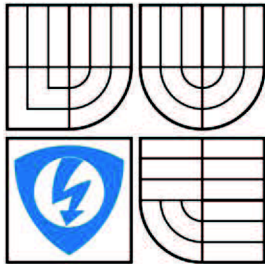


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NEKONTAKTNÍ INDIKÁTORY PORUCHOVÝCH STAVŮ NA VN VEDENÍ

CONTACTLESS FAULT INDICATOR FOR MV LINES

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. DRAHOMÍR PERNICA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2011

ABSTRAKT

V disertační práci jsou rozpracovány teoretické poznatky o metodách indikace zemních spojení do tvaru použitelného pro návrh nekontaktního indikátoru poruchových stavů na VN vedení. Tento návrh se skládá ze snímačů elektrického a magnetického pole, vyhodnocovací jednotky a softwarové podpory. Využitím indikátorů, které budou rozmístěny ve VN síti, se předpokládá dosažení větší efektivity při odstranění poruchy a lepší ochrany osob a majetku.

KLÍČOVÁ SLOVA: zemní spojení, indikátor zemního spojení, detekční metody.

ABSTRACT

The theoretical findings about methods of earth faults indication are elaborated in this thesis into form, which is applicable to design contactless indicator of failure states on MV lines. This design contains electromagnetic field sensors, evaluation device and software support. The higher effectiveness of clearing of fault and better health and asset protection is supposed by using of these indicators.

KEYWORDS: earth fault, earth fault indicator, detection methods.

Bibliografická citace práce

PERNICA, D. *Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 161 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....

Poděkování

Dovoluji si na tomto místě vyjádřit poděkování pracovníkům distribučních společností E.ON a.s., ČEZ a.s., PRE a.s. a ZSE a.s., kteří umožnili nasazení nekontaktních indikátorů na svých zařízeních a podíleli se na provádění zkoušek. Firmě MEgA a.s. za podporu na projektu nekontaktních indikátorů a všem dalším spolupracovníkům a vedoucímu práce.

V Brně, 31. května 2011.

Drahomír Pernica

Obsah

Seznam symbolů	8
Seznam zkratk	8
1 Úvod	10
1.1 Spolehlivost distribučních sítí	10
2 Poruchy v distribučních sítích	12
2.1 Poruchové stavy VN vedení	12
2.2 Zemní spojení	13
2.3 Statistika ERÚ – nejdůležitější provozní události	16
3 Zemní spojení, obecná teorie	17
3.1 Metoda souměrných složek	17
3.2 Základní vztahy pro kompenzovaný systém	18
3.3 Metody pro detekci zemních spojení	21
3.3.1 Aktivní	22
3.3.2 Pasivní – ustálený stav	22
3.3.3 Pasivní – přechodný děj	27
3.3.4 Švédská neutrála	30
3.3.5 Metoda částečných výbojů	31
3.3.6 Metody detekce zemních poruch - shrnutí	31
3.4 Systém přizemňování fáze (shunting)	32
3.5 Opětné zapínání	32
4 Přehled dosavadního vývoje ochran a indikátorů	33
4.1 Současné ochrany	33
4.2 Využití součtových elektromagnetických polí	34
4.2.1 Příklad indikátoru využívající součtové elektromagnetické pole	36
4.3 Využití elektromagnetických polí jednotlivých vodičů	39
4.4 Patentové nároky	40
5 Cíle dizertační práce	43
6 Analýza řešení nekontaktního indikátoru	44
6.1 Analýza sítě se zemním spojením pomocí simulací na modelu	44
6.2 Metody a vlastnosti vhodné pro aplikaci v nekontaktním indikátoru poruchových stavů	51
6.2.1 Nadproud a zkrat	51
6.2.2 Metoda první půlperrody	51
6.2.3 Metody závislé na připínání odporníku	51
6.2.4 Metoda průběžného sledování veličiny G_0	52
6.2.5 Metoda průběžného sledování páté harmonické veličiny I_0	52
6.2.6 Sledování neúspěšného opětného zapnutí	53
6.2.7 Otočení směru zemního spojení	53
6.2.8 Konec zemního spojení	54
6.2.9 Ostatní stavy VN sítě	54
6.2.10 Získání online údajů	54
6.3 Korekce působení okolních fází	54
6.4 Realizace měřicí sestavy	56
6.4.1 Snímače	56
6.4.2 Požadavky na vyhodnocovací jednotku	58
6.4.3 Požadavky na výběr řídicího procesoru vyhodnocovací jednotky	59

6.5	Řešení firmware	62
6.6	Programové vybavení	70
6.6.1	System nasazení indikátorů	78
6.7	Porovnání průběhů	79
6.7.1	Porovnání výsledků záznamů z plánovaných zemních spojení	79
6.8	Měření simulovaných zemních spojení v konkrétní síti VN	84
6.8.1	Cíl a popis simulace zemních spojení	84
6.8.2	Tabulkové vyhodnocení	84
6.8.3	Detailní vyhodnocení	85
6.8.4	Závěr z měření simulovaných zemních spojení	90
6.9	Příklady měření u uživatelů	91
6.9.1	Statistické vyhodnocení měření v ČEZ a.s. a ZSE a.s.	91
6.9.2	Použití nekontaktních indikátorů při zkouškách v PRE a.s.	93
Závěr		97
Literatura		99
Příloha 1. Užité vzor		101
Příloha 2. Patentový spis		106
Příloha 3. Teoretické předpoklady pro výpočet elektromagnetického pole		111
A	Elektrické pole pod vedením	111
B	Magnetické pole	113
C	Simulace v prostředí MATLAB	114
Příloha 4. Průběhy při simulovaných ZS v reálné síti VN		117
Příloha 5. Přehled norem		159

Seznam symbolů

C_1, C_2, C_3	kapacita fází 1,2,3 vůči zemi	[F]
E_x	intenzita elektrického pole v horizontální rovině	[V/m]
G_0	konduktance netočivých složek napětí a proudu	[S]
G_1, G_2, G_3	svodová vodivost jednotlivých fází 1,2,3	[S]
H_x	intenzita magnetického pole v horizontální rovině	[A/m]
I_0	netočivá složka proudu	[A]
I_1, I_2, I_3	proud jednotlivých fází 1,2,3	[A]
I_C	kapacitní proud	[A]
I_F	proud zemním spojením	[A]
I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}	proud jednotlivých fází 1,2,3	[A]
$P_{\epsilon 0}$	činný výkon netočivých složek napětí a proudu	[W]
P_{z0}	zdánlivý výkon netočivých složek napětí a proudu	[VA]
Pf_0	činitel výkonu netočivých složek napětí a proudu	[-]
U_0	netočivá složka napětí	[V]
U_1, U_2, U_3	fázová napětí jednotlivých fází 1,2,3	[V]
U_{BAT}	napětí baterie	[V]

Seznam zkratk

A/D	Analogově číslicový převodník
COM	Původní označení sériového rozhraní počítače
DMA	Direct Memory Access, přímý přístup do paměti bez nutnosti činnosti jádra procesoru při přenosu dat
ERÚ	Energetický regulační úřad
FEPR0M	Flash Erasable Programmable Read Only Memory, elektricky programovatelná a mazatelná paměť, drží obsah i po odpojení napájecího napětí
FFT	Fast Fourier Transform, rychlá Fourierova transformace
FTDI	Future Technology Devices International, výrobce součástek pro komunikaci USB
FW	Firmware – programové vybavení nejnižší úrovně (např. mikroprocesoru)
GSM	Globální systém pro mobilní komunikaci
GPRS	General Packet Radio Service, mobilní datová služba

I/O	Vstup/Výstup
IZS	Indikátor zemních spojení
JTAG	Joint Test Action Group je standard definovaný normou IEEE 1149, který se používá při testování plošných spojů, programování pamětí, procesorů apod.
MATLAB	MATrix LABoratory, program pro výpočty
MTN	Měřicí transformátor napětí
MTP	Měřicí transformátor proudu
MW	Microsoft Windows, operační systém
NOZ	Neúspěšné opětné zapnutí
OS	Operační systém
OZ	Opětne zapnutí
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PSPICE	Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, program pro simulaci elektrických obvodů
RAM	Random Access Memory, paměť s přímým přístupem, po odpojení napájení ztrácí svůj obsah
RTC	Real Time Clock, hodiny reálného času
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
VN	Vysoké napětí
WDT	Watchdog timer, čítač pro hlídání běhu programu
ZS	Zemní spojení

1 Úvod

Distributoři elektrické energie věnují velkou pozornost tomu, aby dodávky elektrické energie probíhaly s co možná nejmenším počtem výskytů poruchových stavů a následných přerušení, které mohou mít také nepříznivé ekonomické dopady. Nejrozsáhlejší distribuční sítě jsou tvořeny venkovními vedeními o nominální hodnotě napětí 22kV, kde mohou být použity nekontaktní indikátory poruchových stavů.

Nejčastěji se vyskytujícím poruchovým stavem ve VN sítích s kompenzačními tlumivkami je zemní spojení. Sít' s touto poruchou může být provozována se zvýšeným rizikem přechodu do dalších stavů poruchových a následným přerušením dodávky elektrické energie zákazníkům. Vedle výše zmíněného zvýšení rizika přechodu zemního spojení do dalšího poruchového stavu dochází při určitých typech zemních spojení ke zvýšení možnosti vzniku požáru proudem protékajícím místem zemního spojení a ohrožení osob a zvířat krokovým napětím a dotykovým napětím. Tyto skutečnosti se ještě více zesilují v důsledku připnutí odporníku pro snazší detekci místa vzniku zemního spojení.

Pro minimalizaci ekonomických ztrát, pro snížení rizika ohrožení osob a zvířat plynoucích ze zemních spojení a pro dosažení co možná nejkratšího času k omezení nepříznivých vlivů zemních spojení se používají různé postupy a prostředky. Jde o techniku přizemnění („šentování“), švédskou neutrálu, používání dálkově ovládaných úsečníků a recloserů, inteligentní řízení připínání primárního nebo sekundárního odporníku ke kompenzační tlumivce.

Při vzniku zemního spojení je důležitá rychlá a spolehlivá identifikace místa vzniku zemního spojení. K tomuto účelu je možné využít indikátory poruchových stavů, které mohou být vybaveny dálkovým přenosem informací do centra, kde poskytnou potřebné informace pro následná dispečerská rozhodnutí. Konečné určení místa zemního spojení a odstranění příčin se děje při prohlídce postiženého úseku.

1.1 Spolehlivost distribučních sítí

Distributoři elektrické energie se při dodávkách elektrické energie řídí kromě zákonných předpisů také Pravidly provozování distribučních soustav (PPDS), která schvaluje Energetický regulační úřad [8]. Spolehlivost a plynulost distribuce (dle PPDS) je jednou z nejdůležitějších charakteristik elektřiny dodávané zákazníkům distribučních soustav. Obecný (systémový) standard plynulosti distribuce předepsaný pro tento účel ERÚ je definován následujícími ukazateli (příloha č. 2 PPDS, Metodika určování plynulosti distribuce elektřiny a spolehlivosti prvků distribučních sítí):

- SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) četnost přerušení distribuce elektřiny daná počtem přerušení dodávek nebo distribuce elektřiny za kalendářní rok, (počet přerušení/rok/zákazníka),

- SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) souhrnná doba trvání všech přerušení distribuce elektřiny v minutách za kalendářní rok (minut/rok/zákazníka),

- CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*) průměrná doba trvání jednoho přerušení distribuce elektřiny v minutách v kalendářním roce (minut/přerušení).

Předmětem sledování těchto ukazatelů jsou nahodilá (poruchová/neplánovaná) a plánovaná přerušení distribuce s trváním delším než 3 minuty (tzv. dlouhodobá přerušení distribuce ve smyslu ČSN EN 50160).

Ve vztahu k běžným zákazníkům jsou důležité meze, ve kterých se tyto ukazatele pohybují. Plynulost distribuce je závislá nejen na spolehlivosti prvků, ale i na organizaci činností při plánovaném i nahodilém přerušení distribuce, vybavení technickými prostředky pro lokalizaci poruch (zde opět nachází uplatnění indikátory poruchových stavů), způsobu provozu uzlu sítě, možnosti náhradního napájení apod., je důležité sledovat i tyto okolnosti.

Vyhláška č.540/2005 Sb. vydaná ERÚ o kvalitě dodávek elektřiny a souvisejících služeb v elektroenergetice stanovuje základní pravidla, kterými se musí řídit provozovatelé distribučních soustav (včetně provozovatele přenosové soustavy) a obchodníci s elektřinou při poskytování svých služeb zejména ve vztahu ke svým zákazníkům. Vyhláška č. 540/2005 Sb. stanovuje postupy při řešení situací, které mohou nastat v průběhu odběru elektřiny zákazníkem, vymezuje standardní řešení, definuje garantované standardy kvality dodávky a služeb v elektroenergetice, určuje lhůty a náhrady za nedodržení standardů.

Další normativní odkazy se zabývají popisem technických prostředků a pravidly jejich používání. Je možné např. použít doporučení normy ČSN 33 3070 Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí.

Důležitou součástí normativních předpisů je také ochrana zdraví a života. Např. PNE 33 0000-1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem v DS dodavatele elektřiny.

Přehled normativních odkazů vztahujících se k řešené problematice nekontaktních indikátorů poruchových stavů je v příloze 5.

Tab. 1 obsahuje délky vedení VN na hladinách 22kV a 35kV v ČR. Celková délka všech vedení (kabelových a venkovních) na území ČR je 75666km. [26] [27] [28] Vznik poruchových stavů není možné vyloučit při takových délkách vedení a k jejich snadnější detekci a lokalizaci je možné využít také nekontaktních indikátorů.

Tab. 1. Délky vedení VN

VN vedení (22kV,35kV)	Celková délka vedení [km]	Délka venkovních vedení [km]	Délka kabelových vedení [km]	Poznámka
ČEZ Distribuce, a.s.	50141	¹⁾	¹⁾	[28]
E.ON Distribuce,a.s.	21745	18631	3114	[27]
PREDistribuce, a.s.	3780	¹⁾	¹⁾	[26]
Celkem	75666			

¹⁾ Údaj v citovaných materiálech nezveřejněn

2 Poruchy v distribučních sítích

V distribuční soustavě se vyskytuje celá řada prvků, které mohou přejít do poruchového stavu a to většinou nahodile. V případě vzniku poruchy nastupuje činnost ochran, které zamezí případným vznikům škod a ohrožení života. Mezi poruchové stavy patří zkrat, přetížení, nadpětí, podpětí, nesouměrnost proudů a napětí, zemní spojení, zpětný tok výkonu, ztráta buzení, snížení či zvýšení frekvence.

Ochranu můžeme rozdělit podle různých kritérií. Např. podle chráněného objektu: vedení (venkovní, kabelové, trolejové), přípojnice, transformátor, generátor, motor, kondenzátorová baterie, vypínač aj. Dále podle druhu poruchy, podle měřené veličiny, podle doby působení a podle konstrukce.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení, které jsou tématem této práce, obsahují charakteristické rysy ochran. Zapojením indikátorů do vyhodnocovacího systému je nejenom řešení již vzniklých poruchových stavů, ale i predikce těchto stavů na základě analýzy dějů, které ještě není nutné označit za poruchové.

V navazujících kapitolách jsou uvedeny skutečnosti, které jsou v přímém vztahu k řešení nekontaktních indikátorů poruchových stavů na VN vedení.

2.1 Poruchové stavy VN vedení

Poruchové stavy VN vedení je možné rozdělit na:

- Nadproud:
 - o Zkrat
 - o Přetížení
- Zemní spojení
- Nadpětí
- Podpětí
- Nesymetrie.

Zkraty jsou nejvýznamnější a nejvíce se vyskytující poruchou. Zkraty mohou být jednofázové zemní, dvojfázové zemní, třífázové zemní, dvojfázové, trojfázové. V sítích s neúčinně uzemněným uzlem, se jednofázové zemní zkraty označují jako zemní spojení (ZS). Zkratové proudy svými účinky vyvolávají tepelné, světelné (oblouk), silové namáhání dalších technických prvků, čímž může docházet k dalším následným poruchám a poškozením těchto prvků. Vedení s poruchou typu zkrat je vždy vypínáno dostatečně rychlou ochranou, která zamezí nežádoucím účinkům zkratových proudů.

U venkovních vedení, kde mohou nastat přechodné poruchy, se používají automatiky opětovného zapnutí (OZ). Účelem automatiky OZ je vytvořit krátkou beznapěťovou prodlevu vypnutím vedení (např. 0,1s až 0,6s) a po této prodlevě provést opětovné zapnutí vedení. Případné hoření oblouku přechodného zkratu zanikne a dodávka elektrické energie pokračuje. V případě, že zkrat dále trvá, je vedení odpojeno a následuje dohledání a oprava na místě poruchy. Existují i automatiky OZ, které mohou pracovat s více cykly beznapěťové prodlevy a následného zapnutí [kap.3.5].

Pro výpočet zkratových proudů lze použít postupu uvedeného v ČSN EN 60909.

Přetížení může svými dlouhodobými účinky způsobit podobné tepelné namáhání technických prvků jako zkrat. Způsobuje přehřívání izolace či snížení mechanické pevnosti. Míra poškození závisí na teplotě přehřátí nebo na jejím časovém integrálu.

Zemní spojení v rezonančně uzemněných soustavách je označováno jako stav, při kterém musí být bezodkladně zahájeno jeho vymezení a také jako stav nežádoucí. Provoz se ZS je dále možný až do doby vyhledání místa poruchy a v některých případech i déle v závislosti na dimenzování celého systému, zvláště pak zhášecí tlumivky. Oteplení zhášecí tlumivky nesmí přesáhnout dovolené oteplení. Standardně 2h, 8h a trvalý provoz pro zatížení jmenovitým proudem. V každém případě je nutné místo poruchy zajistit tak, aby nedošlo k ohrožení života a majetku. Při provozu se ZS hrozí také zvýšené riziko možnosti následných poruch, zvláště pak přechod do dvojitého zemního spojení (dvojfázového zkratu). Indikaci zemního spojení zajistí indikátory zemních spojení a zemní ochrany.

Zemní spojení, jako nejčastěji se vyskytující poruchový stav v distribučních sítích, je možné rozdělit podle velikosti přechodového odporu a délky jeho trvání.

Zemní spojení rozdělené podle velikosti přechodového odporu např. [23]:

- kovové (do několika Ω)
- obloukové (10-ky až 100-ky Ω)
- odporové (100-ky až 1000 Ω)
- vysokoimpedanční (nad 1000 Ω).

Zemní spojení rozdělené dle délky trvání např. [23]:

- mžikové (do 0,5s)
- velmi krátké (do 5s)
- krátkodobé (od 5s do 10min)
- trvalé (nad 10min)
- přerušované (rychlý sled mžikových, velmi krátkých nebo krátkodobých ZS).

Přepětí na venkovních vedeních je způsobováno bleskem, provozními stavy (manipulace s vypínači a odpojovači, zkraty, ZS). Často se s přepětími setkáváme u obloukových zemních spojení a to obvykle na opačném konci sítě než kde se nachází místo ZS. Ochranu před přepětími zajišťují bleskojistky, jiskřiště, svodiče přepětí.

Nesouměrnost proudů a napětí - snižuje kvalitu dodávky elektrické energie a je nebezpečná zejména pro elektrické točivé stroje, kdy může zpětná složka proudu způsobit přehřívání rotorového vinutí

2.2 Zemní spojení

Zemní spojení v sítích VN je nejčastěji se vyskytující stav, který ve většině případů předchází následným poruchovým stavům typu zkrat. Udává se [17], že na zemní spojení připadá 85% až 95% všech poruchových stavů v kompenzovaných sítích. VN

sítě v ČR mají většinou zemnění uzlu vinutí transformátoru provedeno přes Petersenovu tlumivku.

Obr. 1 ukazuje velmi častou příčinu vzniku zemního spojení pádem stromu do vedení. Na vině je většinou nepříznivé počasí (vítr, bouřka, sníh, námraza), ale i neodborné působení člověka (kácení). Obr. 2 ukazuje vznik zemního spojení, jehož příčinou je vada či únava materiálu. Zvláště nebezpečné je zemní spojení přes konzolu a sloup, pokud je konzola neuzemněná, které může vést až k destrukci konzoly a pádu sloupu. Na dalším obrázku (Obr. 3) jsou vidět světelné a tepelné účinky oblouku, při experimentálním obloukovém zemním spojení. Vodič spadlý na zem může být častou příčinou požárů a bezprostředního ohrožení života (Obr. 4). Obr. 5 ukazuje různé možnosti ptačích zábran, čímž se zamezí nejen vzniku poruchových stavů, ale především poranění či smrti zvířat.



Obr. 1. Vznik zemního spojení pádem stromu do vedení



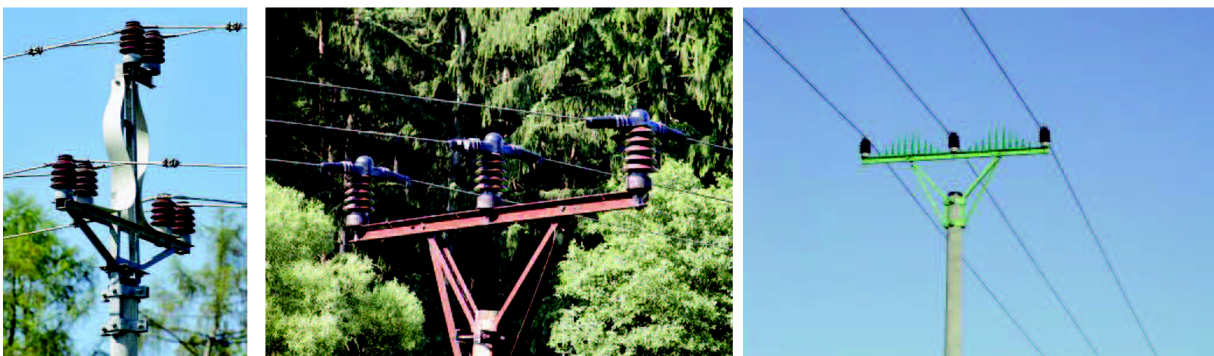
Obr. 2. Přetržení úchyty lana, důsledky zemního spojení přes konzolu a sloup



Obr. 3. Experimentální obloukové zemní spojení ve vzduchu a v kabelu



Obr. 4. Utržený vodič VN v dotyku se zemí



Obr. 5. Zábrany pro ochranu ptáků

2.3 Statistika ERÚ – nejdůležitější provozní události

Energetický regulační úřad ve svých pravidelných měsíčních zprávách o provozu popisuje také nejdůležitější provozní události, které v daném měsíci nastaly. Tab. 2 obsahuje výsledky za sledované období od května 2009 do května 2010 [35]. I když jsou v tabulce uvedeny pouze nejzávažnější případy poruch, je vidět, že vlivem nepříznivého počasí (vítr, bouřka, sníh, námraza) dochází k pádu stromů nebo větví do vedení s následným vyvoláním poruchy. Nejnebezpečnějšími poruchami jsou však ty, které jsou vyvolány cizím zaviněním. Zde dochází k rozsáhlým škodám na majetku i zdraví osob. I u takovýchto případů je možné signalizovat ZS. Poruchy vyvolané vadnou součástí nebo únavou materiálu často vyvolávají také ZS.

Tab. 2. Počet událostí ve sledovaném období

Událost	5/ 09	6/ 09	7/ 09	8/ 09	9/ 09	10/ 09	11/ 09	12/ 09	1/ 10	2/ 10	3/ 10	4/ 10	5/ 10
Vítr (100km/h)	1		1			2		1					
Bouřka, blesk	1	5	3	1									2
Námraza, sníh						1			3	1			
Povodeň		1											
Nepříznivé počasí	1											1	
Činnost zvěře	1						1						
Chybná manipulace	1												
Cizí zavinění				1	2	2	2	1	2	1	3	2	1
Vadná součást		1	2	3	1	1	4			2	2	1	
Porucha VN		2	1	2	2			1		1	2	4	1
Porucha VVN					1							1	1

Vadná součást – izolátor, kabelová koncovka, chybné působení ochrany, vadný kabel, vadná bleskojistka, vnitřní porucha transformátoru, utržený vodič, vadný vaz, malá vzduchová vzdálenost.

Cizí zavinění – autonehoda (náraz do sloupu), úraz el. proudem, krádež oleje, kabel poškozený výkopovými pracemi, poškození vodiče stělbou, nechtěné zapnutí, neodborné kácení stromu, chybná manipulace, spadlý plech do vedení, krádež.

Exemplární případy, které se vyskytly v souvislosti s provozem distribuční soustavy 22kV jsou uvedeny také v [29].

3 Zemní spojení, obecná teorie

Z hlediska provozování distribučních sítí dle způsobu spojení uzlu vinutí transformátoru se zemí dělíme distribuční sítě na izolované, kompenzované a odporově uzemněné.

Soustava s izolovaným uzlem

V soustavách s izolovaným uzlem při zemním spojení vzroste napětí uzlu vůči zemi na napětí fázové a napětí zdravých fází vzroste vůči zemi na napětí sdružené. Poruchový proud je dán součtem kapacitních proudů zdravých fází. Místem zemního spojení bude protékat proud, jehož hodnota závisí na rozsahu sítě. Při vzniku zemního spojení a při přerušovaném zemním spojení mohou vznikat značně vysoká přepětí. Sítě s izolovaným uzlem jsou provozovány při kapacitním proudu sítě do 20A.

Soustava kompenzovaná

V soustavách s kompenzovaným uzlem je mezi uzlem a zemí připojena tlumivka (Petersenova cívka), která způsobí omezení kapacitních proudů zemních spojení. Při zemním spojení protéká touto tlumivkou induktivní proud a uzavírá se přes místo zemního spojení s poškozenou fází. Induktivní proud má v místě zemního spojení opačný směr, takže kapacitní proud je kompenzován. Zemním spojením pak prochází pouze zbytkový proud. Zbytkový proud je malý a vzniklý elektrický oblouk zemního spojení rychle uhasíná. Proto se takto použité tlumivky nazývají zhášecí tlumivky. Při zemním spojení vzroste napětí uzlu vůči zemi na napětí fázové a napětí zdravých fází vzroste vůči zemi na napětí sdružené.

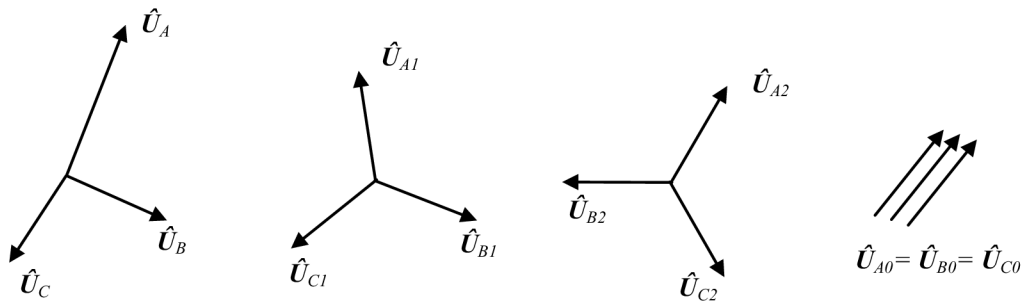
Podrobný popis situace při zemních spojeních v kompenzovaných sítích je rozebrán v kapitole 3.3.

Soustava odporově uzemněná

V soustavách s odporově uzemněným uzlem je mezi uzlem a zemí připojen činný odpor. Odporově uzemněny jsou především kabelové sítě, kde hodnoty kapacitních proudů sítě převyšují meze pro kompenzovanou síť. V ČR dle doporučení [23] je to 450A. Odpor v uzlu omezuje proudy při zemním spojení (zkratu) a tlumí přepětí vznikající při zemních poruchách. Odporově uzemněnou síť nelze provozovat při jednofázovém zemním spojení, protože se v tomto případě jedná o jednofázový zkrat, který musí být v krátkém čase vypnut.

3.1 Metoda souměrných složek

Pro analýzu nesouměrných stavů v elektrických sítích je možné s výhodou použít metodu souměrných složek (Ch.L.Fortescue 1918), která je založena na náhradě trojfázové soustavy nesymetrických fázorů složením tří soustav symetrických fázorů. Jde o soustavu souslednou (positive sequence component) označenou „1“, o soustavu zpětnou (negative sequence component) označenou jako „2“ a soustavu netočivou (zero sequence component) označenou jako „0“. Je možné se také setkat s označením „abc“ nebo „+“ pro souslednou a „acb“ nebo „-“ pro zpětnou soustavu.



