

PŘECHODNÉ JEVY A MOŽNOSTI JEJICH MĚŘENÍ

G STUDIJNÍ CÍLE

Po prostudování :

- § Budete vědět, co tvoří přechodné jevy v elektrizačních soustavách.
- § Poznáte jejich vlivy na napájecí síť.
- § Seznámíte se s možnostmi jejich měření.
- § Uděláte si představu o možnostech jejich vyhodnocení.

Ň KLÍČOVÁ SLOVA

přechodný jev, zemní spojení, zkrat, přepětí, digitální osciloskop, měřicí karta.

Ā ČAS POTŘEBNÝ KE STUDIU

180 minut

1. ÚVOD

Přechodné jevy v elektrizačních soustavách (ES) výrazně ovlivňují spolehlivost chodu těchto soustav a se spolehlivostí přímo či nepřímo související efekty, jako například bezpečnost provozu, ekonomická efektivnost a mnoho dalších. Z uvedených důvodů je třeba alespoň v hrubých liniích předvídat průběh přechodných jevů pro zavedení následujících opatření.

Prognóza přechodných jevů je možná mnohými metodami, z nichž nejvýznamnější jsou:

- § měření na modelu ES či části ES,
- § výpočet charakteristických veličin průběhu přechodného jevu,
- § měření ve skutečné ES (respektive na určitém představiteli ES) a statistické zpracování co možná největšího množství vzorků projevů přechodných jevů.

1.1 Teoretický rozbor přechodných jevů v elektrizačních soustavách

Přechodné jevy v elektrizačních soustavách (ES) vznikají vždy při přechodu ES z jednoho ustáleného provozního stavu do nového ustáleného provozního stavu. K narušení ustáleného chodu ES může dojít v důsledku manipulací prováděných v ES, při změně zatížení ES, popřípadě v důsledku poruchy některého zařízení ES, tj. například zkraty, zemní spojení a podobně. Přechodné jevy výrazným způsobem ovlivňují chod, potažmo spolehlivost chodu ES.

Z důvodu následného rozboru je prvořadě nutno definovat ES. ES řadíme do kategorie *rozlehlých systémů kybernetického typu*, jelikož propojením jednotlivých článků nabývá ES nových vlastností, které jednotlivé články samostatně neměly (lze hovořit o systému), dále pak ES zahrnuje velké množství vzájemně propojených článků, provozovaných na velkém území (lze hovořit o rozsáhlém systému) a konečně pro ES je typická řada zpětných vazeb s přenosem a zpracováním informace (lze hovořit o kybernetickém systému).

ES chápeme jako dynamický systém, tj. systém, v němž okamžitá hodnota vnitřních veličin závisí na okamžitých hodnotách řízení a na stavu systému (souboru vnitřních veličin systému, zahrnujících informaci o minulém vývoji systému) v daném okamžiku. Základním provozním stavem každého dynamického systému je tzv. *rovnovážný stav*, v případě ES *ustálený chod*. Ten je charakterizován neměnností stavových veličin. Jakákoliv změna těchto parametrů má za následek narušení ustáleného chodu. Vzniká přechodný jev, po němž:

- § ES přejde do nového ustáleného chodu,
- § některý z provozních parametrů roste nade všechny meze, což vede k narušení stability chodu ES.

ES můžeme modelovat jako dynamický systém se soustředěnými parametry, popřípadě s rozprostřenými parametry. To souvisí s rychlostí průběhu daného přechodného jevu. Z tohoto pohledu je možno rozdělit přechodné jevy do tří základních skupin:

- § *vlnové přechodné jevy* – doba trvání řádově v mikrosekundách až milisekundách; vzhledem k rychlosti změn provozních parametrů ES není možno zanedbat

rychlost šíření elektromagnetických vln v jednotlivých člancích ES – ty se pak musejí při výpočtu nahrazovat modely s rozprostřenými parametry

- § *elektromagnetické přechodné jevy* – doba trvání řádově desetin sekundy; vzhledem k rychlosti jejich průběhu lze zanedbat konečnou rychlost šíření elektromagnetických vln ve všech člancích ES – všechny články považujeme za články se soustředěnými parametry; v průběhu elektromagnetických přechodných jevů lze zanedbat změny otáček točících se soustrojí a předpokládat konstantní úhlové rychlosti elektrických točivých strojů – to umožňuje pojímat ES jako čistě elektrický systém
- § *elektromechanické přechodné jevy* – doba trvání řádově od desetin sekundy až po desítky sekund; jsou charakterizovány především mechanickým pohybem rotorů alternátorů v závislosti na provozních změnách v ES.

Stěžejními přechodnými jevy z hlediska zadaného problému jsou přechodné jevy elektromagnetické.

1.2 Úvod do problematiky zkratů a zemních spojení

Nejčastější příčinou vzniku elektromagnetických přechodných jevů v ES jsou zapnutí a vypnutí článků soustavy, zkraty, zemní spojení, vznik místní nesymetrie, regulace elektrických strojů a nesynchronní sepnutí synchronních strojů. Jak již bylo výše avizováno, budu se zabývat přednostně zkraty a zemními spojeními.

Zkratem rozumíme poruchu vznikající spojením nakrátko dvou nebo tří fází a v soustavách s účinně uzemněným uzlem také spojení nakrátko jedné nebo dvou fází se zemí. Při vzniku zkratu v ES se mnohdy několikanásobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a zdroji napětí. To má za následek markantní vzrůst proudů ve větvích a pokles napětí v uzlech, zvláště pak v místech elektricky blízkých místu zkratu. Příčiny vzniku zkratu mohou být například:

- § nedokonalosti a vady elektrických zařízení (špatná izolace, znečištění nebo poškození izolátorů, vadné kontakty přístrojů apod.); mohou být způsobeny například špatnou výrobou či nedbalou montáží,
- § přepětí,
- § nedostatečné dimenzování zařízení,
- § cizí zásahy,
- § chybná manipulace.

Zkraty patří mezi nejrozšířenější typ poruchy v ES. Projevují se četnými nepříznivými následky ohrožujícími bezpečnost provozu a provozovaných zařízení a především, mimo jiné, bezpečnost obsluhujících osob. Aspekt zmíněných nepříznivých následků bude detailně rozebrán v kapitole 2.1.

Nastane-li v trojfázové soustavě s izolovaným, resp. kompenzovaným uzlem spojení jedné fáze se zemí, hovoříme o zemním spojení. Zemním spojením se rozumí spojení kteréhokoli bodu izolované nebo kompenzované soustavy, které má za následek větší nesouměrnost soustavy než 33% fázového napětí sítě (viz. Příručka silnoproudé elektrotechniky, str. 639). Podle doby trvání je možno zemní spojení rozdělit na:

- § *mžiková* (0,5 s a méně),

- § *krátkodobá* (do 5 min),
 - § *přerušovaná*, tj. mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující (vznikají například za větru, stykem pohybujících se částí s vedením, přerušovaným elektrickým obloukem apod.),
 - § *trvalá* (trvá až do doby zásahu obsluhy, mnohdy i několik hodin).
- Podobně jako zkraty, také zemní spojení se v ES projevují četnými nepříznivými následky, které budou rovněž detailně rozebrány v kapitole 2.2.

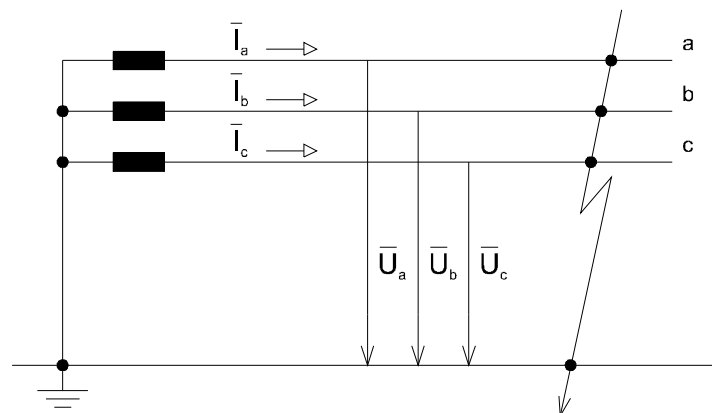
1.2.1 Zkraty v trojfázové soustavě

Jsou-li zkratem postiženy současně všechny tři fáze, hovoříme o *zkratu trojfázovém* – souměrném. Jsou-li pak tyto tři zkratované fáze propojeny se zemí, hovoříme o *trojfázovém zemním zkratu* (někdy také úplném trojfázovém zkratu). Všechny ostatní zkraty jsou nesouměrné a řadíme k nim zejména:

- § dvoufázový zkrat
- § dvoufázový zemní zkrat
- § *jednofázový zkrat* (v sítích s účinně uzemněným uzlem, v sítích s izolovaným či kompenzovaným uzlem se jedná o zemní spojení)

