

---

# 1. UVOD V RELEJNO ZAŠČITO

---

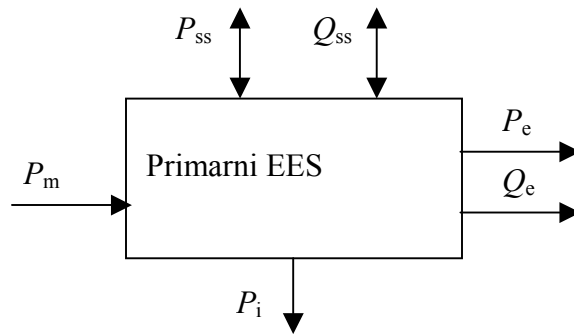
## *1.1. PODROČJA RELEJNE ZAŠČITNE TEHNIKE*

Relejna zaščite se ukvarja predvsem z zaščito delov primarnega elektroenergetskega omrežja in pa primarnega elektroenergetskega sistema v celoti. Deli primarnega sistema, ki imajo svojo zaščito in jo bomo tudi posebej obravnavali, so:

- generatorji,
- transformatorji,
- zbiralke in
- vodi.

Stikala, ki te elemente povezujejo, bomo obravnavali pri zaščiti zbiralk. Zaščite dušilk, sinhronskih kompenzatorjev in kondenzatorjev za kompenzacijo ne bomo obravnavali.

Poleg delov zaščitimo vse pogosteje tudi primarni sistem v celoti. Primarni sistem si lahko predstavljamo kot blok. Vhoda v blok, slika 1.1, predstavlja vektor mehanskih moči  $P_m$ , ki se v sistemu spremeni v električno moč, se v sistemu transformira in prenaša ter končno razdeljuje. Vektor moči  $P_e$ , ki predstavlja moči vseh, na sistem vezanih potrošnikov, predstavlja pa izhod. Poleg tega je blok, ki predstavlja sistem, povezan tudi z drugimi elektroenergetskimi sistemi. Pretakanje moči med njimi predstavlja vektor izmenjav  $P_{ss}$ , ki je lahko vhod ali pa izhod. Poleg tega imamo še en izhod, namreč vektor  $P_i$ , ki predstavlja vse izgube v sistemu.



Sl. 1.1 Veličine primarnega EES-a

Iz elektroenergetskega sistema izstopajo in vanj vstopajo poleg delovnih moči tudi jalove moči. Na sl. 1.1 so podane te moči z vektorjema  $Q_e$  in  $Q_{ss}$ . Vektor  $Q_e$  predstavlja vse induktivne jalove moči, ki jih potrošniki prejemajo oz. dajejo sistemu. Vektor  $Q_{ss}$  pa predstavlja vse jalove moči, ki se izmenjujejo s sosednjimi sistemi. Jalove moči se v samem sistemu tudi proizvajajo in porabljajo. Induktivne jalove moči proizvajajo generatorji, kondenzatorji, kompenzatorji in vodi, predvsem kabelski. Porabljajo pa jih transformatorji, dušilke in pa vodi.

Zaščita celotnega elektroenergetskega sistema deluje predvsem v primeru, ko pride do kritične neuravnovešenosti med proizvodnjo in potrošnjo delovne oz. jalove moči. Posledice tega so predvsem spreminjanje frekvence v sistemu in pa nihanja amplitud napetosti in kotov med njimi. Naloga zaščite je, da v tem primeru ukrepa in sicer z izklapljanjem potrošnikov, z odcepitvijo od s sistemom povezanih drugih energetskega sistema, oz. z delitvijo sistema v dva ali pa več med seboj nepovezanih sistemov. Ker je delovanje močno povezano z delovanjem regulacijskih in drugih avtomatskih naprav, tega področja zaščite ne bomo obravnavali.

## ***1.2.PRIMARNI ELEKTROENERGETSKI SISTEM***

### **1.2.1.Stanja in prehodi med stanji**

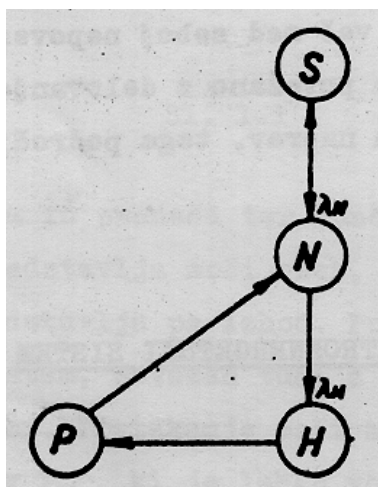
Za pravilno izbiro in nastavitvev zaščit je potrebno poznavanje vseh možnih stanj tako elektroenergetskega sistema v celoti kot tudi njegovih delov. Za posamezna stanja je važna verjetnost, da se sistem ali njegov del v njem nahaja. Verjetnost, da je sistem oz. njegov del v nekem stanju, ja podana s produktom povprečne pogostosti prehoda v to stanje in pa povprečne relativne dobe zadrževanja v tem stanju. Povprečno pogostost prehoda bomo označevali s črko  $\lambda$ , izražali pa bomo z njo povprečno število prehodov v to stanje na leto. Povprečno relativno dobo

zadrževanja v tem stanju pa bomo izračunali s povprečno dobo zadrževanja, deljeno z dobo enega leta.

### 1.2.1.1. Stanja primarnega elektroenergetskega sistema

Elektroenergetski sistem se lahko nahaja v naslednjih, za zaščito važnih stanjih, slika 1.2:

1. sigurno normalno stanje: vsi potrošniki dobivajo kvalitetno električno moč. Napetost, frekvenca in popačitve napetostnega vala so v dovoljenih mejah. Sistem je normalno povezan s sosednjimi elektroenergetskimi sistemi in obstoja v samem sistemu ali pa v sosednjih sistemih rezerva, da ostane pri izpadu kakršnekoli enote sistem še vedno v normalnem stanju. Na sliki je sigurno normalno stanje označeno s črko S.

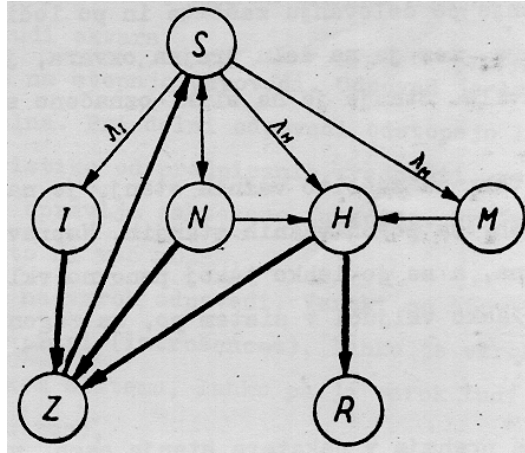


Sl. 1.2

2. nesigurno normalno stanje: vsi potrošniki dobivajo kvalitetno električno moč, ni pa v sistemu oz. v sosednjih sistemih rezerve. To stanje je na sliki označeno s črko N.
3. havarijsko stanje: to je prehodno stanje, ko je v sistemu okvara in ko ni več ravnovesja med potrošnjo in proizvodnjo, a ustrezni zaščitni ukrepi še niso izvedeni. Na sliki je stanje označeno s črko H.
4. pohavarijsko stanje: vzpostavljeno je ravnovesje med proizvodnjo in potrošnjo. Pri tem so lahko nekateri potrošniki izključeni, ostali pa npr. prejemajo električno moč z nižjo frekvenco oz. napetostjo. Lahko je prišlo tudi do prekinitve povezave s sosednjimi sistemi, lahko pa tudi deli samega sistema niso med seboj več povezani. Stanje je na sliki označeno s črko H. Pohavarijsko stanje običajno preide v nesigurno normalno stanje.

### 1.2.1.2. Stanja delov primarnega elektroenergetskega sistema

Deli elektroenergetskega sistema se lahko nahajajo v naslednjih stanjih (sl.1.3):



Sl. 1.3

1. normalno stanje: vse vrednosti za obratovanje pomembnih veličin so v dovoljenih mejah. Na sliki je stanje označeno s črko S.
2. nevarno stanje: dovoljene vrednosti so prekoračene, dalj časa trajajoče obratovanje v takih pogojih lahko povzroči odpoved naprave. Na sliki je označeno s črko N.
3. stanje po okvari, kateri mora slediti izklop dela od sistema. To stanje je označeno na sliki s črko H.
4. stanje po okvari, ki ne zahteva ločitev dela od sistema. Stanje je na sliki označeno s črko M.
5. stanje v izjemnih obratovalnih razmerah, ki za samo napravo niso nevarne, lahko pa povzročijo nepotrebno delovanje zaščite. To stanje je na sliki označeno s črko I.
6. stanje po delovanju zaščite in po ločitvi dela od sistema. Ker je odpoved le kratkotrajna oz. je izklop povzročilo nepotrebno delovanje zaščite, se lahko del ponovno poveže na sistem in to po krajši časovni zakasnitvi. Stanje je na sliki označeno s črko Z.
7. stanje po delovanju zaščite in po ločitvi dela od sistema. Ker je na delu trajna okvara, je potrebno popravilo. Stanje je na sliki označeno s črko R.

Poleg teh, za zaščito važnih stanj, je naprava lahko še v drugih, za pogon važnih stanjih. Naprava je npr. izključena, a se jo lahko takoj ponovno vključi, ali naprava se lahko vključi v sistem po, za zagon potrebni zakasnitvi.

Naprava prehaja v nekatera stanja sama, v druga pa s posredovanjem avtomatskih naprav kot zaščita, naprava za avtomatski ponovni vklop. Na sl. 1.3 so prikazani avtomatski prehodi z debelejšo črto.

### **1.2.2.Vrste odpovedi primarnih delov elektroenergetskega sistema**

V primarnem sistemu stalno prihaja do odpovedi, ko posamezni deli začasno ali pa trajno niso več sposobni, da bi kvalitetno opravljali svoje funkcije. Odpovedim se sicer skušamo čim bolj izogniti in to z vgradnjo odpornejših in zdržljivejših naprav, s kvalitetnim vzdrževanjem, s pravočasno izmenjavo iztrošenih naprav in z detajlno analizo dogajanj pri odpovedih. Lahko sicer pričakujemo, da bomo odpovedi zmanjšali, a odstraniti pa jih ne bomo mogli. Odpovedi lahko klasificiramo na razne načine. Običajno pa jih določamo glede na 7 vidikov in sicer glede na:

1. hitrost nastopa odpovedi. Nastopijo lahko trenutno ali pa nastajajo postopoma,
2. trajanje odpovedi. Odpoved je kratkotrajna, bežna oz. prehodna, ali pa trajna. Trajno odpoved imenujemo tudi okvara,
3. stopnjo odpovedi. Odpoved je lahko delna ali popolna. Pri delni odpovedi odstopajo le nekatere karakteristike od predpisanih vrednosti, vendar pa del lahko še opravlja zahtevano funkcijo. Pri popolni odpovedi pa to ni več možno,
4. vzrok odpovedi. Vzroki so številni. Lahko so v sami napravi (iztrošenost), lahko je vzrok v elektroenergetskem sistemu, lahko pa je vzrok tudi zunanji (npr. potres),
5. mesto nastopa okvare. Teoretično lahko nastopijo na vseh delih naprave. Pri transformatorju npr. pride lahko do okvare v navitju, v jedru, v kotlu,
6. vrsto odpovedi. Lahko so električne (n.pr prekinitve vodnika, zemeljski stik, kratek stik) kemične ali mehanske,
7. način javljanja. Odpoved se lahko javi takoj, npr. preboj v odklopniku, lahko pa ostane skrita, dokler se od naprave ne zahteva, da opravi določeno funkcijo, npr. da odklopnik odklopi. Če tega ne more opraviti, je to skrita okvara, ki se ne ugotovi pri njenem nastopu, ampak šele pri pregledih oz. zatajitvah.

### ***1.3. SEKUNDARNI ELEKTROENERGETSKI SISTEM***

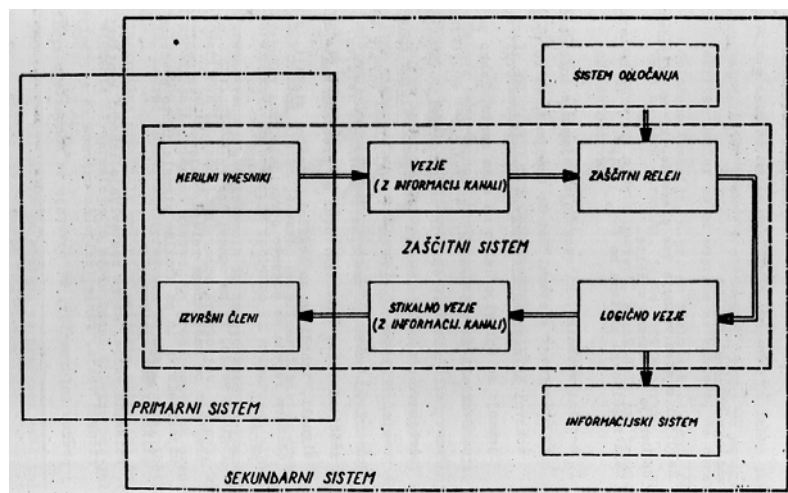
Naloga sekundarnega elektroenergetskega sistema je, zajemanje podatkov iz primarnega sistema, njih prenašanje, obdelava in na tej osnovi tudi ustrezno ukrepanje. Del tega sistema je tudi človek - operater. Obdelava, shranjevanje in pa ukrepanje je lahko ročno, delno ročno ali pa avtomatsko.

Sekundarni sistem je vezan na primarni sistem preko posrednikov. Informacije dobivamo iz primarnega sistema prvenstveno preko tokovnih in napetostnih instrumentnih (merilnih in zaščitnih) transformatorjev. Ukrepi, ki naj spreminjajo primarni sistem, pa gredo zopet na prenosnike, namreč na stikala (predvsem na odklopnike, ločilke in krmilna pretikala pri regulacijskih stikalih) oz. na elemente za spreminjanje proizvedene delovne oz. jalove moči.

Podsistemi sekundarnega sistema so predvsem zaščitni sistem, informacijski sistem, sistem odločanja in sistem pomožnega napajanja.

### 1.3.1. Zaščitni sistem

Zaščitni sistem vsebuje vse elemente, ki so vključeni v delovanje posamezne zaščite. Deli zaščitnega sistema so (sl. 1.4):



Sl. 1.4

1. merilni vmesniki, ki omogočajo zajemanje informacij iz primarnega sistema. Kot že omenjeno, so to predvsem tokovni in napetostni zaščitni transformatorji. To zajemanje se opravlja lahko na enem mestu, lahko pa tudi na dveh ali pa več mestih, ki so v istem postroju ali pa v različnih postrojih in se informacije prenašajo daljinsko. Mesto zajemanja imenujemo relejna točka.

2. vezje, vključno naprave za ev. daljinski prenos informacij, ki povezuje vmesnike z zaščitnim relejem.
3. zaščitni rele, katerega vhodi so predvsem analogni signali, izhodi pa so logični, binarni signali. V zaščitnem releju se pogosto opravljajo tudi računske operacije.
4. logično vezje, ki na osnovi logičnih signalov, prejetih predvsem od zaščitnega releja, daje podatke za informacijski sistem in pa krmilne signale in to predvsem za stikanje odklopnikov.
5. stikalno vezje, ki ga sestavljajo izhodni kontakti logičnega vezja, vezje vključno z napravami za daljinski prenos informacij, ki povezuje te kontakte s krmilnim členom izvršnega člena, in končno sam krmilni člen, običajno izklopna tuljava odklopnika.
6. izvršni členi, ki so običajno odklopniki, lahko pa je tudi naprava za zaviranje, za razbuditvev generatorja in pod. Ta člen je vmesnik med zaščitnim in primarnim sistemom.

### **1.3.2. Povezava zaščitnega sistema z ostalimi sistemi**

Zaščitni sistem je, kot že omenjeno, povezan s primarnim sistemom in informacijskim sistemom, povezan pa je tudi s sistemom pomožnega napajanja in pa ev. s sistemom odločanja. Zaščitni sistem daje informacijskemu sistemu podatke, ki so predvsem namenjeni operaterju v centru vodenja, on pa jih posreduje vzdrževalnim ekipam in pa ekipam za popravila. Podatki se koristijo za direktno ukrepanje, za analizo odpovedi, za arhiv in za poznejšo statistično obdelavo.

Poleg informacij o delovanju zaščitnega releja, ki so razvidne iz stanja signalnih značk, vgrajenih v samem releju, se vse pogosteje izvaja tudi lokalni kronološki zapis vseh binarnih signalov in to v pravilnem časovnem zaporedju in s točnim časom nastopa signala. Poleg tega uporabljamo pri zaščiti vodov pogosto se osciloperturbograf, ki poleg binarnih zapisov opravlja tudi analogne zapise. Signalizacije se pogosto prenašajo tudi v center vodenja. Tam se prikazujejo operaterju na sinoptični plošči oz. na ekranu katodne cevi. Istočasno pa se izvede tudi njihov avtomatski zapis s pisalnikom in to v kodirani obliki ali s tekstom.

Povezava zaščitnega sistema s sistemom odločanja se še ne izvaja, pričakujemo pa jo lahko v bodočnosti. Glede na trenutno stanje predvsem v primarnem sistemu, bi bilo npr. koristno avtomatsko spreminjanje nastavitvev zaščite.

Izredno važna je povezava s sistemom pomožnega napajanja. Pri manjših postrojih se to napajanje opravlja iz izmeničnega omrežja preko napetostnih oz. tokovnih zaščitnih transformatorjev. Potrebna energija za delovanje se lahko črpa tudi iz kondenzatorskih baterij, priključenih preko usmernikov na omrežno napetost. Ti se uporabljajo le pri manjših postrojih. Predvsem pa se uporablja kot izvor pomožnega napajanja ena ali več akumulatorskih baterij.

Glede na različne zahteve, ki jih imajo statični releji, uporabljamo vse pogosteje centralne baterije in pa številne pretvornike in to enosmernih v enosmerne veličine (DC/DC pretvorniki), enosmernih v izmenične veličine (DC/AC pretvorniki) oz. izmeničnih v enosmerne veličine (AC/DC pretvorniki).