Obr. 6. Nesymetrická soustava, sousledná, zpětná a netočivá soustava.

$$\begin{aligned}\hat{U}_A &= \hat{U}_{A1} + \hat{U}_{A2} + \hat{U}_{A0} \\ \hat{U}_B &= \hat{U}_{B1} + \hat{U}_{B2} + \hat{U}_{B0} \\ \hat{U}_C &= \hat{U}_{C1} + \hat{U}_{C2} + \hat{U}_{C0}\end{aligned}\quad (1)$$

Pokud zvolíme za referenční fázi A, můžeme přepsat soustavu rovnic (1) do tvaru :

$$\begin{aligned}\hat{U}_A &= \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \\ \hat{U}_B &= a^2 \hat{U}_1 + a \hat{U}_2 + \hat{U}_0 \\ \hat{U}_C &= a \hat{U}_1 + a^2 \hat{U}_2 + \hat{U}_0\end{aligned}\quad (2)$$

$$\text{kde } a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{a} \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} .$$

Rovnice (2) je možné zapsat v maticovém tvaru

$$\mathbf{U}_F = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_{SL}\quad (3)$$

Pomocí inverzní matice \mathbf{A} je možné přejít k souměrným složkám

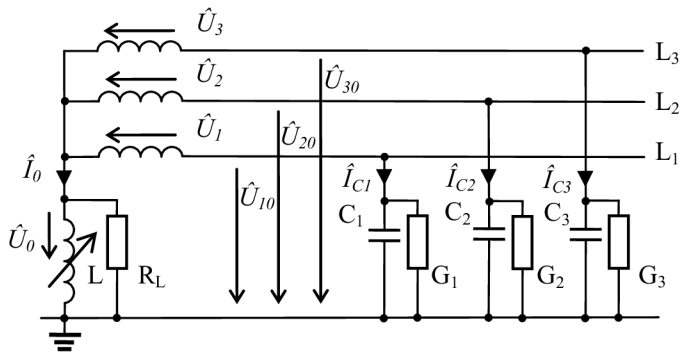
$$\mathbf{U}_{SL} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{U}_F\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\hat{U}_1 &= \frac{1}{3}(\hat{U}_A + a\hat{U}_B + a^2\hat{U}_C) \\ \hat{U}_2 &= \frac{1}{3}(\hat{U}_A + a^2\hat{U}_B + a\hat{U}_C) \\ \hat{U}_0 &= \frac{1}{3}(\hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C)\end{aligned}\quad (5)$$

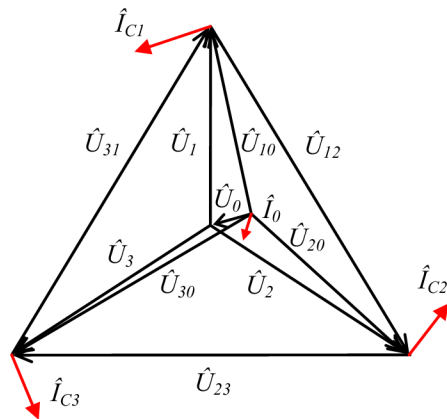
3.2 Základní vztahy pro kompenzovaný systém

Ve zjednodušeném schématu (Obr. 7) nahrazuje Petersenovu tlumivku paralelní kombinace indukčnosti (L) a rezistance (R_L). Tato konfigurace je ekvivalentním paralelním obvodem cívky a stejná kombinace může také reprezentovat obvod pro případ, kdy připojujeme odporník paralelně k Petersenově tlumivce nebo k pomocnému vinutí cívky. Kapacity C_1 , C_2 a C_3 jsou kapacity fází vůči zemi. Vodivosti G_1 , G_2 a G_3 reprezentují svodový odpor. Hodnoty kapacit i odporů, mohou být rozdílné pro různé

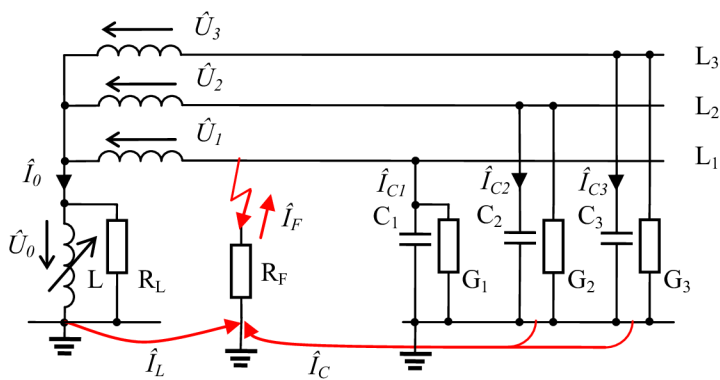
fáze. To znamená, že systém není symetrický. Vzájemné kapacity mezi fázemi neuvažujeme, zanedbáme také všechny činné ztráty.



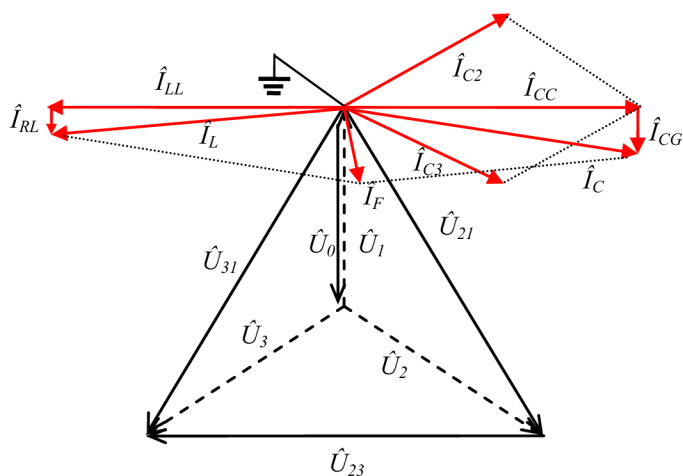
Obr. 7. Schéma sítě s Petersenovou tlumivkou



Obr. 8. Fázorový diagram napětí pro systém bez poruchy



Obr. 9. Schéma sítě s Petersenovou tlumivkou při zemním spojení



Obr. 10. Fázorový diagram napětí a proudů pro systém se zemním spojením

Systém bez zemního spojení

$$3\hat{I}_0 = \hat{I}_{C1} + \hat{I}_{C2} + \hat{I}_{C3} \quad (6)$$

$$3\hat{U}_0 = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_3 = 0 \quad (7)$$

Admittance fáze L_1

$$\hat{Y}_{L1} = G_1 + jB_1 = G_1 + j\omega C_1 \quad (8)$$

V symetrickém systému bez zemního spojení je proud $\hat{I}_0=0$ a uzel systému je na potenciálu země $\hat{U}_0=0$. Nesymetrie v systému však produkuje malý proud uzlem a vysouvá uzel tohoto systému z ideálního potenciálu země. Viz Obr. 8 fázorový diagram.

Systém s kovovým zemním spojením, $R_F=0$.

Schéma systému se zemním spojením ukazuje Obr. 9 a fázorový diagram Obr. 10.

Poruchový proud I_F

$$\hat{I}_F = \hat{I}_L + \hat{I}_C = (\hat{I}_{LL} + \hat{I}_{RL}) + (\hat{I}_{C2} + \hat{I}_{C3} + \hat{I}_{CG}) \quad (9)$$

$$\hat{I}_{CG} = \hat{I}_{G2} + \hat{I}_{G3} \text{ suma svodových proudů}$$

V ideálním stavu při zanedbání činných ztrát je poruchový proud redukován na nulu $\hat{I}_F=0$.

Pro případ kdy je

$$|\hat{I}_L| = |\hat{I}_C| \text{ systém je vykompenzován} \quad (10)$$

$$|\hat{I}_L| > |\hat{I}_C| \text{ systém je překompenzován} \quad (11)$$

$$|\hat{I}_L| < |\hat{I}_C| \text{ systém je podkompenzován} \quad (12)$$

$$\hat{U}_0 = -\hat{U}_1, \hat{U}_{10} = 0, \hat{U}_{20} = \hat{U}_{21}, \hat{U}_{30} = \hat{U}_{31}, \hat{I}_F = -3\hat{I}_0 \quad (13)$$

Admitance fáze L₁

$$\hat{Y}_{L1} = \frac{1}{R_F} + G_1 + j\omega C_1 \quad (14)$$

Proud protékající zhášecí tlumivkou

$$\hat{I}_L = -j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} \quad (15)$$

Indukčnost zhášecí tlumivky

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (16)$$

Pokud je R_F>0, je

$$|\hat{U}_0| < |\hat{U}_1| \quad (17)$$

Zhášecí tlumivka je plynule regulovatelná tak, aby se induktivní proud mohl měnit podle velikosti zemního proudu, který je v dané síti dán celkovou kapacitou galvanicky spojeného vedení sítě. Při připnutí nebo odpojení části vedení je nutné přeladění tlumivky. Změna indukčnosti zhášecí tlumivky se dříve prováděla pomocí přepínání odboček, nyní se provádí změna magnetického obvodu motoricky a tato činnost je zautomatizována. Zhášecí tlumivka většinou obsahuje také pomocné výkonové vinutí, které při zatížení rezistorem slouží ke zvýšení činné složky proudu zemního spojení pro spolehlivou činnost ochrany při vyhledávání vývodu s poruchou. Připnutí rezistoru, při kterém dochází ke zvýšení poruchového proudu, trvá několik sekund (1-3s). Rezistor je připnut s časovým zpožděním v rozmezí 0,5-10s.

3.3 Metody pro detekci zemních spojení

Metod pro detekci zemních spojení existuje celá řada [5],[6],[7],[9],[10] a vypovídací schopnost těchto metod závisí na typu zemnění uzlu vinutí transformátoru se zemí. Z tohoto hlediska mohou být sítě izolované a neúčinně zemněné (přes velkou impedanci, např. Petersenova tlumivka).

Metody detekce zemních spojení je možné rozdělit na:

- aktivní
- pasivní

- ustálený stav
- přechodný děj

U aktivních metod se provádí injektáž dalších signálů do sítě se zemním spojením. Pasivní metody využívají k detekci měření napětí a proudů, které vznikají v síti při přechodných dějích nebo ustálených stavech.

3.3.1 Aktivní

Aktivní metody detekce zemního spojení využívají k lokalizaci zemního spojení injektovaný signál, který může mít konstantní frekvenci nebo se frekvence injektovaného signálu může měnit.

K injektování konstantního signálu se využívá napěťových transformátorů, které při výskytu zemního spojení začnou přenášet přídavný generovaný signál do obvodu. Tento signál s konstantní frekvencí se uzavírá přes místo poruchy do smyčky. Postižené vedení a místo zemního spojení je pak určeno stopováním tohoto signálu. Nevýhodou této metody je nutnost využití zvláštního zařízení pro generování signálu, jehož úroveň je omezena kapacitou napěťového transformátoru. S výhodou je možné použít generátorů signálu HDO např. o frekvenci 216,66Hz, čímž odpadá nutnost použití dalšího vnějšího zdroje signálu. Pravděpodobnost správné lokalizace místa poruchy touto metodou je u vysoko-impedančních zemních spojení nebo obloukových zemních spojení s přerušovaným obloukem malá. Vliv na funkčnost má také celková kapacita soustavy, u soustav s vysokou kapacitou se snižuje přesnost lokalizace.

U kompenzovaných sítí, kde často dochází k vysoce-impedančním zemním spojení, se využívá proudového signálu s rezonanční frekvencí. Dojde-li k nízkoimpedančnímu zemnímu spojení, injektuje se do obvodu konstantní signál s frekvencí 70Hz. Tyto signály jsou poté měřeny na každém vývodu a je porovnáváno jejich poměrné tlumení v jednotlivých vývodech. Pokud dojde na vývodu k útlumu signálu většímu než 17%, je tento označen za vývod postižený poruchou.

3.3.2 Pasivní – ustálený stav

3.3.2.1 Amplituda fázového napětí a netočivé složky napětí

Zemní poruchy v kompenzovaných systémech snižují fázové napětí porušené fáze a vysouvají napětí uzlu systému a ve většině případů dojde ke zvýšení netočivé složky napětí v systému. Jak netočivá složka napětí, tak fázové napětí, jsou používány pro detekci zemních poruch. Pro vysokoimpedanční poruchy však může být změna napětí jen velmi malá. Pro zvýšení citlivosti se někdy doporučuje detekovat zemní poruchy využitím přírůstků netočivé složky napětí.

Dalším problémem je, že netočivá složka napětí má téměř stejnou hodnotu v celém systému. Pokles napětí způsobený netočivou složkou proudu protékající netočivými složkami impedance linek a transformátorů jsou velmi malé. Jinými slovy, metody detekce zemních poruch založené na napětí nejsou selektivní. Lze jimi detekovat zemní poruchu, ale nelze určit, kde porucha nastala. Pak je nutné manuálně nebo automaticky vypínat a opět zapínat každý vývod v rozvodně a tím lokalizovat místo poruchy. Tyto krátké výpadky v dodávce energie pak reprezentují problém v její kvalitě. Z těchto důvodů se používá metod založených na napětí jako startovací funkce pro selektivní metody detekce zemních poruch v kompenzovaných distribučních sítích.

Sledování amplitudy netočivé složky napětí je používáno jako popudové veličiny. Obvykle při výskytu $U_0 > 30\% U_f$ hovoříme o vzniku zemního spojení.

3.3.2.2 Porovnávání amplitudy netočivých složek proudu

Metoda vyhodnocuje amplitudy netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Je-li vlivem poruchy překročena přednastavená hodnota, začnou se porovnávat amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. Jako postižené vedení je poté označeno to, u kterého je amplituda maximální. Nevýhodou této metody je její nízká citlivost a nutnost velmi přesného měření netočivé složky proudu obzvláště v případech, kdy se kapacita jednoho vývodu blíží celkové kapacitě soustavy (délka jednoho vedení značně převyšuje délku ostatních vedení) nebo při vysokoimpedančních zemních spojeních.

Lepších výsledků je možné dosáhnout aplikací výpočetní metody EdF s názvem DESIR, která vytváří vektorový součet všech netočivých reziduálních proudů a porovnává hodnoty jejich vertikálních projekcí na osu kolmou k tomuto součtovému proudu. Tím se rozpozná vedení s největší činnou složkou netočivého proudu, což je vedení s poruchou. Tato metoda zaručuje rozpoznání zemních spojení s odporem do cca 20 k Ω .

3.3.2.3 Porovnávání fáze netočivé složky proudu

Metoda porovnává fáze netočivých složek proudů jednotlivých vývodů, u vývodu se zemním spojením je fáze netočivé složky proudu oproti ostatním nepostiženým vývodům opačná. Obsahuje-li síť velmi krátká vedení (malá netočivá složka proudu), je citlivost metody velmi nízká a může dojít i k chybné lokalizaci. Korektní vyhodnocení také komplikuje proudová nesymetrie nebo vysokoimpedanční zemní spojení.

3.3.2.4 Porovnání skupin amplitud a fáze netočivých složek proudů

Přesnost lokalizace zemního spojení se zvýší kombinací těchto dvou předcházejících metod. V první fázi se vyberou vývody s nejvyšší amplitudou netočivé složky proudu, u těchto vytypovaných vývodů se poté provede porovnání fáze netočivé složky proudu. Vývod, který má opačnou fázi netočivé složky proudu, je označen jako postižený. Budou-li mít všechny vývody stejnou fázi, došlo k poruše v rozvodně. Dojde-li k vysokoimpedančnímu zemnímu spojení v soustavě, která obsahuje vedení krátkých délek, není ani tato kombinace metod stoprocentně funkční a může tak dojít k chybnému označení postiženého vývodu

3.3.2.5 Směr toku jalového výkonu netočivých složek

U postiženého vývodu v izolovaných sítích předbíhá netočivá složka proudu netočivou složku napětí o 90°, u nepostiženého vývodu se netočivá složka proudu opoždí o 90° oproti napětí. Tato metoda vyhodnocuje tok jalového výkonu netočivých složek, respektive jeho znaménka. Je-li znaménko jalového výkonu na vývodu záporné, označí se vývod jako postižený a naopak, je-li znaménko jalového výkonu kladné, je vývod nepostižený. Výhodou proto je, že není nutné výkon porovnávat s ostatními vývody, ale problém se správnou lokalizací u poruch s malou hodnotou netočivého proudu přetrvává.

3.3.2.6 Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu ($\Delta I \sin \varphi$)

V bezporuchovém stavu se pro jednotlivé vývody vybere referenční signál netočivé složky proudu společně s fázovým posunem netočivé složky napětí a po vzniku zemního spojení se vyhodnotí jejich změna. Postižený vývod je poté ten, u něhož byla změna $\Delta I \sin \varphi$ maximální.

3.3.2.7 Metoda detekce činné složky netočivého proudu (činného výkonu netočivé složky), wattmetrická metoda

Jelikož nelze zcela vykompenzovat poruchový proud, a vždy přetrvává činná složka netočivého proudu, lze na rozdíl od metody určení toku jalové složky netočivého proudu touto metodou lokalizovat poruchu i v kompenzovaných sítích. U postiženého vývodu je činná složka netočivého proudu popřípadě činný výkon netočivé složky vyšší a má opačný směr než u ostatních vedení. Vliv na správnou funkci metody mají vhodně navržené (jistící) přístrojové transformátory proudu a velikost činné složky netočivého proudu.

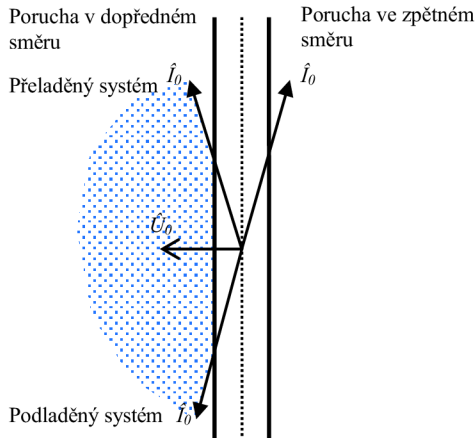
Můžeme detekovat zemní poruchu v dopředném směru a poruchu ve zpětném směru. V kompenzovaných systémech se může směr jalové části proudu I_0 při poruše v dopředném směru měnit v závislosti na podmínkách ladění. Směr pak závisí na velikosti netočivé složky kapacit neporušených linek a velikosti indukčnosti Petersenovy tlumivky.

Hodnotu činné složky $P_{\varepsilon 0}$ můžeme porovnat s kladnou a zápornou prahovou hodnotou ($+\varepsilon$ a $-\varepsilon$). Pak $P_{\varepsilon 0} < -\varepsilon$ indikuje poruchu v dopředném směru a $P_{\varepsilon 0} > +\varepsilon$ indikuje poruchu ve zpětném směru. Pracovní charakteristiku wattmetrické metody uvádí Obr. 11. Pracovní charakteristika pro wattmetrickou metodu.

Činná složka I_0 je během zemní poruchy velmi malá, takže indikátor by měl být velmi citlivý (ε by mělo být velmi malé). Abychom zabránili chybnému působení při normálních provozních podmínkách, přidáme startovací podmínku závislou na velikosti napětí U_0 . V kompenzovaných systémech je wattmetrická metoda používána mnoho let. Je to jednoduchá a bezpečná metoda pro zemní poruchy s malým odporem. Požadavky na nastavení hodnoty U_0 však omezují citlivost wattmetrické metody pro vysokoimpedanční poruchy.

Distribuční společnosti používají zařízení pro netočivou složku napětí pro detekci zemní poruchy v kompenzovaných systémech a poté automaticky připojují rezistor (odporník) paralelně k Petersenově cívce nebo k pomocnému vinutí cívky. Pro vysokoimpedanční poruchy se po připojení rezistoru sníží velikost netočivé složky napětí bez toho, aby se odpovídajícím způsobem zvýšila netočivá složka proudu a pracovní veličina wattmetrického článku se vlastně sníží.

Wattmetrickou metodu pro detekci zemních poruch můžeme použít ve všech typech distribučních sítí, které mají nízké hodnoty zemních poruchových proudů. Mezi ně patří systémy kompenzované a izolované.



Obr. 11. Pracovní charakteristika pro wattmetrickou metodu.

3.3.2.8 Metoda páté harmonické

Hlavní význam zhašecí tlumivky v neúčinně uzemněných sítích je kompenzovat kapacitní zemní proud, zejména jeho první harmonickou. Díky nelineárním zařízením a vlivem zemního spojení v síti se mohou generovat harmonické, mezi kterými má významný podíl také pátá harmonická, která není kompenzována Petersenovou tlumivkou. Metoda využívá této páté harmonické pro lokalizaci místa poruchy, kde u postiženého vedení je pátá harmonická proudů větší než u nepostižených a má opačný směr. Jelikož pátá harmonická zemního proudu dosahuje malých hodnot (max 10% první harmonické), je metoda velmi závislá na korektním měření a vyváženosti proudových transformátorů.

3.3.2.9 Metoda základní harmonické

Při jednofázovém zemním spojení se přes filtr propustí pouze základní harmonická netočivé složky proudu. Spočítá se zbytkový činný proud ze všech vývodů. Největší hodnota tohoto proudu pak určuje postižený vývod. U této metody odpadá sledování netočivé složky napětí, avšak je nutné velice přesné měření netočivé složky proudu.

3.3.2.10 Metoda vyšších harmonických

Metoda vychází z obdobných předpokladů jako metoda páté harmonické kap. 3.3.2.8, kde se při zemním spojení generují také další harmonické o vyšší úrovni než před zemním spojením. Před vyhodnocením postiženého vývodu se provede sumace 3., 5., 7. harmonické a případně dalších. Korektní vyhodnocení pak není tak výrazně ovlivněno výskytem páté harmonické.

3.3.2.11 Admitanční princip netočivé složky

Vlivem zemního spojení se změní i admitance postiženého vedení. U této metody se porovnává netočivá admitance před a po poruše u všech vývodů. Jako postižený vývod je označen ten, u kterého dojde k největšímu nárůstu netočivé složky admitance. Citlivost této metody je vyšší než u předchozích metod.

Admittance:

$$\hat{Y} = \frac{1}{\hat{Z}} = \frac{\hat{I}}{\hat{U}} \quad (18)$$

$$\hat{Y} = G + jB = |\hat{Y}| \cdot \cos(\varphi) + j \cdot |\hat{Y}| \cdot \sin(\varphi) \quad (19)$$

G -konduktance, B -susceptance

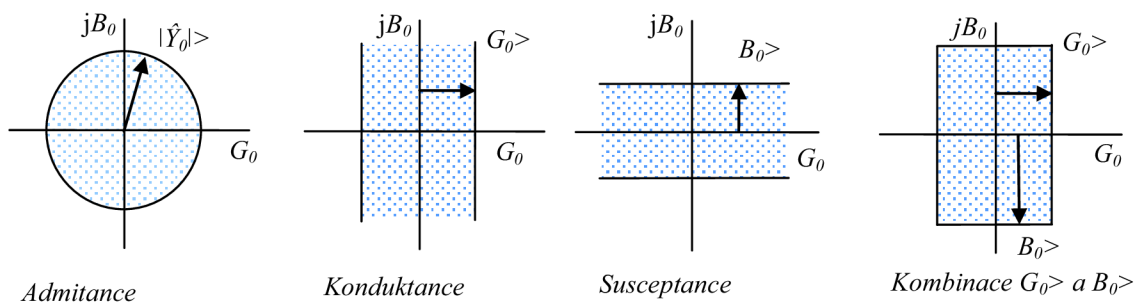
Aplikací na netočivé složky napětí a proudu dostaneme:

$$\hat{Y}_0 = \frac{\hat{I}_0}{\hat{U}_0} = G_0 + jB_0, \quad |\hat{Y}_0| = \frac{I_{0ef}}{U_{0ef}} \quad (20)$$

Úprava vztahu pro G_0 :

$$G_0 = \frac{P_{\dot{e}0}}{U_{0ef}^2}, \quad P_{\dot{e}0} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (u_{0j} \cdot i_{0j})^2}{n}} \quad (21)$$

Možné typy admitanční metody



Obr. 12. Příklady admitančních charakteristik.

Konduktanční metoda je ve své podstatě směrová. Reaguje na znaménko reálné části měřené konduktance. Konduktanční metoda reaguje na poměr proud/napětí. Výstup je relativně nezávislý na velikosti netočivé složky proudu a napětí. To představuje výhodu v porovnání s wattmetrickou metodou, která selhává při detekci vysokoohmových poruch kvůli nízkým hodnotám \hat{U}_0 a \hat{I}_0 .

Obvyklá konduktanční metoda popsaná výše pracuje správně ve vyvážených systémech a pro malé chyby MTP. Nesymetrie systému a MTP však produkují chyby v měřené konduktanci a proto omezují citlivost. Řešení těchto problémů představuje přírůstková konduktanční metoda. Použijeme přírůstků netočivé složky proudu ($\Delta\hat{I}_0$) a napětí ($\Delta\hat{U}_0$) pro výpočet přírůstku netočivé složky konduktance (ΔG_0):

3.3.2.12 Metoda zpětné složky proudu

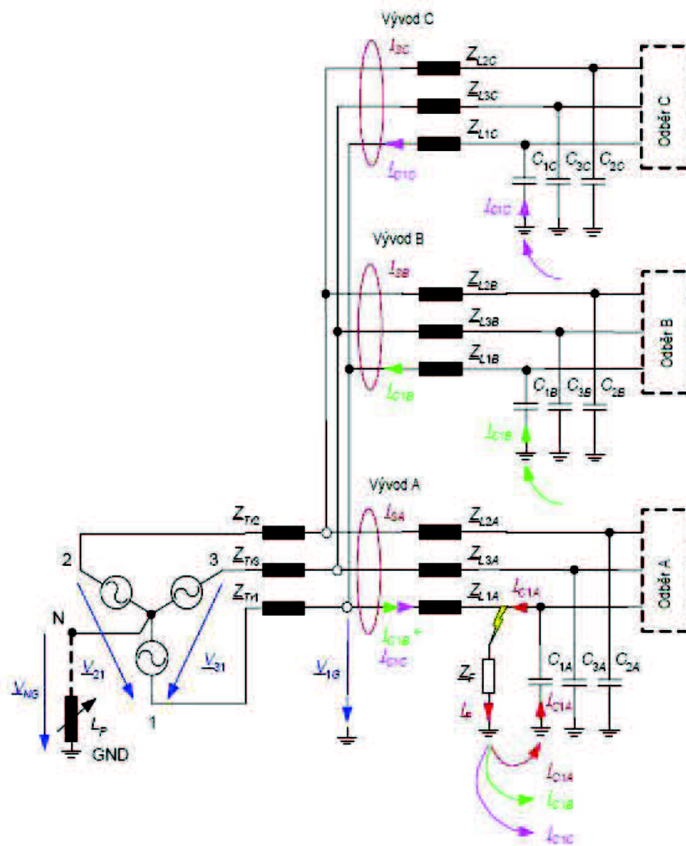
Zemní spojení vyvolá zpětnou složku proudu, která prochází postiženým vedením ve směru od místa zemního spojení k napájecí. Tato zpětná složka proudu je daleko nižší u nepostižených vedení než u postiženého. Dojde-li při zemním spojení k překročení přednastavené hodnoty, je vedení označeno jako postižené. Zpětné složka proudu je však silně závislá na symetrii systému a zátěži a proto je její získání obtížné.

3.3.2.13 Zbytková inkrementální metoda

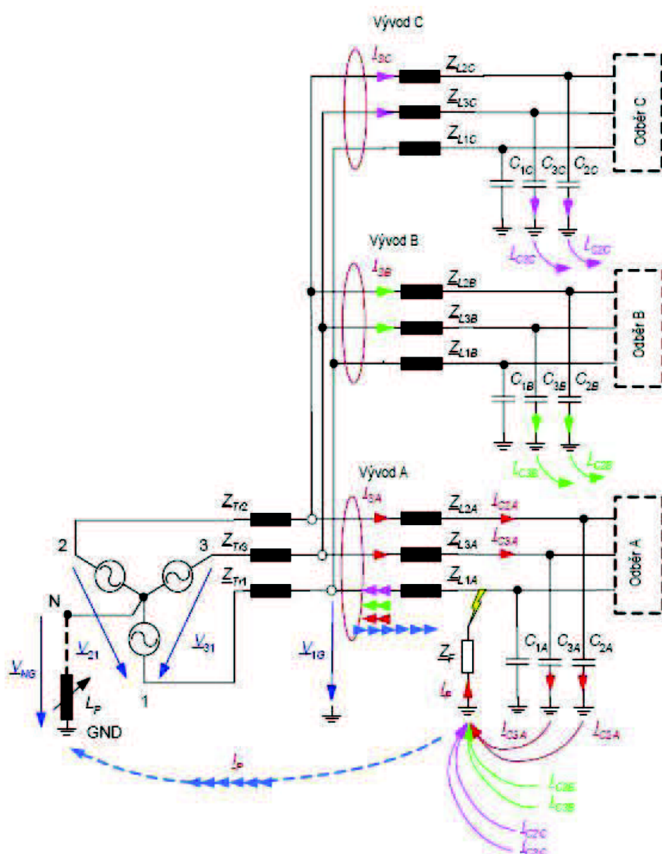
Jako vývod s poruchou je určen ten, kde je největší rozptyl netočivé složky proudu před a při zemní poruše. Metodu však nejde použít v izolovaných sítích a v sítích s automaticky laděnou tlumivkou.

3.3.3 Pasivní – přechodný děj

Přechodný děj vznikající během začátku zemního spojení je možné využít k určení směru k místu zemního spojení. Petersenova tlumivka zde reprezentuje vysokou impedanci, takže téměř neovlivňuje průběh přechodného děje. Přechodný děj je možné rozložit do tří částí. První je vybíjení postižené fáze (Obr. 13) [9], druhá je přenabíjení nepostižených fází (Obr. 14) a třetí je vliv Petersenovy tlumivky, která do průběhu vnáší stejnosměrnou složku a při saturaci vyšší harmonické. Při vybíjení postižené fáze je její náboj odveden a po celé délce je přenášen zemní potenciál. Při přechodném ději vzniká také postupná vlna, která se šíří podél postiženého vodiče. Některé metody se zabývají vyhodnocováním přímé a odražené vlny k bližšímu určení místa zemního spojení. Na hladině VN je však tato postupná vlna tlumena přes distribuční transformátory a také dochází k vícečetným odrazům. Při přenabíjení nepostižených fází dochází k pomalejšímu přechodnému ději než při vybíjení postižené fáze. Náboj je přenášen přes indukčnosti připojených zařízení (transformátorů).



Obr. 13. Vybíjení postižené fáze.



Obr. 14. Nabíjení nepostižených fází.

