„Počítačové pomůcky zlepšují motivaci a porozumění. Jsou však pouze doplněním výuky. Žáci si většinou nedovedou pořádně zapsat závěry je problematičké. Praktická cvičení jsou z hlediska efektivity podstatně výhodnější.“

„Motivace pochybná, žáci sice sledují, ale nejsou schopni ani ochotni si udělat samostatně poznámky, porozumění snad ale částečně, výsledky jsou minimální. Je to ale žádoucí trend – tyto trendy se objevují periodicky od 60. let – tehdy "programové vyučování, primitivní učící programy" - účinnost dnes asi stejně malá, žádoucí např. při hospitaci.“

Z odpovědí vyplývá, že z hlediska porozumění, zapamatování a pochopení širších souvislostí jsou efektivnější elektronické stavebnice v kombinaci praktickými cvičeními. Počítačové modely jsou výhodné zvláště pro zvýšení pozornosti a jako doplněk výuky pro větší názornost.

add B1

Více než polovina modelů obsažených v této práci byla původně vytvořena pro potřeby vybraných elektronických předmětů na pedagogické fakultě. Posléze byly upraveny tak, aby byly použitelné i pro vyučování na středních odborných školách. Z dotazníků vyplývá, že animace jsou vesměs použitelné a přiměřené pro střední školy. Vyjimku tvoří animace jevů v polovodičích. Ty jsou modelovány na základě pásové teorie, která standardně není obsahem středoškolského učiva. Myšlenka zařazení těchto modelů byla jako nadstavbové učivo pro nadané studenty. Jejich zařazení se u učitelů nesešlo s velkým úspěchem. Faktum je, že výklad jiného principu jevů může působit spíše matoucně.

add B2, B3

Pro hypotézy užitečnosti modelů vytvořených v této práci platí stejné závěry jako závěry pro A3, A4. Učitelé se shodují v jejich motivačním přínosu (především ke zvýšení pozornosti studentů). Přínos vědomostní nelze potvrdit. Ukazuje se, že z hlediska zapamatování učiva jsou výhodnější praktická cvičení (zapojování obvodů, měření) v kombinaci s počítačovými měřicími systémy.

7 Hodnocení výsledků práce a závěr

Tato disertační práce se zabývá rozbořem problematiky počítačových modelů používaných ve výuce elektroniky a jejich tvorbou. Má několik cílů popsanych v kapitole 2.

V první části práce jsou rozebrány obecné otázky týkající se modelů: jejich klasifikace, funkce modelů ve vědě a ve vyučování, pedagogicko-psychologický význam v kognitivních procesech. Zde jsem se pokusil provést kategorizaci počítačových modelů. Ukázalo se, že samostatná klasifikace není třeba – modely lze zařadit do stávajícího systému. Do této části jsem zařadil i kapitolu týkající se výběru obvodů a součástek, idealizace skutečnosti, barevného zpracování a výběru vhodného programovacího prostředí.

Druhá část práce obsahuje popisy vytvořených modelů. Programy jsou uloženy na příloženém CD. Při výběru prostředků jsem se rozhodoval mezi prostředím Java a Delphi. Nakonec jsem se rozhodl pro programování v jazyce Delphi. Nevýhodou oproti Java apletům 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 i na historických počítačích (konfigurace: Pentium 150 MHz, 32 MB RAM, Windows 95) bez potřeby instalace jakéhokoliv softwaru. Vytvořil jsem celkem 35 animací z oblasti analogové a digitální elektroniky. U každé skupiny je zařazena kapitola „Didaktický cíl“ uvádějící požadavky na zobrazované děje. Tato část může pomoci učitelům při stanovování výukových cílů. Každá kapitola obsahuje teorii k modelované problematice, komentované výpisy zdrojového kódu a metodické návody pro zařazení do výuky. Některé z modelů byly vytvořeny již v rámci mé diplomové a rigorózní práce a byly úspěšně zařazeny do výuky jako podpora vybraných elektronických předmětů na pedagogické fakultě. Všechny animace jsou volně dostupné na webových stránkách www.elektronicke-modely.cz, které jsem vytvořil za účelem pedagogického výzkumu. Z výzkumu vyplývá, že animace vytvořené v této práci jsou použitelné pro výuku elektroniky na středních odborných školách. Kontroverzní zůstává pouze skupina animací jevů v polovodičích na základě pásové teorie, která není na středních školách standardně zařazena. Pedagogický přínos vytvořených animací je obdobný jako u ostatních PC modelů (viz. níže).