Z důvodu nesymetrie těchto poruch je třeba při výpočetním řešení zkratových poměrů aplikovat metodu rozložení nesouměrné soustavy na souměrné složky, a to souslednou, zpětnou a nulovou složku. Zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor, původcem proudu zpětné a netočivé složkové soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy. Problémem výpočtu zkratových poměrů se však nebudu podrobněji zabývat, jelikož úkolem zadané práce je analýza poruch na základě měření. Na Obr. 1.1 je příklad konfigurace trojfázového zemního zkratu, přičemž platí:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_b = \bar{U}_c = 0 \quad (1.1.)$$

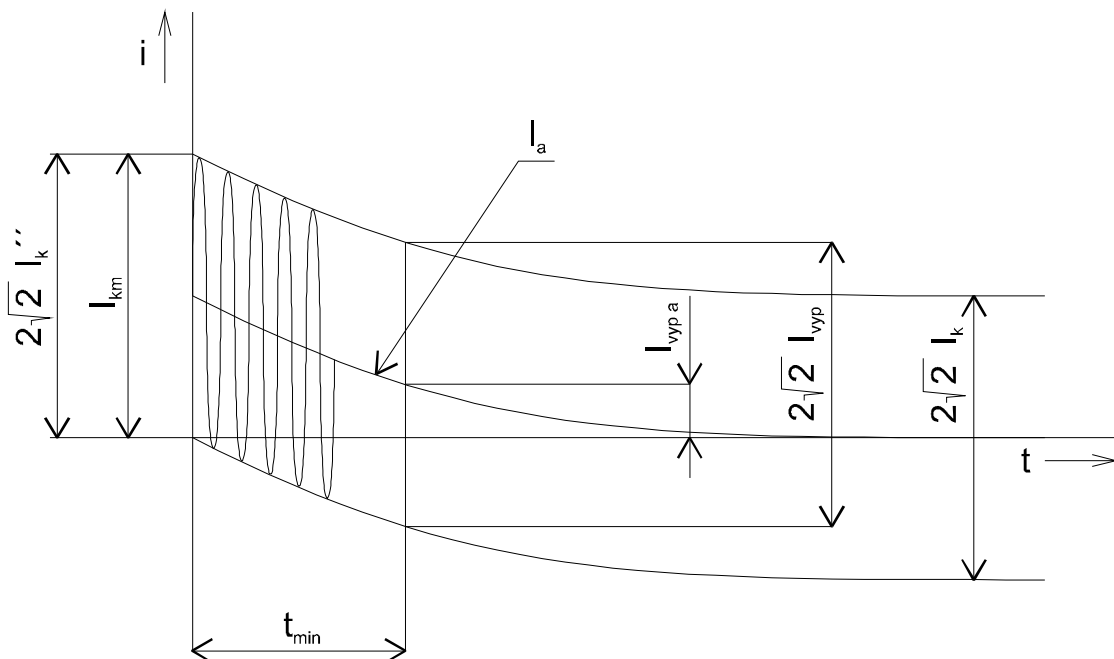


Obr. 1.1. Konfigurace trojfázového zemního zkratu

1.2.2 Vybrané pojmy z oblasti zkratových veličin dle ČSN 33 30 20

- § Zkrat – náhodné nebo úmyslné spojení přes poměrně malý odpor nebo impedanci dvou nebo více bodů obvodu, které mají při normálním provozu různá napětí.

- § Zkratový proud – nadproud při zkratu, který je důsledkem poruchy nebo nesprávného propojení v obvodu.
- § Počáteční rázový zkratový proud – (I_k'') efektivní hodnota střídavé složky zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, zůstane-li impedance stejná jako v okamžiku zkratu.
- § Stejnoseměrná (aperiodická) složka zkratu zkratového proudu – (I_a) střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.
- § Nárazový zkratový proud – (I_{km}) největší možná vrcholová hodnota předpokládaného zkratového proudu.
- § Ekvivalentní oteplovací proud – (I_{ke}) efektivní hodnota fiktivního proudu sinusového průběhu s konstantní amplitudou, který za dobu zkratu vyvine stejné množství tepla jako předpokládaný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou.
- § Ustálený zkratový proud – (I_k) efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který protéká obvodem po zakončení přechodných jevů.
- § Elektricky blízký zkrat – zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho alternátoru k předpokládanému počátečnímu rázovému zkratovému proudu překračuje při trojfázovém zkratu dvojnásobek jmenovitého proudu alternátoru.
- § Elektricky vzdálený zkrat – zkrat, při kterém nejsou splněny podmínky předcházejícího odstavce (Obr. 1.2.).
- § Doba trvání zkratu – (t_k) doba od okamžiku vzniku zkratu až do jeho konečného vypnutí ve všech fázích postižených zkratem.



Obr. 1.2. Příklad průběhu zkratového proudu elektricky vzdáleném zkratu

Na Obr. 1.2. je zobrazena možnost průběhu zkratového proudu, kde:

- § I_{vyp} je vypínací zkratový proud,

§ $I_{\text{vyp } a}$ je stejnosměrná (také aperiodická) složka vypínacího zkratového proudu a

§ t_{min} je minimální vypínací doba vypínače.

Ostatní parametry jsou pojmenovány ve výše uvedeném seznamu.

1.3 Zemní spojení

V předchozích kapitolách bylo vodivé spojení jedné fáze se zemí nazýváno jednofázovým zkratem, ovšem za předpokladu, že k takovému vodivému spojení došlo v síti provozované s přímo uzemněným uzlem. V sítích provozovaných s izolovaným uzlem, respektive v sítích kompenzovaných či s uzlem zemněným přes odpor nazýváme spojení jedné fáze se zemí zemním spojením. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je většinou několikanásobně větší než proud provozní (nebo je blízký provoznímu proudu) a má indukční charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze relativně malý proud kapacitního charakteru. Zvláštností tohoto proudu je jeho nezávislost na elektrické vzdálenosti od zdroje, tzn. je přibližně stejně veliký ve všech místech sítě.

Sítě vn, tedy převážně distribuční a průmyslové sítě, jak v České republice, tak v řadě ostatních zemí nemají přímo uzemněný uzel. Tyto sítě hustě pokrývají území venkova, měst a okraje měst s průmyslovými závody a jsou ve značné míře vystaveny atmosférickým vlivům, četným přepětím, ale i cizím zásahům. Tyto okolnosti notně ovlivňují jejich bezporuchový chod. Následkem daných okolností vznikají časté izolační vady jednotlivých fází, většinou proti zemi. To vše tedy vede ke vzniku zemního spojení. Hovoříme-li pak o průmyslových a distribučních sítích, je porucha typu vodivé spojení jedné fáze se zemí vždy zemním spojením. Vzhledem k zadání práce proto věnuji popisu zemních spojení odpovídající pozornost.

V sítích s větší rozlohou, kde poruchový zemní proud přesáhne hodnotu asi 5 A vzniká při zemních spojeních zpravidla oblouk, který se rozroste do značných délek a téměř vždy zasáhne sousední fázi. Důsledkem toho jsou pak dvou nebo trojfázové zkraty. Nebezpečným jevem bývají přepětí, která mohou účinkem přerušovaného zemního spojení nastat ve zdravých fázích.

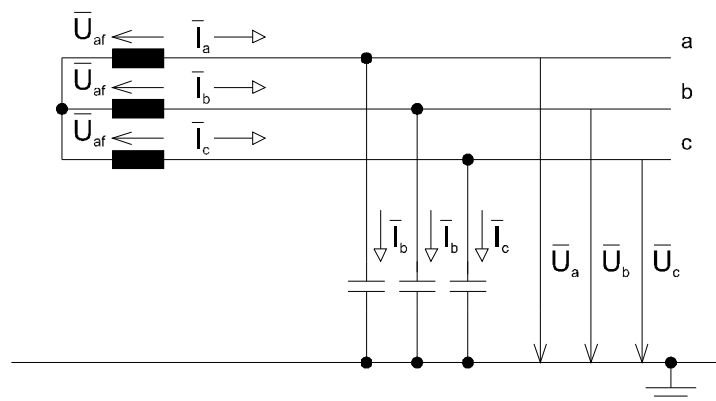
Podle velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení rozlišujeme *odporová zemní spojení*, kde hodnota přechodového odporu je řádově několik set ohmů, respektive *kovová* či *oblouková zemní spojení*, kde hodnota přechodového odporu je zanedbatelná (zpravidla několik ohmů). Podle doby trvání těchto stavů se rozlišují, jak již bylo dříve uvedeno v kapitole 1.1. „Úvod do problematiky zkratů a zemních spojení“:

§ *mžiková* (0,5 s a méně),

§ *krátkodobá* (do 5 min),

§ *přerušovaná*, tj. mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující (vznikají například za větru, stykem pohybujících se částí s vedením, přerušovaným elektrickým obloukem apod.),

§ *trvalá* (trvá až do doby zásahu obsluhy, mnohdy i několik hodin).

