

# OBSAH

## 1. ÚVOD

## 2. ZÁKLADNÉ PRVKY SIETÍ 22 KV

### 2.1 Elektrické vedenia

#### 2.1.1 Vzdušné vedenia

#### 2.1.2 Káblové vedenia

#### 2.1.3 Spínacie prístroje vonkajších vedení

### 2.2 Elektrické stanice

#### 2.2.1 Druhy elektrických staníc

#### 2.2.2 Hlavné časti elektrických staníc

#### 2.2.3 Rozvodné zariadenia

##### 2.2.3.1 Prípojnice

##### 2.2.3.2 Transformátory

##### 2.2.3.3 Spoločné zariadenia

##### 2.2.3.4 Elektrické ochrany

Zoznam literatúry

## 3. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI SIETÍ 22 KV

### 3.1 Prevádzka siete 22 kV s izolovaným uzlom

### 3.2 Prevádzka siete 22 kV s nepriamo uzemneným uzlom cez zhášaciu tlmivku

### 3.3 Prevádzka siete 22 kV s nepriamo uzemneným uzlom cez odporník

Zoznam literatúry

## 4. TRANSFORMÁTORY

### 4.1 Konštrukcia transformátorov

#### 4.1.1 Magnetický obvod

#### 4.1.2 Elektrický obvod

### 4.2 Rozdelenie transformátorov

#### 4.2.1 Transformátory podľa účelu

#### 4.2.2 Transformátory podľa počtu vinutí

#### 4.2.3 Transformátory podľa spôsobu chladenia

#### 4.2.4 Transformátory podľa zapojenia vinutia

### 4.3 Prevádzkové stavy transformátorov

#### 4.3.1 Hlavné parametre transformátorov

#### 4.3.2 Stav naprázdno

#### 4.3.3 Stav nakrátko

#### 4.3.4 Transformátor pri zaťažení

### 4.4 Model dvoj a trojvinuťového trojfázového transformátora

### 4.5 Prechodové javy v transformátoroch

#### 4.5.1 Pripojenie transformátora v stave naprázdno na sieť

##### 4.5.1.1 Prechodový jav pri $\alpha = \varphi$

##### 4.5.1.2 Prechodový jav pri $\alpha = 0$

Použitá literatúra

## 5. SPÍNACIE PRÍSTROJE

### 5.1 Ovládanie spínacích prvkov

### 5.2 Parametre spínacích prístrojov

### 5.3 Vypínače

#### 5.3.1 Zotavené napätie

#### 5.3.2 Vznik elektrického oblúka medzi kontaktmi

### 5.4 Popis vypínačov

#### 5.4.1 Vákuový vypínač

##### 5.4.1.1 Vlastnosti vákuových zhášadiel

##### 5.4.1.2 Izolačné vlastnosti vákua a vznik oblúka vo vákuu

##### 5.4.1.3 Utrhávanie prúdu pred jeho prirodzenou nulou

#### 5.4.2 Plynový vypínač SF<sub>6</sub>

##### 5.4.2.1 Vlastnosti plynu SF<sub>6</sub>

##### 5.4.2.2 Charakteristika plynových vypínačov SF<sub>6</sub>

### 5.5 Odpájače

### 5.6 Odpínače

### 5.7 Model vypínačov

#### 5.7.1 Zostavenie modelu vákuového vypínača

#### 5.7.2 Zostavenie modelu plynového vypínača SF<sub>6</sub>

### 5.8 Vybrané spínací prístroje používané na vedeniach 22 kV

#### 5.8.1 Vnútorne odpájače

#### 5.8.2 Vonkajší odpájače

#### 5.8.3 Odpínače

#### 5.8.4 Vypínače

### Zoznam literatúry

## 6. PRÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

## 7. ELEKTRICKÉ OCHRANY

### 7.1 Teória ochrán

### 7.2 Základné pojmy

### 7.3 Druhy ochrán

### 7.4 Konštrukcia elektromechanických ochrán

#### 7.4.1 Elektromagnetické meracie relé ER

#### 7.4.2 Jednosmerné meracie relé UCR1 a UCR2

#### 7.4.3 Elektrodynamické relé USM10

#### 7.4.4 Časové relé

### 7.5 Princíp činnosti vybraných typov elektromechanických ochrán

#### 7.5.1 Okamihové prúdové ochrany rady A11, A22, A32

#### 7.5.2 Časové nezávislé prúdové ochrany rady AT12, AT21, AT31

### 7.6 Simulácia činnosti elektromechanických ochrán

#### 7.6.1 Model podsystému časového člena T

#### 7.6.2 Model podsystému meracieho člena ER

#### 7.6.3 Model ochrany AT31

### Zoznam literatúry

# 1. ÚVOD

Táto správa je úvodom do 1. etapy riešenia projektu APVV „Lokalizácia miesta poruchy v sieti 22 kV s využitím prvkov umelej inteligencie“. Hlavným cieľom projektu je navrhnuť novú metódu pre lokalizáciu poruchy v sieti 22 kV, ktorá by pri svojej činnosti využívala prvky umelej inteligencie, konkrétne expertných systémov. Dôraz je kladený na komplexný prístup k lokalizácii poruchy a rešpektovanie inštalovanej technológie a spôsobu prevádzky sietí 22 kV.

Prvá etapa projektu má za úlohu vytvorenie modelu siete 22 kV, tak, aby pomocou neho bolo možné vytvoriť matematické popisy jednotlivých prvkov siete 22 kV. Vzhľadom na čiastkové ciele prvej etapy sme sa na začiatku riešenia projektu zamerali na identifikáciu tých prvkov siete 22 kV, ktoré sa podieľajú na prenose elektrickej energie medzi transformátormi 110/22 kV a distribučnými transformátormi 22/0,4 kV vrátane, alebo môžu pri lokalizácii miesta poruchy slúžiť ako zdroj užitočných informácií o tom, v akom stave sa nachádza sieť pred, počas a po poruche. Pri tejto identifikácii sme do úvahy zobrali aj spôsob dispečerského riadenia sietí 22 kV, a preto sme prvky rozdelili na tie, ktoré sa dajú zaradiť ako súčasť elektrických vedení a tie, ktoré sú súčasťou elektrických staníc.

V doterajšej časti riešenia projektu sme sa viac zamerali na analýzu a modelovanie vlastností prvkov zaradených ako súčasť elektrických staníc. Jednalo sa konkrétne o transformátory, spínacie prístroje, prístrojové transformátory napätia a elektromechanické nadprúdové ochrany.

V nasledujúcom roku riešenia projektu sa zameriame na matematický popis a vytvorenie simulačných modelov prvkov, ktoré sme zaradili ako súčasť vedení. Najmä vytvorenie modelov diaľkovo riadených vypínačov, odpínačov a indikátorov prechodu poruchových prúdov bude mať veľký význam pri overovaní vhodnosti expertného systému pre lokalizáciu miesta poruchy, pretože tieto zariadenia sú schopné poskytnúť veľmi užitočné informácie pre lokalizáciu miesta poruchy.

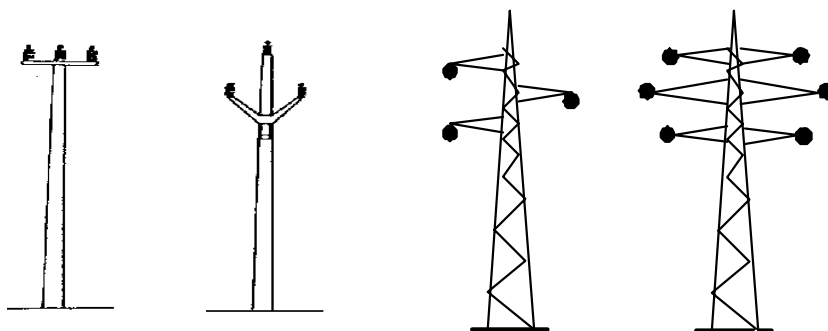
## 2. ZÁKLADNÉ PRVKY SIETÍ 22 kV

Distribučná sústava je časť elektrizačnej sústavy, z ktorej sú priamo napájaní veľkí odberatelia elektrickej energie a slúži tiež na distribúciu elektrickej energie k ostatným odberateľom. Pre distribúciu elektrickej energie na Slovensku sa využívajú elektrické siete s napätím 110 a 22 kV a už dosluhujúcim napätím 6 kV. Zo siete 110 kV sú napájané cez transformátory (väčšinou jednostrane) elektrické siete 22 kV. Ak sa v sieti 22 kV nachádzajú zdroje, ktorých výkon nie je vyvedený priamo na prípojnicu elektrickej stanice s transformátorom 110/22 kV, ale sú pripojené na kmeňové vedenie alebo jeho odbočku, zmení sa napájanie príslušnej časti siete na dvojstranné alebo viacstrané. Striedavá trojfázová sieť 22 kV je realizovaná ako sústava IT trojvodičovými vzdušnými a káblovými vedeniami. Zo siete 22 kV sa spotrebiče elektrickej energie nenapájajú priamo, ale cez transformátory vn/vn a vn/nn. Základnými prvkami sietí 22 kV sú vzdušné a káblové elektrické vedenia a elektrické stanice (rozvodne a transformačné stanice).

### 2.1 Elektrické vedenia

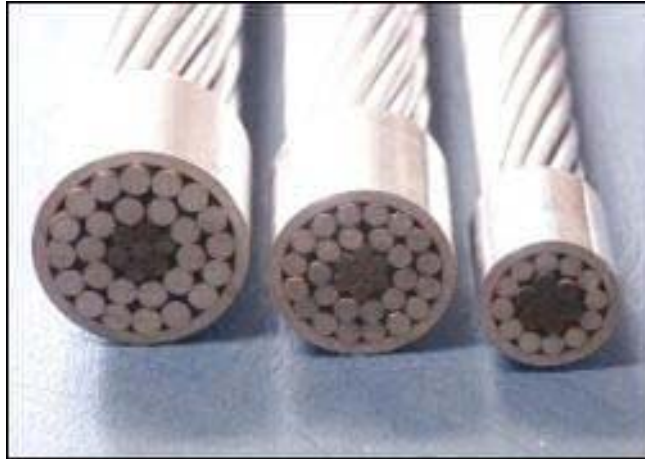
#### 2.1.1 Vzdušné vedenia

Vzdušné vonkajšie vedenia sú umiestnené na **podperných bodoch** – železobetónových stĺpoch, na stĺpoch drevených s betónovými pätkami alebo ocelových priehradových stožiaroch. Do súboru vzdušných elektrických vedení patria tiež laná, izolátory, zvodiče prepätia, spínacie prístroje, armatúry, konzoly a spojovací materiál. Najpoužívanejšie usporiadanie vodičov na podperných bodoch sú na obr. 2.1. Pre prierezy vodičov nad 150 A lFe sa rovinné usporiadanie nepoužíva.



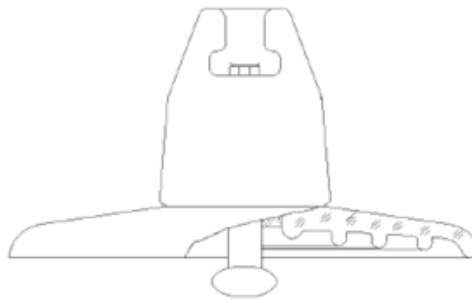
Obr. 2.1. Usporiadanie vodičov vzdušných vedení na podperných bodoch

Ako **vodiče** 22 kV vedení sú najpoužívanejšie hliníkové laná s ocelovou dušou – AlFe laná. Príklady usporiadania lán sú na obr. 2.2 [1].



Obr. 2.2. A1Fe laná

**Izolátory** sú určené na upevnenie vodičov na podperné body vonkajších vedení. Zabezpečujú odizolovanie vodičov od vodivej konštrukcie podperného bodu. Používajú sa v prevedení **podpernom a závesnom**, obr. 2.3. Závesné izolátory sa vyrábajú ako čiapkové (tanierové) alebo tyčové a používajú sa ako **kotevné, kladkové alebo ťahové**. Podperné izolátory sa používajú v prevedení kolíkovom alebo stĺpovom.



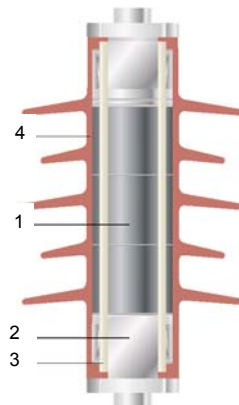
Obr. 2.3. Čiapkový izolátor



Obr. 2.4. Kolíkový, podperný a závesný izolátor 22 kV firmy Elektroporcelán Louny, a.s.

**Izolátorový reťazec** je vytvorený z niekoľkých vzájomne spojených závesných izolátorov. Reťazce sa rozlišujú podľa počtu spojených článkov v sérii a podľa počtu reťazcov spojených paralelne (reťazec jednoduchý, dvojité atd.). V súčasnosti sa takmer výhradne používajú tyčové izolátory z rôznych druhov materiálov (keramika, sklo, polymér).

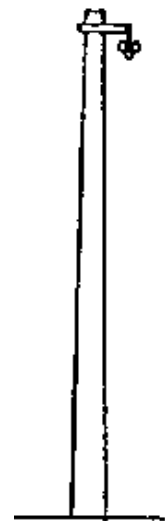
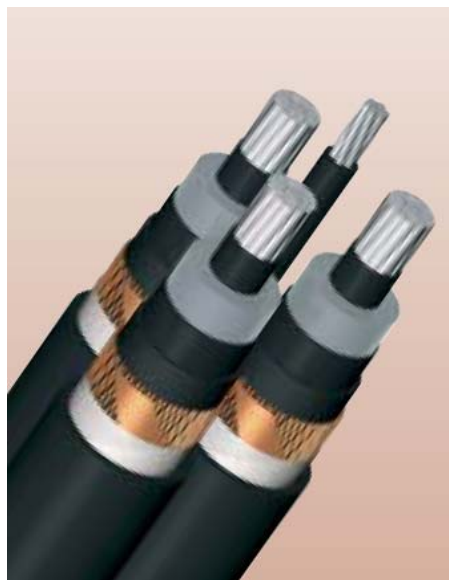
**Zvodiče prepätia** obmedzujú v chránenom obvode krátkodobé prepätia (atmosférické alebo prevádzkové) na bezpečnú hodnotu pre chránené zariadenia zvedením prepätia do zeme.



Obr. 4.1.8. Mechanické usporiadanie obmedzovača prepätia vn  
1 – varistor ZnO, 2 – elektródy, 3 – sklolaminátová výstuha, 4 – polymérové puzdro

### 2.1.2 Káblové vedenia

Káblové vedenia sú **uložené v zemi** alebo realizované ako **izolované vzdušné vedenie** na podporných bodoch (napr. 22–AXEKVCEz, obr. 2.3a, alebo z izolovaných skrúcaných káblov DISTRI obr. 2.3b) [2]. Do súboru káblových vedení patria káble, káblové žlaby a rúry, káblové koncovky a spojky, podperné body a armatúry.



a)

b)

c)

Obr.2.3. Kábel pre napätie 22 kV, a) pre uloženie v zemi, b) závesný, c) podperný bod pre závesný kábel

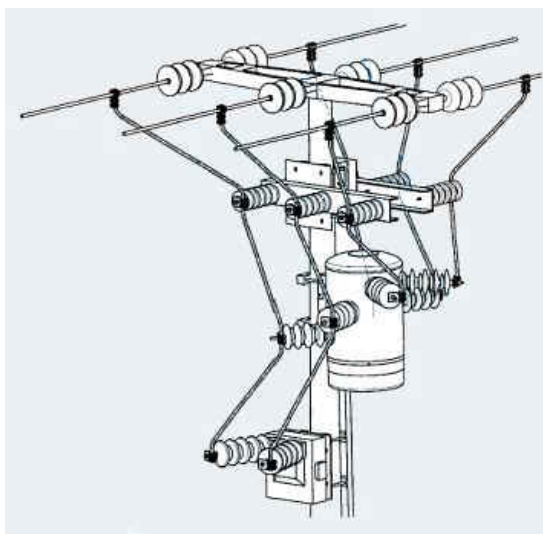
### 2.1.3 Spínacie prístroje vonkajších vedení

Spínacie prístroje slúžia na zapínanie a odpínanie elektrických vedení alebo ich častí (úsekov). Na vypínanie a zapínanie úsekov vonkajších vedení slúžia úsekové odpájače (úsečníky), odpínače a vypínače. Ich ovládanie môže byť miestne alebo diaľkové.

- **Odpájače** sú určené na spínanie obvodov bez prúdu. Zaisťujú viditeľné rozpojenie obvodu. Odpájače môžu spínať obvody pod napätím, no nesmú sa s nimi zopínať ani vypínať obvody so zaťažením, okrem malých indukčných a kapacitných prúdov a transformátorov naprázdno. Ich pohon môže byť ručný, stlačeným vzduchom alebo elektrický.
- **Odpínače** spínajú výkony do menovitej hodnoty, nesmú vypínať skratové výkony. Pri zariadeniach vn sa používajú v spojení s poistkami ako ochrana proti skratu. Konštrukčne sú to odpájače so zariadením na hasenie oblúka.
- **Vypínače** slúžia na zapínanie a vypínanie odbočky bez alebo pod zaťažením. V prípade poruchy vypínajú aj preťaženia a skraty. Vypínač musí vypnúť až do svojho menovitého vypínacieho prúdu všetky skratové prúdy s akoukoľvek zložkou a s akýmkoľvek podielom jednosmernej zložky, pokiaľ neprekročí maximálnu hodnotu striedavej zložky.

Na vypínanie častí vedení sa používajú tiež diaľkovo ovládané reclosery, ktoré umožňujú podobne ako vypínače vypínanie menovitých a skratových prúdov.

Ako príklad je na obr. 2.4 uvedený diaľkovo ovládaný úsekový odpínač **IATS**<sup>®</sup>, izolovaný SF<sub>6</sub>, určený pre diaľkové spínanie vzdušného vedenia vo vonkajšom prostredí s možnosťou vypínania menovitého prúdu 630 A [3].

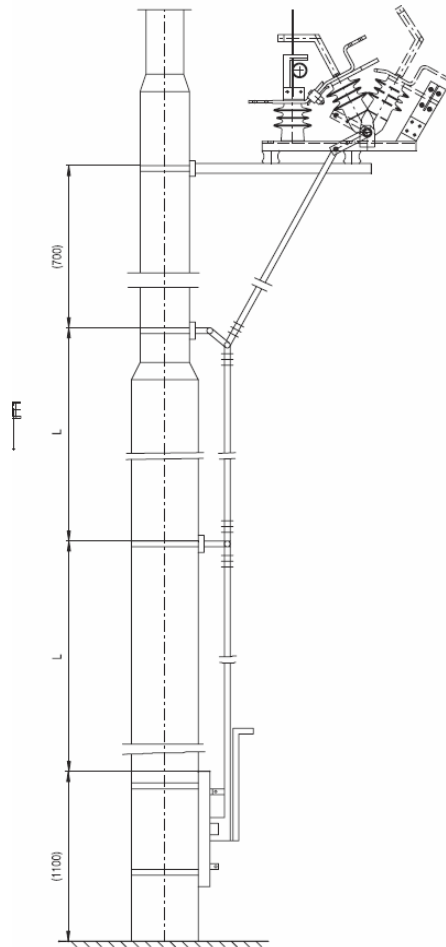


Obr. 2.4. Úsekový odpínač IATS

Na obr. 2.5 je **úsečníkový odpájač** SEZ Kropachy OMDZ s ručným pohonom. Je určený na odpojenie alebo pripojenie úseku, odbočiek vonkajšieho vzdušného a káblového vedenia vn alebo prípojok transformátorov vn/nn s menovitým vypínacím kapacitným prúdom 16 A [4].

Na obr. 2.6 je uvedený vonkajší, zapuzdrený, plynom SF<sub>6</sub> plnený **odpínač** SECTOS NXB fy ABB. Odpínače SECTOS sú určené na spínanie menovitých prúdov a sú vhodné na použitie na vonkajších holých aj izolovaných vedeniach [5].

**Odpájač OMDZ, OZTZ  
s ručným pohonom  
dvojitá izolácia**



*Obr. 2.5. Odpájač s ručným pohonom*

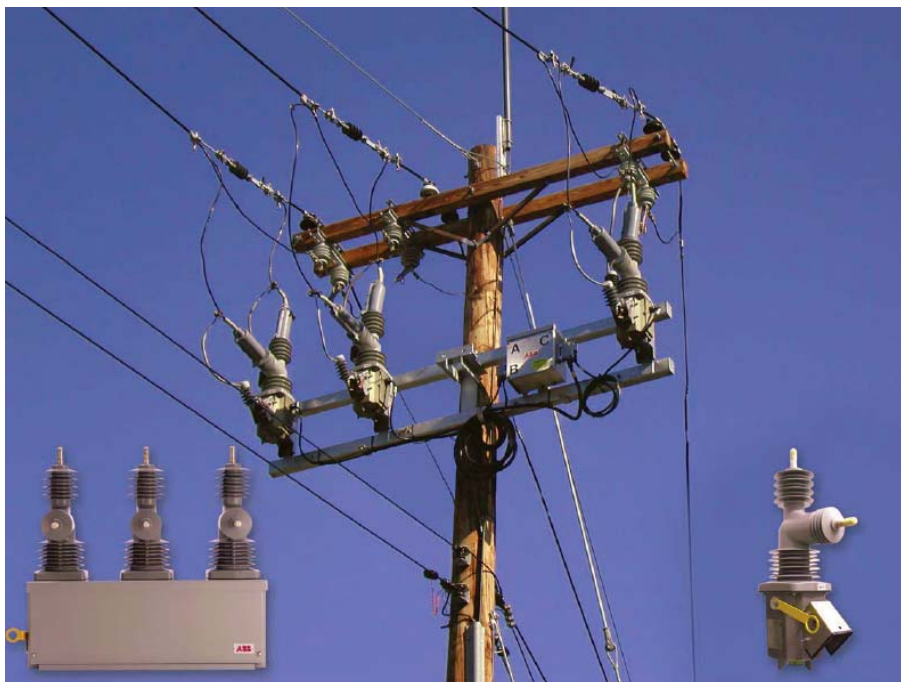




*Obr. 2.6. Úsekový odpínač pre montáž na stožiar - Sectos NXB*

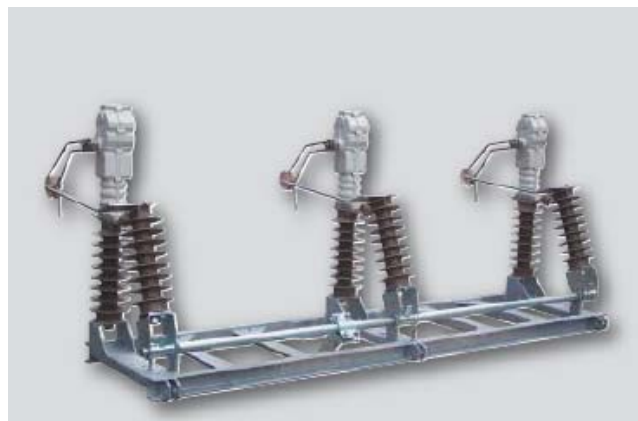
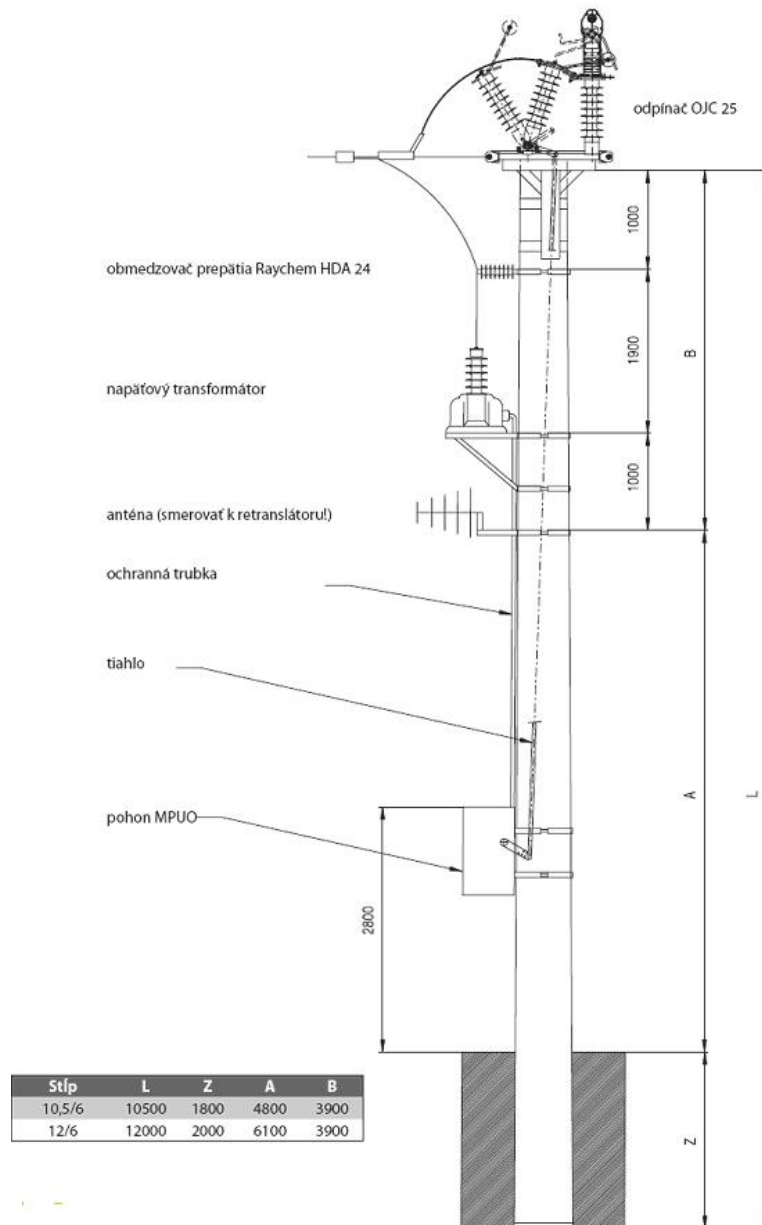
Na obr. 2.7 je ako príklad vypínača uvedený vonkajší vákuový **recloser** vyrábaný firmou ABB [6]. Umožňuje vypínanie menovitých prúdov do 800 A a skratových prúdov do 10 kA. Je vybavený automatikou 3 a 1-pólového OZ.

Na obr. 2.8 je diaľkovo ovládaný **odpínač** SEZ Krompachy OJC 25 s možnosťou vypínania menovitého prúdu 200 alebo 400 A [4].



*Obr. 2.7. Vonkajší vákuový recloser*

## Montážna zostava diaľkovo ovládaného odpínača



Obr. 2.8. Zostava a detail odpínača OJC 25

## 2.2 Elektrické stanice

V elektrickej stanici sú rozvodné zariadenia a prístroje umožňujúce bezpečné pripojenie a odpojenie vedení a transformátorov, ich istenie pred účinkami preťaženia, skratov, prepätím, reguláciu, meranie a ovládanie. Sú nimi prepojené elektrické siete rôznych prúdových a napäťových sústav. Rozvodné zariadenia (rozvodne) sa riešia ako vnútorné v budovách alebo sú umiestnené vonku.

### 2.2.1 Druhy elektrických staníc

Z hľadiska vplyvu na obsah prenosového súboru je možné deliť stanice podľa viacerých kritérií. Prvým kritériom je hlavná funkcia, pretože tá určuje technologické vybavenie elektrickej stanice. Podľa hlavnej funkcie sa elektrické stanice delia na [7]:

- **transformovne** – ich hlavnou úlohou je zabezpečiť zmenu napätia prenášanej elektrickej energie bez zmeny frekvencie,
- **meniarnie** – slúžia na zmenu druhu prúdu alebo frekvencie prenášanej elektrickej energie. Meniarnie sa delia na usmerňovacie stanice meniace striedavý prúd na jednosmerný a striedačové stanice meniace jednosmerný prúd na striedavý,
- **spínacie stanice** – rozdeľujú privedenú elektrickú energiu do viacerých vetiev siete bez zmeny prúdovej alebo napäťovej sústavy. Túto funkciu plnia často rozvodné zariadenia transformovni a meniarní,
- **kompenzovne** – slúžia na zmenu (reguláciu) parametrov prenosu elektrickej energie za účelom vyrovnania jalových zložiek striedavého prúdu. Využívajú sa najmä na reguláciu napätia zmenou jalového výkonu a na kompenzáciu účinníka. Funkcie kompenzovni bývajú často zahrnuté do transformovni, príp. spínacích staníc.

Ďalším kritériom pre delenie elektrických staníc je ich začlenenie do elektrizačnej sústavy, pretože to určuje ich dôležitosť. Podľa neho je možné deliť elektrické stanice na [8]:

- **elektrické stanice výrobní** – sú to transformovne, ktoré privádzajú vyrobenú elektrickú energiu do elektrizačnej sústavy a transformujú napätie alternátorov na napätie siete, do ktorej sú pripojené,
- **transformačné stanice** – slúžia na spojenie distribučných sústav s rôznym napätím (110/22 kV) a na transformáciu napätia.,
- **distribučné elektrické stanice** – rozdeľujú elektrickú energiu, transformujú napätie (vvn/vn a vn/nn) a dodávajú elektrickú energiu spotrebným centráram.
- **priemyslové elektrické stanice** – rozdeľujú elektrickú energiu v priemyslových podnikoch priamo ku spotrebičom a transformujú napätie na nn, zvláštnym typom týchto staníc sú stanice zabezpečujúce vlastnú spotrebu elektrární a ostatných typov elektrických staníc.

Posledným kritériom delenia je spôsob prevádzky elektrických staníc. Podľa neho je ich možné rozdeliť na:

- **stanice s trvalou obsluhou,**
- **stanice s dohľadom,**
- **stanice bez obsluhy.**

### 2.2.2 Hlavné časti elektrických staníc

Elektrická stanica sa skladá z časti stavebnej a časti technologickej. Pre riadenie elektrizačnej sústavy je dôležitejšia technologická časť elektrickej stanice. Pre riadenie je potrebné vedieť nielen z akých zariadení pozostáva, ale aj v akom prevádzkovom stave sa jednotlivé zariadenia v danom okamžiku nachádzajú.

Technologická časť elektrickej stanice sa skladá z [7]:

- **hlavných silových zariadení** – patria sem rozvodné zariadenia, transformátory, zariadenia na kompenzáciu účinníka, kompenzáciu zemných prúdov, spojovacie vedenia,
- **riadiaceho a informačného systému** – pozostáva zo zariadení na riadenie elektrickej stanice vrátane dispečerských komunikačných zariadení, hromadného diaľkového ovládania (HDO), v<sub>f</sub> a n<sub>f</sub> prenosu, zo zariadení na chránenie a istenie proti preťaženiu, skratom, prepätiu a chybným manipuláciám (blokovanie), zo zariadení na zaistenie bezpečnosti obsluhy, zariadení a okolia stanice vrátane pracovného a ochranného uzemnenia,
- **spoločných zariadení** – zariadenia vlastnej spotreby, zdroje a rozvod vlastnej spotreby (jednosmerné a striedavé signalizačné napätia), núdzové zdroje elektrickej energie (UPS, dieselagregát,...), u starších rozvodní zariadenia na výrobu a rozvod stlačeného vzduchu, elektroinštalácia pre osvetlenie, vykurovanie, vetranie a zásuvky,
- **pomocných zariadení** – sklady, garáže, požiarne zbrojnice, laboratória,...
- **ochranných a pracovných pomôcok.**

Nie všetky elektrické stanice sú vybavené všetkými uvedenými časťami a zariadeniami. Rozsah ich vybavenia je daný vekom, veľkosťou, dôležitosťou a požadovanými funkciami príslušnej elektrickej stanice.

Rozvodne vn a vvn môžu byť podľa vyhotovenia realizované ako:

- **vonkajšie**, odolávajúce všetkým nepriaznivým vplyvom vonkajšieho prostredia,
- **vnútorné**, umiestené v obstavanom priestore, v ktorom sú chránené proti poveternostným vplyvom. Rozdeľujú sa na:
  - **komorové**, (najmä s vn kobkami), obr. 2.9,
  - **skriňové** (montované z rozvádzačov), obr. 2.10,
  - **zapuzdrené** (vvn a vn s izoláciou SF<sub>6</sub>), obr. 2.11,
    - šetria miesto, má plochu 2 – 3 % vonkajšej,
    - vyhovujú ekologickým požiadavkám a sú chránené pred znečistením,
    - majú zvýšenú ochranu pred úrazom elektrickým prúdom.



Obr. 2.9. Vnútorná kobková rozvodňa 22 kV



*Obr. 2.10. Vnútorná skriňová rozvodňa 22 kV*



*Obr. 2.11. Vnútorná zapuzdrená rozvodňa ABB 22 kV  
(Distribučný kompaktný rozvádzač izolovaný plynom SF6)*

### 2.2.3 Rozvodné zariadenia

Účelom rozvodných zariadení je rozvádzať privedenú elektrickú energiu do viacerých odbočiek. Jednotlivé **odbočky** tvoria polia. **Polia** sú navzájom prepojené pomocou vodičov prechádzajúcich pozdĺž rozvodného zariadenia – **prípojnic** ktoré tvoria základ rozvodného zariadenia. Porucha na prípojniciach znamená vždy vyradenie rozvodného zariadenia z prevádzky. Pre zväčšenie prevádzkovej bezpečnosti a spoľahlivosti sa používa viac systémov prípojnic, ktoré sa môžu deliť na pozdĺžne úseky. Prípojnice v rozvodných zariadeniach 22 kV sa zhotovujú najčastejšie z holých obdĺžnikových vodičov z elektrovodného hliníka alebo medi. V novovybudovaných zariadeniach sa používajú zapúzdrené vodiče izolované plynom [7].

#### 2.2.3.1 Prípojnice

Prípojnice musia byť dimenzované a usporiadané tak, aby **odolali silovým a tepelným účinkom** prevádzkových i poruchových prúdov a účinkom prepätí. Minimálny prierez vodiča  $S_{\min}$  s ohľadom na oteplenie pri skrate sa vypočíta podľa vzťahu:

$$S_{\min} = \frac{I_e \sqrt{t}}{K}$$

kde je  $K$  koeficient rešpektujúci teplotu (pred skratom a po skrate) a vlastnosti materiálu vodiča; pre Cu = 185; Al = 120,7;

$I_e$  ekvivalentný otepľovací prúd pri skrate,

$t$  doba trvania skratu.

Vzhľadom na to, že pri normálnej prevádzke a pri skratoch sa teplota vodičov mení, dochádza aj k zmenám ich dĺžky. Preto sa tuhé vodiče na podpierky ukladajú tak, že v strede svojej dĺžky sú uchytené v držiakoch pevne, v ostatných držiakoch posuvne. Zmena dĺžky vodičov sa kompenzuje pružnými spojkami. Tie sa umiestňujú aj nad dilatáčnymi škárami budov.

Pri zisťovaní dynamických účinkov skratových prúdov na vodiče sa vychádza zo vzťahu pre silu, pôsobiacu na jednotkovú dĺžku rovnobežných vodičov

$$F_1 = 0,2 \cdot k_1 \cdot k_2 \frac{\ell^2}{a}$$

kde je  $k_1$  koeficient rešpektujúci tvar vodiča a rozloženie prúdu v ňom, pre kruhové vodiče má hodnotu  $k_1 = 1$ ; pre obdĺžnikové vodiče sa určuje z nomogramov,

$k_2$  koeficient rešpektujúci vzájomné usporiadanie vodičov a fázový posun prúdov, u dvojpólového skratu má hodnotu  $k_2 = 1$ ; pri trojpólovom skrate a rovinnom usporiadaní vodičov  $k_2 = 0,87$  pre stredný vodič a  $k_2 = 0,81$  pre krajný vodič; pri usporiadaní vodičov do rovnostranného trojuholníka  $k_2 = 0,85$ ,

$\ell$  dĺžka vodiča medzi dvoma podperami,

$a$  osová vzdialenosť medzi vodičmi rôznych fáz.

**Izolátory** sa v elektrických staniách používajú na upevnenie holých vodičov podoprením alebo zavesením, prípadne na priechod stenami alebo inými prepážkami. Podľa funkcie to teda sú: **izolátory podperné** (podpierky), **izolátory priechodné** (priechodky), **izolátory závesné**. Pre charakteristiku izolátorov sú dôležité nasledovné technické údaje: menovité napätie, rázové skúšobné napätie, striedavé skúšobné napätie (za sucha alebo za mokra), mechanická pevnosť v ohybe (podpierky, priechodky) alebo v ťahu. Podpierky a priechodky sa najčastejšie vyrábajú z porcelánu, môžu však byť aj plastové, silikónové alebo sklenené.

Priechodky sa môžu montovať na priechodkové dosky (skrutkovacie priechodky), ktoré sa potom vkladajú do otvorov v stenách.

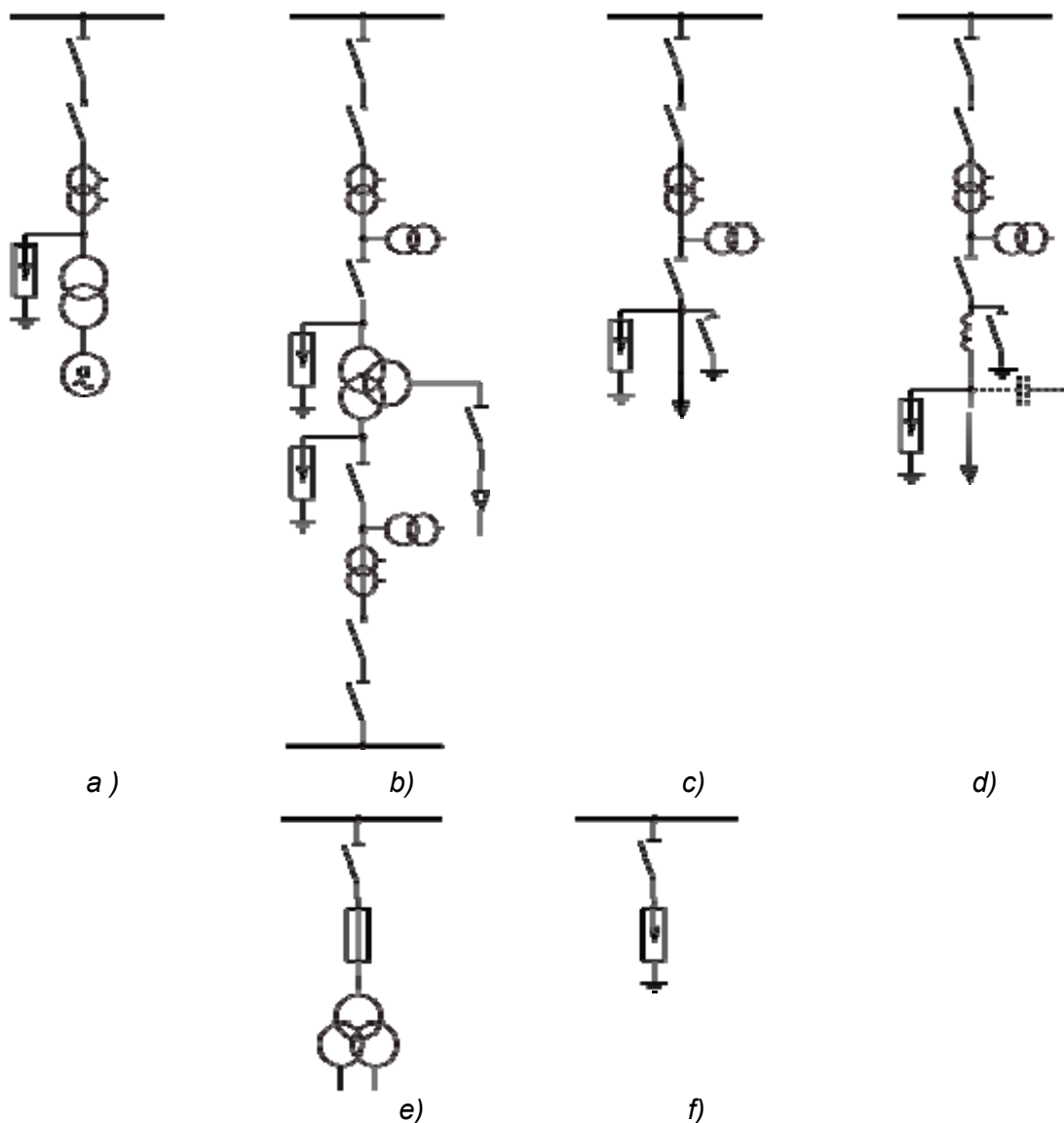
**Prístrojové vybavenie** poľa závisí od jeho funkcie (pole odbočky transformátora, vývodové pole vzdušného vedenia, pole kombinovaného spínača prípojnic a pod.). Pretože musí umožňovať vykonávanie základných činností pre riadenie a prevádzku elektrizačnej sústavy (napr.: spínanie, meranie, istenie, zmena konfigurácie sústavy), svojimi parametrami a funkčnými vlastnosťami musí vyhovovať požiadavkám elektrizačnej sústavy nielen po stránke izolačnej (z hľadiska menovitých napätí a prúdov), ale aj z hľadiska ďalších podmienok napr. mechanického namáhania.