3.3.3.1 Metoda první půlperiody (Whisherův princip)

Pokud je v první půlperiodě po výskytu poruchy netočivá složka napětí a proudu v protifázi, jde o postižený vývod, pokud jsou ve fázi, jde o nepostižený vývod. Na postiženém vývodu je možné uplatnit stejný princip, kdy složky v protifázi indukují poruchu ve směru a složky ve fázi poruchu v opačném směru.

3.3.3.2 Porovnání amplitudy netočivé složky proudu

Vývod s maximální amplitudou netočivé složky proudu během přechodného děje je označen jako postižený. Chybná indikace však nastane při zemním spojení na sběrně nebo v systému se dvěma vývody.

3.3.3.3 Porovnání polarity netočivé složky proudu

Jako vývod se zemním spojením je označen ten, který má opačnou polaritu netočivé složky proudu během přechodného děje vůči ostatním vývodům.

3.3.3.4 Porovnání polarity jalového výkonu netočivých složek napětí a proudu

Jako vývod se zemním spojením je označen ten, který má opačnou polaritu jalového výkonu netočivých složek napětí a proudu během přechodného děje vůči ostatním vývodům.

3.3.3.5 Připínání odporníku

Pro určení postiženého vývodu se využívá odporníku, přes něhož je krátkodobě spojen uzel transformátoru se zemí. Po vzniku zemního spojení se na krátkou chvíli (0,5

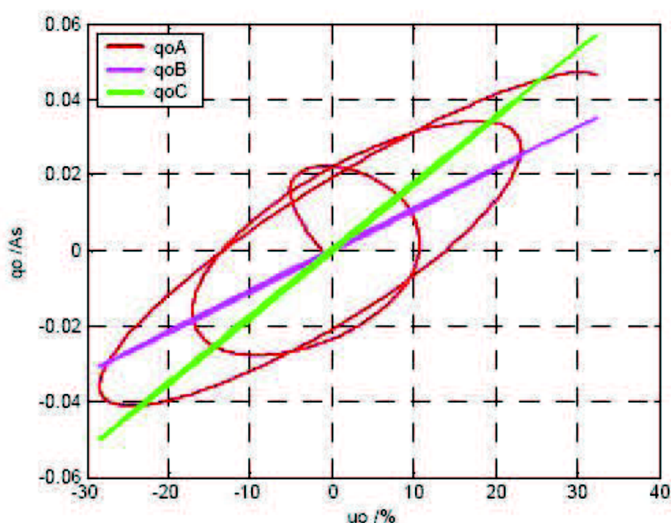
až 3s) připojí odporník a vyhodnotí se proudové a napěťové změny. Má-li po připojení odporníku diference amplitudy proudu postižené fáze kladné znaménko, jedná se o postižené vedení. V opačném případě se jedná o vedení nepostižené. Podobně jako u předchozí metody je možné lokalizovat zemní spojení i z netočivých složek napětí a proudu. Má-li po připojení odporníku diference amplitud netočivých složek stejné znaménko, jedná se o nepostižené vedení a mají-li diference napětí a proudu netočivé složky opačný směr, jedná se o postižené vedení (vývod). Nevýhodou této metody je navýšení proudového zatížení v místě poruchy avšak pomocí distančního principu pro nízkoimpedanční poruchy je možné lokalizovat místo poruchy.

3.3.3.6 Metoda qu-diagramu

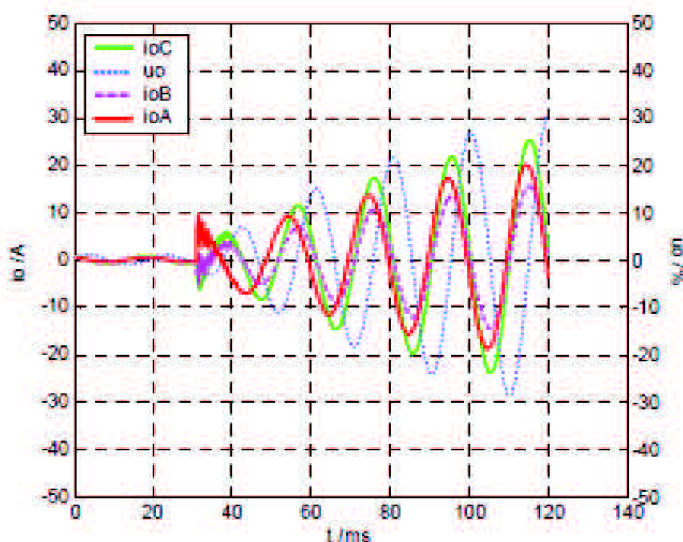
Tato metoda vychází z popisu přechodného děje při nabíjení nepostižených fází. Např. je možné pro vývod B napsat rovnici (Obr. 14) :

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eqB}} \int_{t_0}^t i_{0B}(\tau) d\tau \quad (22)$$

t_0 je zvoleno tak, aby $u_0(t_0) = 0$. Najde se místo průchodu nulou pro u_0 a od tohoto místa se začne s integrací. Výsledek integrace je závislý na faktoru C_{eqB} , který reprezentuje ekvivalentní netočivou kapacitanci vývodu B. Integrace i_0 reprezentuje náboj q_0 vývodu. Vynesením integrálu i_0 v závislosti na netočivé složce u_0 vznikne qu-diagram. Obr. 15 ukazuje příklad qu-diagramu, kde vývody B a C jsou nepostižené a vývod A má zemní spojení. Vývody B a C jsou v qu-diagramu reprezentovány úsečkami, jejichž sklon závisí na C_{eqB} . Křivka postiženého vývodu opisuje křivku podobnou elipse. Metoda qu-diagramu byla zkoušena pro vyhodnocení vysokoimpedančním zemním spojení s ohmickou hodnotou 2000Ω . Předpokladem k použití této metody je dostatečně husté vzorkování od 10kHz výše a dostatečný výpočetní výkon vyhodnocovací jednotky a dostatečná paměť na navzorkovaná data. Příslušné časové průběhy ukazuje Obr. 16.[9]



Obr. 15. Příklad qu-diagramu při zemním spojení (2000Ω) na vývodu A.



Obr. 16. Časové průběhy při zemním spojení (2000Ω) na vývodu A.

3.3.3.7 Metoda energií

Procesy po vzniku zemního spojení jsou interpretovány zobrazením energií, které jsou produkovány netočivými složkami napětí a proudu. Po zemním spojení je energie postiženého vývodu záporná a nepostižených kladná.

3.3.3.8 Pulzní metoda

Při této metodě je dostatečné měření netočivé složky proudu. Během zemního spojení je paralelně k Petersenově cívce připojena kapacitní baterie. To má za následek změnu proudu postiženým místem. Tato změna může být měřena pouze na postiženém vedení. Použitím skupiny impulzů (perioda připínání 0,5 až 1Hz) pro připojení kapacitní baterie může být měření opakováno. Tuto sérii impulzů je pak možné měřit od místa připojení kapacitní baterie až po místo zemního spojení. Jednoduchým měřením pouze netočivé složky proudu je možné sledování podél vývodu. Pro zvýšení citlivosti této metody se používá asymetrická skupina pulzů, která také zlepší rozlišení postiženého a nepostiženého vývodu při vysokoimpedančním zemním spojení.

3.3.4 Švédská neutrála

Švédská neutrála (Swedish Neutral) byla poprvé použita v r.1992 na švédském ostrově Gotland. Tento ochranný systém proti zemním poruchám indikuje jednofázové poruchy a následně automaticky kompenzuje zbytkový proud. Systém je zapojen do uzlu hvězdy napájecího VN transformátoru. Skládá se z prvků: pro indikaci zemního spojení, kompenzaci zbytkového proudu a určení místa ZS. Kompenzace zbytkového proudu umožňuje provoz bez nutnosti vypínání. Předností systému je rychlost odezvy na změnu kapacity sítě VN při změnách konfigurace napájených oblastí.

V ČR je systém Swedish Neutral provozován společností ČEZ.a.s. v rozvodně Hodolany, Olomouc.

3.3.5 Metoda částečných výbojů

Metoda detekce jednofázové zemní poruchy je podrobně popsána v [24] a týká se izolovaných závěsných vodičů, které jsou použity pro VN vedení. K výhodám použití izolovaných vodičů patří: snížení poruchovosti způsobené pádem stromů a větví do vedení, které pak mohou být odstraněny později, při vzájemném dotyku vodičů nedochází ke zkratu, izolace vodičů brání korozi, ochranné pásmo je sníženo na 2m, kompaktnější provedení vedení, nehrozí nebezpečí pro ptactvo. Nevýhodou je vyšší riziko porušení izolace účinky blesku.

Při poruchách, kdy dojde ke kontaktu izolovaného vodiče se zemí nebo s větví stromu, dochází v místě styku ke vzniku částečných výbojů (uvnitř izolace, na povrchu izolace a korónové výboje). Detekce částečných výbojů nám poskytne informace o stavu izolace, avšak požadavky na měřicí techniku i způsoby vyhodnocení jsou vysoké.

3.3.6 Metody detekce zemních poruch - shrnutí

Základní harmonická složka proudu a napětí poskytuje nejspolehlivější informace pro detekci vysokoimpedančních poruch v kompenzovaných distribučních sítích. Obsah vyšších harmonických při zemních poruchách je malý a proměnlivý, zvláště u vysokoimpedančních poruch.

Přechodové složky proudu a napětí jsou při vysokoimpedančních poruchách mírně utlumeny. Metody, které vyžadují jakýkoliv typ řízení Petersenovy tlumivky nebo proudovou injektáž, se vyznačují vysokou citlivostí, ale vyžadují použití velmi nákladných zařízení.

Příkladem takového zařízení je ochranný systém Swedish Neutral, který vyhodnocuje zemní poruchy metodou DDA (Differential Detection using phase-to-ground Admittances), která využívá nejen změny netočivých proudů, ale také změn všech systémových veličin vlivem zemního spojení - změny netočivého napětí ΔU_0 , hodnot fázových napětí U_v ($v = L1, L2, L3$) a hodnoty netočivé admitance vedení. K dispozici jsou hodnoty referenční a hodnoty při zemním spojení. Kombinací vyhodnocovacích metod je možné indikovat zemní spojení s odporem do cca 20 k Ω . Kromě indikace zemního spojení obsahuje systém zařízení pro kompenzaci zbytkového proudu a funkce k určení místa zemního spojení (spojení do kruhu).

Všechny známé metody, založené na měření základních harmonických složek, které se vyznačují vysokou citlivostí, vyžadují informace ze všech vývodů nebo jistý způsob řízení Petersenovy tlumivky nebo proudovou injektáž. Například admitanční metoda vyžaduje informace ze všech vývodů. Admitanční metoda vyžaduje také řízení Petersenovy tlumivky nebo injektáž proudu. Wattmetrická metoda je dobrým řešením pro zemní poruchy s malým odporem, ale existují zde limity citlivosti pro detekci vysokoimpedančních poruch.

Pro návrh a realizaci nekontaktního indikátoru jsou vhodné takové metody, které používají informace pouze z jednoho vývodu a nevyžadují řízení Petersenovy tlumivky ani proudovou injektáž. Tyto metody jsou vhodné pro samostatné citlivé zařízení, které může být umístěno kdekoliv v distribuční síti. Pro zvýšení selektivity a citlivosti je vhodné zahrnout do nekontaktního indikátoru více metod.

3.4 Systém přizemňování fáze (shunting)

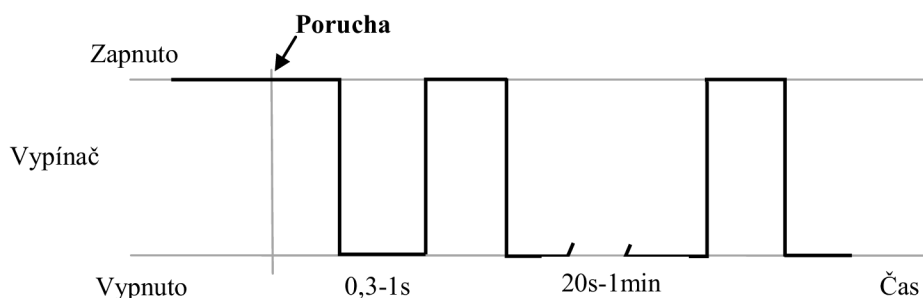
Vznikne-li v kompenzované soustavě vysokého napětí zemní spojení, protéká místem ZS pouze zbytkový proud, jehož velikost závisí na stupni vyladění zhášecí tlumivky a menší mírou na svodových proudech. Předpokládá se, že tento zbytkový proud dosahuje maximálně 10% kapacitního proudu sítě. V místě poruchy však mohou vzniknout tepelná přetížení a poškození a také zvýšená kroková a dotyková napětí. Pro eliminaci zbytkového proudu je možné použít proudovou injektáž (švédská nula, kap.3.3.4) nebo nízkoohmové přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně. Metoda přizemňování fáze není účinná při kovovém zemním spojení a nízkém odporu uzemnění v místě postižené části VN sítě. Velmi příznivý vliv je pak pozorován při nekovových zemních spojeních [25].

Systém přizemňování fáze byl zprovozněn ve společnosti E.ON a.s. v roce 2010 v rozvodně Brno-Medlánky. Při zjištění výskytu zemního spojení je nejdříve na dobu 50ms přizemněna nepostižená fáze. Tím vznikne dvojitě zemní spojení a distanční ochrany mají dostatek času k určení místa poruchy. Za 1s se na dobu 1s připne odporník a po 7s se provede přizemnění postižené fáze.

Systém přizemňování fáze obsahuje tedy poruchovou diagnostiku, určení místa a vzdálenosti poruchy a odlehčení místa zemního spojení.

3.5 Opětné zapínání

Opětného zapnutí je používáno k eliminaci přechodné poruchy na VN vedení. Při zjištění poruchy ochranou (zkrat, zemní spojení) je postižený vývod na určitou dobu odpojen. Po uplynutí této doby, kdy se předpokládá také zmizení poruchy, se vedení opět zapne. Časování opětného zapnutí může být rychlé (0,3s-1s), pomalé (20s-3min), jednorázové nebo vícekrát opakované. Na Obr. 17 je ukázána kombinace rychlého a pomalého opětného zapnutí. Pokud se však opětovým zapnutím porucha neodstraní, je vývod vypnut na mnohonásobně delší čas, který je potřebný k nalezení a odstranění poruchy. Tento stav je označován jako neúspěšné opětovné zapnutí (NOZ).



Obr. 17. Časování opětného zapnutí

V případech zemního spojení, kdy se používá metoda přizemnění (shunting) postižené fáze přímo na rozvodně, jsou požadavky na řízení celého systému náročnější.

4 Přehled dosavadního vývoje ochran a indikátorů

Existuje velké množství indikátorů a ochran pro nasazení na VN vedení, které čerpají vstupní informace z měřících transformátorů napětí a proudů jednotlivých fází, případně ze součtových transformátorů pro získání netočivých složek. Tato zařízení bývají vybavena také funkcemi pro zjišťování zemních spojení. Možnost četnějšího nasazení takových zařízení komplikuje právě nutnost použití měřících transformátorů, jejichž instalace v místě použití bývá problematická a ekonomicky náročná. Speciální body VN sítě jsou osazovány zařízeními (dálkově odpínané úsečníky, reclosery), které již ve své výbavě mohou obsahovat měřící transformátory. Doplnění takových bodů o indikátory zemních spojení pak není obtížné. Mnoho bodů však takovou výbavu nemá a je možné zde použít levnější řešení za použití nekontaktních indikátorů.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů využívají ke své činnosti sledování elektromagnetických polí, která vznikají pod vodiči VN vedení nebo v jejich blízkosti a sledování přechodových stavů, které se také projeví změnami elektromagnetického pole. Principy, které jsou v nekontaktních indikátorech pro jejich činnost použity, jsou již historicky známy. Jejich aplikace a reálné použití však přišlo až s rozvojem mikroprocesorové techniky.

4.1 Současné ochrany

V této kapitole jsou stručně zmíněny současné ochrany vedení, jejich členění a principy [22]. Vstupními signály ochran jsou jistící přístrojové transformátory napětí a proudu, které zajišťují žádanou přesnost při velkých nadproudech a nízkých napětích.

Základní členění ochran vedení je na ochrany stupňovité a ochrany srovnávací. Stupňovité ochrany pracují s vhodně odstupňovaným časovým zpožděním pro získání selektivního působení a vzájemného zálohování. Srovnávací ochrany pracující na principu srovnání daných fyzikálních veličin na vstupu a výstupu chráněného objektu.

Ochrany je možné dále dělit na:

- nadproudová, směrová nadproudová
 - časově závislá
 - polozávislá
 - časově nezávislá
 - mžiková
- distanční
- srovnávací
 - přímé srovnání
 - rozdílová
 - fázová
 - nepřímé srovnání.

Dále jsou uvedeny příklady ochran a vysvětlen jejich princip.

Časově odstupňovaná nezávislá nadproudová ochrana

Princip působení je odvozen od zvýšeného proudu při přetížení nebo zkratu. Ochrany jsou rozmístěny v síti, která se větví od zdroje směrem k odběrateli. Ochrany začnou působit, jestliže překročí proud např. 1,3 až 1,8 násobek jmenovitého proudu. Velikost vybavovacího proudu je menší na vzdálenější části vedení od zdroje, protože vyšší impedance tlumí zkratový proud. Nastane-li porucha ve vzdáleném místě, nabíhají popudové členy všech ostatních ochran směrem ke zdroji. Po uplynutí nastaveného času (např. 0,5s) vypne nejvzdálenější ochrana výkonový vypínač, zkrat odpojí a ostatní ochrany se vrátí do klidového režimu. Při selhání ochrany ve vzdáleném místě přebírá funkci ochrana další, blíže ke zdroji a vypíná postiženou větev za delší čas (např. 1,5 s). Nevýhodou této ochrany jsou příliš dlouhé vypínací časy směrem k napájecímu zdroji, proto je vhodná pro méně rozvětvené sítě.

Směrová nadproudová ochrana

Používá se pro ochranu vedení v místech, kde může proud při zkratu v síti téci oběma směry. Působí jenom při určitém směru proudu. Tvoří ji nadproudová ochrana a směrový článek. Směrový článek působí a uvolňuje vypnutí, je-li tok zkratového proudu v dovoleném směru. Jinak blokuje vypínací impuls od nadproudového článku. Při tom je nutné seřízení ochran takové, že při zkratu v daném místě nabíhají nadproudové články všech ochran. Správného vypnutí se dosáhne vhodným časovým zpožděním.

Distanční ochrana vedení.

Patří mezi stupňovité ochrany, které se vzájemně zálohují podobně jako ochrany nadproudové. Jejich princip je založen na tom, že vyhodnocují impedanci, tj. vzdálenost místa poruchy. Doba zapnutí časového článku se u distanční ochrany nastavuje samočinně podle impedance vedení (podle vzdálenosti ochrany od místa poruchy). Po uplynutí nastaveného času a při určitém směru proudu se vedení vypíná.

Princip srovnávací ochrany

Srovnávací ochrany porovnávají vstupní a výstupní veličiny chráněného objektu. Z jejich rozdílu vyhodnocují, zda je porucha uvnitř chráněného objektu nebo mimo. Vyznačují se rychlým působením a současným vypínáním na obou koncích chráněného objektu. Ochrany s přímým srovnáním porovnávají skutečné veličiny na obou koncích chráněného objektu. Porovnávají např. fázory proudu, výkony, fázový posun mezi proudy. Ochrany s nepřímým srovnáním srovnávají pouze údaje o poloze kontaktů měřících relé na obou stranách chráněného úseku. Spojovací vedení mezi oběma konci nepřenáší skutečné měřené veličiny jako v předcházejícím případě, ale pouze logické signály 1 nebo 0. Tím se podstatně snižují nároky kladené na spojovací vedení a kvalitu přenosové cesty.

4.2 Využití součtových elektromagnetických polí

V současné době je k dispozici řada nekontaktních indikátorů, které využívají součtová elektromagnetická pole od všech tří fází. Jsou umístěny na stožár s VN vedením do různé výšky. Sledují změny elektromagnetického pole v místě pod vodiči a z jeho změn při vzniku zemního spojení dokážou určit vznik zemního spojení na daném vedení i s případným směrem k místu zemního spojení nebo směrem opačným.

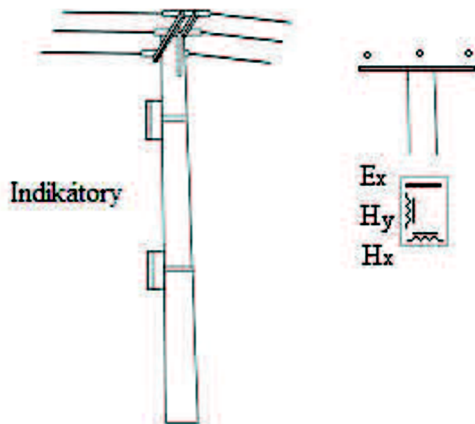
Hlavními principy zde používanými jsou změny složek součtového magnetického a elektrického pole, protože metody indikací zemních spojení jsou převážně založeny na vyhodnocení netočivé složky napětí (U_0) a netočivé složky proudů (I_0). Pokud je indikátor se snímači elektromagnetických polí umístěn v uspořádání, jak ukazuje Obr. 19, je možné použít následující vztahy:

$$I_0 = K \cdot \left(\frac{L_0}{L_0^2 + a^2} \cdot I_1 + \frac{1}{L_0 + b} \cdot I_2 + \frac{L_0}{L_0^2 + a^2} \cdot I_3 \right) \quad (23)$$

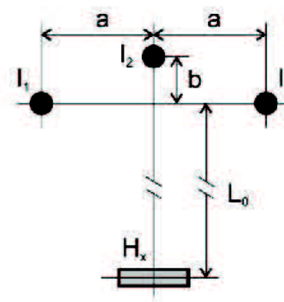
$$\text{Pro } b = \frac{a^2}{L_0}, \text{ pak } I_0 = K \cdot \frac{L_0}{L_0^2 + a^2} (I_1 + I_2 + I_3) \quad (24)$$

Výsledné magnetické pole VN vedení pak odpovídá veličině I_0 . Analogické vztahy je možné použít také pro elektrické pole, které pak odpovídá U_0 . Nicméně působení středního vodiče „b“ není pouze funkcí vzdáleností „a“ a „ L_0 “. Také deformace elektrického pole způsobené různými potenciály okolních objektů vnášejí do těchto výpočtů další nepřesnosti. Z výsledných součtových polí však není možná analýza polí jednotlivých fázových vodičů.

Některé indikátory jsou založeny na principu sledování 5. harmonické, která se v součtových signálech vyskytuje (KMB systém [31]). Některé se umísťují co nejbližší vedení, kde pak jsou ovlivněny hlavně elektromagnetickým polem středního vodiče (EGÚ České Budějovice [32]). Další indikátory využívají také principu přechodných složek, které vznikají při vzniku zemního spojení a odezní řádově v jednotkách ms (Schneider electric [33], MEG A [34]). Je možné využít také principy používané při připínání odporníku (MEGA).



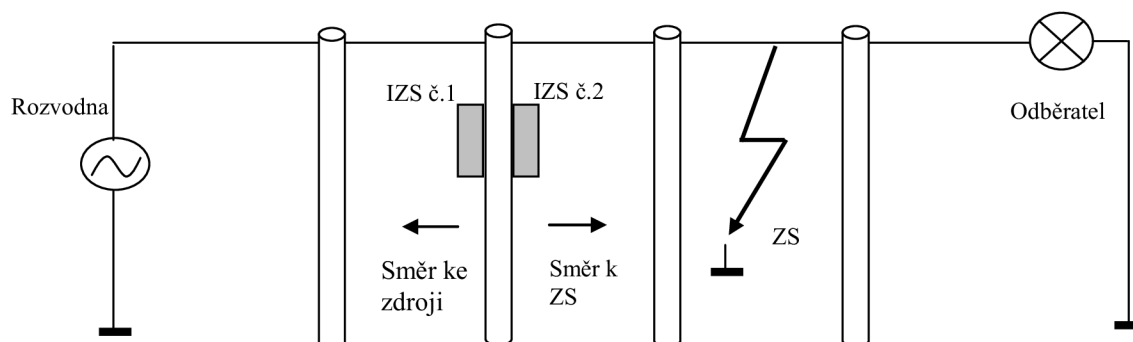
Obr. 18. Indikátor sledující výsledné elektromagnetické pole



Obr. 19. Uspořádání pro sledování I_0

Mechanicky jsou indikátory a potřebné snímače pro elektromagnetické pole umístěny v jedné jednotce. Protože jsou tyto indikátory umísťovány většinou na místa, kde není externí napájecí zdroj, obsahují buď lithiové velkokapacitní baterie nebo dobíjené články ze solárních panelů. K indikaci směru používají uvedené indikátory různých principů. Například LED diody různých barev pro různý směr, nebo otáčecích reflexních

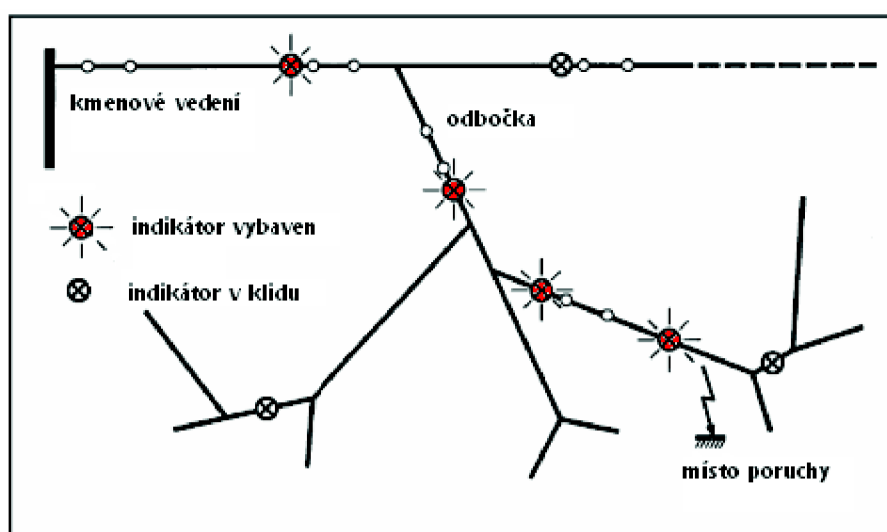
prvků, z nichž jedna skupina indikuje jeden směr a druhá skupina směr opačný. Bývá obvyklý i jiný typ indikace, pokud není možné směrovost vyhodnotit.



Obr. 20. Indikátor snímající výsledné elektromagnetické pole vedení

V důsledku organizačních změn v distribučních společnostech a rozvíjejících se možnostech dálkové komunikace bývají indikátory doplněny také prostředky pro dálkový přenos dat nebo jsou upraveny tak, aby byly schopny být na tyto prostředky, které jsou k dispozici v místě instalace, napojeny. Jde hlavně o přenosy nezávislou rádiovou sítí a přenosy využívající veřejných sítí mobilních operátorů. V druhém případě se využívá spojení GPRS nebo SMS zpráv.

Základními indikačními stavy, které indikátory indikují, jsou zemní spojení i s možností vyhodnocení směru, zkrat a přítomnost napětí.



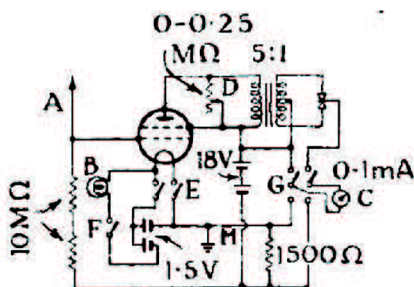
Obr. 21. Určení úseku s poruchou

4.2.1 Příklad indikátoru využívající součtové elektromagnetické pole

Již v roce 1946 bylo popsáno využití rozložení elektrického pole v okolí VN vedení k lokalizaci zemního spojení [6]. Elektrostatické pole v okolí nadzemního vedení je dáno v každém bodě a v každém okamžiku geometrickým součtem individuálních polí každého ze tří fázových vodičů. Vzdálenost mezi vodiči je velká v relaci s průměrem vodičů právě tak jako vzdálenost od země a proto má elektrostatické pole značně široký

rozptyl. Okraj tohoto pole dosahuje zemní roviny. Takovéto rozložení pole vyvolává rozdíl potenciálů mezi dvěma body v prostoru obklopujícím vedení, dokonce i v blízkosti zemní roviny. Rozdíl potenciálů vzniká také mezi bodem daného prostoru a zemí. Rozložení pole se ovšem markantně změní, pokud dojde k dotyku kteréhokoliv vodiče se zemí – k zemnímu spojení. Zemní potenciál se dostává na postiženou fázi a na další dvě plné (sdružené) napětí. To vyvolá zvýšení elektrického pole. Rozdíl potenciálů bude tím pádem vyšší, než za normálních provozních podmínek. Tato změna je pak sledována indikačním zařízením, které je zapojeno mezi dvě kondenzátorové desky. Jedna deska je zformována do antény, která je nasměrována k vedení a druhá je uzemněna. Jako anténa může posloužit kovový prut, tělo nebo vozidlo s pneumatikami. Další kovový prut může být použit jako uzemnění nebo pro stejný účel může být využita kapacita vlastního indikačního zařízení vůči zemi nebo konduktance operátora držícího indikační zařízení.

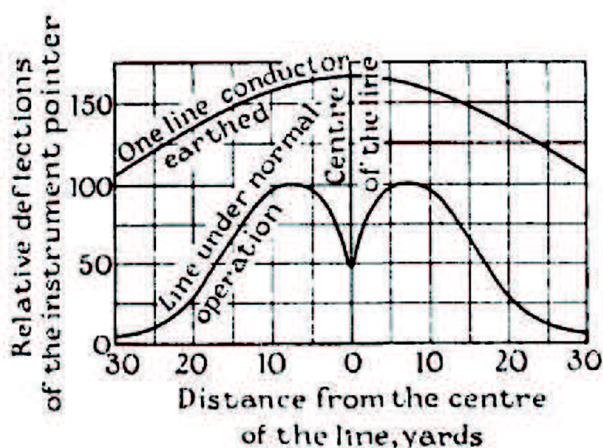
Jako indikační zařízení byl sestaven indikátor dle schématu viz Obr. 22. Použitá elektronka byla americké výroby s označením 3Q5-GT.