Třetí část práce obsahuje pedagogický výzkum. Za tímto účelem jsem vytvořil webové stránky, kde jsou umístěny vytvořené animace, didaktické návody a vzorový výklad. Zde je možné vyplnit a odeslat elektronické dotazníky. Z výzkumu vyplývá, že reálné i počítačové učební pomůcky jsou používány přibližně stejnou měrou – průměrně ve 26% vyučovacích hodin. Závislost míry používání různých pomůcek na věku a délce praxe učitele nelze potvrdit. Pedagogický přínos PC modelů je především motivační (prokazatelný vliv na zvýšení pozornosti studentů). Vliv na výkony studentů nelze potvrdit. Ukazuje se, že z hlediska zapamatování učiva jsou výhodnější praktická cvičení (zapojování obvodů, měření) v kombinaci s počítačovými měřicími systémy.

8 Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 1 Rozdělení vyučovacích prostředků	14
Tabulka 2 Používání učebních pomůcek v závislosti na věku učitele	163
Obr. 1.1 ISES připojený na elektronickou stavebnici	17
Obr. 1.2 ORCAD – simulace astabilního obvodu	17
Obr. 1.3 Fotodioda ve virtuální laboratoři	18
Obr. 1.4 Pásové schéma P-N přechodu	18
Obr. 2.1 Zvyšování napětí U_{GS} , při malé hodnotě napětí U_{DS}	26
Obr. 2.2 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 0$ V	26
Obr. 2.3 Provedení modelu tranzistoru JFET	27
Obr. 2.4 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0$ V	30
Obr. 2.5 Při malém napětí U_{DS} má kanál po celé délce téměř stejný účinný průřez	30
Obr. 2.6 V-A charakteristiky tranzistoru JFET	31
Obr. 2.7 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 1$ V	31
Obr. 3.1 Vznik inverzní vrstvy	32
Obr. 3.2 Průchod proudu po překročení prahového napětí	33
Obr. 3.3 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 5$ V	34
Obr. 3.4 Výstupní a převodní charakteristika tranzistoru MOSFET	34
Obr. 3.5 Provedení modelu tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem	35
Obr. 3.6 Struktura tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem	38
Obr. 3.7 Zvyšování napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0$ V	39
Obr. 3.8 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem	39
Obr. 3.8 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 4$ V	40
Obr. 4.1 Rozdíly tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem a zabudovaným kanálem	41
Obr. 4.2 Provedení modelu tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem	42
Obr. 4.3 Provedení zabudovaného kanálu	42
Obr. 4.4 Provedení zabudovaného kanálu	43
Obr. 4.5 Provedení zabudovaného kanálu	43
Obr. 4.6 Struktura tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem	45
Obr. 4.7 Změna napětí U_{GS} , při $U_{DS} = 0$ V	45
Obr. 4.8 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem	46
Obr. 4.9 Zvyšování napětí U_{DS} , při $U_{GS} = 2$ V	46
Obr. 5.1 Jednocestný usměrňovač	47
Obr. 5.2 Model jednocestného usměrňovače	48
Obr. 6.1 Dvojcestný usměrňovač	49
Obr. 6.2 Model jednocestného usměrňovače	49
Obr. 7.1 Můstkový usměrňovač	51
Obr. 7.2 Model jednocestného usměrňovače	51
Obr. 8.1 Bistabilní obvod	52
Obr. 8.2 Překlápění bistabilního obvodu do stabilního stavu po připojení zdroje	56
Obr. 9.1 Monostabilní obvod	58
Obr. 9.2 Provedení modelu monostabilního obvodu	59
Obr. 9.3 Překlápění monostabilního obvodu do stabilního stavu po připojení zdroje ...	62
Obr. 9.4 Průběhy napětí po připojení zdroje	62
Obr. 9.5 Kvazistabilní stav	63
Obr. 9.6 Průběhy napětí při kvazistabilním stavu	63