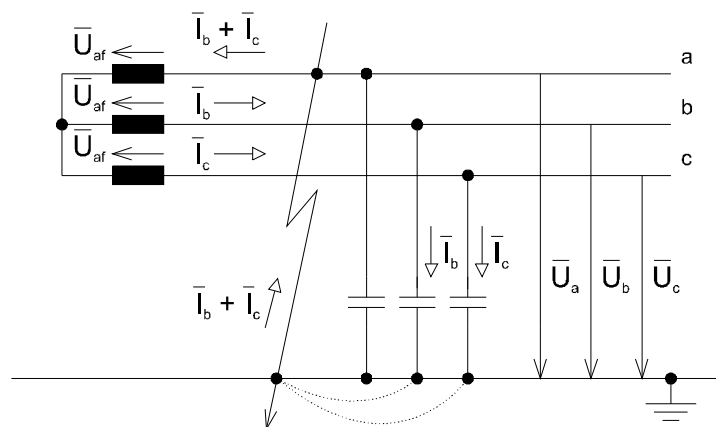


Obr. 1.3. Schématické znázornění sítě s izolovaným uzlem

V izolovaných sítích v ustáleném provozním stavu procházejí kapacitami k zemi kapacitní proudy, jejichž vektorový součet při symetrické síti a symetrickém napětí je roven nule.

$$\bar{I}_a = \bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad (1.2.)$$

V případě, že dojde v takovéto síti ke spojení některé fáze se zemí, uzavírají se kapacitní proudy zdravých fází přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Zemí protékají proudy, které při rozsáhlejší síti mohou dosahovat značných velikostí (Obr. 1.4.).



Obr. 1.4. Schématické znázornění sítě s izolovaným uzlem při zemním spojení

Pro tuto konfiguraci sítě při ideálním zemním spojení a symetrické síti platí následující důležité relace:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (1.3.)$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (1.4.)$$

$$\bar{U}_{bf} = \bar{U}_{cf} = \bar{U}_{ab} = \bar{U}_{ac} \quad (1.5.)$$

Pro napětí U_0 mezi izolovaným uzlem a zemí platí vztah:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{af} = 0 \Rightarrow \bar{U}_0 = -\bar{U}_{af} \quad (1.6.)$$

Přechod od normálního ustáleného chodu sítě k ustálenému stavu se zemním spojením má kmitavý charakter. Napěťových oscilací se účastní celá síť. Hlavními parametry určujícími frekvenci oscilací jsou indukčnosti a kapacity celé sítě včetně napájecích transformátorů.

Pokud poruchový proud nepřekročí stanovenou hodnotu, může být síť s izolovaným uzlem ponechána v provozu. Komplikace nastává při zemním spojení, při němž elektrický oblouk hoří nestabilně, tzn. dochází k hasnutí a opětovné zapalování oblouku (přerušované zemní spojení) s frekvencí sítě. Toto hasnutí a opětovné zapalování se může opakovat i několikrát, což bývá příčinou vzniku přepětových kmitů v celé rozsáhlé elektrické síti.

1.4 Přepětí

Elektrická soustava je charakterizována jmenovitým napětím, tj. efektivní hodnotou sdruženého napětí. Často je udáván parametr *nejvyšší napětí soustavy*, přičemž se připouští napětí o 10 % vyšší (u nejvyšších napájecích hladin o 5 % vyšší) než jmenovité napětí. Jedná se tedy o nejvyšší možnou hodnotu napětí, která se může v soustavě vyskytnout za normálních provozních podmínek.

Napětí jakéhokoliv druhu, které je vyšší než amplituda nejvyššího napětí soustavy nazýváme přepětí. Přepětí mezi fází a zemí vztahujeme k nejvyššímu fázovému napětí, analogicky přepětí mezi dvěma fázemi vztahujeme k nejvyššímu sdruženému napětí. Podle původu mohou být přepětí provozní (označujeme jako vnitřní) či atmosférická (označujeme jako vnější).

1.4.1 Atmosférická přepětí

Vzniká přímým úderem blesku nebo elektrostatickou indukcí ve venkovních vedeních. Bouřková přepětí trvají velmi krátkou dobu (do 100 μ s), mohou však dosáhnout hodnot, které se nedají žádnou izolací zvládnout. Elektrostatickou indukcí vznikají ve vedeních náboje, které se při výbojích mezi mraky uvolňují a formou napětových a proudových vln postupují po vedení na obě strany. Na rozhraní dvou impedancí se jejich velikost mění. Největší vrcholové hodnoty indukovaných přepětí dosahují hodnot až 300 kV. Dle statistik je většina (asi 90 %) atmosférických přepětí v našich krajích menší než 20 kV, jen malá část (asi 1 %) je větší než 100 kV.

Vzniku atmosférických přepětí můžeme zabránit zemnicími lany. Ta se umísťují na vrcholcích stožárů. Jejich hlavním úkolem je stínit fázové vodiče před přímým úderem blesku a snížit indukované přepětí. Zemnicí lana se obvykle spojují se zemí na každém druhém stožáru, přičemž odpor uzemnění stožáru nemá být větší než 15 Ω .

Sítě vn se u nás neprovozují s účinně uzemněným uzlem. Používají se proto takzvaná výběhová lana ve vzdálenosti 600 až 1000 m před rozvodnami.

1.4.2 Provozní přepětí

Provozní přepětí vznikají při zemních spojeních a zkratech, při zapínání a vypínání vypínačů, odpojovačů na rozvodnách, při rezonanci prvků sítě a při některých zvláštních provozních stavech, zejména dlouhých vedeních. Přechodná přepětí mají obvykle oscilační charakter. Ustálená přepětí síťového kmitočtu musí být spolehlivě vypnuta.

Je zřejmé, že problematika provozních přepětí bude vzhledem k příčinám možného vzniku pro tuto práci stěžejní. Je však nutno podotknout, že vznik

provozních přepětí velice úzce souvisí s atmosférickými přepětími. Vzhledem ke značným hodnotám atmosférických, případně indukovaných přepětí velice často dochází k poruchám typu zkrat či zemní spojení.

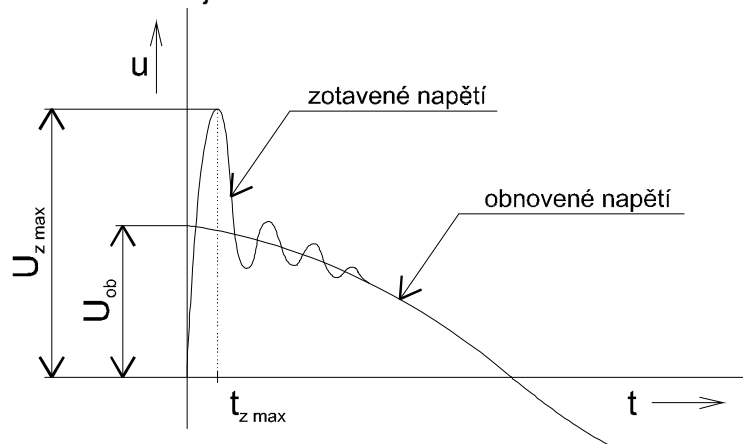
1.4.3 Zotavené napětí

Zotavené napětí je takové napětí, které se objeví mezi vypínačem a sítí bezprostředně po přerušení proudu mezi kontakty vypínače. Na vypínači je obloukové napětí u_v . V každém přirozeném průchodu proudu nulou má oblouk snahu uhasnout. To se projevuje vzrůstem obloukového napětí, vzniká tzv. zhasínací špička. Tato špička roste s klesající hodnotou zkratového proudu a má snahu překmitnout na napětí zdroje.

Výše uvedené potíže provázené vznikem zotaveného napětí přepětového charakteru vznikají především při vypínání kapacitních a induktivních proudů, zejména při vypínání zkratových proudů. Zotavené napětí se skládá z přechodné složky a ze složky o kmitočtu 50 Hz, kterou nazýváme obnovené napětí. Přechodná složka vzniká vyrovnáváním energie elektrického pole kondenzátoru a magnetického pole cívky. Vznikají tak kmity o vlastním kmitočtu daném konfigurací náhradního LC obvodu. Při zanedbání odporu náhradního obvodu lze vlastní kmitočet stanovit dle Thompsonova vztahu:

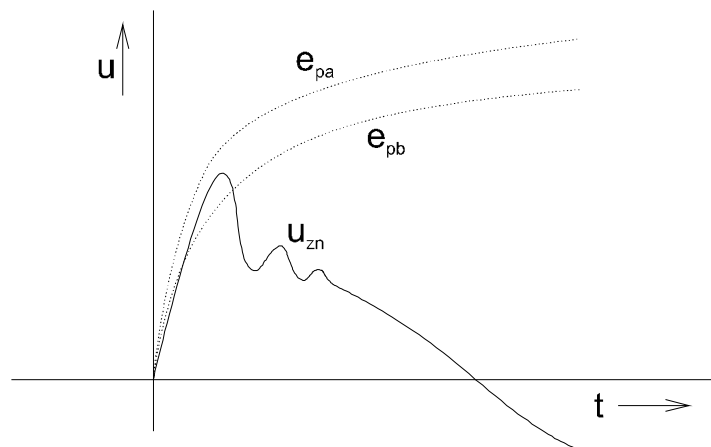
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot p \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (\text{Hz}) \quad (1.7.)$$

V případě složitější konfigurace náhradního LC obvodu může zotavené napětí vykazovat kmity o více vlastních kmitočtech. Možný průběh zotaveného napětí s jedním vlastním kmitočtem je na obrázku 1.5.