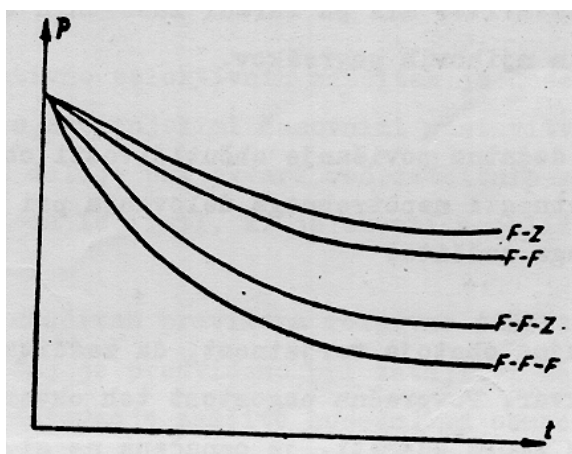
## 1.4. OCENJEVANJE ZAŠČITNEGA SISTEMA

Pri ocenjevanju obstoječega kot tudi pri načrtovanju novega zaščitnega sistema je potrebno upoštevati predvsem njegovo hitrost, občutljivost, selektivnost, zanesljivost in ekonomičnost.

### 1.4.1. Hitrost delovanja zaščite

Željeno je, da se del sistema, na katerem je nastala okvara, čim prej izključi. Vzroki so predvsem naslednji:

- Posledice kratkega stika so pogosta sorazmerne času trajanja okvare.
- pri okvari pogosto prihaja v sistemu do napetostnih, tokovnih, termičnih in mehanskih preobremenitev. To lahko povzroči pri dalj časa trajajoči okvari še drugo okvaro v bližnji ali pa daljni okolici.



Sl. 1.5

- Zaradi okvare lahko pride do nestabilnega obratovanja. Na sl. 1.5 je podano možno trajanje okvare v vodu v odvisnosti od moči  $P$ , katero je vod prenašal pred okvaro. Krivulje podajajo za nek konkreten primer čase dopuščenega trajanja za štiri vrste okvar



in sicer za trofazni kratki stik (P-P-P), za dvofazni kratki stik (F-F), za dvofazni zemeljski stik (P-P-Z) in za enofazni stik (F-Z). Sistem je učinkovito ozemljen.

- Oblok se v zraku običajno s časom podaljšuje. S tem se povečuje tudi njegova upornost, kar lahko otežuje delovanje zaščite.

Vendar pa so zelo hitre zaščite običajno tudi dražje, manj selektivne, včasih pa tudi manj občutljive. Z nastopom okvare nemreč dobimo tako v primarnih kot v sekundarnih tokokrogih prehodne pojave, ki pa se običajno hitro iznihajo. Zato se odločamo prvenstveno za hitre zaščite pri strojih in pri vodih visokih in najvišjih napetostih z delovnim časom releja ca 20 ms. V distribucijskih vodih, kjer cena zaščite igra važno vlogo, pa dopuščamo tudi delovne čase zaščite do nekaj sekund.

#### **1.4.2. Občutljivost zaščite**

Pri zaščiti želimo, da bi delovala že pri minimalnih okvarah. Minimalne neodkrite okvare sicer ne povzročajo običajno večje škode, lahko pa postanejo zelo nevarne pri nastopu druge okvare. Pri nekaterih zaščitah smo omejeni z možnostjo zviševanja občutljivosti in to zaradi zaščitnega releja in njegove nastavitve ali pa zaradi zaščitnih transformatorjev in njihovih pogoškov.

Včasih pa dodatno povišanje občutljivosti občutno poviša verjetnosti nepotrebne delovanja pri okvarah izven obsega zaščite. Zato običajno obstoja verjetnost, da zaščita ne odkrije vseh okvar. Povprečna pogostost teh okvar, ki jih zaščita ne zmore odkriti, je označena na sl. 1.3 z  $\lambda_M$ . Te okvare se običajno ugotove pri rednih pregledih delov primarnega sistema ali pa pri nastopu druge okvare.

#### **1.4.3. Selektivnost zaščite**

Od zaščite zahtevamo, da izloči le tisti del sistema, na katerem je nastala okvara. Zato je celotni primarni sistem razdeljen na posamezna območja. Ta območja zajemajo en, včasih pa tudi dva dela kot npr. blok generator - transformator oz. blok transformator - vod. Seveda se morajo območja med seboj delno prekrivati in to tako, da dobimo sigurno delovanje pri okvari na kateremkoli delu sistema.

Glede na selektivnost razlikujemo absolutno in relativno selektivne zaščite. Absolutno selektivne zaščite delujejo le pri okvarah v svojem območju in jih zato imenujemo tudi zaščite enote. Prednost teh zaščit je predvsem v tem, da delujejo sorazmerno hitro pri okvarah v

celotnem območju zaščite, ki je točno definirano. Pri teh zaščitah pa je potrebna ustrezna rezerva, ki deluje pri zatajitvi te zaščite.

Pri relativno selektivnih zaščitah je dosežena selektivnost s stopenjskimi časovnimi nastavitvami. Pri teh zaščitah deluje pri okvari več zaščitnih relejev istočasno, toda le tisti, ki je okvari najbližji, opravi izklop. Pri teh zaščitah praviloma rezervne zaščite niso potrebne, saj je predvideno pri zatajitvi zaščite enega območja delovanje zaščite sosednjega območja. Vendar pa je območje delovanja le grobo določeno in zato imajo te zaščite tudi daljše čase delovanja. Ker se obe vrsti zaščite v glavnem dopolnjujeta, se vse pogosteje uporablja kombinacija obeh.

Kljub temu, da naj zaščita ne bi delovala neselektivno, to je nepotrebno, se takim delovanjem ne moremo popolnoma izogniti. Povprečna pogostost takih neselektivnih izklopov je označena na sl. 1.3 z  $\lambda_1$ .

#### **1.4.4. Zanesljivost zaščite**

Nezanesljivo delovanje zaščitnega sistema povzročajo predvsem pogoški v načrtovanju in montaži in pa defekti v samih elementih zaščitnega sistema. Načrtovalec zaščitnega sistema mora dobro poznati obratovalne pogoje v normalnih in nenormalnih razmerah. Prav tako pa mora poznati možne zaščitne sisteme in problematiko posameznih njihovih delov, predvsem zaščitnih relejev in transformatorjev. Kljub temu pa se včasih izkaže, da je bilo načrtovanje zaščite pomanjkljivo in je zato potrebno naknadno spreminjanje.

Prav tako je potrebno posvetiti posebno pozornost montaži. Kljub temu, da se več in več dela opravlja že v tovarnah z vgraditvijo posameznih elementov v posebne zaščitne omare, je potrebna tudi še vedno zelo skrbna montaža in pa številni preskusi pri stavljanju zaščite v obratovanje.

Največ težav pa povzročajo defekti v zaščitnih napravah. Ker delujejo nekatere zaščite zelo redko, se defekt odkrije lahko le takrat, ko zaščita deluje nepotrebno ali pa pri okvari zataji. Lahko pa se odkrije tudi pri vzdrževalnih pregledih.

Zaščita lahko deluje nepravilno zaradi defekta v zaščitnem sistemu, ki zaradi povišane občutljivosti povzroči nepotrebno delovanje, ali pa zaradi defekta, ki zmanjša občutljivost zaščite oz. celo prepreči potrebno delovanje zaščite.

Povprečna pogostost nepravilnega delovanja zaščite je odvisna od povprečne pogostosti nastopa takih razmer v primarnem sistemu, ki lahko povzročijo tako delovanje, to pogostost označimo z  $\lambda_s$ , nadalje je odvisna od povprečne pogostosti nastopa defekta v zaščitnem sistemu, ki povzroči nepravilno delovanje zaščite, označimo jo z  $\lambda_z$  in pa od povprečne pogostosti rednih pregledov, ki jo označimo z  $\lambda_v$ .

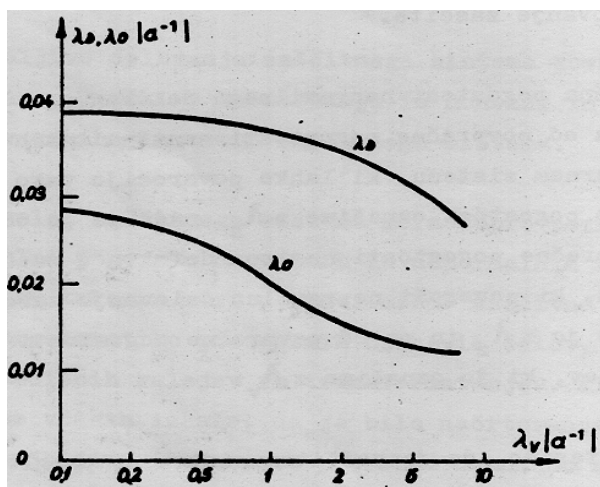
Predpostavimo, da je zaščitni sistem po pregledu vedno brez defekta in da je verjetnostna gostota nastopa okvare v primarnem sistemu oz. defekta v zaščitnem sistemu porazdeljena eksponentno. V tem primeru je pogostost nepravilnega delovanja zaščite podana z enačbo (L.19):

$$\lambda_f = \frac{\lambda_z * \lambda_s^2 * (1 - e^{-\lambda_z * \lambda_v}) - \lambda_z^2 * \lambda_s * (1 - e^{-\lambda_s * \lambda_v})}{\lambda_s^2 * (1 - e^{-\lambda_z * \lambda_v}) - \lambda_z^2 * (1 - e^{-\lambda_s * \lambda_v})} \quad (1.1)$$

Pogostost nepravilnega delovanja  $\lambda_f$  je največja, če ni pregledov, če je torej  $\lambda_v$  enak nič. V tem primeru dobi gornja enačba naslednjo obliko:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_z * \lambda_s}{\lambda_z + \lambda_s} \quad (1.2)$$

Kot sledi iz enačbe (1.1) se z večanjem pogostosti vzdrževalnih pregledov dviguje tudi zanesljivost zaščitnega sistema. Na sl.1.6 sta podani krivulji, ki podajata pogostost nepotrebnih delovanj zaščite oz. izostalih delovanj zaščite v odvisnosti od pogostosti pregledov.



Sl. 1.6

Spodnja krivulja, ki prikazuje pogostost izostalih delovanj, je izračunana za primer, da nastopita na leto dve okvari na varovanem delu, da pride do defekta na zaščitnem sistemu, ki povzroči zatajitev delovanja zaščite, 1 krat na 100 let in da zaščita enkrat na sto let ne deluje pri okvari zaradi nezadostne občutljivosti.

Zgornja krivulja prikazuje pogostost nepotrebnih delovanj. Določena je za primer, da nastopa v sistemu na leto 20 okvar, pri katerih pa naj zaščita varovanega dela ne deluje, da pride

1 krat na 100 let do defekta v zaščitnem sistemu, zaradi katerega zaščita po nepotrebnem deluje pri okvarah v sistemu in pa da 1 krat na 100 let deluje zaradi svoje karakteristike neselektivno.

### 1.4.5. Ekonomičnost zaščitnega sistema

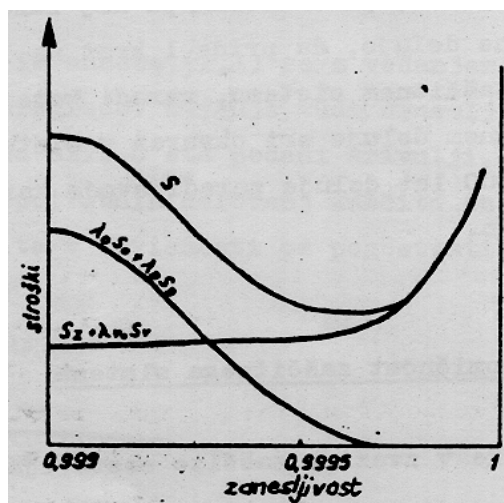
Letne stroške v zvezi z zaščito sestavljajo:

- 1. stroški z opremo (obresti, odpisi opreme itd.), ki jih označimo z  $S_z$
- 2. stroški za njeno vzdrževanje: stroški enega vzdrževanja  $S_v$  x pogostost vzdrževanja  $\lambda_v$
- 3. stroški zaradi odpovedi delovanja zaščite pri okvari v zaščitenem območju: povprečni stroški zaradi odpovedi zaščite  $S_o$  x povprečna pogostost odpovedi delovanja  $\lambda_o$
- stroški zaradi nepotrebne delovanja zaščite: povprečni stroški nepotrebne določanja zaščite  $S_D$  x povprečna pogostost teh delovanj  $\lambda_D$ .

Celotni stroški so torej:

$$S = S_z + \lambda_v * S_v + \lambda_o * S_o + \lambda_D * S_D \quad (1.3)$$

S poviševanjem zanesljivosti rastejo stroški za zaščitne naprave in za njihovo vzdrževanje, padajo pa stroški, povezani z odpovedmi delovanja zaščite ali zaradi nepotrebne delovanja zaščite. Za konkreten primer so podani stroški v odvisnosti od zanesljivosti na sl. 1.7. Kot sledi iz slike, so minimalni stroški za ta primer pri zanesljivosti 0,99965.



Sl. 1.7

## **1.5. REDUNDANCA V ZAŠČITI**

Pri podvojitvi celotnega zaščitnega sistema ali pa njegovih členov lahko dosežemo zmanjšanje izostalih ali nepotrebnih delovanj; povišajo pa se ustrezno izdatki za opremo. Če želimo zmanjšanje izostalih delovanj, je potrebno, da deluje le en člen. Če so odpovedi obeh elementov med sabo nepovezane, se verjetnost izostalega delovanja zmanjša. Enaka je produktu verjetnosti izostalega delovanja posameznih elementov

$$P_0(a \text{ in } b) = P_0(a) * P_0(b) \quad (1.4)$$

S tem pa se poviša verjetnost nepotrebne delovanja, saj je enaka vsoti verjetnosti nepotrebne delovanja obeh elementov:

$$P_D(a \text{ ali } b) = P_D(a) + P_D(b) \quad (1.5)$$

Ta način uporabljamo predvsem pri zaščiti važnih vodov, kjer je posledica izostalega delovanja lahko dosti hujša od nepotrebne delovanja.

Če želimo zmanjšanje nepotrebnih delovanj, je za delovanje potrebno delovanje obeh členov. Če kot v prejšnjem primeru vzamemo, da so nepotrebna delovanja obeh členov med sabo nepovezana, se verjetnost nepotrebne delovanja občutno zmanjša. Enaka je produktu verjetnosti izostalega delovanja obeh členov:

$$P_0(a \text{ ali } b) = P_0(a) * P_0(b) \quad (1.16)$$

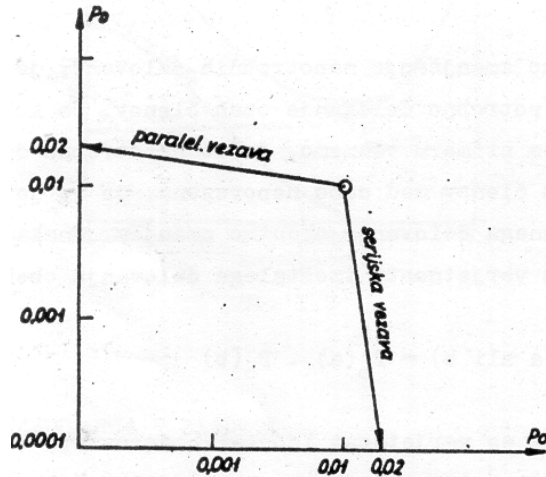
Poviša pa se verjetnost izostalih delovanj, saj je verjetnost v tem primeru enaka vsoti verjetnosti izostalih delovanj posameznih členov:

$$P_D(a \text{ in } b) = P_D(a) + P_D(b) \quad (1.17)$$

Ta način se npr. uporablja praviloma pri zaščiti zbiralk, kjer povzroča nepotrebno delovanje lahko zelo hude posledice.

Vrednosti verjetnosti izostalih in nepotrebnih delovanj je za primer uporabe dveh členov z enako verjetnostjo za izostalo in za nepotrebno delovanje, ki naj je 0,01, podana za obe možnosti na sl. 1.8.

Če je potrebno znižati obe vrednosti nepravilnega delovanja, moramo uporabiti več členov. To omogoča že kombinacija treh členov, če je pogoj za delovanje ta, da delujeta vsaj dva člena. Čeprav ima tak način prednosti zaradi povečane sigurnosti, se zaradi dodatnih izdatkov v glavnem še ne uporablja.



Sl. 1.8

## 1.6. VRSTE DELOVANJA ZAŠČITE

Pri statistični obdelavi podatkov o delovanjih zaščit je potrebno delovanje zaščit klasificirati. Pri odpovedi (okvara oz. motnja) na delu omrežja je delovanje zaščite tega dela potrebno, delovanje ostalih zaščit pa nepotrebno. V nekaterih slučajih pa je to težko ugotoviti. V tem primeru je potrebnost dvomljiva.

Pri razmerah, ko je delovanje zaščite potrebno, se lahko dogodi, da zaščita deluje (pravilno delovanje), ali pa da ne deluje (izostalo delovanje). Nepotrebna in izostala delovanja zaščite so nepravilna delovanja.

Kvaliteto delovanja zaščite podajamo običajno s kakovostnim številom, ki je razmerje med številom pravih delovanj  $n_P$  in med številom potrebnih delovanj  $n_H$  in številom nepotrebnih delovanj  $n_D$  oz. med številom pravih in nepravilnih delovanj ( $n_H - n_P + n_D$ ):

$$f_k = \frac{n_P}{n_H + n_D} = \frac{n_P}{n_P + (n_H - n_P + n_D)} \quad (1.8)$$

Kvaliteta delovanja zaščite pa se izraža lahko tudi na druge načine:

- z razmerjem med pravih in potrebnih delovanj
- z razmerjem med potrebnih in med vsoto potrebnih in nepotrebnih delovanj
- s številom nepotrebnih delovanj na odklopnik v sistemu.

---

## **2. ZAŠČITNI RELEJI**

---

### **2.1. UVOD**

Najvažnejši in običajno najzahtevnejši člen zaščitnega sistema je zaščitni rele. Zaščitni rele lahko predstavlja le en rele, lahko je to relejni sestav z več releji in sestavnimi deli v enem okrovu. Pogosto pa predstavlja zaščitni rele tudi relejna skupina z več električno oz. mehansko povezanimi relejnimi sestavi.

### **2.2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE RELEJEV**

#### **2.2.1. Električni in neelektrični releji**

Rele, ki ga uporabljamo pri zaščiti, je lahko električen ali pa neelektričen. Pri električnih relejih dobimo trenutno spremembo v izhodnih električnih tokokrogih releja pri spremembi v električnih vhodnih tokokrogih, ki krmilijo delovanje releja. Pri neelektričnih relejih je vhod releja neelektričen, npr. Buchholz rele pri zaščiti transformatorja. Ker je velika večina relejev v zaščiti električnih, bomo zanje uporabljali kar ime rele. Le v kolikor rele ne bo električni, bomo zanj uporabljali ime neelektrični rele.