Medzi základné prvky poľa patria [8]:

- **vypínač** – slúži na zapínanie a vypínanie odbočky bez alebo pod zaťažením. Spínajú sa nimi značne veľké výkony. V prípade poruchy sa nimi vypínajú aj preťaženia a skraty. Vypínač musí vypnúť až do svojho menovitého vypínacieho prúdu všetky skratové prúdy s akoukoľvek zložkou a s akýmkoľvek podielom jednosmernej zložky [7],
- **prípojnicový odpájač** – zaisťuje viditeľné odpojenie odbočky od systému prípojnic. Odpájače môžu spínať obvody pod napätím, no nesmú sa s nimi zapínať ani vypínať obvody so zaťažením, okrem malých indukčných a kapacitných prúdov a transformátorov naprázdno [7],
- **vývodový odpájač** – zaisťuje viditeľné odpojenie vedenia, či už káblového alebo vzdušného, od systému prípojnic elektrickej stanice. Býva vybavený uzemňovačmi (uzemňovacie nože), s ktorými je možné uzemniť hlavné nože odpájača, a tak spolu s ním aj určitú časť rozvodného zariadenia. Uzemňovače môžu byť na ktorejkoľvek strane odpájača. Musia byť ale blokováné tak, aby ich nebolo možné zapnúť, keď sú zapnuté kontakty hlavných nožov a naopak,
- **prístrojové transformátory prúdu a napätia** – transformujú vo vhodnom rozsahu hodnotu prúdu alebo napätia meraného obvodu na hodnoty vhodné pre meracie a istiace prístroje. Rozlišujeme prístrojové transformátory istiace (pre pripojenie ochrán) a meracie (pre meranie, reguláciu a riadenie). Meracie prístrojové transformátory musia byť presné predovšetkým v pracovnej oblasti (v okolí menovitej hodnoty). Istiace prístrojové transformátory musia zaisťovať dostatočný prenos i na hranici pracovnej oblasti, pri veľkých prúdoch a minimálnom napätí. Ich inštalácia záleží od charakteru a dôležitosti poľa, a taktiež od požiadaviek merania a ochrán poľa. Veľmi často je v jednotlivých poliach nainštalovaný len prístrojový transformátor prúdu (PTP) a prístrojové transformátory napätia (PTN) sú umiestnené v samostatnom poli merania, ktoré je spoločné pre celý systém prípojnic,
- **meracie a signalizačné zariadenia** – spracovávajú údaje z prístrojových transformátorov a monitorujú prevádzkový stav jednotlivých prvkov poľa. Získané údaje odovzdávajú informačnému a riadiacemu systému elektrickej stanice,
- **elektrické ochrany** – zabezpečujú ochranné funkcie chrániace príslušné pole pred nežiaducimi prevádzkovými stavmi elektrizačnej sústavy, ako sú napr. preťaženie skratom, prepätie, podpätie a iné. Pri detekovaní poruchového stavu dávajú popud na zapnutie alebo vypnutie vypínača chráneného poľa.

## Odbočky

Odbočky obsahujú prístroje v počte a zložení, ktoré zodpovedajú ich funkcií. **Hlavné odbočky** s typickým vybavením pre vn rozvodné zariadenia sú uvedené na obr. 2.12 a) až f).



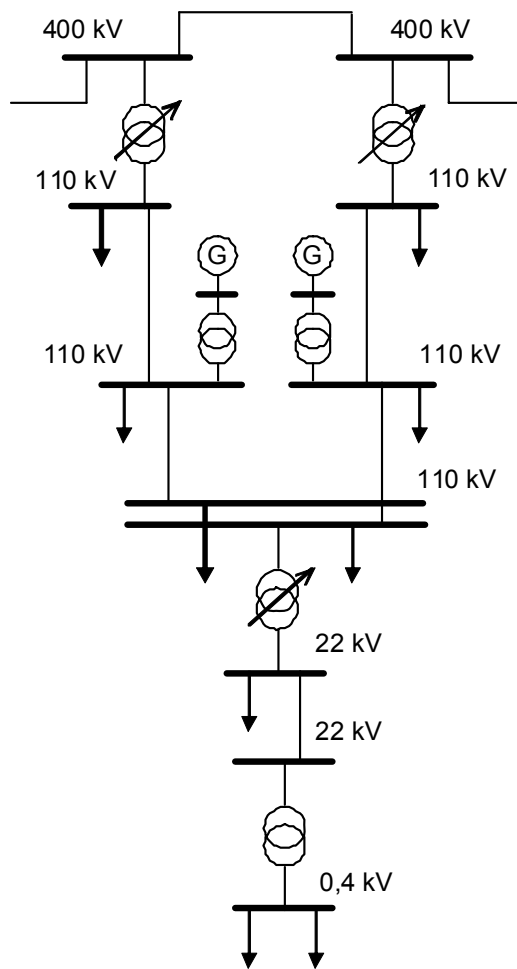
Obr. 2.12. Hlavné a pomocné odbočky  
 a) generátorová, b) transformátorová s vyvedeným terciárnym vinutím, c) káblového vývodu, d) vzdušného vývodu, e) merania, f) bleskoistiek

### 2.3.2.2 Transformátory

Z **distribučnej sústavy 110 kV** je cez transformátory napájaná **distribučná sústava 22 kV**. Toto napätie je ďalej distribuované vedeniami a následne transformované pre napájanie **rozvodnej sústavy 0,4 kV**, ktorá je väčšinou sústredená na menšie ohraničené územie (obr. 2.9).

Transformátory 110/22 kV sú **riaditeľné** a môžu pri zaťažení t. j. pod napätím a s prúdom meniť po malých stupňoch odbočky vinutia. Transformátory 22/0,4 kV sa označujú ako **normálne** a majú možnosť ovládania odbočkového prepínača len vo vypnutom stave t. j. bez prúdu a napätia. **Transformátory 110/22 kV a 22/0,4 kV** sa umiestňujú vo vnútorných alebo vonkajších transformátorových stanovištiach. **Distribučné transformačné stanice** sú vystavané ako stožiarové, murované, kioskové, kompaktné a už dosluhujúce vežové (obr. 2.10 až 2.12).





Obr. 2.9. Distribučná a rozvodná sústava



Obr. 2.10. Stožiarové transformačné stanice



Obr. 2.11. Stanovištia transformátorov

EH 8



EH 5



EH 4



EH 2



EH 1



2.12. Kioskové transformačné stanice

Uzol 22 kV strany transformátora 110/22 kV sa v súčasnosti prevádzkuje ako nepriamo uzemnený cez zhášaciu tlmivku alebo cez odporník (bližšie pozri kap. 3).

**Zhášacia tlmivka** je zapojená medzi uzol transformátora a zem. Za normálneho stavu siete, t. j. v súmernom režime, má uzol proti zemi nulové napätie, takže tlmivkou neprechádza prúd (v skutočnosti prechádza len tzv. vyrovnávací prúd). Ak dôjde k zemnému spojeniu, vznikne medzi uzlom transformátora a zemou rozdiel potenciálov rovný fázovému napätiu v sieti, takže tlmivkou začne pretekať prúd, ktorý sa vracia miestom zemného spojenia vodiča. Týmto prúdom je potom kompenzovaný zemný kapacitný prúd ostatných dvoch vodičov, na ktorých je pri poruche združené napätie siete.



Vzhľadom na to, že sa kapacita siete v priebehu prevádzky mení, musí byť tlmivka regulovateľná a to buď stupňovite – prepínaním počtu závitov, alebo plynule – zmenou magnetického odporu vzduchovej medzery, t. j. posúvaním kotvy ručne alebo automaticky. Tlmivka je umiestnená v ocelevej nádobe a chladená olejom. Medzi tlmivku a transformátor je zaradený odpínač, ktorý bezpečne vypne menovitý prúd tlmivky. Na obrázku je zhášacia tlmivka firmy EGE, s.r.o. České Budějovice.

Úplná kompenzácia zemného prúdu nie je v praxi možná, pretože vplyvom vodivosti vedení, odporu tlmivky a vplyvom nesúmernosti siete zostáva zvyškový prúd, ktorý je priamo závislý na rozsahu pripojenej sústavy 22 kV.

Úplná kompenzácia zemného prúdu nie je v praxi možná, pretože vplyvom vodivosti vedení, odporu tlmivky a vplyvom nesúmernosti siete zostáva zvyškový prúd, ktorý je priamo závislý na rozsahu pripojenej sústavy 22 kV.

**Uzlový odporník** slúži na prepojenie uzla transformátora so zemou v rozsiahlych káblových sieťach 22 kV prevádzkovaných s odporovým uzemnením uzla. Účelom odporového uzemnenia uzla je utlmenie prepätia pri zemných poruchách a zabezpečenie dostatočného prúdu pre činnosť ochrán pôsobiacich na rýchle vypnutie postihnutého úseku siete. Uzlové odporníky vyrábané v ESE, s.r.o. České Budějovice (obr. 2.13) sú vhodné pre vonkajšie prostredie, chladenie je zabezpečené prirodzeným prúdením vzduchu.



Obr. 2.13. Uzlový a sekundárny odporník

V kompenzovaných sieťach sa tiež používa paralelná kombinácia tlmivky a odporníka (napr. sekundárny odporník fy ABB). Táto metóda je vhodná tam, kde požadujeme jednoduchý systém chránenia a relatívne rýchle vypínanie zemných porúch. Tlmivka v uzle najmä u vonkajších sietí potom dokáže eliminovať cca 70 % zemných porúch. Jedná sa teda o kombinovanú metódu neúčinne uzemneného uzla siete v zmiešaných alebo káblových distribučných sieťach. Vyladená tlmivka na hodnotu zemného kapacitného prúdu eliminuje prechodné zemné spojenie (cca 70 % zemných spojení vo vonkajších sieťach) a pri trvalom zemnom spojení sa pripína sekundárny odporník (cca niekoľko sekúnd po vzniku zemného spojenia). Po pripnutí odporníka dochádza k veľkému nárastu poruchového prúdu miestom zemného spojenia a to aj pri odporových zemných poruchách, ktorých odpor býva prúdovo závislý. Na tento veľký poruchový prúd potom reagujú zemné ochrany vypnutím postihnutého vývodu so zemnou poruchou.

### **2.3.2.3 Spoločné zariadenia**

Spoločné zariadenia elektrickej stanice slúžia na zabezpečenie prevádzky jej hlavných častí. Jedná sa hlavne o zabezpečenie vlastnej spotreby, zdroja nezávislého napájania dôležitých spotrebičov (akumulátorová batéria) a výrobu alebo skladovanie potrebných médií (stlačený vzduch, olejové hospodárstvo, SF<sub>6</sub>) [8].

#### **Rozvodné zariadenia vlastnej spotreby**

Pod vlastnou spotrebou elektrickej stanice sa rozumejú všetky spotrebiče, ktoré sú nutné pre prevádzku celej elektrickej stanice. Patrí sem osvetlenie, klimatizácia, napájanie pohonných jednotiek spínacích prvkov, pohonné motory kompresorov, usmerňovače pre akumulátorové batérie, IKT zariadenia, ventilátory vo vnútorných rozvodniach a spotrebiče pomocných prevádzok. Napájanie vlastnej spotreby a schéma rozvodne alebo rozvádzača vlastnej spotreby musí byť riešené tak, aby pri všetkých prevádzkových stavoch bola zaistená dodávka prúdu [8].

#### **Akumulátorová batéria**

V elektrických staniach je vždy potrebný nezávislý zdroj jednosmerného napätia. Ako zdroje jednosmerného napätia sa používajú usmerňovače alebo akumulátorové batérie. Veľkosť napätia získavaného z akumulátorovej batérie sa podľa typu napájaného zariadenia pohybuje od 24 V do 220 V. Medzi napájané zariadenia patria ochrany, ovládacie obvody pre zapínanie, vypínanie a rýchle opätovné zapínanie vypínačov, návestné svietidlá a relé, núdzové elektrické pohony, núdzové osvetlenie a náhradné osvetlenie [8].

Monitorovanie činnosti a prevádzkového stavu niektorých spoločných zariadení je pre riadenie elektrickej stanice veľmi dôležité, pretože pri strate funkcionality alebo poznania stavu týchto zariadení nie je možné uskutočňovať správne rozhodnutia pri riadení elektrizačnej sústavy.

#### **Meranie**

V elektrických staniach sa merajú najčastejšie elektrické veličiny. Medzi merané veličiny patria napätie, prúd, výkon, energia, frekvencia, rozdiel napätí a ich uhol, účinník a sled fáz. Pritom sa ešte môže jednať o veličiny jednosmerné alebo striedavé, jednofázové alebo trojfázové, činné alebo jalové. U týchto elektrických veličín môže byť požadované meranie okamžitých, stredných (efektívnych), sumárnych, minimálnych alebo maximálnych hodnôt.

Merajú sa taktiež aj rôzne neelektrické veličiny, ako teplota (oleja, transformátora,...), tlak (SF<sub>6</sub>, vzduchu,...), otáčky (chladiacich ventilátorov,...), výška vodnej hladiny, prietok a podobne.

## Stavová signalizácia

Úlohou stavovej signalizácie je poskytovať informáciu o stave silových zariadení (rozvodné zariadenia, transformátory, ...). Hlavnú časť stavovej signalizácie tvoria signály popisujúce stav spínacích zariadení (vypínače, prípojnicové odpájače, vývodové odpájače). U transformátorov je to signál udávajúci číslo odbočky príslušného vinutia transformátora.

Pri signalizácii stavu spínacích prvkov sa využíva 2-bitová signalizácia, kde každý bit reprezentuje vytvorenie (1) alebo zrušenie (0) kontaktu na opačných stranách dráhy spínacích kontaktov príslušného zariadenia. Potom je možné jednotlivé stavy signalizovať nasledovnými kombináciami:

- 00 – zariadenie je v medzipolohe,
- 01 – zariadenie je zapnuté,
- 10 – zariadenie je vypnuté,
- 11 – chybový stav.

Trvalá signalizácia stavu kombináciou 00 sa vyskytuje pri strate signalizačného napätia alebo prerušení signalizačného kábla, alebo pri revízii spínacích prvkov, kedy sú kontakty zariadenia stiahnuté do medzipolohy. Pri bezporuchovej prevádzke je tento stav dočasný a trvá len počas procesu zapínania alebo vypínania spínacieho zariadenia. Stav 11 je neprípustný, pretože nie je možné, aby kontakty na oboch stranách spínacieho zariadenia boli súčasne zapnuté. Takáto signalizácia reprezentuje skrat na zariadení alebo poruchu signalizačného zariadenia.

### 2.3.2.4 Elektrické ochrany

**Vysokonapäťové výkonové poistky** pre napäťovú hladinu 22 kV sú určené na chránenie proti nadprúdu a skratovému prúdu vo vnútorných a vonkajších transformačných staniaciach. Dimenzujú sa v súlade s normou STN 35 4720 alebo IEC 60 282-1 podľa výkonu transformátora na prúd od 4 do 100 A.

**Vedenia 22 kV** sú chránené súborom ochrán. Ako príklad je uvedené vybavenie vývodu staršej rozvodne 22 kV elektromechanickými ochranami:

- nadprúdová medzifázová ochrana, napr. AT31, AT31X,
- skratová ochrana, napr. A32,
- nadprúdová zemná ochrana, napr. A15,
- výkonová ochrana – činná zložka, zemná, napr. GSC11,
- automatika OZ, napr. OZ33,
- zemná ochrana konduktančná (G0 >), napr. Ryo (digitálna ochrana).

Nové rozvodne 22 kV sú vybavené digitálnymi ochranami, ako príklad uvádzame ochranu REF 543, ktorá má implementovaný softvér pre:

- nadprúdová medzifázová,
- skratová,
- nadprúdová zemná nesmerová - dva stupne,
- nadprúdová zemná smerová - dva stupne,
- automatika OZ.

V tab. 2.1 sú uvedené príklady osadenia vývodu ochranami podľa druhu vedenia [7].

Tab. 2.1. Ochrany vedení vn

Druh ochrany	Druh vedenia			
	podružné stanice	lúčové v napájacích staniách	okružné a paralelné obojstranne napájané	uzavreté prepojené okružné, obojstranne napájané
nadprúdová skratová časovo nezávislá	x	x <sup>1)</sup>		x
nadprúdová smerová časovo nezávislá			x	
porovnávací				x
dištančná				x <sup>2)</sup>
zemná smerová na jalovú zložku prúdu	x	x <sup>3)</sup>	x <sup>3)</sup>	x <sup>3)</sup>
zemná smerová na činnú zložku prúdu	x	x <sup>4)</sup>	x <sup>4)</sup>	x <sup>4)</sup>
nadprúdová skratová na nulovú zložku prúdu	x	x <sup>5)</sup>	x <sup>5)</sup>	x <sup>5)</sup>
záblesková	x	x <sup>6)</sup>	x <sup>6)</sup>	x <sup>6)</sup>
<p>1) prípadne aj okamihová nadprúdová                  2) keď nie je možné vyhotoviť spojovaciu cestu pre porovnávaciu ochranu                  3) v nekompensovaných sieťach s neúčinne uzemneným uzlom                  4) v kompenzovaných sieťach                  5) v sieťach uzemnených cez odpor                  6) v skriňových rozvádzačoch vn, alternatívne sa používa kostrová ochrana</p>				

Prípojnice rozvodní 22 kV sú chránené súborom ochrán podľa tab. 2.2 [7].

Tab. 2.2. Ochrany prípojnic 22 kV

Druh ochrany	do 350 MVA	nad 350 MVA
rozdielová základná		x
rozdielová záložná		x
nadprúdová základná	x	x
záblesková	x <sup>1)</sup>	x <sup>1)</sup>
1) u dôležitých rozvodných zariadení		

**Transformátory 110/22 kV** sú chránené súborom ochrán. Štandardné vybavenie transformátora ochranami je uvedené v tab. 2.3 [7].

Tab. 2.3. Ochrany transformátorov

Druh ochrany	Výkon transformátora $S_T$ (MVA)		
	$S_T \leq 1,6$	$1,6 < S_T \leq 5$	$S_T > 5$
nadprúdová skratová	x <sup>1)</sup>	x <sup>1)</sup>	x <sup>1)</sup>
poistky	x		
plynové relé	x	x	x <sup>4)</sup>
rozdielová		x <sup>2)</sup>	x <sup>3)</sup>
dištančná		x <sup>1)</sup>	x <sup>1)</sup>
zemná kostrová			x
proti preťaženiu			x
nadpäťová		x <sup>5)</sup>	x <sup>5)</sup>
1) jedna z uvedených 2) ak nevyhovie časovému nastaveniu nadprúdovej ochrany 3) od 25 MVA 4) jedna na nádobe transformátora, druhá na prepínači odbočiek 5) odporúčaná pre riaditeľné transformátory			

## Zoznam literatúry

- [1] <http://www.lana.sk/vyroba.htm> , 2008
- [2] Katalóg Kablo elektro, Kably a vodiče pro energetiku, <http://www.kabloelektro.cz>, 2008
- [3] [www.energiapro.sk/zoznampr\\_soubory/IATS/IATS.htm](http://www.energiapro.sk/zoznampr_soubory/IATS/IATS.htm) , 2008
- [4] [http://www.sezkropachy.sk/subory/SEZ\\_Odpajace\\_vonkajsie1.pdf](http://www.sezkropachy.sk/subory/SEZ_Odpajace_vonkajsie1.pdf), 2008
- [5] [http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/03b6681c06b48911c1256e5400606128/\\$File/SECTOS.pdf.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/03b6681c06b48911c1256e5400606128/$File/SECTOS.pdf.pdf)
- [6] ABB OVR Reclosers Brochure, Rev B, [www.abb.com/mediumvoltage](http://www.abb.com/mediumvoltage), 2008
- [7] Janíček, F., Arnold, A., Gorta, Z.: *Elektrické stanice*, Vydavateľstvo STU, 2001, ISBN 80-227-1630-8
- [8] Mertlová, J.: *Elektrické stanice*, Katedra elektroenergetiky ZČU Plzeň, <http://home.zcu.cz/~mertlova>
- [9] <http://www.varia-bratislava.com/izolatory.htm> , 2008
- [10] <http://www.epl.cz/cz/produkty.php>
- [11] Novák, M., Kopecký, V., Roch, M., Bracíník, P.: *ELEKTROENERGETIKA*, ISBN 978-80-89072-41-5, CD ROM, vydala EF ŽU vo vydavateľstve MARKAB s.r.o., Žilina, 2007, EAN 9788089072415

### 3. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI SIETÍ 22 kV

Na predchádzanie a rýchle rozpoznanie nebezpečných poruchových stavov v elektrických sieťach je potrebné budovať také zapojenia, konfigurácie sietí a chránenia proti poruchovým stavom, aby prípadné poruchy boli likvidované v krátkych časoch, s vysokou selektivitou a hlavne bez ujmy na zdraví a životoch ľudí.

Jednou z možností predchádzania a rozpoznávania porúch v sieti 22 kV je aj spôsob prevádzkovania uzlov transformátorov 110/22 kV, ktoré priamo súvisia s veľkosťou, charakterom poruchových a zemných prúdov a následných krokových a dotkových napätí [1].

V prípade poškodenia izolácie vn sieti voči zemi dochádza v týchto sústavách k poruchám:

- **zemným skratom** – keď je uzol napájacieho zdroja (transformátora) uzemnený priamo bez vloženej impedancie (tlmivky, odporníka) a odpor poruchy je zanedbateľný,
- **zemným spojeniam** – uzol siete je uzemnený neúčinne cez zhášaciu tlmivku, odporník alebo je izolovaný.

Počas jednopólových zemných spojení nedochádza k deformácii napäťového trojuholníka vytvoreného fázormi združených napätí, čiže do určitej hranice nevyváženosti fázových napätí je sieť prevádzkovaná aj so zemným spojením. Dovolená hodnota nevyváženosti fázových napätí, veľkosť a doba vypnutia poruchového prúdu (poruchy) závisí od veľkosti dovoleného dotkového a krokového napätia v sieťach, ale musí zohľadňovať aj prioritu vypnutí jednotlivých odbočiek napájacej rozvodne a zdrojov, stav siete, možnosť vzniku dvojitého zemných spojení.

**Podľa veľkosti prechodového odporu** v mieste zemného spojenia sa zemné spojenia rozdeľujú na:

- **odporové** – keď veľkosť prechodového odporu je niekoľko stoviek ohmov,
- **kovové a oblúkové** – keď veľkosť prechodového odporu je len niekoľko ohmov a je zanedbateľná.

**Podľa doby trvania** rozoznávame zemné spojenie:

- **okamihové** – do 0,5 s,
- **krátkodobé** – do 5 min,
- **prerušované** – okamihové alebo prerušované opakované niekoľkokrát po sebe,
- **trvalé** – niekoľko hodín (až do doby odstránenia príčiny).

Pri zvažovaní požiadaviek na prenos (bezpečnosť, bezporuchovosť, ekonomika...), hierarchie často protichodných požiadaviek na chránenie a vypínanie pri poruche, môžeme zvoliť ten „najvýhodnejší“ spôsob prevádzkovania uzla zdroja (transformátora).

Spôsoby prevádzkovania neutrálneho bodu (uzla) 22 kV strany transformátora 110/22 kV v súčasnosti používané v sieťach vn:

- **izolovaný uzol,**
- **nepriamo uzemnený cez zhášaciu tlmivku,**
- **nepriamo uzemnený cez odporník.**



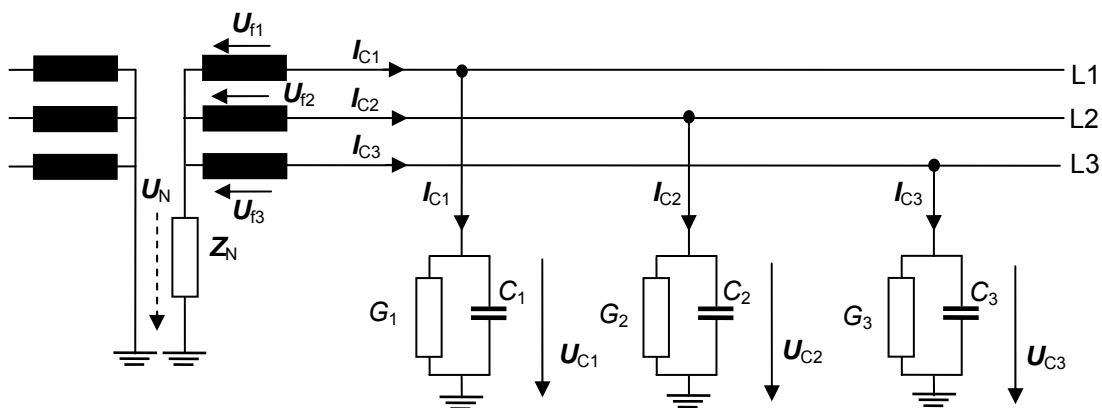
### 3.1 Prevádzka siete 22 kV s izolovaným uzlom

Rozlohou malé rozvody 22 kV najmä vo výrobných závodoch, výrobníach elektrickej energie (teplárenská vlastná spotreba) a malé mestské rozvody sú prevádzkované s izolovaným uzlom.

V týchto sieťach nie sú medzi uzlom napájajúceho transformátora na vn strane a zemou, ani medzi fázami a zemou, galvanicky pripojené žiadne impedancie okrem jednofázových prístrojových transformátorov napätia. Zvodové odpory a kapacity fázových vodičov proti zemi majú veľkosť závislú od veľkosti siete (dĺžky a počtu odbočiek), typov odbočiek (vzdušné, káblové), vyhotovenia (umiestnenie a rozloženie vodičov na podperných bodoch) a kvality izolácií (káblov, izolátorov).

Na obr. 3.1 je znázornená všeobecná sieť 22 kV napájaná transformátorom Yy0(d1). Za predpokladu  $Z_N \rightarrow \infty$  (obr. 3.3) považujeme túto sieť za sieť s izolovaným uzlom. V sieti bez poruchy sú kapacity fáz L1, L2 a L3 voči zemi približne rovnaké, čiže  $C_1 = C_2 = C_3$  a ich zvodové susceptancie sú tiež rovnaké  $G_1 = G_2 = G_3$ . Pri napájaní zo symetrického zdroja majú aj fázové napätia rovnakú veľkosť a sieť je v chode naprázdno.

Rovnakú veľkosť majú aj kapacitné prúdy jednotlivých fáz voči zemi a vzhľadom k ich posunutiu medzi sebou o  $120^\circ$  je ich výsledný súčet rovný nule (obr. 3.2a). To znamená, že medzi uzlom zdroja (transformátora) a sieťou netečú cez zem žiadne vyrovnávacie prúdy (ideálny stav). Prúdy  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ ,  $I_{C3}$  sú kapacitné prúdy jednotlivých fáz napájanej siete.



Obr. 3.1. Všeobecná sieť vn

V sieťach s izolovaným uzlom a sieťach s kompenzáciou zemných kapacitných prúdov môžeme pri výpočtoch zanedbať bez ovplyvnenia výsledku vnútornú impedanciu zdroja siete (transformátora), pozdĺžne impedancie vedení a medzifázové kapacity [3].

Označme  $Y_{C1} = G_1 + j\omega C_1$  a podobne to platí aj pre fázy L2 a L3.

Z obr. 3.1 vyplýva

$$U_{C1} - U_N - U_{f1} = 0,$$

$$U_{C2} - U_N - U_{f2} = 0, \tag{3.1}$$

$$U_{C3} - U_N - U_{f3} = 0,$$

$$I_{C1} = Y_{C1} \cdot U_{C1}, \quad I_{C2} = Y_{C2} \cdot U_{C2}, \quad I_{C3} = Y_{C3} \cdot U_{C3}. \tag{3.2}$$

Pretože sieť má izolovaný uzol, musí platiť pre prúdy

$$I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} = 0, \tag{3.3}$$

takže po dosadení do rovnice (3.3) platí

$$U_{C1} \cdot Y_{C1} + U_{C2} \cdot Y_{C2} + U_{C3} \cdot Y_{C3} = 0. \quad (3.4)$$

Keď postupne vynásobíme rovnice (3.1)  $Y_{C1}$ ,  $Y_{C2}$  a  $Y_{C3}$  a sčítame, dostaneme

$$(U_{C1} \cdot Y_{C1} + U_{C2} \cdot Y_{C2} + U_{C3} \cdot Y_{C3}) - U_N \cdot (Y_{C1} + Y_{C2} + Y_{C3}) - (U_{f1} \cdot Y_{C1} + U_{f2} \cdot Y_{C2} + U_{f3} \cdot Y_{C3}) = 0.$$

Ak platí, že

$$U_{f2} = a^2 \cdot U_{f1}, \quad U_{f3} = a \cdot U_{f1} \quad \text{a rešpektujeme rovnicu (3.4), potom platí}$$

$$-U_N \cdot (Y_{C1} + Y_{C2} + Y_{C3}) - (U_{f1} \cdot Y_{C1} + a^2 \cdot U_{f1} \cdot Y_{C2} + a \cdot U_{f1} \cdot Y_{C3}) = 0$$

a po úprave

$$U_N = -U_{f1} \frac{(Y_{C1} + a^2 \cdot Y_{C2} + a \cdot Y_{C3})}{(Y_{C1} + Y_{C2} + Y_{C3})}. \quad (3.5)$$

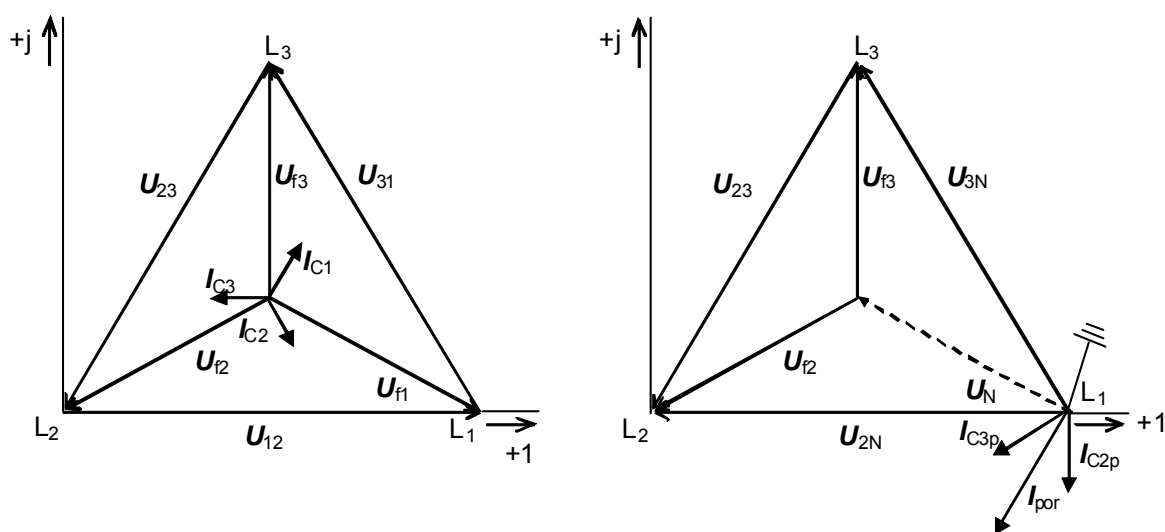
V impedančne symetrickej sieti bude

$$Y_{C1} = Y_{C2} = Y_{C3} = Y_C \quad (3.6)$$

a pre čitateľ zlomku vo vzťahu (3.5) platí

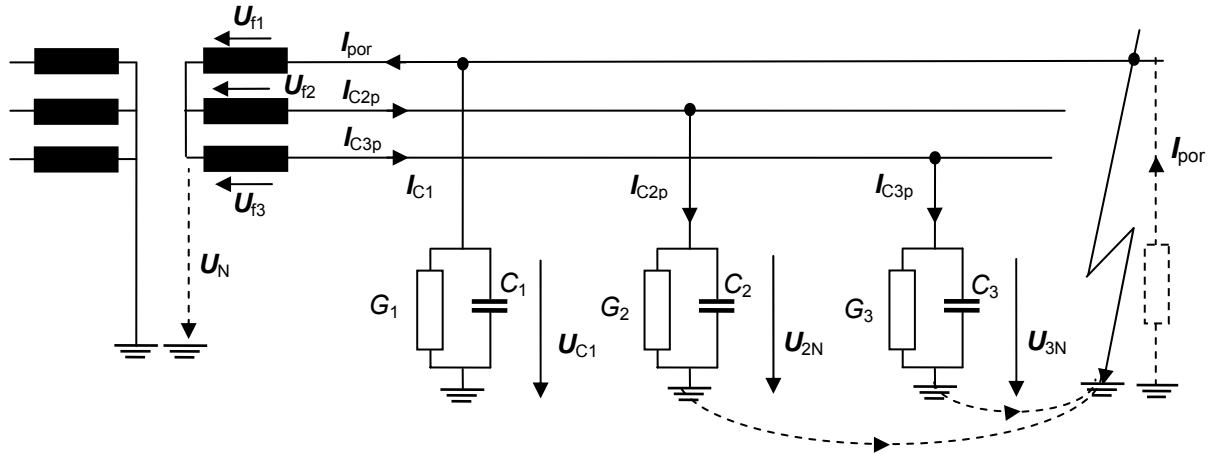
$$Y_C \cdot (1 + a^2 + a) = 0,$$

a preto je napätie izolovaného uzla proti zemi v bezporuchovej prevádzke  $U_N = 0$ . Vo všetkých ostatných prípadoch je sieť impedančne nesymetrická a  $U_N \neq 0$ .



Obr. 3.2. Fázory napätí a zemných kapacitných prúdov v sieti s izolovaným uzlom  
a) bez poruchy, b) porucha vo fáze  $L_1$

Na obr. 3.3 je znázornená sieť s izolovaným uzlom, v ktorej nastala porucha – zemné spojenie. Symetria impedancií fázových vodičov voči zemi bola porušená a tým je porušená tiež symetria fázových napätí. Zmenia sa veľkosti a uhly fázorov kapacitných prúdov jednotlivých fáz, miestom poruchy tečie do zeme poruchový prúd  $I_{por}$ , ktorý sa uzatvára cez kapacity zdravých – neporušených fáz voči zemi a cez napájací transformátor. Rozloženie fázorov napätí a prúdov bude podľa obr. 3.2b v prípade ideálneho bezodporového (kovového) zemného spojenia.



Obr. 3.3. Zemné spojenie v sieti s izolovaným uzlom

Poruchový prúd  $I_{por}$  na obr. 3.3 je zložený z dvoch prúdov, tečúcimi kapacitami nepostihnutých fáz. Tretia kapacita je skratovaná zemným spojením. Potom z obr. 3.3 vyplýva

$$I_{por} = I_{C2p} + I_{C3p} \quad (3.7)$$

$$U_{C1} = 0, \quad (3.8)$$

$$U_N + U_{f1} = 0, \quad (3.9)$$

$$U_{2N} - U_N - U_{f2} = 0,$$

$$U_{2N} = U_N + U_{f2} = -U_{f1} + U_{f2} = -U_{f1} + a^2 \cdot U_{f1} = (a^2 - 1) \cdot U_{f1} = -\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} U_{f1}, \quad (3.10)$$

$$U_{3N} - U_N - U_{f3} = 0,$$

$$U_{3N} = U_N + U_{f3} = -U_{f1} + U_{f3} = -U_{f1} + a \cdot U_{f1} = (a - 1) \cdot U_{f1} = -\sqrt{3} \cdot e^{-j30^\circ} U_{f1} \quad (3.11)$$

$$I_{C2p} = U_{2N} \cdot Y_{C2}, \quad I_{C3p} = U_{3N} \cdot Y_{C3}. \quad (3.12)$$

Z uvedených vzťahov vyplýva

- pri dokonalom zemnom spojení klesne napätie postihnutej fázy na nulu – (3.8),
- napätie uzla transformátora stúpane na hodnotu záporného napätia postihnutej fázy – (3.9),
- napätie nepostihnutých fáz stúpane z hodnoty fázovej na hodnotu združenú – (3.10 a 3.11),
- zemný poruchový prúd (3.7 a 3.12)

$$I_{por} = U_{2N} \cdot Y_{C2} + U_{3N} \cdot Y_{C3}. \quad (3.13)$$

Ak budeme uvažovať impedančne symetrickú sieť, potom bude

$$Y_{C2} = Y_{C3} = Y_C.$$

Podľa (3.10) a (3.11) bude

$$I_{por} = Y_C (U_{C2N} + U_{C3N}) = Y_C (-U_{f1} + a^2 \cdot U_{f1} - U_{f1} + a \cdot U_{f1}). \quad (3.14)$$

Ak pripočítame a odčítame v zátvorke  $U_{f1}$ , dostaneme

$$(-3U_{f1} + U_{f1} + a^2 \cdot U_{f1} + a \cdot U_{f1}) = -3 \cdot U_{f1}$$

a zemný poruchový prúd bude

$$I_{\text{por}} = -3 \cdot U_{f1} \cdot Y_C = 3 \cdot U_N \cdot Y_C. \quad (3.15)$$

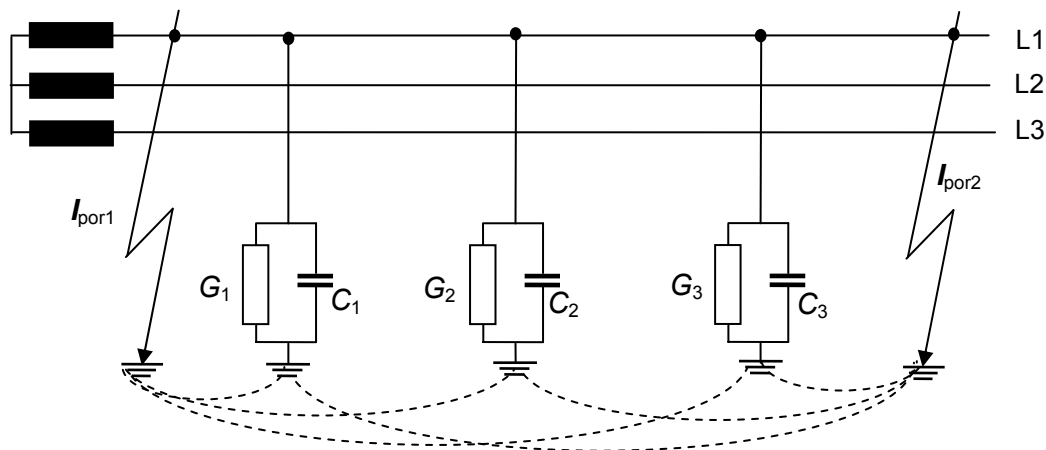
Ak vo vzťahu (3.15) zanedbáme reálnu zložku admitancie, bude poruchový zemný prúd

$$I_{\text{por}} = -3 \cdot j \cdot \omega \cdot C \cdot U_f = 3 \cdot j \cdot \omega \cdot C \cdot U_N. \quad (3.16)$$

Poruchový prúd predbieha napätie uzla sústavy o  $90^\circ$  a je súčtom kapacitných prúdov nepostihnutých fáz.

Poruchový prúd sa obyčajne v tomto prípade nazýva aj kapacitný prúd siete voči zemi  $I_{\text{kap}}$  a jeho absolútna hodnota je meradlom rozsahu siete. Podľa jeho veľkosti volíme spôsob prevádzkovania uzla zdroja v príslušnej sieti. Pre tento prípad sú znázornené prúdové a napätové pomery na obr. 3.2b.

Veľkosť kapacitných prúdov voči zemi sa v sieťach vn určuje obvykle výpočtom podľa dĺžky jednotlivých vedení siete a merných veľkostí kapacitných prúdov. Pre vzdušné vedenie 22 kV sa jednotne počíta s prúdom  $0,063 \text{ A km}^{-1}$ . Ako vyplýva z obr. 3.4, veľkosť kapacitného prúdu v danej sieti prakticky nezávisí od vzdialenosti miesta poruchy od transformátora. Na obr. 3.4 sú zobrazené 2 prípady zemného spojenia (na začiatku vedenia – 1 a priebežne na vedení – index 2), kde môžeme vidieť, že na  $I_{\text{por}}$  sa podieľajú tie isté kapacitné prúdy celej dĺžky vedenia.



Obr. 3.4. Vplyv vzdialenosti zemného spojenia od zdroja v sieti s izolovaným uzlom

**V káblových sieťach** sú merné kapacity omnoho väčšie a závisia od prierezu jadier káblov, konštrukcie kábla a druhu izolácie. Orientačne je možné počítať pre káble 22 kV s prierezmi  $120 - 240 \text{ mm}^2$  a papierovou izoláciou s mernými kapacitnými prúdmi  $3,5 - 4,5 \text{ A km}^{-1}$ .

Norma [2] pripúšťa medznú hodnotu kapacitného prúdu siete s izolovaným uzlom do 20 A (súčet kapacitných prúdov všetkých napájaných vedení). Pri dosiahnutí väčšej hodnoty kapacitného prúdu (väčší rozsah siete, viac vedení) je potrebné prevádzkovať uzol transformátora ako priamo alebo nepriamo uzemnený.