Obr. 1.5. Průběh zotaveného napětí

Zotavené napětí je tedy charakterizováno vlastním kmitočtem f_0 , strmostí S danou podílem U_{zmax} a t_{zmax} a konečně překmitem p . Úplné přerušení proudu závisí na napětí mezi kontakty a na zotavující se elektrické pevnosti vypínací dráhy. Elektrická pevnost dráhy závisí na vzdálenosti kontaktů a je definována jako napětí, při kterém vzroste vodivost vypínací dráhy tak, že může vzniknout nový oblouk. Označujeme ji e_p .



Obr. 1.6. Průběh zotaveného napětí a elektrické pevnosti na vypínači při
a) úspěšném vypnutí (e_{pa}) a b) neúspěšném vypnutí (e_{pb})

Dle Obr. 1.6.: stoupá-li zotavené napětí na svorkách vypínače rychleji, než se zotavuje elektrická pevnost e_p , dojde v tomto vypínači k opětovnému zapálení oblouku a vypínač zkratový proud nepřeruší, což zpravidla mívá za následek jeho havárii.

1.5 Vliv zemních spojení na napájecí síť

Zemní spojení jsou v převážné většině oblouková a nastávají buď průrazem izolace kabelu nebo snížením přeskokových napětí vnější izolace, např. nepříznivými atmosférickými podmínkami, dočasným dotykem s jinými předměty (spálené vodiče, ulomené větve stromů apod.). Oblouk bývá většinou nestabilní, tzn. vzniká přerušované zemní spojení. To zapříčiňuje značná přepětí v celé rozsáhlé síti (kapitoly 1.3. a 1.4.), která namáhají izolaci zařízení soustavy, a to mnohokrát po sobě ve velmi krátkém čase. Uvedené mnohonásobné namáhání může izolaci poškodit, i když přepětí nedosahují zkušebního napětí zařízení sítě. Je nutno uvědomit si, že zkušebním napětím o průmyslovém kmitočtu se zařízení zkouší jen jednou za celý život po dobu jedné minuty, kdežto provozní přepětí namáhá izolaci často a několikrát po sobě. Tím se izolace unaví a může se tak poškodit při napětí mnohem nižším než zkušebním.

Jelikož, jak již bylo uvedeno, se přepětí doprovázející zemní spojení rozšíří po celé síti, namáhá tak stovky ba i tisíce izolátorů současně. Každý z těchto izolátorů má určité přeskokové napětí stanovené normou. Sledováním přeskokového napětí dostatečného statistického vzorku izolátorů bychom však zjistily, že každý izolátor má poněkud jiné přeskokové napětí a pouze průměr ze všech měření se přibližně rovná normalizované veličině. Přeskoková napětí mají tedy jistý rozptyl (jejich velikost je rozložena okolo střední velikosti podle Gaussova rozdělení četnosti). Z toho vyplývá, že mezi např. 1000 izolátory o přeskokovém napětí např. 50 kV najdeme několik kusů s přeskokovým napětím pouze 40 kV. Potom přepětí, i když nedosahuje zkušebního napětí, může způsobit mezi velkým počtem izolátorů u některých z nich přeskok, tzn. další zemní spojení.

Navíc je pravděpodobné, že se v síti nacházejí izolačně slabá místa, např. částečně narušené izolátory, které sice správně konají svou funkci při jmenovitém či

nejvyšším napětí soustavy, avšak při jakémkoliv vyšším napětí prorazí. Tímto způsobem odkrývají zemní spojení, potažmo přepětí, slabá místa sítě. Uvedenými úvahami lze vysvětlit přeskoky a poruchy v sítích, aniž bychom připouštěli vznik extrémních přepětí.

Přepětí při zemních spojeních bývá často příčinou zapálení oblouku mezi dvěma fázemi a tím se porucha šíří, mnohdy v určitý druh zkratu (krom jednofázového, ten není ve své podstatě v síti s izolovaným uzlem možný). Vznikají tedy opět problémy nadproudového charakteru.

Jak již bylo dříve uvedeno, síť je možno za určitých podmínek provozovat i při zemním spojení. I v tomto případě je toto zemní spojení nežádoucím jevem. Proto je třeba aplikovat zařízení, které zemní spojení identifikuje a pokud možno co nejrychleji odbaví. V případě provozu sítě s uzlem uzemněným přes odpor reagují citlivé zkratové ochrany.

2. MĚŘENÍ PŘECHODNÝCH JEVŮ

Směrodatnými kritérii pro měření elektromagnetických přechodných jevů jsou jejich základní parametry, a to:

- § *doba trvání přechodného jevu* – doba trvání elektromagnetických přechodných jevů se pohybuje v řádu desetin sekundy, jedná se tedy o velmi rychlý jev,
- § *průběh přechodného jevu* – amplituda a frekvence, většinou i tvar směrodatné veličiny a s tím související harmonické složení.

Konkrétní měření pak může být:

- § analogové
- § digitální

Analogové měření spočívá v okamžité reakci měřicího ústrojí na změnu měřené veličiny s případnou možností uchování naměřeného údaje po určitou dobu. Jako příklad je možno uvést analogové špičkové analyzátory, zapisovače, popřípadě analogové osciloskopy se setrvačností (se speciální obrazovkou), tedy jistou „pamětí“. Z hlediska rychlosti změny směrodatné veličiny při elektromagnetických přechodných jevech zcela odpadá metoda postupného měření bodů tohoto průběhu jakýmkoli analogovým postupem. Nejvýraznější nevýhodou analogového měření je nemožnost trvalého uložení naměřených údajů pro následnou analýzu.

Zřejmou a nezpochybnitelnou výhodou digitálního měření je tedy uchování dat pro další zpracování a vyhodnocení naměřených údajů. V zásadě připadají v úvahu tyto možnosti digitálního měření přechodných jevů:

1. použití specializovaného prostředku pro měření daného úkolu,
2. použití univerzálních prostředků.

Výhodou prvního případu je optimálnost prostředku pro měření konkrétního problému. Z toho vyplývá pravděpodobnost snadné obsluhy a především spolehlivosti chodu při uvažovaném měření. Nevýhodou mohou být značné pořizovací náklady vzhledem k jednostrannosti využití. Použití takovýchto přístrojů je pak z hlediska ekonomické rentability podmíněno co nejčastějším provozem. Do této skupiny měřících přístrojů je možno zařadit tzv. monitory sítě (PRYM firmy EGU Brno, BK550 firmy Elcom Praha, atd.) se schopností registrace velmi rychlých jevů.

V druhém případě je nespornou výhodou použití přístroje, který je využitelný pro více aplikací. Problém pak nastává při vyladění přístroje na požadovanou operaci. Chybné vyladění může vést ke kolizím v průběhu měření. Obsluha bývá zpravidla náročnější a pro analýzu naměřených dat je třeba využít pomocných prostředků (například zpracování naměřených dat počítačem). Tento případ nachází uplatnění při občasném použití přístroje pro měření zadaného úkolu. Do této skupiny měřících přístrojů je možno zařadit například digitální osciloskopy a měřicí počítačové karty.

2.1 Měření přechodných jevů specializovanými prostředky

2.1.1 Přenosný rychlý monitor PRYM firmy EGU Brno

PRYM je navržen pro měření a záznam přechodových jevů a poruchových událostí střídavých napětí a proudů trojfázových sítí nn, vn a vvn. Při zadání nižší rychlosti vzorkování jej lze výhodně použít i pro provádění delších měření ustálených a pomalu proměnných stavů. Realizované způsoby spouštění záznamu umožňují použití monitoru PRYM jak při měření jednorázově připravených experimentů, tak při dlouhodobých sledováních náhodných událostí. Je možno zaznamenat také zvolený časový úsek před vznikem události. V průběhu jednoho měření lze zaznamenat sekvenci až čtyř shodně, případně různě definovaných událostí.

Ve vstupním protokolu je možné definovat tyto druhy zahájení (startu) měření:

- okamžitě,
- po zadaném čase,
- od kombinace externích signálů A a B,
- od kombinace externích signálů A a B po zadaném čase.
- Čas zahájení měření sestává z datumu a časového okamžiku s rozlišením na 1 s.