Obr. 22. Schéma indikátoru z r.1946

- A Anténa
- B 1.5V, 60mA, žárovka k osvětlení ciferníku miliampérmetru
- C Miliampérmetr 0-1mA
- D Proměnný rezistor pro nastavení vhodného vychýlení ručky miliampérmetru pro různé VN hladiny (6,22,66kV) a pro různé vzdálenosti od vedení
- E Dvoupólový hlavní vypínač
- F Vypínač pro žárovku B
- G Přepínač pro testování indikátoru
- M Kovové držadlo použitelné jako zemnicí svorka

Indikátor byl sestaven do dřevěné skříňky o rozměrech 23x15x13cm a vážil 2,5kg. Měřením již sestaveným indikátorem bylo zjištěno rozložení pole, které je uvedeno na Obr. 23. Pole bylo zjišťováno v horizontální rovině pod vedením 22kV, rovinného uspořádání se vzdáleností krajních vodičů 150cm.

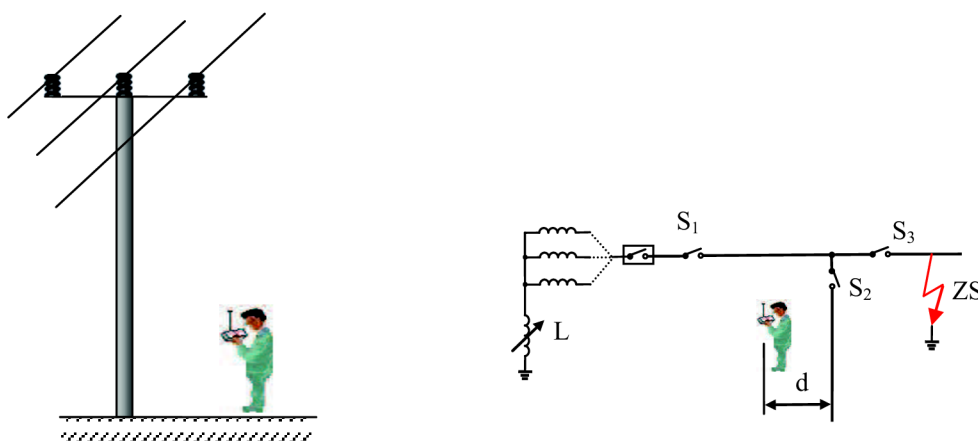


Obr. 23. Rozložení elektrického pole zjištěné indikátorem z r.1946

Vodorovná osa	Vzdálenost od středu vedení (1yard=0,9144m)
Svislá osa	Relativní výchylka ručky indikátoru
Horní křivka	Vedení se zemním spojením
Spodní křivka	Vedení za normálních provozních podmínek

Postup hledání úseku vedení se zemním spojením ukazuje

Obr. 24. Jako optimální vzdálenost obsluhy indikátoru od vedení byla zjištěna 40m pro vedení 22kV a 22m pro vedení 6kV. Tato vzdálenost odpovídá volnému prostranství. V případě překážek v podobě staveb, stromů nebo jiných je možné vzdálenost redukovat. Ve vzdálenosti 6-9m od středu vedení je však difference elektrického pole mezi postiženým a nepostiženým vedením minimální. Měřením bylo také zjištěno, že rozložení elektrického pole nezávisí na vodiči, ve kterém se vyskytuje zemní spojení. Obdobné výsledky byly zjištěny i pro uspořádání vodičů do trojúhelníku. Je také velmi pravděpodobné, že bude tato metoda využitelná i pro uspořádání vodičů pod sebou („pulsoudek“), pro dvojpotahy i pro svazkové vodiče.



Obr. 24. Vymezení úseku vedení se zemním spojením

Vlastní nalezení úseku probíhá v součinnosti s vypínáním a zapínáním vypínačů S_1 rozmístěných na vývodu se zemním spojením viz Obr. 24. Po zaujmutí vhodné pozice a dostatečné vzdálenosti od sekce spínané vypínačem S_2 , se nastaví proměnným rezistorem D základní citlivost indikátoru. Dostatečná vzdálenost „d“ od sekce za vypínačem S_2 je důležitá pro zamezení nesprávné indikaci. Pokud je sepnut a rozepnut vypínač S_3 , je zaznamenána silná výchylka indikátoru, která indikuje zemní spojení za posledně sepnutým vypínačem. V reálném provozu má však vývod mnohem více sekcí a je proto důležité zvolit optimální postup spínání a odpínání jednotlivých úseků vedení tak, aby se jejich počet minimalizoval a co nejvíce zkrátila doba potřebná k vyhledání úseku vedení se zemním spojením.

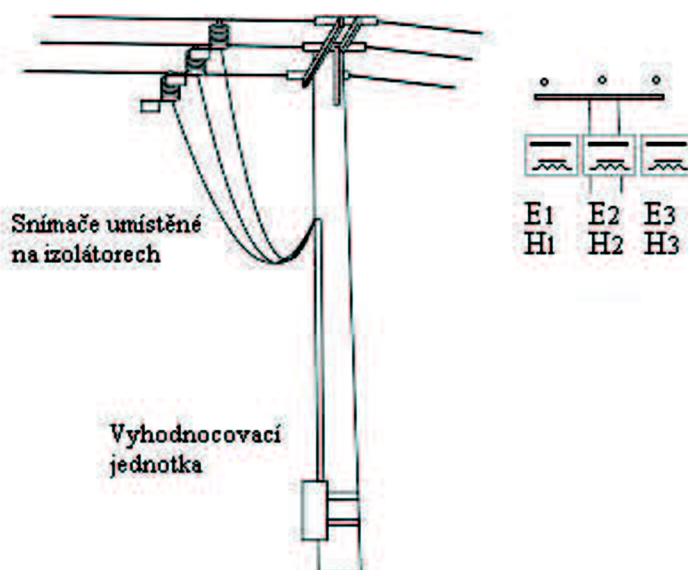
4.3 Využití elektromagnetických polí jednotlivých vodičů

Druhý způsob realizace indikátoru zemního spojení s analýzou elektromagnetických polí naopak analyzuje elektromagnetická pole jednotlivých fázových vodičů v co nejtěsnějších vzdálenostech od fázových vodičů a výsledné signály odpovídající U_0 a I_0 se skládají v elektrických obvodech indikátoru, viz Obr. 25. Výhodou této metody je definovaný způsob sumace signálů polí jednotlivých fází, což u první metody závisí na okolí, které může významným způsobem výsledné pole deformovat a superponovat další vlivy. Nevýhodou druhé metody je nemožnost umístění snímačů polí tak blízko jednotlivých fázových vodičů, aby bylo možné zanedbat vliv sousedních fází. Při známé a prakticky neměnné vzdálenosti mezi fázovými vodiči je však možno tento vliv korigovat. Indikátory využívající tuto metodu jsou obecně méně závislé na vlivech okolí a vyznačují se vyšší spolehlivostí indikace zemního spojení. Z pohledu jejich instalace a zajištění provozuschopnosti jsou však náročnější.

Následující vztah je možné použít pro symetrické rovné uspořádání snímačů:

$$I_0 = I_1 + q \cdot I_2 + I_3 \quad (25)$$

Kde „q“ nabývá hodnot 0.6 až 0.85 pro rozteč vodičů mezi 0.6m až 1.4m. Vzdálenost senzorů od vodičů je 0.35m. Konstantu „q“ je možné s dobrou přesností určit výpočtem z geometrických poměrů mezi vodiči a snímači. Všeobecně platí stejné relace pro snímače elektrických polí a výpočet netočivé složky napětí U_0 , ale konstantu „q“ pro elektrické pole není možné určit výpočtem, ale měřením v místě nasazení indikátoru.

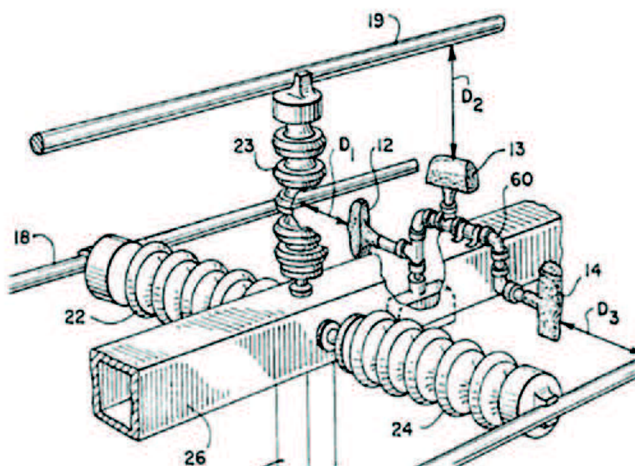


Obr. 25. Indikátor snímající elektromagnetická pole jednotlivých vodičů

4.4 Patentové nároky

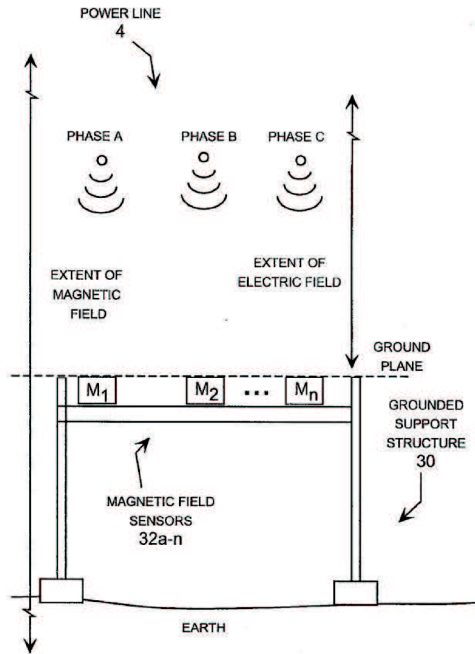
Navržená sestava umístění snímačů nekontaktního indikátoru poruchových stavů, která je detailně popsána v kapitole 6.4.1 se zdá na první pohled velmi jednoduchá, ale i přesto proběhl průzkum možnosti udělení patentu na tuto sestavu snímačů společně s vyhodnocovací jednotkou. Bylo nalezeno několik podobných řešení, z nichž jsou některá uvedena níže.

Kanadský patent 2092988A popisuje umístění snímačů na přídavné trubkové konzole při použití s umístěním vodičů do trojúhelníku (Obr. 26).



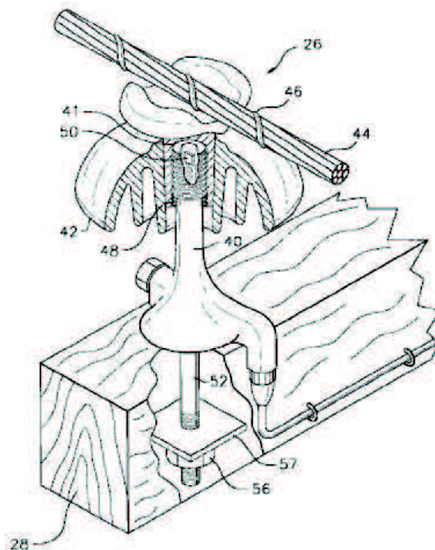
Obr. 26. Kanadský patent 2092988A

US patent WO2006007131A1 popisuje řešení, kde jsou snímače umístěny na robustní podpěrné konstrukci pod vedením vysokého napětí. Viz Obr. 27.



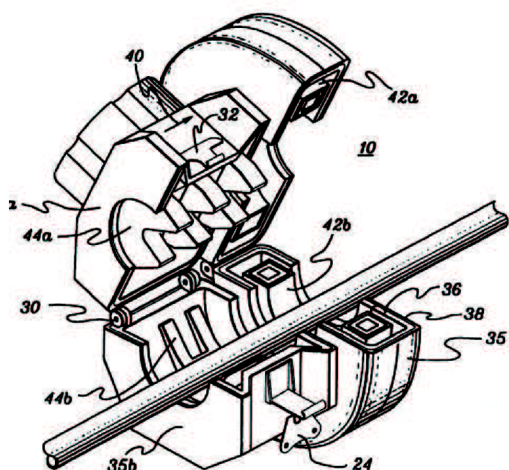
Obr. 27. US patent WO2006007131A1.

US patent 6555999B1 popisuje konstrukci podpěrného izolátoru se zabudovaným snímačem elektromagnetických polí. Izolační bariéra je tvořena materiálem izolátoru (Obr. 28). Obdobně řešených snímačů, které jsou zabudovány v izolátoru je náplní mnoha dalších patentů.



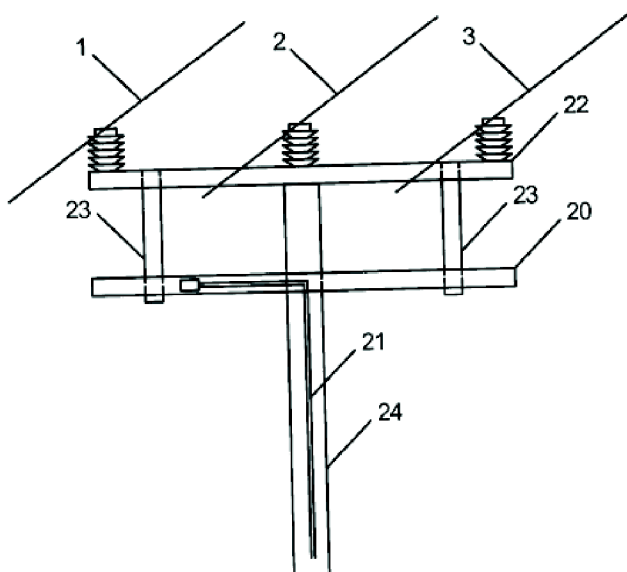
Obr. 28. US patent 6555999B1.

V dalších popisech patentů najdeme celou řadu samostatně umístěvaných snímačů na vedení. Nevýhodou takových řešení je nutnost bezdrátového přenosu informace k vyhodnocovací jednotce a komplikovanost napájení. Jako příklad je uveden US patent 5426360 viz Obr. 29.



Obr. 29. US patent 5426360

Slovinský patent SI21254A2 popisuje umístění snímače na další přídatnou konzolu viz Obr. 30.



Obr. 30. Slovinský patent SI21254A2.

5 Cíle dizertační práce

Hlavním cílem disertační práce je rozpracování teoretických poznatků o metodách indikace zemních spojení do podoby použitelné pro měřicí systém, jehož snímací prvky jsou založeny na snímání elektromagnetického pole pod vodiči VN vedení – nekontaktní indikátor. S tímto poměrně rozsáhlým procesem úzce souvisí problematika experimentálního ověření teoretických poznatků v reálných sítích VN. Nekontaktní indikátor vychází z koncepce umístění snímacích prvků co možná nejbližší fázovým vodičům. Obsahuje tři snímací sady pro magnetické a elektrické pole jednotlivých fází třífázového systému a vyhodnocovací jednotku. Vyhodnocovací jednotka je řízena mikroprocesorem, který potřebuje řídicí program. Pro snadné nastavení a konfiguraci parametrů bude sloužit obslužný program schopný běhu na počítači typu PC.

Etapy řešení k dosažení hlavního cíle:

- ověření teoretických předpokladů pomocí simulovaných poruch v trojfázové kompenzované soustavě na modelu sítě
- analýza funkčností indikátoru (sběr dat, korekce působení okolních fází, vyhodnocení popudů, vyhodnocení poruchových stavů vznikajících na vedení, signalizace poruchových stavů, parametrizace a nastavení, komunikační schopnosti s nadřazeným systémem, upgrade řídicího programu, autokontrola správné činnosti)
- algoritmizace detekčních principů (sledování změn při vzniku zemního spojení, sledování změn hodnot proudu a vyhodnocení nadproudu či zkratu, sledování změn v době připnutí odporníku a v době mimo připnutí odporníku, vyhodnocení dalších stavů VN vedení jako neúspěšný OZ, beznapěťový stav, zapnutí vedení, ukončení zemního spojení)
- vytvoření datových struktur a jejich plnění pro záznam poruchových jevů
- odzkoušení vlastností indikátoru při praktických zkouškách ve VN sítích a vyhodnocení dosažených výsledků

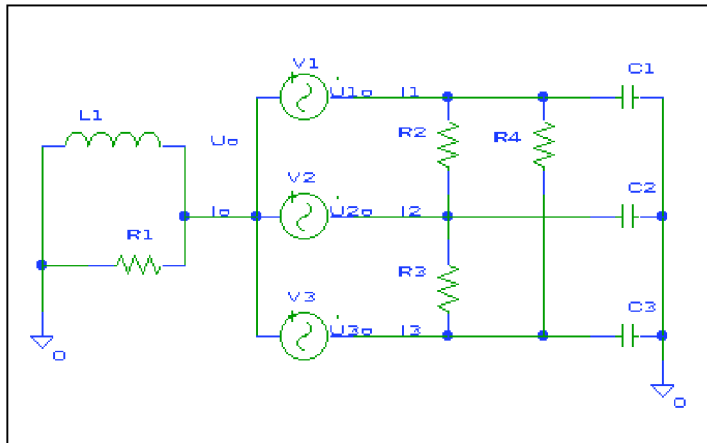
6 Analýza řešení nekontaktního indikátoru

V kapitole 4 byly představeny dvě možnosti řešení nekontaktních indikátorů poruchových stavů na VN vedení. Jde o metodu snímání součtových elektromagnetických polí od všech fází a metodu snímání elektromagnetických polí jednotlivých vodičů. Práce se zabývá využitím druhé metody. Řešený nekontaktní indikátor je pracovně nazýván MEG61.

V průběhu dalších kapitol je uváděno následující značení hodnot intenzit magnetických polí úměrných fázovým proudům $\hat{H}_{x1} \sim \hat{I}_{L1} = \hat{I}_1$, $\hat{H}_{x2} \sim \hat{I}_{L2} = \hat{I}_2$ a $\hat{H}_{x3} \sim \hat{I}_{L3} = \hat{I}_3$ a hodnot intenzit elektrických polí úměrných fázovým napětím $\hat{E}_{x1} \sim \hat{U}_{fL1}$, $\hat{E}_{x2} \sim \hat{U}_{fL2}$ a $\hat{E}_{x3} \sim \hat{U}_{fL3}$. Pro vyhodnocení zemních spojení je spočtena suma elektrických polí vývodu \hat{S}_{Ex} , tj. \hat{U}_0 a suma magnetických polí vývodu \hat{S}_{Hx} , tj. \hat{I}_0 .

6.1 Analýza sítě se zemním spojením pomocí simulací na modelu

Pro ověření teoretických poznatků uvedených v kapitole 3 a pro studium chování sítě v různých poruchových stavech byl při přípravě návrhu indikátoru použit simulační program PSPICE. Byla sestavena schémata třífázové kompenzované sítě s možností změny parametrů pro simulaci poruchových stavů za různých podmínek. Obr. 31 ukazuje základní, nejjednodušší uspořádání sítě a na Obr. 32 je model sítě. Modelováním sítí VN, zemních spojení a jiných stavů se zabývají např. publikace [14], [15], [16].



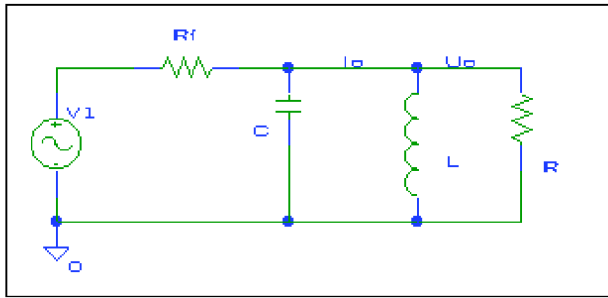
Obr. 31. Uspořádání sítě.

Pro uvedené uspořádání a pro souměrnou síť uvažujeme následující vztahy.

$$\hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_3 = 3 \cdot \hat{I}_0 \quad (26)$$

$$\hat{U}_{10} + \hat{U}_{20} + \hat{U}_{30} = 3 \cdot \hat{U}_0 + \hat{V}_1 + \hat{V}_2 + \hat{V}_3 \quad (27)$$

$$\hat{U}_{10} + \hat{U}_{20} + \hat{U}_{30} = 3 \cdot \hat{U}_0 = 0 \quad , \text{ souměrná síť} \quad (28)$$



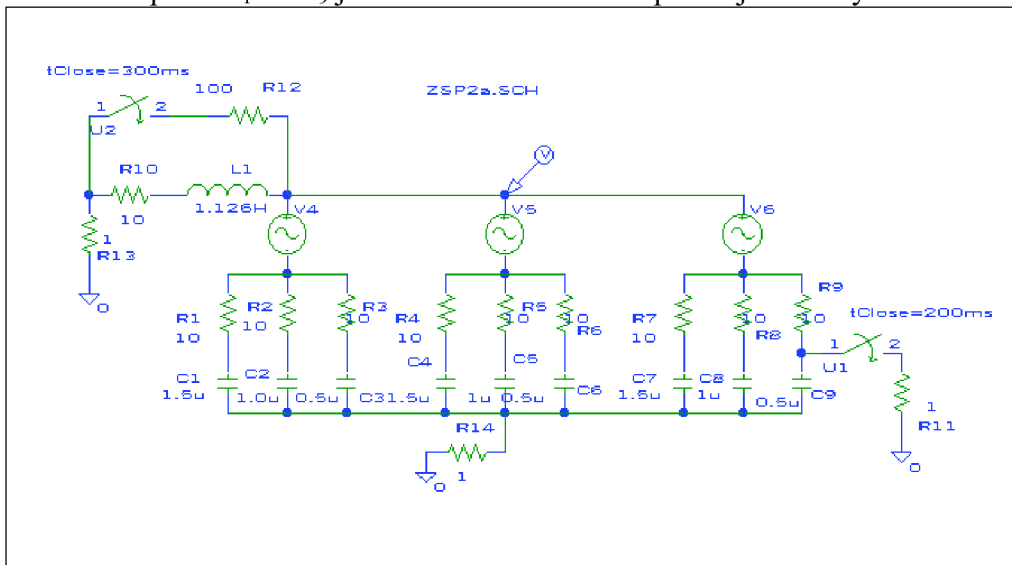
Obr. 32. Model sítě.

Odpor zemního spojení R_f
 Kompenzovaná síť $|\hat{I}_C| = |\hat{I}_L|$ (29)

Překompenzovaná síť $|\hat{I}_C| < |\hat{I}_L|$ (30)

Nedokompenzovaná síť $|\hat{I}_C| > |\hat{I}_L|$ (31)

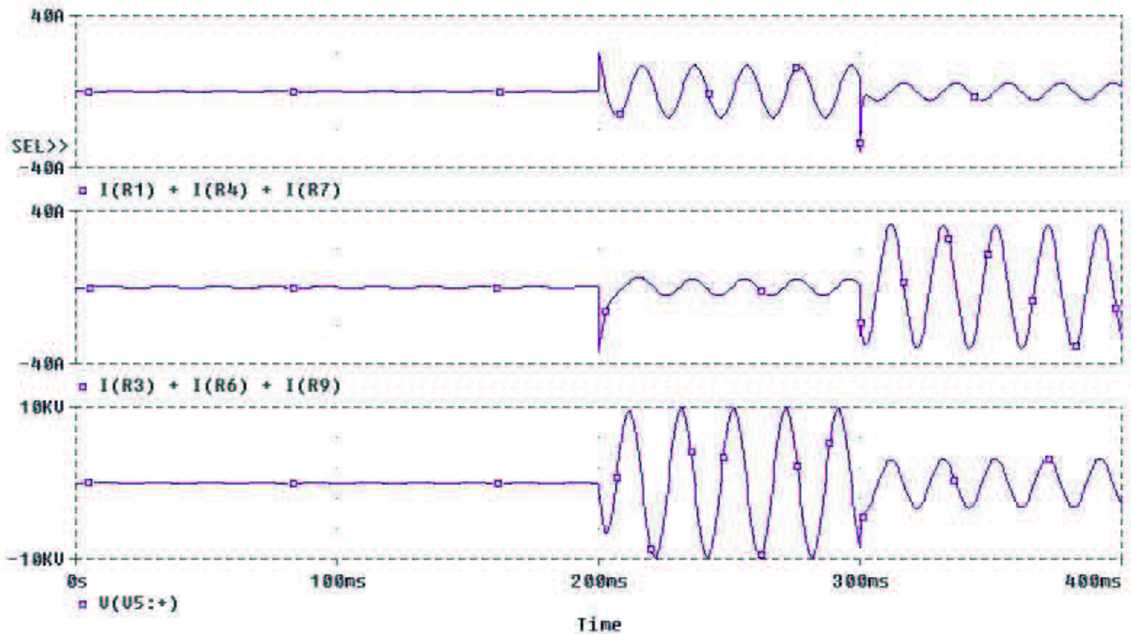
Na Obr. 33 je schéma třífázové sítě pro tři vývody A, B, C s různou kapacitou a pro sledování chování při ZS na vývodu C. Spínač u1 simuluje vznik zemního spojení v čase 200ms po startu a spínač u2 za dalších 100ms simuluje připnutí odporníku. Změnou kapacit C_1 až C_9 je simulována odlišná kapacita jednotlivých vedení.



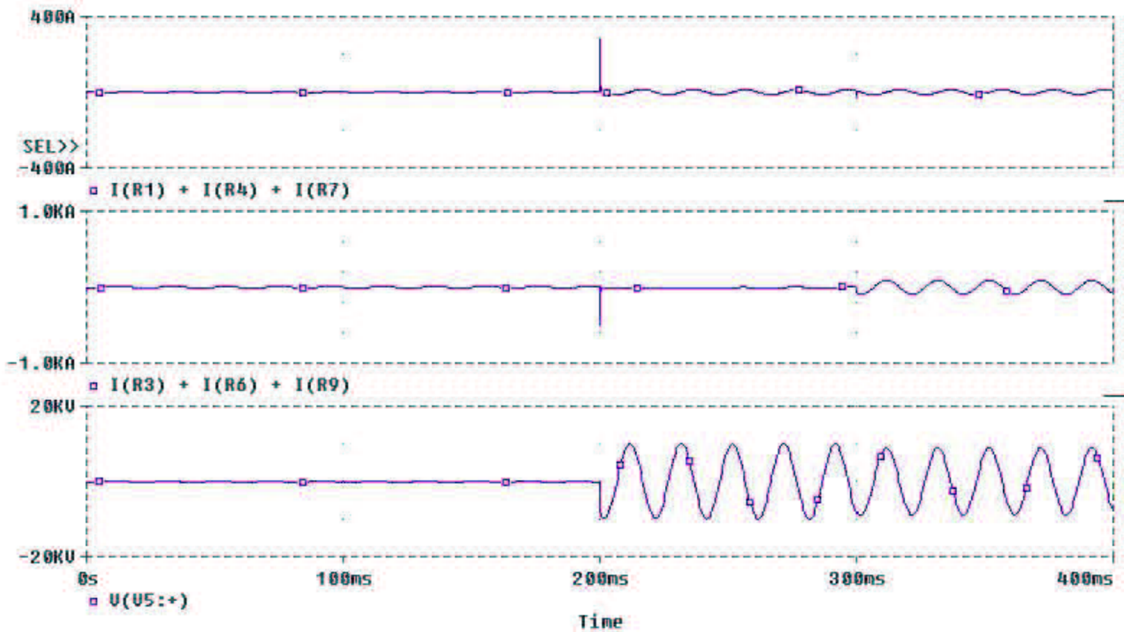
Obr. 33. Schéma modelové sítě.

Ladící tlumivka	L_1, R_{10}
Připínání odporníku	R_{12}
Pomocné R pro sledování proudů	R_{13}, R_{14}, R_{11}
Simulace ZS	u_1
Vedení A	R_1, R_4, R_7
Vedení B	R_2, R_5, R_8
Vedení C	R_3, R_6, R_9

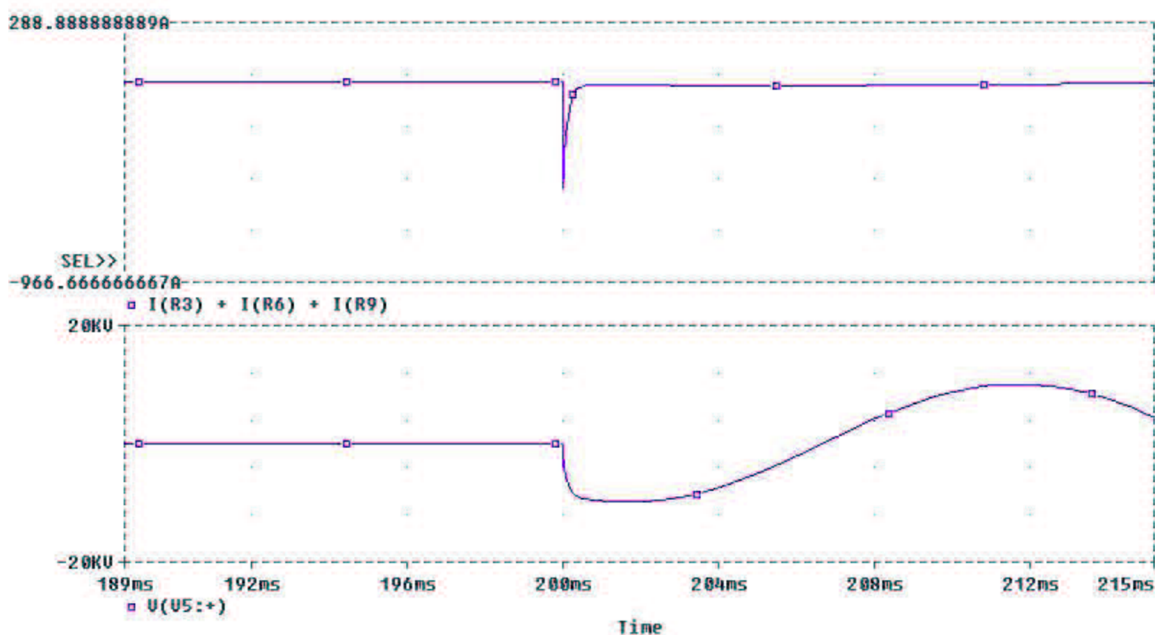
Na Obr. 34 jsou zobrazeny grafické výsledky simulací, kde je zobrazen proud nepostížené a postižené fáze a napětí na tlumivce pro menší hodnotu odporu zemního spojení R_{11} a na Obr. 35 je obdobná situace avšak pro větší hodnotu R_{11} . Na Obr. 36 je v podrobnějším časovém měřítku uveden detailní proudový ráz, vznikající při začátku zemního spojení.