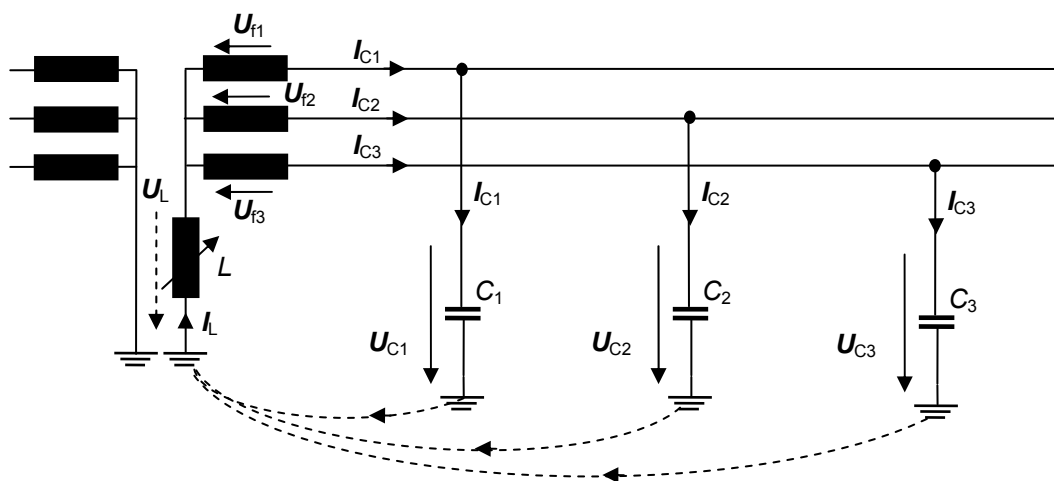
Od veľkosti kapacitného prúdu nad 10 A odporúča norma [2] kompenzáciu zemných kapacitných prúdov – spojenie uzla siete so zemou cez zhášaciu tlmivku alebo odporník, ktoré obmedzujú veľkosť zemných poruchových prúdov. Pretože poruchový prúd má kapacitný charakter, je zhášanie oblúkov vznikajúcich pri poruchách sprevádzané samozápalmi oblúka a následnými prepätiami v sieti.

Z uvedeného dôvodu je používanie izolovaného uzla obmedzené iba na rozsahom malé siete. Sieť prevádzkovaná s izolovaným uzlom má rôzne obmedzenia (rozsah, nutnosť okamžitého vypínania pri zemných spojeniach), preto nie je používaná elektroenergetickými podnikmi vo väčšom rozsahu.

### 3.2 Prevádzka siete 22 kV s nepriamo uzemneným uzlom cez zhášaciu tlmivku

Elektrické siete 22 kV, v ktorých prevažujú vzdušné vedenia, sú prevádzkované s nepriamo uzemneným uzlom transformátora cez zhášaciu tlmivku. Tlmivka je zapojená medzi uzol transformátora a zem. V normálnej prevádzke (v súmernom režime) má uzol proti zemi teoreticky nulové napätie a tlmivkou by nemal prechádzať prúd. V skutočnosti však ňou prechádza vyrovnávací prúd – nabíjací kapacitný prúd vedenia, ktorý sa uzatvára cez zem (obr. 3.5). Vzhľadom na to, že sa počas prevádzky mení konfigurácia siete (pripojovanie a odpojovanie vedení alebo ich častí), mení sa aj kapacitný nabíjací prúd siete a tlmivka musí byť regulovateľná. Indukčnosť tlmivky sa reguluje zmenou vzduchovej medzery železného jadra (posúvaním ručne alebo automaticky).

Ak dôjde v niektorej fáze vedenia k zemnému spojeniu, nastane nesymetria fázových napätí proti zemi a prúd pretekajúci zhášacou tlmivkou sa zväčší. Výsledný prúd pretekajúci miestom poruchy má zložku danú rozdielom kapacitného prúdu siete a induktívneho prúdu zhášacej tlmivky (túto zložku sa snažíme presným vyladením zhášacej tlmivky odstrániť) a nevykompenzovateľnú činnú zložku, zohľadňujúcu činné straty v zhášacej tlmivke a straty v sieti cez zvodové odpory fázových vodičov voči zemi.



Obr. 3.5. Sieť s kompenzáciou zemných kapacitných prúdov zhášacou tlmivkou

Základná schéma ideálneho obvodu je na obr. 3.5 (uvažujeme len kapacity siete voči zemi, ostatné parametre zanedbáme). Napätie na zhášacej tlmivke v súlade so zobrazenými smermi napätia  $U_L$  a prúdu tlmivkou  $I_L$  je dané vzťahom

$$U_L = -j \cdot \omega \cdot L \cdot I_L \quad \Rightarrow \quad I_L = +j \frac{U_L}{\omega L}. \quad (3.17)$$

Hodnoty napätia na kapacitách jednotlivých fáz budú

$$\begin{aligned} U_{C1} &= U_{f1} + U_L, \\ U_{C2} &= U_{f2} + U_L, \\ U_{C3} &= U_{f3} + U_L. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Prúd zhášacou tlmivkou je daný vzťahom

$$I_L = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} = j \cdot \omega \cdot (C_1 \cdot U_{C1} + C_2 \cdot U_{C2} + C_3 \cdot U_{C3}). \quad (3.19)$$

Dosadením do vzťahu (3.19) z (3.18) dostaneme

$$\begin{aligned}
 I_L &= j \cdot \omega \cdot [C_1 \cdot U_{f1} + C_2 \cdot a^2 \cdot U_{f1} + C_3 \cdot a \cdot U_{f1} + (C_1 + C_2 + C_3) \cdot U_L] = \\
 &= j \cdot \omega \cdot [(C_1 + a^2 \cdot C_2 + a \cdot C_3) \cdot U_{f1} + (C_1 + C_2 + C_3) \cdot U_L].
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Porovnaním vzťahov (3.17) a (3.20) a ich úpravou dostávame

$$\begin{aligned}
 U_L &= \omega^2 L \cdot [(C_1 + a^2 \cdot C_2 + a \cdot C_3) \cdot U_{f1} + (C_1 + C_2 + C_3) \cdot U_L], \\
 U_L - \omega^2 L \cdot (C_1 + C_2 + C_3) \cdot U_L &= \omega^2 L \cdot (C_1 + a^2 \cdot C_2 + a \cdot C_3) \cdot U_{f1}
 \end{aligned}$$

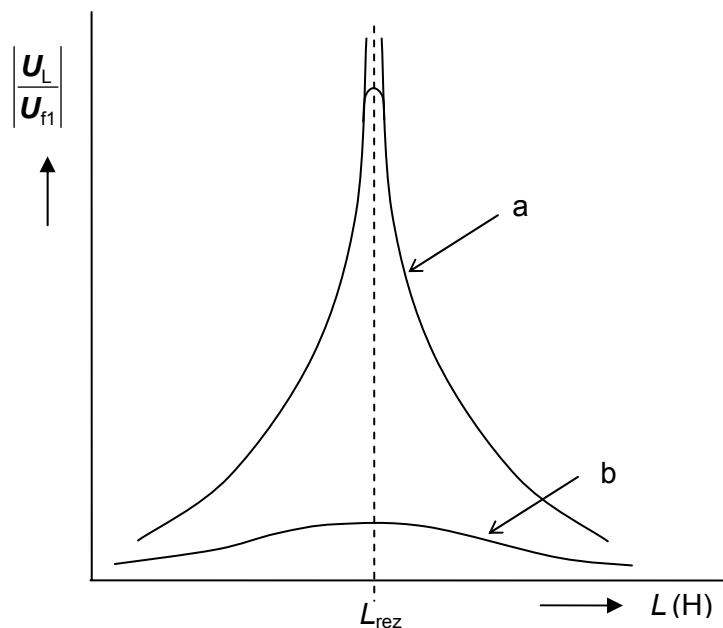
a z toho

$$U_L = \frac{\omega^2 L \cdot (C_1 + a^2 \cdot C_2 + a \cdot C_3)}{-\omega^2 L \cdot (C_1 + C_2 + C_3) + 1} \cdot U_{f1} = \frac{-\omega \cdot (C_1 + a^2 \cdot C_2 + a \cdot C_3)}{\omega \cdot (C_1 + C_2 + C_3) - \frac{1}{\omega \cdot L}} \cdot U_{f1}.
 \tag{3.21}$$

Graf funkcie

$$\left| \frac{U_L}{U_{f1}} \right| = f(L)$$

je na obr. 3.6 a predstavuje rezonančnú krivku siete z obr. 3.5. Rezonančná krivka „a“ zodpovedá istej kapacitnej nesymetrii vonkajších vedení. V skutočnosti je vplyvom činných odporov jej maximum obmedzené. Priamka prechádzajúca stredom krivky určuje rezonančnú indukčnosť  $L_{rez}$ , ktorá zabezpečuje, že pri vzniku zemného spojenia nastane úplná kompenzácia zemného prúdu. Podľa rezonančnej krivky sa reguluje tlmivka, napríklad pomocou merania napätia  $U_L$  na tlmivke.



Obr. 3.6. Rezonančné krivky

Ako vyplýva z obr. 3.6, pri veľmi nesymetrických sieťach s malými činnými odporami dosahuje maximum krivky veľké hodnoty a uzol transformátora je namáhaný veľkým napätím  $U_L$ . Preto sa v tomto prípade zhašacia tlmivka úmyselne mierne rozladí a vplyvom veľkej strmosti rezonančnej krivky napätie uzla značne poklesne.

V káblových sieťach, ktoré sú kapacitne takmer symetrické, dáva vzťah (3.21) rezonančnú krivku „b“, ktorá je tým plochejšia, čím je väčšia symetria vedení. Pomocou merania napätia je preto problematické regulovať tlmivku. Vedie to k tomu, aby sa v káblových sieťach používali siete uzemnené cez odporník.

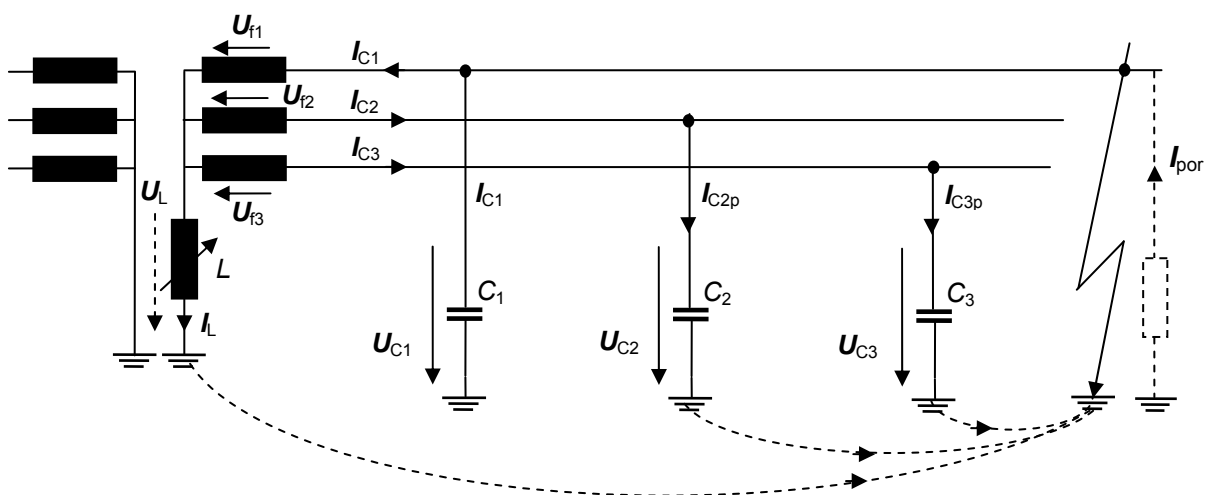
Na obr. 3.7 je znázornená sieť s nepriamo uzemneným uzlom cez zhášaciu tlmivku, v ktorej nastala porucha – zemné spojenie.

Pri dokonalom zemnom spojení je napätie uzla

$$U_L = -U_{f1} \quad (3.22)$$

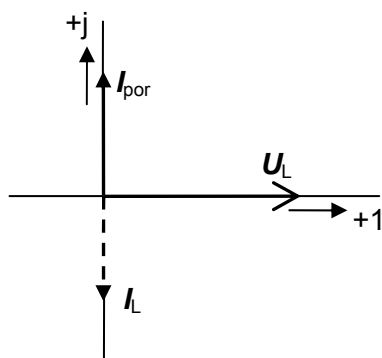
a prúd tečúci ideálnou zhášacou tlmivkou bude oneskorený o  $90^\circ$  za napätím  $U_L$

$$I_L = -j \frac{U_L}{\omega L} \quad (3.23)$$



Obr. 3.7. Zemné spojenie v sieti s kompenzáciou zemných kapacitných prúdov zhášacou tlmivkou

Pri správne zvolenej veľkosti indukčnosti  $L$  nastane kompenzácia zemných prúdov.



Pri úplnej kompenzácii platí

$$I_L = -I_{por} \quad (3.24)$$

a po úprave s použitím rovnice (3.16)

$$-j \frac{U_L}{\omega L} = -3 \cdot j \cdot \omega \cdot C \cdot U_N, \quad (3.25)$$

kde označenie  $U_L$  je analogické s označením  $U_N$  a predstavuje napätie uzla voči zemi.

Zo vzťahu (3.25) je možné vypočítať potrebnú indukčnosť zhášacej tlmivky pre úplnú kompenzáciu zemného poruchového prúdu

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} \quad (3.26)$$

a jej zdanlivý výkon

$$S = U_L \cdot I_L^* = U_L \cdot j \frac{U_L}{\omega L} = j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_L^2 = j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f^2 = j \cdot \omega \cdot C \cdot U^2. \quad (3.27)$$

Pretože sa jedná o ideálnu tlmivku, je tento výkon jalový induktívny výkon

$$Q = \omega \cdot C \cdot U^2. \quad (3.28)$$

Pri ideálnej kompenzácii netečie miestom poruchy prúd a teda oblúk sa neudrží. V skutočnosti zostáva v mieste poruchy zvyškový prúd, ktorý sa skladá z nevykompenzovaného prúdu vplyvom nepresne nastavenej indukčnosti, z nevykompenzovanej činnnej zložky spôsobenej zvodmi vedenia a činného odporu zhášacej tlmivky a tiež prúdmi harmonických zložiek. Ak je tento zvyškový prúd menší než 5 A, dochádza tiež k zhasnutiu oblúka.

Norma [2] uvádza medznú veľkosť zvyškového prúdu 60 A, je to prúd, ktorý preteká tlmivkou po vyladení. Pre celkový rozsah sietí s kompenzáciou udáva pre vzdušné siete hranicu 100 A celkového kapacitného prúdu, pre zmiešané siete (vzdušné a káblové) je hranica celkového rozsahu siete 300 A, pre káblové siete je hranica celkového rozsahu 450 A.

V kompenzovanej sieti sa musíme zaoberať dvoma druhmi nesymetrie fázových napätí voči zemi:

- **kapacitná nesymetria**, ktorá sa prejavuje v zdravých sieťach v prípadoch, keď rozdiely vo veľkostiach kapacitných prúdov jednotlivých fáz majú veľmi malé hodnoty (< 0,5 %). V praxi sa využíva na jednoduché nastavenie vyladeného stavu siete.

Pri väčších hodnotách nesymetrie (> 0,5 %) vyvoláva vo vyladenom stave rozdiely vo fázových napätiach, alebo dokonca zabraňuje prevádzkovaniu siete vo vykompenzovanom stave. Táto hodnota tiež udáva obraz o celkovom stave siete.

- **odporová nesymetria**, ktorá je daná rozdielmi v izolačnom stave jednotlivých fáz voči zemi. Prejavuje sa zemnými spojeniami vzniknutými z preskokov na izolátoroch, prierazoch pevnej izolácie (káble, izolátory), prípadne aj pri páde prerušeného vodiča na zem.

Uzemnenie neutrálneho bodu transformátora cez zhášaciu tlmivku vychádzalo v nedávnej minulosti veľmi prijateľné s ohľadom na charakter vtedajších sietí vn. Väčšina rozvodov vn bola realizovaná vzdušnými sieťami a mala pomerne veľké dĺžky. V niektorých prípadoch boli siete vn jediný (najlacnejší) spôsob ako zásobiť odľahlé oblasti, viac vzdialené od zdrojov alebo transformovní, kde neboli budované transformovne 110/22 kV pre veľké náklady vzhľadom na malý odber elektrickej energie (hlavne malé výrobné závody a maloodberatelia). Z uvedených predpokladov vychádzala snaha prevádzkovateľa distribučnej sústavy udržať v prevádzke takúto sieť čo najdlhšie aj napriek zemnému spojeniu (do maximálnej nesymetrie fázových napätí 30 – 33 %) a pomerne veľkým zvodom, spôsobených porušením izolátorov.

Sieť (vedenie) bola vypínaná iba v najnevyhnutnejších prípadoch, aj to obyčajne až ochranami vedenia alebo pri neúnosnej miere napäťovej nesymetrie fázových napätí (4 – 5 kV nebolo nič zvláštne).

V takto prevádzkovanvej sieti nielenže nebolo možné správne naladiť zhášaciu tlmivku, ale zhášanie oblúkových zemných spojení pri pôsobení automatík opätovného zapínania v zle vykompenzovanej sieti nebolo prakticky možné. Vznikali nežiaduce výpadky s prepätiami



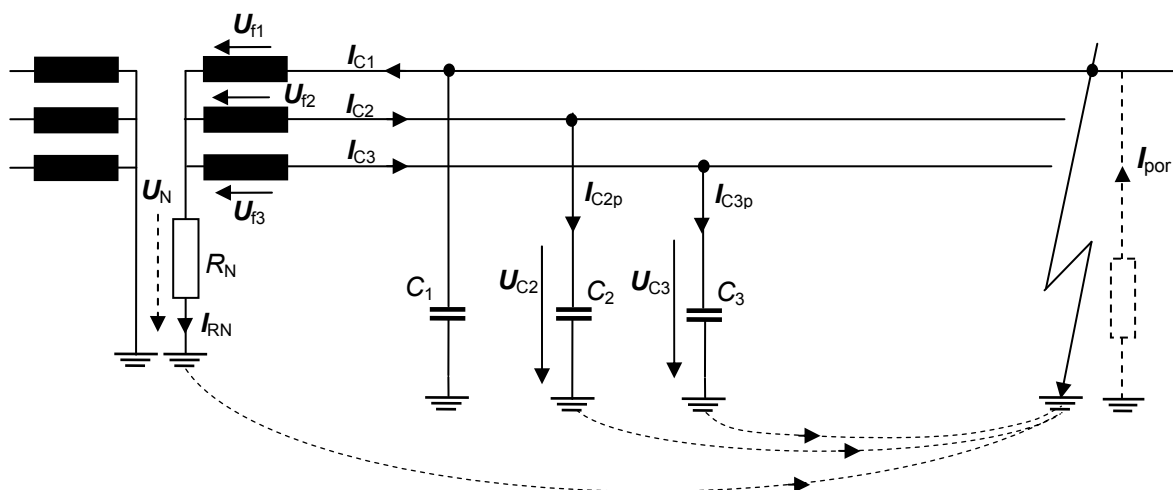
po uhasení oblúka a tým následné poruchy, ktoré mávajú vždy väčší rozsah ako prvotné a ich odstraňovanie je finančne a časovo náročnejšie.

Tento nedostatok prevádzkovania siete so zhášacou tlmivkou, ako aj rezonančné prepätia vznikajúce zo zemných skratov v napájacích sieťach 110 kV boli tlmené pridaním sekundárnych odporov, ktoré sú v čase poruchy automaticky paralelne pripájané k zhášacej tlmivke a tým zvyšujú činnú zložku poruchového prúdu zemného spojenia a vytvárajú lepšie podmienky pre selektívne pôsobenie zemných ochrán vývodov.

### 3.3 Prevádzka siete 22 kV s nepriamo uzemneným uzlom cez odporník

Aby sa predišlo problémom s naladením tlmivky v rozsiahlych káblových sieťach alebo zmiešaných sieťach s prevažujúcim počtom káblových vývodov, prevádzkujú sa s nepriamo uzemneným uzlom cez odporník. Znamená to, že uzol transformátora je uzemnený cez činný odpor a pri vzniku zemného spojenia napätie postihnutej fázy poklesne a napätie uzla sa zvýši takmer na fázové napätie. Miestom zemného spojenia preteká súčet prúdov odporníkom a kapacitných prúdov celej siete 22 kV (obr. 3.8). Veľkosť tohto poruchového prúdu je závislá od rozlohy siete a klesá so vzdialenosťou miesta zemného spojenia od uzla transformátora. Vhodnou voľbou veľkosti rezistancie odporníka sa obmedzuje veľkosť poruchového prúdu na prijateľné minimum tak, aby obmedzoval prúdy zemných porúch na hodnoty prijateľné s ohľadom na dimenzovanie uzemnení a ďalšie účinky poruchových prúdov, ale pritom zabezpečil tlmenie prepätí pri zemných poruchách a umožňoval použitie jednoduchých zemných ochrán vedení a ich správnu činnosť (obr. 3.8).

Väčšina porúch v káblových sieťach je trvalého charakteru, takže sa zmenšenie poruchového prúdu nemôže prejaviť v samozhášaní oblúkov v beznapätových pauzách automatík opätovného zapínania ako pri oblúkových poruchách u vzdušných vedení. Vo všeobecnosti automatiky opätovných zapínaní na káblových vedeniach ani nie sú prevádzkované.



Obr. 3.8. Zemné spojenie v sieti s kompenzáciou zemných kapacitných prúdov odporníkom

Podmienka tlmenia prepätí uvedená v smernici [5] vyjadruje požiadavku, aby menovitý prúd uzlového odporníka bol väčší ako je kapacitný prúd siete  $I_{\text{kap}} = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3}$ .

$$I_{\text{RN}} = \frac{U_f}{R_N} \geq I_{\text{kap}}, \quad (3.29)$$

kde je  $U_f$  fázové napätie na transformátore,

$I_{\text{RN}}$  prúd tečúci odporníkom  $R_N$  v uzle transformátora,

$I_{kap}$  celkový kapacitný prúd siete,  
 $R_N$  odpor uzla transformátora voči zemi.

Pre určenie maximálneho poruchového prúdu vychádzame z predpokladu miesta poruchy v blízkosti napájacieho transformátora a zanedbáme pozdĺžne impedancie vedenia a vnútornú impedanciu napájanej sústavy a transformátora. Potom veľkosť poruchového prúdu bude

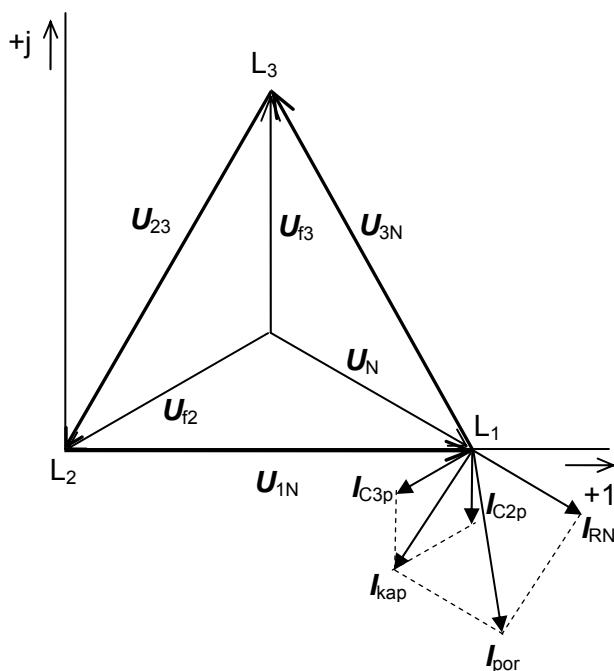
$$I_{pormax} = U_f \cdot \left( \frac{1}{R_N} + j \cdot 3 \cdot \omega \cdot C \right) \quad (3.31)$$

a jeho absolútna hodnota

$$|I_{pormax}| = U_f \cdot \sqrt{\left[ \frac{1}{R_N^2} + (3 \cdot \omega \cdot C)^2 \right]}, \quad (3.31a)$$

kde je:  $I_{pormax}$  fázor maximálneho prúdu tečúceho miestom poruchy,  
 $U_f$  fázové napätie na transformátore,  
 $C$  celková kapacita napájanej siete voči zemi,  
 $R_N$  odpor uzla transformátora voči zemi,  
 $\omega$  uhlová frekvencia.

Tento vzťah vyjadruje, že najväčší poruchový prúd v sieti s odporovým uzemnením uzla je daný geometrickým súčtom fázorov menovitého prúdu uzlového odporníka a kapacitného prúdu siete, čo je zrejmé aj z fázorového diagramu na obr. 3.9.



Obr. 3.9. Fázorový diagram napätí a prúdov v odporovo uzemnenej sieti

Jedným z hlavných dôvodov prevádzkovania siete s odporovým uzemnením uzla je možnosť jednoduchého zisťovania zemných porúch pomocou nadprúdového kritéria. Vzhľadom k veľkosti menovitých prúdov uzlových odporníkov (300 A) nie je predpoklad, že by prúdy zemných porúch boli dostatočne veľké voči prúdom záťaží jednotlivých vývodov a preto zemné ochrany u týchto vedení vyhodnocujú súčtový prúd.

Minimálny prúd ochranou pri poruche by mal byť väčší ako rozbehová (nastavená) hodnota prúdu ochrany vedenia

$$I_{\text{nast}} \leq \frac{\left| \sum I_{\text{pormin}} \right|}{k_c \cdot \rho_i}, \quad (3.32)$$

kde je  $I_{\text{nast}}$  veľkosť prúdu nastavená na zemnej nadprúdovej ochrane vedenia,

$I_{\text{pormin}}$  minimálny prúd tečúci miestom poruchy,

$k_c$  koeficient citlivosti zemnej ochrany,

$\rho_i$  prevod prístrojového transformátora prúdu pre zemnú ochranu.

Hodnota nastaveného prúdu však musí byť dostatočne väčšia, ako je súčtový kapacitný prúd vlastného vedenia (vlastný kapacitný prúd chráneného vedenia – príspevok do poruchy), aby bola ochrana necitlivá na poruchy mimo chránené vedenie

$$I_{\text{nast}} > \left| I_{\text{kapvl}} \right| \cdot k_b, \quad (3.33)$$

kde je  $k_b$  koeficient bezpečnosti (podľa francúzskej praxe sa volí  $k_b = 1,3$  – smernica [4], [5]),

$I_{\text{nast}}$  veľkosť prúdu nastavená na zemnej nadprúdovej ochrane,

$I_{\text{kapvl}}$  veľkosť kapacitného prúdu vlastného vedenia.

Veľkosť minimálneho poruchového prúdu pre oblúkové poruchy v káblových sieťach určuje smernica [5], na ktorú majú byť zemné ochrany vedení necitlivé. Odporúčaná hodnota

$$I_{\text{pormin}} = \frac{0,7 \cdot U_f}{R_N + R_V}. \quad (3.34)$$

Vzdušné vedenia majú odporúčanú veľkosť minimálneho poruchového prúdu pre nastavenie necitlivosti ochrán rovnakú ako nadprúdové ochrany uzlových odporníkov

$$I_{\text{pormin}} = \frac{0,1 \cdot U_f}{R_N}, \quad (3.35)$$

kde je  $U_f$  fázové napätie na transformátore,

$I_{\text{pormin}}$  minimálny prúd tečúci miestom poruchy,

$R_N$  odpor uzla transformátora voči zemi,

$R_V$  činný odpor vedenia (fázového vodiča).

V rozsiahlych káblových sieťach nie je možné uvedené podmienky dodržať. Veľké vlastné kapacitné prúdy vývodov nepripúšťajú dostatočne nízke nastavenie zemných ochrán jednotlivých vývodov. Z toho dôvodu je účinnejšie používať zemné smerové ochrany aktivované činnou zložkou poruchového výkonu.

Siete s odporovým uzemnením uzla patria k sieťam, ktoré je potrebné pri vzniku zemného spojenia rýchle vypínať.

## Zoznam literatúry

- [1] Bukviš, M.: *Kapacitné prúdy v sieťach vn a zemné ochrany*, Diplomová práca, Elektrotechnická fakulta, Katedra elektrickej trakcie a energetiky, ŽU v Žiline, 2002
- [2] STN 33 3070 *Kompenzácia kapacitných zemných prúdov v sieťach vn*. Praha 1982
- [3] Procházka, K.: *Vybrané problémy provozu distribučních sítí vn*. VÚE Brno, 1992, 64 str.
- [4] Procházka, K.: *Provozně technická pravidla 18/1978*. ČEZ/SEP 1978, 52 str.
- [5] Procházka, K.: *Provozně technická pravidla 12/1977*. ČEZ/SEP 1977, 30 str.

## 4. TRANSFORMÁTORY

Transformátory zohrávajú dôležitú úlohu pri prenose, rozvode a distribúcii elektrickej energie. Každá elektrizačná sústava prevádzkuje transformátory rôznych napäťových hladín a výkonov. Pri diaľkovom prenose elektrickej energie sa blokovými transformátormi (transformátory v elektrárňach) zvyšuje napätie, tzv. zvyšovacie transformátory, aby sa minimalizovali straty a zvýšil prenášaný výkon. Elektrická energia je vysokonapäťovými vedeniami distribuovaná do miesta spotreby, kde sa znižovacími transformátormi transformuje napätie z vyššieho na nižšie.

Z technického hľadiska môžeme transformátory definovať ako netočivé elektrické stroje, ktoré pracujú na princípe elektromagnetickej indukcie, kedy sa časovou zmenou magnetického toku indukuje vo vodičoch napätie.

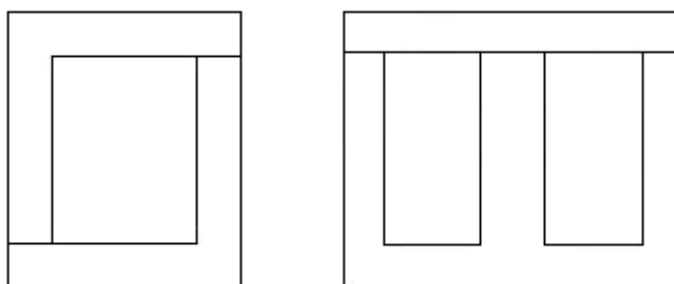
### 4.1 Konštrukcia transformátorov

#### 4.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod transformátora, jadro, sa skladá z oceľových plechov hrúbky 0,35 alebo 0,5 mm s prísadou kremíka. Normálne transformátorové plechy majú stratové číslo 1,3 W/kg. Výnimočne sa používajú aj plechy s menším stratovým číslom, okolo 1 W/kg [2].

Jednotlivé plechy sú od seba izolované na ochranu proti vírivým prúdom polepením hodvábnym papierom, lakovaním alebo fosfátovaním. Obzvlášť výhodné je fosfátovanie, ktoré umožňuje žihať nastrihané plechy za účelom zmenšenia strát.

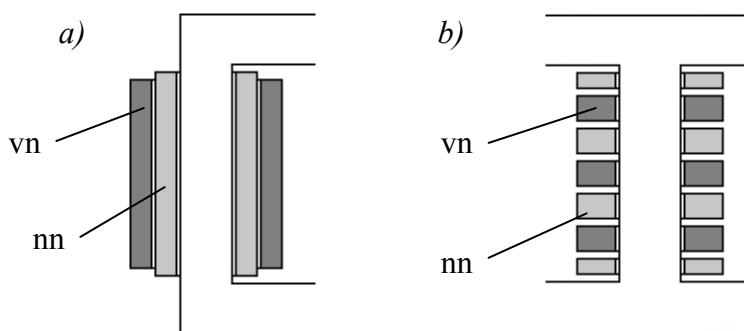
Jadro transformátora sa vytvorí poskladaním plechov, ktoré sa následne stiahnu sťahovacou konštrukciou. Plechy sa vyrábajú v rôznych tvaroch ako napr. E, I alebo L, obr. 4.1.



Obr. 4.1. Vytvorenie magnetického obvodu transformátora

#### 4.1.2 Elektrický obvod

Elektrický obvod transformátora je tvorený vinutiami, ktoré sa skladajú z cievok navinutých z medených alebo hliníkových vodičov kruhového alebo obdĺžnikového prierezu. Vodiče sú voči sebe izolované. Podľa celkového usporiadania je vinutie buď valcové alebo kotúčové, obr. 4.2.



Obr. 4.2. Usporiadanie vinutí transformátora a – valcové, b – kotúčové

U valcového vinutia sú cievky vn a nn sústredené pri sebe. Kotúčové vinutie má na stĺpiku magnetického obvodu striedavo umiestnené vinutia vn a nn. Pre magnetickú súmernosť a lepšiu izoláciu sa na konce stĺpu dávajú dve polovičné cievky nn.

## 4.2 Rozdelenie transformátorov

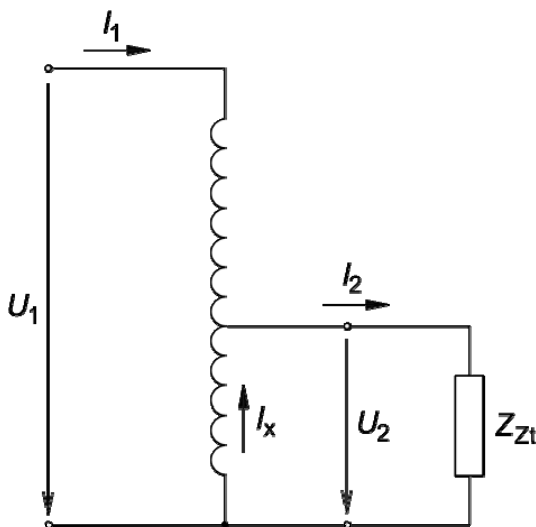
### 4.2.1 Transformátory podľa účelu [3]

- *blokové transformátory* – používajú sa v elektrárňach, ktoré nemajú odber napájaný napätím generátora. Z hľadiska počtu vinutí sa používajú dvojvinuťové alebo trojvinuťové transformátory (dva generátory na jeden transformátor), z konštrukčného hľadiska jednofázové alebo trojfázové,
- *spojovacie transformátory* – spájajú dve rôzne elektrické stanice, resp. dve alebo tri napäťové úrovne. Pri transformácii zvn, vvn/vn sa používajú buď trojfázové transformátory, autotransformátory alebo jednofázové transformátory (tri jednotky + 1 záložná),
- *distribučné transformátory alebo transformátory vlastnej spotreby* – napájajú vnútorné rozvody objektov. Sú to trojfázové transformátory s výstupným napätím vn alebo nn,
- *izolačné transformátory* – majú prevod 1:1 a galvanicky oddeľujú výrobné zdroje od vonkajších vedení, čím tieto chránia proti atmosférickým prepätiam alebo znižujú skratové prúdy.

### 4.2.2 Transformátory podľa počtu vinutí [3]

Podľa počtu vinutí transformátory rozdeľujeme na dvojvinuťové (vstupné, primárne vinutie a výstupné, sekundárne vinutie), trojvinuťové (jedno vstupné a dve výstupné vinutia) a autotransformátory.

- *trojvinuťové transformátory* sa používajú pri spojení troch sústav rôznych napätí. Tretie, terciárne vinutie, sa často nepoužíva na napájanie rozvetvených sietí, ale pripája sa k nemu napr. kompenzátor účinníka alebo transformátor vlastnej spotreby. Niekedy je toto vinutie zapojené do trojuholníka bez záťaže. Vtedy slúži na kompenzáciu harmonických vyšších rádov a na vyrovnanie nerovnomerných úbytkov napätí pri nesúmernom zaťažení,
- *autotransformátory* sú úsporné riešenie transformátorov. Majú len jedno hlavné vinutie, ktoré je pripojené na vyššie napätie. Nižšie napätie je vyvedené zo zodpovedajúceho počtu závitov tohto vinutia, obr. 4.3.



Obr. 4.3. Autotransformátor

### 4.2.3 Transformátory podľa spôsobu chladenia

Vinutie transformátorov sa pri normálnej prevádzke zahrieva prechodom záťažového prúdu. Aby sa zamedzilo prehriatiu a následne poškodeniu vinutia, vzniknuté teplo je preto potrebné odvádzať. Používané druhy chladiva a spôsoby cirkulácie chladiaceho média sú uvedené v tab. 4.1. Medzinárodne používané označenie spôsobu chladenia sa skladá zo štyroch písmen, ktorých význam je nasledovný:

1. písmeno – druh chladiva v styku s vinutím,
2. písmeno – spôsob obehu chladiva,
3. písmeno – druh chladiva v styku s vonkajšou chladiacou sústavou,
4. písmeno – spôsob obehu vonkajšieho chladiva.

Tab. 4.1. Chladenie transformátorov [3]

Druh chladiva	Označenie	Spôsob obehu chladiva	Označenie
Minerálny olej alebo ekvivalentná syntetická kvapalina (teplota vznietenia $\leq 300$ °C)	O	Prirodzený obeh	N
Iná syntetická kvapalina	L		
Plyn (teplota vznietenia $> 300$ °C)	G	Nútený obeh	P
Vzduch	A		
Voda	W		

### Suché transformátory

Tieto transformátory nevyžadujú ochranné opatrenia proti roztekaniu oleja alebo inej chladiacej kvapaliny. Vyžadujú len minimálnu pozornosť pri prevádzke a údržbe. Používajú sa na transformáciu napätia z úrovne vn na nn vo výkonových radách od 100 do 4000 kVA s krytím IP 23 [4].



Obr. 4.4. Trojfázový suchý transformátor 22/0,4 kV s liatou izoláciou [4]

## Olejšové transformátory

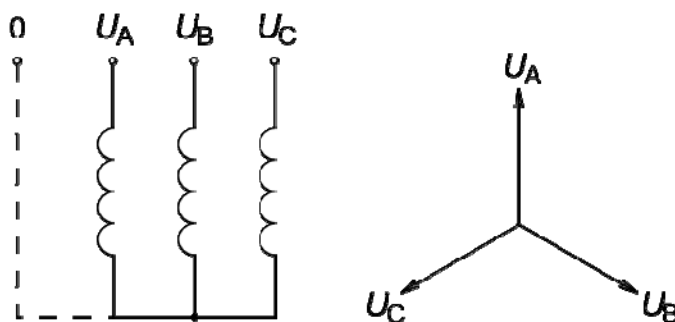
Tieto transformátory sa vyrábajú hermeticky uzavreté – distribučné transformátory vo vlnových nádobách a výkonové transformátory v radiátorových nádobách. Vinutie a magnetický obvod sú teda ponorené v chladiacom médiu, ktorým je buď minerálny alebo silikónový olej, resp. ekologické dielektrikum na báze esterov – MIDEŁ 7131. Používajú sa na transformáciu napätia z úrovne zvn/vvn a vvn/vn vo výkonových radách od 2,5 do 1000 MVA.



Obr. 4.5. Trojfázový olejový transformátor

### 4.2.4 Transformátory podľa zapojenia vinutia

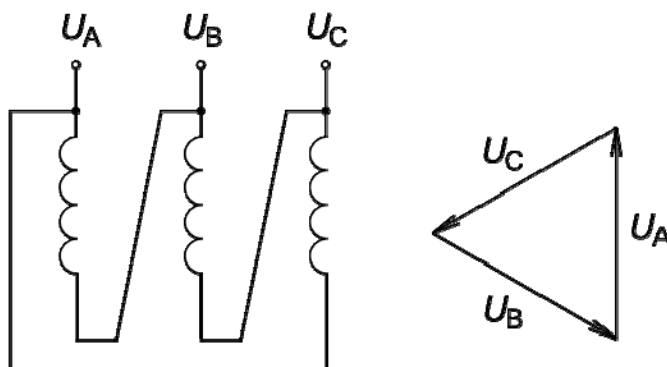
U trojfázových transformátorov máme možnosť zapojiť ich vinutia do hviezdy, do trojuholníka a do lomenej hviezdy. Ich rôznou kombináciou je možné dosiahnuť rôzne zapojenia transformátora a rôzny hodinový uhol. Hodinový uhol je fázový posun medzi fázorom napätia vstupného a výstupného vinutia tej istej fázy v tom smere, v ktorom sa uvažuje sled fáz napätia, pričom  $1 \text{ h} = 30^\circ$ .



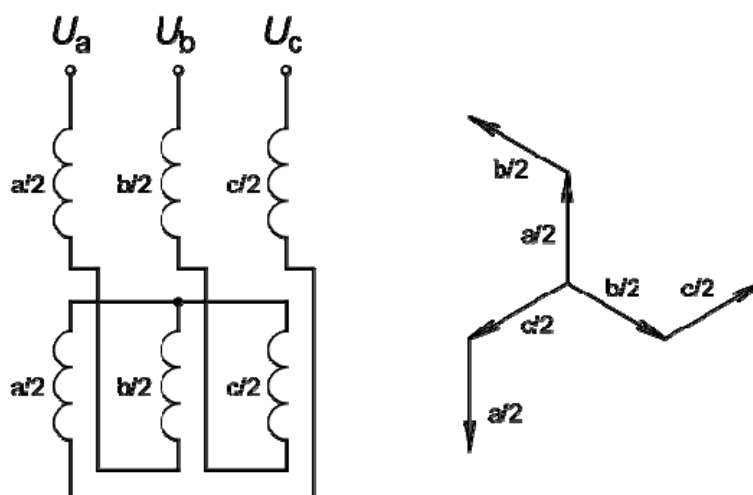
Obr. 4.6. Zapojenie vinutia transformátora do hviezdy (Y) a jeho fázorový diagram

Zapojenie vstupného a výstupného vinutia je na sebe nezávislé. Preto máme viac možností ich vzájomného usporiadania, napr. ak je vstupné vinutie, ktorého napätie je vyššie ako napätie výstupného vinutia zapojené do hviezdy (Y), obr. 4.6, a výstupné vinutie zapojené do lomenej hviezdy (Z), obr. 4.8, toto zapojenie transformátora označujeme Yz.