Změřená data jsou ukládána do kruhově organizovaného paměťového prostoru vyhrazeného první události. Při zaplnění paměťového prostoru přepisují postupně nová data stará. Jakmile se vyskytne vstupním protokolem definovaná první událost, odměří monitor PRYM pro první událost definovaný počet vzorků po události a ukončí záznam do paměťového prostoru vymezeného první události. Zůstane zde nepřepsaná doplňující část s daty naměřenými před vznikem první události (tzv. pretrigger). Po ukončení měření a záznamu první události očekává monitor naplnění podmínky, popřípadě podmínek zahájení měření druhé události. Po splnění podmínek startu druhého měření monitor měří zadané kanály a měřené hodnoty postupně ukládá do paměťového prostoru vyčleněného druhé události. Při výskytu druhé události monitor doměří požadovaný počet vzorků po druhé události. Pak monitor přechází na měření a vyhodnocování třetí, posléze čtvrté události. Podmínku splnění záznamu události lze naprogramovat pro každou ze čtyř událostí samostatně.

Měřená napětí	3 galvanicky oddělených střídavých napětí U_{jm} - 57,73 V - 100 V - 230 V
Přesnost měření	Při $f = 50$ Hz 1 % z U_{jm} Rozlišovací schopnost 7 bitů + znaménko
Měřené proudy	3 střídavé vzájemně galvanicky oddělené proudy I_1, I_2, I_3 Měření proudů vždy pomocí klešťových transformátorů
Jmenovité hodnoty měřených proudů	1 A, 5 A, 30 A, 150 A Klešťový transformátor PRYM s přepínačem 100 A, 300 A, 600 A, 1000 A Klešťové transformátory MT
Maximální vzorkovací frekvence	7,2 kHz
Start měření, stop měření	Dvě externí spouštěcí stejnosměrná napětí A, B
Rozsah a organizace paměti	Kapacita datové paměti 128 kB nebo 512 kB Možnost záznamu až 4

	událostí do paměti minimální prostor pro záznam události 32 kB nebo 128 kB
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	-20 °C až 60 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	85 %
Pracovní poloha	Libovolná, přednostně svislá
Napájení	180 V až 260 V
Příkon	3 VA
Rozměry	150 x 200 x 60 mm
Hmotnost	1 kg

Tab. 2.1 Technické parametry monitoru PRYM

2.1.2 Sdružený síťový analyzátor BK550 firmy Elcom Praha

Sdružený síťový analyzátor BK 550 – měřicí systém pro identifikaci a analýzu rušivých a zpětných vlivů v napájecích sítích, pro měření základních a kvalitativních parametrů elektrické energie, tj. harmonické a meziharmonické napětí a proudů, efektivní hodnoty napětí a proudů, činné, zdánlivé a jalové výkony, kolísání napětí, analýza napětí podle ČSN EN 50160.

Tento výkonný přístroj byl vyvinut a realizován na bázi technologie virtuální instrumentace v souladu s evropskými standardy a IEC doporučeními. Je dodáván v různých provedeních. V analyzátoru BK 550 je v současné době integrováno až devět přístrojů a modul analýzy naměřených dat:

- FFT analyzátor harmonických a meziharmonických pro 4 napěťové a 4 proudové měřené kanály
- osciloskop
- monitor výkonů a energií
- vektorskop
- měření blikání (flickermetr)
- monitor napětí podle ČSN EN 50160
- zapisovač rychlých dějů (transient recorder)
- zapisovač pomalých dějů
- modul zpracování naměřených dat

Kromě těchto měřicích přístrojů obsahuje sdružený analyzátor sítí BK 550 softwarový modul zpracování naměřených dat a software pro komunikaci mezi analyzátozem a UPS. BK 550 používá měřicí kartu firmy National Instruments a jeho firmware je naprogramován ve vývojovém prostředí LabVIEW. Hardware analyzátoru je založen na průmyslovém PC Dewetron 3010 (2010) vybaveném dotykovým aktivním 10,4" TFT displayem.

Z hlediska zadaného úkolu práce je výhodnou funkcí zapisovač rychlých dějů (transient recorder). Může uložit 65535 vzorků pro každý ze čtyř měřených napětí a čtyř měřených proudů po dosažení spouštěcí podmínky. Je možno nastavit až 12 typů spouštěcích podmínek: strmota napětí, strmota proudu, špičková hodnota napětí, špičková hodnota proudu, RMS hodnota napětí, RMS hodnota proudu, RMS hodnota vybrané harmonické napětí, RMS hodnota vybrané harmonické proudu, THD hodnota napětí, THD hodnota proudu, nesymetrie napětí, externí TTL signál. Pro každou podmínku lze nastavit referenční hodnotu a podmínku větší/menší než. Všechny podmínky lze kombinovat logickými funkcemi OR nebo AND. Vzorkovací frekvence závisí na počtu povolených kanálů:

- 2 kanály – 25,6 kHz
- 6 kanálů – 12,8 kHz
- 8 kanálů – 6,4 kHz

V následující tabulce jsou uvedeny důležité technické parametry deklarované výrobcem.

Měřená napětí	4 galvanicky oddělená střídavá napětí do 2 kV
Rozlišení	12 bit
Měřené proudy	4 střídavé vzájemně galvanicky oddělené proudy; měření proudů vždy pomocí klešťových transformátorů
Vzorkovací frekvence	6,4 kHz / kanál
Procesor systému	AMD K6, 2400 MHz
RAM	128 MB
HDD	4 GB
Rozhraní	1 x LPT, 1 x RS-232, Ethernet
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	pro měření 0 °C až 50 °C, pro ukládání -20 °C až 70 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	10 % až 80 %
Napájení	180 V až 265 V
Příkon	50 VA
Rozměry	372 x 238 x 150 mm
Hmotnost	6 kg

Tab. 2.2 Technické parametry sdruženého síťového analyzátoru BK 550

2.2 Měření přechodových jevů digitálním osciloskopem

Osciloskop je v analogové podobě zařízení určené pro snímání a následné zobrazování periodických signálů, popřípadě je možno po krátkou dobu uchovat jednorázovou změnu měřeného signálu, máme-li k dispozici osciloskop s paměťovou obrazovkou. Jak již bylo dříve uvedeno, analogový osciloskop je pro zadaný úkol zcela nevyhovující.

Revoluci v možnostech využití osciloskopů přinesl dynamický vývoj číslicové techniky. Digitální osciloskopy současných konstrukcí jsou schopny nejen ukládat měřená data a tato data opětovně zobrazovat v libovolných intervalech, ale také zpracovávat a analyzovat naměřené údaje rozličnými metodami.

V následujících podkapitolách podrobněji popíšeme digitální osciloskopy firem:

§ LeCroy, typ 9314 A, produkce USA,

§ YOKOGAWA, typ DL 708 E japonské produkce.

2.2.1 Osciloskop LeCroy 9314 A

Firma LeCroy patří se svými produkty v oblasti analogových a digitálních osciloskopů mezi absolutní světovou špičku (spolu s firmami Hewlett-Packard, Tektronix, atd.).

V osciloskopu je pro každý kanál k dispozici jeden 8 bitový A/D převodník s rychlostí vzorkování 100 MS/s, tj. 100 milionů vzorků (samples) za sekundu. Tato násobná architektura A/D převodníků zaručuje souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Srdcem osciloskopu je mikroprocesor firmy Motorola, který provádí výpočty a řídí činnost osciloskopu. Mikroprocesor řídí také bránu rozhraní

GPIO, stejně jako bránu RS-232C pro propojení osciloskopu s plotterem, tiskárnou, se vzdáleným terminálem či jiným pomalým zařízením. Veškerá vnitřní komunikace probíhá po 16 bitové sběrnici.

V následující tabulce jsou uvedeny důležité technické parametry osciloskopu:

Počet kanálů	4 galvanicky oddělené se samostatnými A/D převodníky
Rozlišení	8 bit / kanál
Vzorkovací frekvence „Single shot“	100 MHz / kanál (pro neperiodické signály)
Vzorkovací frekvence „RIS“	10 GHz / kanál (pro periodické signály)
Šířka pásma	400 Mhz
Procesor systému	Motorola (bez bližších informací)
Akviziční paměť (mezipaměť)	1 MB
HDD	neuveďeno, možnost připojení PCMCIA HDD
FDD	3,5 palce 1,44 MB
Rozhraní	GPIO, RS-232C, PCMCIA, LPT Centronics, SCSI
Referenční teplota	20 °C
Teplota okolí	5 °C až 40 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	menší než 80 %
Napájení	180 V až 250 V
Příkon	neuveďeno
Rozměry	neuveďeno
Hmotnost	neuveďeno

Tab. 2.3 Technické parametry osciloskopu LeCroy 9314 A

Je možno zvolit vnitřní nebo vnější časovou základnu. V závislosti na zvolené časové základně je možno nastavit z těchto režimů vzorkování:

- § jednorázový sběr dat (Single shot) – shromážděná data se skládají z nepřerušené řady naměřených hodnot, snímaných ve stejných časových intervalech, přiřazených k jedné události spuštění; tento systém používá většina digitálních osciloskopů,
- § náhodné prokládané vzorkování (Random Interleaved Sampling – RIS) – umožňuje zvýšit efektivní vzorkovací rychlost ze 100 MS/s až na 10 GS/s.
- § režim rolování – jednorázový sběr dat při nastavení časové základny pomalejší než 0,5 s/dílek
- § režim sekvence – rozšířený režim jednorázového sběru dat

Spouštění měření osciloskopu (trigger) určuje dobu, kdy se aktivuje a zastaví sběr dat. Možnosti spouštění lze rozdělit do dvou tříd:

- § EDGE (spouštění hranou) – jednoduché spouštění náběžnou hranou vstupního signálu, spouštění odvozené ze sítě, spouštění s časovým blokováním
- § SMART (inteligentní) – spouštění šířkou impulsu spouštěcího signálu, spouštění šířkou intervalu mezi spouštěcími impulsy, spouštění odvozené od vf signálů (TV, Dropout)

Osciloskop LeCroy zvládá mnoho metod analýzy signálu, z nichž nejdůležitější z hlediska zadané práce je rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation – FFT) pro spektrální analýzu naměřeného signálu. Obrazovku osciloskopu tvoří LCD Display úhlopříčky 9 palců s rozlišením 810 x 696 bodů.