Obr. 34. Časové průběhy I nepostížená fáze, postižená fáze a U tlumivka, R_{11} menší.



Obr. 35. Časové průběhy I nepostížená fáze, postižená fáze a U tlumivka, R_{11} větší.



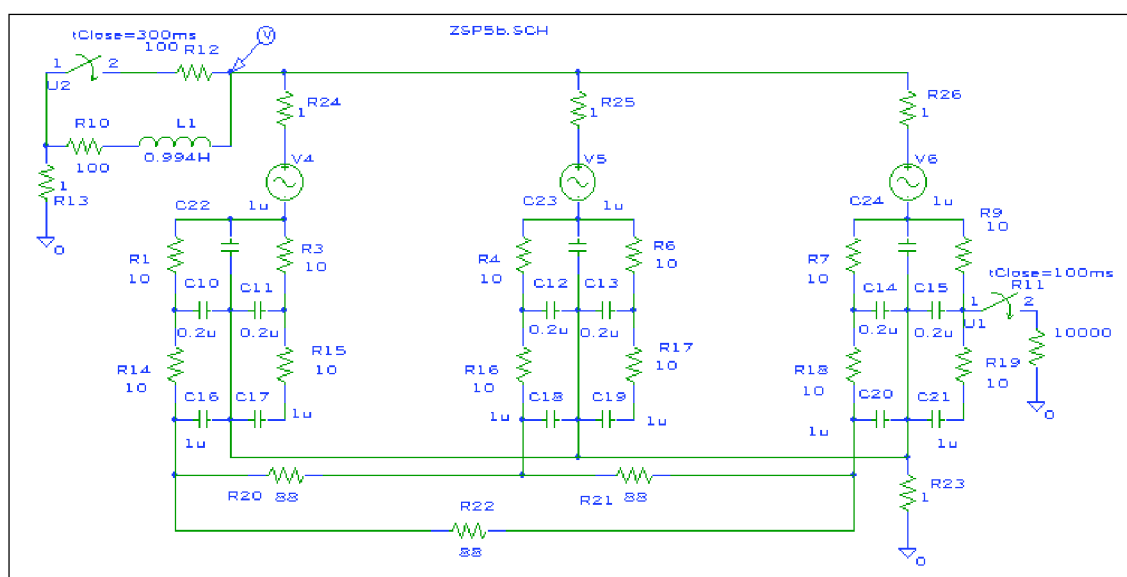
Obr. 36. Detail proudového rázu.

Na Obr. 37 je schéma kompenzované sítě pro simulaci chování s kapacitní nesymetrií a souměrnou zátěží jedné větve. Předpokládá se symetrická soustava napětí V_4, V_5, V_6 s jmenovitou hodnotou 10kV.

Zatížená větev je reprezentována odpory R_1, R_4, R_7 . Proud v zatížené větvi je přibližně 114 A. Nezatížená větev, postižená ZS s odporem R_{11} je reprezentována odpory R_3, R_6, R_9 . Impedance Z_0 je spočtena jako paralelní kombinace R, L, C a pro různé hodnoty R_{10} nabývá hodnot:

$$R_{10} = 10 \Omega, \text{ pak } |Z_0| = 5,7 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} = 100 \Omega, \text{ pak } |Z_0| = 986 \Omega$$

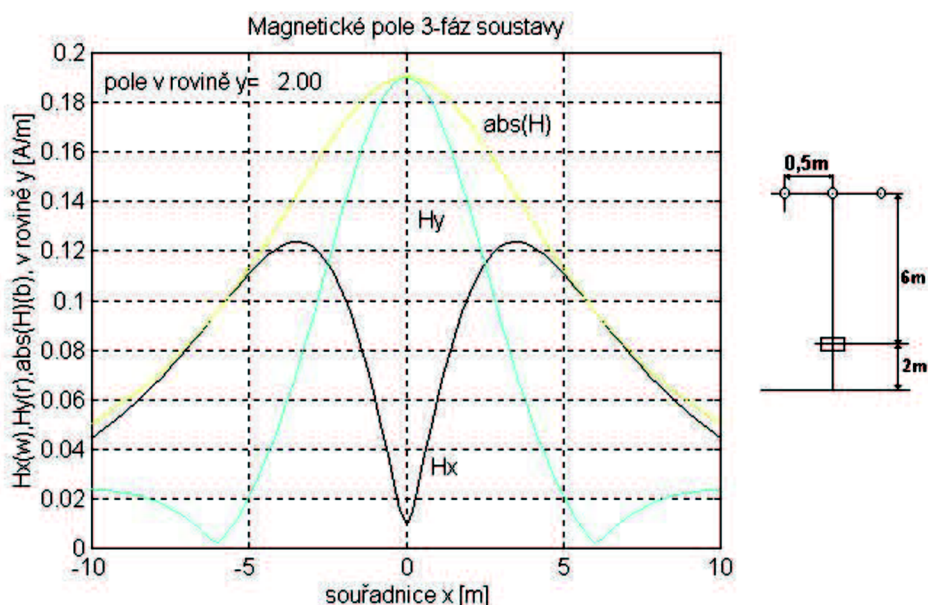


Obr. 37. Schéma modelové sítě.

Pomocí výpočetního programu MATLAB bylo simulováno rozložení magnetických a elektrických polí pod vodiči třífázové soustavy. Při simulovaných výpočtech se využilo vztahů uvedených v příloze 3. V části C přílohy 3 jsou pak uvedeny konkrétní vztahy pro magnetické a elektrické pole použité v programu MATLAB.

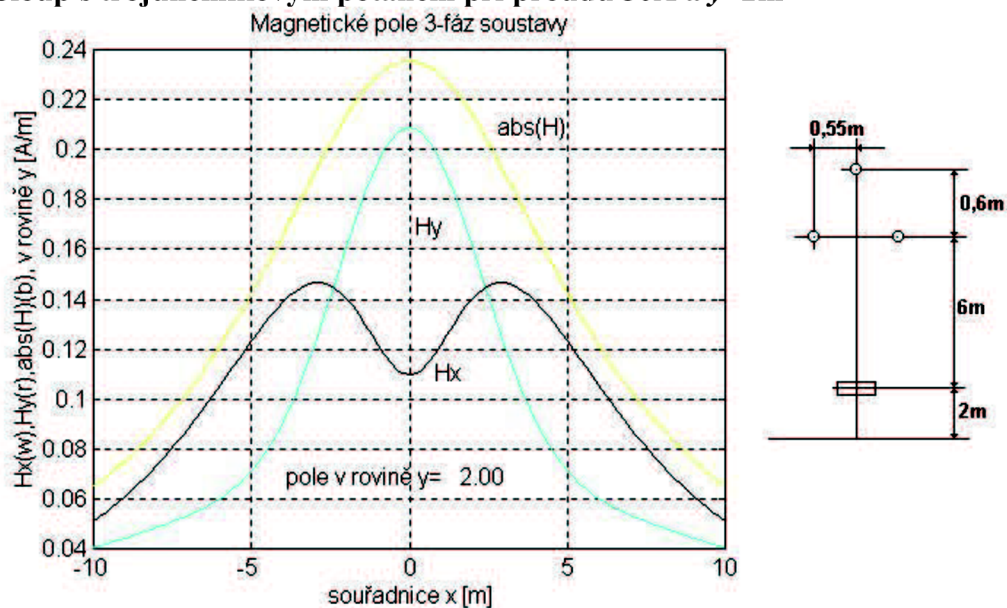
Na Obr. 38 a Obr. 39 jsou zobrazeny složky magnetického pole H_x, H_y a $|H|$ pro různé uspořádání vodičů na konzole.

Složky magnetického pole při proudu 50A a $y=2\text{m}$



Obr. 38. Magnetické pole třífázové soustavy. Rovinné uspořádání.

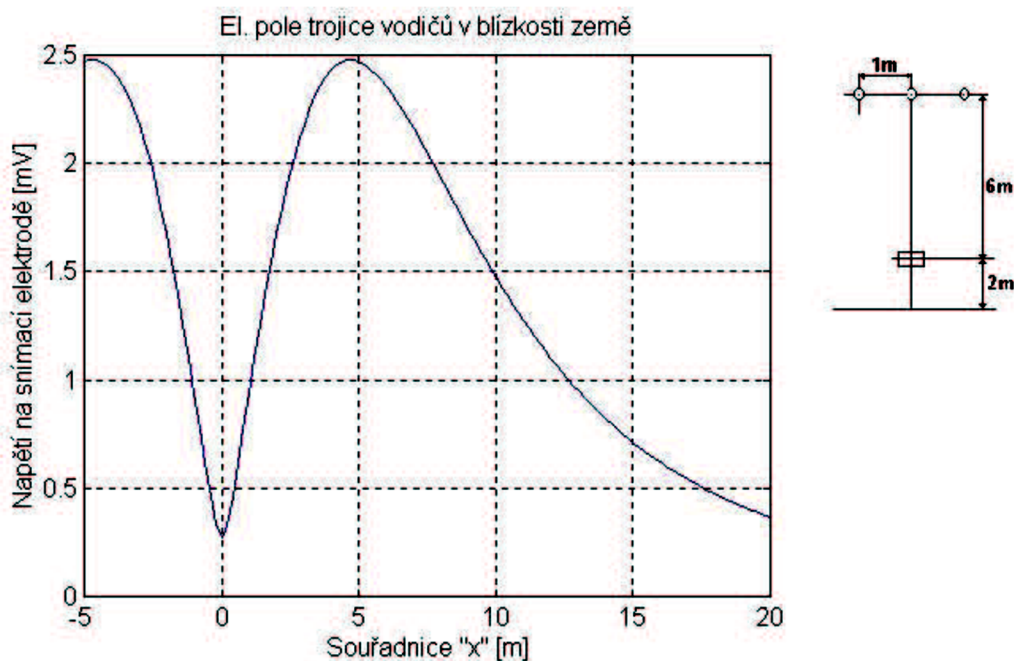
Sloup s trojúhelníkovým potahem při proudu 50A a $y=2\text{m}$



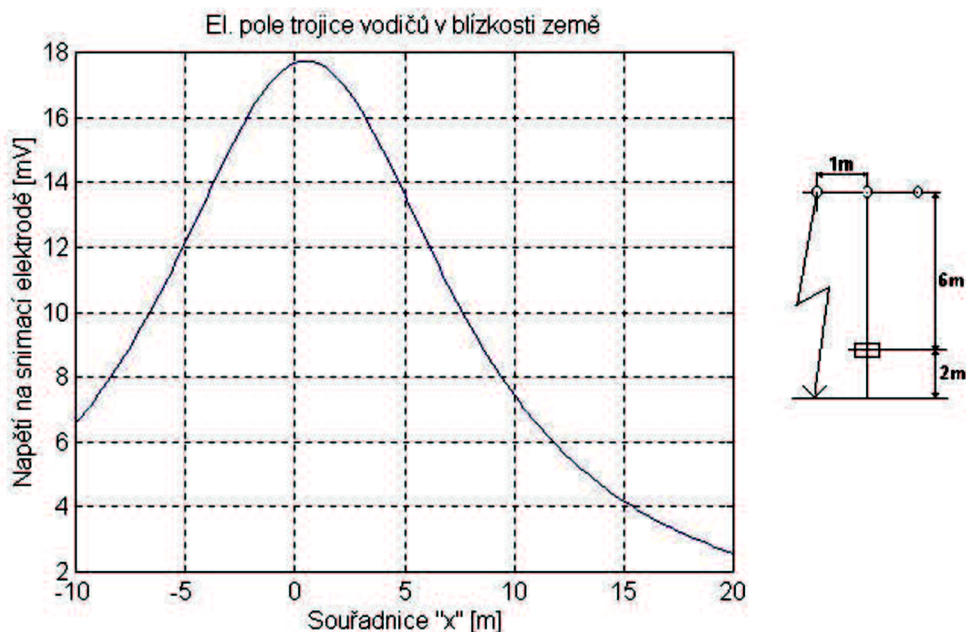
Obr. 39. Magnetické pole třífázové soustavy. Uspořádání do trojúhelníku.

Na Obr. 40 a Obr. 42 je zobrazen průběh rozložení elektrického pole pro různé typy uspořádání vodičů na konzole bez přítomnosti poruchy zemní spojení. Na Obr. 41 a Obr. 42 je zobrazen průběh rozložení elektrického pole v případě poruchy zemního spojení. Snímací elektroda je uvažována o rozměrech 0.1 x 0.05 m a o kapacitě 1000 pF.

**Napětí snímací elektrody pod třífázovým vedením pro napětí 12700V
Potah v horizontální rovině.**

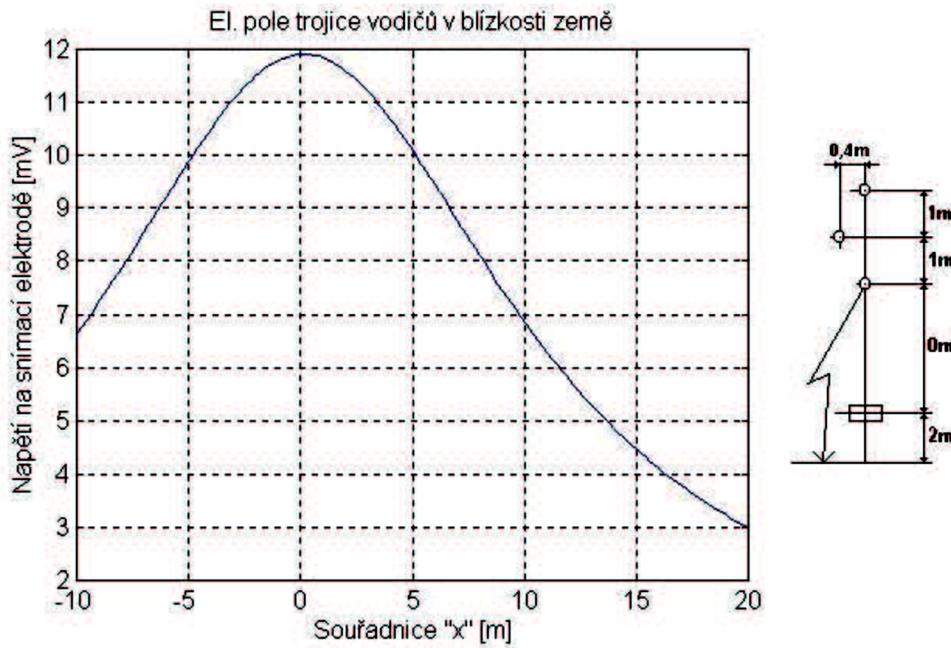
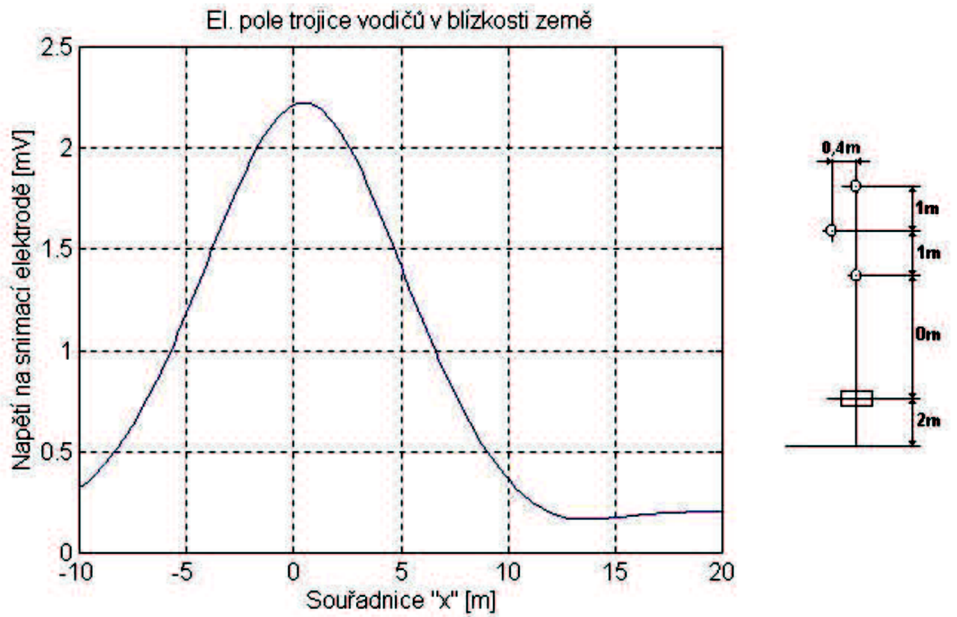


Obr. 40. Napětí snímací elektrody, symetrická soustava.



Obr. 41. Napětí snímací elektrody, zemní spojení krajního vodiče.

Potah typu „pulsoudek“ při napětí 12700V



6.2 Metody a vlastnosti vhodné pro aplikaci v nekontaktním indikátoru poruchových stavů

Na základě simulací a studia literatury byly navrženy následující vlastnosti, které je vhodné zahrnout do nekontaktního indikátoru. Kombinací více navržených metod se dosáhne spolehlivější činnosti indikátoru při detekci poruchových stavů.

6.2.1 Nadproud a zkrat

Pro sledování nadproudu nebo zkratu je definována mezní hodnota proudu I_{mez} . Pokud efektivní hodnota některého proudu I_1 , I_2 nebo I_3 překročí mezní hodnotu, čítá se doba, po kterou překročení trvá. Dále je definována doba T_{mez} . Pokud dojde v průběhu čítání doby k poklesu proudu v příslušné fázi pod I_{mez} , je sledování nadproudu či zkratu přerušeno a čeká se nové překročení I_{mez} . Pokud je doba překročení mezní hodnoty delší jak T_{mez} je vyhlášen nadproud či zkrat a vybaven binární výstup. Výstup zůstane vybaven po definovanou dobu $T_{R2VYBAV}$. Funkce snímání nadproudu má nejvyšší prioritu a je sledována neustále. Je tak možné indikovat zkrat, kterému předcházelo zemní spojení.

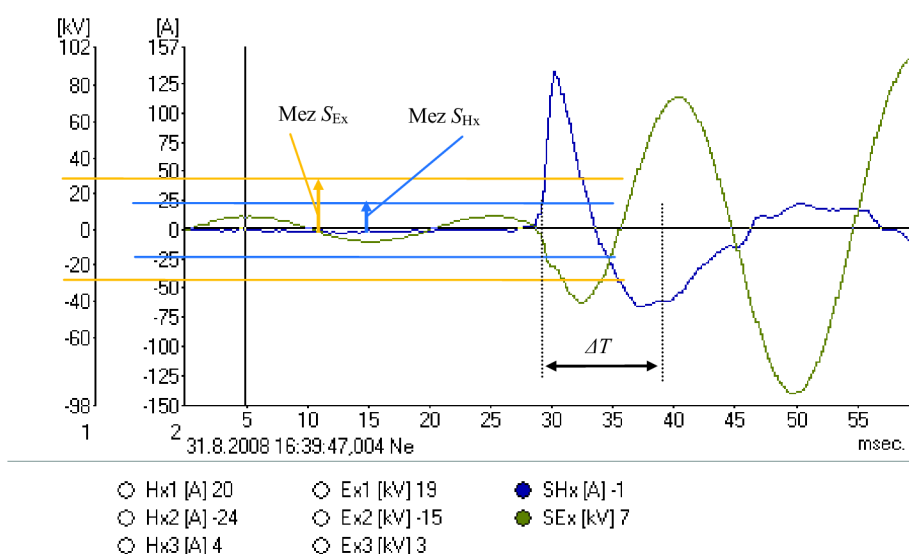
V nekontaktním indikátoru je aplikována jedna sada parametrů I_{mez} a T_{mez} . Je možné aplikovat více sad uvedených parametrů s tím, že vyhodnocení nadproudu a zkratu bude odděleno nastavením různých hodnot I_{mezi} případně i různou délkou trvání T_{mezi} .

6.2.2 Metoda první půlperrody

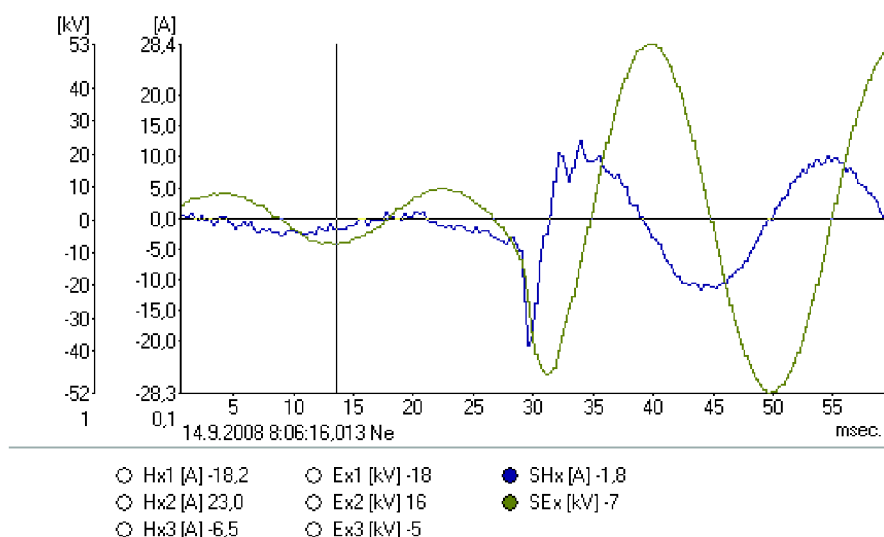
Pro metodu využívajícího přechodného děje jsou zavedeny mezní hodnoty pro netočivé složky I_{0mez} (mez S_{HX}), U_{0mez} (mez S_{EX}). Jestliže některá z těchto složek překročí nastavenou mez a signály I_0 a U_0 jsou v protifázi (Obr. 44), jde o postižené vedení, pokud jsou ve fázi (Obr. 45) jde o nepostižené vedení. Pokud dojde k překročení obou mezí v čase ΔT a signály I_0 a U_0 jsou v protifázi a zemní spojení trvá, je vybaven binární výstup a hlášeno zemní spojení. Pro zjištění, že ZS trvá, musí být efektivní hodnota U_0 nad stanovenou mezí také v čase $4s$ od zjištění překročení meze. Pokud ZS netrvá, jde o mžikové nebo velmi krátké ZS a binární výstup není vybaven. Dle fázových poměrů I_0 a U_0 je možné určit směr výskytu ZS.

6.2.3 Metody závislé na připínání odporníku

Pro použití metody je nutné znát časování připínání odporníku. To je definováno časem připnutí po zjištění ZS a dobou trvání připnutí. V indikátoru jsou pak vyhodnocovány rozdíly, které vzniknou srovnáním hodnot, kdy ještě není odporník připnut s hodnotami, kdy je odporník připnut. Jsou porovnávány veličiny činný výkon netočivých složek $P_{\epsilon 0}$, účinník Pf_0 a konduktance G_0 . Je-li zjištěna větší diference sledovaných veličin před a při připnutí odporníku, je zahlášeno ZS a vybaven binární výstup.



Obr. 44. Přechodný děj na postiženém vedení.



Obr. 45. Přechodný děj na nepostiženém vedení

6.2.4 Metoda průběžného sledování veličiny G_0

U této admitanční metody je sledována konduktance. Je definována mez G_{0mez} a doba $T_{G_{0mez}}$. Překročením nastavené meze pro G_0 po stanovenou dobu je nastaven příznak vybavení sledování G_0 . Dojde-li k poklesu G_0 pod stanovenou mez po dobu 20ms, je čítání stanovené doby vynulováno. Zemní spojení zjištěné admitanční metodou je možné hlásit vybavením binárního výstupu.

6.2.5 Metoda průběžného sledování páté harmonické veličiny I_0

U této metody je definována mez I_{05hmez} pro 5. harmonickou obsaženou v signálu I_0 . Dojde-li k překročení nastavené meze I_{05hmez} po stanovenou dobu je nastaven příznak vybavení sledování 5. harm. Dojde-li k poklesu 5. harmonické v signálu I_0 pod

stanovenou mez po dobu 20ms, je čítání stanovené doby vynulováno. Zemní spojení zjištěné sledováním 5. Harmonické v v signálu I_0 je možné hlásit vybavením binárního výstupu.

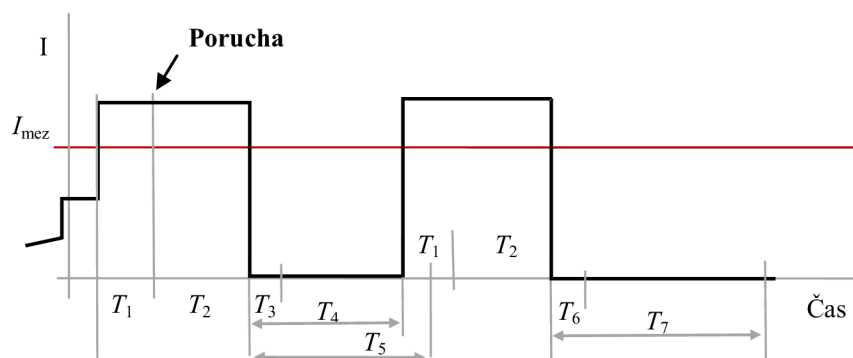
6.2.6 Sledování neúspěšného opětného zapnutí

Po překročení meze proudu I_{mez} alespoň v jedné fázi L_1 , L_2 nebo L_3 po dobu T_1 je vyhodnocen nadproud či zkrat. Pokud nadproud či zkrat pokračuje po dobu T_2 delší než 1s, je funkce sledování neúspěšného OZ ukončena (neúspěšný OZ se nevyhodnotí). Pokud nadproud netrvá, testuje se beznapěťový stav, který musí nastat do limitu $T_3 < 200ms$. Pokud se tak nestane, je funkce neúspěšného OZ ukončena. Beznapěťový stav je vyhodnocen, pokud napětí ve všech fázích L_1 , L_2 a L_3 klesne pod 10% jmenovité hodnoty a zůstává zde. Pokud napětí na některé fázi L_1 , L_2 nebo L_3 stoupne nad 10% mez po dobu alespoň 20ms, je beznapěťový stav zrušen, čímž je zrušeno i sledování NOZ. Pokud je beznapěťový stav delší jak nastavená hodnota T_5 (max. pauza mezi zkraty, např. 800ms), je funkce neúspěšného OZ ukončena. Pokud by druhý nadproud přišel v čase $T_4 < 100ms$, je funkce sledování neúspěšného OZ ukončena.

Druhý nadproud musí tedy přijít do uplynutí beznapěťové pauzy T_5 (v našem případě od 100 do 800ms) a musí splňovat stejné podmínky jako první nadproud (hladina proudu I_{mez} , doba T_1). Pokud by byl druhý nadproud delší jak 1s, je funkce neúspěšného OZ ukončena.

Pokud by po druhém nadproudu nenastal beznapěťový stav do času T_6 , je funkce neúspěšného OZ ukončena.

Dále se čeká, že beznapěťový stav trvá minimálně po dobu T_7 . Pokud by v této době přišel nadproud v délce 20ms, je funkce neúspěšného OZ ukončena. Pokud beznapěťový stav trvá v našem případě např. 5s, je vyhlášen neúspěšný OZ a vybaven binární výstup.



Obr. 46. Vyhodnocení neúspěšného OZ

6.2.7 Otočení směru zemního spojení

Umístění snímačů na místě měření nemusí být vždy možné v požadovaném směru, kdy je ZS indikováno ve směru od napájecí rozvodny. Nekontaktní indikátor umožňuje otočení směru proudu a tím i změnu směru indikace indikátoru.

V praxi se také vyskytují vedení, kde se směr proudu mění velmi dynamicky. Např. připojení dalšího zdroje energie. Tento další zdroj energie vykazuje však v čase

proměnné parametry, které v daném bodě umístění nekontaktního indikátoru mění směr toku energie. V takovém případě, by bylo také vhodné automaticky měnit směr indikací v nekontaktním indikátoru.

6.2.8 Konec zemního spojení

Pro zjištění konce ZS jsou sledovány veličiny I_0 a U_0 . Dojde-li k poklesu těchto veličin pod meze I_{0mez} a U_{0mez} současně po dobu delší než T_{Kmez} je považováno probíhající ZS za skončené a vybaven binární výstup.

6.2.9 Ostatní stavy VN sítě

Nekontaktní indikátor neustále sleduje stav vstupních veličin ($U_1, U_2, U_3, I_1, I_2, I_3, U_0, I_0$). Je proto možné na základě tohoto sledování zjistit další stavy sítě VN či sledovaného vývodu nebo úseku. Jde např. o stav bez napětí, stav bez zátěže, stav připnutí zátěže, stav vzniku nesymetrie apod. Ke každému stavu je možné definovat potřebná kritéria. Např. stav bez napětí je vybaven, pokud jsou napětí U_1, U_2, U_3 současně pod mezní hodnotou U_{min} (např. 10% jmenovité hodnoty) po stanovenou dobu T_{UMIN} . Každému stavu pak může být přiřazen binární výstup pro hlášení jeho vybavení.