Pri zapojení Yy je vstupné aj výstupné vinutie zapojené do hviezdy. Pri vyvedenom uzle, čiarkovaná časť na obr. 4.6, dostávame dve napätia – fázové a združené. Transformátory s týmto zapojením vinutí sú vhodné na napájanie súmerne zaťažených sietí, napr. sieť zaťažená trojfázovými motormi. Pri transformácii v<sub>VN</sub>/v<sub>N</sub> sa obvykle používa zapojenie Yyd, kde tretie, terciárne vinutie, zapojené do trojuholníka slúži na kompenzáciu harmonických vyšších rádov a na kompenzáciu nesymetrie, obr. 4.7.



Obr. 4.7. Zapojenie vinutia transformátora do trojuholníka (D) a jeho fázorový diagram



Obr. 4.8. Zapojenie vinutia transformátora do lomenej hviezdy (Z) a jeho fázorový diagram

### 4.3 Prevádzkové stavy transformátorov

#### 4.3.1 Hlavné parametre transformátorov

##### Menovité napätie

Na štítku transformátora je vždy uvedené napätie primárneho, sekundárneho, prípadne napätie terciárneho vinutia. Pomer primárneho a sekundárneho napätia je označený ako napäťový prevod transformátora, ktorý je rovný pomeru počtu závitov vinutia na primárnej a sekundárnej strane (závitový pomer):

$$p = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (4.1)$$

kde  $U_1$  je napätie primárneho vinutia,  
 $U_2$  napätie naprázdno sekundárneho vinutia,  
 $N_1$  počet závitov primárneho vinutia,  
 $N_2$  počet závitov sekundárneho vinutia.



Prevod transformátora zisťujeme v stave naprázdno pri nízkom primárnom napätí, kedy prúd na sekundárnej strane  $I_2 = 0$  a úbytok napätia na vstupnom vinutí  $\Delta U_1 = 0$ . Pri zaťaženom transformátore treba preto rátať s miernym poklesom výstupného napätia.

### Menovitý výkon

Menovitý výkon  $S_N$  je tak isto ako menovité napätie, resp. prevod uvedený na štítku každého transformátora. Výkon sa volí z radu 12, 16, 20, 25, 30, 40, 50, 63, 80, 100, 160, 200, 250, 300, 330 400, 500 kVA a z desať, sto, príp. tisícnásobkov týchto hodnôt [3]. Uvedené hodnoty predstavujú trojfázový výkon. Pre výkon trojfázového transformátora platí:

$$S_N = 3 \cdot U_{1Nf} \cdot I_{1Nf} = 3 \cdot U_{2Nf} \cdot I_{2Nf} \quad (\text{VA; V, A}), \quad (4.2)$$

kde  $U_{1Nf}$  je menovité napätie primárneho vinutia, fázová hodnota,  
 $U_{2Nf}$  menovité napätie sekundárneho vinutia, fázová hodnota,  
 $I_{1Nf}$  menovitý prúd primárneho vinutia, fázová hodnota,  
 $I_{2Nf}$  menovitý prúd sekundárneho vinutia, fázová hodnota.

### Menovitá frekvencia

Pre naše podmienky platí:  $f_N = 50 \text{ Hz}$ . Po pripojení transformátora na napätie s inou frekvenciou dochádza k zmene jeho parametrov.

### Zapojenie vinutí

Pozri kapitolu 4.2.4 Transformátory podľa zapojenia vinutia.

### Napätie nakrátko

Napätie nakrátko je napätie, ktoré po pripojení na primárnu stranu vyvolá vo vinutiach transformátora menovité prúdy, ak sú sekundárne svorky spojené nakrátko. Hodnota tohto napätia výrazným spôsobom rozhoduje o schopnosti transformátora obmedziť skratový prúd a o úbytkoch napätia na vinutiach. Obvykle sa vyjadruje v percentách vstupného menovitého napätia.

### Prúd naprázdno

Prúd naprázdno predstavuje prúd indukívneho charakteru, ktorý prechádza primárnym vinutím transformátora v stave naprázdno. Tento prúd sa skladá z dvoch zložiek, z magnetizačného prúdu  $I_\mu$  a prúdu v železe  $I_{Fe}$ . Prúd naprázdno sa vyjadruje v percentách menovitého prúdu primárneho vinutia. Pre malé transformátory približne platí  $i_0 = 10\% I_{1N}$ , pre veľké  $i_0 = 1\% I_{1N}$ .

### Straty

Straty sú všeobecne definované ako nezvratná premena elektrickej resp. mechanickej energie na teplo. V prípade transformátorov ich rozdeľujeme na dve hlavné skupiny:

*Straty v železe*, nazývané aj *straty naprázdno*, vznikajú vtedy, ak má magnetický materiál hysteréziu alebo ak sa v elektricky vodivom materiáli časovou zmenou magnetického toku indukujú napätia a vznikajú vírivé prúdy. Straty naprázdno sú nezávislé od zaťaženia transformátora.

*Straty nakrátko* sa nazývajú tiež *straty vo vinutí*. Tieto straty, oproti stratám naprázdno, sú od zaťaženia transformátora závislé.

### Účinnosť

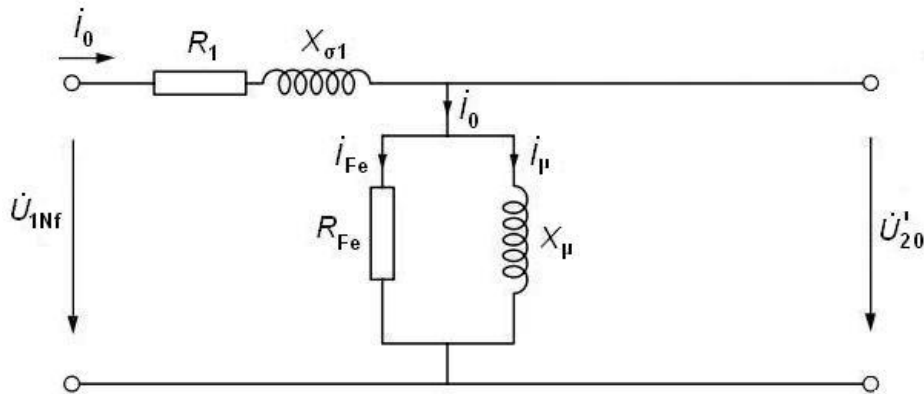
Účinnosť transformátora môžeme vyjadriť, tak ako aj u mnohých iných strojov, ako:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}, \quad (4.3)$$

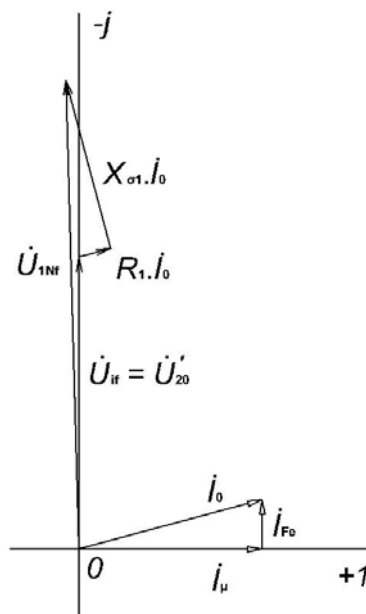
kde  $P_1$  je príkon transformátora,  
 $P_2$  činný výkon transformátora,  
 $\Delta P$  sú celkové straty transformátora.

### 4.3.2 Stav naprázdno

Stavom naprázdno sa rozumie prevádzka transformátora, pri ktorej na sekundárne svorky nie je pripojená žiadna záťaž. To znamená, že na sekundárnych svorkách bude napätie naprázdno  $U_{20}$ , ak na primárne vinutie pripojíme menovité napätie  $U_{1N}$ . Transformátor potom z napájacej siete odoberá len prúd naprázdno  $I_0$  na magnetizáciu a krytie strát v železe. Schéma zapojenia a fázorový diagram stavu naprázdno sú na obr. 4.9 a 4.10.



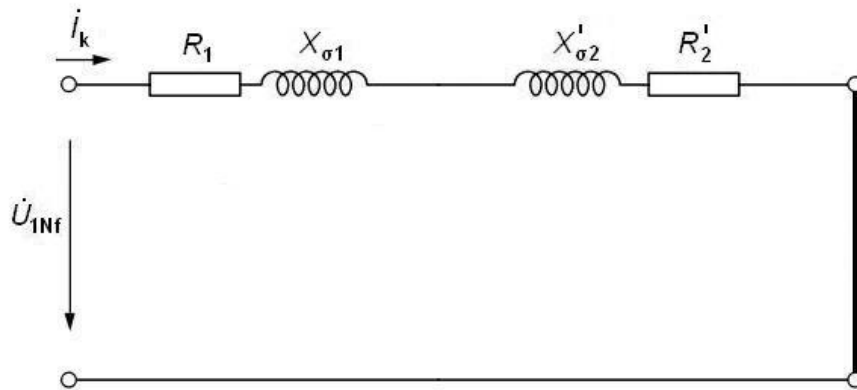
Obr. 4.9. Náhradná schéma transformátora naprázdno



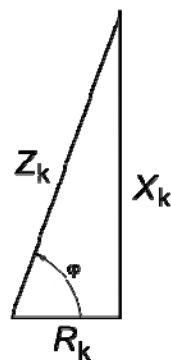
Obr. 4.10. Fázorový diagram transformátora naprázdno

### 4.3.3 Stav nakrátko

Stavom nakrátko sa rozumie prevádzka transformátora, pri ktorej sú sekundárne svorky spojené nakrátko (skratované). Ak je transformátor pripojený na menovité napätie  $U_{1Nf}$ , vinutiami tečú skratové prúdy. Ak na primárne svorky pripojíme napätie nakrátko  $U_{1k}$ , vinutiami potečú menovité prúdy. Schéma zapojenia a fázorový diagram stavu naprázdno sú na obr. 4.11.



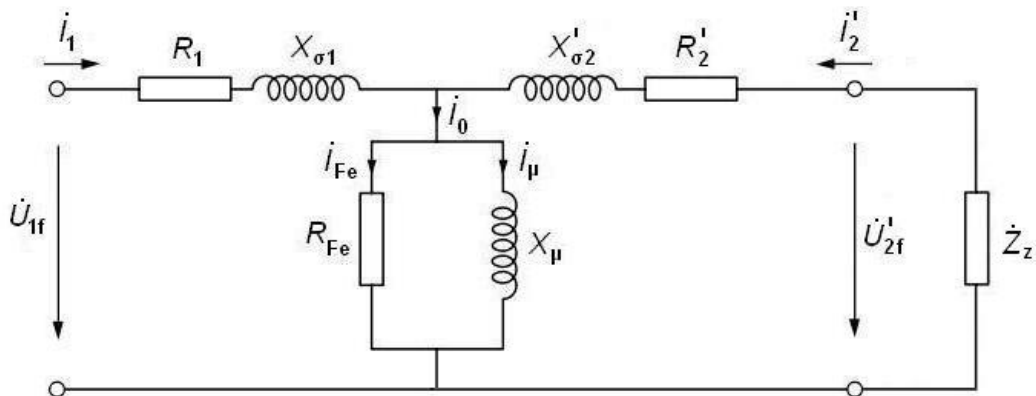
Obr. 4.11. Náhradná schéma transformátora nakrátko



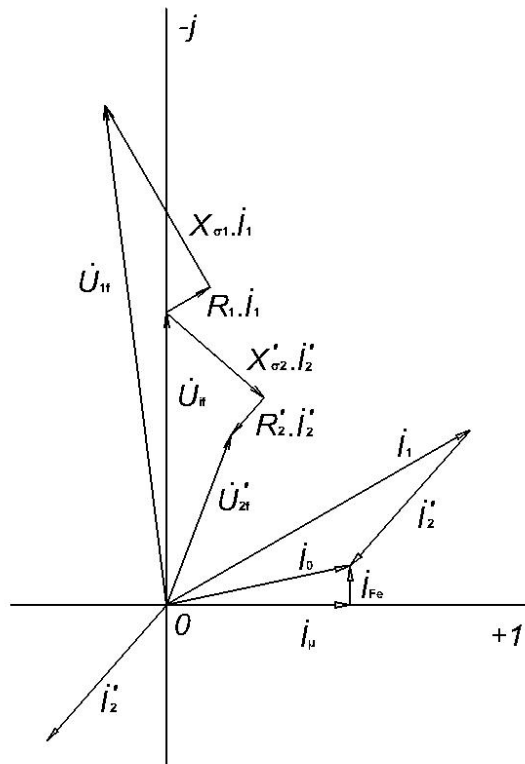
Obr. 4.12. Impedančný trojuholník stavu nakrátko

#### 4.3.4 Transformátor pri zaťažení

Tento stav predstavuje normálnu prevádzku transformátora. Schéma zapojenia a fázorový diagram stavu naprázdno sú na obr. 4.13 a 4.14.



Obr. 4.13 Náhradná schéma transformátora pri zaťažení

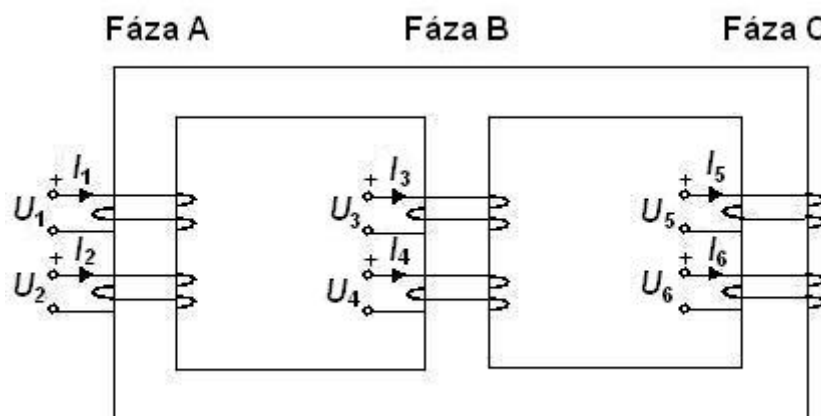


Obr. 4.14. Fázorový diagram zaťaženého transformátora

#### 4.4 Model dvoj a trojvinuťového trojfázového transformátora

Treba si uvedomiť, že hore uvedené náhradné schémy sú jednofázové. Keď je jadro trojfázového transformátora zostavené ako trojstĺpové alebo päťstĺpové a model trojfázového transformátora je tvorený tromi jednofázovými transformátormi, takýto model nereprezentuje väzbu medzi vinutiami ostatných fáz. Preto je potrebné, aby vytvorený model rešpektoval skutočné magnetické väzby medzi jednotlivými vinutiami všetkých fáz.

Na obr. 4.15 je zobrazené trojstĺpové jadro dvojinuťového trojfázového transformátora. Vinutia sú očíslované nasledovne: 1 a 2 pre fázu A, 3 a 4 pre fázu B, 5 a 6 pre fázu C.



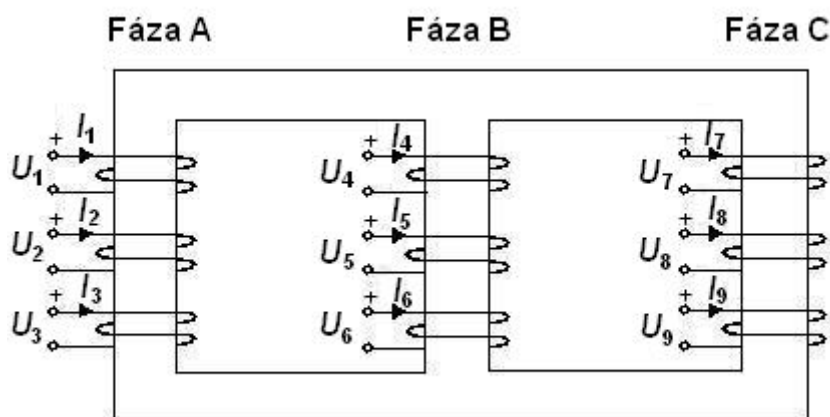
Obr. 4.15. Magnetický obvod dvojinuťového trojfázového transformátora

Z tejto geometrie jadra je zrejmé, že vinutie 1 je magneticky spojené so všetkými ostatnými vinutiami (2 až 6), zatiaľ čo pri modeli trojfázového transformátora zloženého z troch jednofázových, kde sú použité 3 nezávislé jadrá, je vinutie 1 spojené len s vinutím 2.

Maticový zápis pre model dvojvinuťového trojfázového transformátora pri rešpektovaní väzby medzi jednotlivými vinutiami:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{61} & L_{62} & \dots & L_{66} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

kde  $R_1$  až  $R_6$  sú odpory jednotlivých vinutí,  
 $L_{ii}$  sú vlastné indukčnosti vinutí,  
 $L_{ij}$  sú vzájomné indukčnosti vinutí.



Obr. 4.16 Magnetický obvod trojvinuťového trojfázového transformátora

Maticový zápis pre model trojvinuťového trojfázového transformátora pri rešpektovaní väzby medzi jednotlivými vinutiami:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{19} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{29} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{91} & L_{92} & \dots & L_{99} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_9 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

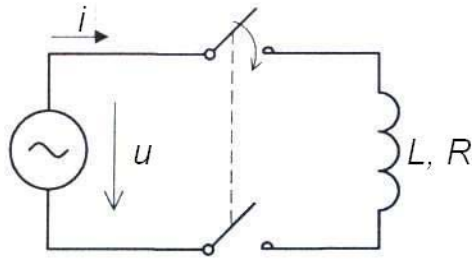
kde  $R_1$  až  $R_9$  sú odpory jednotlivých vinutí,  
 $L_{ii}$  sú vlastné indukčnosti vinutí,  
 $L_{ij}$  sú vzájomné indukčnosti vinutí.

#### 4.5 Prechodové javy v transformátoroch

V praxi je potrebné poznať aspoň nasledujúce dva prípady prechodových javov:

- pripojenie transformátora v stave naprázdno na sieť,
- náhly skrat alebo náhla zmena záťaže na sekundárnej strane.

Pri vyšetrovaní týchto prechodových javov vychádzame z prechodového javu pri zapnutí tlmivky s indukčnosťou  $L$  a odporom  $R$  na harmonické napätie  $u = U_{max} \sin(\omega t + \alpha)$ , obr. 4.17.



Obr. 4.17. Pripojenie tlmivky na harmonické napätie

Po pripojení tohto napätia môžeme obvod popísať diferenciálnou rovnicou na základe II. Kirchhoffovho zákona:

$$U_{\max} \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt}, \quad (4.6)$$

kde  $\alpha$  je fázový uhol okamihu zapnutia.

Riešením tejto diferenciálnej rovnice dostaneme:

$$i = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (4.7)$$

$$\text{čiže prúd } i \text{ sa skladá z dvoch zložiek: } i = i' + i'', \quad (4.8)$$

kde ustálená hodnota  $i'$  má priebeh sínusoidy a mení polaritu v čase s frekvenciou  $\omega$ :

$$i' = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (4.9)$$

a prechodná zložka prúdu  $i''$  má tvar exponenciály a je to jednosmerná zložka, ktorá nemení polaritu a jej zánik závisí od časovej konštanty  $\tau$  (pozri vzťah 4.14):

$$i'' = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.10)$$

V oboch prípadoch je  $\varphi$  uhol fázového posunu medzi napätím a prúdom, ktorý je daný prvkami obvodu:

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}. \quad (4.11)$$

Výraz pre prúd môžeme zjednodušiť, ak použijeme nasledovné označenia:

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{Z}, \quad (4.12)$$

kde  $Z$  je impedancia obvodu

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (4.13)$$

a časová konštanta

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (4.14)$$

Potom

$$i = I_{\max} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (4.15)$$

Konkrétny priebeh prúdu prechodového javu závisí od parametrov obvodu, ktoré určujú  $I_{\max}$ , časovú konštantu  $\tau$  a fázový posun  $\varphi$  a od okamihu zopnutia  $\alpha$ .

Najprv analyzujeme vplyv okamihu zopnutia alebo začiatku prechodového deja  $\alpha$  na tvar prúdu. V podstate môžu nastať dva medzné prípady:

1. Pripojenie na napätie alebo náhla zmena záťaže nastane v takom okamihu, keď

$$\alpha = \varphi \quad (4.16)$$

t. j. kedy prúd prechádza nulou a napätie sa v okolí  $U_{\max}$  s časom takmer nemení, obr. 4.18. Z rovnice (4.10) vyplýva, že prechodná zložka prúdu  $i'' = 0$  a celkový prúd  $i$  nabieha hneď od začiatku na ustálený tvar, ktorý možno opísať výrazom:

$$i = i' = I_{\max} \sin \omega t, \quad (4.17)$$

čo znamená, že je to najpriaznivejší možný stav, ktorý sa môže vyskytnúť, čiže prechodný stav vôbec nenastane a prúd je hneď prúdom ustáleným.

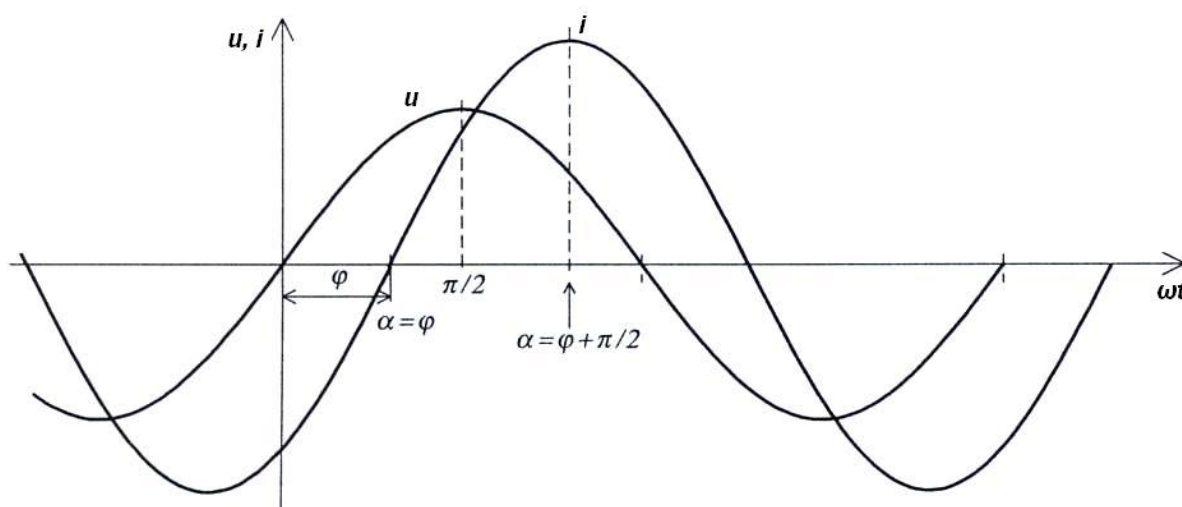
2. Pripojenie na napätie alebo náhla zmena záťaže nastane v okamihu, keď

$$\alpha = \varphi \pm \frac{\pi}{2}, \text{ resp. } \varphi - \alpha = \pm \frac{\pi}{2}, \quad (4.18)$$

t. j. vtedy, keď napätie dosahuje najväčšiu časovú zmenu a prúd by mal už dosahovať svoju maximálnu hodnotu, obr. 4.18. Prúd však vychádza z nuly, takže celý priebeh je vysunutý o jednosmernú zložku prechodového prúdu kladnej alebo zápornej hodnoty, ktorý teraz dosahuje maximálnu možnú hodnotu

$$i'' = \pm I_{\max} \left( \sin \frac{\pi}{2} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = \pm I_{\max} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (4.19)$$

Preto tento prípad predstavuje najnepriaznivejší stav.



Obr. 4.18. Vplyv okamihu zopnutia na prechodový jav

#### 4.5.1 Pripojenie transformátora v stave naprázdno na sieť

Transformátor v stave naprázdno môžeme popísať diferenciálnou rovnicou vychádzajúcou z rovnice (4.6), aplikovanou na stav naprázdno:

$$u = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha) = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt}, \quad (4.20)$$

kde  $R_1$  je činný odpor primárneho vinutia,  
 $L_1$  celková indukčnosť primárneho vinutia, čiže

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu}, \quad (4.21)$$

kde  $L_{\sigma 1}$  je rozptylová indukčnosť primárneho vinutia,  
 $L_{\mu}$  magnetizačná indukčnosť,

pričom  $L_{\mu} = f(I_0)$ , t.j.  $L_{\mu}$  je funkciou magnetizačného prúdu  $I_{\mu} \cong I_0$ .

Transformátor v stave naprázdno má činný odpor vzhľadom na reaktanciu veľmi malý:

$$R_1 \ll \omega(L_{\mu} + L_{\sigma 1}) = \omega L_1, \quad (4.22)$$

preto pri vyšetrowaní prechodového javu môžeme tento činný odpor v prvom kroku zanedbať. Potom sa transformátor javí ako čistá tlmička s fázovým posunom  $\varphi = \pi/2$ .

##### 4.5.1.1 Prechodový jav pri $\alpha = \varphi$

Najpriaznivejší stav nastane, keď sa pripojenie na napätie uskutoční v okamihu  $\alpha = \varphi = \pi/2$ , kedy  $u = U_{\max}$  a časová zmena napätia je najmenšia. Prúd prechádza nulou a narastá do svojej maximálnej hodnoty a nabieha hneď na ustálenú hodnotu prúdu naprázdno.

##### 4.5.1.2 Prechodový jav pri $\alpha = 0$

Najnepriaznivejší stav nastane, ak sa pripojenie na sieť uskutoční v okamihu nulového napätia, kedy je časová zmena napätia najväčšia.

V ďalšom budeme vyšetrowať len tento najnepriaznivejší stav. Ak teda

$$\alpha = 0 \quad \text{a} \quad \varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi - \alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{resp.} \quad \alpha - \varphi = -\frac{\pi}{2}$$

a ako vyplýva z rovnice (4.7), vyvinú sa obidve zložky prúdu. Podľa vzťahu (4.9) je ustálená zložka prúdu

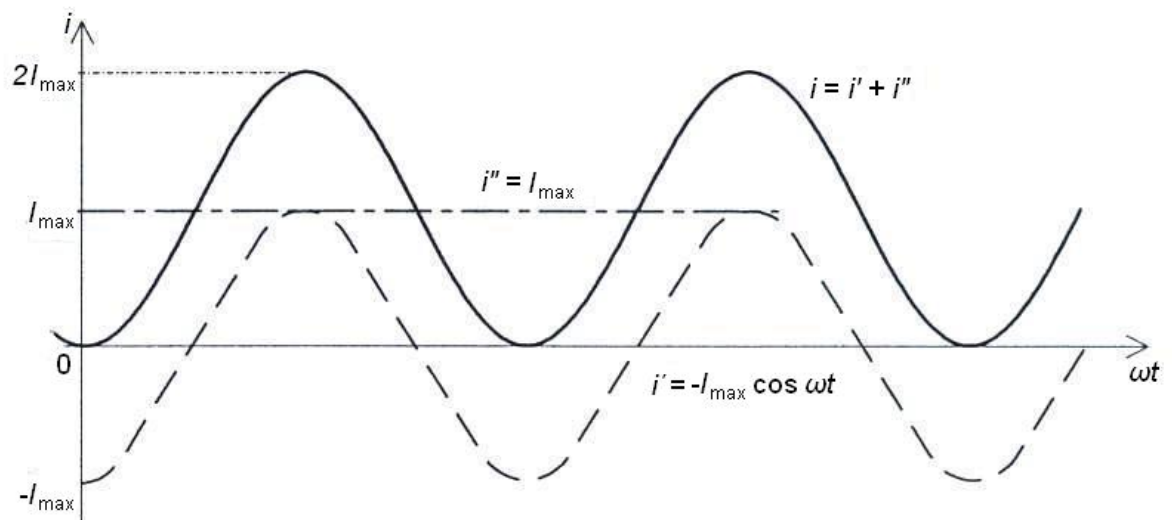
$$i' = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I_{\max} \cos \omega t \quad (4.23)$$

a prechodná zložka prúdu

$$i'' = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} \sin \frac{\pi}{2} e^{-\frac{0}{L_1} t} = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} = I_{\max} \quad (4.24)$$

má konštantnú hodnotu rovnú maximálnej hodnote ustáleného prúdu  $i'$ , pretože neuvažujeme odpor, čiže tlmenie je nulové. Výsledný prúd, daný súčtom oboch zložiek teda osciluje medzi 0 a  $2I_{\max}$ , ako na obr. 4.19.





Obr. 4.19. Prechodový dej prúdu ak  $R = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$ ,  $\alpha = 0$

#### Použitá literatúra

- [1] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M., HUDÁK, P.: *Meranie a modelovanie elektrických strojov*, EDIS 2004
- [2] CIGÁNEK, L.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL 1958
- [3] JANÍČEK, F., ARNOLD, A., GORTA, Z.: *Elektrické stanice*, STU Bratislava 2001
- [4] [www.bez.sk](http://www.bez.sk)

## 5. SPÍNACIE PRÍSTROJE

Spínacie prístroje sú určené na vypínanie a zapínanie silnoprúdového obvodu. Prostredníctvom nich je možné meniť konfiguráciu prenosových a rozvodových sústav a spínať napájané elektrické spotrebiče a elektrické zariadenia. Svojimi parametrami musia byť prispôsobené požiadavkám sústavy. Musia vyhovovať po stránke izolačnej, z hľadiska menovitých prúdov, z hľadiska namáhania pri prechodových stavoch, pri skratoch a prepätiach a z hľadiska podmienok mechanického namáhania [1].

Medzi spínacie zariadenia podľa [1] patria:

- vypínač,
- vypínač- istič,
- vypínač- prepínač,
- odpájač,
- odpínač,
- poistky,
- uzemňovače,
- skratovače,
- stýkače.

### 5.1 Ovládanie spínacích prvkov

V moderných elektrických staniaciach sa na ovládanie prvkov používa elektrický pohon, čo je pri diaľkovo ovládaných staniaciach nevyhnutnosť. Každý prvok sa z bezpečnostných dôvodov dá ovládať aj ručne. Staršie elektrické stanice používali ako pohon tlak vzduchu, k tomu však bol potrebný rozvod stlačeného vzduchu a kompresorovňa.

Od použitého pohonu odpínačov a odpájačov závisí rýchlosť ich reakcie na povel VYP alebo ZAP.

Pri vypínačoch, ktoré musia vypínať skratové prúdy, musí byť reakcia v desiatkach milisekúnd, preto sa používajú pružiny, ktoré skladujú v sebe energiu na vypnutie (zapnutie), poprípade viacej pružín na rýchle vypnutie, opätovné zopnutie a prípadné ďalšie vypnutie (cyklus OZ). Pružiny sú stláčané (nabíjané) elektrickými motormi. Štandardná hodnota nabíjania pre motor je CO – 3 min – CO (pozri kap. 5.2). Čas 3 min je na nabíjanie pružín a na ochladnutie kontaktov. Pri odpájačoch a odpínačoch nie je potrebná až taká rýchla reakcia na signál ZAP/VYP, preto sú priamo vypínané motorom, čo trvá podstatne dlhšie (rádovo v sekundách) [6].

### 5.2 Parametre spínacích prístrojov

Spínacie prístroje sú podľa [1] charakterizované nasledovnými hodnotami:

- menovité napätie  $U_N$  (kV) – rovné najvyššiemu napätiu sústavy,
- menovitý prúd  $I_N$  (A) – zodpovedá maximálnemu prevádzkovému zaťaženiu. Menovitým prúdom sa nesmú časti prístroja zohriať nad dovolenú hranicu.
- menovitá frekvencia  $f_N$  (Hz),
- menovité zotavené napätie  $U_C$  (V) – napätie, ktoré sa objaví na kontaktoch vypínača po prerušení prúdu. Je definované strmostou a prekmitom
  - o prekmit zotaveného napätia  $p$  (kV) – maximálna hodnota  $U_C$
  - o strmosť zotaveného napätia  $S$  (kV/ $\mu$ s) – nárast zotaveného napätia

- menovitý skratový vypínací prúd  $I_{vyp}$  (kA) – je to prúd, ktorý udáva výrobca a prístroj je ho za predpísaných podmienok (zotavené napätie, účinník, spínacie poradie...) schopný bez poškodenia vypnúť:

$$I_{vyp} \geq I_k'' \quad (\text{kA}; \text{kA})$$

kde  $I_k''$  je počiatkový rázový súmerný skratový prúd pri najnepriaznivejších podmienkach,

- menovitý vypínací prúd  $I_{vypo}$  – je to prúd odpínača, ktorý udáva výrobca a prístroj je ho za predpísaných podmienok (zotavené napätie, účinník, spínacie poradie...) schopný bez poškodenia vypnúť. U odpínačov sa udáva vypínací prúd pre prevažne činnú záťaž ( $\cos\varphi = 0,7$ ), pre kapacitnú a pre indukčnú záťaž,
- menovitý skratový zapínací prúd  $I_z$  – prúd, ktorý spínací prístroj bez poškodenia zapne. Prichádza do úvahy pri zapínaní do skratu, ktorého minimálna hodnota je:

$$I_z \geq I_{km} \quad (\text{kA}; \text{kA})$$

kde  $I_{km}$  je celkový nárazový skratový prúd,

- jednosmerná zložka skratového prúdu  $I_{JS}$  (%) – veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu, pri ktorej vypínač spoľahlivo rozpojí obvod. Udáva sa v percentách vypínacieho skratového prúdu,
- dynamický prúd  $I_{DYN}$  – maximálna vrcholová hodnota prúdu, ktorú prístroj znesie bez poškodenia vplyvom elektromagnetických síl. Prístroj vyhovuje, ak:

$$I_{dyn} \geq I_{km} \quad (\text{kA}; \text{kA})$$

- menovitý krátkodobý výdržný prúd  $I_K$  – prúd, ktorý prístroj krátkodobu znesie bez poškodenia alebo prehriatia sa. Zvyčajne sa udávajú hodnoty pre skrat trvajúci 1 a 3 s,
- vypínací čas  $t_{VYP}$  – čas od impulzu vypnutia až do prerušenia prúdu,
- zapínací čas  $t_{ZAP}$  – čas od impulzu zapnutia až po zopnutie kontaktu,
- čas trvania oblúku  $t_{OBL}$  – čas od vzniku oblúku až po jeho uhasenie,
- menovitá postupnosť funkcií

$$O - t_1 - CO - t_2 - CO$$

kde O – vypnutie  
CO – jedno zapnutie (CLOSE), po ktorom bez prerušenia nasleduje jedno vypnutie (OPEN),  
 $t_1, t_2$  - menovité časy medzi CO,

- menovitá postupnosť funkcií pre cyklus OZ

$$O - t_1 - CO - t_3 - CO$$

kde O – vypnutie (OPEN),  
CO – jedno zapnutie (CLOSE), po ktorom bez prerušenia nasleduje jedno vypnutie (OPEN),  
 $t_1, t_3$  – čas medzi CO pri cykle OZ.

- počet zopnutí skratového prúdu,

- počet rozopnutí skratového prúdu,
- počet zopnutí/rozopnutí menovitého prúdu,
- mechanicky prípustný počet zopnutí,
- dovolené mechanické namáhanie – statickými a dynamickými silami vo vodičoch,
- vypínacia charakteristika – grafická závislosť vypínacej doby od prúdového zaťaženia.

### 5.3 Vypínače

Slúžia na zapínanie a vypínanie prúdových obvodov v zaťaženom stave. V prípade poruchy vypínajú aj preťaženia a skraty. Vypínač musí byť schopný (pokiaľ sú dodržané podmienky stanovené výrobcom) vypnúť až do svojho menovitého vypínacieho prúdu všetky skratové prúdy s akoukoľvek striedavou zložkou a s akýmkoľvek podielom jednosmernej zložky, ak neprekročí maximálnu hodnotu striedavej zložky [2].

Podľa funkčného vyhotovenia sa podľa [2] delia na:

- máloolejové: s vlastnou zhášacou energiou,
- tlakovzdušné: oblúk zháša prúd vzduchu,
- s hexafluoridom síry (SF<sub>6</sub>): SF<sub>6</sub> je použitý ako izolačné médium a aj na zhášanie elektrického oblúku. Používa sa najmä v zapuzdrených rozvodniach. Môže byť s aktívnou (SF<sub>6</sub> hasí oblúk) alebo pasívnou zhášacou komorou (sníma sa prechod prúdu nulou),
- vákuové vypínače: izolačné médium je vákuum. Nevyžadujú žiadnu údržbu a zvládnu veľa zopnutí.

#### 5.3.1 Zotavené napätie

Je to napätie, ktoré sa objaví na kontaktoch vypínača po vypnutí obvodu. Podľa [6] sa skladá z dvoch zložiek:

- obnovené napätie (ustálená hodnota zotaveného napätia, napätie zdroja),
- prechodová zložka (časom sa utlmí).

Prechodová zložka je charakterizovaná rezonančnou frekvenciou  $f_r$ . Zotavené napätie je dôležitým parametrom určujúcim vypínacie schopnosti vypínača, pretože ak má dôjsť k vypnutiu prúdu, musí byť po zániku oblúka prirazne pooblúkové napätie vždy väčšie než zotavené napätie. Parametre charakterizujúce zotavené napätie:

a) frekvencia prechodovej zložky

$$f_{rid} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (5.1)$$

b) stredná strmosť nárastu zotaveného napätia

$$s_{id} = \frac{U_{zn\ max}}{t_{1\ max}} \quad (5.2)$$

kde:  $U_{zn\ max}$  – maximálna hodnota zotaveného napätia,

$t_{1\ max}$  – doba od začiatku vypnutia k vyvinutiu.

c) prekmit, t. j. pomer maximálnej hodnoty zotaveného napätia k okamžitej hodnote obnoveného napätia

$$\gamma_{id} = \frac{U_{zn\ max}}{U_m \cdot \sin\varphi} \quad (5.3)$$

Pri vypínaní reálnym vypínačom môžu nastať podmienky, ktoré potom ovplyvnia riešenie vypínača a ktoré plynú z nasledujúcich skutočností:

- a) pri vypínaní vzniká elektrický oblúk, charakterizovaný určitým napätím na oblúku,
- b) pri vypínaní môže dôjsť k prerušeniu prúdu pred prirodzenou nulou (useknutie prúdu),
- c) po vypnutí zostane medzikontaktný priestor po určitý čas v ionizovanom stave, čo sa prejaví jeho určitým zvyškovým odporom, ktorý sa mení s časom.

### 5.3.2 Vznik elektrického oblúka medzi kontaktmi

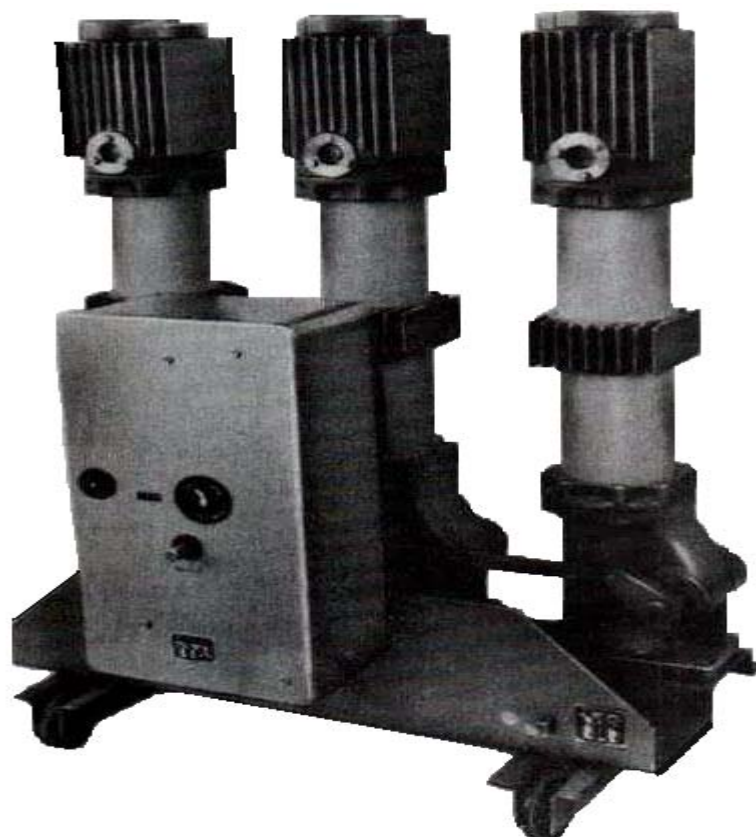
V zapnutom stave sú kontakty vypínača podľa [6] navzájom pritlačované silou kontaktnej pružiny. Táto sila pružne deformuje súčasne aj plasticky materiál v oblasti styku kontaktov. Prúd neprechádza celou plochou kontaktov, ale iba určitým počtom mikroskopicky malých kontaktných plôšok následkom nerovnosti povrchu elektród.

Behom vypínacieho procesu pochodu sa znižuje sila kontaktnej pružiny, kontakty sa pohybujú v medziach pružnej deformácie materiálu, znižuje sa veľkosť a počet bodových plôšok. Vzrastá kontaktný odpor, zväčšuje sa ohrievanie kontaktných mostíkov Joulovým teplom.