Obr. 9.7 Doba trvání kvazistabilního stavu	64
Obr. 10.1 Astabilní obvod	65
Obr. 10.2 Provedení modelu astabilního obvodu	66
Obr. 10.3 Diferenciace bázových proudů po připojení zdroje napětí	70
Obr. 10.4 Průběhy napětí: Δt_1 – připojení zdroje, Δt_2 – 1. kvazistabilní stav,	70
Δt_3 – 2. kvazistabilní stav	70
Obr. 10.5 1. Kvazistabilní stav	71
Obr. 10.6 2. kvazistabilní stav	71
Obr. 10.7 Průběhy napětí při různých parametrech	72
Obr. 11.1 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič N	74
Obr. 11.3 Struktura kov-polovodič N při vnějším napětí v závěrném a propustném směru	75
Obr. 11.3 Energetické hladiny oddělených a spojených částí kov-polovodič P	75
Obr. 11.4 Struktura kov-polovodič P při vnějším napětím v závěrném a propustném ...	76
Obr. 11.5 Provedení modelu kov-polovodič N	76
Obr. 11.6 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-N	81
Obr. 11.7 Připojení vnějšího napětí v závěrném směru	81
Obr. 11.8 Připojení vnějšího napětí v propustném směru	82
Obr. 11.9 Difúze elektronů a vznik hradlové vrstvy po spojení oddělených částí kov-P	82
Obr. 11.10 Připojení vnějšího napětí v závěrném a propustném směru	83
Obr. 11.11 Schottkyho dioda s V-A charakteristikou	83
Obr. 12.1 Energetické hladiny struktury P-N v rovnovážném stavu bez vnějšího napětí	84
Obr. 12.2 Struktura P-N s vnějším napětím v závěrném a propustném směru	85
Obr. 12.3 Provedení modelu P-N přechodu	86
Obr. 12.4 Oddělené části polovodič P, polovodič N	90
Obr. 12.5 Koncentrace nositelů náboje v oddělených částech P a N	90
Obr. 12.6 Rovnovážný stav po spojení částí P a N	91
Obr. 12.7 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu	91
Obr. 12.8 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v závěrném směru	92
Obr. 12.9 Koncentrace nositelů náboje při závěrném napětí na P-N přechodu	92
Obr. 12.10 V-A charakteristika P-N přechodu – závěrný proud	93
Obr. 12.11 Připojení vnějšího napětí na P-N přechod v propustném směru	93
Obr. 12.12 Koncentrace nositelů náboje na P-N přechodu při průchodu proudu	93
Obr. 12.13 Usměrnovací dioda s V-A charakteristikou	94
Obr. 13.1 Princip Zenerova jevu	95
Obr. 13.2 Provedení modelu Zenerova jevu	96
Obr. 13.3 P-N přechod bez připojení vnějšího napětí	99
Obr. 13.4 P-N přechod po připojení vnějšího napětí v závěrném směru	99
Obr. 13.5 Tunelování elektronů přes energeticko bariéru	100
Obr. 13.6 Stabilizační dioda s V-A charakteristikou	100
Obr. 14.1 Princip lavinového jevu	101
Obr. 14.2 Provedení modelu lavinového jevu	102
Obr. 14.3 P-N přechod bez vnějšího napětí, zobrazeny jsou i minoritní nositelé	104
Obr. 14.5 Při menším napětí než je napětí průrazné,	105
stabilizační diodou téměř neprochází proud	105
Obr. 14.6 Nárazovou ionizací se elektrony dostávají do vyšších energetických hladin	106
Obr. 14.7 Stabilizační dioda s V-A charakteristikou po dosažení průrazného napětí..	106
Obr. 15.1 Silně dotovaný P-N přechod a připojení malého napětí v propustném směru	107
Obr. 15.2 Zvyšování napětí v propustném směru	107