6.2.10 Získání online údajů

Při manipulacích v síti je vhodné ověřit stavy, v kterých se VN síť nachází. K tomu slouží okamžité zjištění aktuálního stavu měřených veličin a jejich předání nadřazenému systému. Je možné předat např. efektivní hodnoty kontinuálně měřených veličin ($U_1, U_2, U_3, I_1, I_2, I_3, U_0, I_0, U_{BAT}$) nebo oscilografické průběhy měřených veličin např. v délce 40ms.

6.3 Korekce působení okolních fází

Následující popis předpokládá od okolních vlivů dostatečně vzdálenou soustavu tří fázových vodičů L_1, L_2 a L_3 VN vedení s trojfázovou soustavou proudů I_1, I_2 a I_3 , viz. Obr. 47. Vodiče jsou umístěny v rovině a jejich vzdálenosti jsou l_{12} a l_{23} . Snímače elektrických a magnetických polí jednotlivých fází S_1, S_2 a S_3 jsou umístěny ve vzdálenosti a_0 , která je určena výškou izolátorů příslušné napěťové hladiny.

Pro napětí U_j indukovaná v magnetických snímačích S_j proudy I_i jednotlivých vodičů L_i platí obecně tato soustava rovnic:

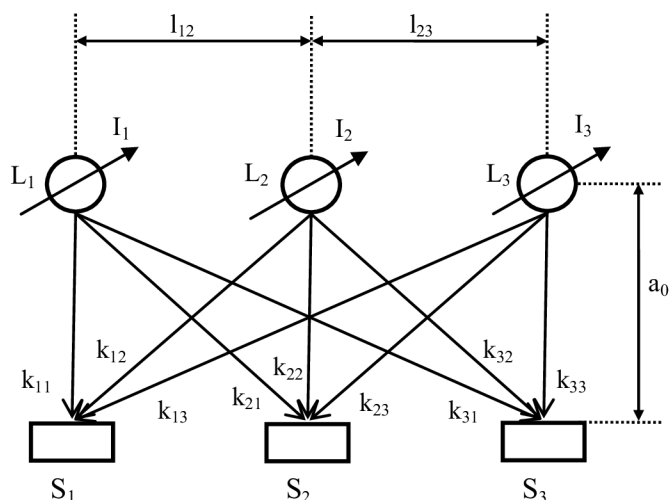
$$\begin{aligned} U_1 &= k_{11}I_1 + k_{12}I_2 + k_{13}I_3 \\ U_2 &= k_{21}I_1 + k_{22}I_2 + k_{23}I_3 \\ U_3 &= k_{31}I_1 + k_{32}I_2 + k_{33}I_3 \end{aligned} \quad (32)$$

nebo zkráceně pomocí maticového zápisu:

$$\mathbf{U} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{I} \quad (33)$$

Výpočet proudů z naměřených napětí snímačů U_j pomocí inverzní matice \mathbf{k} :

$$\mathbf{I} = \mathbf{k}^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (34)$$



Obr. 47: Trojfázová soustava snímačů magnetických polí na VN vedení.

Pro reálné instalace se shodnou vzdáleností mezi fázovými vodiči, $l_0=l_{12}=l_{23}$ a shodnou vzdáleností a_0 jednotlivých snímačů od odpovídajících fázových vodičů, tj. rovinné a symetrické uspořádání pak platí:

$$\begin{aligned} k_{11} &= k_{22} = k_{33} = K_1 \\ k_{12} &= k_{21} = k_{23} = k_{32} = K_2 \\ k_{13} &= k_{31} = K_3 \end{aligned} \quad (35)$$

Dosažením a řešením soustavy rovnic dostaneme výpočtové konstanty:

$$\begin{aligned} A &= K_1^2 - K_2^2 \\ B &= K_2 \cdot K_3 - K_1 \cdot K_2 \\ C &= K_2^2 - K_1 \cdot K_3 \\ D &= K_1^3 + 2 \cdot K_2^2 \cdot K_3 - K_1 \cdot K_3^2 - 2 \cdot K_1 \cdot K_2^2 \\ E &= K_1^2 - K_3^2 \\ F &= K_2^2 - K_1 \cdot K_3 \end{aligned} \quad (36)$$

Okamžité hodnoty proudů jsou:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1 \cdot A + U_2 \cdot B + U_3 \cdot C}{D} = U_1 \frac{A}{D} + U_2 \frac{B}{D} + U_3 \frac{C}{D} \\ I_2 &= \frac{U_1 \cdot B + U_2 \cdot E + U_3 \cdot C}{D} = U_1 \frac{B}{D} + U_2 \frac{E}{D} + U_3 \frac{C}{D} \\ I_3 &= \frac{U_1 \cdot F + U_2 \cdot B + U_3 \cdot A}{D} = U_1 \frac{F}{D} + U_2 \frac{B}{D} + U_3 \frac{A}{D} \end{aligned} \quad (37)$$

Další zjednodušení je možné, když poměr vzdálenosti vodičů a vzdálenosti snímačů od roviny vedení je alespoň 4:1. Pak s chybou cca 5% (za předpokladu přibližně stejné velikých fázových proudů) platí:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{U_1}{K_1} - \frac{U_2 K_2}{K_1^2} - \frac{U_3 K_3}{K_1^2} \\
 I_2 &= \frac{U_2}{K_1} - \frac{U_1 K_2}{K_1^2} - \frac{U_3 K_2}{K_1^2} \\
 I_3 &= \frac{U_3}{K_1} - \frac{U_2 K_2}{K_1^2} - \frac{U_1 K_3}{K_1^2}
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Při praktické realizaci je velikost převodních konstant K_1 , K_2 a K_3 závislá nejen na geometrických rozměrech instalace, ale i na citlivosti snímače magnetického pole, tj. jeho konstrukci vyjádřené konstantou A_0 a na zesílení signálu v indikátoru zemních spojení vyjádřené konstantou A_p . Uvedené dvě konstrukční konstanty jsou shodné pro všechny tři převodní konstanty K_1 , K_2 a K_3 , protože jak konstrukce snímačů, tak i zesílení jednotlivých větví je obvykle shodné.

$$K_1 = A_0 A_p A_1, K_2 = A_0 A_p A_2, K_3 = A_0 A_p A_3 \tag{39}$$

přičemž platí:

$$A_1 = 1, A_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{a_0}{l_0}\right)^2}, A_3 = \frac{1}{1 + 4\left(\frac{a_0}{l_0}\right)^2} \tag{40}$$

Analogicky by bylo možné odvodit vztahy i pro elektrická pole. V tomto případě jsou realizované výsledky v podstatně vyšší míře závislé na okolí, a proto je účelné je stanovit empiricky.

Na základě praktických i laboratorních zkušeností vyplynulo, že snímáním a vyhodnocením magnetických polí lze spolehlivě dosáhnout 5%ní přesnost měření proudů, zatímco pro napětí je dosažitelná přesnost nižší. I zde však lze kalibraci v daném konstrukčním uspořádání dosáhnout prakticky použitelné přesnosti měření fázových napětí.

V praxi se snímače elektrických a snímače magnetických polí používají také pro svoje vhodné frekvenční vlastnosti. Snímače elektrických polí použité u indikátorů zemních spojení snímají i napětí o frekvenci podstatně nižší než je kmitočet sítě.

6.4 Realizace měřící sestavy

6.4.1 Snímače

Pro nekontaktní indikátor je rozhodující volba umístění snímacích prvků v souvislosti se zdrojem signálu. Za tímto účelem bylo zvoleno co možná nejjednodušší řešení snímačů, které zaručí maximální spolehlivost a bezpečnost použitého snímacího prvku. Nekontaktní indikátor pro vedení VN je tvořen snímači elektrického a magnetického pole, které jsou umístěny v bezpečné vzdálenosti od vodičů a jejich výstupy jsou vedeny do vyhodnocovací jednotky. Tyto kombinované snímače elektrického a magnetického pole jsou zavěšeny na vodičích prostřednictvím izolátorů s odstupem od stožáru a vyhodnocovací jednotka je umístěna na stožáru. Část snímače

pro snímání elektrického pole může být tvořena elektrodou napojenou na vyhodnocovací jednotku přes zemněný obvod tvořený snímacím kondenzátorem a vstupním odporem, přičemž je tento obvod propojen s mikropočítačem prostřednictvím zesilovače. Část snímače pro snímání magnetického pole může být tvořena snímací cívkou, do jejíhož zemněného obvodu jsou zapojeny odpory integračního členu a kondenzátor integračního členu, přičemž je tento obvod propojen s mikropočítačem prostřednictvím diferenciálního zesilovače. Trojice sestav izolátorů se snímači tvoří pak jednu sadu snímačů. Vzdálenost izolátorů na straně snímačů může být pevně fixována (Obr. 48), nebo může být spoj proveden ohebným lanem (Obr. 49). Upnutí na vedení je možné různými úchyty i s ohledem na možnost práce pod napětím (Obr. 50). Možné provedení kombinovaného snímače ukazuje Obr. 51.

Výše popsané uspořádání a vlastnosti snímačů jsou předmětem patentového spisu č.300802 a užitého vzoru č.16983. Viz příloha č. 1 a příloha č. 2.



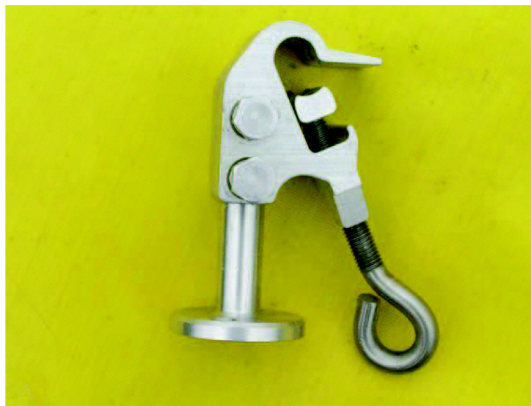
Obr. 48. Pevné uchycení snímačů.



Obr. 49. Propojení snímačů zemnicím lanem.



Obr. 50. Možnosti provedení úchyty.





Obr. 51. Detailní snímek snímače pro jednu fázi a uchycení na izolátor

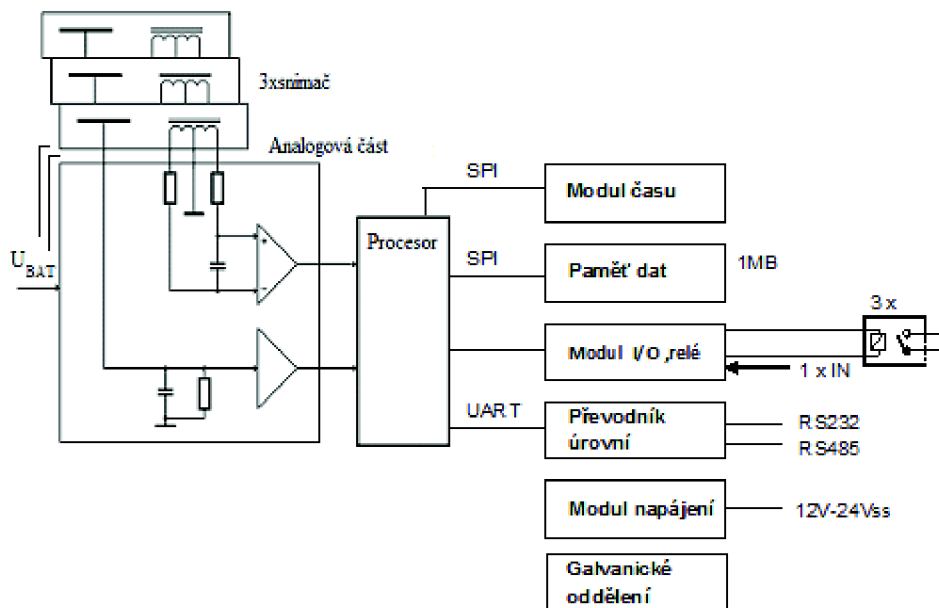
6.4.2 Požadavky na vyhodnocovací jednotku

Signály z kombinovaných snímačů elektrického a magnetického pole jsou zpracovávány ve vyhodnocovací jednotce. Blokové schéma vyhodnocovací jednotky je uvedeno na Obr. 52. Kromě funkčních požadavků na indikaci poruchových stavů VN vedení mohou být na vyhodnocovací jednotku a její části kladeny požadavky další. Mezi hlavní patří minimální energetické nároky pro zajištění provozu na místech sítě, kde je možné čerpat energii pouze ze solárních článků. Dále pak zavedení požadovaného komunikačního protokolu pro komunikaci s nadřazeným systémem, úprava obsahu přenášených dat apod.

Signály ze snímačů jsou vedeny do vstupní analogové části, kde jsou zesíleny a upraveny. Byly navrženy čtyři stupně zesílení pro každý měřený kanál pro možnost měření na různých hladinách VN. Měřených kanálů je celkem 7. Tři pro napětí (složku $Ex1, Ex2$ a $Ex3$), tři pro proudy (složku $Hx1, Hx2$ a $Hx3$) a jeden pro sledování napětí baterie pro případ napájení indikátoru z baterie, která je dobíjena solárními články. Jako zdroj hodin reálného času ve vyhodnocovací jednotce je možné použít obvod RX4045SA [3], který má v jednom pouzdře i krystal. Kromě jiného obsahuje adjustační funkce a výstup impulzů s periodou 1s.

Jako paměť poruchových záznamů je použita 1MB DataFlash paměť se sériovým přístupem AT45DB081B [4]. Paměť je členěna po 264B stránkách s 264B SRAM vyrovnávací pamětí. Velikost paměti je dostatečná pro 120 záznamů v navržené struktuře dat (viz. Tab. 4). Pro více záznamů je možné paměť rozšířit dvojnásobně nebo čtyřnásobně.

Modul I/O a relé obsahuje jeden vstup a tři výstupní relé s volným kontaktem, které signalizují zemní spojení, zkrat a neúspěšný OZ. Modul převodníku úrovní může být osazen převodníky rozhraní pro RS232, RS485 nebo za použití čipu FTDI FT232RL pro USB. Modul převodníků rozhraní obsahuje galvanické oddělení signálů pomocí optronů. Modul napájení dodává potřebné napěťové hladiny. Obsahuje DC/DC měnič.



Obr. 52. Blokové schéma nekontaktního indikátoru.

6.4.3 Požadavky na výběr řídicího procesoru vyhodnocovací jednotky

Pro zabezpečení funkčnosti použitých detekčních metod (viz kap.6.2) musí být získány hodnoty veličin uvedených v rovnicích (41) až (52). Uvedené výpočty se provedou maximálně v 50% času mezi jednotlivými vzorky získanými A/D převodníkem. Pro 128 vzorků a 50Hz vstupní signál je mezi vzorky 156,25μs. Rovnice (41),(42) a (43) popisují získání okamžitých hodnot I_1 , I_2 a I_3 se zahrnutím přepočtových korekcí proudu a dále se sumují kvadráty hodnot pro výpočet efektivní hodnoty po uplynutí periody signálu. Rovnice (45-47) popisují výpočet okamžitých hodnot U_1 , U_2 a U_3 se zahrnutím přepočtových korekcí napětí. Hodnoty Hx_1 , Hx_2 , Hx_3 , Ex_1 , Ex_2 , Ex_3 , U_{BAT} jsou předány A/D převodníkem. Dále jsou spočteny netočivé složky I_0 a U_0 a průběžné sumace pro výpočet efektivních hodnot I_0 a U_0 a výkonu $P_{\varepsilon 0}$.

$$I_1 = Hx_1 N_{I1} + Hx_2 N_{I2} + Hx_3 N_{I3}, \quad \sum I_1^2 = \sum I_1^2 + I_1^2 \quad (41)$$

$$I_2 = Hx_1 N_{I2} + Hx_2 N_{I4} + Hx_3 N_{I2}, \quad \sum I_2^2 = \sum I_2^2 + I_2^2 \quad (42)$$

$$I_3 = Hx_1 N_{I5} + Hx_2 N_{I2} + Hx_3 N_{I1}, \quad \sum I_3^2 = \sum I_3^2 + I_3^2 \quad (43)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 \quad (44)$$

$$U_1 = Ex_1 N_{U1} + Ex_2 N_{U2} + Ex_3 N_{U3} \quad (45)$$

$$U_1 = Ex_1 N_{U2} + Ex_2 N_{U4} + Ex_3 N_{U2} \quad (46)$$

$$U_1 = Ex_1 N_{U5} + Ex_2 N_{U2} + Ex_3 N_{U1} \quad (47)$$

$$U_0 = U_1 + U_2 + U_3 \quad (48)$$

$$\sum I_0^2 = \sum I_1^2 + I_0^2 \quad (49)$$

$$\sum U_0^2 = \sum U_1^2 + U_0^2 \quad (50)$$

$$\sum U_0 I_0 = \sum U_1 I_0 + U_0 I_0 \quad (51)$$

$$\sum U_{BAT} = \sum U_{BAT} + U_{BAT} \quad (52)$$

$N_{I1}, N_{I2}, N_{I3}, N_{I4}, N_{I5}$ – přepočtové konstanty pro proud

$N_{U1}, N_{U2}, N_{U3}, N_{U4}, N_{U5}$ – přepočtové konstanty pro napětí

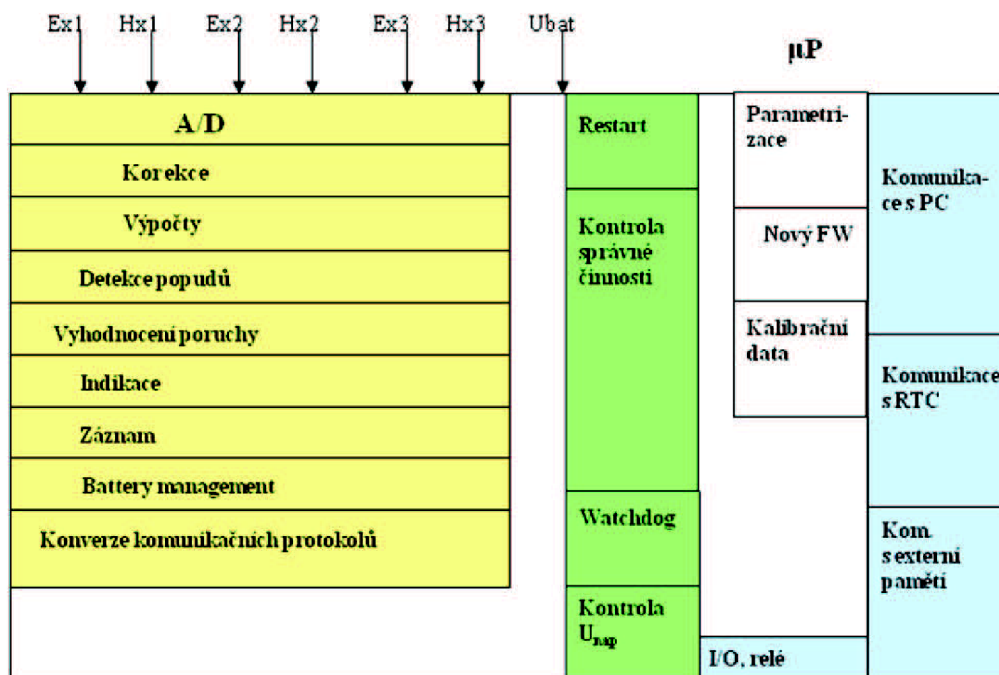
Na Obr. 53 jsou uvedeny funkční bloky, které je výhodné zabezpečit pomocí mikroprocesoru. Na další činnosti dle výše uvedeného odstavce připadá přibližně druhých 50% výkonu mikroprocesoru.

Hlavní kritéria pro výběr řídicího procesoru je možné shrnout do následujících:

- Dostatečná rychlost
- Nízká spotřeba
- Přítomnost důležitých periférií na čipu
- Dostatečná velikost paměti RAM
- A/D převodník na čipu alespoň 12-ti bitový
- HW násobička

Pro zahájení vývoje zkušebních vzorků nekontaktních indikátorů se rozhodovalo mezi mikroprocesory s označením Nanowat od firmy Microchip a procesory řady MSP430 od firmy Texas Instruments. Nakonec byla zvolena řada MSP430, protože v té době dostupné mikroprocesory Microchip obsahovaly pouze 10-ti bitový A/D převodník a méně nutné paměti RAM.

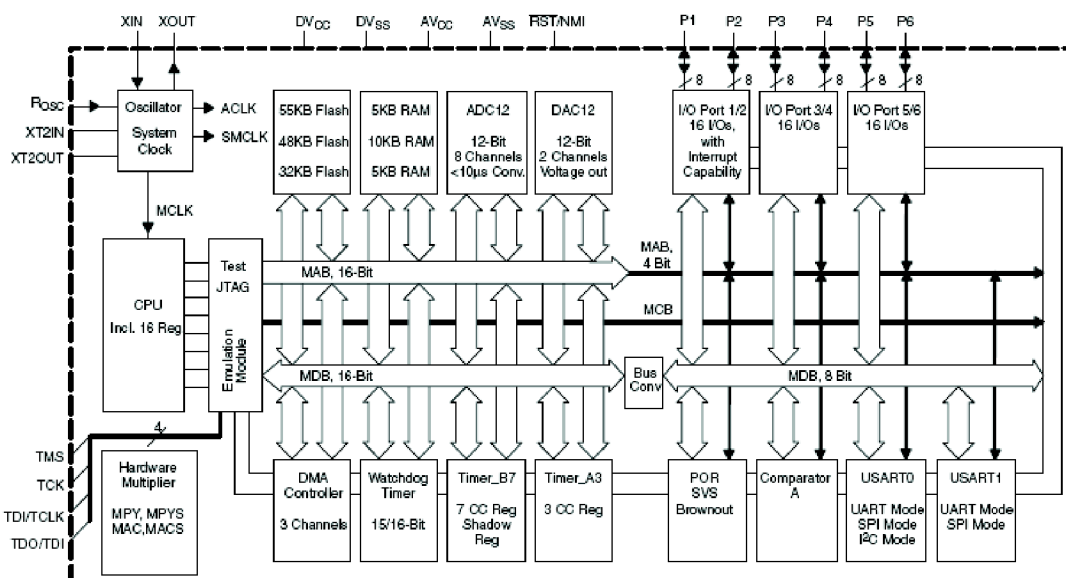
Byl vybrán mikroprocesor s označením MSP430F1611 [1][2][3], který obsahuje 10kB paměti RAM. Mikroprocesor může být taktován až 8MHz, je 16-ti bitový s redukováným souborem instrukcí RISC. Velikost paměti na data 48kB FEPRAM je také dostatečná. Schéma procesoru a jeho interních periférií ukazuje Obr. 54.



Obr. 53. Funkční bloky indikátoru v řídicím procesoru

Procesor obsahuje hardwarovou násobičku, která disponuje také funkcí násobení a přičtení. DMA kanálu je použito pro obsluhu sériového rozhraní UART ve směru k uživateli. Druhý sériový kanál je použit v módu SPI pro komunikaci s externími periferiemi. S výhodou je použita také funkce autoscan u A/D převodníku, při které se navzorkují všechny požadované kanály a po té je vyvoláno přerušení. K vlastnímu řízení (časování) A/D převodníku je použit čítač/časovač A.

Vývojové prostředí IAR Systems je dodáváno zdarma pro neomezenou délku kódu v assembleru a pro 8kB kódu v jazyku C. Řídicí FW indikátoru byl sestaven v assembleru.



Obr. 54. Funkční blokové schéma mikroprocesoru MSP430F1611

6.5 Řešení firmware

K řešení FW použitého mikroprocesoru bylo využito standardní vývojové prostředí firmy IAR Systems (Obr. 55) dodávané pro rodinu mikroprocesorů MSP430. Z důvodu předcházejících projektů, které byly psány v assembleru, byl pro tvorbu FW použit také assembler. Vývojové prostředí obsahuje assembler, překladač, linker a debugger. Debugger umožňuje simulovaný provoz nebo provoz v cílové aplikaci pomocí rozhraní JTAG.

FW nekontaktního indikátoru je složen z následujících programových modulů:

- Hlavní – řídicí část programu, výpočty po uplynutí periody
- Data – definice datových struktur
- Adprevod – obsluha A/D převodu a výpočty mezi dvěma převody
- CRC – výpočet kontrolního součtu, generační polynom $1+x_2+x_{15}+x_{16}$
- FFT_1_32vz – výpočet FFT
- HodinyRX – obsluha hodin reálného času
- Ser_FE – obsluha externí FEPRM paměti na data
- Serkom – obsluha sériového rozhraní pro nadřazený systém
- FWloader – zavedení nové verze FW pomocí sériového rozhraní
- FWloaderFE – zavedení nové verze FW z externí FEPRM paměti

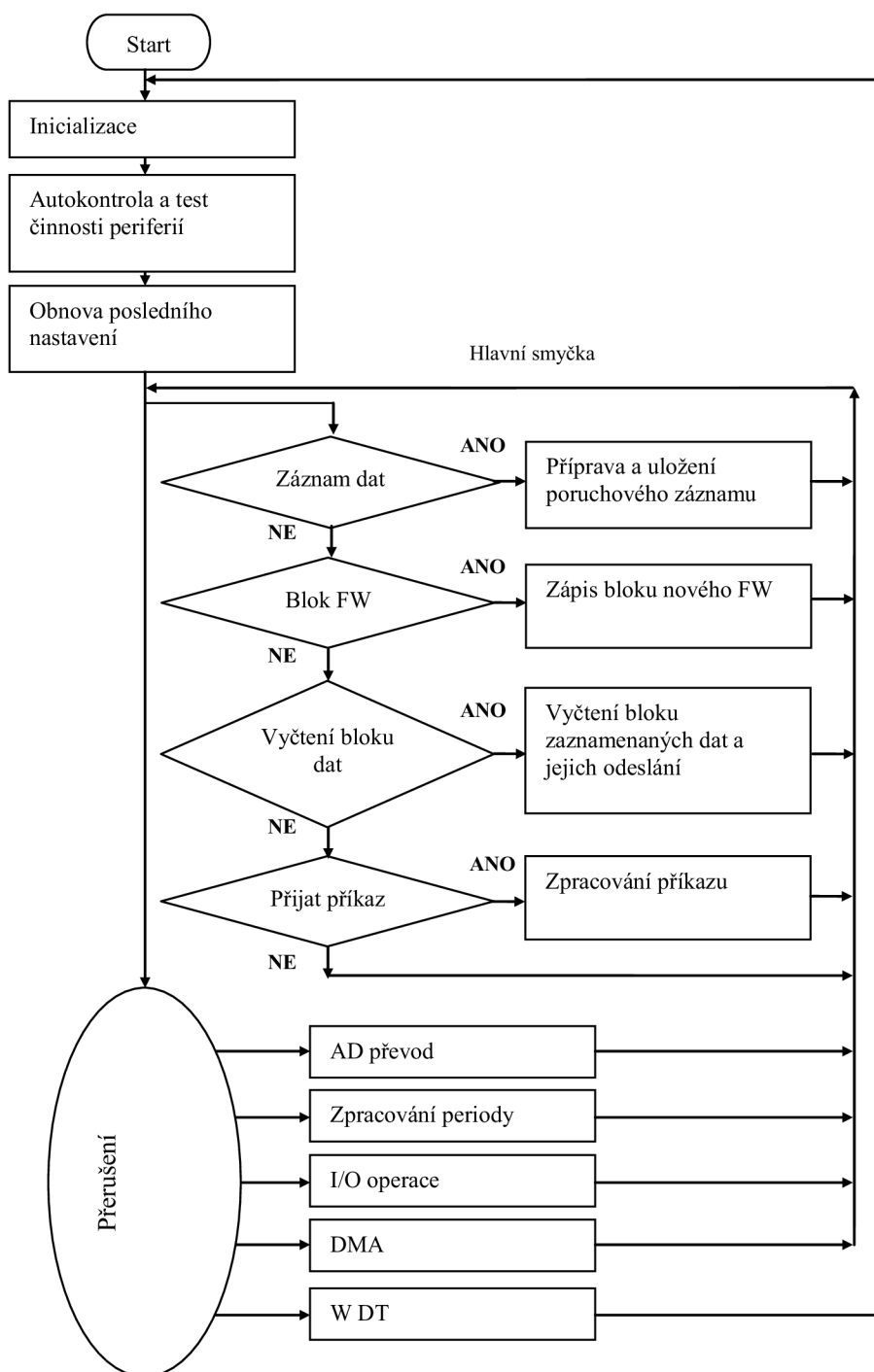
Obr. 56 znázorňuje vývojový diagram činnosti indikátoru. Po zapnutí je proveden restart procesoru. Pak následuje inicializace procesoru a interních periférií procesoru, inicializace a kontrola externích periférií (RTC, FEPRM). Dále se z vnitřní paměti načte poslední nastavení a provede jeho obnova. Povolí se přerušování a spustí hlavní smyčka programu.

V hlavní smyčce programu je testováno, zda je připraven poruchový záznam. Pokud ano, uloží se do externí paměti FEPRM. Dále se testuje příchod bloku nového FW. Pokud je takový blok přijat, je uložen do externí paměti FEPRM. Dále se testuje, zda proběhlo vyčtení bloku uložených dat. Pokud je blok dat vyčten z externí paměti FEPRM, je zahájeno jeho vysílání po sériovém kanálu. Dále se testuje přijetí řídicího příkazu. Pokud je takový příkaz přijat, provede se jeho zpracování a je poslána odpověď o stavu zpracování.