2.2.2 Osciloskop YOKOGAWA DL 708 E

Osciloskopy YOKOGAWA japonské produkce jsou představiteli střední třídy této oblasti měřících přístrojů.

Celá koncepce typu DL 708 E je založena na filosofii tří bloků, přičemž prvním blokem je blok vstupních modulů (Module Block) se vstupními obvody a A/D převodníkem. Je možno připojit až osm vstupních modulů. Obdobně jako u osciloskopu LeCroy, velikou výhodou je přítomnost samostatného A/D převodníku pro každý vstupní modul, zaručující souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Moduly, které jsou k dispozici na katedře elektroenergetiky jsou typu 701852 – „High-resolution, High voltage, isolation module“ – tj. modul se vstupními obvody pro zpracování vysokonapěťových signálů do 850 V. A/D převodník modulu tohoto typu disponuje vzorkovací frekvencí 100 kS/s. Dalším blokem je blok předzpracování a meziuložení získaných dat (Acquisition Block) a konečně třetím blokem je blok finálního zpracování, uložení a zobrazení naměřených dat.

Obdobně jako u osciloskopu je možno zvolit vnější či vnitřní časovou základnu. Spouštění (Trigger) je možno volit jednoduché (Simple) odpovídající režimu „Edge“ osciloskopu LeCroy, popřípadě rozšířené (Enhanced) odpovídající režimu „Smart“ osciloskopu LeCroy.

Osciloskop YOKOGAWA disponuje mnohými metodami analýzy naměřených signálů včetně rychlé Fourierovy transformace pro spektrální analýzu. Obrazovku osciloskopu tvoří barevný TFT LCD display úhlopříčky 10,4 palců s rozlišením 640 x 480 bodů.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry osciloskopu:

Počet kanálů	8 galvanicky oddělených se samostatnými A/D převodníky
Rozlišení	16 bit / kanál
Vzorkovací frekvence	100 kS/s
Šířka pásma	40 kHz
Procesor systému	neuvedeno
Akviziční paměť (mezipaměť)	400 kB/kanál
HDD	2,1 GB
FDD	3,5 palce 1,44 MB
Rozhraní	GPIO, RS-232C, LPT Centronics, SCSI
Referenční teplota	23 °C
Teplota okolí	-20 °C až 60 °C
Relativní vlhkost při 20 °C	20 % až 80 %
Napájení	200 V až 240 V
Příkon	Max. 250 VA
Rozměry	370 x 260 x 183 mm
Hmotnost	6,8 kg

Tab. 2.4 Technické parametry osciloskopu YOKOGAWA DL 708 E

2.3 Měření přechodných jevů počítačovou měřicí kartou

Rozmach digitálních technologií přinesl v oblasti měřící techniky nový fenomén – počítačové měřicí karty. Jedná se o zařízení připojitelné k určité sběrnici dat PC. Počítačová měřicí karta je tvořena blokem vstupů a výstupů (jak analogových, tak digitálních), blokem vstupních obvodů, blokem zpracování vstupního signálu (A/D,

respektive D/A převodníkem s podpůrnými obvody) a blokem rozhraní pro zmíněné připojení k PC.

Z hlediska měření analogových veličin lze počítačové měřicí karety zásadně rozdělit dle použitého typu A/D převodníku. Další dělní je možno provést na základě konkrétních technických parametrů jak použitého A/D převodníku, tak ostatních funkčních bloků karty.

Veškeré zpracování naměřené veličiny (popřípadě více veličin) provádí PC, z čehož vyplývá určitá nevýhoda z hlediska kompaktnosti měřícího přístroje jako celku.

V následujících podkapitolách je rozbor těchto měřících karet:

§ Tedia PCA 1228 české produkce,

§ ADAB, taktéž české produkce,

§ National Instruments NI PCI-6115 produkce USA.

2.3.1 Měřicí karta Tedia PCA 1228

Multifunkční PC karta Tedia PCA-1228 je zařízením pro běžné i rozsáhlé aplikace s vyšší vzorkovací frekvencí v rámci výrobních řad Tedia pracující v prostředí operačních systémů Windows 95, 98, a NT.

Karta je vybavena vyrovnávací pamětí typu FIFO (tzn. fronta dat typu „první dovnitř - první ven“ – „First In First Out“) jež je v cestě toku informací mezi A/D převodníkem a sběrnici počítače. V případě PCA-1228 umožňuje vyrovnávací paměť při obvyklém způsobu přenosu dat pětsetdváctkrát redukovat frekvenci volání přerušování a karta, resp. více karet pak umožňuje realizovat celkově až 250000 měření za sekundu.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřicí karty:

Počet kanálů	8 multiplexovaných
Rozlišení	12 bit
Vzorkovací frekvence	80 kS/s
Vyrovnávací paměť	2 kB typu FIFO
Vstupní impedance	10 MΩ
Vstupní rozsah napětí	±5 V, ±10 V
Zesílení vstupního zesilovače	1 x, 2 x, 4 x, 8 x, 16 x (programově nastavitelné)
Doba převodu	12,5 μs
Integrovaná nelinearita	Neuvedeno
Diferenciální nelinearita	Neuvedeno
Teplotní drift	Neuvedeno
Rozhraní pro připojení k PC	ISA (Industry Standard Architecture, 16 bit)

Tab. 2.5 Technické parametry karty Tedia PCA 1228

Karta disponuje jedním A/D převodníkem o vzorkovacím kmitočtu 80 kHz. Multiplexer vstupů řídí mikropočítač podporující až 128 měřených kanálů. Pro případ ještě většího počtu měřených signálů nebo nároků na vyšší vzorkovací frekvenci je karta vybavena tzv. „multicard master-slave“ logikou (pomůcka pro synchronizaci chodu více karet) umožňující efektivní rozšiřování systému paralelním řazením více karet. Karta PCA-1228 však umožňuje i jednoduché rozšíření základních 8

analogových vstupů na 32 externím multiplexerem OPT-832 v provedení koncového panelu - svorkovnice. Součástí je také D/A převodník, kterým se však nebudu detailněji zabývat, jelikož v zadaném úkolu nenachází uplatnění. Software pro komunikaci s kartou, pro zpracování a prezentaci naměřených dat není součástí sady. To samozřejmě představuje zvýšení nákladů na pořízení měřicí soupravy.

2.3.2 Měřicí karta ADAB

Měřicí karta ADAB je produktem někdejšího agrokombinátu Slušovice a je zařízením srovnatelných parametrů s popisovaným produktem firmy Tedia. Je však staršího provedení, tudíž veškerý software pro komunikaci, pro zpracování naměřených dat a pro jejich prezentaci je vytvořen v prostředí systému MS DOS. Oproti výše uvedenému konkurenčnímu výrobku je ovšem tento software součástí měřicí sady. Software karty umožňuje mnoho metod zpracování naměřeného signálu, mimo jiné spektrální analýzu rychlou Fourierovou transformací (FFT).

Karta disponuje jedním A/D převodníkem pracujícím se vzorkovací frekvencí 27 kHz. Dále pak 16 multiplexovanými vstupy, přičemž doba ustálení analogového řetězce na 1 LSB při přepnutí kanálu činí asi 10 μ s (při zesílení vstupního zesilovače $A = 1$).

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřicí karty:

Počet kanálů	16 multiplexovaných
Rozlišení	12 bit
Vzorkovací frekvence	27 kS/s
Vyrovnávací paměť	neuvedeno
Vstupní impedance	100 M Ω
Vstupní rozsah napětí	$\pm 2,5$ V, ± 5 V, ± 10 V
Zesílení vstupního zesilovače	1 x, 10 x, 100 x (programově nastavitelné)
Doba převodu	30 μ s
Integrovaná nelinearita	maximálně 1,5 LSB
Diferenciální nelinearita	maximálně 1,5 LSB
Teplotní drift	maximálně 60 ppm/K
Rozhraní pro připojení k PC	ISA (Industry Standard Architecture, 16 bit)

Tab. 2.6 Technické parametry karty ADAB

Na rozdíl od konkurenčního výrobku, technická dokumentace karty ADAB zahrnuje velice detailní rozbor chyb měření, jež by měl být součástí každého produktu tohoto druhu. Společnou vlastností je dispozice jednoho A/D převodníku. Může tedy nastat kolize v případě potřeby souvztažnosti absolutních amplitud a fází měřených signálů.