Obr. 15.3 Připojení napětí v závěrném směru	107
Obr. 15.4 Provedení modelu tunelového jevu	108
Obr. 15.5 Tunelování elektronů po připojení malého napětí v propustném směru	110
Obr. 15.6 Zvýšení napětí v propustném směru.....	110
Obr. 15.7 Při dalším zvýšení napětí se struktura chová jako standardní P-N přechod	111
Obr. 15.8 Po připojení napětí v závěrném směru dochází k tunelování elektronů	111
Obr. 15.9 Tunelová dioda připojená ke zdroji napětí.....	111
Obr. 16.1 Různé druhy excitace	112
Obr. 16.2 Princip fotovoltaického jevu	112
Obr. 16.3 Provedení modelu fotoelektrických jevů	113
Obr. 16.4 Fotovoltaický jev.....	116
Obr. 16.5 Elektroluminiscenční jev.....	116
Obr. 17.1 Princip tranzistorového jevu	117
Obr. 17.2 Provedení modelu tranzistorového jevu	118
Obr. 17.3 Zvyšování závěrného napětí na přechodu báze-kolektor.....	121
Obr. 17.4 $U_{bc} = 0 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, přechodem báze-emitor prochází proud.....	121
Obr. 17.5 $U_{bc} = 10 \text{ V}$, $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, elektrony z emitoru procházejí	122
přes tenkou bázi do kolektoru	122
Obr. 18.1 Vnitřní struktura hradla NAND.....	123
Obr. 18.2 Typy hradel a jejich pravdivostní tabulky - zleva NOT, AND, NAND	123
Obr. 18.3 Typy hradel a jejich pravdivostní tabulky - zleva OR, NOR, XOR.....	124
Obr. 18.4 Realizace modelu hradla NAND.....	124
Obr. 18.5 Model hradla NAND.....	125
Obr. 19.2 Detail propojů kodéru	126
Obr. 19.1 Kodér	126
Obr. 20.1 Tříbitový dekodér.....	128
Obr. 20.2 Čtyřbitový dekodér	129
Obr. 21.1 Jednabitová sčítačka.....	130
Obr. 21.2 Dvoubitová sčítačka	130
Obr. 21.3 Čtyřbitová sčítačka	131
Obr. 22.1 Čtyřbitový registr.....	132
Obr. 22.2 Třístavové hradlo NAND	132
Obr. 23.1 Čtyřbitový čítač.....	134
Obr. 24.1 Funkce RS klopného obvodu.....	136
Obr. 24.2 Realizace RS klopného obvodu.....	136
Obr. 25.1 Funkce R-S-T klopného obvodu.....	138
Obr. 25.2 Realizace R-S-T klopného obvodu	139
Obr. 26.1 Funkce D klopného obvodu	140
Obr. 26.2 Realizace D klopného obvodu	141
Obr. 27.1 JK klopný obvod	142
Obr. 27.2 Realizace J-K klopného obvodu	142
Obr. 28.1 Model mikroprocesoru	144
Obr. 28.2 Zápis programu do paměti	145
Obr. 28.3 Dvoufázové hodiny	147
Obr. 28.4 Řídící obvody	148
Obr. 28.5 Struktura řídicích obvodů	149
Obr. 28.6 Dostupné příkazy a bnární kódy čísel.....	153
Obr. 28.7 Program zapsaný v paměti RAM	154
Obr. 28.8 Čtení prvního příkazu z paměti RAM	154
Obr. 28.9 Zápis čísla zRAM do registru A.....	155

Obr. 28.10 <i>Přepsání obsahu registru A do registru B</i>	155
Obr. 28.12 <i>Čtení ze sčítačky</i>	156
Obr. 28.13 <i>Zápis do registru A</i>	156
Obr. 28.14 <i>Čtení adresy z paměti RAM</i>	157
Obr. 28.15 <i>Zápis adresy do programového čítače</i>	157
Obr. 29.1 <i>Struktura webových stránek</i>	159