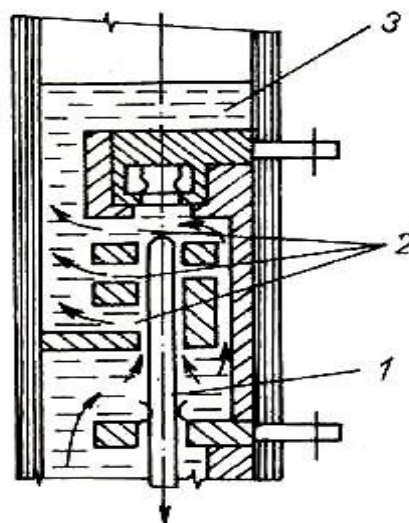
Z elektródy, ktorá je v okamžiku rozpojenia kontaktov katódou, sú elektrickým poľom vyvrhované elektróny a po urýchlení vytvoria elektrónovú lavínu a vznikne oblúk.

### 5.4 Popis vypínačov

Na obr.5.1 je máloolejový vypínač vyrábaný v k. p., EJF Brno. Na obr.5.2 je zhášacia komora máloolejového vypínača, u ktorej pri zhášaní oblúka prúdi olej kolmo k ose oblúka (je tu tzv. priečne prerušenie oblúka). Pri vypnutí vypínača sa pohybuje spínací kolík (1) smerom dole. Vzniknutý oblúk odparí okolitý olej a pary unikajú zo zhášacej komory kanálikmi (2) postupne tak, ako sa pohybujúci sa kolík odkrýva. Priestor, ktorý sa za pohybujúcim sa kolíkom uvoľňuje, je zaplavovaný čerstvým olejom zo zásobného priestoru (3). Teplom oblúka sa olej odparuje, oblúk sa ochladzuje a pri priechode prúdu nulou zhasne [11].

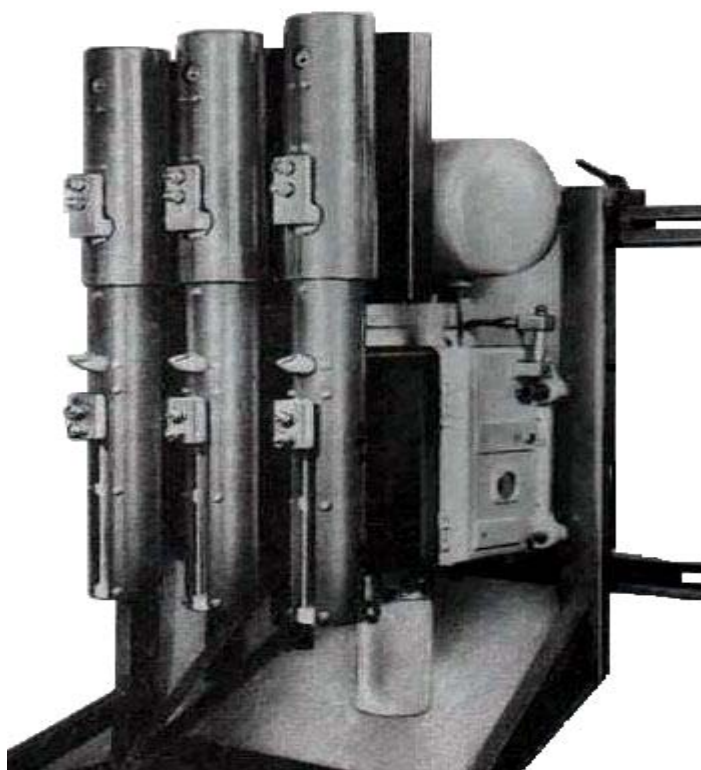


Obr. 5.1. Máloolejový vypínač (výrobok EJF, k. p., Brno) [11]

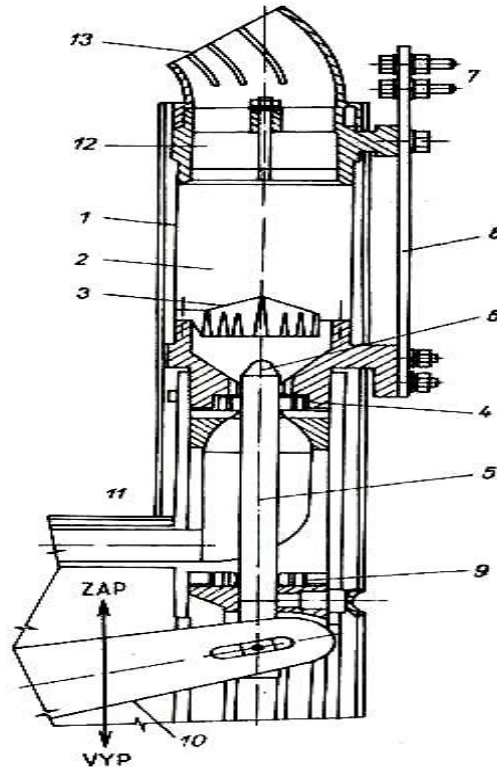


Obr. 5.2. Zhášacia komora máloolejového vypínača [11]

Zhášanie elektrického oblúka v tlakovzdušných vypínačoch sa dá prirovnať k zhasnutiu plameňa sviečky. U tlakovzdušných vypínačov sa k zhášaniu elektrického oblúka používa vzduch stlačený na tlak 1 až 2,5 MPa, ktorý sa vháňa do priestoru medzi kontaktmi. Na obr.5.4 je rez jedným pólom zhášacej komory. Izolačný valec (1) tvorí zhášaciu komoru (2), v ktorej je uložená opaľovacia mreža (3). V spodnej časti zhášacej komory je zachytená objímka pevného ružicového kontaktu (4). Do kontaktu sa zospodu zasúva spínací kolík (5) s opaľovacím hrotom (6). Prívod prúdu k ružicovému kontaktu od hornej svorky (7) zaisťuje prívodný pás (8). Kolík je natrvalo spojený so spodným kontaktom (9), ktorý je vyvedený na spodnú prívodnú svorku (na obr.5.4 nie je vyznačená, ale vidieť ju na obr.5.3). Spínací kolík sa ovláda pákou (10), ktorá má tlakovzdušný pohon. Pri vypínaní sa spínací kolík pohybuje smerom nadol a do priestoru okolo kolíka prúdi trubicou (11) stlačený vzduch. Vzduch vháňa horiaci oblúk medzi ružicovým kontaktom a kolíkom do zhášacej komory. Tam sa na opaľovacej mriežke oblúk roztriešti, ochladí a zhasne. Vzduch zhášacej komory uniká cez tlmič (12) šikmým výfukom (13) do ovzdušia. Na obr.5.3 je celkový pohľad na tlakovzdušný vypínač vn [11].



Obr.5.3. Tlakovzdušný vypínač typu CNR, 1000 A, 22 kV (výrobok EJF, k. p., Brno) [11]



Obr.5.4. Rez jedným pólom zhášacej komory tlakovzdušného vypínača [11]

## 5.4.1 Vákuový vypínač

### 5.4.1.1 Vlastnosti vákuových zhášadiel

Podrobné vlastnosti vákuových vypínačov sú popísané v [6].

Výhody:

- nehorľavosť,
- tichý chod,
- nevyfukujú ionizované plyny alebo plamene,
- majú o jeden až dva rády nižšie oblúkové napätie,
- minimálne opotrebenie,
- malý potrebný zdvih,
- minimálna údržba,
- dlhý bezrevízny chod.

Nevýhody:

- utrhávanie prúdu pred jeho nulou,
- problémy pri určovaní ďalšej životnosti pri prevádzke.



#### 5.4.1.2 Izolačné vlastnosti vákuu a vznik oblúka vo vákuu

Oblasť tlakov od  $10^{-3}$  Pa a nižších sa vo vákuovej technike nazýva *vysoké vákuum*. Pre toto vákuum prierazné napätie je nezávislé od tlaku. Elektrická pevnosť medzery vo vákuu je oveľa väčšia ako pevnosť tej istej medzery pri atmosférickom tlaku. Vákuum však nie je ideálnym izolantom, pretože aj pri ňom dochádza pri určitom napätí k prierazu, avšak mechanizmus jeho vývoja je odlišný. Prieraz vo vákuu je spôsobený prítomnosťou elektród.

Vznik oblúka pri vypínaní vo vákuovom zhášadle je možné vysvetliť takto [6]: V zapnutom stave prechádza prúd niekoľkými dotykovými bodmi, v ktorých sa kontakty dotýkajú. Pri vypínanom procese najprv zaniká kontaktná sila, tým sa znižuje počet stykových bodov a prúd sa presúva do posledného miesta dotyku kontaktov. Toto miesto sa Joulovým teplom značne zahrieva, až dôjde k vypareniu časti kontaktového kovu. Medzi oddiaľujúcimi sa kontaktmi sa objaví mrak kovových pár. Dochádza k ionizácii kovových pár a prenosu prúdu vzniknutou plazmou. Na katóde sa vytvorí katódová škvrna s veľkou prúdovou hustotou v rozmedzí  $10^3$  až  $10^4$  A.mm<sup>-2</sup>. Katódová škvrna je zdrojom kovových pár pre vákuový oblúk. Oblúk teda horí v kovových parách. Styková plocha oblúka s anódou je veľká, čo zaručuje, že na anóde sa neobjaví prehriate miesto.

Pri horení oblúka unikajú do okolitého priestoru jednotlivé ionizované častice. Tieto častice je nutné dopĺňať, a preto sa musí oblúk stále zásobovať kovovými parami z katódovej škvry. Pri nedostatočnom prísune kovových pár oblúk stráca stabilitu a vypínač odsekáva prúdy mimo ich prirodzenú nulou. Pri prechode striedavého prúdu zanikajú katódové škvry za dobu asi  $10^{-8}$  s. Plná elektrická pevnosť medzi kontaktmi sa obnovuje v mikrosekundových dobách. Časť kovových pár kondenzuje na anóde, časť, ktorá uniká z priestoru medzi kontaktmi, kondenzuje na tieniacich krytoch obklopujúcich kontakty. Vypínacími pochodmi teda dochádza k strate kontaktného materiálu. Táto strata je závislá na veľkosti vypínacieho prúdu, fyzikálnych vlastnostiach kontaktov, na tvare a veľkosti kontaktov. Straty u bežne používaných materiálov sa zhruba pohybujú okolo  $10^{-3}$  μg.C<sup>-1</sup>.

Často bývajú tieto straty z hľadiska životnosti pre vákuové zhášadlá limitujúce. Pretože pre vznik vákuového oblúka a k jeho horeniu je nutná katódová škvrna a po prechode prúdu nulou a zmene polarít elektród nemáme na novej katóde (predtým anóde) žiadne prehriate miesto schopné generovať kovové pary, nemôže sa oblúk znova zapáliť. Vákuový vypínač teda vypína v prvej nule prúdu. Vákuový vypínač je vhodný k vypínaní striedavých prúdov, nie je vhodný pre jednosmerný prúd.

#### 5.4.1.3 Utrhávanie prúdu pred jeho prirodzenou nulou

Ako je uvedené v [6], utrhnutie prúdu pred jeho prirodzenou nulou je najzávažnejším problémom vákuových zhášadiel. Je spôsobené tým, že pri určitom minimálnom prúde sa neodparí dostatok kovu katódy a oblúk prestane byť stabilný. Prúd rýchlo zanikne na nulou. Toto prebehne rádovo za  $10^{-8}$  s a spôsobí veľké prepätie. Utrhnutie prúdu je možné zmenšiť vhodnou voľbou materiálu katódy alebo zmenou tvaru katódy. Do základného kontaktného materiálu sa primieša materiál s vyššou produktivitou pár, ktorý zaisťuje dostatočné množstvo pár aj pri nižšej teplote katódovej škvry, alebo vhodným tvarom katódy zmenšíme množstvo odvádzaného tepla z katódovej škvry do telesa katódy.

## 5.4.2 Plynový vypínač SF<sub>6</sub>

Podrobné vlastnosti vypínača SF<sub>6</sub> sú opísané v [6]. Tu sú uvedené iba základné vlastnosti plynu SF<sub>6</sub> a stručná charakteristika plynových vypínačov SF<sub>6</sub>.

### 5.4.2.1 Vlastnosti plynu SF<sub>6</sub>

Výhody:

- patrí k najstabilnejším chemickým zlúčeninám:
  - bezfarebný,
  - bez zápachu,
  - nehorľavý,
  - nejedovatý,
- elektrická pevnosť SF<sub>6</sub> pri atmosférickom tlaku je viac než 2-násobná ako u vzduchu.

Nevýhody:

- v porovnaní s ostatnými plynmi nie je príliš dobrý v odvedení tepla,
- vplyvom elektrického oblúka dochádza k rozpadu SF<sub>6</sub> na odpadné produkty, ktoré majú viac alebo menej škodlivé účinky na človeka.

### 5.4.2.2 Charakteristika plynových vypínačov SF<sub>6</sub>

Prvé vypínače s plynom SF<sub>6</sub> boli vyvinuté v USA na počiatku päťdesiatich rokov. Tieto vypínače priaznivo spájajú výhody olejových vypínačov a vypínačov na stlačený vzduch, pričom nemajú ich nedostatky.

Účinok SF<sub>6</sub> na oblúk je obecné daný konštrukciou zhášadla. Vo všetkých zhášadlách je elektrický oblúk ňahovaný vzdalujúcimi sa kontaktmi a zároveň je ofukovaný plynom.

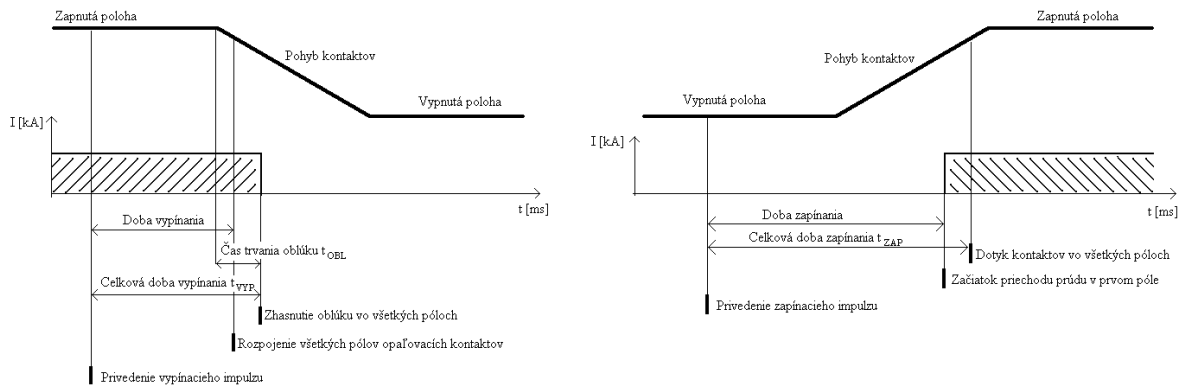
Jednotlivé princípy ofukovania možno rozdeliť takto:

- a) *Jednoduché oddialenie kontaktov.* Uhasenie oblúka jednoduchým oddialením kontaktov vložených do nádoby naplnenej SF<sub>6</sub> je jedným z najjednoduchších.
- b) *Zhášadlo využívajúce energiu oblúka.* U tohto je oblúk zhášaný prúdom expandujúceho SF<sub>6</sub>, ktorý vzniká tepelným účinkom tzv. pomocného oblúka. Pri pohybe kontaktov dôjde k zapáleniu dvoch oblúkov v sérii. Jeden z nich je pomocný a spôsobuje tepelnú expanziu SF<sub>6</sub> a druhý je v prúdiacom SF<sub>6</sub> zhášaný.
- c) *Zhášanie v kvapalnom SF<sub>6</sub>.* Mechanizmus zhášania týchto vypínačov je obdobný ako u olejových vypínačov. Plyn SF<sub>6</sub> má v kvapalnom stave rovnakú izolačnú pevnosť ako v plynnom stave, avšak pri omnoho väčšej hmotnosti.
- d) *Princíp využívajúci krúženie oblúka.* U tohto zhášadla bol pohyb plynu nahradený pohybom oblúka. Kontaktné ústrojenstvo s čelným stykom, ponorené do nádoby so stlačeným SF<sub>6</sub>, je vybavené cievkami, ktorými prechádza vypínaný prúd a ktorých magnetické pole s polom oblúka vytvára zložku sily, ktorá uvádza oblúk do krúživého pohybu. Tým je uskutočnené priečne ofukovanie oblúka.
- e) *Automatické zhášadlo.* Oblúk je zhášaný prúdom SF<sub>6</sub>, ktorý je vyvolaný pri vypínaní cyklo piestom, ktorý sa pohybuje vo valci a je poháňaný vypínacou pružinou. Rôzne konštrukcie autopneumatických zhášacích komôr s SF<sub>6</sub> využívajú v podstate dva princípy zhotovenia – konštrukcia s pevnou kovovou tryskou alebo konštrukcia s pohyblivou izolačnou tryskou.

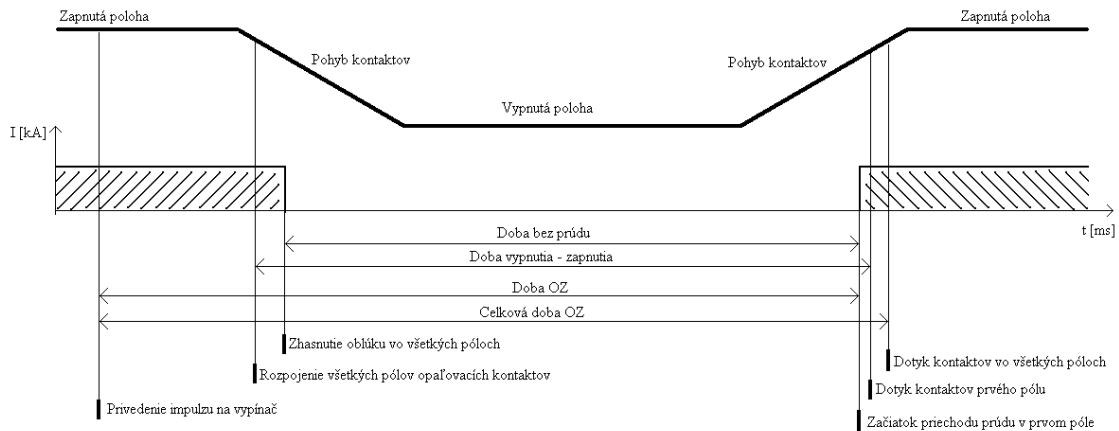
- f) *Dvojtłaková sústava.* U tejto sústavy je na zhášanie využité ofukovanie prúdom SF<sub>6</sub>, ktorý vzniká pri prepustení z nádoby s vysokým tlakom (asi 1,5 až 2 MPa) do nádoby s nízkym tlakom (0,2 až 0,4 MPa). Po prebehnutí pracovného cyklu sa automaticky zapne kompresor, ktorý prečerpá SF<sub>6</sub> z nádoby s nízkym tlakom do nádoby s vysokým tlakom.

Pozn.: Z uvedených spôsobov sa v praxi najlepšie osvedčila sústava *autopneumatická a dvojtłaková*.

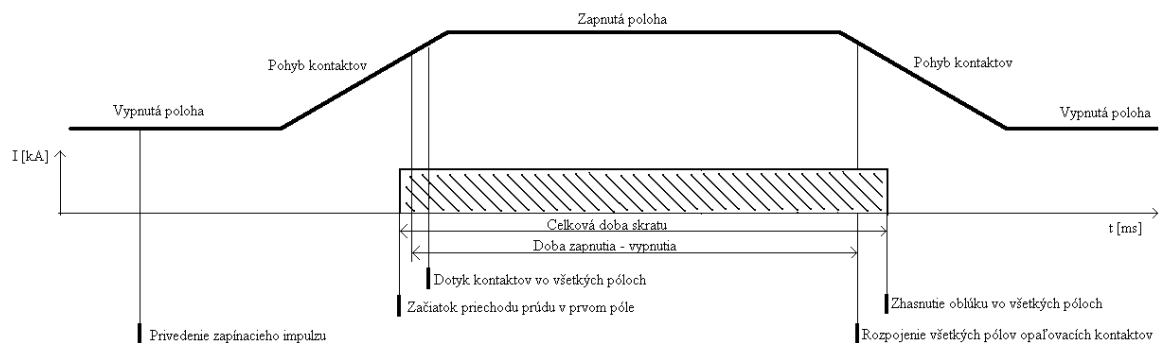
Na obr.5.5 je zobrazený časový priebeh vypínacieho a zapínacieho prúdu vo vypínači, na obr.5.6 je priebeh závislosti prúdu na čase pri opätovnom zopnutí a na obr.5.7 je časový priebeh zopnutia a vypnutia vypínača.



Obr.5.5. Časový priebeh a) vypínania b) zapínania [3]



Obr.5.6. Časový priebeh OZ [3]



Obr.5.7. Časový priebeh zapnutia – vypnutia [3]

Bežné hodnoty vypínačov podľa [4] pre 22 kV vedenia:

$$U_N = 25 \text{ kV}$$

$$I_N = 630 \div 2500 \text{ A,}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz,}$$

$$U_c = 41 \text{ kV, záleží od } U_N, \text{ zvyčajne } U_c = 1,7 \cdot U_N,$$

$$S = 0,34 \div 0,57 \text{ kV}/\mu\text{s,}$$

$$I_{VYP} = 12 \div 25 \text{ kA,}$$

$$I_Z = 25 \div 62,5 \text{ kA, väčšinou platí } I_Z = 2,5 \cdot I_{VYP},$$

$$I_{JS} = 20 \div 30 \%,$$

$$I_{DYN} = 25 \div 62,5 \text{ kA, väčšinou platí } I_{DYN} = I_Z$$

$$I_{Kt=1s} = 16 \div 25 \text{ kA, zvyčajne rovný } I_{VYP},$$

$$I_{Kt=3s} = 16 \div 25 \text{ kA, zvyčajne rovný } I_{VYP},$$

$$t_{VYP} = 40 \div 60 \text{ ms,}$$

$$t_{ZAP} = 30 \div 60 \text{ ms,}$$

$$t_{OBL} \leq 20 \text{ ms,}$$

menovitá postupnosť funkcií  $t_1 = 3 \text{ min}$ ,  $t_2 = 3 \text{ min}$ ,

menovitá postupnosť funkcií pri OZ:  $t_1 = 0,3s$ ;  $t_2 = 15s$ ,

počet zopnutí/rozopnutí menovitého prúdu: 10000 ÷ 30000,

počet rozopnutí skratového prúdu: cca 100,

počet zopnutí skratového prúdu: cca 100,

mechanicky prípustný počet zopnutí: 30000.

## 5.5 Odpájače

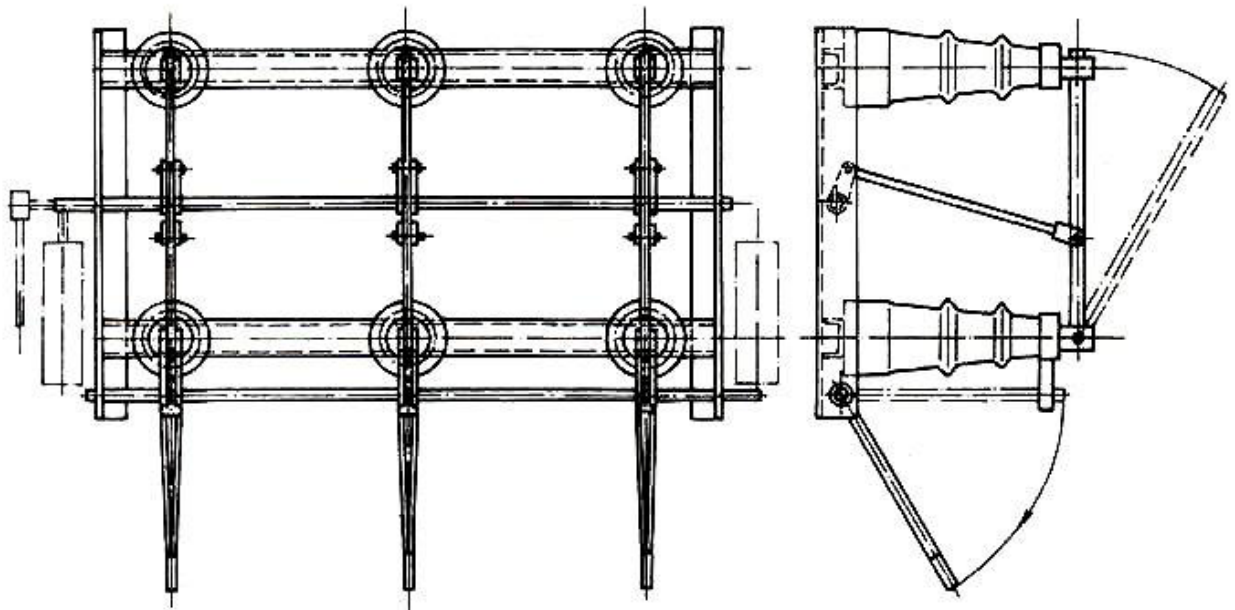
Odpájače sa používajú v rozvodných zariadeniach na bezpečné a viditeľné odpojenie odbočky, čo je potrebné najmä pri opravách, údržbárskych prácach na vypínačoch alebo pri zmene zariadenia. Viditeľnosť odpojovanej dráhy nie je potrebná, ak je nahradená spoľahlivou signalizáciou stavu, napr. pri zapuzdrených rozvodniach. Môžu spínať obvody pod napätím, nesmie sa však nimi zapínať ani vypínať záťaž okrem malých indukčných a kapacitných prúdov a transformátorov naprázdno. Pohon odpájačov môže byť tlakovzdušný, elektrický alebo ručný. Používajú sa v jedнопólovom (vvn) aj trojpólovom (vn,nn) vyhotovení [2].

Podľa účelu ich podľa [2] delíme na:

- *prípojnicové* – používajú sa na pripojenie príslušných obvodov k prípojniciam, pomocou nich sa volí systém prípojnic,
- *vývodové* – používajú sa na pripojenie alebo odpojenie vedenia. Na rozdiel od prípojnicových majú uzemňovacie nože.

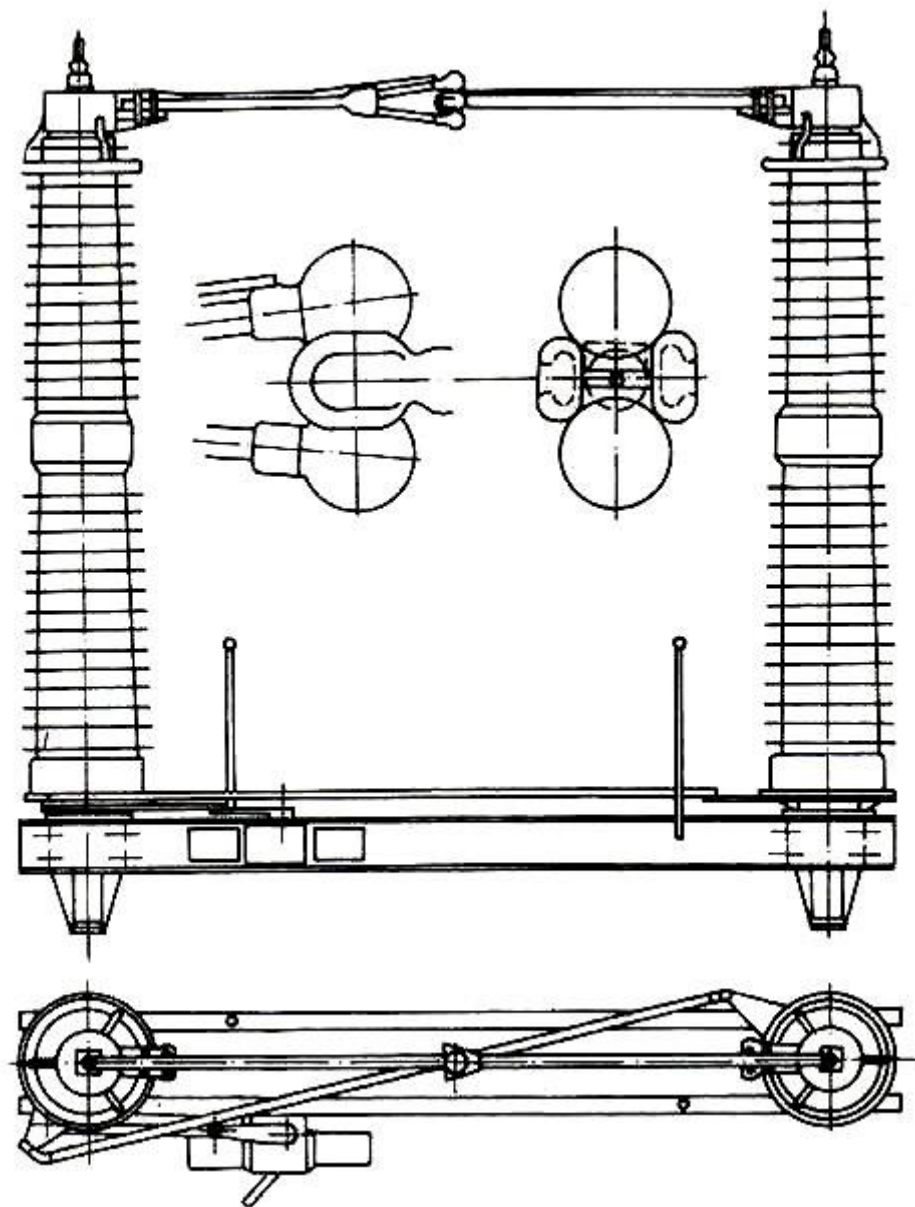
Podľa konštrukčného usporiadania sú odpájače [11]:

- *nožové* (obr.5.8), ktoré sa skladajú zo základného rámu, na ktorom sú umiestnené podperné izolátory. Podperné izolátory sú umiestnené v dvoch radoch. Na troch spodných izolátoroch sú upevnené ložiská s pohyblivými nožmi a na protifaľných troch izolátoroch sú pevne uložené perové kontakty. Odpájače môžu byť spojené do jedného celku s uzemňovačom. Uzemňovač je nožový spínač, ktorým sa uzemňuje (skrakuje) vypnutá časť elektrického obvodu pre bezpečnosť obsluhy. U všetkých odpájačov s uzemňovačmi je zapnutie alebo vypnutie možné len vtedy, pokiaľ je uzemňovač vypnutý.



Obr.5.8. Nožový trojpólový odpájač s uzemňovačom [11]

- rotačné (obr.5.9), u nich má každý pól dva otočné izolátory nesúce spínacie zariadenie, ktoré sa pohybuje v rovine rovnobežnej so základným rámom.



Obr.5.9. Trojpólový rotačný odpájač [11]

- *sklápacie*, u ktorých sa spínacia pohyblivá časť sklápa v rovine pólov okolo čapu v ložisku na jednom izolátore (obr.5.10).



Obr.5.10. Sklápací trojpólový odpájač 630 A, 22 kV (výrobok SEZ, Krompachy)

Pohon odpájačov môže byť [11]:

- Ručný, s ovládaním izolačnou tyčou, ktorá je uzemnená lanom pre ochranu obsluhy. Tyč sa zasunie pri vypínaní do otvoru v páke ovládacieho hriadeľa a ťahom sa vysunú nože z pevných kontaktov. Manipulácia vyžaduje odbornú obsluhu a vykonáva sa v malých rozvodniach.
- Ručný, u ktorého sú všetky tri nože ovládané priebežným hriadeľom, ktorý je spojený s pákou a s jednoduchým prevodom umožňujúcim spínanie odpojovača.
- Tlakovzdušný, s ovládaním pohyblivých kontaktov stlačeným vzduchom.

Bežné hodnoty odpájačov podľa [5] pre 22 kV vedenia:

$$U_N = 25 \text{ kV},$$

$$I_N = 400 \div 1250 \text{ A},$$

$$f_N = 50 \text{ Hz},$$

$$I_{Kt=1s} = 16 \div 20 \text{ kA},$$

$$I_{Kt=3s} = 16 \div 20 \text{ kA},$$

$$I_{DYN} = 40 \div 50 \text{ kA},$$

menovitý počet operácií: cca 3000 CO,

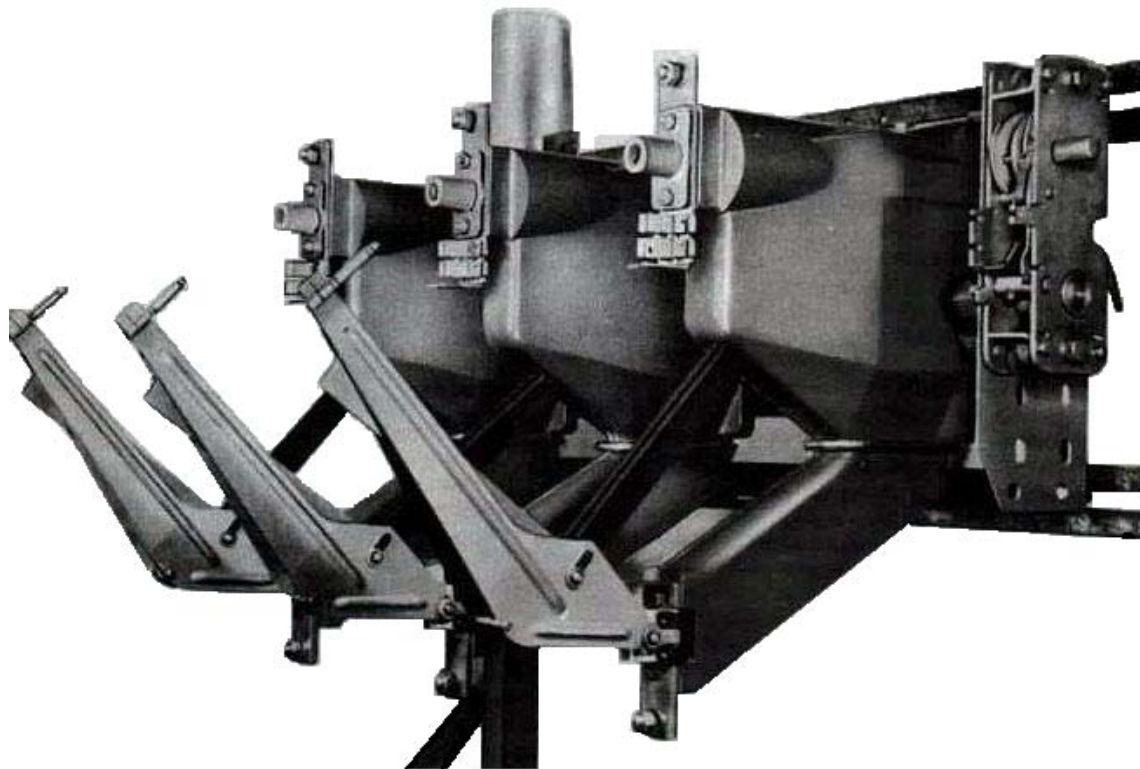
$$t_{ZAP/VYP} = 3 \div 20 \text{ s}, \text{ záleží od použitého pohonu.}$$

## 5.6 Odpínače

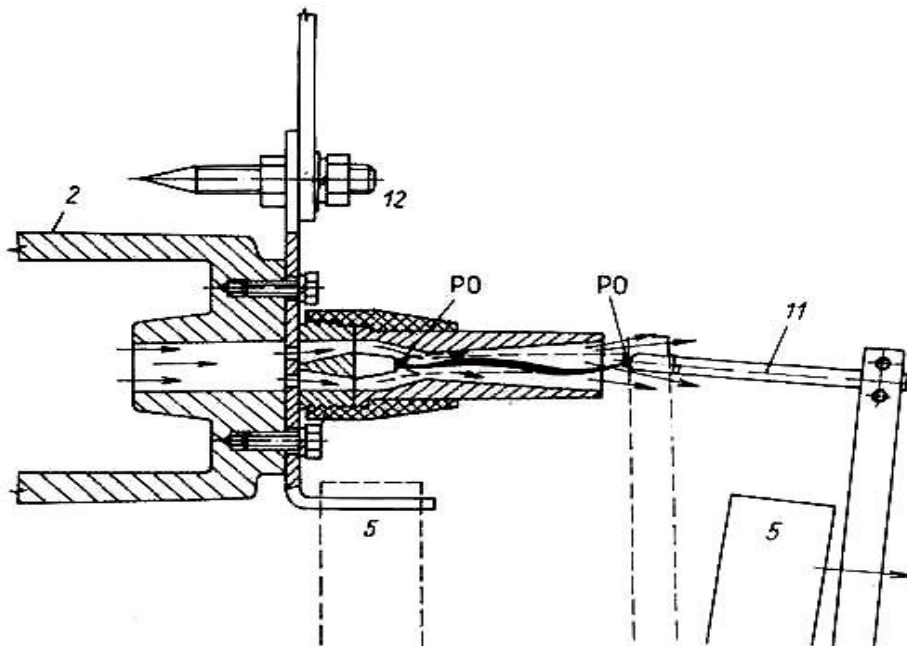
Svojou funkciou sa zaraďujú medzi odpájače a vypínače. Používajú sa na bezpečné a viditeľné odpojenie elektrického zariadenia, avšak vypínajú aj menovité prúdy v rozsahu svojej vypínacej schopnosti. Nemožno nimi odpínať poruchové stavy. Sú to vlastne odpájače so zvýšenou vypínacou schopnosťou, vyrábajú sa aj so zhášacou komorou pre rýchlejšie uhasenie oblúka. Väčšinou sa používajú vo VN obvodoch, ktoré sa nemusia chrániť proti preťaženiu. Často sa používajú v kombinácii s VN poistkami na spoločnom ráme. VN poistky chránia pri stavoch, ktoré by už odpínač nedokázal bezpečne vypnúť. Veľkosť vypínacieho prúdu, ktorý je odpínač schopný vypnúť, závisí aj od účinníka daného prúdu a od druhu záťaže. Napríklad pre nezaťažený transformátor to býva do 20 A (induktívna záťaž) a pre nezaťažené káble a batérie do 50 A (kapacitná záťaž) [2].

Na obr.5.11 je celkový pohľad na odpínač a na obr.5.12 je rez jedným pólom odpínača typu BA (výrobok EJF Brno, k.p.). Odpínač je namontovaný v ráme (1), ktorý nesie tri izolátory (2) s kontaktným ústrojenstvom. V hornej časti izolátora je valec s piestom (3). Piest je spojený tiahlom (4) a hlavným kontaktným nožom (5) a s pákou (6) s ovládacím hriadeľom (7), na ktorom je volnobežka, ktorá spája piest s ručným alebo tlakovzdušným pohonom. Pri vypínaní začne pružina (8) pohybovať piestom vo vzduchovom valci a súčasne sa tiahlom (4) vysúva hlavný kontaktný nôž (5) z pevného perového kontaktu (9). Po vysunutí noža (5) z kontaktov (9) narazí nôž (5) na pomocný kontakt (10) a spoločne s ním pokračuje v pohybe. K prerušeniu prúdu dôjde, až sa oddiali opaľovací kontakt (11) od opaľovacieho kontaktu (12). Vznikne oblúk (obr. 5.12), ktorého obe pätý PO ofukuje stlačený vzduch, ktorý prichádza stredom izolátora (2). Zhášadlo vedie prúd len pri vypínaní, lebo v zopnutom stave je preklenuté hlavným nožom (5).

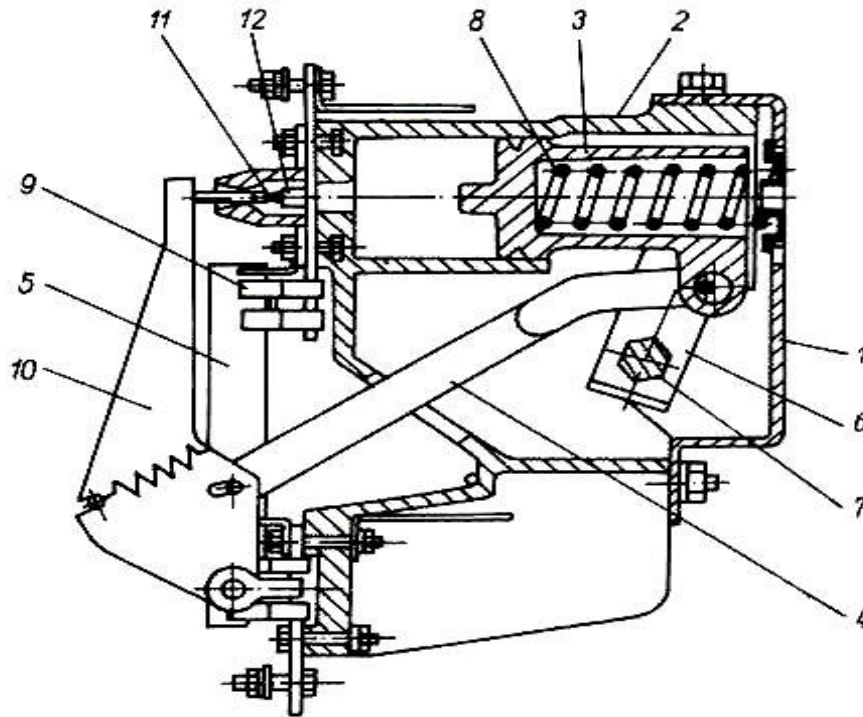




Obr.5.11. Odpínač (výrobok EJF, k. p., Brno) [11]



Obr.5.12. Zhášacie ústrojenstvo odpínača z obr.5.11 [11]



Obr.5.13. Zhášacie ústrojenstvo odpínača z obr.5.11 [11]

Bežné hodnoty odpínačov podľa [8] pre 22 kV vedenia:

$$U_N = 25 \text{ kV,}$$

$$I_N = 400 \div 1250 \text{ A,}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz,}$$

$$I_{Kt=1s} = 16 \div 25 \text{ kA,}$$

$$I_{Kt=3s} = 16 \div 21 \text{ kA,}$$

$$I_{DYN} = 40 \div 67 \text{ kA,}$$

$$I_{VYPO} = 16 \div 1250 \text{ A,}$$

$$I_Z = 10 \div 50 \text{ kA,}$$

menovitý počet operácií: cca 1000 CO,

$$t_{ZAP/VYP} = 3 \div 20s, \text{ závisí od použitého pohonu}$$

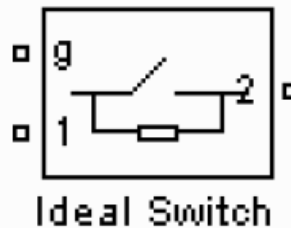
## 5.7 Model vypínačov

Model je vypracovaný pre vákuový vypínač a plynový vypínač SF<sub>6</sub>. Vychádza sa z predpokladu, že odpor vypínača je v zapnutej polohe zanedbateľne malý ( teoreticky nulový ) a vo vypnutej polohe veľmi veľký (teoreticky nekonečný). Avšak na dostatočne presný model nie je možné vystačiť iba s týmto jednoduchým priblížením, pretože pri vypínaní vznikajú rôzne javy, ktoré viac alebo menej nepriaznivo pôsobia na samotný vypínač, ako aj na vypínanú sústavu.