### **2.2.2. Elektromehanski in statični releji**

Glede na osnovni princip delovanja delimo releje v elektromehanske in v statične. Pri elektromehanskih relejih je logična konverzija izvedena s premikom mehanskih delov, povzročenim s tokovi v enem ali več vhodnih tokokrogih releja, ki delujejo na kontaktni stavek samega releja. Sami kontakti so del izhodnega tokokroga releja.

Pri statičnih relejih se izvaja konverzija brez mehanskega gibanja in to predvsem z elektronskimi elementi. Statični rele je na izhodni strani lahko tudi opremljen z elektromehanskim relejem, obstojajo pa tudi popolnoma statične izvedbe, ki pa so sorazmerno redke. Tako imamo statične releje z izhodnimi kontakti in pa izvedbe brez izhodnih kontaktov.

### **2.2.3. Stanja releja**

Stanja releja ločimo glede na napajanje, neodvisno od funkcije releja in pa glede na izhodne tokokroge, kar pa je povezano s funkcijo releja. Glede na napajanje ima lahko rele nevzbujeno in vzbujeno stanje. V nevzbujenem stanju ima običajno rele le eno možno stanje. Te releje imenujemo monostabilne releje. Lahko pa ima tudi dve možni stanji, t.j. bistabilni rele, ali pa celo več, npr. izbiralni rele.

Če je rele zadostno napajan, pritegne in pride v vzbujeno stanje. Za pritegnitev zadošča pri nepolariziranih relejih samo velikost vzbujalne oz. karakteristične veličine (pri merilnih relejih), pri polariziranih relejih pa je poleg velikosti potrebna še pravilna smer. Pri zmanjšanju oz. prekinitvi napajanja rele spusti in preide v nevzbujeno stanje.

Glede na funkcijo releja in na stanje v izhodnem tokokrogu je lahko rele v začetnem stanju. Pri maksimalnih relejih je to nevzbujeno stanje, pri minimalnih relejih pa je to začetno stanje vzbujeno stanje. Po delovanju preide rele v delovno stanje. Zadnjo fazo delovanja, ki je povezana z ustrezno spremembo v izhodnem tokokrogu, imenujemo stikanje. Po prenehanju delovanja se rele povrne v začetno stanje, pri čemer se imenuje prva faza povratno stikanje (dezangažiranje). V tej fazi se izhodni tokokrog povrne v izhodni položaj.

### **2.2.4. Tokokrogi releja**

Rele ima dve vrsti tokokrogov, vhodne in izhodne. Včasih pa ima še pomožne tokokroge. Število tokokrogov je različno. Vsak tokokrog ima praviloma svoje sponke, na katere so



priključeni deli tokokroga, ki so med sabo lahko povezani galvansko, kapacitivno ali pa induktivno.

Pri delovanju oz. pri povratku pride v izhodnih tokokrogih do sprememb. Ločimo dva tipa izhodnih tokokrogov, delovne in mirovne. Pri delovnem izhodnem tokokrogu je upornost v začetnem stanju izhodnega tokokroga visoka. Pri releju s kontakti delovni kontakt releja v tem stanju izhodni tokokrog prekinja. V delovnem stanju pa je pri tej vrsti izhodnega tokokroga upornost tokokroga nizka. Če je rele v delovnem stanju in je opremljen s kontakti, delovni kontakt sklepa izhodni tokokrog.

Pri mirovnem izhodnem tokokrogu pa so razmere obratne, nizka upornost izhodnega tokokroga v začetnem stanju in visoka upornost tega tokokroga v delovnem stanju.

### **2.2.5. Stikalni in merilni releji**

Glede na točnost delovanja oz. popustitve delimo releje v stikalne in v merilne releje. Pri stikalnih relejih je predvideno, da je vhodna napajalna veličina ali večja od vrednosti, pri kateri rele deluje, ali pa je njena vrednost nič. Odtod tudi angleško oz. francosko ime za tak rele: vse ali nič rele (all-or-nothing relay, relais de tout ou rien).

Merilni rele ima ime svoje karakteristične veličine, ki karakterizira tudi njegovo delovanje. Merilni rele deluje, če doseže njegova karakteristična veličina delovno vrednost. Ta lahko odstopa od nastavljene vrednosti za vrednost, ki je določena s točnostjo releja.

Karakteristična veličina je lahko vhodna napajalna veličina, npr. tok oz. napetost, lahko pa se karakteristična veličina razlikuje od vhodne napajalne veličine. Pri frekvenčnem releju je npr. karakteristična veličina frekvenca, vhodna napajalna veličina pa napetost. Pri močnostnem releju je karakteristična veličina moč, vhodni napajalni veličini pa sta napetost in tok.

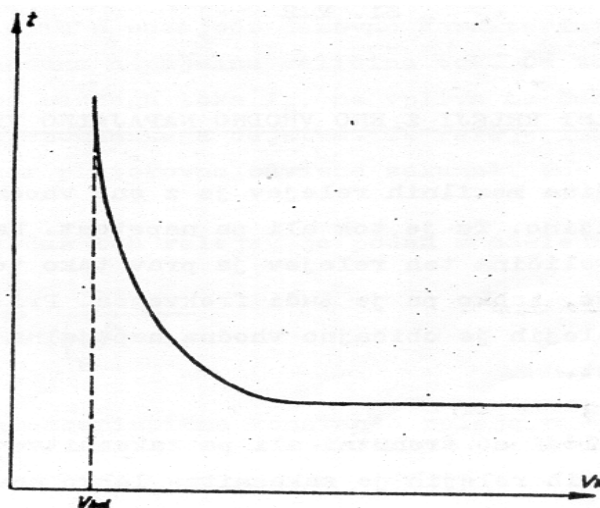
Pri merilnih relejih je nastavitvena vrednost releja običajno nastavljiva in to bodisi zvezno ali pa stopenjsko. Obseg nastavitve je definiran običajno že s samo izvedbo releja in pa s področjem predvidene uporabe. Pri merilnih relejih je pogosto važno razmerje med povratno in delovno vrednostjo, ki ga imenujemo povratno razmerje.

### **2.2.6. Delovni in povratni čas**

Časovni interval med trenutkom, ko na vhodni napajalni tokokrog trenutno priključimo določeno vrednost vhodne napajalne veličine (pri stikalnih relejih) oz. karakteristične veličine (pri merilnih relejih), ki naj povzroči, da rele deluje, in trenutkom, ko pride rele v delovno stanje,

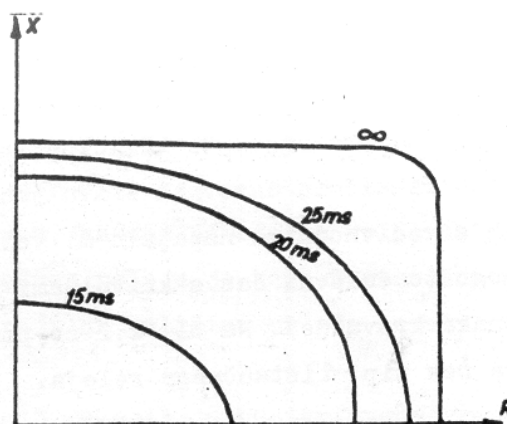
imenujemo delovni čas releja. Povratni čas pa je interval med trenutkom, ko trenutno priključimo določeno vrednost vzbujalne oz. karakteristične veličine, ki povzroči povratek releja, in med trenutkom, ko se rele povrne.

Releje brez namerne zakasnitve imenujemo trenutne releje, z namerno zakasnitvijo pa zakasnitvene releje. Trenutne stikalne releje imenujemo pomožni releji.



Sl. 2.1

Pri stikalnih relejih je namerna zakasnitev običajno neodvisne od vhodne napajalne veličine in je nastavljiva. Take releje imenujemo časovni releji.



Sl. 2.2

Delovni čas trenutnih relejev z eno vhodno napajalno veličino  $V_k$  pada z večanjem te veličine, potek pa dobimo v karakterističnih časovnih krivuljah (Sl. 2.1). Pri relejih z več vhodnimi napajalnimi veličinami pa podajamo pogosto delovni čas s krivuljami istega časa (isohronske krivulje). Na sl. 2.2 so podane te krivulje za nek tip distančnega releja.

## 2.3. MERILNI RELEJI Z ENO VHODNO NAPAVALNO VELIČINO

Velika večina merilnih relejev je z eno vhodno napajalno veličino. Ta je tok ali pa napetost. Karakteristična veličina teh relejev je prav tako tok ali pa napetost, lahko pa je tudi frekvenca. Pri frekvenčnih relejih je običajno vhodna napajalna veličina napetost.

Merilni releji so trenutni ali pa zakasnitveni. Pri zakasnitvenih relejih je zakasnitev lahko neodvisna od velikosti karakteristične veličine (releji z neodvisno zakasnitvijo), lahko pa se spreminja z vrednostjo karakteristične veličine (odvisni zakasnitveni releji). Pri relejih z neodvisno zakasnitvijo običajno deluje merilni rele na časovni rele.

### 2.3.1. Odvisni zakasnitveni releji

Pri vseh ostalih relejih nastavljamemo mejno vrednost, pri kateri rele deluje. pri teh relejih nastavljamemo mejno vrednost, pri kateri rele ne sme delovati. To vrednost karakteristične veličine imenujemo bazna nastavitev.

Pri odvisnih zakasnitvenih relejih lahko z večanjem karakteristične veličine delovni čas pada ali pa raste. Pri relejih s padajočo časovno karakteristiko je običajno vhodna napajalna veličina tok. Če tok, ki je nižji od baznega toka  $I_B$ , ne vpliva na čas, je to rele brez spominskega dejstva. Te releje imenujemo običajno kar pretokovne odvisne zakasnitvene releje.

Delovni čas teh relejev je podan z naslednjo enačbo:

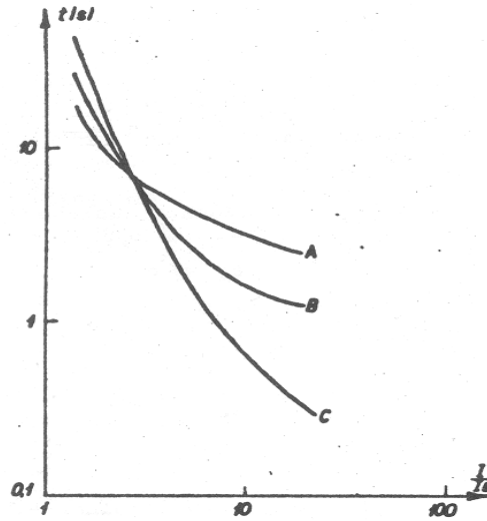
$$t = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_B}\right)^\alpha - 1} \quad (2.1)$$

$k$  je karakteristična konstanta releja,  $\alpha$  je indeks funkcije.

Uporabljamo tri tipe teh relejev in sicer tip A (standardno inverzni rele) (sl. 2.3). Vrednosti indeksov in konstant  $k$  so podane v tabeli (L. 28).

Nadtokovne odvisne zakasnitvene releje s spominskim dejstvom imenujemo termični releji. Delovni čas teh relejev je namreč odvisen tudi od vrednosti toka obremenitve  $I_p$ , preden je bila prekoračena bazna vrednost toka.

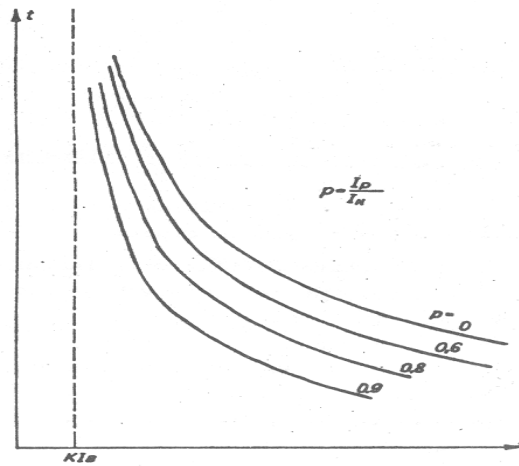
Tip releja:	A	B	C
Območje indeksa $\alpha$	$\alpha \leq 0,5$	$0,5 < \alpha < 1,5$	$\alpha \geq 1,5$
Standardne vrednosti indeksa $\alpha$	0,02	1	2
Konstante k	0,14 s	13,5 s	80 s



Sl. 2.3

Delovni čas teh relejev je (sl. 2.4):

$$t = \tau \ln \frac{I^2 - I_p^2}{I^2 - (k * I_B)^2} \quad (2.2)$$



Sl. 2.4

$\tau$  je časovna konstanta releja, ki je pri mehanskih relejih podana z izvedbo, pri statičnih pa je nastavljiva,  $k$  pa je konstanta releja. Pri relejih z rastočo časovno karakteristiko je karakteristična veličina običajno napetost. Te releje uporabljamo pri podnapetostni zaščiti, kjer se čas izklopa zaščite zmanjšuje z zmanjševanjem napetosti.

Teoretični delovni čas podnapetostnih relejev je podan z naslednjo enačbo:

$$t = k \frac{(U : U_B)^\alpha}{1 - (U : U_B)^\alpha} \quad (2.3)$$

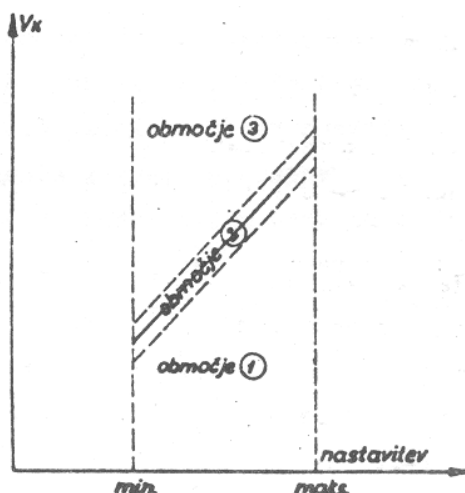
### 2.3.2. Območja vrednosti karakteristične veličine

Vrednost karakteristične veličine merilnega releja se nahaja lahko v 6 območjih in sicer:

1. Območje, ko karakteristična veličina ni dovolj velika, da bi rele prešel iz nevzbujenega v vzbujeno stanje
2. Območje, v katerem pride do pritegnitve releja
3. Območje, ko je vrednost karakteristične veličine dovolj visoka, da je rele v vzbujenem stanju
4. Območje, ko rele ostane v vzbujenem stanju, čeprav je karakteristična veličina nekoliko nižja kot v 3. področju
5. Območje, v katerem pride do spustitve releja in
6. Območje, ko je rele v nevzbujenem stanju.

### 2.3.3. Maksimalni in minimalni releji

V zaščiti uporabljamo predvsem maksimalne in pa minimalne releje. Pri maksimalnih relejih je vzbujeno stanje releja tudi delovno stanje. Za označbo teh relejev uporabljamo prefiks pre- oz. nad- kot npr. nadtokovni, nadfrekvenčni rele. Pri teh relejih se nahaja nastavitvena vrednost karakteristične veličine v 2. območju. Širina območja je podana s točnostjo releja. Pri minimalnih relejih je nevzbujeno stanje releja delovno stanje. Pri teh relejih uporabljamo prefiks pod kot npr. podimpedančni rele. Nastavitvena vrednost karakteristične veličine se nahaja v 5. področju, katerega širina je prav tako podana s točnostjo.



Sl. 2.5

V nadaljevanju bomo obravnavali le delovna območja, začetna oz. nedelovna območja in pa nedefinirana območja karakteristične veličine, ki se nahajajo med delovnimi in nedelovnimi območji, pri maksimalnih relejih torej le 1., 2. in 3. območje, pri minimalnih relejih pa le 4., 5. in 6. območje. Pri relejih z eno vhodno napajalno veličino, ki je karakteristična veličina, podajamo tako imenovano delovno karakteristiko releja v grafičnem prikazu. Ta daje vsa tri omenjena območja karakteristične veličine v odvisnosti od vrednosti nastavitvev (sl. 2.5).

## 2.4. MERILNI RELEJI Z VEČ VHODNIH NAPAJSALNIH VELIČIN

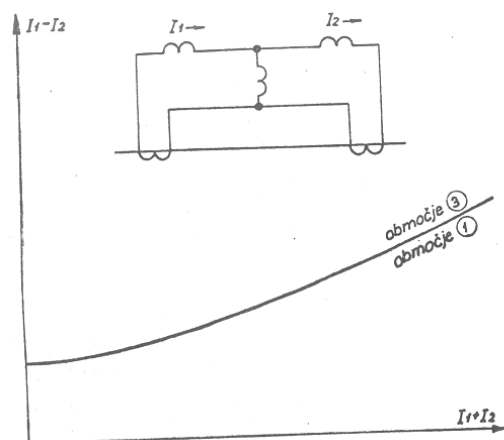
V zaščiti uporabljamo številne releje z dvema vhodnima napajalnima veličinama, ki sta npr. tok in napetost (pri uporovnih, smernih in močnostnih relejih) ali pa dva tokova (pri stabiliziranih diferenčnih relejih). Nastavitvena vrednost karakteristične veličine teh relejev je podana s tremi vrednostmi n.nr. z obema efektivnima vrednostima vhodnih napajalnih veličin in s fazno razliko med njima ali pa z eno efektivno vrednostjo, kvocientom ali pa produktom obeh efektivnih vrednosti in s fazno razliko med njima. Vzemimo, da je nastavitvena vrednost enaka delovni vrednosti in da zato ni nedefiniranega 2. območja. Zato lahko pri določeni nastavitvi karakteristične veličine  $V_k$  podamo krivuljo, ki loči delovno in nedelovno območje, z matematičnim izrazom (npr.  $U \cdot I \cdot \cos \varphi = V_k$ ), lahko jo podamo v x-y koordinatah (npr.  $U = f(I)$ ) in to za razne vrednosti faznega kota  $\varphi$ ) ali pa v polarnih koordinatah (npr.  $U = f(\varphi)$  in to za razne vrednosti toka I).

Nastavitvena vrednost pa je pri določenih tipih relejev podana enostavneje, pri impedančnem releju je npr. lahko delovanje neodvisno od faznega kota. V določenem območju toka je pri tem releju delovanje odvisno le od razmerja med vrednostima napetosti in toka. V tem primeru je torej lahko podana nastavitvena vrednost le z enim podatkom, namreč z omenjenim razmerjem.

V matematičnem izrazu, ki določa delovno območje releja, lahko nastopata vhodni napajalni veličini v števcu in imenovalcu ulomka. Te releje imenujemo kvocientne releje. Kvocientne releje uporabljamo pri zaščiti predvsem kot stabilizirane diferenčne in kot uporovne releje. Lahko pa je v matematičnem izrazu tudi produkt vhodnih veličin npr. pri močnostnih relejih.