Kromě výše popsaných testovaných příznaků jsou vyvolávána a obsluhována přerušování. Základním přerušením je přerušování od A/D převodníku. Přerušování je vyvoláno každých 312,5 μ s (64 vzorků za periodu) po získání údajů ze všech měřených kanálů.

Mezi dvěma přerušováními A/D převodníku (312,5 μ s) probíhají výpočty, které jsou uvedeny v kap. 6.4.3 a další činnosti:

- korekce signálů
- test špičkových hodnot
- průběžné výpočty efektivních hodnot
- testy popudových signálů.



Obr. 56. Vývojový diagram činnosti indikátoru.

Nejdůležitější částí je obsluha A/D převodu a výpočty prováděné mezi jednotlivými vzorky. Délka obsluhy A/D převodu má zásadní vliv na volbu periody vzorkování, která byla u indikátoru zvolena 312,5 μ s. To odpovídá 64 vzorkům 50Hz vstupního signálu. V čase mezi dvěma vzorky jsou vyhodnocovány parametry popsané rovnicemi (41) až (52) viz kap.6.4.2. Vzorky všech sedmi kanálů ($Hx_1, Hx_2, Hx_3, Ex_1, Ex_2, Ex_3, U_{BAT}$) jsou

převzaty z mezipaměti A/D převodníku a uloženy do oběžného registru snímaných vzorků. Dále je provedena korekce nuly na každém kanálu a provedeny další korekce dle rovnice (37).

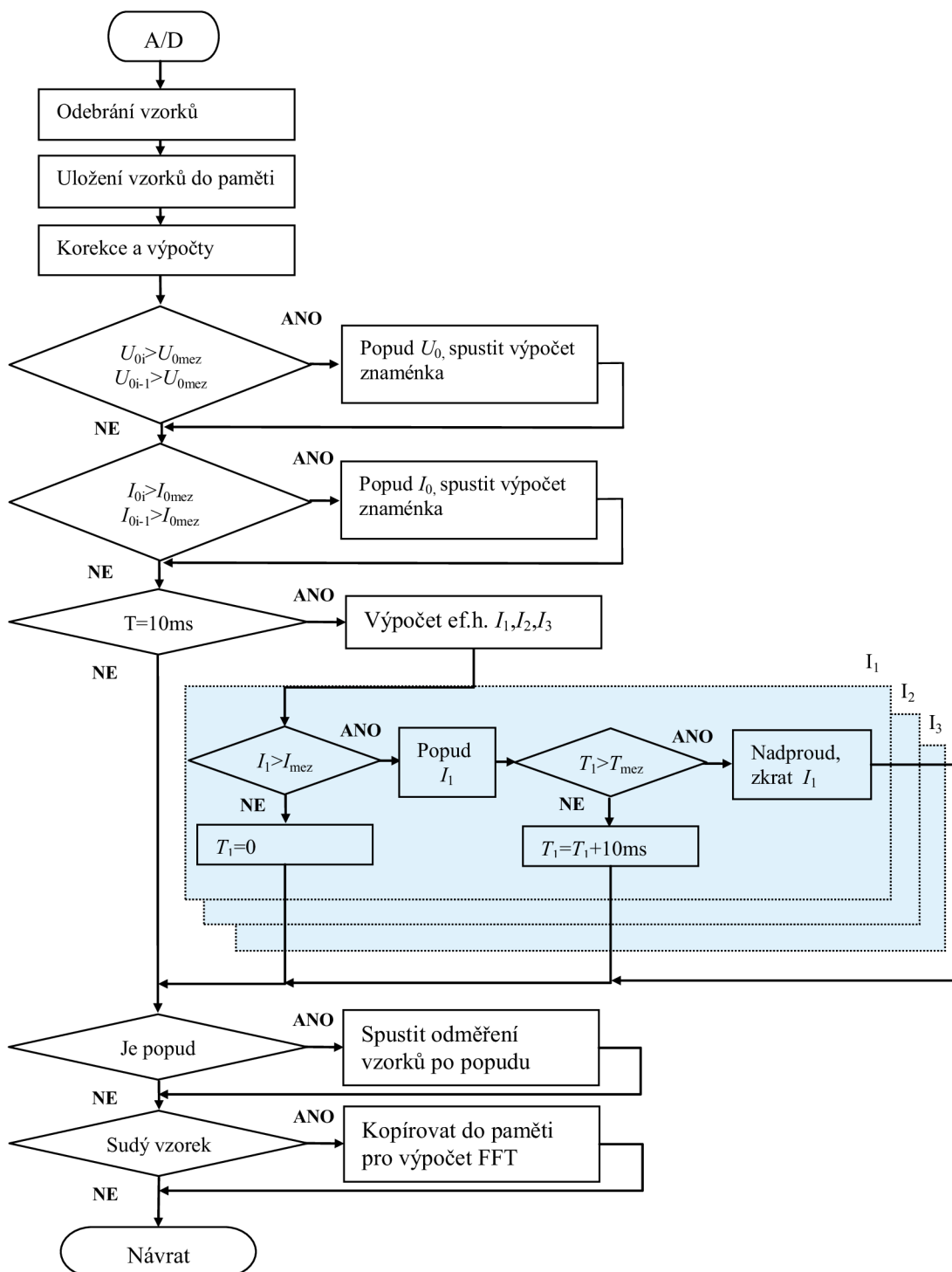
Vývojový diagram obsluhy A/D převodu uvádí Obr. 57. Po skončení výpočtů se přejde k rozhodovacím blokům. Jako první se testuje překročení meze složky U_0 . Pokud je nad mezí dva vzorky po sobě, je vyvolán popud od překročení složky U_0 a je spuštěn výpočet znaménka. Znaménko se bere ze sumy součinů $U_0 I_0$ ze čtyř po sobě jdoucích vzorků. Pokud je kladné, jsou složky U_0 a I_0 ve fázi, pokud je záporné, jsou v protifázi. Z vyhodnocení znaménka je určen postižený vývod. Obdobným způsobem je testována složka I_0 . Dojde-li k překročení meze U_0 a I_0 v časovém okně 10ms, je vyhodnoceno ZS.

Každých 10ms jsou spočteny efektivní hodnoty I_1, I_2, I_3 klouzavě za 20ms. Hodnoty jednotlivých fází jsou porovnány s mezí I_{mez} pro vyhodnocení nadproudu nebo zkratu. Pokud je I_{mez} překročen, sleduje se doba překročení T_{mez} s krokem 10ms. Pokud je doba překročení větší než T_{mez} je vyhodnocen nadproud nebo zkrat v příslušné fázi. Pokud se stane, že jedna 10ms hodnota proudu spadne pod I_{mez} v průběhu čítání doby překročení, je doba překročení vynulována a začíná její nové čítání.

Dále je kontrolována přítomnost popudu. Pokud je zjištěn popud, je ukončeno cyklické ukládání vzorkovaných hodnot a nastaven režim dozorkování hodnot po výskytu popudu. Počet hodnot, které se ještě po popudu navzorkují je stanoven tak, aby polovina vzorků byla před výskytem popudu a druhá polovina za ním. Celkem je zachyceno 192 vzorků (3 periody) kanálů $Hx_1, Hx_2, Hx_3, Ex_1, Ex_2, Ex_3$. Každý druhý vzorek I_0 je kopírován do paměti pro výpočet FFT.

Přehled popudů:

1. Složka U_0 je větší než mez
2. Složka I_0 je větší než mez
3. Proud I_1 je větší než mez
4. Proud I_2 je větší než mez
5. Proud I_3 je větší než mez
6. Průběžné G_0 je větší jak mez
7. Průběžná 5.harmonická I_0 je větší jak mez
8. Externí popud



Obr. 57. Vývojový diagram činnosti po vyvolání přerušení od A/D převodníku.

Druhou nejvýznamnější částí je zpracování periody. Funkce jsou vyvolány po navzorkování kompletní periody (64vzorků). Nejdříve jsou provedeny výpočty hodnot U_0 , I_0 , $P_{\xi 0}$, P_{z0} , Pf_0 , efektivních hodnot proudů I_1 , I_2 , I_3 , U_{BAT} , FFT, 1. a 5. harmonická

signálu I_0 . Dále jsou sledovány průběžné hodnoty G_0 , 5. harmonické I_0 , je vyhodnocováno NOZ a vyhodnoceny změny před a při připnutí odporníku.

Výpočet efektivních hodnot :

$$I_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{64} I_{1i}^2}{64}}, I_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{64} I_{2i}^2}{64}}, I_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{64} I_{3i}^2}{64}}$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{64} U_{0i}^2}{64}}, I_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{64} I_{0i}^2}{64}}$$

$$P_{\varepsilon 0} = \frac{\sum_{i=1}^{64} U_{0i} \cdot I_{0i}}{64}, P_{Z0} = \frac{U_0}{I_0}$$

$$U_{BAT} = \frac{\sum_{i=1}^{64} U_{BATi}}{64}$$

Sledování NOZ

Popudem pro zjišťování NOZ je vybavení nadproudu, který je definován překročením nastavené hladiny proudu alespoň v jedné fázi kontinuálně po minimální zadanou dobu.

Podrobný popis zjišťování NOZ je uveden v kapitole 6.2.6.

Komunikace

Komunikace indikátorů s okolím (nadrízeným systémem) je umožněna sériovou komunikací, která je řízena pomocí DMA přenosů. Přijatá data, která přijme sériový kanál UART jsou automaticky pomocí DMA kanálu přenesena do vyrovnávací paměti. Po příjmu minimálního počtu znaků rámce zprávy se vyvolá přerušování od skončení příjmu DMA. Došlý rámec se analyzuje v příkazovém seznamu. Pokud za rámcem příkazu následují další data, spustí se další cyklus příjmu. Po přijetí všech bytů zprávy se data zpracují a vyšle potvrzení. Pokud za rámcem příkazu nenásledují další data, příkaz se provede a vyšle potvrzení. Pokud si nadřízený systém žádá data, data jsou připravena a vyslána současně s potvrzením.

Data vyčítání uložených událostí jsou rozdělena po blocích 256B. Jeden takový blok připraví a odešle funkce „Vyčtení bloku zaznamenaných dat a jejich odeslání“. Obdobně funkce „Zápis bloku nového FW“ přijme 256B dlouhý blok nového FW, který uloží do první sekce paměti FEPRM. Po přijetí všech bloků nového FW se nový FW přehraje do paměti procesoru a FW se opět spustí.

Přerušení od vstupních externích signálů řeší funkce I/O operace. Přerušení je pravidelně po 1s z externích hodin reálného času nebo asynchronně od vstupní události. Funkce I/O operací provádí také sepnutí relé zkrat, zemní spojení a NOZ.

Interní paměť RAM

Mikroprocesor MSP430F1611 obsahuje celkem 10240B uživatelské paměti RAM. V této oblasti musí být však realizován také zásobník, který začíná na adrese 3900H. Vlastní počátek paměti RAM je na adrese 1100H.

Tab. 3. Použití uživatelské části paměti RAM

Položka	Počáteční adresa [H]	Počet bytů [D]
Stavové a pomocné proměnné	1100	62
Čas (sec,min,hod,den,měsíc,rok)	113E	6
Paměť pro sériovou komunikaci UART	1144	264
Průběžné výsledky, čítače, sumační buňky	124C	176
Navzorkované hodnoty	12FC	2764
Vypočtené hodnoty	1DC8	5892
Paměť pro sériovou komunikaci SPI	34CC	256
Paměť na vzorky a výpočet FFT	35CC	320
Celkem		9740
Kapacita zásobníku	3900	500

Obsah poruchového záznamu

Jeden poruchový záznam zabírá 8192B externí paměti FEPR0M. Celkem je možné do externí paměti dat uložit 120 detailních poruchových záznamů.

Tab. 4. Obsah poruchového záznamu

Položka	Počet bytů
Délka záznamu	2
Číslo záznamu	2
Čas vzniku záznamu (ms,sec,min,hod,den,měsíc,rok)	8
Typ dat, označení popudů	6
Stavové informace	4
Korekční konstanty	20
Rozteč, vzdálenost snímačů	4
Vyhodnocení	4
Navzorkované hodnoty	2240
Efektivní hodnoty	5884
Volno	18
Celkem	8192

Příklad implementovaného algoritmu pro výpočet FFT signálu I_0 . Algoritmus uveden v jazyku Pascal.

```

procedure FFT_1(var a:array of complex);
label 1190,1200,1240;
var n,nm1,nd2,M,j,i,k:integer;
    tr,ti:extended;
    ur,ui,sr,si:extended;
    JM1,L,LE,LE2,IP:integer;
begin
n:=128;                //predpokladany pocet vzorku
NM1:= N-1;
ND2:= N div 2;
M:=round(LOG10(N)/LOG10(2));
J:= ND2;

FOR I:= 1 TO N-2 do begin    //Bitove inverzni setrideni
IF I >= J THEN GOTO 1190;
TR := a[J].r;
TI := a[J].i;
a[J].r := a[I].r;
a[J].i := a[I].i;
a[I].r := TR;
a[I].i := TI;
1190: K:= ND2;
1200: IF K > J THEN GOTO 1240;
J:= J-K;
K:= K div 2;
GOTO 1200;
1240: J:= J+K;
end;

cit1:=0;
FOR L:= 1 TO M do begin    //Smycka pro kazdou uroven
LE := 2 shl (L-1);
LE2:= LE div 2;
UR := 1;
UI := 0;
SR := COS(PI/LE2);        //Vypocet hodnot sin a cos
SI := -SIN(PI/LE2);
FOR J := 1 TO LE2 do begin    //Smycka pro kazdou sub DFT
JM1 := J-1;
I:=JM1;
while I <= NM1 do begin    //Smycka pro každého motylka
IP := I+LE2;
TR := a[IP].r*UR - a[IP].i*UI; //Vypocet motylka
TI := a[IP].r*UI + a[IP].i*UR;
a[IP].r := a[I].r-TR;
a[IP].i := a[I].i-TI;
a[I].r := a[I].r+TR;
a[I].i := a[I].i+TI;
inc(I,LE);
inc(cit1);
end; {I}
TR := UR;
UR := TR*SR - UI*SI;
UI := TR*SI + UI*SR;
end; {J}
end; {L}

end;

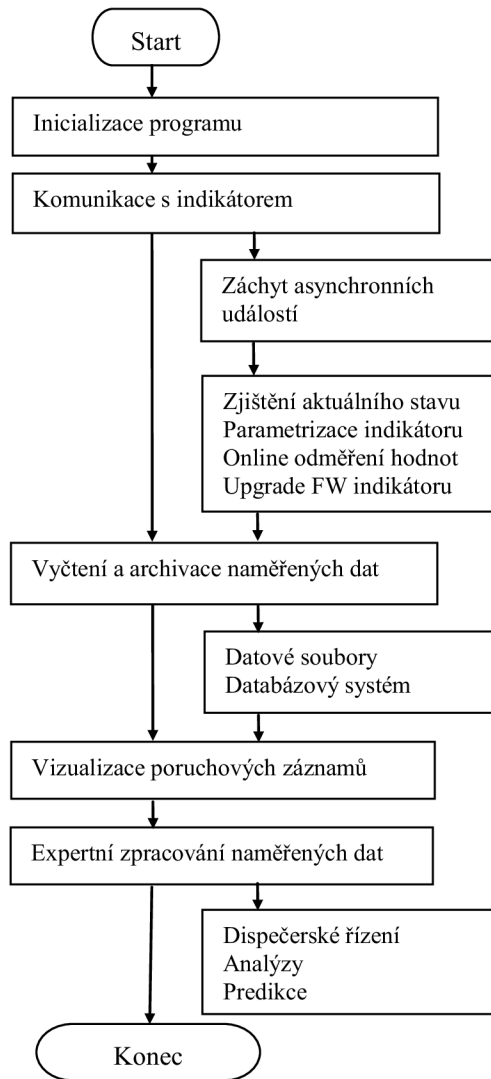
```

Vstupní hodnoty jsou obsaženy v poli v komplexním tvaru a do stejného pole jsou uloženy výsledky po FFT. Postup výpočtu FFT ve FW indikátoru je stejný, jako v proceduře FFT_1. Nejdříve je pomocí přesunů připravena bitově reverzní tabulka

vstupních hodnot. Pak je připravena tabulka s potřebnými hodnotami sinů a cosinů a následně se provede FFT. Počet úrovní je 5 pro případ 32 vstupních vzorků.

6.6 Programové vybavení

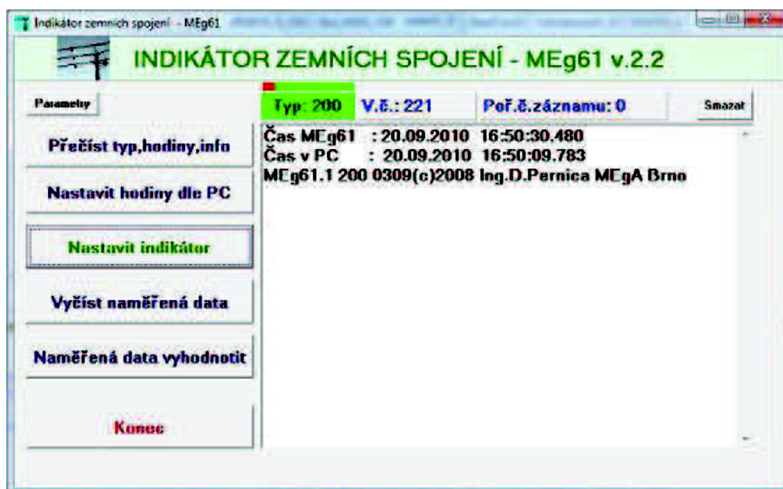
Programové vybavení, které umožní základní archivaci a vizualizaci poruchových záznamů je možné sestavit dle schématu na Obr. 58.



Obr. 58. Schéma programového vybavení

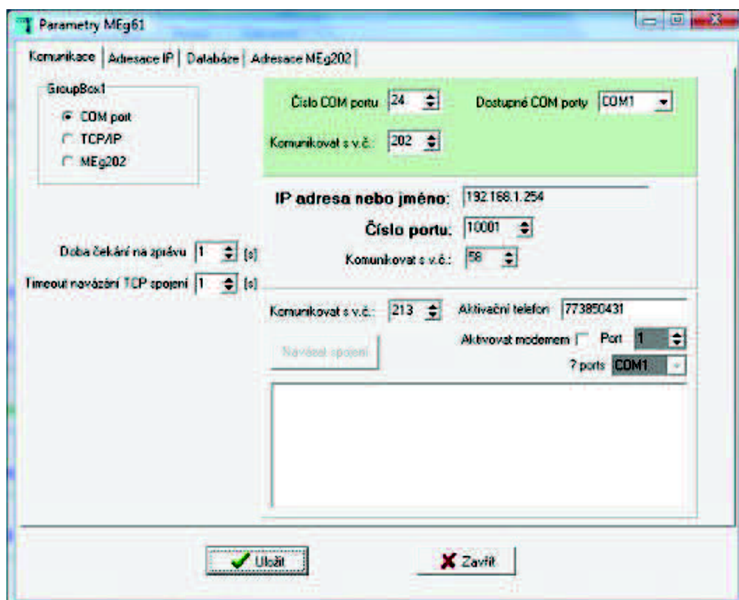
Programové vybavení nekontaktního indikátoru proudu bylo sestaveno v programovacím jazyku Pascal pomocí vývojového prostředí Delphi pro operační systém Microsoft Windows (MW). Běh programu byl odzkoušen na verzích OS MW98, MW2000, MWXP, MWVista a MW7. Do programového vybavení byly zařazeny takové programové bloky (viz.Obr. 58), aby bylo možné z nekontaktního indikátoru poruchových záznamů získat poruchové záznamy a další informace pro optimalizaci jeho funkcí a pro možnost získávání údajů ze zkušebních měření a z měření z indikátorů umístěných v reálné VN síti distributorů elektrické energie.

Základní bloky programu je možné vyvolat v hlavním okně programu pomocí tlačítek, jak ukazuje Obr. 59.



Obr. 59. Hlavní okno programu

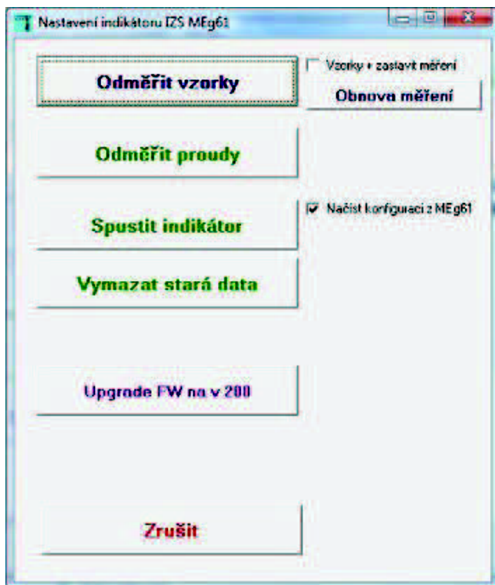
Pro přímou komunikaci mezi PC a indikátorem bylo zvoleno rozhraní USB. V okně parametrů programu je možné zvolit další typy komunikace jako je komunikace pomocí protokolu TCP/IP, pomocí sériového rozhraní RS485 nebo pomocí GPRS přenosů za využití např. jednotek MEg202, které obsahují GSM modem. Široká škála komunikačních možností je dána potřebami různých uživatelů, kteří používají různé komunikační prostředky. Vhodná je také možnost implementace více typů komunikačních protokolů, kde je však třeba upravit jak programové vybavení tak FW.



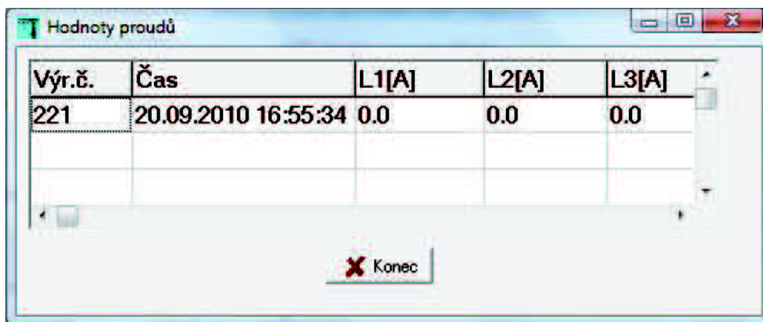
Obr. 60. Zadání parametrů programu

Stlačením tlačítka Nastavit indikátor v hlavním okně programu je vyvoláno další okno (Obr. 61), které slouží k nastavení parametrů v indikátoru, umožňuje okamžitá odměření hodnot a další servisní funkce. K servisním funkcím patří funkce, které jsou prováděny při oživování indikátoru nebo při hledání poruchy činnosti indikátoru. Jde o adjustaci hodin RTC, test relé, komunikace s externí pamětí apod.

Stlačením tlačítka Odměřit proudy, jsou odměřeny efektivní hodnoty proudů všech tří fází. Obr. 62 ukazuje příklad odměření proudů, které byly v daném čase nulové. Tato funkce je zvláště vhodná pro dispečerské řízení, kdy je třeba ověřit aktuální stav v místě měření.



Obr. 61. Okno pro nastavení indikátoru bez servisních funkcí.



Výr.č.	Čas	L1[A]	L2[A]	L3[A]
221	20.09.2010 16:55:34	0.0	0.0	0.0

Obr. 62. Odměření proudů na povel.

Parametrizaci indikátoru je vhodné rozdělit na dvě části. V první části jsou parametry instalační, které je nutné zadat pouze jednou při instalaci indikátoru na místě měření a druhou částí jsou parametry provozní, které bývá potřebné měnit častěji. Obr. 63 ukazuje parametry zadávané při instalaci. Jsou to následující parametry: rozteč vodičů, vzdálenost snímačů od vodiče (dáno použitým izolátorem), zesílení (pro síť 22kV je zesílení obvykle pro H_x [1,0] a pro E_x [1,0]), kalibrace proudu na místě instalace (pokud je možné ověřit proud jiným měřicím přístrojem).

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení

Parametrizace indikátoru MEg61
Výrobní číslo a verze 221, verze FW: 200

Parametry instalací | Parametry provozní

Rozteč vodičů: 100.0 [cm] Přednastavená hodnota: 100 cm
 Vzdálenost od vodiče: 34.0 [cm] Dle použitého uzáření
 Max. provozní proud: 0 [A] Max. et. hodnota proudu v třídě měření: 225.6 [A et. h.]

Zesílení Hx (dpy) [2.10 x] Zesílení Ex (dpy) [1.2 x]

Kalibrace proudů | U Batérie

Kalibrace proudů v místě instalace

Naměřeno MEg61 fáze L1 [A]: 0 Odměřit
 L2 [A]: 0
 L3 [A]: 0

Správná hodnota fáze L1 [A]: 0 Zkontrolovat ?

Zrušit Nastavit parametry
 Instalační-provozní
 Provozní Spustit Vyčistit nastavení

Obr. 63. Instalační parametry indikátoru

Parametrizace indikátoru MEg61
Výrobní číslo a verze 221, verze FW: 200

Parametry instalací | Parametry provozní

Popis měření | Test

Mez SEX: 20 [kV] Mez Hx1, Hx2, Hx3: 200 [A]
 Mez SHx: 20 [A] Min. doba alespoň jeden proud nad definovanou mezí: 100 [ms]
 SEx,SHx současně nad v limitu: 10.0 [ms] Doba vyčerpání relé ZKRAT-NADPROUD: 5 [s]
 Oscilogram SEx a SHx v čase: 0.5 [s]

Použití připínání odporů - R
 čas připnutí R: 1.0 [s] Zjišťovat neúspěšný OZ, Relé 3
 doba připnutí R: 1.0 [s] Max. pauza mezi zkraty (bez U): 500 [ms]
 změna P00 před a při R: 32761 [kW] Min. doba po 2. zkratu (bez U): 5000 [ms]
 změna F10 před a při R: 1.0 [ms] Otočit směr ZS
 změna G0 před a při R: 323.02 [ms] Automaticky otočit směr ZS
 Použití metody G0 Záznam od všech popudů
 Detekční hodnota G0: 1294.5 [ms] Povolit harm. analýzu (FFT)
 Minimální doba překročení: 200 [ms] Číslo osvětla
 Použití metody 5. harm. Min. doba, vše vstupy pod mezemi, do obnovení měření: 10 [s]
 Detekční hodnota 5. harm.: 30.0 [%] Počet vzorků pro výpočet znaménka: 4
 Minimální doba překročení: 200 [ms] Timeout sériové komunikace: 4.0 [s]

Zrušit Nastavit parametry
 Instalační-provozní
 Provozní Spustit Vyčistit nastavení

Obr. 64. Provozní parametry indikátoru.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení

Obr. 64 ukazuje parametry, které ovlivňují činnost indikátoru a další doplňující údaje. Seznam provozních parametrů ukazuje Tab. 5.

Tab. 5. Seznam provozních parametrů.

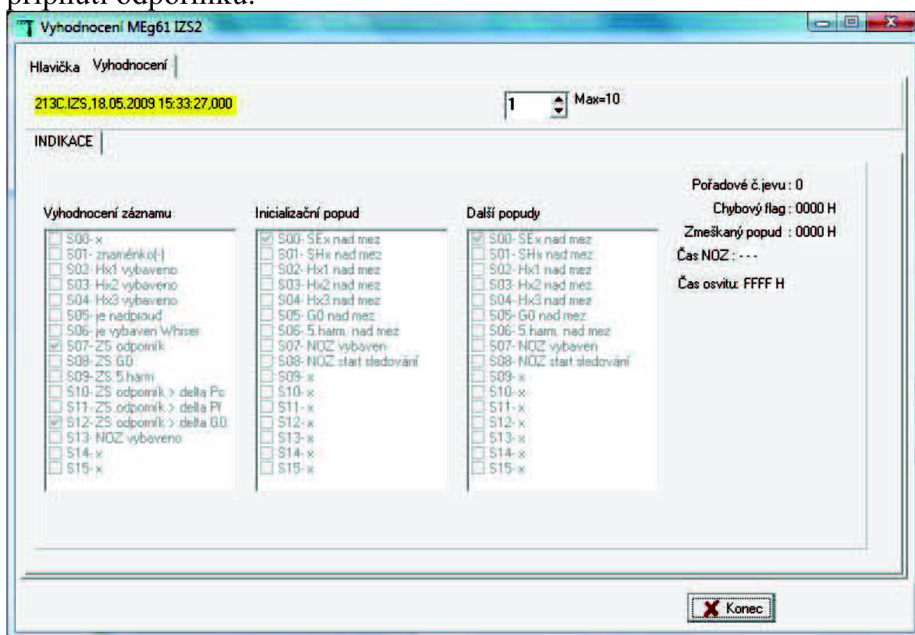
Parametr	Rozsah	Poznámka
Popis měření	40 znaků	
Mez Sex	1-100kV	U_0
Mez SHx	1-1000A	I_0
SEx,SHx současně nad vlimitu	5-30ms	V daném limitu dojde k překročení meze SEx a SHx
Oscilogram SEx a SHx v čase	0,5s	Pevně dáno na 0,5s
Použit připínání odporníku – R	ANO/NE	Použit metodu
čas připnutí R	0,6-3,5s	Za jak dlouho dojde k připnutí odporníku po zjištění ZS
doba připnutí R	0,2-3s	Jak dlouho je odporník připnutý
změna P_{e0} před a při R	12-30000kW	
změna P_{f0} před a při R	0,1-1,0	
změna G_0 před a při R	0,04-1000mS	
Použit metodu G0	ANO/NE	Použit metodu
Detekční hodnota G0	0,04-1000mS	
Minimální doba překročení	20-2000ms	
Použit metodu 5.harm	ANO/NE	Použit metodu
Detekční hodnota 5.harm.	0,5-30%	
Minimální doba překročení	20-2000ms	
Mez Hx1,Hx2,Hx3	1-1000A	Nadproud, zkrat
Min.doba alespoň jeden proud nad definovanou mezí	10-2000ms	
Doba vybavení relé ZKRAT-NADPROUD	1-1200s	
Otočit směr ZS	ANO/NE	Posun fáze proudů o 180°
Automaticky otáčet směr ZS	ANO/NE	
Záznam od všech popudů	ANO/NE	Registrace mžikových a krátkodobých událostí
Povolit harm. analýzu(FFT)	ANO/NE	Použit metodu
Min.doba vše vstupy pod mezemi, do obnovení měření	1-1200s	
Počet vzorků pro výpočet znaménka	2-8	
Timeout sériové komunikace	4s	Pevně dáno

Indikátor do své paměti zaznamená 120 poruchových záznamů. Pak dochází k přepisu nejstarších záznamů (kruhová organizace). Poruchové záznamy je možné z indikátoru vyčíst a uložit do souboru pro další zpracování.