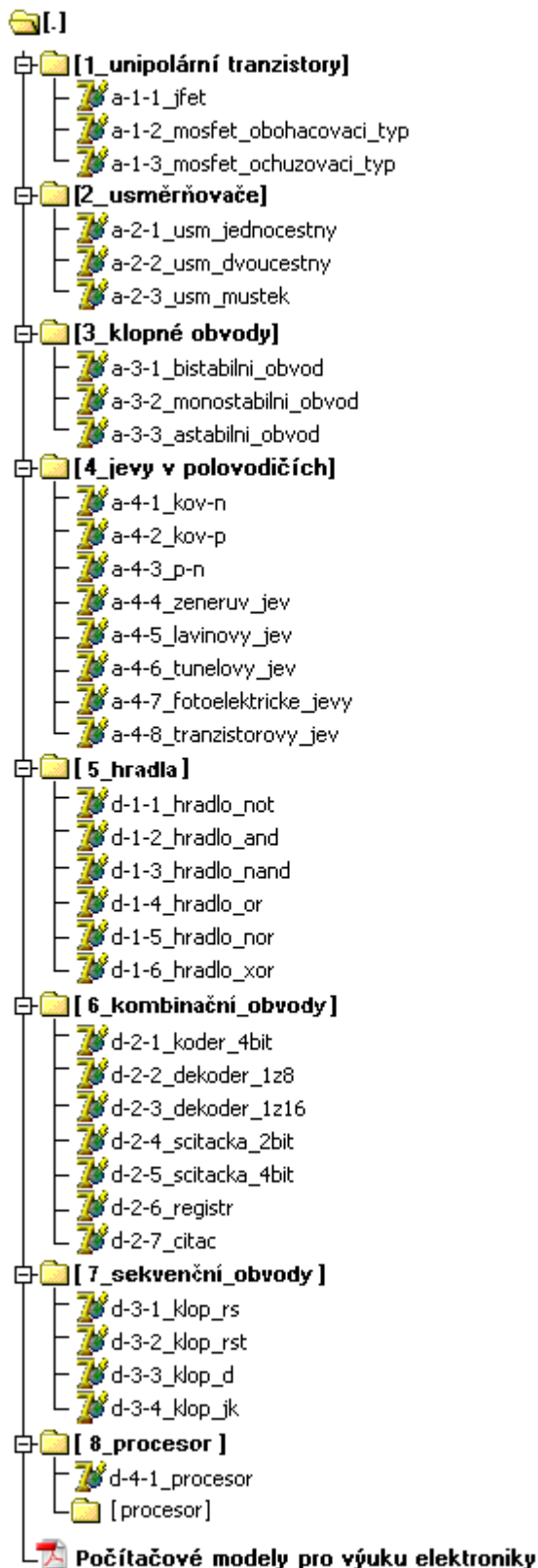
9 Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] BOGART, T. F. 1992. Introduction to Digital Circuits, Glencoe, Macmillan/McGraw-hill, Lake Forest
- [2] CANTÚ, M. 1999. Delphi 4. Grada publishing. Praha.
- [3] CANTÚ, M. 1995. Mistrovství v Delphi. Computer Press.
- [4] ČÁBALOVÁ, D. 2011. Pedagogika. Grada Publishing. Praha.
- [5] ČÁP, J., MAREŠ, J. 2001. Psychologie pro učitele. Portál. Praha.
- [6] FONTANA, D. 1997. Psychologie ve školní praxi. Portál. Praha.
- [7] GAVORA, P. 2010. Úvod do pedagogického výzkumu. Paido. Brno
- [8] HEBÁK, J., KAHOUNOVÁ, J. 1988. Počet pravděpodobnosti v příkladech. STNL. Praha
- [9] JANŮ, K. 1986. Instrukční soubor ASM 86, ČSVTS.
- [10] KALHOUS, Z., OBST, O. 2002. Školní didaktika. Portál. Praha.
- [11] KAŠPAR, E. 1978. Didaktika fyziky. SPN. Praha.
- [12] MAREŠ, J., GAVORA, P. 1999. Anglicko-český pedagogický slovník english-czech educational dictionary. Portál. Praha.
- [13] MIŇHOVÁ, J.: 2003. Vybrané kapitoly z pedagogické psychologie. ZČU. Plzeň.
- [14] PETŘÍK, J., RAUNER, K. 2003. Elektronika (digitální část), ZČU. Plzeň.
- [15] PRŮCHA, J. 2000. Přehled pedagogiky. Portál. Praha.
- [16] PRŮCHA, J. 2002. Moderní pedagogika. Portál. Praha.
- [18] PRŮCHA, J., WALTEROVÁ, E., MAREŠ, J.: Pedagogický slovník. Portál. Praha
- [18] RAUNER, K. 2001. Elektronika (analogová část). ZČU. Plzeň.
- [19] SLOOP J. G. 1995. Základy elektroniky, ELCOM Education.
- [20] SKALKOVÁ, J. 2007. Obecná didaktika. Grada Publishing. Praha.
- [21] SVOBODA, E., KOLÁŘOVÁ, R. 2006. Didaktika fyziky základní a střední školy, Vybrané kapitoly. Karolinum. Praha.
- [22] SZACHTOVÁ, A. a kol. 2000. Vybrané kapitoly z pedagogické psychologie. ZČU. Plzeň.
- [24] VÁGNEROVÁ, M. 2002. Kognitivní a sociální psychologie žáka základní školy. Karolinum. Praha.
- [24] VACHEK, J., LEPIL, O. 1980. Modelování a modely ve vyučování fyzice. SPN. Praha.
- [25] VALÁŠEK, P. 1986. Mikroprocesor 8086. ČSVTS.
- [26] VALIŠOVÁ, A., KASÍKOVÁ, H. 2007. Pedagogika pro učitele. Grada publishing. Praha.
- [28] VANÍČEK, F. 2004. Elektronické součástky – Principy, vlastnosti, modely. ČVUT. Praha.
- [28] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. 2005. Elektronika – Součástky a obvody, principy a příklady. Grada publishing. Praha.