### 2.4.1. Stabilizirani diferenčni releji

Diferenčna zaščita deluje, če razlika tokov v dovodu  $I_1$  in tokov v odvodu  $I_2$  prekorači nastavljeno vrednost, kar je kriterij za nastop toka okvare v zaščitenem območju. Delovno karakteristiko stabiliziranih diferenčnih relejev običajno podajmo v koordinatah, kjer je bscisa zadrževalna veličina npr.  $I_1 + I_2$ , ordinata pa je delovna veličina npr.  $I_1 - I_2$  (sl. 2.6). Pri diferenčnih zaščitah predpostavljamo, da sta tokova lahko le v fazi ali pa v protifazi.



Sl. 2.6

### 2.4.2. Uporovni releji

Uporovne releje uporabljamo v zaščiti predvsem tam, kjer se pri okvari npr. pri kratkem stiku med vodniki zmanjša upornost, merjena v relejni točki. Zato za te minimalne releje običajno

ne uporabljamo prefiksa pod- kot npr. impedančni rele, čeprav deluje, ko impedanca pade pod nastavljeno vrednost. Delovne karakteristike za posamezne nastavitve podajamo običajno v R – X ravnini, ki je superponirana polarnim koordinatam.

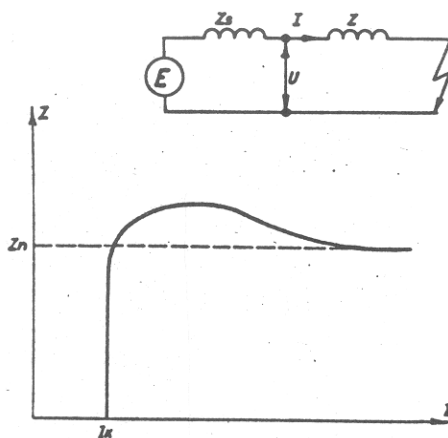
Pri polarnih koordinatah vzamemo kot eno koordinato kvocient med napetostjo in tokom, kot drugo na kot, ki ga oklepata. S tem dobimo že upornost tokokroga, ki ga nadzira zaščitni rele v relejni točki. Če vzamemo tok  $I$  kot referenčno veličino v smeri abscise, dobimo v smeri te osi že vrednosti resistance  $R$  tokokroga, v smeri ordinate pa vrednosti reaktance  $X$ .

Poleg omenjenega kvocienta pa vpliva v določenih območjih obeh vhodnih napajalnih veličin na delovanje še en parameter. Tega običajno izbiramo med tremi možnostmi: tok  $I$ , napetost  $U$  ali pa nadomestna impedanca izvora  $Z_s$ . Če vzamemo impedanco  $Z_s$ , predpostavljamo, da je nadomestna elektromotorna sila  $E$  konstantna.

Pri pregledu uporovnih relejev bomo na tem mestu obravnavali le tri osnovne tipe in sicer impedančne releje, ohmskeke releje in mho releje.

### 2.4.2.1. Impedančni releji

Impedančni rele je najenostavnejši uporovni rele. V R – X ravnini je pri nastavitvi delovna karakteristika krog z središčem(izhodiščem) v koordinatnem izhodišču. Območje delovanja je znotraj kroga. Seveda velja delovna karakteristika le, če je tok (oz. napetost ali pa impedanca izvora  $Z$ ) znotraj določenega območja. Na sl. 2.7 pa je prikazana delovna karakteristika v odvisnosti od toka. Kot sledi iz slike, delovna impedanca pada, če pade tok pod neko vrednost. S tem se tudi ustrezno manjša krog v R - X ravnini, ko preide pri toku, manjšem od  $I_k$ , v točko.

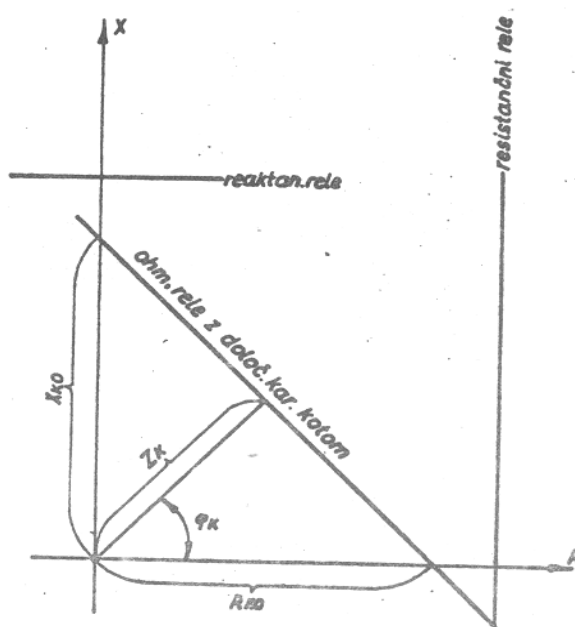


Sl. 2.7



### 2.4.2.2. Ohmski releji

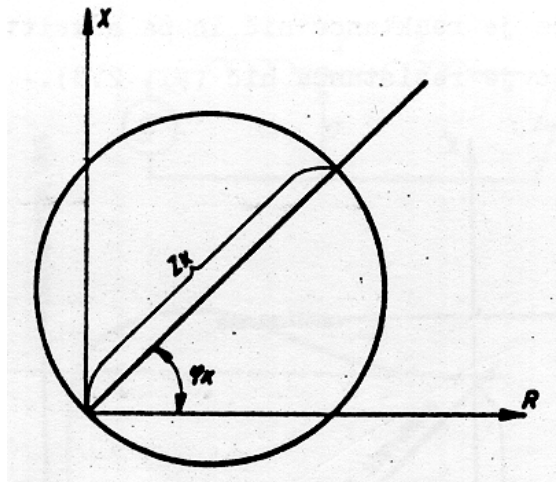
Pri ohmskih relejih loči v  $R - X$  ravnini območje delovanja od območja nedelovanja premica. Minimalno upornost, pri kateri rele deluje, imenujemo karakteristična upornost  $Z_k$ , kot, ki ga oklepa z absciso, pa karakteristični kot  $\varphi_k$ . Najpogosteje uporabljamo reaktančne releje, kjer je karakteristična upornost reaktanca, kot  $\varphi_k$  pa je  $90^\circ$ . Resistanca v tokokrogu na delovanje releja sploh ne vpliva. Redkeje uporabljamo resistančne releje, kjer pa je karakteristična upornost rezistanca, kot  $\varphi_k$  je pa  $0^\circ$ . Pogosto pa uporabljamo tudi releje z drugimi karakterističnimi koti (ohmski rele z določenim karakterističnim kotom). Te releje včasih označujemo tudi s kritično rezistanco  $R_{ko}$ , če je reaktanca nič in pa s kritično reaktanco  $X_{ko}$ , če je rezistanca nič (sl. 2.8).



Sl. 2.8

### 2.4.2.3. Mho releji

Mho, kar čitamo obratno ohm, je stara enota za prevodnost, ki jo danes imenujemo siemens, releji imajo delovno karakteristiko daljico v prevodnostni,  $G - B$  ravnini, ki jo označujemo tudi  $1:R - 1:X$  ravnina. V  $R - X$  ravnini pa je njihova delovna karakteristika krog, ki gre skozi koordinatno izhodišče. Tudi ti releji imajo karakteristično upornost  $Z_k$ , ki je najvišja upornost v delovni karakteristiki. Napram abscisi je nagnjena za karakteristični kot  $\varphi_k$  (sl. 2.9).

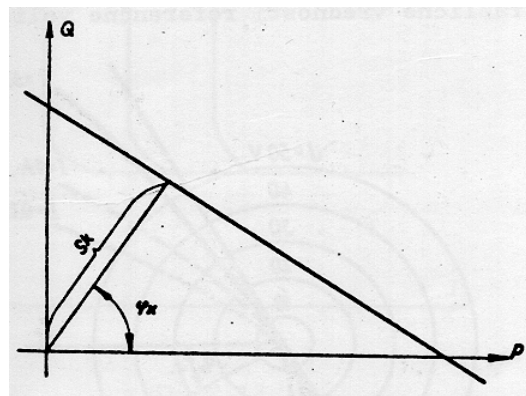


Sl. 2.9

Tudi tu uporabljamo dve posebni izvedbi. Če se nahaja središče kroga na abscisi, je to konduktančni rele, če pa na ordinati, je pa susceptančni rele ( $\varphi_k = 90^\circ$ ).

### 2.4.3. Močnostni releji

Enofazne močnostne releje uporabljamo tako kot releje na minimalno kot tudi na maksimalno moč. Uporaba teh relejev ni posebno razširjena. Delovno karakteristiko podajamo običajno v P - Q koordinatah, ki so superponirane polarnim koordinatam. Pri polarnih koordinatah uporabljamo kot eno koordinato produkt efektivnih vrednosti toka in napetosti, kot drugo koordinato pa kot med njima. Če vzamemo kot referenčno veličino tok, dobimo na abscisi že delovne moči P, na ordinati pa jalove moči Q.

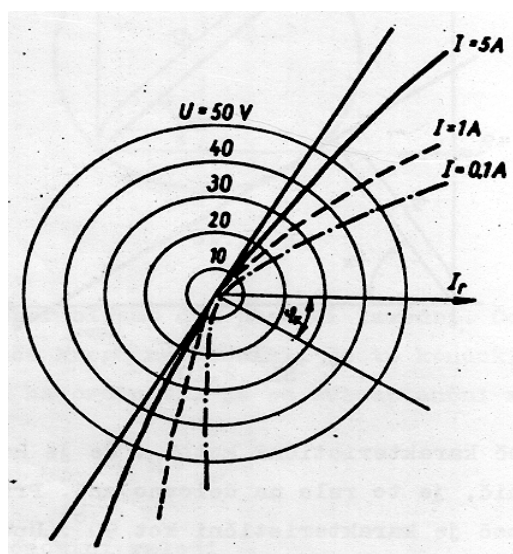


Sl.2.10

Teoretična delovna karakteristika je premica. Najmanjša moč, potrebna za delovanje, se imenuje karakteristična moč  $S_k$  (sl. 2.10). Z absciso oklepa karakteristična moč karakteristični kot  $\varphi_k$ . Če je karakteristični kot nič, je to rele na delovno moč. Pri releju na jalovo moč je karakteristični kot  $90^\circ$ . Uporabljamo pa tudi releje s karakterističnimi koti  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  in  $60^\circ$ . Če je kot  $180^\circ$ , je na povratno moč.

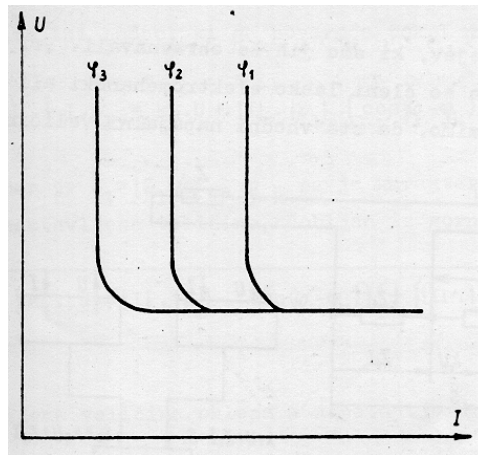
#### 2.4.4. Smerni releji

Smerne releje uporabljamo v zaščiti pogosto in to predvsem v kombinaciji z drugimi merilnimi releji. Delovne karakteristike podajamo običajno v polarnih kordinatah, pri čemer vzamemo eno vhodno napajalno veličino kot referenčno. Vrednost druge vhodne napajalne veličine je ena koordinata, druga koordinata pa je kot med njima. Kot, pri katerem je rele najbolj občutljiv, je karakteristični kot  $\varphi_k$ . Na sliki 2.11 je podana delovna karakteristika releja za tri različne vrednosti referenčne veličine.



Sl. 2.11

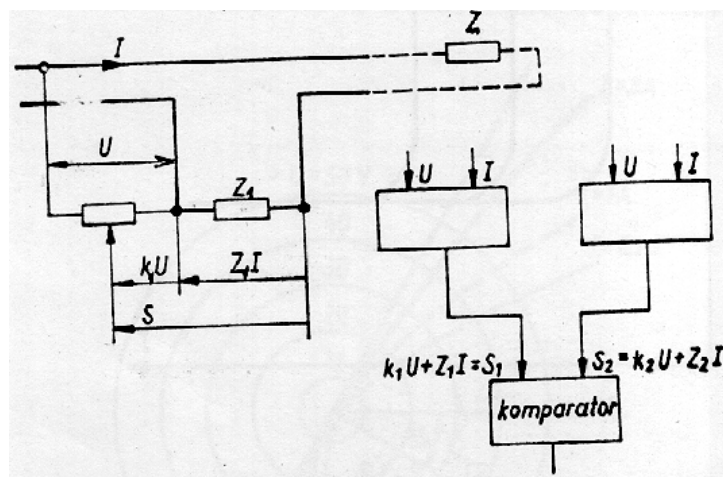
Včasih podajamo delovno karakteristiko za posamezne kote med vhodnima veličinama tudi v diagramu, kjer je abscisa referenčna vhodna napajalna veličina, ordinata pa druga vhodna napajalna veličina (sl. 2.12).



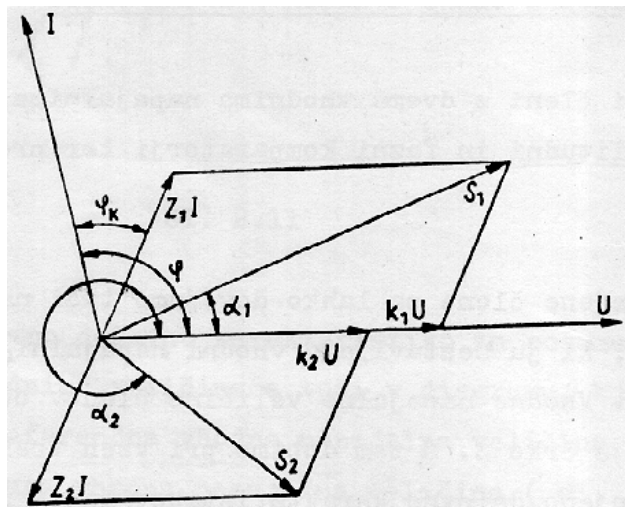
Sl. 2.12

## 2.5. MERILNI ČASI S SESTAVLJENIMMI VHODI

Osnovni členi z dvema vhodnima napajalnima veličinama so amplitudni in fazni komparatorji ter produktni členi. Na omenjene člene pa lahko dovajamo tudi napajalni veličini, ki ju sestavljata vhodni napajalni veličini releja. Vhodne napajalne veličine členov bomo označevali s črko S. S tem dobimo pri vseh treh členih spremenjeno delovno karakteristiko. Na ta način lahko uporabimo vse tri omenjene člene tako kot fazne kot tudi amplitudne komparatorje. Poleg tega pa omogočajo izvedbo različnih delovnih karakteristik uporovnih relejev, ki smo jih že obravnavali. Pri tem naj omenimo, da so členi lahko elektromehanski ali pa statični. Vzemimo, da sta vhodni napajalni veličini releja napetost  $U$  in tok  $I$  (sl. 2.13).



Sl. 2.13



Sl. 2.14

Sestavljena veličina  $S_1$  ima dve komponenti in sicer napetost  $k_1 \cdot U$ , ko jo dobimo na napetostnem delilniku, in pa napetostni padec, ki ga povzroča tok  $I$  na upor  $Z_1$ :

$$S = k_1 \cdot U + I \cdot Z_1 = k_1 \cdot U + |I| \cdot |Z_1| \cdot [\cos(\varphi - \varphi_k) + j \cdot \sin(\varphi - \varphi_k)] \quad (2.4)$$

pri čemer je  $Z_1 = |Z_1| \angle \varphi_k$ ,  $\varphi_k$  pa je karakteristični kot. Iznos sestavljene veličine, dobljen iz gornje enačbe je:

$$|S_1| = \sqrt{[k_1 \cdot |U| + |I| \cdot |Z_1| \cdot \cos(\varphi - \varphi_k)]^2 + [|I| \cdot |Z_1| \cdot \sin(\varphi - \varphi_k)]^2} \quad (2.5)$$

Sestavljena veličina oklepa z napetostjo  $U$  kot  $\alpha_1$ :

$$\alpha = \arctg \frac{|I| \cdot |Z_1| \cdot \sin(\varphi - \varphi_k)}{k_1 \cdot |U| + |I| \cdot |Z_1| \cdot \cos(\varphi - \varphi_k)} \quad (2.6)$$

V nadaljevanju bomo z indeksom 1 označevali prvo sestavljeno veličino in njene komponente, z indeksom 2 pa drugo sestavljeno veličino in njene komponente (Sl.2.14).