2.3.3 Měřicí karta National Instruments NI PCI-6115

Firma National Instruments (NI) je jedním z předních špičkových výrobců počítačových měřících karet. Typ NI PCI-6115, i když nejjednodušší produkt firmy NI v oblasti měřících karet, je svými technickými parametry s výše uvedenou konkurencí nesrovnatelný.

Technologie NI PCI-6115 koresponduje s nejnovějšími směry v oblasti vnitřní stavby PC. Součástí karty je paměť typu SDRAM, která napomáhá efektivnímu sběru

dat. Paměť je organizována jako FIFO. A/D převodník pracuje se vzorkovacím kmitočtem 10 MHz s dvanáctibitovým rozlišením. K dispozici jsou 4 analogové vstupy se samostatnými A/D převodníky. Tato koncepce zaručuje souvztažnost absolutních amplitud a fází měřených signálů. Každý vstup má k dispozici programovatelný frekvenční filtr pracující v rozmezí 50 až 500 kHz.

Následující tabulka shrnuje důležité technické parametry měřicí karty:

Počet kanálů	4 nezávislé se samostatným A/D převodníkem
Rozlišení	12 bit
Vzorkovací frekvence	10 MS/s na kanál
Vyrovnávací paměť	32 MS s možností rozšíření na 64 MS
Vstupní impedance	Neuvedeno
Vstupní rozsah napětí	$\pm 0,2$ V, $\pm 0,5$ V, ± 1 V, ± 2 V, ± 5 V, ± 10 V, ± 20 V, ± 42 V
Zesílení vstupního zesilovače	Neuvedeno
Doba převodu	Neuvedeno
Integrovaná nelinearita	Neuvedeno
Diferenciální nelinearita	Neuvedeno
Teplotní drift	Uváděn zvlášť pro jednotlivé rozsahy
Rozhraní pro připojení k PC	PCI (32 bit)

Tab. 2.7 Technické parametry karty National Instruments NI PCI-6115

Oproti zvyklostem českých výrobců, NI udává chyby měření přístroje v poněkud jiné formě. Popisuje chyby v závislosti na zvoleném rozsahu měření. Vzniká tak serióznější obraz předpokládaného měření. Jak již bylo výše řečeno, výrobek firmy NI je s ostatními dvěma nesrovnatelný co do technických parametrů. Vzhledem k těmto skutečnostem a věhlasnosti výrobce se tyto disproporce nemalou měrou promítají do ceny výrobku.

2.4 Srovnání měřících metod pro měření přechodných jevů

Z důvodu značné odlišnosti filosofii popsaných metod měření elektromagnetických přechodných jevů při zkratech a zemních spojeních není možnost absolutního srovnání uvedených přístrojů. Proto provedeme nejprve srovnání jednotlivých přístrojů dané kategorie, posléze zvolíme ze tří nejvhodnějších zástupců jednotlivých kategorií nejvhodnější měřící metodu.

Jelikož měření bude probíhat trojfázově, tzn. budou měřena tři fázová napětí a tři proudy tekoucí fázovými vodiči, bude hlavním kritériem počet měřících kanálů (alespoň 6). Pro možnost měření dalších důležitých veličin, zejména napětí a proudu kompenzační tlumivkou při zemním spojení, je dispozice dalších měřících kanálů výhodou. V úvahu bude brán také počet A/D převodníků na měřící kanál.

Významným kritériem bude vzorkovací kmitočť, a to takový, který zaručí správné navzorkování měřeného signálu včetně nejvyšší směrodatné harmonické (zvolený vzorkovací kmitočť musí být větší nebo roven dvojnásobku frekvence dané nejvyšší směrodatné harmonické) a nejrychleji odehrávajících se významných procesů. Navrhovaná souprava má pouze zachycovat abnormální stavy, konkrétně dobu vzniku a odeznění, popřípadě dobu vypnutí poruchového stavu. Účelem není harmonická analýza či podrobné zkoumání průběhu obvodových veličin při přechodném ději. V drtivé většině výskytů poruch v oblasti distribučních a průmyslových sítí, tedy v oblasti vn, se jedná o zemní spojení. Druhou nejčastější poruchou je dvoufázový zemní zkrat s pravděpodobností výskytu asi 20 %. Následuje

dvoufázový zkrat s pravděpodobností výskytu asi 10 %. Uvedené poruchy jsou směrodatné zvláště pro venkovní vedení vn, která jsou objektem zadaného měření. Abnormální stav se v případě zmíněných poruch projevuje již v první harmonické napětí významným vzrůstem či poklesem amplitudy. Z těchto důvodů nebude požadována vysoká vzorkovací frekvence. Avšak pro variabilnost měřicí soupravy volíme minimální vzorkovací frekvenci 4 kHz, což umožňuje snímání nejvyšší harmonické měřené veličiny, odpovídající čtyřicetinásobku frekvence základní harmonické, tj. 50 Hz.

Dalším důležitým kritériem bude rozlišení (též rozlišovací schopnost) A/D převodníku, související s chybou kvantování. Jedná se o nejmenší možnou změnu výstupní veličiny vyvolanou změnou vstupního čísla mezi dvěma sousedními hodnotami a vztahenou k plnému rozsahu vyjádřenému největší možnou hodnotou vstupního čísla. Běžným rozlišením A/D převodníků je 8 bitů, tj. 256 úrovní pro kvantování navzorkované veličiny. Toto rozlišení je zároveň pro danou aplikaci zcela postačující.

Podstatným kritériem bude také dispozice nadstandardního vybavení měřicího přístroje (ostatní vybavení). Jedná se zejména o prostředky pro analýzu naměřených signálů, jako například možnost FFT a jiných matematických funkcí. Dále pak hardwarové i softwarové prostředky pro komunikaci s PC a pro následující zpracování a uchování naměřených dat. V úvahu jsou brány i prostředky pro zpracování a uchovávání naměřených dat integrované do měřicích přístrojů.

Neméně významným, ba dokonce v praxi nejvýznamnějším kritériem, bude poměr užitných vlastností konkrétního přístroje vzhledem k jeho pořizovací ceně.

Souhrn kritérií pro výběr konkrétního měřicího systému:

1. počet měřicích kanálů - minimálně 6 (vyhovuje, nevyhovuje)
2. vzorkovací frekvence alespoň 4 kHz na kanál (vyhovuje, nevyhovuje)
3. rozlišení A/D převodníku alespoň 8 bitů (vyhovuje, nevyhovuje)
4. ostatní vybavení (bodování 1 - nejhorší až 5 - nejlepší)
5. poměr užitná hodnota/cena (příznivý, nepříznivý)

Kritérium	Druh měřicího přístroje		
	Specializované prostředky		
	PRYM	BK 550	-
počet měřicích kanálů	vyhovuje	vyhovuje	-
vzorkovací frekvence	nevyhovuje	vyhovuje	-
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	-
ostatní vybavení	1 bod (1 až 5 bodů)	5 bodů (1 až 5 bodů)	-
Poměr užitná hodnota/cena	příznivý	nepříznivý	-
	Digitální osciloskopy		
	LeCroy 9314 A	YOKOGAWA DL 708 E	-
počet měřicích kanálů	nevyhovuje	vyhovuje	-

vzorkovací frekvence	vyhovuje	vyhovuje	-
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	-
ostatní vybavení	5 bodů (1 až 5 bodů)	4 body (1 až 5 bodů)	-
Poměr užitná hodnota/cena	nepříznivý	příznivý	-
	Počítačové měřicí karty		
	Tedia PCA 1228	ADAB	NI - PCI 6115
počet měřících kanálů	vyhovuje	vyhovuje	nevyhovuje
vzorkovací frekvence	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
rozlišení A/D převodníku	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
ostatní vybavení	2 body (1 až 5 bodů)	4 body (1 až 5 bodů)	5 bodů (1 až 5 bodů)
Poměr užitná hodnota/cena	příznivý	příznivý	nepříznivý

Tab. 2.8 Přehled vstupů pro výběr nejvhodnější měřicí metody

2.4.1 Stručná charakteristika kladů a záporů jednotlivých metod

Sdružený síťový analyzátor BK 550 je přístroj úzce specializovaný pro tzv. monitoring sítě, tzn. sledování a záznam důležitých síťových ukazatelů. Jeho uplatnění v jiných aplikacích měření je proto poměrně problematické. Jelikož zadané měření využije jen zlomek funkcí přístroje, jeví se být jeho použití vzhledem k velmi vysokým pořizovacím nákladům (cca 700000 Kč) značně předimenzované.