Preto ak je požadované, aby sa model vypínača čo najviac priblížil reálnemu stavu, je potrebné do tohto modelu zahrnúť aj tieto javy.

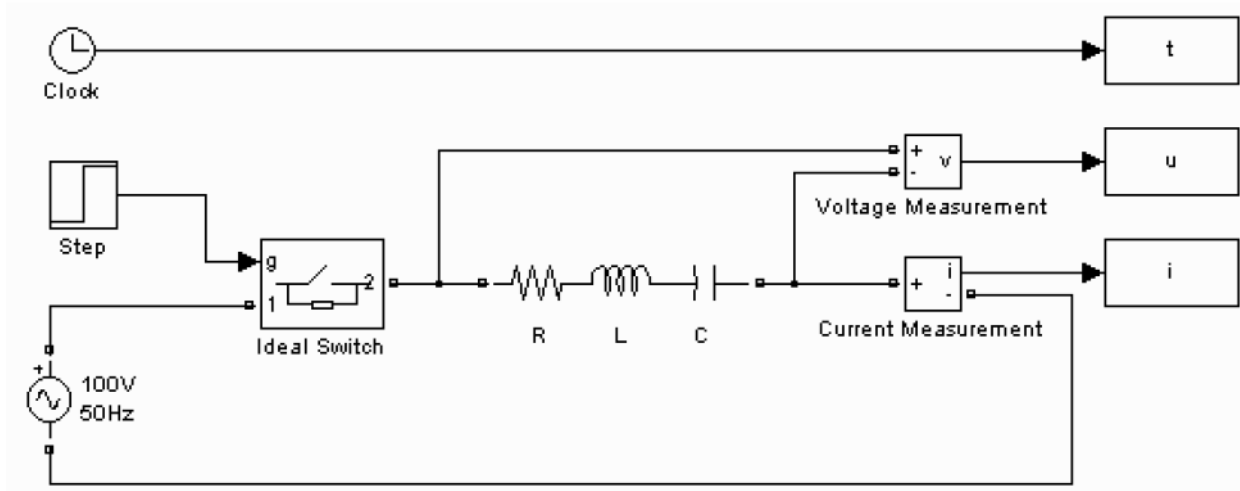
### 5.7.1 Zostavenie modelu vákuového vypínača

Pre popis zhášania elektrického oblúka vo vákuu nemožno využiť klasické metódy, ako napr. teória Mayra, teória Cassieho a pod., ktoré sa v rôznych úpravách používajú pre popis vypínania oblúka, kvôli odlišnému vzniku a správaniu sa oblúka vo vákuu. Keďže vákuový vypínač sa svojimi vlastnosťami najviac blíži k ideálnemu vypínaču, na jeho simuláciu bol využitý blok Ideal Switch, zobrazený na obr.5.14. Zmena odporu tohto bloku z vodiča na izolant sa mení počas extrémne krátkej doby (ďalej „skokovo“) a preto je možné pomocou neho nasimulovať utrhanie prúdu pred jeho prirodzenou nulou.



Obr.5.14. Blok Ideálneho vypínača

Do zadávacích parametrov tohto bloku je potrebné zadať odpor v zopnutom stave  $R_{on}$  a počiatkový stav vypínača. Na overenie vlastností tohto bloku bol namodelovaný testovací obvod (obr.5.15) s presne zadefinovanými parametrami.



Obr.5.15. Testovací obvod na overenie vlastností ideálneho vypínača

Tento testovací zdroj obsahuje nasledovné prvky a ich parametre:

*Jednofázový zdroj striedaného napätia:*

Amplitúda napätia: 100 V

Frekvencia: 50 Hz

*Sériová RLC záťaž:*

$R = 10 \Omega$

$L = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

$C = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

*Ideálny vypínač:*

$R_{on} = 0,001 \Omega$

Počiatočný stav: zopnutý

*Bloky merania napätia a prúdu*

*Blok Step:* Slúži na ovládanie vypínača

*Blok Clock*

*Bloky t, u, i:* Slúžia na záznam výsledkov simulácie

Na testovacom obvode boli vykonané dve simulácie: simulácia 1, pri ktorej došlo k useknutiu prúdu v jeho amplitúde a simulácia 2, pri ktorej bol prúd prerušený v okamihu prechodu nulou. Výsledky simulácií sú uvedené na obr.5.16 a obr.5.17.

Ako je vidieť na obr.16 a), pri useknutí prúdu v jeho amplitúde dochádza k výraznej prepäťovej špičke, ktorá dosahuje hodnotu 31,37 kV. Túto hodnotu je možné overiť výpočtom podľa vzorca (5.4) prebraného z [6]:

$$U_{pm} = \frac{U_m}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (5.4)$$

kde:

$U_{pm}$  – maximálna amplitúda prepätia

$U_m$  – amplitúda napätia zdroja

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$f$  – frekvencia zdroja

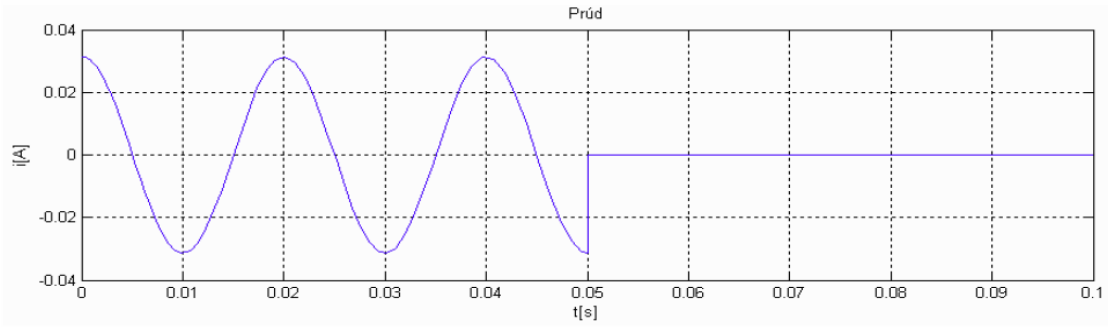
$L$  – indukčnosť

$C$  – kapacita

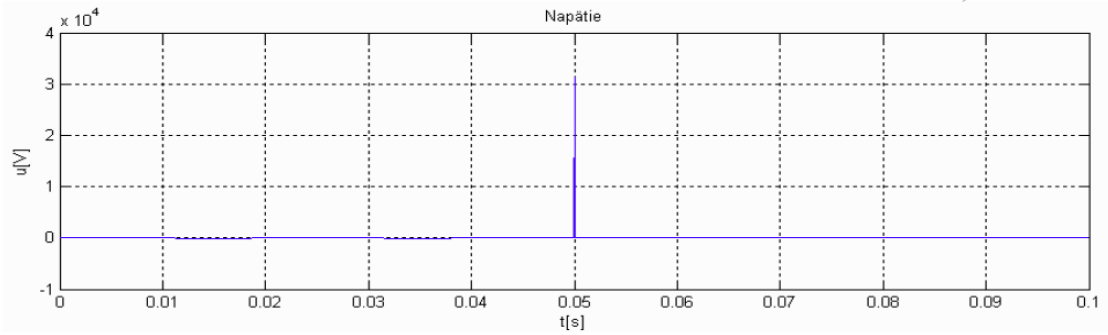
Po dosadení hodnôt:

$$U_{pm} = \frac{U_m}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} = 31,83 kV$$

Na obr.17 b) je vidieť, že pri prerušení prúdu pri prechode nulou nevznikajú žiadne nežiaduce prepätia. Preto je žiaduce, aby k vypínaniu obvodu dochádzalo práve v tomto okamihu.

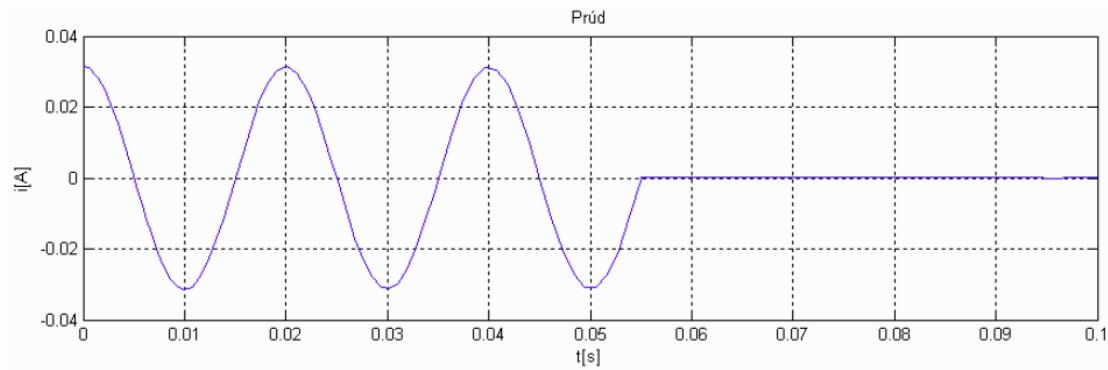


a)

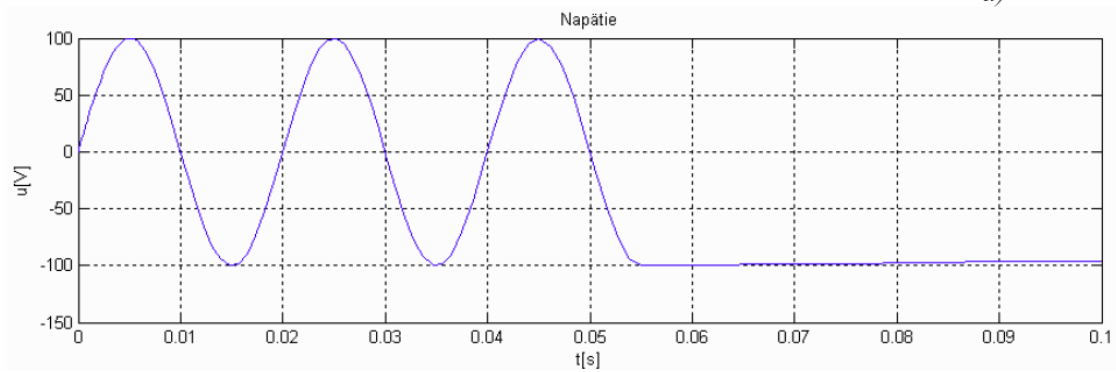


b)

**Obr.5.16. Useknutie prúdu v amplitúde**  
a) priebeh prúdu b) priebeh napätia



a)

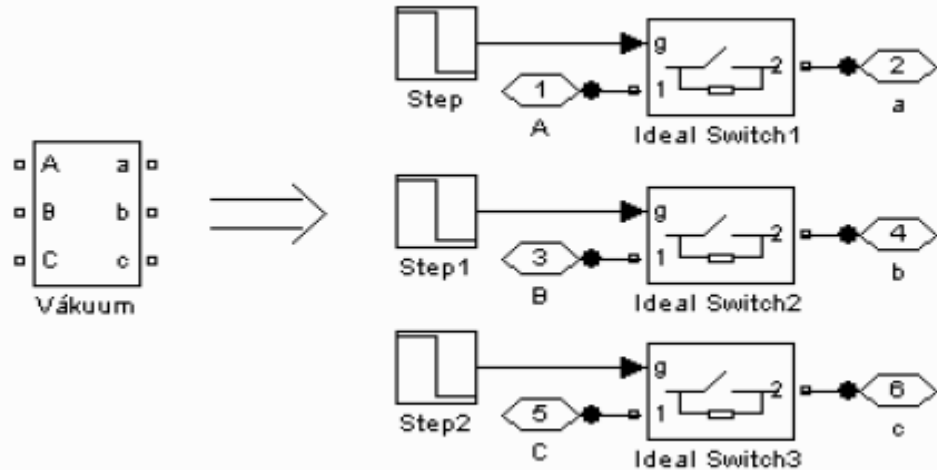


b)

**Obr.5.17. Prerušenie prúdu v nule**  
a) priebeh prúdu b) priebeh napätia

Z výsledkov získaných na testovacom obvode možno usúdiť, že blok ideálneho vypínača je možné považovať za zjednodušený všeobecný model vákuového vypínača. Zjednodušenie spočíva v tom, že nie pri každom vákuovom vypínači dochádza k utrúhaniu prúdov a ani prechod medzi vodivým a nevodivým stavom nie je v skutočnosti skokový. Z toho vyplýva, že v skutočnosti nebudú prepätia také veľké ako v simulácii. To je však možné považovať za výhodu, pretože návrh vypínača je potom vždy bezpečný.

Model 3-fázového vákuového vypínača sa skladá z troch blokov ideálneho vypínača a troch step blokov, tak ako ukazuje obr.5.18.



Obr.5.1. Model 3-fázového vákuového vypínača

### 5.7.2 Zostavenie modelu plynového vypínača SF<sub>6</sub>

Základ na zostavenie modelu plynového vypínača SF<sub>6</sub> tvorili rovnice KEMA modelu elektrického oblúka. KEMA model je opísaný v [7]. Nasledovné rovnice použité pri návrhu zostavenia KEMA modelu boli prebraté z [8]:

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{A_1}{\tau_1} \cdot g^{\lambda_1} \cdot u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} \cdot g_1, \quad (5.5)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{A_2}{\tau_2} \cdot g^{\lambda_2} \cdot u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} \cdot g_2, \quad (5.6)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{A_3}{\tau_3} \cdot g^{\lambda_3} \cdot u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} \cdot g_3, \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3}, \quad (5.8)$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3, \quad (5.9)$$

$$i = g \cdot u = \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_1 \cdot g_3 + g_1 \cdot g_2} \cdot u, \quad (5.10)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{K_1}, \quad (5.11)$$

$$\tau_3 = \frac{\tau_2}{k_2}, \quad (5.12)$$

$$A_3 = A_2 \cdot k_3, \quad (5.13)$$

kde je :

$g$  – vodivosť oblúka,

$g_n$  – vodivosť n-tého oblúka,

$u$  – napätie na oblúku,

$u_n$  – napätie na n-tom oblúku,

$i$  – prúd tečúci cez oblúk,

$\tau_n$  – časová konštanta n-tého oblúka,

$A_n$  – (chladiaca) konštanta n-tého oblúka,

$\lambda_n$  – konštanta pre určenie typu n-tého oblúka, ak  $\lambda = 1$  výsledkom je Cassieho typ oblúka a ak  $\lambda_2 = 2$  výsledkom je Mayrov typ oblúka,

$k_n$  – parametre závislé na návrhu vypínača.

Ako bolo uvedené vyššie, model oblúka je popísaný trojicou rovníc, ktoré predstavujú tri časti oblúka, pričom každá časť je charakterizovaná svojím napätím, vodivosťou a parametrami. Parametre  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  a  $\lambda_3$  sú rovnaké pre všetky vypínače, parametre  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  závisia na návrhu vypínača a parametre  $\tau_1$ ,  $A_1$  a  $A_2$  sú tzv. voľné parametre a majú široké rozpätie hodnôt.  $\tau_1$  je časová konštanta prvého oblúka a ďalšie časové konštanty sú na nej závislé podľa rovníc (5.11) a (5.12) a je ňou možné ovplyvňovať dobu vypínacieho procesu. Parametre  $A_1$ ,  $A_2$  a  $A_3$  súvisia so stratami energie na oblúku, pričom parameter  $A_1$  riadi veľkosť napätia na oblúku a parametre  $A_2$  a  $A_3$  určujú vypínacie schopnosti vypínača, ktoré narastajú s väčšími energetickými stratami. Parameter  $A_3$  závisí na parametri  $A_2$  podľa rovnice (5.13), takže aj parametrom  $A_2$  je možné ovplyvňovať vypínací výkon vypínača. Čím bude hodnota parametra  $A_2$  väčšia, tým bude vypínací výkon vypínača menší a to sa prejaví na dlhšej dobe horenia oblúka a predĺžení vypínacieho procesu.

Pre získanie rovníc vhodných na vytvorenie KEMA modelu bolo potrebné vykonať úpravy vyššie uvedených rovníc. Podľa [7] je možné napísať:

$$i = u_1 \cdot g_1, \quad (5.14)$$

$$i = u_2 \cdot g_2, \quad (5.15)$$

$$i = u_3 \cdot g_3. \quad (5.16)$$

Ak sa rovnice (5.14), (5.15) a (5.16) dajú do rovnosti s rovnicou (5.10), je po úprave možné napísať:

$$u_1 = \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_1}, \quad (5.17)$$

$$u_2 = \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_2}, \quad (5.18)$$

$$u_3 = \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_3}. \quad (5.19)$$

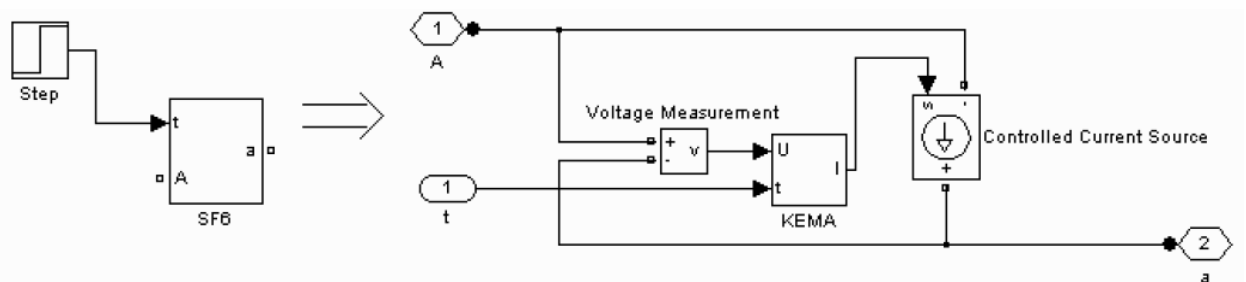
Potom dosadením rovníc (5.17), (5.18), a (5.19) do rovníc (5.5), (5.6) a (5.7) a spolu s rovnicou (5.10) boli získané rovnice na zostavenie KEMA modelu:

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{A_1}{\tau_1} \cdot g^{\lambda_1} \cdot \left( \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_1} \right)^2 - \frac{1}{\tau_1} \cdot g_1, \quad (5.20)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{A_2}{\tau_2} \cdot g^{\lambda_2} \cdot \left( \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_2} \right)^2 - \frac{1}{\tau_2} \cdot g_2, \quad (5.21)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{A_3}{\tau_3} \cdot g^{\lambda_3} \cdot \left( \frac{u \cdot \frac{g_1 \cdot g_2 \cdot g_3}{g_2 \cdot g_3 + g_3 \cdot g_1 + g_1 \cdot g_2}}{g_3} \right)^2 - \frac{1}{\tau_3} \cdot g_3. \quad (5.22)$$

Výsledkom rovníc (5.20), (5.21), (5.22) a (5.10) je priebeh prúdu cez oblúk. Na vytvorenie modelu vypínača SF<sub>6</sub> je potrebný upravený nelineárny odpor. Keďže MATLAB neobsahuje priamo blok nelineárneho odporu, je potrebné ho namodelovať. Postup na vytvorenie modelu nelineárneho odporu je uvedený z [9]. Výsledný model jednofázového plynového vypínača SF<sub>6</sub> je zobrazený na obr.5.19.



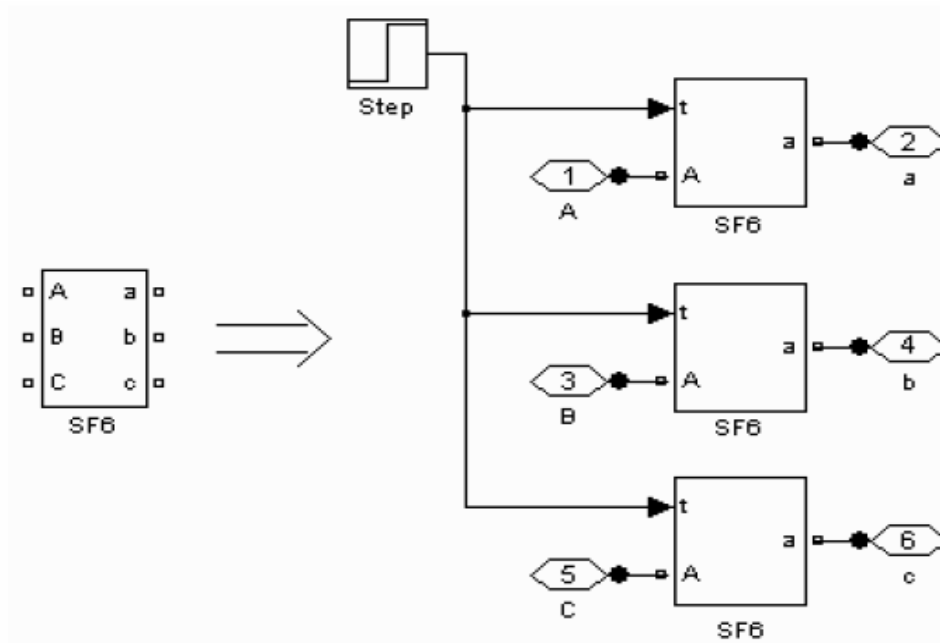
Obr.5.19. Jednofázový model vypínača SF<sub>6</sub>

Step blok slúži na zadávanie času rozopnutia kontaktov vypínača. Model vypínača sa skladá z bloku merania napätia, ktorý predstavuje napätie  $u$  v rovniciach KEMA modelu, ďalej z bloku Controlled Current Source, ktorý podľa hodnôt privádzaných na jeho vstup „S“ generuje prúd a nakoniec z bloku KEMA, v ktorom je vytvorený už samotný KEMA model elektrického oblúka, ako ukazuje obr.5.21.

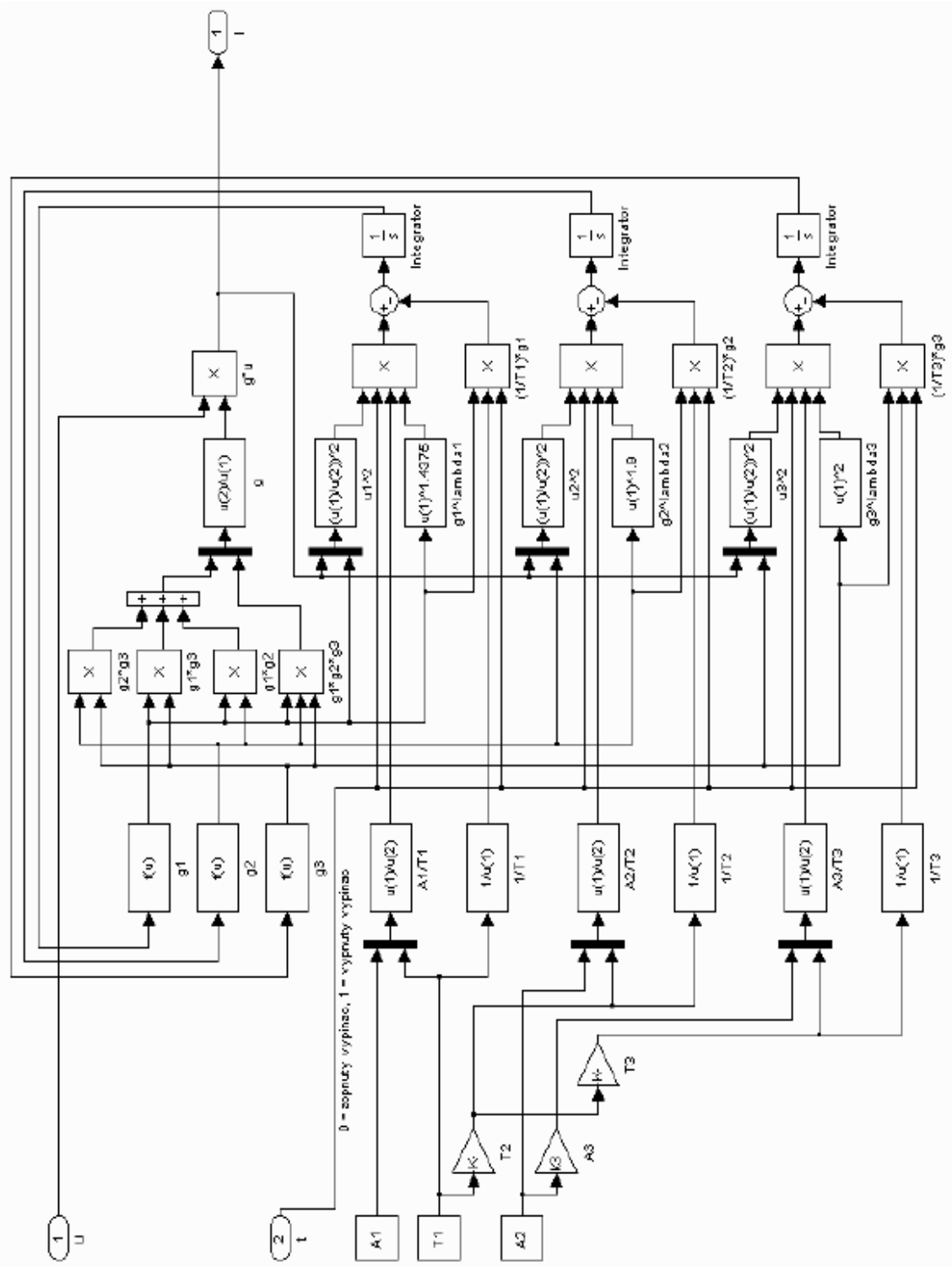


Vstupnými hodnotami do KEMA modelu sú napätie  $u$ , hodnota zo Step bloku (0 pre zopnutý vypínač alebo 1 pre vypnutý vypínač) a hodnoty parametrov  $A_1$ ,  $A_2$  a  $\tau_1$ . Výstupom z KEMA modelu je, ako už bolo spomenuté, priebeh prúdu, ktorý je vstupom pre blok Controlled Current Source.

Na obr.5.20 je zobrazený model trojfázového plynového vypínača, ktorý sa skladá z troch jednofázových modelov a jedného Step bloku.

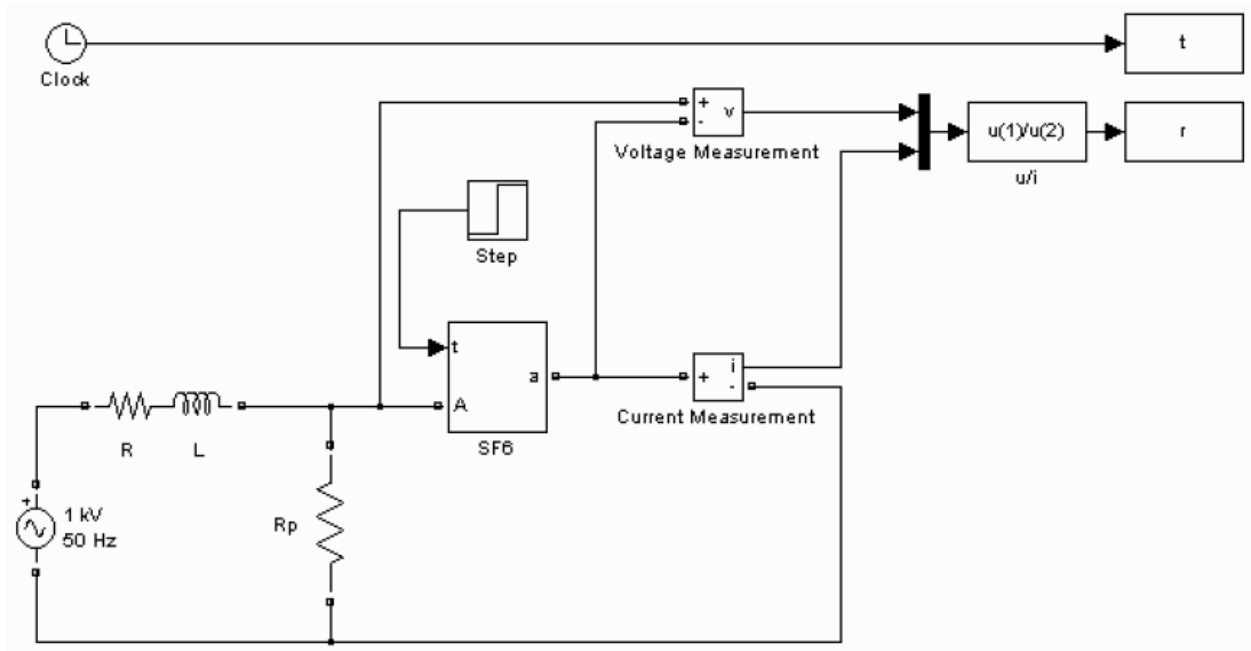


Obr.5.20. Trojfázový model vypínača  $SF_6$



Obr.5.21. Simulačný model elektrického oblúka podľa rovníc KEMA modelu

Na overenie vlastností modelu vypínača SF<sub>6</sub> bol namodelovaný testovací obvod pre model jednofázového plynového vypínača SF<sub>6</sub>. Tento obvod je zobrazený na obr.5.22.



Obr.5.22. Testovací obvod na overenie vlastností modelu vypínača SF<sub>6</sub>

Tento testovací obvod obsahuje nasledovné prvky a ich parametre:

*Jednofázový zdroj striedaného napätia:*

Amplitúda napätia: 1000 V

Frekvencia: 50 Hz

*Sériovú RL záťaž:*

$R = 5 \Omega$

$L = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ H}$

*R<sub>p</sub> záťaž:*

$R_p = 1 \cdot 10^8 \Omega$

Odpor  $R_p$  je pripojený paralelne k vypínaču, pretože model vypínača obsahuje blok *Controlled*

*Current Source* a ten nemôže byť priamo zapojený v sérii s indukčnosťou [10]. Jeho hodnota je však dostatočne veľká, takže neovplyvňuje výsledok simulácie.

*Model vypínača SF<sub>6</sub>*

*Bloky merania napätia a prúdu*

*Blok Step:* Slúži na ovládanie vypínača

*Blok Clock*

*Blok „u/i“:* Pomocou tohto bloku je vypočítaný priebeh odporu medzi kontaktmi vypínača

*Bloky t, r:* Slúžia na záznam výsledkov simulácie

Ako vstupné parametre do KEMA modelu boli použité hodnoty prebrané z [8]. Tieto parametre boli považované za základné pre model vypínača SF<sub>6</sub>:

$$\tau_1 = 2,87894 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$A_1 = 0,4236938 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}$$

$$A_2 = 17,0195 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}$$

$$k_1 = 4,9$$

$$k_2 = 5$$

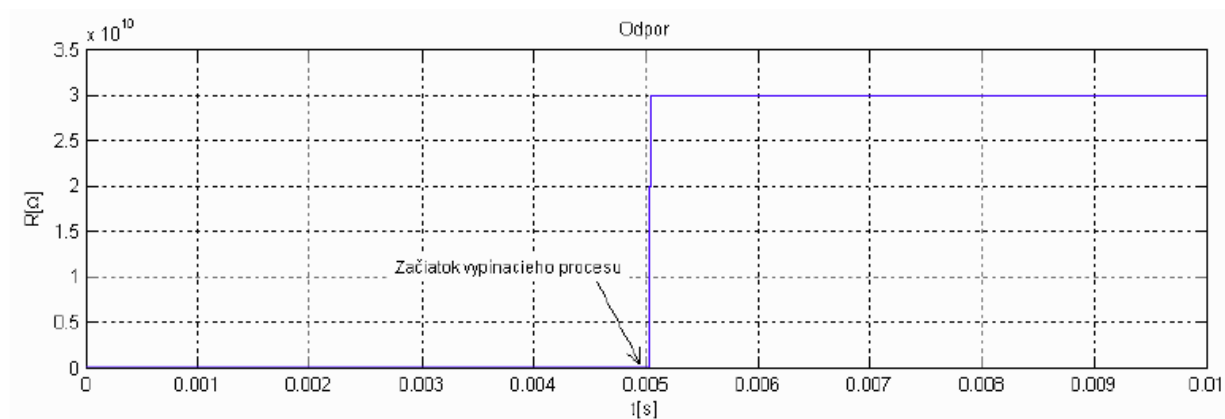
$$k_3 = 100$$

$$\lambda_1 = 1,4375$$

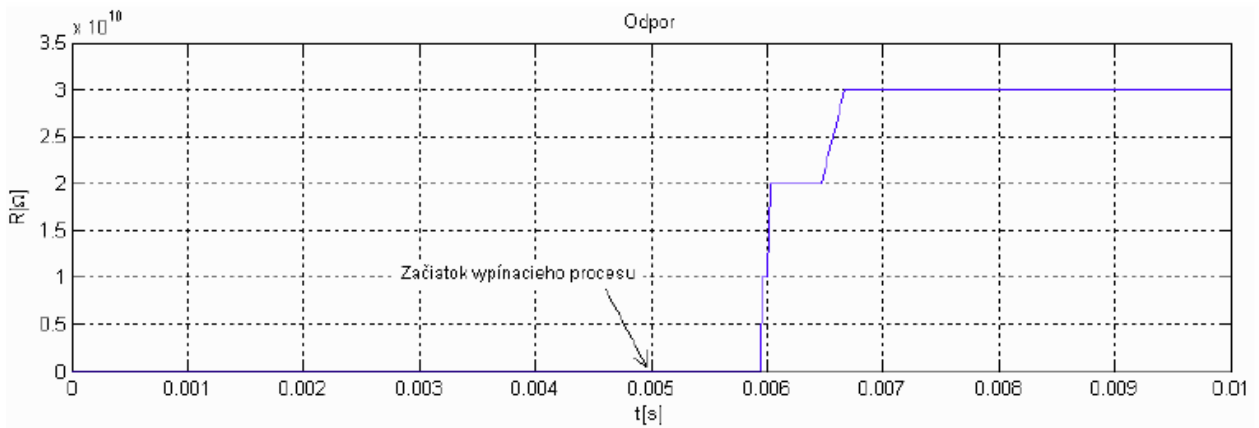
$$\lambda_2 = 1,9$$

$$\lambda_3 = 2$$

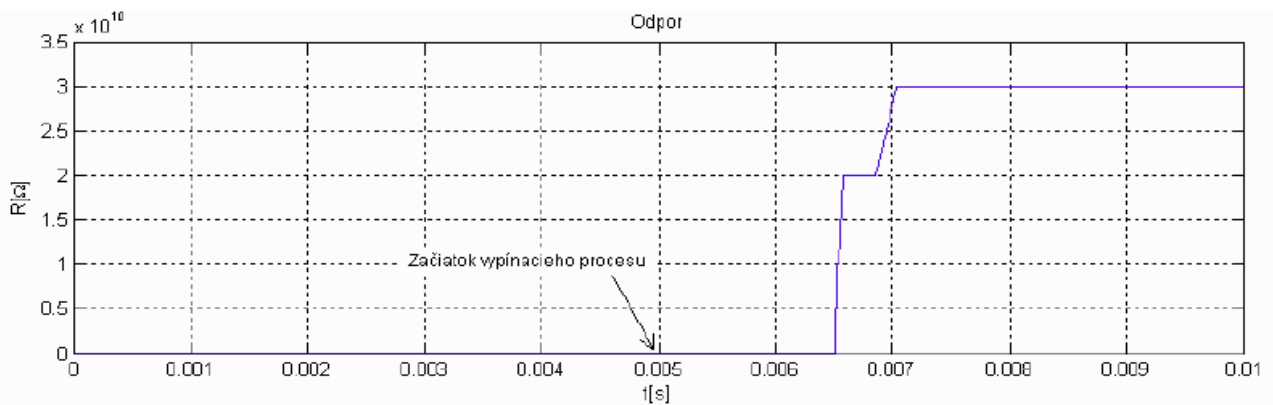
Na testovacom obvode bol skúmaný vplyv parametrov  $\tau_1$ ,  $A_1$  a  $A_2$  na vypínací proces. Tento vplyv sa prejavil na zmene priebehu medzikontaktného odporu, ako je zobrazené na obr.5.23 – obr.26.



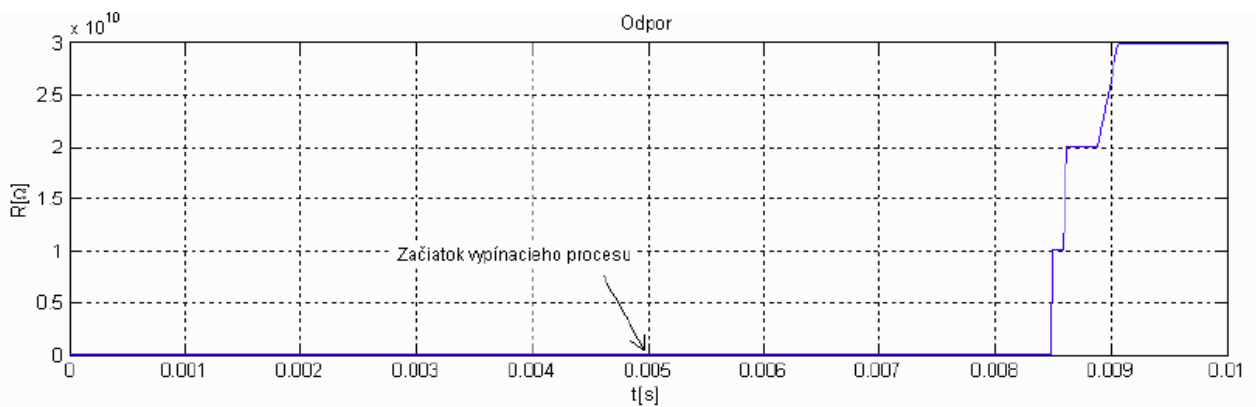
Obr.5.23. Priebeh odporu pri základných parametroch KEMA modelu



Obr.5.24. Priebek odporu pri  $\tau_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ s}$



Obr.5.25. Priebek odporu pri  $\tau_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  a  $A_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}$



Obr.5.26. Priebek odporu pri  $\tau_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ,  $A_1 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}$  a  $A_2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ W}^{-1}$

Podľa nasimulovaných priebehov je možné konštatovať, že parametre  $\tau_1$ ,  $A_1$  a  $A_2$  majú výrazný vplyv na vypínací výkon vypínača, pričom ich zvyšovaním sa vypínací výkon znižuje, čo sa prejavilo na predĺžení vypínacej doby, ako aj na tvare priebehu medzikontaktného odporu. Preto je možné tento model vypínača považovať za zjednodušený všeobecný model plynového vypínača SF<sub>6</sub>. Zovšeobecnenie spočíva v tom, že na presné určenie hodnôt pre konkrétny vypínač SF<sub>6</sub> by bolo potrebné vykonať merania na danom vypínači a zjednodušenie v tom, že pri

reálnom vypínači sa medzikontaktný odpor nemení počas troch na seba nadväzujúcich lineárnych priebehov.

## 5.8 Vybrané spínacie prístroje používané na vedeniach 22 kV

### 5.8.1 Vnútorne odpájače

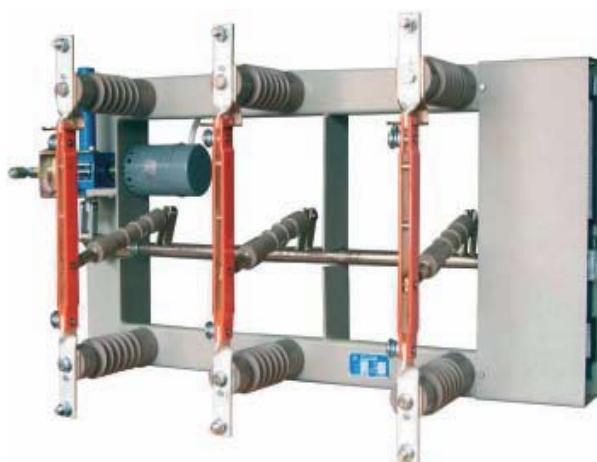
Odpájače typu OMI, OMZI [12]

Tieto odpájače vyrába firma SEZ – Krompachy a sú určené pre vnútornú montáž do rozvodní. Ukážky jednotlivých odpájačov sú na obrázkoch 5.27, 5.28 a 5.29.