### 2.5.1. Amplitudni komparator s sestavljenimi vhodi

Pri amplitudnem komparatorju je pogoj za delovno karakteristiko, ki loči območje delovanja in nedelovanja, da sta iznosa obeh sestavljenih veličin enaka:

$$|S_1| = |S_2| \quad \text{ali} \quad S_1^2 - S_2^2 = 0 \quad (2.7)$$

Če izračunamo iznosa  $|S_1|$  in  $|S_2|$  in obe vrednosti vstavimo v gornjo enačbo, dobimo delovno karakteristiko:

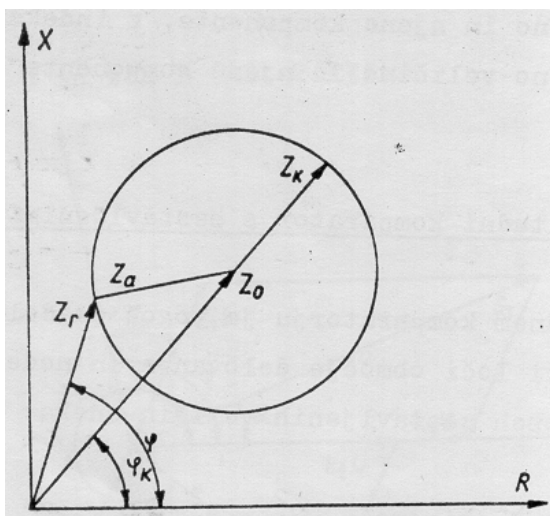
$$(k_1^2 - k_2^2) * U^2 - 2(k_2 * |Z_2| - k_1 * |Z_1|) * |U| * |I| * \cos(\varphi - \varphi_k) + I^2 * (Z_1^2 - Z_2^2) = 0 \quad (2.8)$$

Če enačbo delimo z  $(k_1^2 - k_2^2) * I^2$ , dobimo:

$$\left(\frac{U}{I}\right)^2 - 2 * \frac{k_2 |Z_2| - k_1 |Z_1|}{k_1^2 - k_2^2} * \frac{|U|}{|I|} * \cos(\varphi - \varphi_k) + \frac{Z_1^2 - Z_2^2}{k_1^2 - k_2^2} = 0 \quad (2.9)$$

Kot sledi iz enačbe 2.9 je splošna delovna karakteristika amplitudnega komparatorja krog v  $R - X$  ravnini. Če označimo mejni kvocient napetosti  $U$  in toka  $I$  z impedanco  $Z_r$ , oddaljenost središča kroga od koordinatnega izhodišča z  $Z_o$  in polmer kroga z  $Z_a$ , je enačba za delovno območje releja (sl. 2.15):

$$Z_r^2 - 2 * |Z_o| * |Z_r| * \cos(\varphi - \varphi_k) + Z_o^2 - Z_a^2 = 0 \quad (2.10)$$



Sl. 2.15

Iz enačb 2.9 in 2.10 dobimo oddaljenost središča kroga od koordinatnega izhodišča  $Z_o$ :

$$Z_o = \frac{k_1 |Z_1| - k_2 |Z_2|}{k_1^2 - k_2^2} < \varphi_k \quad (2.11)$$

Polmer kroga  $Z_a$  dobimo iz enačb 2.9, 2.10 in 2.11:

$$|Z_a| = \frac{k_1|Z_2| - k_2|Z_1|}{k_1^2 - k_2^2} \quad (2.12)$$

Vrednost karakteristične impendace releja  $Z_k$  pa je:

$$|Z_k| = |Z_a| + |Z_o| = \frac{|Z_2| + |Z_1|}{k_1 + k_2} \quad (3)$$

Iz gornjega lahko izračunamo za željeno obliko delovne karakteristike vrednosti koeficientov  $k_1$  in  $k_2$  oz. impedanc  $Z_1$  in  $Z_2$ .

Če npr. želimo ohmski rele, ki ima polmer kroga neskončno velik, lahko vzamemo naslednje vrednosti koeficientov oz. impedanc:  $k_1 = k_2$ ;  $Z_1 = 2k_2 * Z_k$ ;  $Z_2 = 0$ .

Iz amplitudnega komparatorja dobimo tudi smerni rele, oz. fazni komparator ( $k_1 = k_2$ ;  $Z_1 = -Z_2$ ).

### 2.5.2. Fazni komparator s sestavljenimi vhodi

Pri faznem komparatorju dobimo največjo občutljivost, če sta  $S_1$  in  $S_2$  v fazi. Meja delovnega območja je določena s pravim kotom med  $S_1$  in  $S_2$ :  $(\alpha_1 - \alpha_2) = \pm 90^\circ$ . Ker je  $\text{tg } 90^\circ = \infty$ , dobimo

$$\text{tg}(\alpha_1 - \alpha_2) = \frac{\text{tg}\alpha_1 - \text{tg}\alpha_2}{1 - \text{tg}\alpha_1 * \text{tg}\alpha_2} = \infty \quad (2.14)$$

Iz tega sledi, da je izraz  $(\text{tg}\alpha_1 * \text{tg}\alpha_2)$  enak nič, iz tega pa dobimo:

$$\text{tg}\alpha_1 = -\frac{1}{\text{tg}\alpha_2} \quad (2.15)$$

Če vstavimo za  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  ustrezne velikosti iz gornje enačbe za  $\alpha$  in če zopet vstavimo za  $(|U| : |I|)$  impedanco  $Z_r$ , dobimo v R – X ravnini za delovno karakteristiko zopet krog (sl. 2.15).

Polmer kroga  $Z_a$  je :

$$Z_a = \frac{k_1 Z_2 - k_2 Z_1}{2k_1 Z_2} \quad (2.16)$$

Oddaljenost središča kroga od koordinatnega izhodišča  $Z_o$  je :

$$Z_o = \frac{k_1 Z_2 + k_2 Z_1}{2k_1 Z_2} \quad (2.17)$$

Karakteristična impedanca  $Z_k$  pa je:

$$Z_k = \frac{Z_2}{2k_2} \quad (2.18)$$

S faznim komparatorjem s sestavljenimi vhodi dobimo lahko ohmski in mho rele, lahko pa tudi impedančni rele oz. amplitudni komparator.

### 2.5.3. Produktni člen s sestavljenimi vhodi

Produktni člen lahko uporabimo tudi kot fazni komparator. Če ga pa napajamo z  $(k_1 * U + I * Z_1)$  oziroma z  $(k_2 * U + I * Z_2)$ , dobimo v primeru, da vzamemo  $k_1 = k_2$  in  $Z_1 = -Z_2$  pozitiven produkt le, če je  $k_1 * U \geq I * Z_1$ , torej deluje kot amplitudni komparator.

### 2.5.4. Merilni členi z dvakrat sestavljenimi vhodi

Če uporabimo namesto enkratnega sestavljanja napajalnih veličin dvakratno sestavljanje, dobimo namesto krogov in premic elipse, hiperbole oz. parabole.

## 2.6. ELEKTROMEHANSKE IZVEDBE MERILNIH RELEJEV

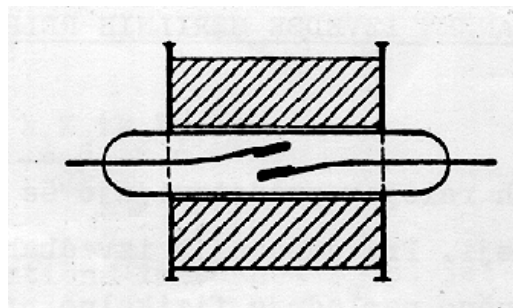
Večino zaščitnih relejev predstavljajo še vedno elektromehanski releji. Pri današnjih izvedbah uporabljamo skoraj izključno naslednje fizikalne principe delovanja: elektromagnetni, magnetoelektrični, indukcijski in termični princip.

Elektromehanski releji imajo pomične in nepomične dele. Silo na pomične dele povzroča karakteristična veličina. Če je ta večja od nastavljive mehanske sile, rele deluje. Obvezni del releja je kontaktni stavek, ki ima običajno svoj pomični in svoj nepomični del. Ker imajo merilni releji običajno le po en kontakt s sorazmerno nizko stikalno zmogljivostjo, uporabljamo običajno še izhodne pomožne releje z večjim številom kontaktov in z večjo stikalno zmogljivostjo.

Če je potrebno hitro delovanje zaščite, je potrebno, da dalujeta hitro tako merilni rele kot tudi njegov pomožni rele. Ker je delovni čas običajnih pomožnih relejev ca 15 ms uporabljamo v tem primeru posebno hitre releje z delovnim časom ca 1 ms.



Od hitrih pomožnih relejev naj omenimo jezičkovno releje (v angleščini reed relay)(sl. 2.16). Ti releji nimajo niti magnetnega jedra, niti magnetne kotve, le kontaktne lamele so iz mehkomagnetnega materiala. Kontaktne lamele so zaprte v steklenih cevkah z internim plinom. Te cevke imenujemo zato hermetični kontaktniki. Navitje releja objema enega ali pa tudi več kontaktnikov. Delovni čas reed relejev je izpod 1 ms.

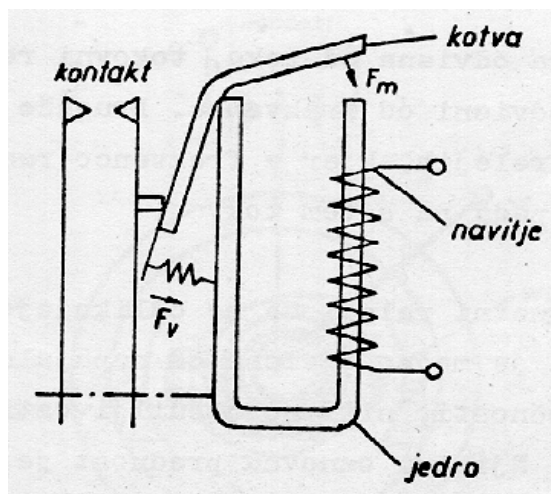


Sl. 2.16 Jezičkovni rele

Elektromehanski releji za svoje delovanje ne potrebujejo pomožne napajalne veličine, kar je prednost teh relejev pred statičnimi izvedbami relejev.

### 2.6.1. Elektromagnetni releji

Elektromagnetni del releja sestavljata navitje s feromagnetnim jedrom in kotva, ki predstavlja gibljivi elektromagnetni del (sl. 2.17).



Sl.2.17

Pri napajanju releja dobimo silo  $F_m$  med obema feromagnetnima deloma. Če je moment, ki ga povzroča sila  $F_m$  večji od momenta nastavljive sile vzmeti  $F_v$ , kotva pritegne, kontakt pa se sklene. Zaradi kvadratične odvisnosti med napajalnim tokom in silo dobimo pri izmeničnem toku silo, ki ima poleg enosmerne komponente še komponento, ki niha z dvojno frekvenco.

Elektromagnetne merilne releje uporabljamo danes pretežno kot nadtokovne releje za izmenični tok. Pri teh relejih namreč brnenje zaradi izmenične komponente sile ni v normalnem obratovanju posebno izrazito. Bistveno bolj pa brnijo v normalnih pogojih podnapetostni, prenapetostni in podtokovni releji in jih zato vse manj uporabljamo v tej izvedbi. V preteklosti so se elektromagnetni releji uporabljali tudi kot balančni releji in sicer kot stabilizirani diferenčni in uporovni rele in to v enofazni kot tudi v trifazni izvedbi.

Ker je sila odvisna od toka, tokovni releji v glavnem niso odvisni od frekvence. Drugače pa je pri napetostnih relejih, kjer s frekvenco raste induktivna upornost, pada pa s tem tok.

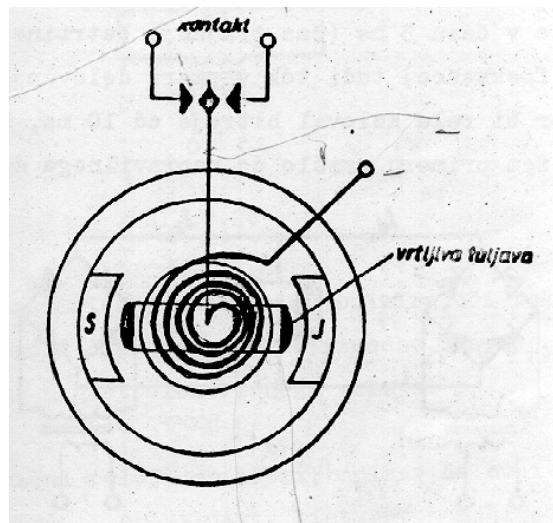
Elektromagnetni releji se ne odlikujejo niti po hitrosti, ki je močno odvisna od napajalne veličine, niti po točnosti, niti po občutljivosti, niti po mali porabi. Njihova osnovna prednost je, da so enostavni in robustni in zato sorazmerno poceni in neobčutljivi na motnje, ki jih povzročajo prehodni pojavi v visokonapetostnem omrežju.

Kot primer elektromagnetnega releja omenimo nadtokovni rele tipa IR 2 proizvodnje ISKRA. Poraba releja pri toku spodnje nastavitve je 2,5 VA. Delovni čas je pri 2-kratnem toku nastavitve ca 20 ms. Povratno razmerje releja je iznad 0,85.

## 2.6.2. Magnetoelektrični releji

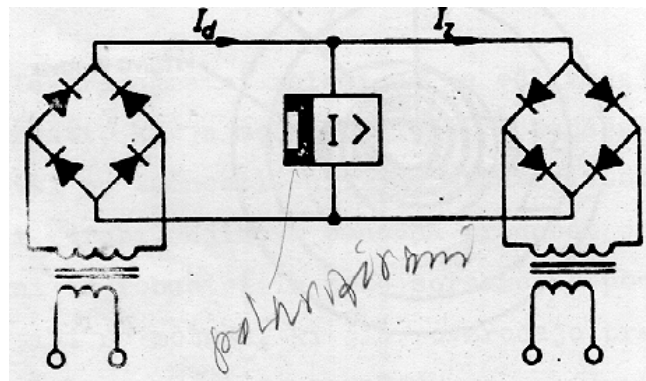
Pri teh relejih predstavlja gibljivi del tuljava, povezana s kontaktnim stavkom. Tuljeva se nahaja v magnetnem polju, ki ga ustvarja permanentni magnet. Rele je zato polariziran in deluje na enosmerni tok. Zato jih v zaščiti uporabljamo pretežno z usmerniki. Danes uporabljamo od magnetoelektričnih relejev pretežno releje z vrtljivo tuljavico (sl. 2.18).

Mehanski protimoment povzroča nastavljiva spiralna vzmet. Uporabljamo jih predvsem pri diferenčnih in uporovnih zaščitah, manj pa pri napetostnih in tokovnih zaščitah. Uporabljamo jih predvsem kot amplitudne in kot fazne komparatorje. Amplitudni komparator dobimo z magnetoelektričnim relejem in z dvema usmernikoma v mostični vezavi (sl. 2.19). Če sta delovni in zadrževalni tok v fazi, dobimo tok v smeri delovanja, ko je amplituda delovnega toka  $I_d$  večja od amplitude zadrževalnega toka  $I_z$ . Tok  $I_d - I_z$  je pulzirajoči.



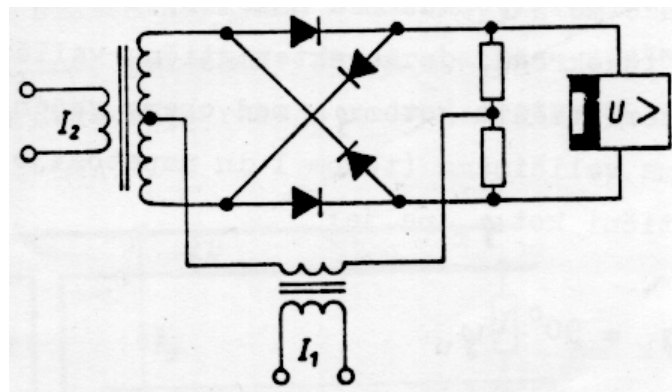
Sl. 2.18

Če pa sta tokova fazno premaknjena, dobimo dodatno še tok dvojne frekvence. Če sta tokova premaknjena za  $90^\circ$  in sta po velikosti enaka, je amplituda toka dvojne frekvence enaka amplitudi toka  $I_d$  oz.  $I_z$ , pulzirajočega toka pa v tem primeru ni. Zato teče v času 5 ms (čas trajanja četrte periode osnovne frekvence) tudi tok v smeri delovanja releja. V kolikor bi rele deloval hitreje od 10 ms, bi zato lahko v tem primeru prišlo do nepravilnega delovanja.



Sl. 2.19

Fazni komparator omogoča vezava magnetoelektričnega releja z usmerniki, ki je podana na sl. 2.20. Če imata  $I_1$  in  $I_2$  isto smer, dobimo na releju pulzirajočo napetost pozitivne smeri. S faznim premikanjem tokov dobimo dodatno izmenično komponento napetosti dvojne frekvence. Pri premiku za  $90^\circ$  med obema tokovoma izgine pulzirajoča napetost, ostane pa izmenična napetost, ki pa ne sme povzročiti delovanja releja. Pri večanju kota med tokovoma preko  $90^\circ$  dobimo zopet pulzirajočo napetost, ki pa je sedaj usmerjena negativno.



Sl. 2.20

Ker deluje polarizirani rele le na pulzirajoči tok ene smeri, omogoča omenjena vezava izvedbo smernega releja z uporabo magnetoelektričnega releja.

Magnatoelektrični releji so hitri, njihov delovni čas je ca 20 ms, točni, občutljivi, bistveno manjši od elektromagnetnih izvedb. So pa od teh dražji in so tudi bolj občutljivi na zunanje motnje. Za delovanje potrebna moč je nizka, nekaj  $\mu W$ ! Krajše namenske časovne zakasnitve omogoča vgradnja kondenzatorja, vezanega paralelno z relejem.

### 2.6.3. Indukcijski releji

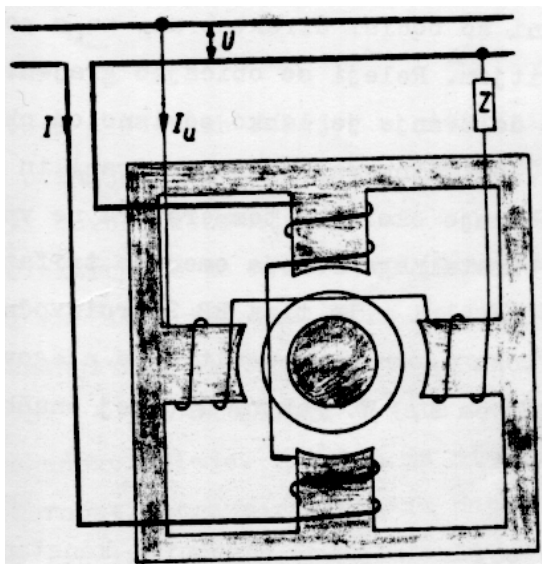
V gibljivih prevodnih delih releja dobimo kratkostične tokove, ki jih inducirajo izmenične vhodne napajalne veličine. Prevodni deli se nahajajo v izmeničnem magnetnem polju in zato dobimo nanje sile, sorazmerne karakteristični veličini releja. Običajno je ena vhodna napajalna veličina tok  $I$ , druga pa napetost  $U$ . Če označimo z  $\varphi_u$  kot med napetostjo  $U$  in tokom  $I_u$  v tem tokokrogu, je karakteristična veličina moč s karakterističnim kotom  $\varphi_k$  med obema vhodnima napajalnima veličinama (tokom  $I$  in napetostjo  $U$ ). Karakteristični kot  $\varphi_k$  pa je:

$$\varphi_k = 90^\circ - \varphi_u$$

Obstojata dve osnovni izvedbi indukcijskih relejev in sicer s prevodnim delom v obliki koluta in s prevodnim delom v obliki obroča oz. zvonca. Prva izvedba je podobna indukcijskemu števcu, le kolut je običajno večji. Pri tej izvedbi namerno odvisno zakasnitev. Karakteristična veličina je moč, pogosteje pa je izveden le za eno vhodno napajalno veličino kot tokovni oz. kot napetostni rele z inverzno zakasnitvijo. Če je moment, ki ga povzročajo tokovi v prevodnem gibljivem delu releja, večji od mehanskega protimomenta, ga povzroča nastavljiva vzmet, se premični del releja zasuče in s tem sklene kontakt releja.