Využitelnost digitálního osciloskopu YOKOGAWA DL 708 E je daleko širší než v případě síťového analyzátoru BK 550. Přístroj sdružuje celky pro měření, ukládání, zpracování i zobrazení naměřených dat, přičemž kapacita paměti pro ukládání těchto dat je značná (HDD 2,1 GB). Samozřejmostí je možnost komunikace s PC pro další zpracování dat. Díky svým rozměrům a hmotnosti je přístroj velice kompaktní. Pořizovací cena však není v žádném případě zanedbatelná, i když výrazně nižší, než u BK 550.

Měřicí počítačová karta ADAB je v podstatě obdobou měřících bloků obou výše uvedených přístrojů. Blok pro ukládání, zpracování a prezentaci naměřených dat zde tvoří hardware PC a jeho periferie. Za určitých předpokladů tedy mohou být parametry zpracování a prezentace dat mnohem kvalitnější, v případě potřeby prostor pro archivaci dat podstatně větší. Z důvodu nutnosti použití PC a potřebných periférií je však tento měřicí systém relativně nekompaktní. Je tedy nutno pečlivě zvážit podmínky měření. Uvážíme-li však skutečnost, že PC postačujících parametrů je v dnešní době součástí téměř všech oblastí lidského života, je bezkonkurenční výhodou měřicí karty její nízká pořizovací cena. Ta se ve třídě karet typu ADAB a Tedia PCA 1228 pohybuje v řádu jednotek tisíců Kč.

3. ANALÝZA A ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Navržený měřicí systém má být součástí zařízení pro monitorování sítě. Cílem monitorování sítě je záznam všech abnormálních jevů, tj. stavů vymykajících se stanoveným normálním provozním poměrům. Z důvodu omezené kapacity paměťového media zařízení, k němuž je měřicí karta systému připojena, není rozumné archivovat všechna data naměřená monitorovacím systémem. Má smysl archivovat pouze sekvence měření, ve kterých je zmíněný abnormální jev zachycen.

Z tohoto důvodu je třeba aplikovat takový softwarový prostředek, který zajistí spolehlivou detekci abnormálního stavu, tzn. dobu jeho počátku a konce, daného odezněním tohoto stavu, respektive jeho vypnutím. Je tedy nutno určit kritérium, na jehož základě lze spolehlivě konstatovat normální či abnormální stav. Toto kritérium může být založeno na principu změn protékajících proudů fázemi, popřípadě na principu změn fázových napětí, respektive sdružených napětí, tedy vektorového rozdílu fázových napětí.

Detekce abnormálního stavu pomocí sledování fázových proudů nemusí být, a zpravidla není, v oblasti elektroenergetiky distribučních a průmyslových sítí zcela spolehlivá. Hodnoty provozních proudů jsou v této oblasti značně proměnlivé v relativně krátkých časových úsecích. Druhým problémem, v tomto případě závažnějším, je fakt, že poruchové proudy jsou často svou hodnotou velmi podobné provozním proudům, zvláště pak při zemním spojení.

Řešením tedy bude detekce abnormálních stavů založená na sledování fázových napětí. Změny fázových napětí v závislosti na odběru spotřebitelů nejsou na rozdíl od změn velikosti protékajících proudů radikální. I když dojde k poklesu či vzrůstu fázových napětí v závislosti na zatížení soustavy, je tato změna daná maximálními tolerancemi pro případ vzrůstu i poklesu velikosti napětí. Jsou-li provozní proudy v závislosti na odběru maximální, tj. je-li odběr spotřebitelů maximální, musí být sníženo napětí v tolerovaných mezích. Není-li tato podmínka splněna, neodpovídá dimenze vedení maximálním provozním nárokům a může pak dojít k chybné detekci.

Každá z poruch popisovaných kapitole 1 se projevuje jistou změnou napěťových poměrů, a to vzrůstem či poklesem napětí trvalejšího charakteru, popřípadě přepětím, které doprovází vznik některých poruchových stavů. Při vypínání všech druhů poruch je určité přepětí pravidlem z důvodu LC charakteru vypínaného obvodu. Jelikož zdaleka nejčastější poruchou v oblasti venkovních vedení distribučních a průmyslových sítí je zemní spojení, dochází téměř vždy k přechodným přepětím při vzniku poruchy i při vypínání poruchy.

Pro lepší orientaci a shrnutí předchozích úvah uvedeme dva zásadní důvody výběru napětí, jakožto veličiny pro detekci poruchy v síti:

- § za normálních provozních podmínek se napětí mění pouze ve známých dovolených mezích, pokud ne, neodpovídá dimenze vedení požadavkům zátěže,
- § změna napětí dlouhodobého či krátkodobého charakteru doprovází téměř každou poruchu v oblasti distribučních a průmyslových sítí.

3.1 Možnosti detekce poruchy analýzou měřených napětí

Na základě výše uvedených myšlenek lze začátek a konec drtivé většiny poruch v síti detekovat analýzou fázových napětí.

Nejjednodušším principem detekce poruchového stavu je detekce přepětí, je-li však toto přepětí doprovodem uvažované poruchy. Nastavíme-li maximální povolenou odchylku napětí, pak porovnáváním této odchylky s okamžitou hodnotou měřeného napětí zjistíme první hodnotu přepětí u vzorku, který dané podmínce neodpovídá. Takovým způsobem však zjistíme n-tou hodnotu periody přepětí, která neodpovídá dané podmínce. Je však pravděpodobné, že několik předchozích vzorků je již součástí uvažovaného přepětí. Vzhledem k zadané podmínce jsou ovšem tyto vzorky korektní. Značnou nevýhodou uvedeného algoritmu je neschopnost detekovat poruchu projevující se poklesem maximální hodnoty napětí v několika periodách. Takovýto průběh napětí vnímá algoritmus v každém jeho vzorku jako korektní.

Další možností detekce poruchového stavu je porovnávání okamžitých hodnot měřených napětí, tedy jednotlivých vzorků kanálů měřících fázová napětí s hodnotami modelovaného průběhu napětí, respektive tří napětí trojfázové soustavy. Tímto principem detekujeme již první hodnotu průběhu přepětí, i když je tato hodnota menší než maximální napětí za normálního provozního stavu. Další výhodou tohoto principu je možnost aplikace pro detekci zkratů, projevujících se poklesem fázových napětí porušených fází či disproporcí předpokládaného průběhu napětí v trojfázové soustavě (viz. základní napěťové poměry v trojfázové síti při zkratech v kapitole 1.).

Druhý popisovaný princip vyžaduje modelování tří referenčních napětí. Je nutno stanovit soustavu tří analytických rovnic srovnatelných se skutečnými průběhy napětí. Naměřené hodnoty je tedy třeba proložit křivkou a tu následovně aproximovat funkcí sinus (respektive cosinus). Vzorkovaný signál je možno rekonstruovat, je-li splněna podmínka Shannon – Kotělnikovova teorému. Tohoto principu využívají D/A převodníky, ovšem jeho programování by bylo značně komplikované.

Vše v těchto kapitolách bylo čerpáno z [1].

Doplňující literatura:

[1] Osladil, M.: Diplomová práce, VŠB-TU, FEI, 2002

S KONTROLNÍ OTÁZKY TEORETICKÉ

1. (2 body) Jaké jsou příčiny vzniku přechodných jevů ?
2. (2 body) Jak dělíme zemní spojení z hlediska doby trvání ?
3. (1 bod) Co je **nárazový zkratový proud** ?
4. (3 body) Jak vznikají zemní spojení a jaký mají vliv na napájecí síť ?
5. (2 body) Jaké jsou základní možnosti měření přechodných jevů ?
6. (8 bodů) Jaké jsou možnosti konkrétních aparatur pro měření přechodných jevů, jejich výhody, nevýhody, vzájemné srovnání.funkce virtuálního přístroje? Popište základní kategorie těchto přístrojů.
7. (2 body) Jaké jsou možnosti detekce přechodných jevů v naměřených datech ?

SHRNUTÍ

Nové poznatky:

- přechodných jev, jejich dělení a příčiny
- zemní spojení a zkrat
- přepětí
- možnosti měření přechodných jevů různými prostředky
- jejich vyhodnocení
- kritéria pro volbu měřicí aparatury

Nové pojmy :

přechodný jev, zemní spojení, zkrat, přepětí, digitální osciloskop, měřicí karta.

Ñ KLÍČ K TEORETICKÝM OTÁZKÁM

1. Kapitola 1.2
2. Kapitola 1.3
3. Kapitola 1.2.2
4. Kapitola 1.5
5. Kapitola 2
6. Kapitoly 2.1 - 2.4.1
7. Kapitoly 3, 3.1

\$ AUTOKONTROLA

Pokud jste získali minimálně 10 bodů z teoretických otázek, můžete pokračovat dále ve studiu. V opačném případě si ve zkráceném čase příslušné kapitoly znovu nastudujte.