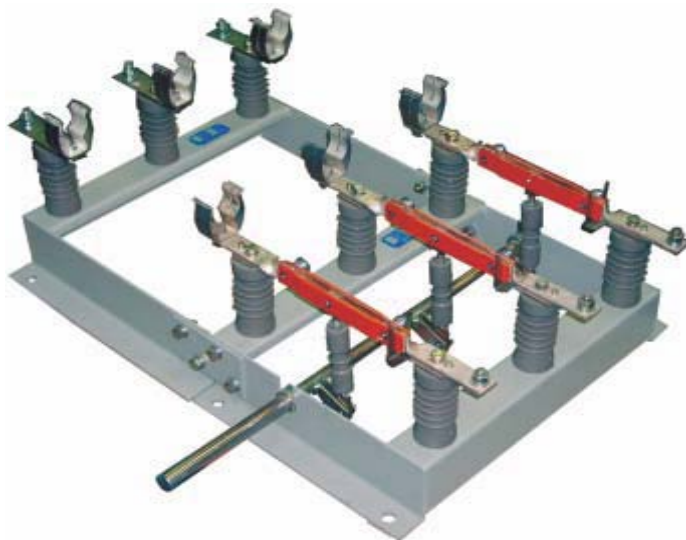
#### Technické údaje odpájača bez uzemňovača

Tab.5.1. Technické údaje odpájačov typu OMI

Typové označenie	Menovité napätie	Menovitý prúd	Menovitý krátkodobý prúd	Menovitý dynamický prúd	Hmotnosť
	(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(kg)
<b>OMI 25/400-30</b>	25	400	16	40	36
<b>OMI 25/630-30</b>	25	630	25	63	39
<b>OMI 25/1250-30</b>	25	1250	40	100	71
<b>OMI 25/1600-30</b>	25	1600	50	125	110
<b>OMI 25/2000-30</b>	25	2000	50	125	155



Obr.5.27. Odpájač bez uzemňovača OMI 25/400-30

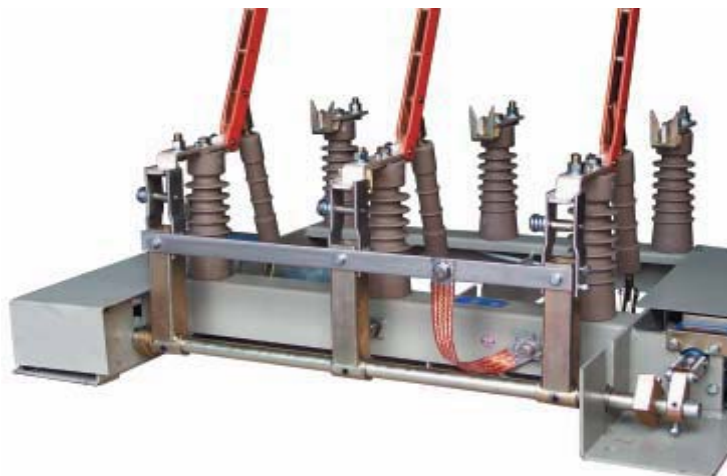


Obr.5.28. Odpájač bez uzemňovača OMI 25/400-30 s poistkovým spodkom

Technické údaje odpájača s uzemňovačom:

Tab.5.2. Technické údaje odpájačov typu OMZI

Typové označenie	Menovité napätie	Menovitý prúd	Menovitý krátkodobý prúd	Menovitý dynamický prúd	Hmotnosť
	(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(kg)
<b>OMZI 25/400-30</b>	25	400	16	40	42
<b>OMZI 25/630-30</b>	25	630	25	63	44
<b>OMZI 25/1250-30</b>	25	1250	40	100	80
<b>OMZI 25/1600-30</b>	25	1600	50	125	135
<b>OMZI 25/2000-30</b>	25	2000	50	125	180



Obr.5.29. Odpájač s uzemňovačom OMZI 25/400-30

### 5.8.2 Vonkajšie odpájače

Odpájače typu OTE [12]

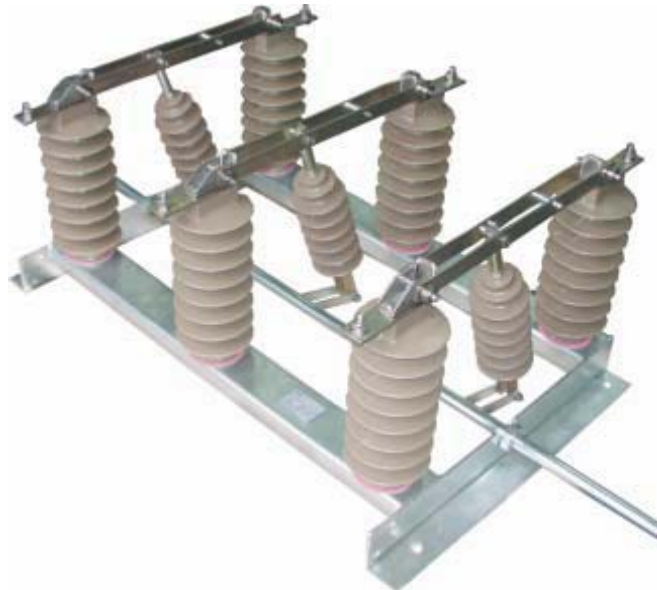
Tieto odpájače vyrába firma SEZ – Krompachy a sú určené pre vonkajšiu montáž.

#### Technické údaje vonkajších odpájačov typu OTE

Tab.5.3. Technické údaje vonkajších odpájačov typu OTE

Typové označenie	Menovité napätie	Menovitý prúd	Men. krátkodobý prúd	Menovitý dyn. prúd	Hmotnosť
	(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(kg)
OTE 25/400, 630-31	25	400,630	16	40	62
OTE 25/400, 630-32	25	400,630	16	40	63
OTE 25/400, 630-52	25	400,630	16	40	65
OTE 25/400, 630-31 s PS 25	25	400,630	16	40	87
OTE 25/400, 630-32 s PS 25	25	400,630	16	40	88
OTE 25/400, 630-52 s PS 25	25	400,630	16	40	90





Obr.5.30. Odpájač typu OTE 25/400,630-31 [12]



Obr.5.31. Odpájač typu OTE 25/400,630-32 [12]

*Vonkajší odpájač pre zvislú montáž – FTr (6400 a 6410) [13]*

Tieto odpájače vyrába firma DRIBO, spol. s.r.o. Vyrábajú sa v jednopólovom alebo trojpólovom prevedení, pri menovitých napätiach 25 a 38,5 kV a menovitom prúde 400 a 630 A.

**Technické údaje odpájačov FTr**

Tab.5.4. Technické údaje odpájačov FTr

Menovité napätie U(kV)	Menovitý prúd I (A)	Menovitý krátkodobý prúd I <sub>k</sub> (kA)	Menovitá doba trvania skratu t <sub>k</sub> (s)	Menovitý dynamický prúd I <sub>p</sub> (kA)
25	400	20	3	50
	630	25	3	63
38,5	400	20	3	50
	630	25	3	63



Obr.5.32. Odpájač FTr 6400

### 5.8.3 Odpínače

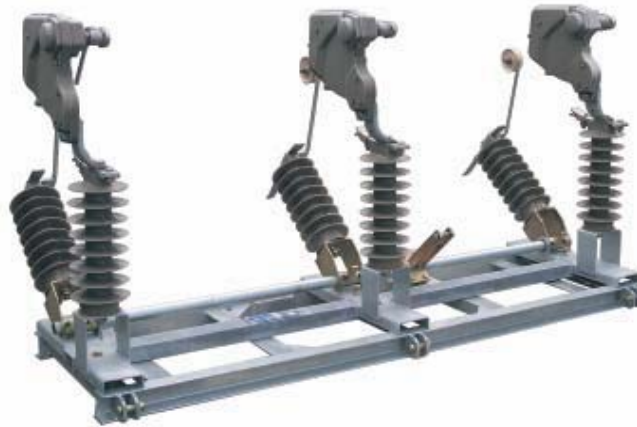
Odpínače typu OJC a OVE [12]

Tieto odpínače vyrábá firma SEZ – Krompachy. Odpínače OVE majú vzduchové zhášacie komory, odpínače OJC majú vákuové zhášacie komory.

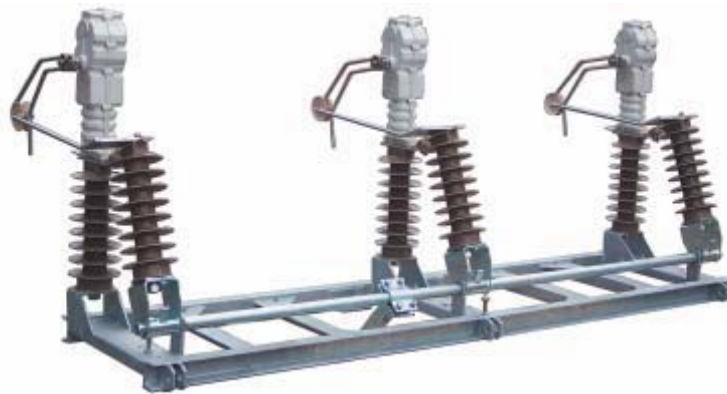
#### Technické údaje odpínačov typu OVE a OJC

Tab.5.5. Technické údaje odpínačov typu OVE a OJC

Typ odpínača	OJC 25	OVE 25
menovité napätie (kV)	25	25
menovitý prúd (A)	200,400	200,400
menovitý dynamický prúd (kA)	40	40
men. krátkodobý prúd 1s. (kA)	16	16
menovitá frekvencia (Hz)	50	50
hmotnosť (kg)	105	105
mechanická životnosť	3000 cyklov vyp.zap.	3000 cyklov vyp.zap.
doba životnosti	30 rokov	30 rokov



Obr.5.33. Odpínač typu OVE 25 [12]



Obr.5.34. Odpínač typu OJC [12]

#### 5.8.4. Vypínače

Vákuový vypínač typu NVL [14]. Vákuové vypínače typu NVL sú určené pre vnútornú montáž do klasických kobkových staníc. Vyrába ich firma Ormazabal (SRN).

#### Technické údaje vypínača NVL

Tab.5.6 Technické údaje vypínača NVL

Typ vypínača	NVL
menovité napätie	25 kV
menovitý prúd	630 A
menovitá frekvencia	50 Hz
menovitý vypínací prúd	16 kA
menovitý zapínací prúd	40 kA
menovité napätie pri atmosférickom impulze	125 kV
počet vypnutí men. vyp. prúdu	100
doba zapínania	< 45 ms
doba vypínania	40 – 50 ms
doba horenia oblúka	< 15 ms
doba naťahovania	max. 7s.



Obr.5.35. Vypínač typu NVL [14]

#### Vákuové vypínače typu KUF [13]

Vyrábajú sa v trojpólovom prevedení, pre menovité napätia 12, 25, 36 a 38,5 kV a menovitý prúd 630 až 2500 A. Vyrába ich firma Dribo, spol. s r.o.

#### Technické parametre vypínača KUF

Tab.5.7. Technické parametre vypínača KUF

Typ vypínača	KUF
menovité napätie	25 kV
menovité jednominútové krátkodobé výdržné striedavé napätie	50 kV
menovité výdržné napätie pri atmosférickom impulze	125 kV
menovitá frekvencia	50 Hz
zotavené napätie	41 kV
celková doba vypínania	65 ms
doba horenia oblúka	< 17 ms
doba zapínania	60 ms
menovitý skratový vypínací prúd	20 kA
menovitý skratový zapínací prúd	50 kA
menovitý krátkodobý prúd	20 kA
menovitá doba skratu	3 s
menovitý dynamický prúd	50 kA
menovitý prúd	630, 800, 1250 A



Obr.5.36. Vypínač typu KUF [13]

**Vákuový vypínač typu VD4 [14]**

Vákuové vypínače typu VD4 sú určené pre vnútornú montáž do kobiek a rozvádzačov so vzduchovou izoláciou v rozpnacích staniciach napájacej siete 22kV. Vyrába ich firma ABB.

**Technické údaje vypínača VD4**

Tab.5.8. Technické údaje vypínača VD4

Menovité napätie	Menovitý prúd	Menovitý vypínací prúd	Menovitý zapínací prúd	Menovitá doba skratu	Rozteč pólov	Rozmery			Hmotnosť
						v	h	š	
(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(s)	(mm)	(mm)			(kg)
25	630	20	50	3	210/275	631	424	570/700	100/104
		25	63	3	210/275	631	424	570/700	100/104
	1250	20	50	3	210/275	631	424	570/700	100/104
		25	63	3	210/275	631	424	570/700	100/104



Obr.5.37 Vypínač typu VD4 [14]

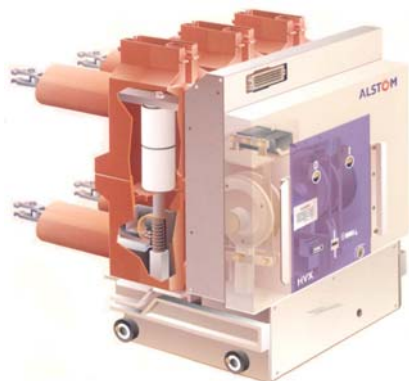
### Vákuový vypínač typu HVX [14]

Vákuové vypínače typu HVX sú určené pre vnútornú montáž do klasických kobkových rozvádaciach staníc v napájacej sieti. Vypínače HVX vyrába firma Areva T&D SA (SRN).

### Technické údaje vypínača HVX

Tab.5.9. Technické údaje vypínača HVX

Menovité napätie	Menovitý prúd	Menovitý vypínací prúd	Menovitý zapínací prúd	Doba horenia oblúka	Rozteč pólov	Hmotnosť
(kV)	(A)	(kA)	(kA)	(ms)	(mm)	(kg)
25	630	16	40	2-15	210/275	135



Obr.5.38. Vákuový vypínač HVX [14]

### Zoznam literatúry

- [1] Janíček, F., Arnold, A., Gorta, Z. *Elektrické stanice*.1.vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2001. 286 s. ISBN 80-227-1630-8
- [2] Fecko, Š., *Elektroenergetika*. 1. vyd. ,Bratislava: Vydavateľstvo Alfa, 1991. 216 s. ISBN 80-05-00817-1
- [3] STN EN 62271-101, Vysokonapäťové spínacie a riadiace zariadenia, platné od 1. 2. 2007
- [4] katalógy ABB, EFACEC, MOELLER, DRIBO
- [5] katalógy odpínačov ABB, MOELLER, DRIBO
- [6] HAVELKA O. a kol.: *Elektrické přístroje*, SNTL Praha, 1995
- [7] GUSTAVSSON N.: *Evaluation and simulation of black-box arc models for high voltage circuit-breakers* - Master thesis. [online] Linköping Universitet. [cit:2007-1-4]. Dostupné na internete <<http://www.ep.liu.se/exjobb/isy/2004/3492/>>
- [8] *Arc Model Blockset* - [online] Electrical Power Systems Delft University of Technology. [cit:2007-2-4]. Dostupné na internete <[http://eps.et.tudelft.nl/pages\\_eng/software/arcmodel.html](http://eps.et.tudelft.nl/pages_eng/software/arcmodel.html)>

- [9] *Building and Customizing Nonlinear Models* - [online] The MathWorks [cit:2007-2-4].  
Dostupné na internete  
<<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/>>
- [10] Manuál programu *MATLAB*
- [11] [http://www.skolspec.cz/dokumenty/gilar/II.rocnik/spinaci\\_pristroje\\_VN\\_a\\_VVN.pdf](http://www.skolspec.cz/dokumenty/gilar/II.rocnik/spinaci_pristroje_VN_a_VVN.pdf)
- [12] [http://www.sezkrompachy.sk/subory/SEZ\\_Odpajace\\_vnutorne1.pdf](http://www.sezkrompachy.sk/subory/SEZ_Odpajace_vnutorne1.pdf)
- [13] [http://www.dribo.cz/pdf/CZ\\_Odpojovace\\_venkovni\\_FTr.pdf](http://www.dribo.cz/pdf/CZ_Odpojovace_venkovni_FTr.pdf)
- [14] <http://www.predistribuce.cz/distribuce/distribucni-sit/zhotovitele/katalog-prvku.html>

## 6. PRÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY

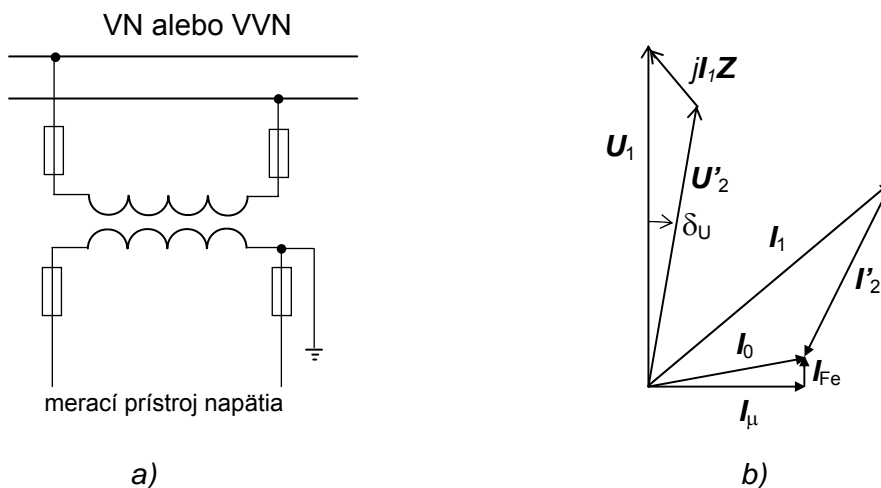
Ako je známe z teórie elektrických strojov a prístrojov, prístrojové transformátory sú potrebné na prispôsobenie a transformovanie meraných veličín vhodnému rozsahu meracích prístrojov a taktiež na oddelenie meracích a istiacich prístrojov od obvodu vysokého napätia respektíve vysokého prúdu. Podľa meranej a prevádzanej veličiny môžeme prístrojové transformátory rozdeliť na transformátory napätia a prúdu. V tejto etape riešenia je pozornosť sústredená hlavne na transformátory napätia. Je urobený krátky prehľad princípu činnosti týchto transformátorov, je poukázané na hlavné chyby v meraní pri použití transformátorov napätia, je zostavený jednoduchý matematický model tohto typu meracieho transformátora, ktorý sa bude postupne spresňovať a na záver je ukázaný simulačný priebeh transformátora napätia.

### Transformátory napätia

Používajú sa na meranie napätia v obvodoch vysokého napätia VN alebo veľmi vysokého napätia VVN. Konštrukčne sa od seba odlišujú. Transformátory napätia VN do 35 kV sa skoro výhradne zalievajú do epoxidových živíc pre vnútornú montáž. Transformátory VVN sú v porcelánových izolátoroch vo vonkajšom vyhotovení. Výstupné alebo sekundárne napätie je väčšinou 100 V. Táto hodnota v trojfázovej sústave predstavuje združené napätie. Toto sekundárne napätie je definované napäťovým prevodom transformátora nasledovne:

$$\rho_U = \frac{U_1}{U_2}, \quad (6.1)$$

kde  $U_1$  je napätie primárnej strany (napätie VN alebo VVN) a  $U_2$  je napätie sekundárnej strany, na ktoré sa pripája merací prístroj. Základná schéma zapojenia fázorový diagram sú zobrazené na obr. 1.



Obr.6.1 a) Schéma zapojenia transformátora napätia, b) Fázorový diagram transformátora napätia

Transformátor napätia predstavuje tvrdý zdroj, preto jeho svorky na primárnej aj na sekundárnej strane musia byť istené nadprúdovou ochranou: poistkami alebo ističmi ako je to vidieť na obr. 6.1a, pretože nemôžu byť spojené nakrátko. Na obr. 6.1b je fázorový diagram transformátora napätia. Ako je z neho vidieť primárne napätie  $U_1$  nie je totožné s prepočítaným sekundárnym napätím  $U'_2$  na primárnu stranu ani čo sa týka veľkosti ani čo sa týka smeru. Je to spôsobené vnútorným úbytkom napätia na primárnej impedancii transformátora  $Z$ . Táto impedancia sa skladá z primárnych veličín: odporu  $R_1$  a reaktancie  $X_{\sigma 1}$ . Snahou je ich minimalizovať, aby chyba vzniknutá meraním bola čo najmenšia. Táto



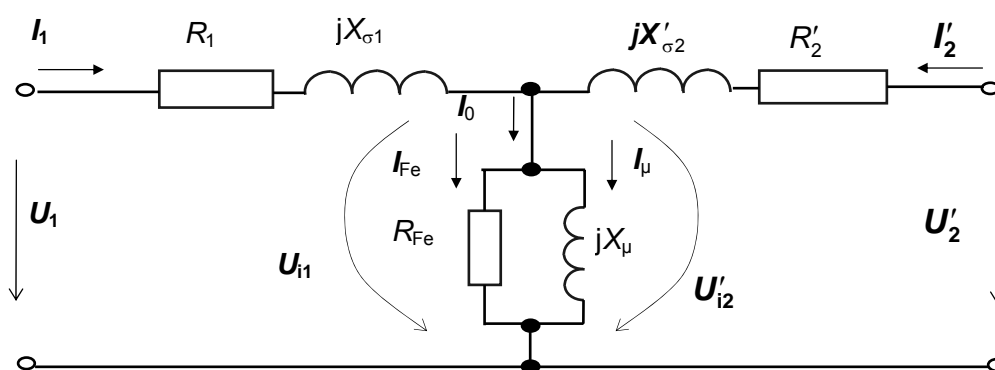
chyba sa uvádza percentuálne a je to vlastne úbytok napätia transformátora a je definovaný pomerom nasledovne:

$$\Delta u = \frac{|\rho_U \mathbf{U}_2 - \mathbf{U}_1|}{U_1} 100. \quad (6.2)$$

Súčasne vzniká aj chyba, ktorá je spôsobená rozdielom fázového posunu  $\delta_U$ , ktorý predstavuje chybu uhla. Udáva sa v minútach a predstavuje uhol medzi vektormi  $\mathbf{U}_1$  a  $\mathbf{U}_2$ . Táto chyba uhla ovplyvňuje presnosť merania výkonu a spotreby elektrickej energie. V praxi je dôležité tieto chyby minimalizovať a tým zvýšiť presnosť merania napätia.

### Matematický model transformátora napätia

Na začiatku použijeme zjednodušený matematický model transformátora napätia, ktorý vychádza z fázorového diagramu, ktorý je uvedený na obr. 6.1b. Použijeme aj náhradnú schému transformátora, ktorá je uvedená na obr. 6.2.



Obr. 6.2. Náhradná schéma transformátora

Pre transformátor napätia nám postačuje uvažovať iba s primárnou stranou, pretože merací prístroj, ktorý je pripojený na sekundárnej strane má veľký vnútorný odpor, a preto sa v zjednodušenom prípade nemusí so sekundárnou stranou transformátora uvažovať. V úplnom matematickom modeli bude uvažované aj s parametrami sekundárnej strany transformátora. Úbytok napätia na primárnej strane vytvorí prechod prúdu naprázdno na primárnej impedancii, ktorá je vyjadrená odporom primárneho vinutia  $R_1$  a rozptylovou reaktanciou primárneho vinutia  $X_{\sigma 1}$ .

V ideálnom prípade by sa sekundárne napätie vypočítalo podľa vzťahu (1) iba pomocou prevodu napätia  $\rho_U$ . To znamená, že ak je transformátor napätia navrhnutý na 22 kV a na sekundárnej strane má byť výstupné napätie 100V, tak potom je  $\rho_U = 220$  a cez túto konštantu by merací prístroj zobrazoval aktuálnu hodnotu primárneho napätia v sieti VN.

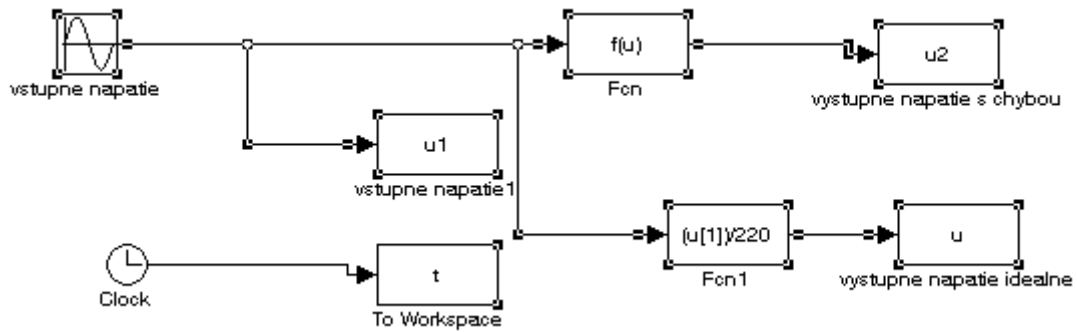
V reálnejšom prípade bude platiť nasledovná rovnica podľa náhradnej schémy transformátora (obr. 6.2):

$$U_2 = \frac{U'_2}{\rho_U} = \frac{(U_1 - Z_1 I_1)}{\rho_U} = \frac{(U_1 - \sqrt{R_1^2 + X_1^2} I_1)}{\rho_U}, \quad (6.3)$$

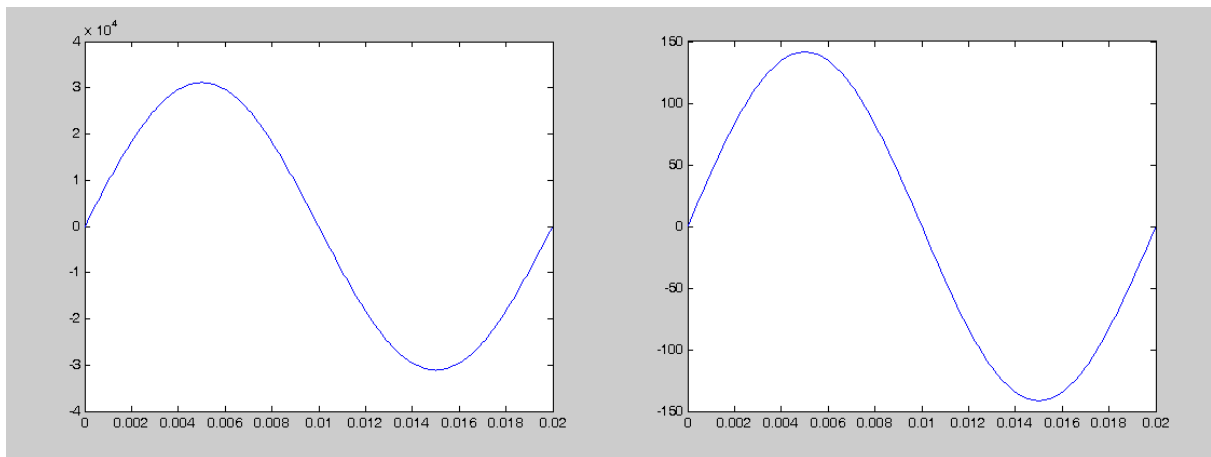
pričom môžeme predpokladať, že prúd  $I_1$  sa rovná prúdu naprázdno  $I_0$ . Ak sú známe parametre náhradnej schémy transformátora napätia, tak je možné vypočítať sekundárne napätie, ktoré bude zobrazovať merací prístroj.

V tomto prípade boli použité približné hodnoty transformátora napätia, ktorý sa používa v sústave VN. V simulačných výsledkoch je urobené porovnanie ideálneho transformátora napätia a transformátora s uvažovaním úbytku napätia. Simulácia bola urobená pomocou

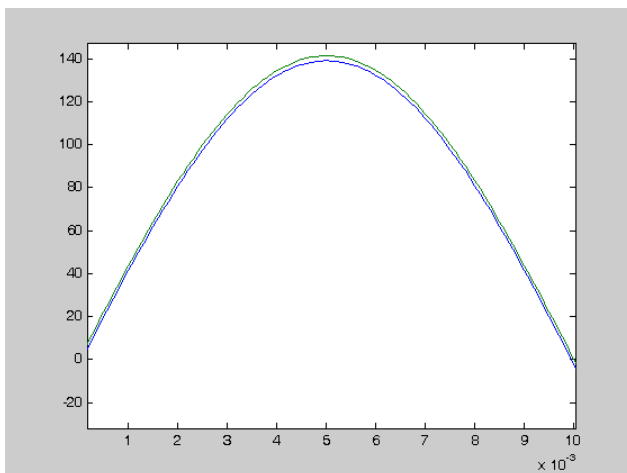
simulačného modelu v programe Matlab Simulink. Bloková schéma tohto programu je na obr. 6.3. Na obr. 6.4a je uvedené vstupné napätie 22 kV, ktorého amplitúda je 31112,6 V a na obr. 6.4b výstupné napätie pre ideálny prípad transformátora napätia. Na obr. 6.5 je uvedené výstupné napätie transformátora s uvažovaním chyby merania, ktorá bola vypočítaná podľa vzťahu 6.3 a ideálny prípad. V ďalšej etape bude model spresnený, aby výsledky simulácie odpovedali čo najviac skutočnosti a podobným spôsobom bude rozpracovaný aj transformátor prúdu.



Obr. 6.3. Blokový model transformátora napätia



Obr.6.4. Simulované priebehy jednej periódy transformátora napätia v ideálnom prípade, a) vstupné napätie, b) výstupné napätia



Obr. 6.5. Porovnanie výstupného napätia transformátora napätia ideálneho (zelený priebeh) a s chybou merania (modrý priebeh)

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Bašta, Chládek, Mayer: *Teorie elektrických stroju*, SNTL Praha 1968
- [2] Blackburn, J., Domin, T.: *Protective Relaying, Principles and Applications*, CRC Press, 2007, ISBN1-57444-716-5
- [3] Hrabovcová a kol.: *Meranie a modelovanie elektrických strojov*, EDIS ŽU v Žiline, 2004

## 7. ELEKTRICKÉ OCHRANY

### 7.1 Teória ochrán

Ochrana je zariadenie, ktoré zaisťuje prevádzkovú bezpečnosť a spoľahlivosť chráneného objektu. Získava informácie o vybraných veličinách chráneného objektu a v prípade prekročenia dovolených hodnôt zabraňuje šíreniu poruchy odpojením zariadenia, odbudením a podobne. Zároveň signalizuje svoje pôsobenie obsluhu. Tá môže nastavovať parametre ochrany (citlivosť, časové oneskorenie) [1].

Chránený objekt môžeme definovať ako zariadenie, ktoré prenáša energiu v rámci svojho okolia. Jeho stav v danom čase definujú takzvané stavové veličiny – napr. napätia, prúdy, výkony, frekvencia, mechanické veličiny (teplota, tlak, otáčky, ...), atď.

Stav objektu  $\mathbf{x}(t)$  je súbor všetkých stavových veličín sledovaného objektu. Zapisuje sa vo forme vektora (napríklad pre objekt charakterizovaný tromi fázovými prúdmi)

$$\mathbf{x}(t) = \begin{pmatrix} i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \end{pmatrix}. \quad (7.1)$$

Vstup objektu je súbor veličín, ktorými pôsobí okolie na chránený objekt. Zapisuje sa vo forme vektora  $\mathbf{p}(t)$  a skladá sa z dvoch častí – vektora  $\mathbf{v}(t)$ , ktorý reprezentuje vstupné veličiny ovládané ochranou a vektora  $\mathbf{u}(t)$ , ktorý reprezentuje veličiny, ktoré ochrana ovplyvniť nedokáže:

$$\mathbf{p}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

Výstupom objektu  $\mathbf{z}(t)$  je vektor veličín chráneného objektu, ktorým pôsobí objekt na svoje okolie. Skladá sa z dvoch častí – vektora  $\mathbf{y}(t)$ , ktorý reprezentuje veličiny merané ochranou a vektora  $\mathbf{r}(t)$ , ktorý reprezentuje ostatné výstupné veličiny:

$$\mathbf{z}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{y}(t) \\ \mathbf{r}(t) \end{pmatrix} \quad (7.3)$$

Do ochrany sa privádza meraný výstup  $\mathbf{y}(t)$ , z ktorého ochrana odvodzuje stav objektu  $\mathbf{x}(t)$  a určuje vektor  $\mathbf{v}(t)$ . Vzťah medzi  $\mathbf{v}(t)$  a  $\mathbf{y}(t)$  popisuje algoritmus ochrany. Algoritmus ochrany definuje, ako pôsobí ochrana na chránený objekt

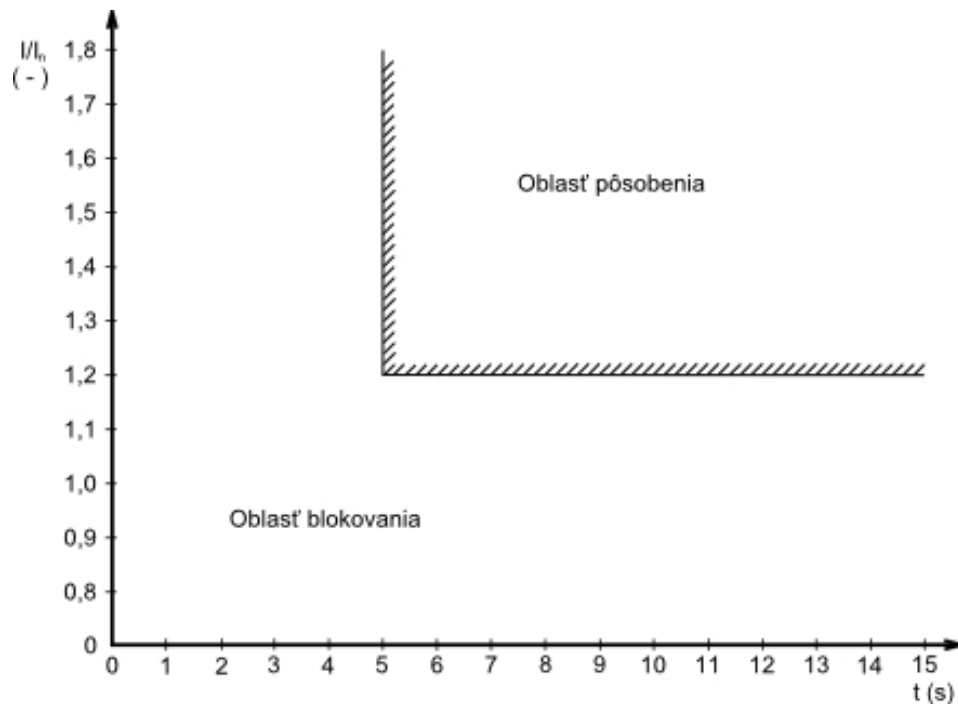
$$\mathbf{v}(t) = F[\mathbf{y}(t), \mathbf{n}]. \quad (7.4)$$

Vektor  $\mathbf{n}$  reprezentuje parametre ochrany. Parametre ochrany sú konštanty, ktorými sa mení algoritmus  $F$ . Algoritmus ochrany je možné algebricky vyjadriť rovnicou ochrany. Príklad rovnice nadprúdovej, časovo nezávislej ochrany je možné popísať nasledovne:

$$\begin{aligned} i < 1,2 \cdot I_n : U_v = 0 \\ i \geq 1,2 \cdot I_n \wedge t > 5 : U_v = 110, \end{aligned} \quad (7.5)$$

kde parametre ochrany sú pomer  $I/I_n$  a vypínací čas  $t_s$  v sekundách:  $\mathbf{n} = [I/I_n, t_s]^T = [1,2, 5]^T$ . Vektor veličín meraných ochranou je potom  $\mathbf{y}(t) = [i]^T$ , kde  $i$  je prúd tečúci objektom a vektor veličín ovládaných ochranou je  $\mathbf{v}(t) = [U_v]^T$ , kde  $U_v$  predstavuje napätie ovládacej cievky výkonového vypínača [2].

Grafickým znázornením algoritmu ochrany je charakteristika ochrany. Charakteristika ochrany rozdeľuje plochu grafu na dve oblasti – oblasť blokovania ochrany a oblasť pôsobenia ochrany. Na obrázku 7.1 je znázornená charakteristika nadprúdovej časovo nezávislej ochrany. Oblasť pôsobenia je vyznačená šrafovaním [2].



Obr. 7.1. Charakteristika nadprúdovej časovo nezávislej ochrany

## 7.2 Základné pojmy

Pri prevádzkovaní a modelovaní ochrán je potrebné brať do úvahy nasledovné parametre a vlastnosti [2], [3]:

- Citlivosť – veľkosť meranej veličiny, na ktorú je ochrana nastavená. Ak je meraná veličina väčšia ako nastavená ochrana pôsobí.
- Nastaviteľnosť – rozsah hodnôt, na ktoré je možné nastaviť citlivosť.
- Prídržný pomer – pomer hodnoty meranej veličiny pri odpadnutí ochrany k hodnote meranej veličiny pri nábehu ochrany. Vždy je menší ako 1.
- Rozlišovacia schopnosť – je schopnosť rozlíšiť dva blízke stavy, z ktorých jeden je už poruchový a druhý ešte nie. Najmenší rozdiel, ktorý ešte dokáže ochrana rozoznať, je jej rozlišovacia schopnosť.
- Absolútna chyba – je rozdiel medzi meranou a nastavenou hodnotou.
- Relatívna chyba – je pomer absolútnej chyby k nastavenej hodnote. Relatívna chyba vyjadrená v percentách sa nazýva presnosť ochrany.
- Doba pôsobenia ochrany – je čas od vzniku poruchy, za ktorý sa objaví signál na výstupe ochrany.
- Preťažiteľnosť ochrany – je maximálna hodnota vstupnej veličiny ochrany, ktorá ak pôsobí definovanú dobu, ešte neohrozuje jej životnosť.
- Blokovanie ochrany – činnosť ochrany môže byť podmienená funkciou iného prístroja. Príkladom je blokovanie činnosti nadprúdovej ochrany podpäťovou.

### 7.3 Druhy ochrán

Na chránených zariadeniach môže dôjsť k rôznym druhom porúch, ktoré musia ochrany spoľahlivo detekovať a v prípade ohrozenia zariadenia dať pokyn na odopnutie zariadenia. Ak nie je možné zabezpečiť všetky potrebné ochranné funkcie jedným druhom ochrany, je nutné ochrany kombinovať a vytvárať súbory ochrán. Podľa druhu poruchy, ktorú ochrana detekuje, rozoznávame ochrany [2]:

- skratové
- pri preťažení
- podpäťové
- nadpäťové
- podfrekvenčné
- nadfrekvenčné
- pri zemnom spojení
- pri nesúmernosti
- pri spätnom toku výkonu
- pri strate budenia

Podľa funkčného princípu (podľa stavovej veličiny, na ktorú ochrana reaguje) delíme ochrany na:

- prúdové (prúd)
- napäťové (napätie)
- dištančné (impedancia)
- rozdielové (rozdiel prúdov)
- porovnávacie (rozdiel fáz)
- wattové (činný výkon)
- jalové (jalový výkon)
- frekvenčné (frekvencia)
- pri nesymetrii (spätná zložka)

Podľa času pôsobenia delíme ochrany na okamihové, časovo nezávislé a časovo závislé.

**Okamihové ochrany** pôsobia okamžite pri vzniku poruchy, ich rýchlosť je obmedzená len dobou spracovania meranej veličiny. **Časovo nezávislé ochrany** majú konštantnú, obsluhou nastavenú dobu pôsobenia, ktorá je nezávislá na hodnote stavovej veličiny. **Časovo závislé ochrany** majú dobu pôsobenia závislú na veľkosti niektorej stavovej veličiny.

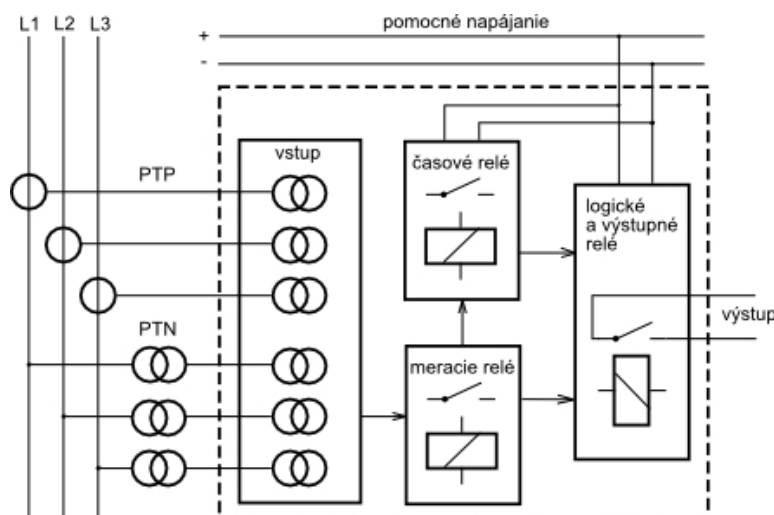
Podľa konštrukčného vyhotovenia rozoznávame ochrany elektromechanické, elektronické a číslicové (digitálne).