Druga izvedba se običajno napaja s tokom in napetostjo in to kot močnostni rele (sl. 2.21), kot smerni rele in pa tudi kot uporovni rele. Kljub temu, da je sorazmerno velik in tudi drag, ga še vedno pogosto uporabljamo. Njegova prednost je predvsem neobčutljivost na prehodne pojave in na višje harmonske komponente v napetosti oz. toku. Je tudi točen, občutljiv in pa hiter.

Kot primer indukcijskega releja z obročastim gibljivim prevodnim delom omenimo rele FR 2 proizvodnje ISKRA. Če en sistem napajamo z nazivno vrednostjo tega sistema 25 VA, je za delovanje releja v drugem sistemu potrebna moč 0,2 mVA.



Sl. 2.21

#### 2.6.4. Termični releji

Pri termičnih elektromehanskih relejih povzročajo premik gibljivega dela kontaktne stavek z električnim tokom segrevani deli releja. Uporabljamo jih predvsem kot zaščito pred tokovnimi preobremenitvami.

Obstojata dve izvedbi in sicer termični rele s krajšimi časovnimi konstantami, za katerega običajno uporabljamo kar ime bimetalni rele in pa termični rele s krajšimi časovnimi konstantami, za katerega običajno uporabljamo kar ime bimetalni rele in pa termični rele z daljšimi časovnimi konstantami. Običajno uporabljamo ime termični rele le za to drugo izvedbo.

Bimetalni rele je sorazmerno enostaven in poceni, uporablja pa se predvsem za zaščito manjših in srednjih motorjev. Vsi ti releji imajo vgrajene posebne termobimetalne trakove, ki se pri temperaturi krivijo. Segrevani so bodisi direktno ali pa s posebnim grelnim navitjem. Releji so običajno grajeni trifazno. Njihovo delovanje je lahko odvisno od okoliške temperature, običajno

pa so kompenzirani in zato na njihovo delovanje okoliška temperatura ne vpliva. Kot primer bimetalnega releja omenimo trifazni kompenzirani bimetalni rele tipa RB 2 proizvodnje ISKRA. Pri baznem toku zgornje nastavitve je njegova poraba v eni fazi ca 1,3 W. Faktor  $\tau$  (glej enačbo 2.2) je ca 4 minute.

Termični releji z daljšimi časovnimi konstantami so sorazmerno zamotani in zato tudi dragi. V zadnjem času jih izpodrivajo statične izvedbe. Namenjeni pa so predvsem zaščiti velikih strojev in kablov.

## ***2.7. STATIČNI RELEJI***

Statični releji so se pričeli z uporabo elektronskih cevi in transduktorjev v zaščiti. Vendar uporaba teh elementov v glavnem ni prodrla v področje zaščite. Skoraj edino izjemo je predstavljala uporaba elektronskih cevi v zaščiti s fazno primerjavo. Tudi uvedba transistorjev kot diskretnih elementov ni prinesla pričakovanega razmaha statičnih relejev. Težave so nastopale predvsem v razvoju in v proizvodnji teh relejev. Seveda pa je prihajalo do težav tudi v obratovanju in to predvsem zaradi nezadostnega poznavanja motenj in pa zaradi pomožnega napajanja teh relejev.

Pri razvoju zaščitnih relejev s statičnimi komponentami je prihajalo do težav, ker obstoječi razvijalci niso bili dovolj seznanjeni z elektroniko, specialisti za elektroniko pa niso dovolj upoštevali specifičnosti zaščitne tehnike. Tako so skušali v prvi fazi le zamenjavati elektromehanske releje s tranzistorji, ki pa so jih nameščali v iste okrove kot prej elektromehanske releje. Pri tem pa niso posvečali dovolj pozornosti sorazmerno nizkim napetostim polprevodniške tehnike in medsebojnemu vplivom v samem okrovu. Tudi komponente so bile še nezanesljive, predvsem zaradi velikega števila vgrajenih komponent in pa zaradi neupoštevanja okoliških pogojev je bila pogosto zanesljivost celotnega releja nezadostna.

Do težav je prihajalo tudi v proizvodnji. Izredno pomembna je postala vhodna kontrola vseh vgrajenih komponent, kateri pa v začetku niso posvečali dovolj pozornosti. Do težav je prihajalo tudi v samem proizvodnem procesu. Ker se je montaža v začetku opravljala predvsem ročno, je prihajalo do vrste okvar, ki so se pogosto odkrivale šele v pogonu. Kontrola podsestavov kot tudi samih relejev je bila namreč v začetku tudi nezadostna. Poseben problem je bilo ročno spajkanje in pa izbira komponent.

Do dodatnih težav je prihajalo tudi v obratovanju. Tranzistorji so zelo občutljivi na kratkotrajne preobremenitve, predvsem na prenapetosti. Te preobremenitve niso povzročale težav elektromehanskim relejem. Zato so pričeli z intenzivnimi raziskavami prehodnih pojavov in prenapetosti v nizkonapetostnih vodih. Problem je bil tudi s pomožnim napajanjem relejev s

tranzistorji. Problem so reševali z manjšimi nizkovoltnimi akumulatorji in tudi z galvanskimi baterijami. Dovolj kvalitetnih pretvornikov enosmernih v enosmerne veličine (DC/DC pretvorniki) namreč se ni bilo.

Uvajanje tranzistorjev v tej fazi ni prineslo v zaščito nobenih bistvenih prednosti, prineslo pa je številne težave. Z uvedbo tranzistorjev niso bili doseženi niti krajši delovni časi, niti boljše delovne karakteristike, niti zmanjšanje dimenzij, niti zmanjšanje cene. V začetku je bila zanesljivost slabša kot pri elektromehanskih relejih. Dodatne težave pa je povzročalo še hitro menjavanje tipov in s tem povezan problem rezervnih delov.

Do bistvenih izboljšav statičnih relejev je prišlo z nastopom precej zanesljivih integriranih linearnih in logičnih vezij. Pozitivno so na razvoj statične zaščite vplivale tudi nove elektronske komponente kot FET, C/MOS, LOC MOS. Pričel je izginjati tudi prepad med razvijalci klasičnih elektromehanskih in razvijalci statičnih zaščit. Tako so pričele slabeti začetne slabosti statičnih zaščit in so začele prihajati do izraza njihove prednosti. Kmalu je prišlo do zamenjav okrovov. Klasične relejne okrove so pričeli zamenjevati paneli, ki so se že prej uvedli v telekomunikacijskih napravah.

Posamezni proizvajalci so razvili določeno število tipiziranih podsestavov, ki so omogočali večjo fleksibilnost in lažje projektiranje kompleksnejših zaščit. Podsestavi so predvsem vtične izvedbe in omogočajo lažjo montažo, preskušanje in pa tudi izmenjavo. Celotne zaščite posameznih delov omrežja, npr. celotna zaščita generatorja, so se pričele vgrajevati v skupne omare s paneli. Tak način je omogočal ločitev etaž z vhodnimi tokokrogovi od etaž z elektronsko opremo in od etaž z izhodnimi členi. S tem so se občutno zmanjšali kvarni vplivi med temi tokokrogovi, ki so pri statičnih relejih lahko še posebno neprijetni. V omare so se pričele vgrajevati skupno z zaščito tudi neke avtomatske naprave, povezane z delovanjem zaščite kot npr. naprave za avtomatski ponovni vklop in pa naprave za preskus zaščit.

Razčiščenje na področju kratkotrajnih napetosti so prinesli nedavno tega sprejeti IEC predpisi, ki določajo, kaj mora zdržati rele. Iz tega tudi sledi, da je treba izvesti zunanje povezave tako, da do releja ne pridejo napetosti višje od dopuščenih.

Do bistvenih zasukov je prišlo v sami proizvodnji. Prenehala je obrtniška proizvodnja, zamenjala pa jo je industrijska, precej avtomatizirana proizvodnja. Prišlo je do avtomatskega zbiranja ustreznih komponent, dalje do strojnega spajkanja kartic, ročno spajkanje pa so zamenjali novi postopki, predvsem spoji z ovito žico (wire-wrap). Posebna skrb se je pričela posvečati končni kontroli, v katero se v zadnjem času uspešno vključuje tudi računalnik, ki s svojo periferijo tudi izpisuje merilne protokole.

Do sprememb je prišlo tudi v obratovanju. Vzdrževalci in preskuševalci so dobivali dodatno znanje iz področja statičnih relejev. Z novim načinom proizvodnje, ko je kompletno ožičenje omar izvedeno v tovarni, sta se montaža in preskušanje močno poenostavili. Vgrajene

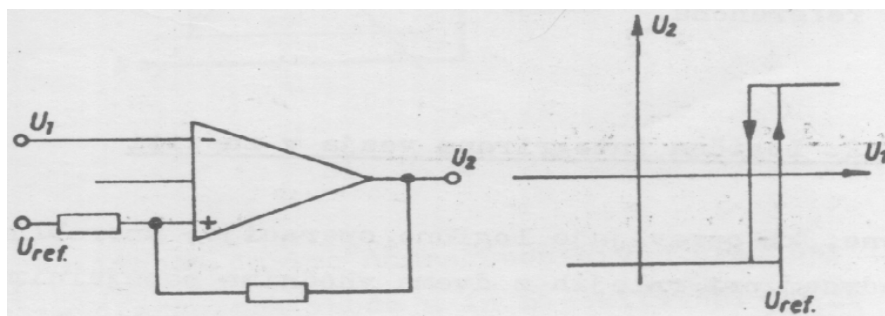
naprave za preskušanje zaščite oz. naprave za sprotno javljanje okvar v zaščitnem sistemu bistveno poboljšujejo zanesljivost zaščite.

### 2.7.1. Linearna integrirana vezja v zaščiti

Kot že omenjeno, se v statičnih zaščitah vse pogosteje uporabljajo integrirana linearna vezja in to predvsem operacijski ojačevalniki. Ti so bili izdelani v začetku še z diskretnimi komponentami za analogne računalnike in sicer kot ojačevalniki, ki so omogočali razne matematične operacije. Z nastopom bistveno cenejših, zanesljivejših in tudi bistveno manjših integriranih linearnih vezij so se operacijski ojačevalniki pričeli uporabljati v številnih avtomatskih napravah.

V zaščiti jih uporabljamo predvsem kot člen za preoblikovanje vhodnih signalov. Operacijske ojačevalnike uporabljamo v te namene kot:

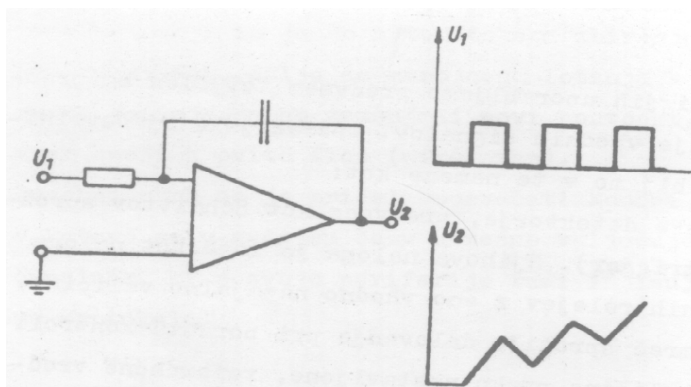
- nivojske detektorje, predvsem kot Schmittov sprožnik (trigger). Njihova naloga je ista kot naloga merilnih relejev z eno vhodno napajalno veličino, da namreč sprožijo delovanje pri porastu kontrolirane veličine preko nastavljene, referenčne vrednosti. Schmittov sprožnik omogoča dodatno, da je lahko tudi povratno razmerje nastavljivo (sl. 2.22)
- preoblikovalnike v sinusih v pravokotne oz. iglaste impulze. Tako preoblikovanje je potrebno predvsem pri faznih komparatorjih.
- Integratorje, ki integrirajo vhodne impulze (sl.2.23)
- kot aktivne filtre. Iz sistema dobivamo v rele poleg osnovnega vala tudi višje harmonske komponente. Te komponente včasih koristno izrabljamo za delovanje ali pa za zadrževanje delovanja zaščite.



Sl. 2.22



Lahko pa višje harmonske komponente tudi motijo delovanje in jih je potrebno odstraniti. Prednost aktivnih filtrov pred navadnimi filtri je predvsem v tem, da dosežemo želeno karakteristiko brez induktivnosti, ki je običajno velika pri nizkih frekvencah.



Sl. 2.23

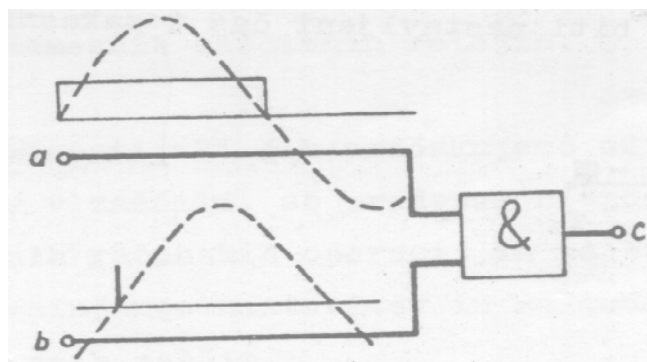
Poleg tega uporabljamo operacijske ojačevalnike tudi kot komparatorje dveh vrednosti, od katerih je ena referenčna.

### 2.7.2. Logična integrirana vezja v zaščiti

Člene, ki opravljajo logične operacije, uporabljamo predvsem pri relejih z dvema vhodnima napajalnima veličinama, ki jim predhodno sinusno obliko spremenimo v pravokotno ali pa iglasto obliko. V zaščiti uporabljamo decizijske člene, pri katerih je izhod le funkcija stanja posameznih vhodov, bistabilne spominske člene, pri katerih je izhod določen s predhodnim in s trenutnim stanjem na vhodu ter zakasnilne člene, ki posredujejo signal z določeno zakasnitvijo.

### 2.7.3. Fazni komparatorji v statični obliki

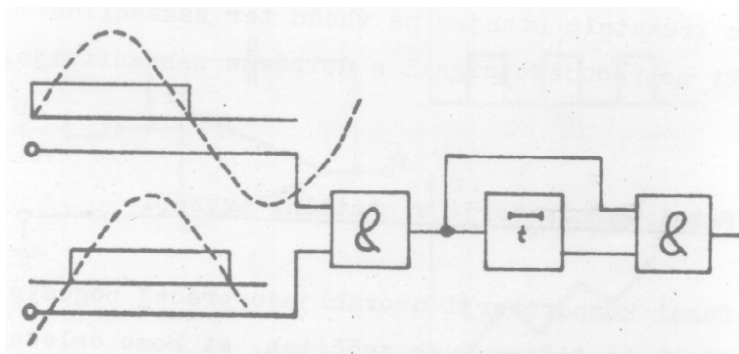
Ker se fazni komparatorji uporabljajo precej pogosto v distančnih in diferenčnih zaščitah, si bomo ogledali dve taki izvedbi. Pri izvedbi na sl. 2.24 vodimo dva signala in sicer enega pravokotniške oblike, drugega pa iglaste na logični IN člen, ki ga uporabimo kot koincidenčni indikator.



Sl. 2.24

Na izhodu dobimo namreč pozitivno vrednost le, če sta istočasno oba vhoda a in b pozitivna. To je znak, da je kot med obema veličinama v nastavljenem območju.

Pri izvedbi na sl. 2.25 sta oba signala pravokotniške oblike.



Sl. 2.25

Tudi v tem primeru ju vodimo na IN člen. Trajanje koincidence nadzira zakasnilni člen. Če naj bo meja območja delovanja določena z mejnim kotom  $\alpha$  med obema vhodoma, mora biti nastavljeni čas  $t$  zakasnilnega člana enak:

$$t = \frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ * f} \quad (2.20)$$

#### 2.7.4. Frekvenčni releji

Logična vezja so izvedena tudi kot številne enote. Pri frekvenčnem releju lahko precej točno izmerimo čas trajanja ene polperiode s tem, da v tem času oddaja poseben oddajnik z zelo

točno frekvenco (običajno kvarčni oscilator) impulze, ki jih nato poseben člen šteje. Če je njihovo število večje od nastavljene vrednosti, je frekvenca nižja in zato rele deluje.

## **2.8. ZAŠČITE Z RAČUNALNIKI**

Računalniki se sicer v zaščiti praktično še ne uporabljajo, lahko pa pričakujemo njihovo uporabo v zaščitnih relejih že v bližnji bodočnosti. V začetku se je zaradi takratnih visokih cen računalnikov predvidevalo, da naj bi en računalnik opravljal naloge več posameznih zaščitnih relejev. Vendar pa zaradi nezadostne sigurnosti ni prišlo do realizacij takih zamisli. Z izdelavo mikroprocesorjev pa lahko računamo, da bodo našli ti statični elementi mesto v posameznih zaščitnih relejih.

Osnovne prednosti, ki jih pričakujemo od uvedbe mikroprocesorjev v zaščiti, so predvsem hitrost, opravljanje zamotanih računskih operacij in pa sorazmerno enostavno spreminjanje nastavitvev in pa tudi karakteristik posameznih zaščit. Od številnih, v literaturi nakazanih rešitev omenimo le dve in sicer termično zaščito delov elektroenergetskih sistemov in to na osnovi številnih izračunov dejanske oz. predvidene temperature navitja zo. voda ter distančno zaščito s časom ca 2 ms in to s sprotnim izračunavanjem reaktanc voda.

### **2.8.1. Sprotni izračun reaktance voda z računalnikom**

Obravnnavani komparatorji potrebujejo za svojo odločitev čas, ki je lahko tudi daljši od 10 ms. Bistveno hitreje pa lahko ugotovimo okvaro, če karakteristično veličino izračuna iz izmerjenih vrednosti računalnik. Pogostost vzorčenja bi bila lahko velika, vendar se smatra za zadostno, če se vzorči vsaki 2 milisekundi.

Za izračun reaktance potrebujemo amplitudo napetosti  $U_m$ , amplitudo toka  $I_m$  in pa  $\sin\varphi$ , saj je reaktanca  $X$

$$X = \frac{U_m}{I_m} * \sin\varphi \quad (2.21)$$

Vrednost amplitude napetosti  $U_m$  lahko izračunamo iz trenutne vrednosti napetosti, iz odvoda te napetosti in iz kotne hitrosti  $\omega$ .