- [29] <http://remote1.kev.zcu.cz/>
- [30] <http://www.ises.info/index.php/en/ises>
- [31] <http://www.ni.com/webappdemos/tempcontroldemo.htm>
- [32] <http://remote1.kev.zcu.cz/ro/robo.htm>
- [33] http://kdt-4.karlov.mff.cuni.cz/vacharakteristika_2.html
- [34] <http://kdt-17.karlov.mff.cuni.cz/pruzina.html>
- [35] <http://kdt-20.karlov.mff.cuni.cz/>
- [36] <http://jas.eng.buffalo.edu/>
- [37] <http://elektrotechnickestavebnice.xf.cz/>
- [38] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electronic/nand.html>
- [39] <http://cs.wikipedia.org>

10 Přílohy

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



Příloha B – Seznam oslovených škol a učitelů.

Název školy	E-mail – vedení školy	E-mail – učitelé elektroniky
Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická Františka Křížíka, Praha 1, Na Příkopě 16	kancelar@vosaspsekrizik.cz	u-sladecek@vosaspsekrizik.cz, u-suchy@vosaspsekrizik.cz, u-potmesil@vosaspsekrizik.cz
Střední průmyslová škola elektrotechnická V Úžlabině 320 100 00 Praha 10	bukovska@uzlabina.cz	fukatko@uzlabina.cz, paryzek@uzlabina.cz, sindelka@uzlabina.cz,
SPŠE a ZDVPP spol. s.r.o. Svatováclavská 1404, Žatec	info@zatecsspse.cz	kontakty nenalezeny
Střední škola průmyslové elektrotechniky ELTODO, Praha, s.r.o., Praha-Kobylisy, Chabařovická 1125/4	sspe@eltodo.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola elektrotechnická, Gen. Svobody 2, 789 85 Mohelnice	klems@spsemoh.cz	opl@spsemoh.cz, vesely@spsemh.cz , divis@spsemoh.cz
Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc, Božetěchova 3	henkl@spseol.cz, sekretari@spseol.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická, Dukelská 13, 371 45 České Budějovice	skola@spssecb.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola elektrotechnická, Kounicova 16, 611 00 Brno	machovec@spsebr.cz	kerndlova@spsebr.cz, lanicek@spsebr.cz, sedlackova@spsebr.cz, novotna@spsebr.cz
Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola Liberec Liberec I-Staré Město - Masarykova	sekretariat@pslib.cz	veronika.kornerova@pslib.cz, miroslav.mach@pslib.cz, petr.zenkl@pslib.cz
Střední průmyslová škola sdělovací techniky, Panská 856, 110 00 Praha	sekretariat@panska.cz	krivka@panska.cz, kubalik@panska.cz, novotny@panska.cz, serych@panska.cz
Gymnázium a Střední průmyslová škola elektrotechniky a informatiky, Křížíkova 1258 744 01 Frenštát pod Radhoštěm	eva.holasova@spsfren.cz	kontakty nenalezeny
SPŠ Jedovnice, Na Větráku 463, 67906 Jedovnice	skola@spsjedovnice.cz	grepl@spsjedovnice.cz, v.jalovy@spsjedovnice.cz, matuska@spsjedovnice.cz,
Střední průmyslová škola elektrotechnická a Vyšší odborná škola Karla IV. 13 531 69 Pardubice	spse@spse.cz	hejna@spse.cz, jedlicka@spse.cz, losenicky@spse.cz, stedry@spse.cz, stepanek@spse.cz