**Elektromechanické ochrany** využívajú elektrické relé. Je to najstaršie konštrukčné riešenie, avšak stále sa v prevádzke bežne vyskytujú. Jedna ochrana zabezpečuje len jednu ochrannú funkciu a preto je nutné ochrany kombinovať. **Elektronické ochrany** nahrádzajú klasické relé elektronickými obvodmi zloženými z diód, tranzistorov a integrovaných obvodov. Stavová veličina je reprezentovaná analógovo – úrovňou nejakej elektrickej veličiny napr. veľkosťou napätia. Jednotlivé obvody sú priestorovo nenáročné a preto je ich možné kombinovať do jednej skrine a vytvoriť tak súbornú ochranu, ktorá zabezpečuje viacero ochranných funkcií.

**Digitálne** využívajú číslicové spracovanie signálu. Všetky veličiny sú spracované číslicovo (diskrétne) pomocou mikroprocesorov. Informácie sú reprezentované kombináciami logickej jednotky a logickej nuly (čísla sú v binárnom tvare). Digitálne ochrany sú schopné sledovať všetky rozmery stavového priestoru chráneného objektu [2].

## 7.4 Konštrukcia elektromechanických ochrán

Základným konštrukčným prvkom elektromechanických ochrán sú elektrické relé. Signály z prístrojových transformátorov sú privedené na vstup ochrany. Vstup ochrany môže byť vybavený ďalším transformátorom, ktorý upraví vstupný signál na úroveň vhodnú pre meracie relé. Ak vstupný signál prekročí nastavenú hodnotu, meracie relé vydá pokyn na vypnutie. Pokyn na vypnutie je prenášaný buď priamo na výstupné relé alebo nepriamo s definovaným oneskorením prostredníctvom časového relé. Pomocné napájanie slúži pre napájanie koncových relé, logických a časových relé. Príklad blokovej schémy elektromechanickej ochrany je na obrázku 7.2 [1].



Obr. 7.2. Blokova schéma elektromechanickej ochrany

### 7.4.1 Elektromagnetické meracie relé ER

V elektromechanických ochránach vyrobených v bývalom Československu sa na meranie prúdu a napätia najčastejšie využíva elektromagnetické meracie relé ER. Jeho principiálna schéma je na obrázku 7.3. Prúd pretekajúci cievkou meracieho relé budí magnetický tok, ktorý vŕahuje otočnú kotvu medzi pólové nástavce. Proti tomuto pohybu pôsobí riadiaca pružina. Relé spína, ak moment kotvy prekoná moment pružiny.

Kotva relé je vplyvom magnetického poľa vŕahovaná medzi pólové nástavce silou

$$F(t) = k \cdot \Phi(t), \quad (7.6)$$

ktorá pôsobí na ramene  $l$  a vytvára moment kotvy  $M_k$

$$M_k(t) = l \cdot F(t). \quad (7.7)$$

Magnetický tok môžeme vyjadriť ako

$$\Phi(t) = LI(t) \quad (7.8)$$

a potom strednú hodnotu momentu

$$M_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T l \cdot k \cdot L^2 \cdot I^2(t) dt. \quad (7.9)$$

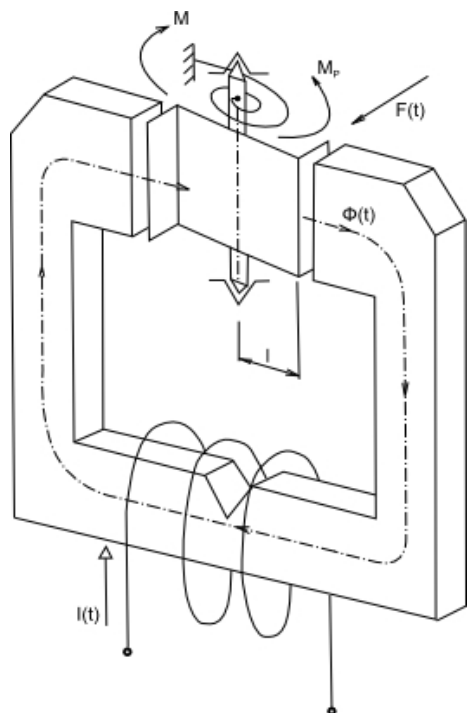
Ak uvedenú rovnicu upravíme na tvar

$$\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt = \frac{M_{AV}}{I \cdot k \cdot L^2}, \quad (7.10)$$

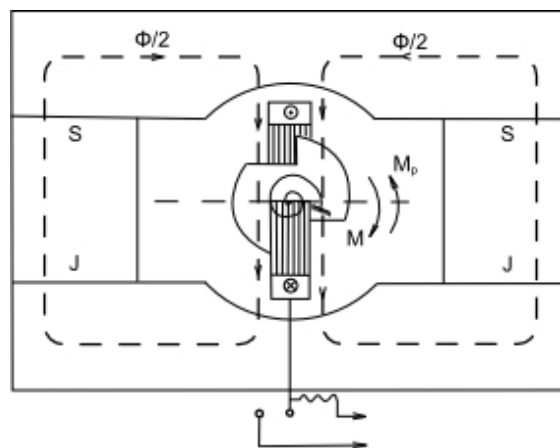
a pravú stranu nahradíme konštantou  $K^2$  a odmocníme, dostávame rovnicu v tvare

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = K, \quad (7.11)$$

kde ľavá strana je definíciou efektívnej hodnoty prúdu  $I(t)$ . Relé ER meria **efektívnu** hodnotu prúdu. V prípade veľkého odporu cievky môže byť toto relé použité na meranie efektívnej hodnoty napätia. Relé ER sa vyrába pre menovité prúdy 0,1 – 25 A, citlivosť je možné nastaviť v rozsahu  $0,8 I_N - 2 I_N$ . Prídržný pomer relé ER je 0,85 až 0,95 a presnosť 5 % [1].



Obr. 7.3. Elektromagnetické relé ER



Obr. 7.4. Jednosmerné meracie relé UCR2

#### 7.4.2 Jednosmerné meracie relé UCR1 a UCR2

Na presné meranie malých jednosmerných prúdov a napätí sa používa relé UCR2. Používa sa v kompenzovaných nadprúdových, rozdielových, smerových a dištančných ochránach. Relé sa skladá z trvalého magnetu, v ktorého poli sa otáča cievka budená vstupným prúdom (obr. 7.4). Na otočnú cievku pôsobia moment magnetického poľa  $M(t)$  a moment pružiny  $M_p$ . Relé spína v momente, keď sa oba momenty vyrovnajú. Silu pôsobiacu na otočnú kotvu môžeme vyjadriť ako

$$F(t) = k \cdot I(t) \cdot \Phi. \quad (7.12)$$

Moment kotvy potom vypočítame ako súčin sily a polomeru cievky

$$M(t) = I \cdot k \cdot \Phi \cdot I(t), \quad (7.13)$$

z toho stredná hodnota momentu bude

$$M_{AV} = k \cdot I \cdot \Phi \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt. \quad (7.14)$$



Ak vzťah (14) upravíme do tvaru

$$\frac{M_{AV}}{k \cdot I \cdot \Phi} = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt \quad (7.15)$$

a ľavú stranu nahradíme konštantou  $K$ , dostávame vzťah

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt, \quad (7.16)$$

ktorý je definíciou strednej hodnoty prúdu. Relé meria **strednú** hodnotu prúdu. Relé slúži na meranie jednosmerného prúdu alebo napätia, no s predradeným usmerňovačom je možné použiť aj na meranie striedavých veličín. Variant s označením UCR1 nemá nastaviteľnú citlivosť, moment pružiny je veľmi malý (blízky nule) a využíva sa ako amplitúdový komparátor – slúži na porovnávanie amplitúd dvoch striedavých veličín bez ohľadu na ich fázový posun. Relé UCR2 má nastaviteľnú citlivosť 1 – 3 mA alebo 2 – 5 mA. Relé UCR1 sa vyrába s citlivosťou 50, 150 alebo 500  $\mu A$  [1].

### 7.4.3 Elektrodynamické relé USM10

Elektrodynamické relé USM10 slúži na určenie smeru toku činného výkonu. Nazýva sa aj smerové relé. Jeho principiálna schéma je na obrázku 7.5. Striedavý prúd  $I \cdot \sin(\omega t)$  pretekajúci statorovým vinutím vytvára magnetické pole  $\Phi(t)$ , v ktorom sa natáča rotorová cievka pripojená na napätie  $U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ . Prúd v statorovom vinutí vybudí magnetický tok

$$\Phi(t) = L \cdot I \cdot \sin(\omega t). \quad (7.17)$$

Silu pôsobiacu na otočnú kotvu vypočítame ako

$$F(t) = k \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \Phi(t) = k \cdot L \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot I \cdot \sin(\omega t). \quad (7.18)$$

Táto sila pôsobí na ramene  $l$  rovnom polomeru rotorovej cievky a vytvára moment

$$M(t) = l \cdot k \cdot L \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot I \cdot \sin(\omega t). \quad (7.19)$$

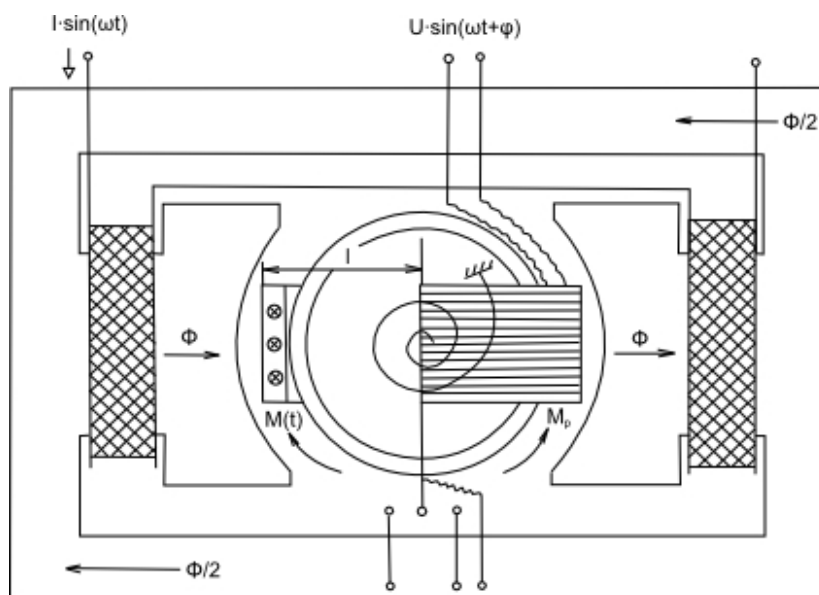
Strednú hodnotu tohto momentu vypočítame

$$M_{AV} = l \cdot k \cdot L \cdot U \cdot I \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin(\omega t) dt, \quad (7.20)$$

po úprave dostávame

$$M = l \cdot k \cdot L \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi). \quad (7.21)$$

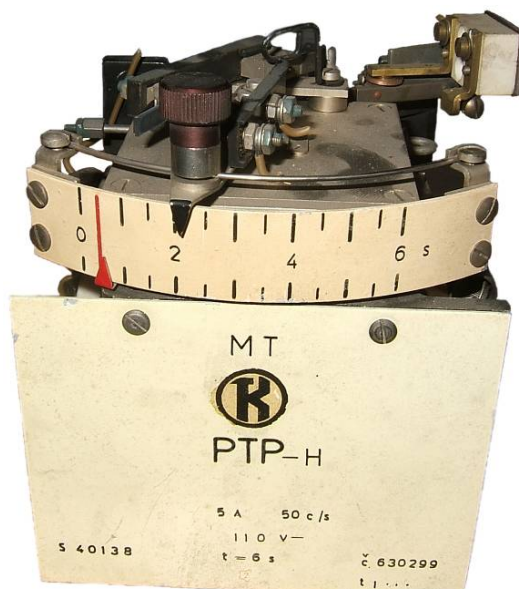
Moment riadiacej pružiny je veľmi malý, blízky nule. Znamená to, že relé nie je citlivé na veľkosť momentu cievky, ale na jeho smer a prepína v prípade zmeny polaritu  $\cos(\varphi)$ . Relé pôsobí bez ohľadu na veľkosť amplitúd vstupných veličín ako fázový komparátor [1].



Obr. 7.5. Elektrodynamiccké relé USM10

#### 7.4.4 Časové relé

Časové relé sa používa na zabezpečenie časového oneskorenia pôsobenia ochrany. Základom je jednosmerný motorček s odstredivým regulátorom otáčok, ktorý zabezpečuje konštantné otáčky aj pri zmene napájacieho napätia a zmene mechanických odporov. Motor cez prevody otáča vačkou, ktorá po dobehnutí nastaveného uhla  $\varphi$  spína výstupný kontakt. Obvodová rýchlosť vačky je konštantná, doba oneskorenia je úmerná uhlu nastavenia. Na vačke je vyznačená časová stupnica. Relé môže byť aj viacstupňové, v tom prípade je viacero vačiek na jednom spoločnom hriadeli [1].

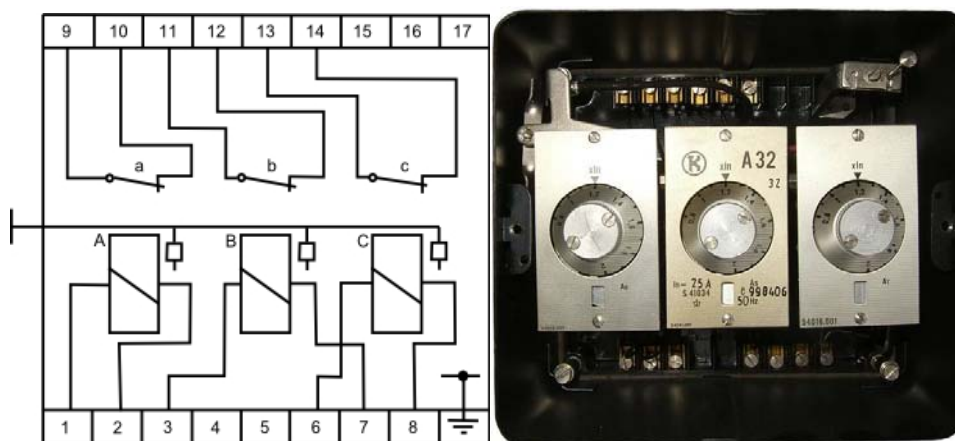


Obr. 7.6. Časové relé

## 7.5 Princíp činnosti vybraných typov elektromechanických ochrán

### 7.5.1 Okamihové prúdové ochrany rady A11, A22, A32

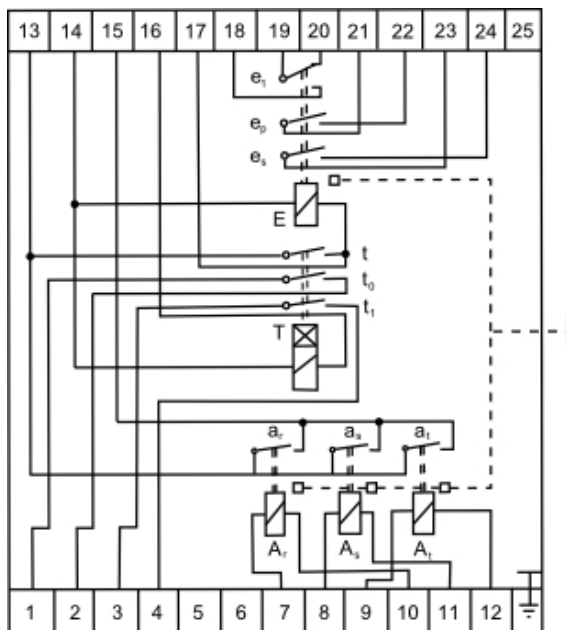
Okamihové prúdové ochrany rady A11, A22 a A32 sa používajú ako prúdové ochrany v striedavých obvodoch. Prvá číslica označenia udáva počet meracích systémov. Ako merací člen sa používajú relé ER s prúdovou cievkou. Ochrana pôsobí, ak efektívna hodnota prúdu dosiahne nastavenú hodnotu. Doba pôsobenia je rádovo 5 až 15 ms. Relé sú umiestnené pod priehľadným krytom v spoločnej skrini. Každé meracie relé je vybavené padáčkami pre vizuálnu indikáciu pôsobenia, padáčky sa vracajú do pôvodnej polohy tlačidlom na čelnom kryte ochrany. Schéma vnútorného zapojenia ochrany A32 je na obrázku 7.7. Ochrany rady A sa používajú ako okamihové skratové ochrany [1], [4].



Obr. 7.7. Ochrana A32

### 7.5.2 Časové nezávislé prúdové ochrany rady AT12, AT21, AT31

Časové nezávislé prúdové ochrany rady AT (obr. 7.8) sa používajú ako prúdové ochrany s pevne stanoveným oneskorením pôsobenia. Prvá číslica v označení udáva počet meracích systémov. Ochrany rady AT, podobne ako ochrany rady A, používajú ako merací člen relé ER, avšak sú doplnené časovým relé TX a pomocným koncovým relé. Časové a pomocné relé si pre svoju činnosť vyžadujú pomocné jednosmerné napájanie. Činnosť ochrany je nasledovná: ak efektívna hodnota prúdu v niektorom meracom systéme presiahne nastavenú hodnotu, príslušné relé vydá popud na časové relé T. Výstup z meracích členov a vstup časového relé sú vyvedené na svorky 15-16, čo umožňuje podmieniť nábeh časového člena zopnutím pomocných kontaktov inej ochrany a vytvárať tak blokovacie podmienky. Nábeh časového člena je signalizovaný zopnutím kontaktov  $t_0$ . Časové relé po uplynutí nastavenej doby dáva zopnutím kontaktu  $t$  popud na koncové relé E a ochrana pôsobí. Pôsobenie je signalizované prepnutím kontaktov  $e_1$  a zopnutím kontaktov  $e_p$  a  $e_s$ . Kontakty  $e_p$  sú vybavené záchytným prvkom. Pokiaľ počas doby činnosti časového relé zanikne popud meracieho člena, činnosť časového relé sa preruší a ochrana sa vracia do kludového stavu. Relé ER ako aj časové relé sú vybavené padáčkami pre vizuálnu indikáciu pôsobenia príslušného relé. Padáčky je možné vrátiť do pôvodnej polohy tlačidlom na prednom paneli ochrany. Ochrany rady AT sa používajú ako ochrany proti preťaženiu alebo ako ochrany skratové. Časovým odstupňovaním ochrán je možné dosiahnuť selektívne vypínanie (poruchu likviduje najbližšia ochrana) [1], [4].



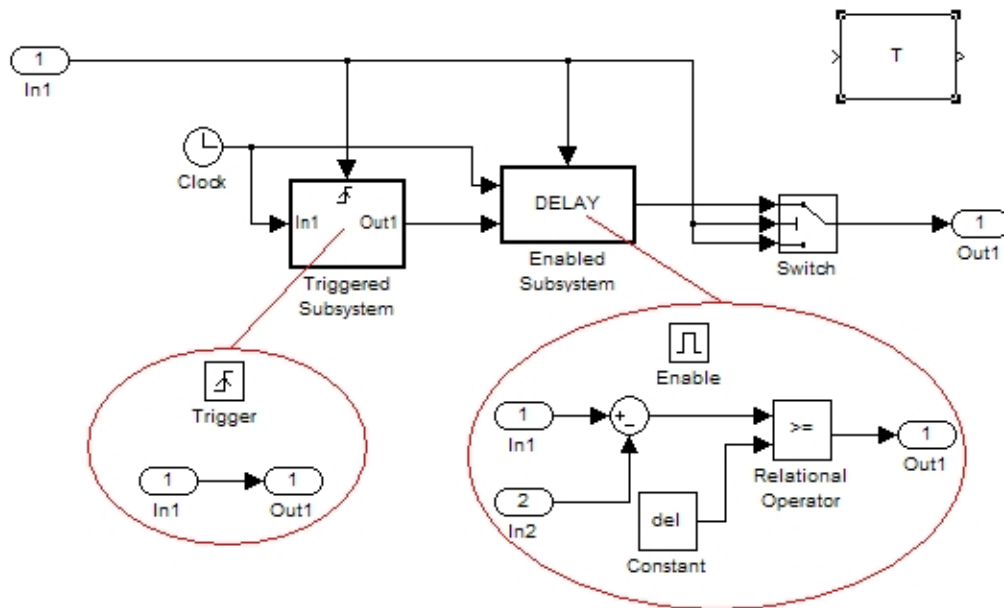
Obr. 7.8. Ochrana AT31

## 7.6 Simulácia činnosti elektromechanických ochrán

Činnosť ochrán je simulovaná v prostredí Matlab – Simulink. Pre účely modelovania ochrán bola vytvorená knižnica základných stavebných podsystémov, ktoré reprezentujú jednotlivé členy skutočnej ochrany – časový člen T, meracie relé ER a bistabilný klopný obvod BKO. Podsystémy sú vytvorené z prvkov zo štandardných knižníc programu Simulink [5].

### 7.6.1 Model podsystému časového člena T

Úlohou časovacieho člena T je zabezpečiť definované oneskorenie pri prenose informácie v riadiacich obvodoch ochrany. Model podsystému je na obr. 7.9.



Obr. 7.9. Model časového člena  $T$  a jeho ikona

Vstupný signál vstupuje do bloku prostredníctvom portu  $In1$  a je privádzaný na riadiaci vstup blokov *Triggered Subsystem* (TS), *Enabled Subsystem* (ES) a *Switch* (S).

*Triggered Subsystem* je blok obsahujúci podprogram (podprogram je na obrázku 7.9 zobrazený v červenej elipse spojenej s príslušným blokom), ktorý sa vykoná iba v momente, keď sa hodnota signálu privedeného na riadiaci vstup zmení z úrovne logická 0 na úroveň logická 1. Blok je aktivovaný nábežnou hranou riadiaceho signálu, v ustálenom stave je neaktívny, aj keď má riadiaci signál úroveň logická 1. S okolím komunikuje prostredníctvom vstupných a výstupných portov (na obrázku 7.9 sú to porty  $In1$  a  $Out1$ ) [5].

*Enabled Subsystem* je blok obsahujúci podprogram, ktorý sa vykoná, ak má signál privedený na riadiaci vstup úroveň logická 1. Blok je aktivovaný hodnotou vstupného signálu. S okolím komunikuje prostredníctvom vstupných a výstupných portov (na obrázku 7.9 sú to porty  $In1$ ,  $In2$  a  $Out1$ ) [5].

*Switch* je blok, ktorý prenáša na svoj výstup signál z jedného zo svojich dvoch vstupov (port 1 a 3) v závislosti na hodnote signálu privedeného na riadiaci vstup (port 2). Ak signál na riadiacom vstupe spĺňa nastavenú podmienku, na výstup je prenesený signál z prvého vstupu, v opačnom prípade je na výstup privedený signál z druhého vstupu [5].

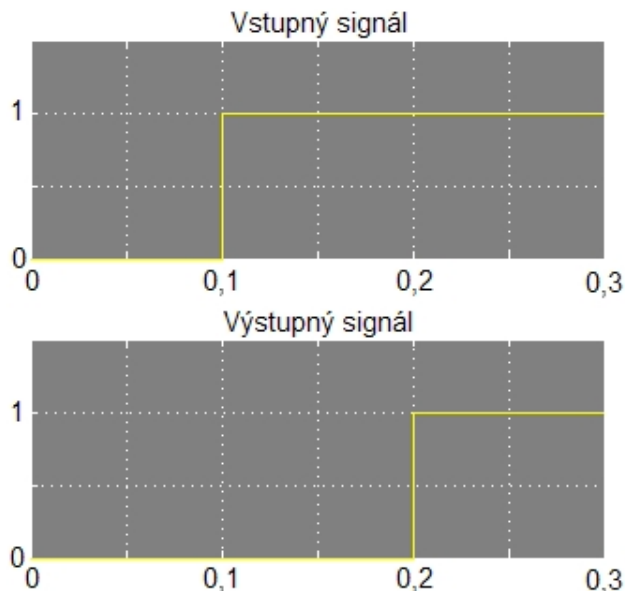
V základnom stave je úroveň vstupného riadiaceho signálu na vstupe  $In1$  rovná logickej 0. Bloky *Triggered Subsystem* (TS) a *Enabled Subsystem* (ES) sú neaktívne, prepínač *Switch* (S) je v dolnej polohe a na výstup bloku  $Out1$  je privedený riadiaci signál zo vstupu s úrovňou logická 0.

V momente, keď vstupný riadiaci signál zmení svoju hodnotu na logická 1, je touto zmenou (nábežnou hranou vstupného signálu) počas jedného výpočtového cyklu aktivovaný blok TS. Ten má na svoj vstup pripojený signál z hodín. V okamihu aktivovania je signál z hodín prenesený na výstup bloku, kde zostáva zaznamenaný aj v ďalších cykloch, keď už blok nie je aktívny a udáva čas prechodu vstupného signálu z hodnoty logická 0 na logická 1.

Zároveň je vstupným riadiacim signálom aktivovaný blok ES. Tento blok má dva vstupy, na prvý je privedený signál z hodín a na druhý signál z TS. Ich rozdiel je porovnávaný s nastavenou konštantou rovnajúcou sa požadovanému oneskoreniu. Ak je rozdiel väčší alebo rovný ako nastavená konštanta, je na výstup bloku ES privedená logická 1. Tá je ďalej cez vypínač S, teraz už prepnutý vstupným riadiacim signálom do hornej polohy, prenesená na výstup časového člena  $Out1$ . Tým sa vstupný riadiaci signál oneskorí na výstupe

o požadovaný definovaný čas. Zmenou vstupného riadiaceho signálu na úroveň logická 0 sa celý blok okamžite vracia do základného stavu.

Činnosť časového člena T je znázornená na obrázku 7.10. V čase 100 ms sa mení hodnota vstupného signálu z 0 na 1. Časový člen má nastavené oneskorenie 100 ms. Z obrázku je zrejmé, že výstupný signál sa zmení z hodnoty 0 na 1 v čase 200 ms, časový člen zabezpečil požadované oneskorenie 100 ms pri prenose signálu z vstupu na výstup.



Obr. 7.10. Priebeh signálu na vstupe a na výstupe časového člena T

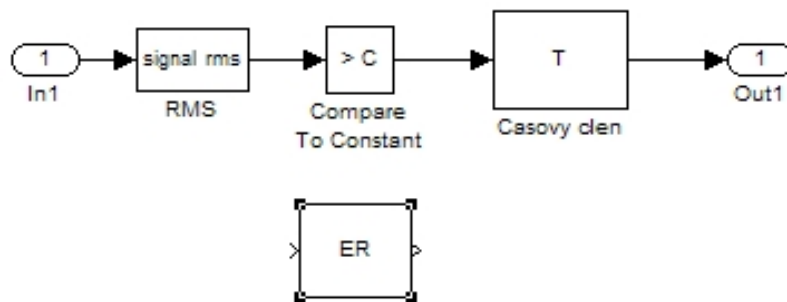
### 7.6.2 Model podsystemu meracieho člena ER

Úlohou meracieho člena ER je signalizovať, kedy efektívna hodnota vstupného signálu prekročí nastavenú hodnotu. V prípade, ak efektívna hodnota vstupného signálu prekročí nastavenú hodnotu, merací člen vygeneruje na svojom výstupe signál s úrovňou logická 1. V opačnom prípade je na výstupe logická 0.

Na vstupný port vytvoreného podsystemu (obr. 7.11) *In1* je privedená okamžitá hodnota meranej veličiny. Táto je odovzdávaná na vstup bloku *RMS*, ktorý slúži na výpočet efektívnej hodnoty vstupného signálu. Vypočítaná efektívna hodnota je porovnávaná v bloku *Compare To Constant* s nastavenou hodnotou. Výstupom bloku *Compare To Constant* je buď logická 0 alebo logická 1.

Výpočet efektívnej hodnoty vnáša do modelu podsystemu určité prirodzené oneskorenie, ku ktorému dochádza aj v skutočnom meracom člene ochrany. Veľkosť oneskorenia spôsobeného výpočtom efektívnej hodnoty nie je konštantná, ale závisí od veľkosti a fázového posunu meranej veličiny. Aby bolo možné modelovať reakčný čas skutočného relé ER (5-15 ms), je signál z porovnávacieho bloku privedený na vstup časového člena T, pomocou ktorého je možné doladiť veľkosť oneskorenia.

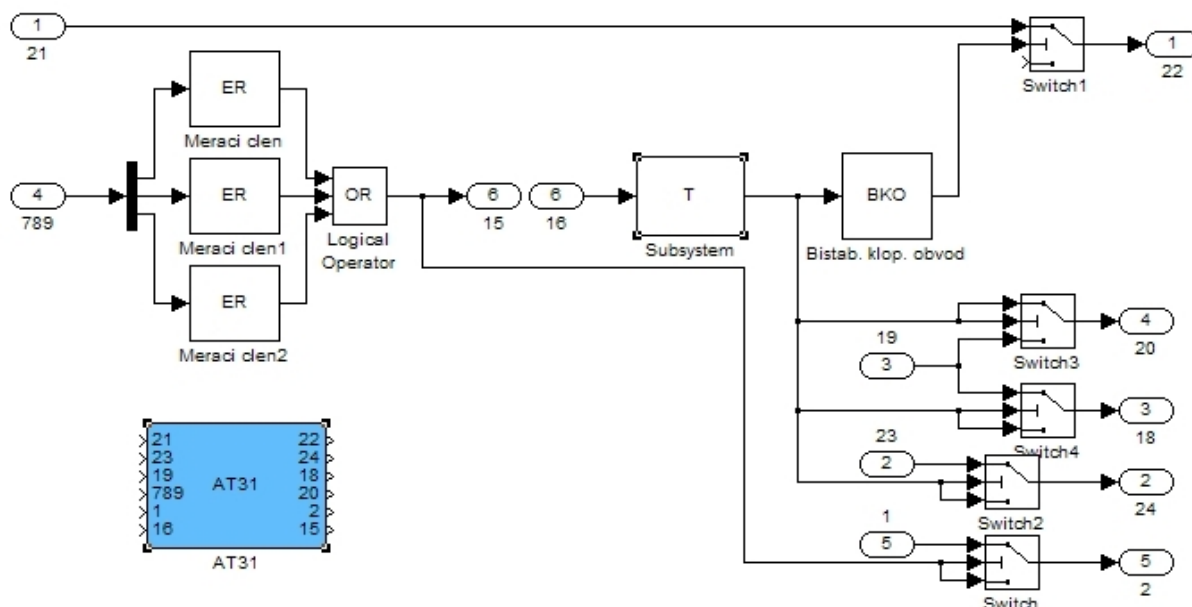
Na výstupnom porte modelu meracieho člena *Out1* sa generuje riadiaci signál hovoriaci o prekročení alebo neprekročení zadanovej efektívnej hodnoty meranej veličiny.



Obr. 7.11. Model meracieho relé ER a jeho ikona

### 7.6.3 Model ochrany AT31

Model ochrany AT31 bol vytvorený podľa jej schémy na obrázku 7.8 a je spolu s jej ikonou zobrazený na obrázku 7.12.



Obr. 7.12. Model ochrany AT31 a jej ikona

Pretože pri vytváraní komplexnejších modelov budú hodnoty meraných veličín prenášané v rámci modelu vo forme vektora ([fáza L<sub>1</sub>, fáza L<sub>2</sub>, fáza L<sub>3</sub>]), je výhodné prispôbiť vstup vytvoreného modelu ochrany AT31 tejto skutočnosti. Preto cez vstupný port označený 789 vstupujú do ochrany okamžité hodnoty všetkých troch fázových prúdov spoločne. Zo vstupného signálu sú následne získavané okamžité hodnoty prúdu pre každú fázu osobitne a tieto sú privedené na vstupy meracích relé ER. Meracie relé z okamžitých hodnôt vypočítajú efektívnu hodnotu vstupného prúdu. Ak efektívna hodnota vstupného prúdu prekročí nastavenú hodnotu, dôjde k zmene výstupného riadiaceho signálu meracieho člena ER z logickej úrovne 0 na logickú úroveň 1.

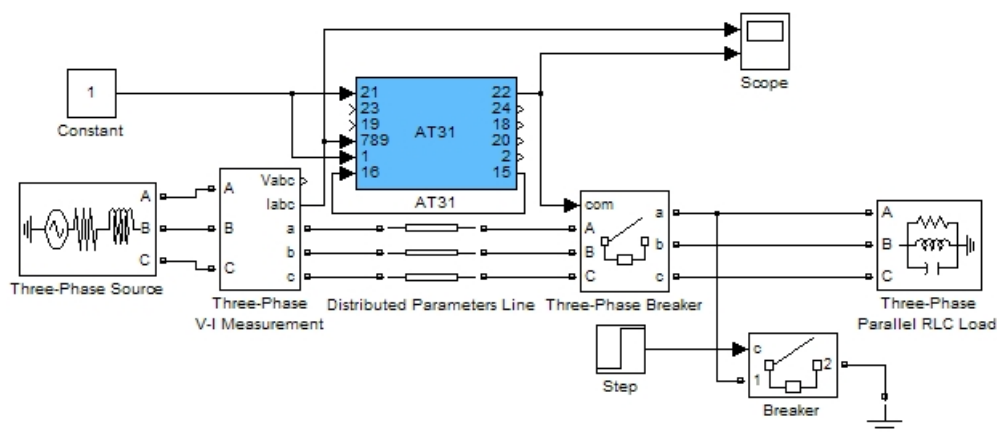
Výstupy z blokov ER pre jednotlivé fázy sú logicky sčítané. Logický súčet je vyvedený na výstupný port 15 a cez vstupný port 16 na vstup časového člena (pozri kap. 7.5.2, obr. 7.8). Porty 15 a 16 môžu byť priamo prepojené (prevádzka bez blokovania modelovanej ochrany), alebo medzi ne môže byť zapojený pomocný kontakt inej ochrany (prevádzka s blokovaním modelovanej ochrany). Časový člen T zabezpečí požadované oneskorenie reakcie ochrany. Výstup z časového člena ovláda jednotlivé pomocné kontakty (prepínače S, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> a S<sub>4</sub>) [1].

Záchyt kontaktu 21-22 (výstupný port 22) je zabezpečený predradeným blokom BKO, ktorý zabezpečuje to, že kontakt zostáva zopnutý, aj keď zanikne popud od časového člena.

Ikona modelu ochrany AT31 má 6 vstupov a 6 výstupov označených číslami. Značenie je zhodné s označením svorkovnice reálnej ochrany.

Pre overenie činnosti zostaveného modelu ochrany AT31 bola zostavená jednoduchá simulácia (obr. 7.13). Trojfázová záťaž (*Three-Phase Parallel RLC Load*) je prostredníctvom vedenia s rozloženými parametrami (*Distributed Parameters Line*) pripojená na trojfázový zdroj (*Three-Phase Source*). Do obvodu je medzi vedenie a spotrebič zaradený trojfázový vypínač (*Three-Phase Breaker*). Na ovládací vstup je cez model ochrany AT31 (kontakty 21-22) privedený signál logická 1 z bloku *Constant*. Medzi zdroj a vedenie je ďalej zaradený blok trojfázového merania (*Three-Phase V-I Measurement*), z ktorého je do ochrany a prvého osciloskopu (*Scope*) prenášaný vektor okamžitých hodnôt fázových prúdov. Súčasne je na druhý vstup osciloskopu pripojený ovládací signál vypínača.

Medzi trojfázovým vypínačom a záťažou je medzi prvú fázu a zem pripojený jednofázový vypínač (*Breaker*), ovládaný blokom *Step*. Ten v definovanom okamžiku (50 ms) vydá pokyn na zopnutie vypínača, čím v obvode vznikol jednofázový zemný skrat. Model ochrany detekuje nárast efektívnej hodnoty prúdu vo fáze 1 nad nastavenú hodnotu a po uplynutí nastavenej doby (100 ms) rozopnutím kontaktov 21-22 preruší ovládací signál trojfázového vypínača, čím dôjde k odopnutiu skratovaného miesta od zdroja vypnutia obvodu.

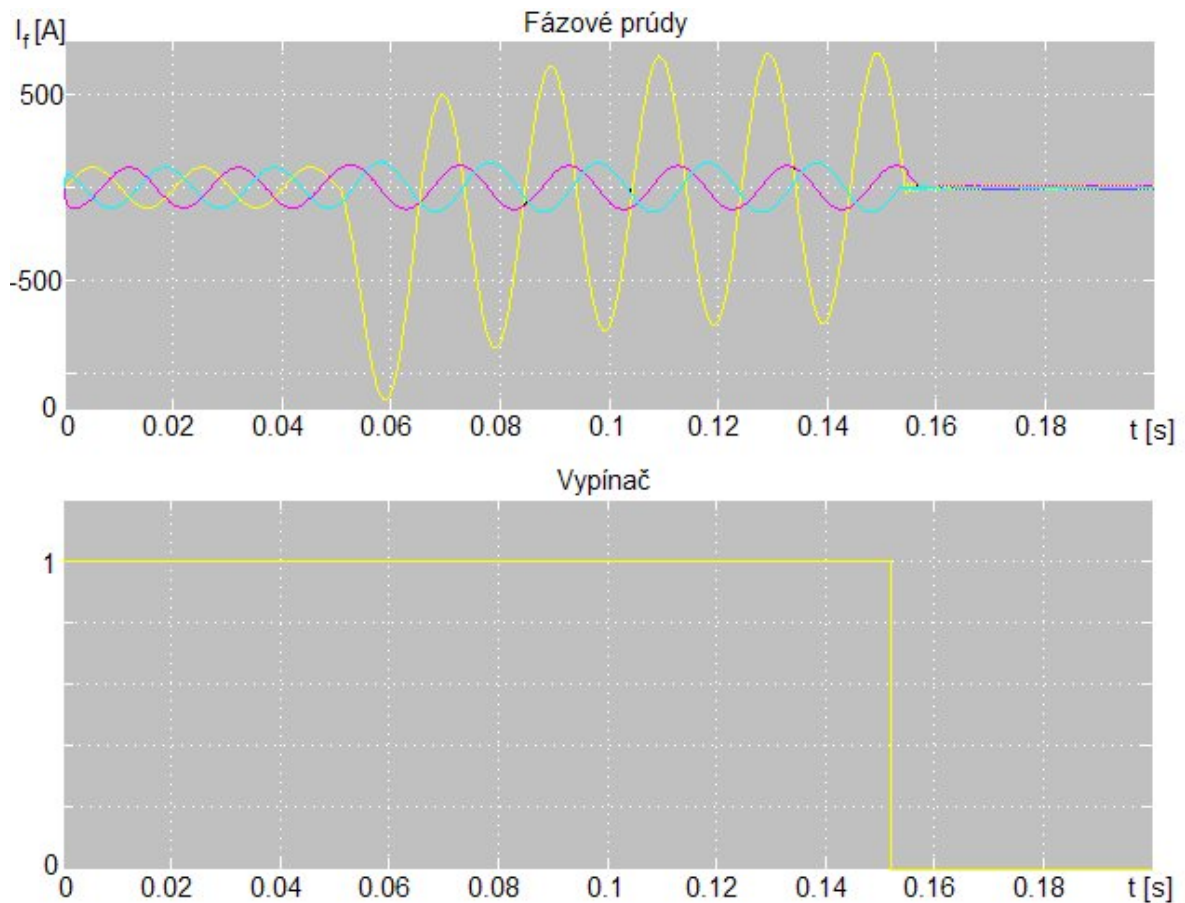


Obr. 7.13. Zostavená simulácia pre overenie činnosti modelu ochrany AT31

Na obrázku 7.14 sú zobrazené priebehy zaznamenané osciloskopom *Scope*. Ako je zrejmé, v čase 0,05 s došlo ku skratu vo fáze 1, čo sa prejavilo strmým nárastom prúdu v postihnutej fáze. Túto skutočnosť zaznamenal príslušný merací člen ochrany AT31, aktivoval časový člen a keďže po uplynutí nastaveného času (100 ms) porucha stále trvala, ochrana prostredníctvom kontaktov 21-22 vydala pokyn na vypnutie trojfázového vypínača. Zo zobrazených priebehov je zrejmé, že ochrana nevydala pokyn na vypnutie presne 100 ms od okamžiku vzniku skratu (t.j. v čase 0,150 s), ale o niečo neskôr. Toto oneskorenie je spôsobené meracím členom (v dôsledku výpočtu efektívnej hodnoty fázového prúdu, viď kapitolu 7.6.2) a vzniká aj v skutočnej ochrane. Uvedená simulácia demonštruje, že model ochrany AT31 pracuje správne.

Z vytvoreného modelu je možné po úpravách (zmena počtu meracích systémov, odstránenie časového člena, zmena zapojenia pomocných kontaktov) jednoducho vytvoriť modely ďalších elektromechanických ochrán využívajúcich meracie relé ER, napríklad A32, V32 a iné.





Obr. 7.14. Priebehy fázových prúdov a priebeh stavu vypínača

### Zoznam literatúry

- [1] DOHNÁLEK, P.: *Provoz a údržba ochran v energetice*. Praha, SNTL, 1989
- [2] DOHNÁLEK, P.: *Ochrany pro průmysl a energetiku*. Praha, SNTL, 1991
- [3] JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESHOVÁ, Ž.: *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2004
- [4] CHLADNÝ, V.: *Ochrany v elektrizačných sústavách – Návod na cvičenia*. Košice, Edičné stredisko VŠT v Košiciach, 1984
- [5] <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink/>