Trenutna vrednost napetosti je:

$$u = U_m * \sin \omega t \quad (2.22)$$

Treutna vrednost odvoda napetosti pa je:

$$u' = \omega * U_m * \cos \omega t \quad (2.22a)$$

Če seštejemo kvadratno vrednost napetosti  $u$  in kvadratno vrednost koeficienta med odvodom napetosti  $u'$  in kotne hitrosti, dobimo kvadratno vrednost amplitude napetosti:

$$u^2 + \left(\frac{u'}{\omega}\right)^2 = U_m^2 * (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = U_m^2 \quad (2.23)$$

Razmerje med napetostjo  $u$  in kvocientom med  $u'$  in  $\omega$  pa da vrednost:

$$\frac{u}{u' : \omega} = \frac{U_m \sin \omega t}{U_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t \quad (2.24)$$

Podobno dobimo, da je vrednost amplitude toka enaka naslednjemu izrazu:

$$I_m = \sqrt{i^2 + \left(\frac{i'}{\omega}\right)^2} \quad (2.25)$$

Razmerje med tokom  $i$  in  $i' : \omega$  je enako izrazu:

$$\frac{i}{i' : \omega} = \operatorname{tg}(\omega t - \varphi) \quad (2.26)$$

Iz enačb 2.24 in 2.26 lahko izračunamo kot  $\varphi$ , ki je:

$$\varphi = \omega t - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{i' : \omega} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{u}{u' : \omega} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{i}{i' : \omega} \quad (2.27)$$

Ker smo iz vrednosti  $u$ ,  $u'$ ,  $i$ ,  $i'$  in  $\omega$  izračunali iskane vrednosti  $U$ ,  $I$  in  $\varphi$ , lahko tudi tako izračunamo reaktanco  $X$ :

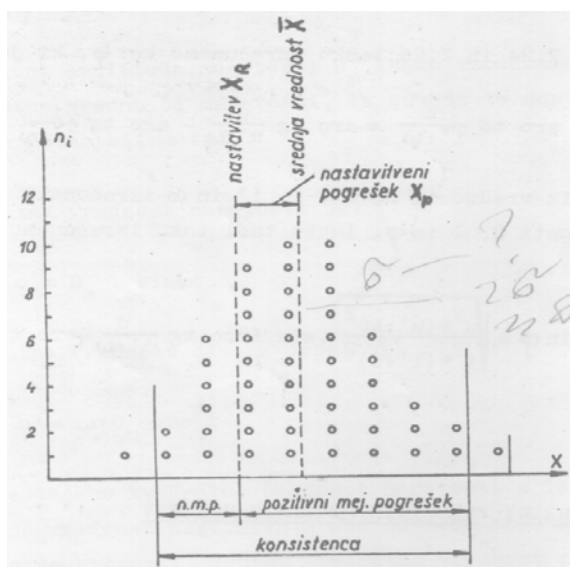
$$X = \frac{U_m}{I_m} * \sin \varphi = \sqrt{\frac{u^2 + (u' : \omega)^2}{i^2 + (i' : \omega)^2}} * \sin \left( \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{u}{u' : \omega} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{i}{i' : \omega} \right) \quad (2.28)$$

## 2.9. POGREŠKI TRENUTNIH MERILNIH RELEJEV

Razliko med nastavitvijo in pritezno vrednostjo (pri maksimalnih relejih) oz. spustitveno vrednostjo (pri minimalnih relejih) imenujemo absolutni pogrešek. Razmerje med absolutnim pogreškom in nastavitveno vrednostjo je relativni pogrešek, ki pa ga običajno izražamo v odstotkih.

### 2.9.1. Mejni in nastavitveni pogrešek

Iz večjega števila meritev v referenčnih pogojih in pri nastavitvi  $X_R$ , ki je z referenčnimi pogoji določena, lahko narišemo histogram (sl. 2.26). V njem podamo va večje število območij karakteristične veličine število delovanj  $n_i$  v njih. Če števila pritegnitev v posameznih območjih izrazimo v odstotkih vseh opravljenih



Sl. 2.26

meritev, dobimo v histogramu že verjetnosti pritegnitve v posameznih območjih. Iz števila delovanj  $n_i$  v posameznih območjih s srednjo vrednostjo karakteristične veličine  $X_i$  in to v vseh  $m$  območjih izračunamo nastavitveni pogrešek, ki ga imenujemo tudi povprečni pogrešek:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} n_i X_i}{\sum n_i} - X_R = \bar{X} - X_R \quad (2.29)$$

Iz histograma lahko nadalje določimo tudi pozitivni in negativni mejni pogrešek, ki je bil prekoračen že pri 5% vseh meritev.

Dovoljeni relativni mejni pogrešek v referenčnih pogojih določa indeks razreda točnosti. Ta pogrešek ne sme biti prekoračen s predpisano gotovostjo (verjetnost, da bo vrednost, pri kateri rele pritegne, znotraj tega pogreška in je običajno 95%).

Prednostni preferenčni indeksi so po IEC predpisih: 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 7,5; 10; 20.

Poleg omenjenih pogreškov lahko določimo iz meritev tudi konsistenco, ki je maksimalna, s predpisano gotovostjo pričakovana razlika med dvema pritezima vrednostima. Namesto konsistence lahko iz histograma izračunamo drugi moment porazdelitve (varanca) in standardno deviacijo, ki je:ki je:

$$m_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} n_i * (X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (2.30)$$

$$\sigma = \sqrt{m_2} \quad (2.31)$$

Naj omenimo, da je običajno bolj neljuba večja vrednost konsistence kot pa pogreška nastavitve. Pogrešek nastavitve se namreč pogosto s časom spreminja in ga lahko kompenziramo s spremembo nastavitve. Naraščanje konsistence pa nakazuje poslabšanje stanja releja in ga zato ne moremo kompenzirati.

Vse omenjeno velja le za referenčne pogoje. Če pa spremenimo eno vplivno veličino iz območja referenčnih pogojev v območje normalnega delovanja, pa lahko nastopi razlika med povprečnim pogreškom pri tej vrednosti vplivne veličine in referenčnim povprečnim pogreškom. To vrednost imenujemo variacija povprečnega pogreška oz. pogreška nastavitve.

## 2.9.2. Veličine, ki vplivajo na točnost merilnih relejev

Na delovanje merilnih relejev predvsem na njihovo točnost vpliva vrsta faktorjev oz. veličin. Ti so povezani:

1. z atmosferskimi razmerami (temperatura, zračni pritisk, relativna vlažnost),
2. z jakostjo elektro-magnetnega polja na mestu montaže releja (jakost magnetnega, elektrostatičnega in izmeničnega elektromagnetnega polja),
3. z vhodnimi napajalnimi veličinami (frekvenca, faktor popačitve sinusoide, izmenična komponenta v enosmerni vhodni napajalni veličini, enosmerna komponenta v izmenični vhodni napajalni veličini in to stacionarna in prehodna, pri relejih z dvema vhodnima napajalnima veličinama še vrednost nereferenčne veličine in kot med njima),

4. s pomožnimi napajalnimi veličinami (pri enosmernih: velikost in izmenična komponenta, pri izmeničnih: frekvenca, faktor popačitve sinusoide, enosmerna komponenta),
5. s stanjem v samem releju (nastavitve, lastno gretje) in
6. z ostalimi pogoji (lega, tresljaji in vibracije, udarci).

Razlikujemo tri območja dopuščenih vrednosti vplivnih veličin in faktorjev. Prvo območje zajema referenčne pogoje, pri katerih se operativno merijo referenčnih pogreškov, drugo področje je področje normalnega delovanja, tretje območje zajema ekstremne razmere pri skladiščenju, transportu, ko delovanje releja ni predvideno.

V tabeli so podane dovoljene mejne vrednosti vplivnih veličin oz. faktorjev za vsa tri območja. Tabela je izdelana na osnovi IEC predpisov oz. osnutkov.

Tabela 2.2 Dovoljene meje vplivnih veličin

<u>Okoliške veličine</u>	Referenčno območje	Normalno območje	Ekstremno območje
Temperatura (°C)	18°...22°	-5°...40°	-20°...60°
Zračni pritisk (kPa)	86...106	≥ 80	-
Relativna vlažnost (%)	45...75	a	n
Magnetno polje	0,5 mT	p	n
Električno polje	n	n	n
<u>Vhodne napajalne veličine</u>			
Frekvenca	0,5%	n	
Faktor popačitve	2%	n	
Izm.komp.v enosm.napet.	3%	n	
Enosm.komp.v izm.napet.	2%	n	
<u>Pomožne napajalne veličine</u>			
Vrednost	p	80...110%	
Frekvenca	0,5%	p	
Faktor popačitve	2%	p	
Izm.komp.v enosm.napet.	3%	p	
Enosm.komp.v izm.napet.	2%	p	
Nastavitev	p	s	

a – ne ustvarja se niti kondenzat niti led

p – določa proizvajalec

n – še ni določeno

s – velja za celotno nastavitveno območje

---

## **3. INSTRUMENTNI TRANSFORMATORJI**

---

### **3.1. UVOD**

Važen člen zaščitnega sistema so instrumenti transformatorji in to tako tokovni kot tudi napetostni. Pri zaščiti uporabljamo predvsem zaščitne transformatorje. Območja tokov in napetosti, pri katerih zaščite delujejo, so namreč pogosto bistveno različna od območij normalnega obratovanja, za katera so predvsem grajeni merilni transformatorji. Včasih pa se pri nekaterih zaščitah odločimo tudi za merilne transformatorje.

### **3.2. ZAŠČITNI TOKOVNI TRANSFORMATORJI**

Zahteve, ki jih mora izpolniti tokovni transformator, so odvisne od tipa zaščite kot tudi od same izvedbe zaščitnega releja. Včasih pa nanje vpliva tudi primarni sistem s svojimi karakteristikami.

Posamezni tipi zaščit imajo do zaščitnih transformatorjev različne zahteve. Pri tem igra posebno vlogo delovni čas zaščite in pa ev. Uporaba avtomatskega ponovnega vklopa. Glede na zahteve lahko razdelimo zaščite v tri skupine:

1. skupina    zaščita deluje pravilno, tudi če pride do popolnega nasičenja tokovnega transformatorja, npr. visokoimpedančne diferenčne zaščit
2. skupina    zaščite, pri katerih dopuščamo delno nasičenje tokovnih transformatorjev
3. skupina    zaščite, ki delujejo nepravilno že, če pride do delnega nasičenja



Primarni sistem določa predvsem dva faktorja, ki vplivata na izbiro tipa tokovnega transformatorja in sicer faktor nazivnega simetričnega kratkostičnega toka  $K_{\text{skt}}$  in pa nazivna časovna konstanta primarnega omrežja  $T_1$ .

Faktor nazivnega simetričnega kratkostičnega toka  $K_{\text{skt}}$  je razmerje med nazivno efektivno vrednostjo toka pri simetričnem kratkem stiku, ki naj bi v ekstremnih primerih tekel skozi transformator, in med efektivno vrednostjo nazivnega toka transformatorja. Vrednost omenjenega faktorja je lahko 50 ali pa še več.

Nazivna časovna konstanta primarnega omrežja  $T_1$  je časovna konstanta enosmerne komponente toka kratkega stika in predstavlja razmerje med nadomestno induktivnostjo in nadomestno ohmsko upornostjo izvora. Če pa je okvara napajana iz več izvorov z različnimi razmerji  $L/R$  oz. z različnimi konstantami  $T_1$ , je pa potrebno najti reprezentančno vrednost te konstante.

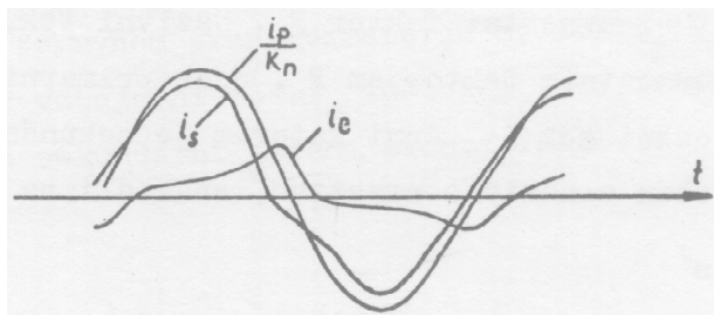
Vrednosti časovnih konstant se dvigajo z višino napetosti. Informativne vrednosti za vode so: 110 kV – 14 ms, 220 kV – 20 ms, 380 kV – 30 ms. Pri 500 kV vodih so bile izmerjene vrednosti do 100 ms. Bistveno višje vrednosti pa dobimo v stikališčih, posebno, če so blizu elektrarn. Informativne vrednosti so za 220 kV stikališča 120 ms, za 380 kV stikališča pa 150 ms. V HE Đerdap je bila izračunana vrednost 145 ms.

Zaščitni tokovni transformatorji so grajeni predvsem za tokove, ki so večji od nazivnih. Obstojata dve skupini in sicer izvedbe za zaščite, pri katerih ni bistven pravilen odziv tokovnega transformatorja na začetni prehodni pojav, in pa izvedbe za zaščite, pri katerih je ta odziv bistven za pravilno delovanje zaščite.

### 3.2.1. Zaščitni tokovni transformatorji za zaščite, ki delujejo v stacionarnem stanju

Pri teh transformatorjih se navaja poleg pogreška prestave in kotnega pogreška (kot pri merilnih transformatorjih) še sestavljeni pogrešek  $I_c$ , ki je enak razliki med primarnim tokom  $I_p$ , deljenim z nazivno prestavo  $K_n$ , in med sekundarnim tokom  $I_s$ . Enak je torej vzbujalnemu toku  $I_e$  oz. vsoti njegove delovne  $I_a$  in magnetilne komponente  $I_m$  (L.37). Če pride zaradi nasičenja do popačitve tokov (sl. 3.1), dobimo sestavljeni pogrešek iz trenutnih primarnih  $i_p$  in sekundarnih tokov  $i_s$ :

$$I_c = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} (i_p : K_n - i_s)^2 dt} \quad (3.1)$$



Sl. 3.1

Sestavljeni pogrešek običajno izražamo kot relativni sestavljeni pogrešek, izražen v odstotkih primarnega toka:

$$\varepsilon_c = 100 K_n \cdot I_c : I_p \quad (3.2)$$

Na zaščitnih transformatorjih teh izvedb je naveden mejni faktor točnosti  $F_{mt}$ , ki podaja razmerje med tokom nazivne točnosti (tok, pri katerem nastopi pri nazivnem bremenu mejni sestavljeni pogrešek) in med nazivnim tokom. Razrede te skupine transformatorjev označujemo s črko P, številka pred črko pa označuje mejni relativni sestavljeni pogrešek in sicer v procentih. Obstajata dva razreda in sicer 5P in 10P. Označba standardnega mejnega faktorja točnosti pa sledi črki P npr. 5P 20. Standardni mejni faktorji točnosti  $F_{mt}$  so: 5, 10, 15, 20 in 30. Pogrešek prestave je 1% (razred 5 P) oz 3% (razred 10 P), kotni pogrešek pa je  $1^\circ$  (razred 5 P), pri transformatorjih razreda 10 P pa ni predpisan. Pogreški prestave in kota veljajo le pri nazivnem toku.

Naj navedemo še, da se pri merilnih transformatorjih ne navaja mejni faktor točnosti  $F_{mt}$ , navaja pa se instrumentni sigurnostni faktor  $F_s$ . Nazivni tok, pomnožen s sigurnostnim faktorjem  $F_s$ , daje primarni nazivni sigurnostni tok  $I_{ps}$ , pri katerem je sekundarni tok  $I_{ss}$ , pomnožen z nazivno prestavo, enak ali pa manjši od  $0,9 I_{ps}$ :

$$K_n \cdot I_{ss} \leq 0,9 I_{ps} \quad (3.3)$$

seveda je pri tem potrebno, da je merilni transformator obremenjen z nazivnim bremenom.

### 3.2.2. Zaščitni tokovni transformatorji za zaščite, pri katerih je bistven odziv v prehodnem stanju

Pri nastopu kratkega stika dobimo na mestu okvare poleg izmenične še enosmerno komponento toka kratkega stika. Vrednost te je odvisna od trenutka nastopa okvare. Najvišjo pozitivno vrednost dobi enosmerna komponenta, če nastopi okvara v trenutku

$$t = \frac{\varphi_k - 90^\circ}{360 * f} \quad (3.4)$$

in to šteto od trenutka, ko je napetost nič in nato postaja pozitivna.  $\varphi_k$  je v gornji enačbi kot kratkega stika med napetostjo in tokom v stacionarnem stanju. V tem primeru je amplituda enosmerne komponente enaka, a nasprotno usmerjena kot amplituda izmenične komponente. Trenutno vrednost toka določa za ta primer enačba:

$$i_p = \hat{I}_p \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right) \quad (3.5)$$

$T_1$  je kot že omenjeno časovna konstanta primarnega omrežja. V tokovnem transformatorju se tok  $i_p : K_n$  deli in sicer v vzbujalni tok  $i_e$  in tok  $i_s$ , ki teče preko bremena na sekundarni strani transformatorja.

### 3.2.2.1. Pojavi brez nasičenja

V nadaljevanju bomo najprej vzeli idealni transformator, zanemarili bomo histerezo in remanenco, torej bomo vzeli, da je delovni vzbujalni tok  $i_a$  enak nič, da je torej vzbujalni tok enak magnetilnemu toku  $i_m$ . Dalje bomo predpostavili, da ima transformator linearizirano karakteristiko, da ke torej induktivnost  $L_2$  konstantna. Breme pa naj bo popolnoma ohmsko, z upornostjo  $R_b$ . Tudi za sekundarno stran transformatorja bomo vzeli, da ima le ohmsko upornost  $R_{ts}$ . Vsoto obeh upornosti  $R_b$  in  $R_{ts}$  bomo označili z  $R_2$ . V transformatorju inducirana napetost  $U_2$  je:

$$U_2 = -L_2 \frac{di_m}{dt} = R_2 * i_s = R_2 * (i_p : K_n - i_m) \quad (3.6)$$

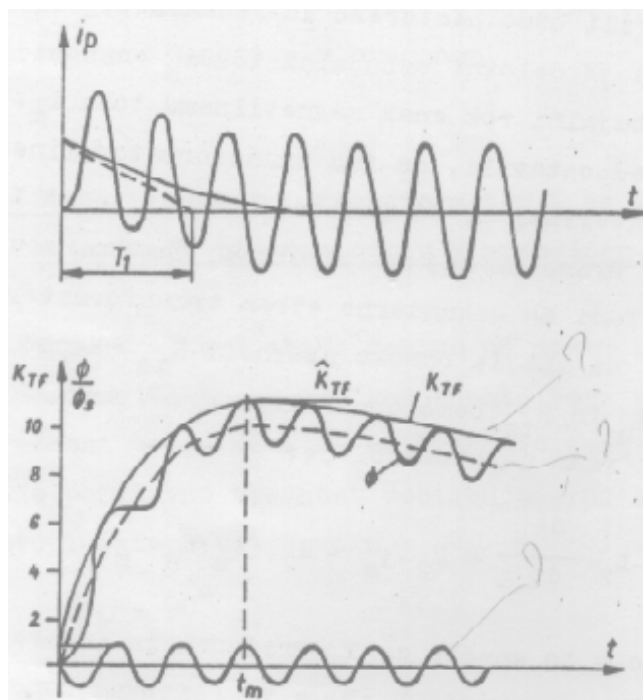
Če vstavimo v to enačbo za  $i_p$  vrednost iz enačbe (3.5) in če označimo razmerje  $L_2 : R_2$  s  $T_2$  (časovna konstanta sekundarnega tokokroga), dobimo iz gornje enačbe vrednost toka  $i_m$ :

$$i_m = \hat{I}_{ms} \left[ -\sin \omega t + \omega * \frac{T_1 * T_2}{T_1 - T_2} * \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right] \quad (3.7)$$

pri čemer je  $\hat{I}_{ms}$  temenska vrednost komponente magnetilnega toka. Vsled tega se ustrezno dviguje tudi magnetni pretok v trnsformatorju (sl. 3.2):

$$\Phi = \hat{\Phi}_s \left[ -\sin \omega t + \omega \frac{T_1 * T_2}{T_1 - T_2} * \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right] \quad (3.8)$$

pri čemer je  $\Phi_s$  temenska vrednost magnetnega pretoka, ki ga povzroča sinusna magnetilna komponenta toka.