VOŠ a SPŠE Plzeň Koterovská 828/85 326 00 Plzeň	spse@spse.pilsedu.cz	blazek@spse.pilsedu.cz, hajzman@spse.pilsedu.cz, macha@spse.pilsedu.cz, skalova@spse.pilsedu.cz, zabranska@spse.pilsedu.cz
SPŠ a VOŠ Písek, Karla Čapka 402, 397 11 Písek	titlova@sps-pi.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola elektrotechnická, Ječná 30, Praha 2	spsejecna@spsejecna.cz	Velicky@spsejecna.cz, Starek@spsejecna.cz, Jerabek@spsejecna.cz, Matatko@spsejecna.cz, Bratscha@spsejecna.cz
Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická, Ústí nad Labem, Resslerova 5	sekret@spsul.cz	kontakty nenalezeny
Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Masarykova 197, 284 11 Kutná Hora	nahlovska@vos-kh.cz	smid@vos-kh.cz, vala@vos-kh.cz
Střední průmyslová škola elektrotechniky a informatiky, Kratochvílova 7/1490, 702 00 Ostrava - Moravská Ostrava	info@spseiostrava.cz	l.blazej@spseiostrava.cz, b.konarski@spseiostrava.cz, z.nalevka@spseiostrava.cz, m.svoboda@spseiostrava.cz, d.vlckova@spseiostrava.cz
Střední průmyslová škola elektrotechniky a informačních technologií, Dobruška, Čs.odboje 670	spse@dobruska.cz	kontakty nenalezeny
Vyšší odborná škola a Střední škola, Středisko technických a uměleckých oborů, Mariánská 1100, 407 47 Varnsdorf	info@vosvdf.cz	kontakty nenalezeny
Střední odborná škola a Střední odborné učiliště Lanškroun, Kollárova 445, 563 01 Lanškroun-Ostrovské Předměstí	info@spslan.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola, Přerov, Havlíčková 2	sps@sps-prerov.cz	pavel.brindl@sps-prerov.cz, frantisek.luska@sps-prerov.cz, jaroslav.pech@sps-prerov.cz, michal.rudolf@sps-prerov.cz, pavla.svajkova@sps-prerov.cz, ivo.vlk@sps-prerov.cz
VOŠ a SPŠ, Jičín Pod Koželuhy 100 506 41 Jičín	safranek@vos-sps-jicin.cz	kontakty nenalezeny
Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Šumperk, Gen. Krátkého 950/1, 787 01 Šumperk	sekretar@vsps-su.cz	kontakty nenalezeny
Střední průmyslová škola Ostrov, Klínovecká 1197, 363 01, Ostrov	sekretariat@spsostrov.cz	burda@spsostrov.cz, fales@spsostrov.cz, skrdlantova@spsostrov.cz, slabyhoud@spsostrov.cz, svoboda@spsostrov.cz,

		valenta@spsostrov.cz
Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola, Jana Palacha 1840, 272 01 Kladno	info@spskladno.cz	hybl@spskladno.cz, patera@spskladno.cz, slama@spskladno.cz, velek@spskladno.cz
Střední průmyslová škola Karviná, Žižkova 1818/1a, 733 01 Karviná-Hranice	spkmail@sps-karvina.cz	adamis@sps-karvina.cz, korta@sps-karvina.cz, lukastikova@sps-karvina.cz
SPŠE, 736 01 Havířov – Město, Makarenkova 1	kancelar.seh@sselek-havirov.cz	bajtkova.seh@sselek-havirov.cz, bajtkova.spsehavirov@iskola.cz, schenkova@sselek-havirov.cz, schenkova.spsehavirov@iskola.cz, urban@sselek-havirov.cz, urban.spsehavirov@iskola.cz
Střední průmyslová škola na Proseku, Novoborská 610/2, 190 00 Praha-Prosek	sps-prosek@sps-prosek.cz	michal.surkov@sps-prosek.cz, ivo.sevcik@sps-prosek.cz, petr.hellebrand@sps-prosek.cz, hellebrand@volny.cz
Střední průmyslová škola Jihlava třída Legionářů 1572/3, 586 01 Jihlava	sps@sps-jia.cz	kontakty nenalezeny
Střední škola energetická a stavební Chomutov, Na Průhoně 4800, 430 03	info@ssescv.cz	diana.tomanova@ssescv.cz
Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola, Školní 50, 430 01 Chomutov	prumyslovka@spscv.cz	kontakty nenalezeny
SOŠ a SOU Nymburk, V Kolonii 1804, 28846	cop@copnb.cz	kontakty nenalezeny

Příloha C – Doručené dotazníky.