Sl. 3.2

Če vstavimo za  $(-\sin \omega t)$  stalno vrednost 1, ki jo sicer dobimo le v časih  $t = 15 \text{ ms}$ ,  $35 \text{ ms}$ , dobimo iz gornje enačbe transzientni faktor  $K_{TF}$ :

$$K_{TF} = 1 + \omega \frac{T_1 * T_2}{T_2 * T_1} \left( e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (3.9)$$

Najvišjo vrednost faktorja  $K_{TF}$  dobimo po času  $t_m$

$$t_m = \frac{T_1 * T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (3.10)$$

V tem trenutku je maksimalna vrednost faktorja  $K_{TF}$  :

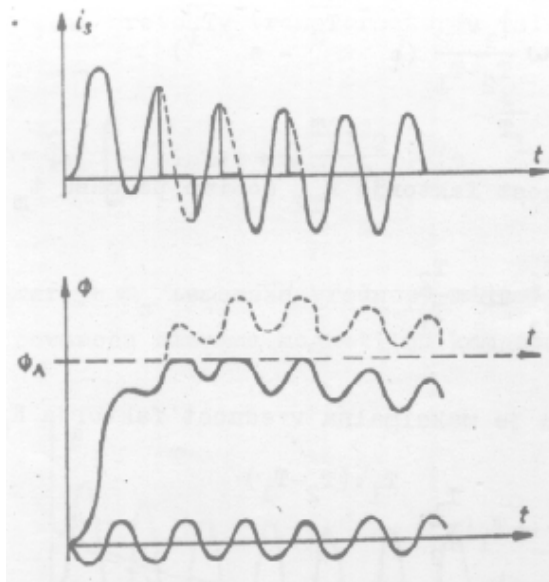
$$\hat{K}_{TF} = 1 + \omega T_1 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{T_1(T_2 - T_1)} \quad (3.11)$$

Če je  $T_2$  dosti večji od  $T_1$ , je  $\hat{K}_{TF}$

$$\hat{K}_{TF} \approx 1 + \omega T_1 \quad (3.12)$$

### 3.2.2.2. Pojavi pri nasičenju

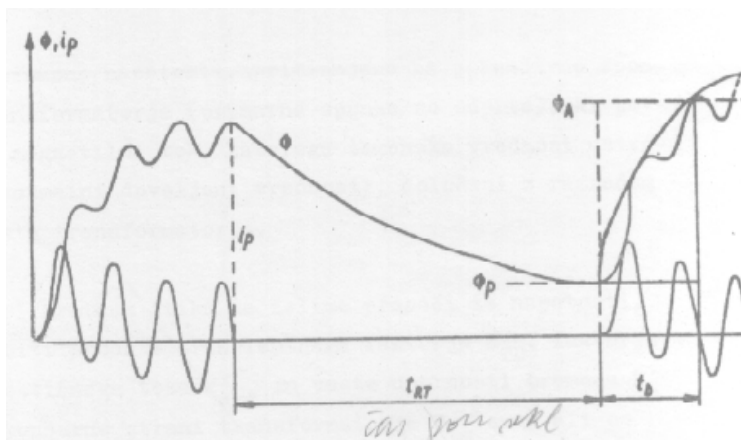
Sedaj pogledjmo, kaj se dogodi, če magnetni pretok preseže vrednost nasičenja. Zaradi enostavnosti vzemimo, da dobimo pri  $\Phi_A$  trenutno in popolno nasičenje. Vsled tega pade v trenutku, ko pretok doseže to vrednost, tok  $i_s$  na vrednost nič (sl. 3.3). Če pride do take popačitve toka v času same meritve, pride pri marsikaterem tipu zaščite do nepravilnosti v delovanju.



Sl. 3.3

Dodaten problem nastopa pri zaščiti vodov, kjer uporabljamo avtomatski ponovni vklop. Prvo delovanje zaščite normalno ne pride v območje nasičenja. V trajanju izklapljanja, običajno traja izklop hitrih odklopnikov 60 ms, pa se magnetni pretok dviguje (sl. 3.4). Pri tem se pa lahko dogodi, da pride transformator v nasičenje. Vzemimo, da v transformatorju ne nastopa remanenca. V tem primeru pojema po izklopu magnetni pretok po eksponentni krivulji s časovno konstanto sekundarnega tokokroga  $T_2$ . Po času, ki ga označimo s  $t_{RT}$ , pride lahko do ponovnega

napajanja okvare. Ker je v jedru v tem trenutku nek magnetni pretok, se lahko pri najbolj neugodnem trenutku ponovnega vklopa prične dvigovati magnetni pretok iz preostale vrednosti. Zato dobimo hitrejšo naraščanje magnetnega pretoka in lahko pride do nasičenja.



Sl 3.4

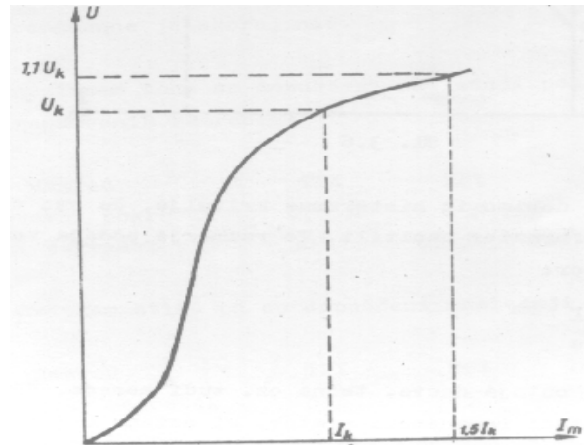
Kdaj pride tokovni transformator v tem primeru v nasičenje, določa nazivni transientni faktor  $K_{TD}$ . Pri časovni konstanti primarnega omrežja  $T_1$ , ki je enaka nazivni primarni časovni konstanti  $T_p$ , pri časovni konstanti sekundarnega tokokroga  $T_2$ , ki je enaka nazivni časovni konstanti sekundarnega tokokroga tokovnega transformatorja, torej pri nazivnem bremenu, in pri predpisanem času  $t_{RT}$  (običajno 0,3 s), doseže tokovni transformator nasičenje v času  $t_D$  (dovoljeni čas do popačitve zaradi nasičenja). To se dogodi mnogokratniku magnetnega pretoka  $K_{TF}$ , ko doseže magnetni pretok v jedru nasičenje  $\Phi_A$ , zmanjšano za vrednost preostalega magnetnega pretoka  $\Phi_p$ .

Za dimenzioniranje transformatorjev je važna sekundarna napetost mejne točnosti  $U_{AL}$ . To je efektivna vrednost sinusne napetosti, pritisnjena na sekundarne sponke transformatorja (primarne sponke so odprte), ki povzroča magnetilni tok, katerega temenska vrednost ustreza maksimalni dovoljeni vrednosti, določeni z razredom točnosti transformatorja.

Ker pri kratkem stiku ne želimo preseči te napetosti, mora biti produkt tranzientnega faktorja  $K'_{TD}$ , faktorja kratkostičnega toka  $K'_{skt}$  in vsote upornosti bremena  $R'_b$  in sekundarne strani transformatorja  $R_{ts}$  enak ali pa manjši od za tokovni transformator podanih vrednosti  $K_{TD}$ ,  $K_{skt}$  in  $R_b$ :

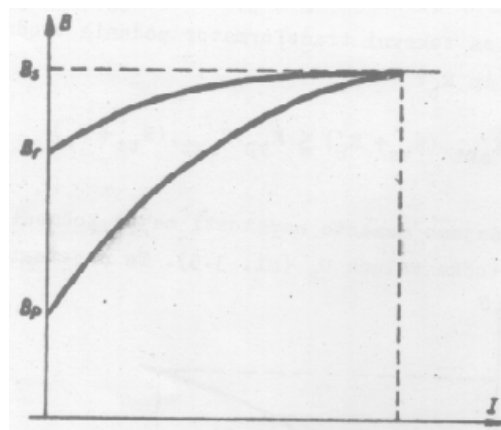
$$K'_{TD} * K'_{skt} * (R_{ts} + R'_b) \leq K_{TD} * K_{skt} * (R_{ts} + R_b) \quad (3.13)$$

Včasih podajamo namesto napetosti mejne točnosti tudi napetost točke kolena  $U_k$  (sl. 3.5).



Sl. 3.5

Ta napetost je definirana s tem, da njeno povišanje za 10% povzroči za povečanje vzbujalnega toka za 50%. Tok pri tej napetosti označujemo z  $I_k$ .



Sl. 3.6

Pri dosedanjih obravnavanjih nismo upoštevali remanence. Pri določenih transformatorjih ostane po izklopu lahko sorazmerno visoka vrednost magnetnega pretoka. Podajamo jo običajno z razmerjem med remanenčno magnetno gostoto  $B_r$ , in med magnetno gostoto pri nasičenju  $B_s$  (sl. 3.6).

Vrednost  $B_r$  dobimo iz histerezne krivulje, če smo predhodno transformator nasitili. To razmerje podaja remanenčni faktor:

$$K_R = \frac{B_r}{B_s} \quad (3.14)$$

Vrednost  $B_r$  ostaja dneve, tedne oz. tudi mesece. Včasih označujemo tudi remanenčni pretok, ki ostane v jedru po treh minutah.

### 3.2.2.3. Izvedbe in karakteristike transformatorjev

Obstojajo tri razredi in sicer TPX, TPY in TPZ. Razred TPX je najbolj točen. Ima pa visoko induktivnost  $L_2$ , zato majhen magnetilni tok in visoko časovno konstanto  $T_2$ . Posledica tega je sorazmerno točno prenašanje enosmerne in izmenične komponente na sekundarno stran in to vse do meje, postavljene s krivuljo nasičenja. Ta razred ima sorazmerno visok remanenčni faktor. Zato vzamemo običajno faktor  $K_{TD}$  kar 2 krat večji od faktorja  $K_{TF}$ .

Razred TPY ima linearizirano jedro. Časovna konstanta  $T_2$  je nižja kot pri TPX, znaša pa ca 300 ms. Zato prenos enosmerne komponente ni več točen. Remanenčni faktor znaša 5 do 10%. Razred TPZ ima prav tako linearizirano jedro. Ker je časovna konstanta  $T_2$  ca 60 ms, se enosmerna komponenta prenaša močno popačeno. Faktor remanence je skoraj nič.

Pri nazivnem toku so dopuščeni naslednji pogreški pri posameznih razredih:

RAZRED	TPX	TPY	TPZ
Prestavni pogrešek	0,5 %	1%	1%
Kotni pogrešek	30'	0...60'	160....200'

Pri kratkem stiku pa so dopuščeni naslednji pogreški

RAZRED	TPX	TPY	TPZ
Prestavni pogrešek	5 %	7,5%	10%
Kotni pogrešek	3°	4,5°	

Primer označbe transformatorjev (L. 39)

TPX – moč: 10 W, $K_{skt} * K_{TD} = 20 \times 40$ ,	$t_2 = 8s$ ,	$R_{ks} = 2,5 \Omega$	$\hat{K}_r = 0,75$
TPZ – moč: 10 W, $K_{skt} * K_{TD} = 20 \times 15$ ,	$t_2 = 60 \text{ ms}$ ,	$R_{ts} = 2,5 \Omega$	$\hat{K}_r = 0$



### 3.2.3. Zaščita transformatorji za zajemanje residualnega toka

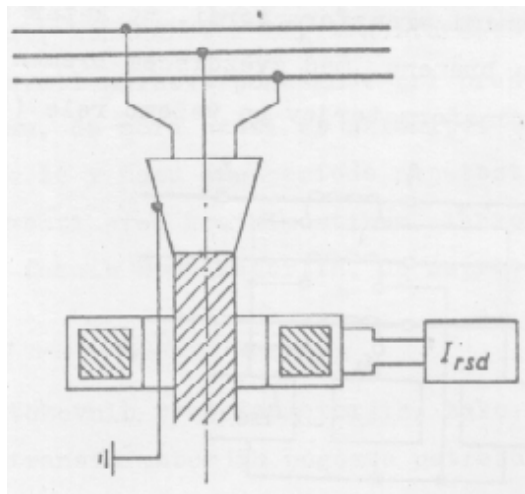
Pri zemeljsko stičnih zaščitah pogosto potrebujemo komponente ničnega zaporedja v faznih tokovih oz. njihovo vsoto – residualni tok:

$$I_{oa} + I_{ob} + I_{oc} = 3 I_o = I_{rsd} \quad (3.15)$$

Pri teh zaščitah pogosto želimo, da so občutljive, da namreč delujejo že pri nizkih zemeljskostičnih tokovih, ki naj bodo včasih tudi le 2‰ nazivnega toka!

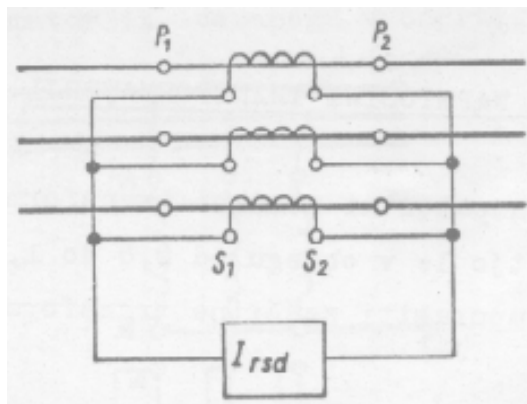
Residualni tok lahko dobimo na tri načine in sicer:

1. z objemnim tokovnim transformatorjem (sl. 3.7). Ta način uporabljamo lahko pri kabljih, omogoča pa zajemanje sorazmerno nizkih residualnih tokov. Pri ozemljitvi kabelske glave je treba paziti, da gre njena ozemljitev skozi transformator!



Sl. 3.7

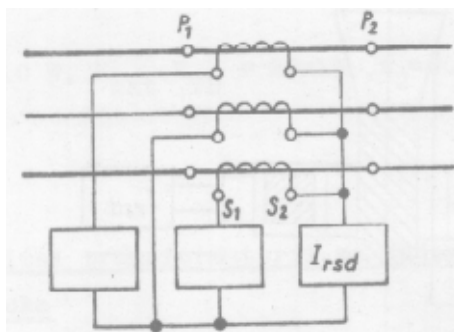
2. s tremi tokovnimi transformatorji, katerih sekundarna navitja vežemo paralelno (Holm-Greenova vezava) (sl. 3.8).



Sl. 3.8

Ker so pozitivne in negativne komponente tokov vezane na kratko, omogoča omenjena vezava precejšnjo občutljivost, zahteva pa, da so karakteristike vseh treh transformatorjev izravnane, saj razlike morebitnih magnetilnih tokov zaznamo kot residualni tok.

3. s tremi tokovnimi transformatorji, na katere so vezana enofazna bremena, med zvezdiščem bremen in pa zvezdiščem transformatorjev pa vežemo rele (sl. 3.9).



Sl. 3.9

Pri tej vezavi prihaja do večjih diferenčnih tokov, predvsem če niso enofazna bremena enaka.

### 3.3. ZAŠČITNI NAPETOSTNI TRANSFORMATORJI

Ker delujejo napetostni merilni transformatorji s predpisano točnostjo le v obsegu od 0,8 do 1,2  $U_n$ , je pogosto potrebno uporabiti zaščitne transformatorje (L.36).

Območje za zaščitne transformatorje. Kjer so predpisane meje pogreškov, je od 5% nazivne napetosti do nazivne napetosti, pomnožene z nazivnim napetostnim faktorjem. Ta faktor

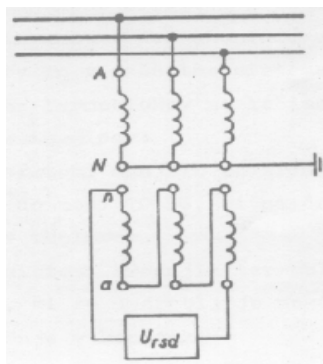
je, odvisno od izvedbe, 1,2; 1,5 ali 1,9. Pri transformatorjih razreda 3 P je mejni pogrešek 3%, kotni mejni pogrešek pa 2°. Pri razredu 6 P pa so vrednosti pogreškov dvojne (6% oz. 4°).

Pri uporabi kondenzatorskih transformatorjev je potrebno upoštevati njihovo ponašanje pri prehodnih pojavih. Kljub temu, da mora pasti po sklenitvi transformatorja na kratko že v času ene periode napetost na 10% temenske vrednosti pred kratkim stikom, lahko pride, predvsem pri faznih komparatorjih, do nepravilnega delovanja.

Kot pri tokovnih transformatorjih, tako tudi pri napetostnih transformatorjih pogosto potrebujemo pri residualnih zaščitah tudi residualno napetost, ki je enaka vsoti komponent ničnega zaporedja vseh treh faznih napetosti:

$$U_{oa} + U_{ob} + U_{oc} = 3U_o = U_{rsd} \quad (3.16)$$

To napetost dobimo lahko iz posebnega navitja na vseh treh transformatorjih, vezanega v odprti trikot (sl. 3.10), lahko pa dobimo residualno napetost iz treh sekundarnih faznih napetosti. Na te napetosti priključimo tri vmesne transformatorje, katerih sekundarna navitja vezemo v odprt trikot. Napetost na tem trikotu je že  $U_{rsd}$ .



Sl. 3.10