škola	věk	praxe	reálné pomůcky	%	pobíratelové pomůcky	%	technické vybavení	vliv pobíratelových pomůček	použité modely	robník	použití	motivace	vědomosti	obřížnost
SPŠ - strojářství + IT	31	11	reál. souděcí, RC 2000	13	simulace	20	dataprojektor, interaktivní tabule, laborator elektroniky	lepší porozumění, názornost						
SPŠ elektronické technologi	44	11	RC-didaktic	20	spouše komunikací mezi měř. přístroji a osciloskopem a PC	23	dataprojektor ve všech úrovních, notebook (nebo PC)	využití je zajímavější.						
VOŠ a SPŠE Františka Křížka, sítě proud a počítače	48	23	nepřítivě pole, měřící přístroje, elektronické souděcí	23	Orcad, LabVIEW 1.1 - simulace obvodů	33	dataprojektor ve všech úrovních, notebook (nebo PC)	vypracovaná vyšší porozumění, vyplývá ze zvýšené pozornosti	al3,2,3,4		výklad, samostatná práce dle zadání	zvýšená pozornost	spíše lepší znalosti	příměření - dle programové úlohy v teorii elektroniky
VOŠ a SPŠE Františka Křížka, sítě proud a počítače	30	6	Reálné souděcí, el. stavěnice, praktické ověření na úlohách v laboratorích - to má asi největší účinnost na rozdíl od počítačových pomůček	40%	Simulační programy - LT Spice IV, animace - program Edcon, prospekt firmy, katalogy, soutěžní program sítěř OZ, volně dostupná VŠ skripta na internetu	33	Dataprojektor a PC stačí, pro výuku jsou potřeba el. laborator	Motivace poskytnutá, žáci si více sledují, ale nejsou schopni ani ochotni si udebat samostatně poznámky, porozumění snad ale dostatečné, výsledky jsou minimální. Je to ale záhodný trend - tyto trendy se objevují periodicky od 60. let - někdy programové vyučování, primitivní učící programy - účinnost dnes asi stejně málo, záhodnou např. při hospitaci					Někdy jsou pro potřeby naší výuky příliš jednoduchá, máme srovnání s podstaty na znalosti	
SPŠ sdělovací technologi, Panská	60	18	Reálné souděcí, výukový systém RC Didactic, reálné měřící přístroje (multimetry, osciloskopy, generátory)	30	animace z různých zdrojů, simulační programy (např. Multisim), program Wolfram Mathematica (samočinné je používání, ale těžké jen v "on the fly" při předání přípravy)	30	pobíratelová úroveň 40% univerzální úroveň s dataprojektorem 50%/hodin	Podoblastové pomůcky zlepšují motivaci a porozumění, jsou však pouze doplňkem výuky. Žáci si většinou nedovodí politiku záměru a zapamatování závdoků je problematické. Praktická cvičení jsou z hlediska efektivity podstatně výhodnější.	al3,2,3		Doplňují výklad a samostatným	Vliv na zvýšení pozornosti	Vědomostní vliv viz výše. Lze použít pro analogovou techniku. V této oblasti jsou modely doplnění výkladu pro lepší příměření a vypracování v poloovodících	
SPŠ sdělovací technologi, Panská	43	21		23	konkrétní označení, a jednak dáleko raději "on the fly" při předání přípravy (pochopitelně jsou i kapitolky na které mám připravena vešl a více prací to tak dělat)	23	pobíratelová úroveň 40% univerzální úroveň s dataprojektorem		al3,2,4		výklad	lepší motivace	příměření	
Benátská základní škola							pobíratelová úroveň 40% univerzální úroveň s dataprojektorem	pedagogická animace a programy jsou výborným doplňkem výuky, ale při větším množství jsou příliš náročná, učitel si musí vymyslet jak je jak využít, což je problém. Při použití ve spouše cvičení může být jejich použití kontropraktivní	al3,2,4		problémový výklad	velký zájem studentů	znalosti při zpracování a vypracování si žáků	podobla modely byly přizpůsobena úrovni znalosti žáků o řídy
SPŠE Hrušov	28	3		20		40	pobíratelová úroveň 40% univerzální úroveň s dataprojektorem	pedagogická animace a programy jsou výborným doplňkem výuky, ale při větším množství jsou příliš náročná, učitel si musí vymyslet jak je jak využít, což je problém. Při použití ve spouše cvičení může být jejich použití kontropraktivní	al3,4					
VOŠ a SPŠE Píseň, Koberovské	41	17		15		20	dataprojektor, PC úroveň	vliv techn. pomůček na výkony studentů jsou neprozkoumané	al3,4					
VOŠ informační technologi	56	14		30	Edicon, Wolfram Mathematica, animace - internet	30	lepší motivace, i toho vyplývající lepší zapamatování, uč. úř.	lepší motivace, i toho vyplývající lepší zapamatování, uč. úř.	al1			zvýšení pozornosti	znalosti by být srovnatelné s ostatními	chtělo by to lepší animací, vodítko žáků