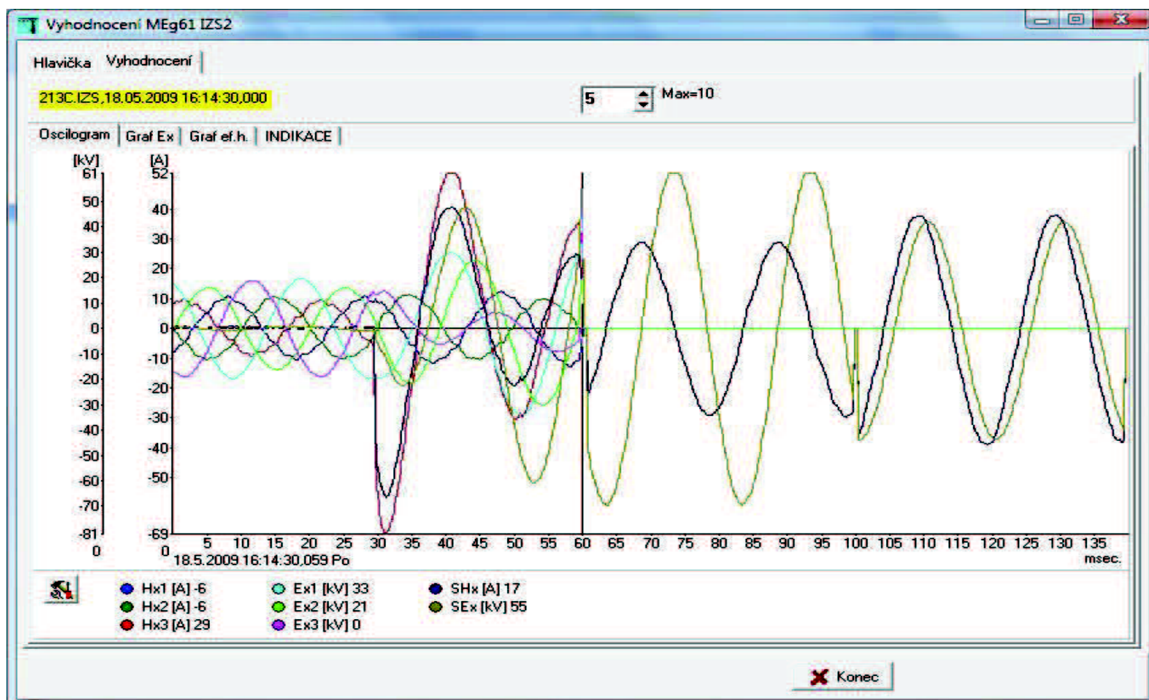
Z poruchového záznamu je možné vyhodnotit níže uvedené parametry (viz Tab.4). Jde o dvoustavové informace, oscilografický průběh začátku poruchy a průběh efektivních hodnot v délce 5s.

Obr. 65 ukazuje dvoustavová vyhodnocení, která zahrnují inicializační popudy, popudy, které přišly jako další v průběhu zpracovávání poruchového záznamu a vyhodnocení poruchového záznamu.

Obr. 66 ukazuje osciloskopický průběh začátku poruchového záznamu. Celková délka osciloskopického záznamu byla zvolena 60ms, přičemž 30ms je záznam před popudem a 30ms po popudu. Dalších 40ms je zobrazen průběh pouze U_0 a I_0 odměřený v čase 0,5s po popudu a v dalších 40ms je průběh U_0 a I_0 odměřený v polovině doby připnutí odporníku.



Obr. 65. Vyhodnocení poruchy.



Obr. 66. Oscilografický záznam.

Obr. 67 ukazuje průběh amplitud napětí U_1, U_2, U_3 a U_0 . Jsou zobrazeny kladné a záporné amplitudy v celkovém čase 5s.



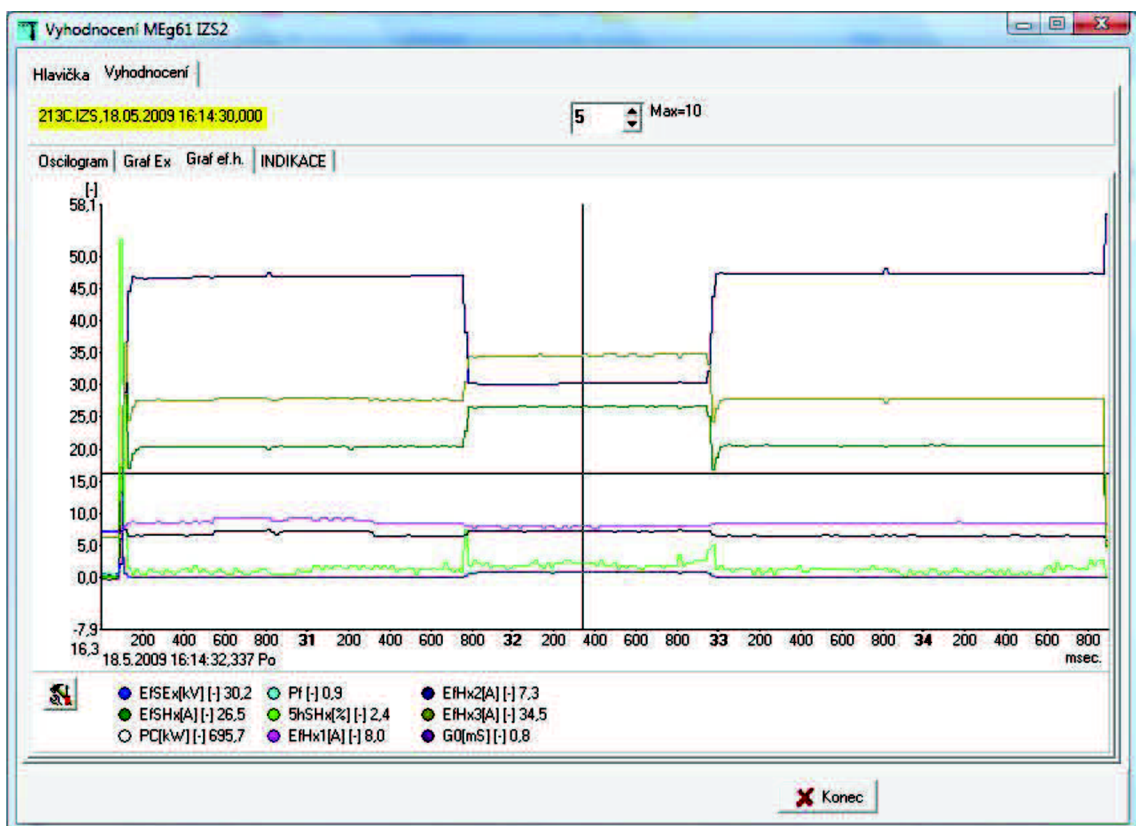
Obr. 67. Záznam amplitud napětí

Obr. 68 a Obr. 69 ukazují průběh efektivních hodnot dalších veličin počítaných za jednu periodu. Jde o veličiny: U_0 (v grafech označeno jako EfSEx), I_0 (v grafech označeno jako EfSHx), $P_{\varepsilon 0}$ (v grafech označeno jako PC), Pf_0 (v grafech označeno jako Pf), 5.harmonická signálu I_0 (v grafech označeno jako 5hSHx), I_1, I_2, I_3 (v grafech označeno jako EfHx1, EfHx2, EfHx3) a G_0 . Průběhy všech veličin jsou vztaženy k jedné svislé ose a pro jejich optimální zobrazení je možné použít lupy.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení

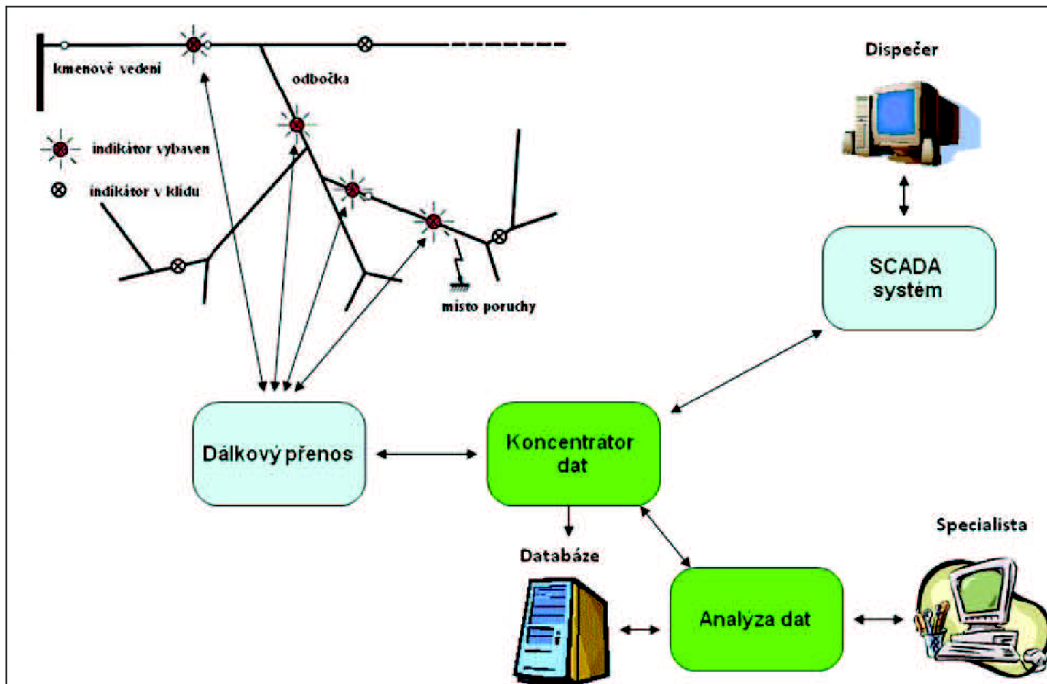


Obr. 68. Záznam efektivních hodnot (P_{e0})

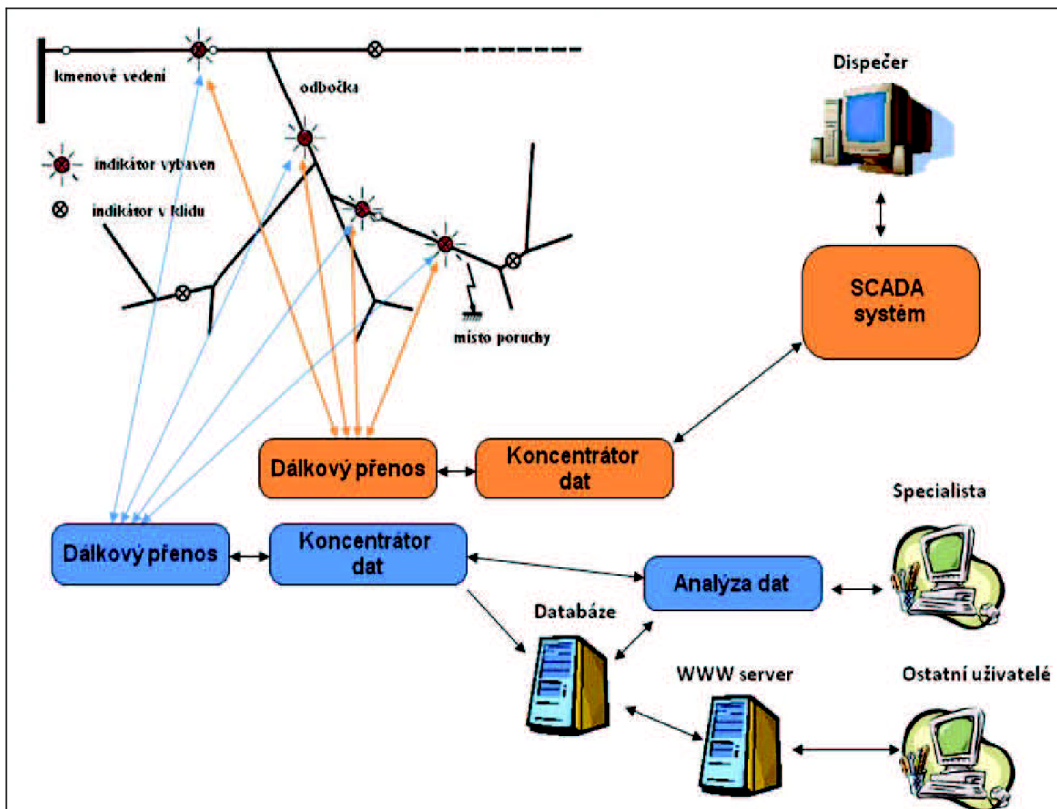


Obr. 69. Záznam efektivních hodnot ostatních veličin

6.6.1 Systém nasazení indikátorů



Obr. 70. První návrh systému.



Obr. 71. Druhý návrh systému.

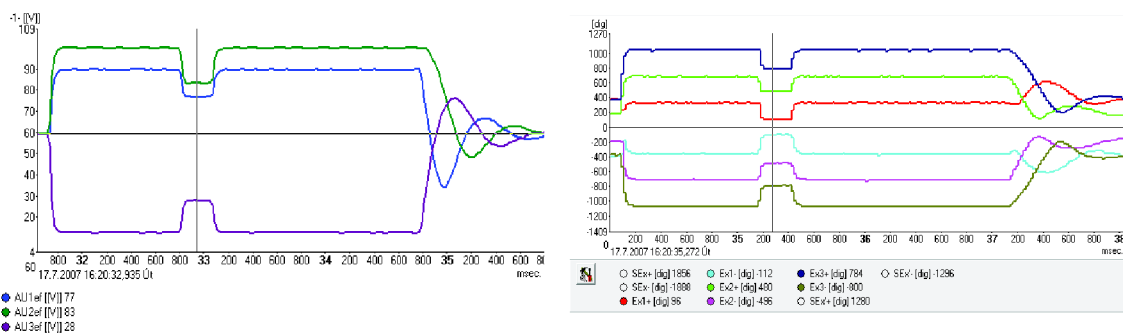
Obr. 70 a Obr. 71 ukazují možné zapojení jednotlivých indikátorů do celého systému. První návrh systému (Obr. 70) počítá s jednou komunikační trasou pro dispečerská data i pro data poruchových záznamů. Z bezpečnostních důvodů však takový provoz není možný a i zatěžování dispečerského systému detailními poruchovými záznamy není vhodné. Pro reálný provoz je tedy možná varianta druhá (Obr. 71), kde jsou data již na

místě měření rozdělena na data dispečerská a data ostatní. Každý typ dat pak putuje vlastní oddělenou cestou. Data poruchových záznamů jsou ukládána do databáze, z které jsou pak k dispozici různým typům uživatelů. Vyhodnocení je možné také navázat na server WWW, který zpřístupní data uživatelům na základě přidělených přístupových práv, bez nutnosti instalace dalšího SW. Předpokládá se pouze internetovský prohlížeč.

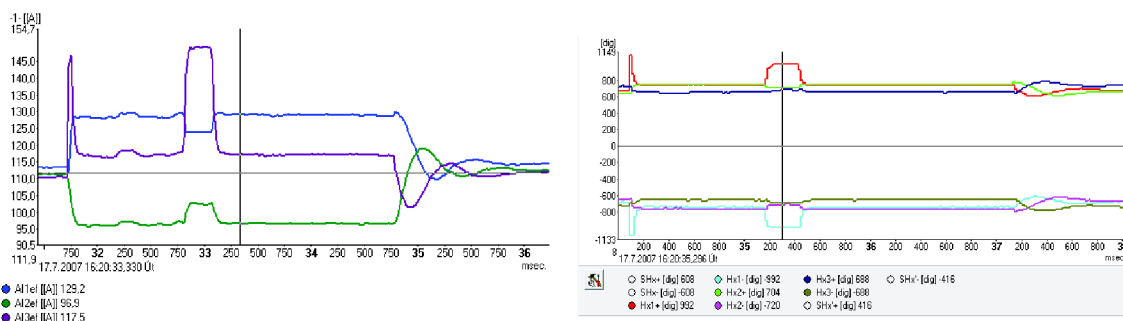
6.7 Porovnání průběhů

6.7.1 Porovnání výsledků záznamů z plánovaných zemních spojení

Obr. 72 až Obr. 77 ukazují porovnání průběhů získaných z MTN a MTP v rozvodně s průběhy elektrických a magnetických polí zachycených indikátorem MEG61 a také indikátorem MEG60 (Obr. 78). Je porovnáván záznam vždy stejné události (viz.čas v grafech), avšak v různých bodech rozvodné sítě (MEG60 a MEG61). U indikátorů MEG61 jsou zobrazeny kladné a záporné amplitudy el.polí (Ex_i) a mag.polí (Hx_i). Písmenem S je pak označena netočivá složka (SE, SH). V příkladu byl vybrán pokus, ve kterém bylo prováděno zemní spojení s nenulovým zemním odporem a síť byla v podkompenzovaném stavu (viz zákmit na konci zemního spojení). Obr. 75 má u grafu z MEG61 zobrazen navíc činný výkon netočivých složek. Je vidět také připínání odporníku (Obr. 72 až Obr. 74). Obr. 76 ukazuje, že došlo k přetečení rozsahu proudu I_1 , které je vidět také na průběhu Hx_2 . Zároveň je možné zjistit přiřazení fází v místě nasazení indikátoru MEG61, které je odlišné od místa zemního spojení. Je zde také opačná polarita snímaných veličin. Příklad indikace indikátoru MEG60 (Obr. 78) je vidět v pravé části. Přístroj MEG60 sleduje součtová elektrická a magnetická pole a k indikaci používá otočné magnetické terčíky různých barev.

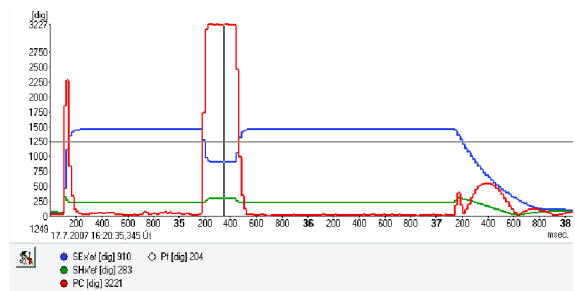
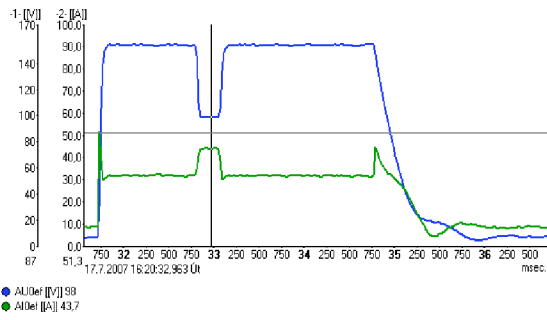


Obr. 72. Hodnoty napětí a elektrických polí.

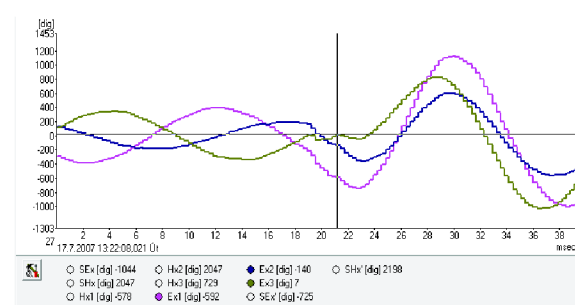
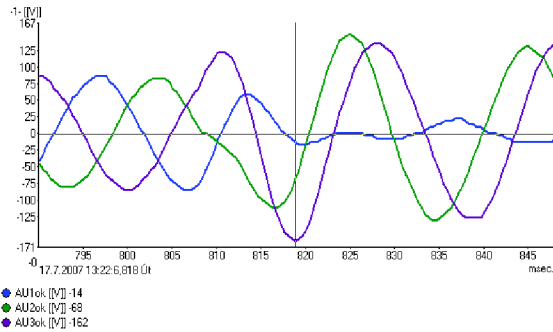


Obr. 73. Hodnoty proudů a magnetických polí.

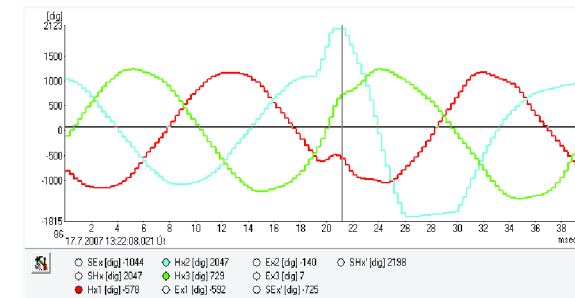
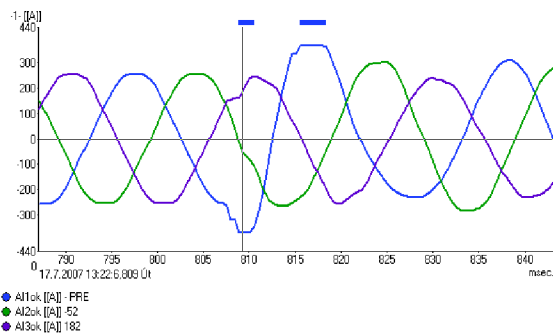
Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení



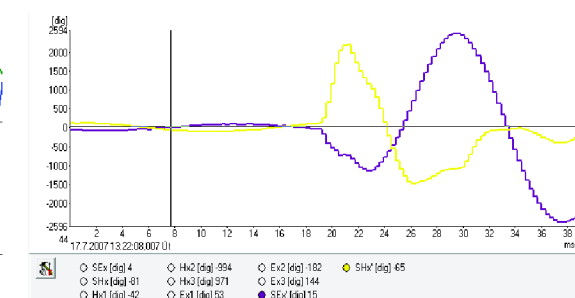
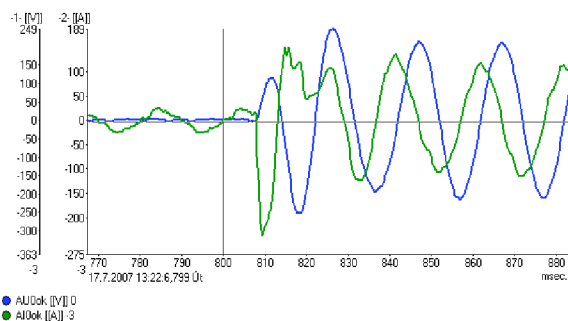
Obr. 74. Hodnoty netočivých složek.



Obr. 75. Počáteční přechodný děj na napětí a elektrických polích.

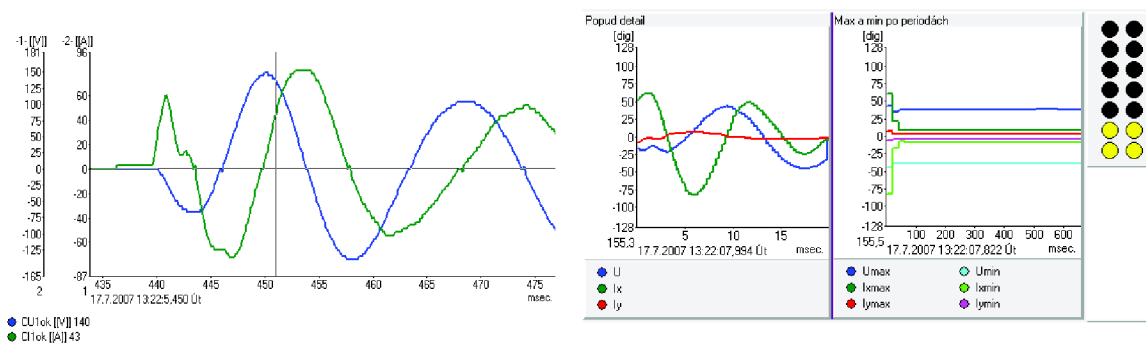


Obr. 76. Přechodný děj na proudech a magnetických polích.



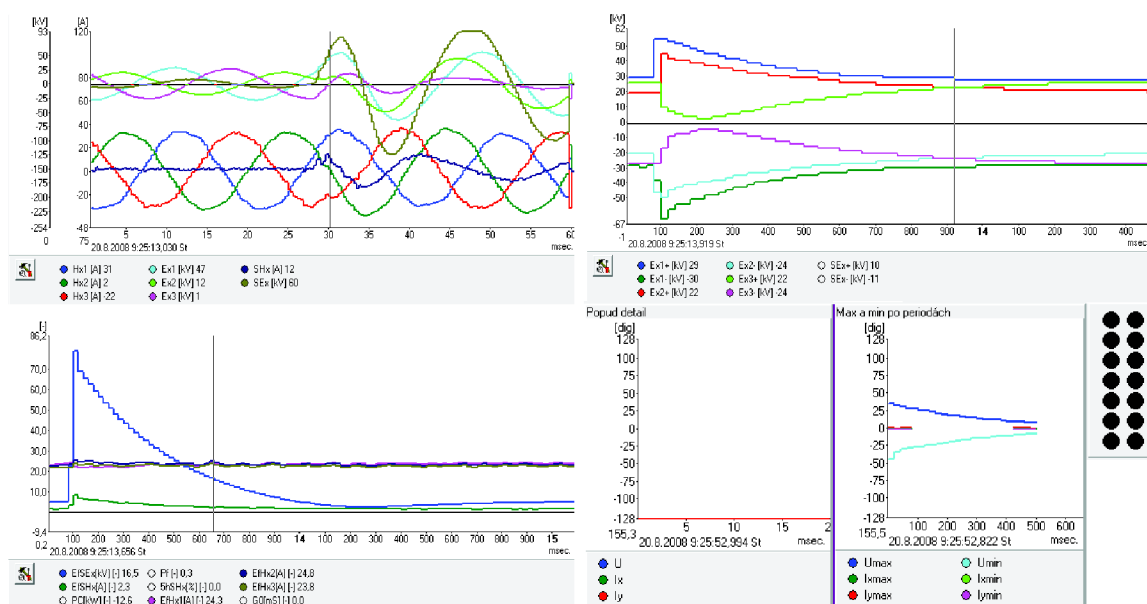
Obr. 77. Přechodný děj na netočivých složkách.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení



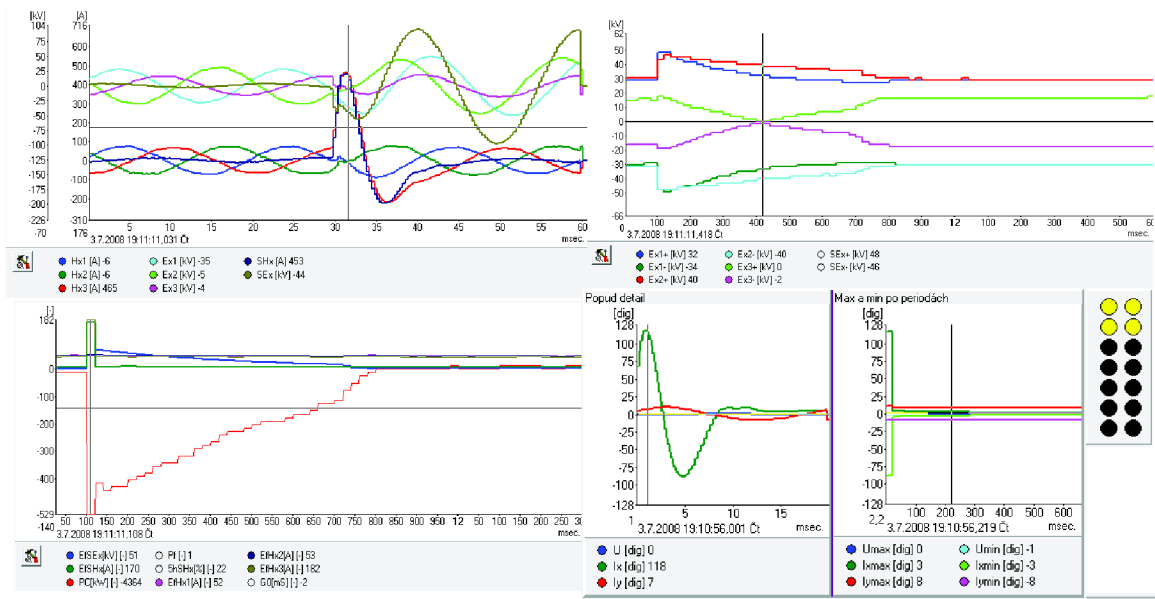
Obr. 78. Přechodný děj na netočivých složkách MEg60.

Obr. 79 až Obr. 83 ukazují různé typy nejčastěji se vyskytujících poruchových záznamů. Jsou to krátkodobá zemní spojení, dlouhodobá zemní spojení, přerušovaná zemní spojení a zkraty.

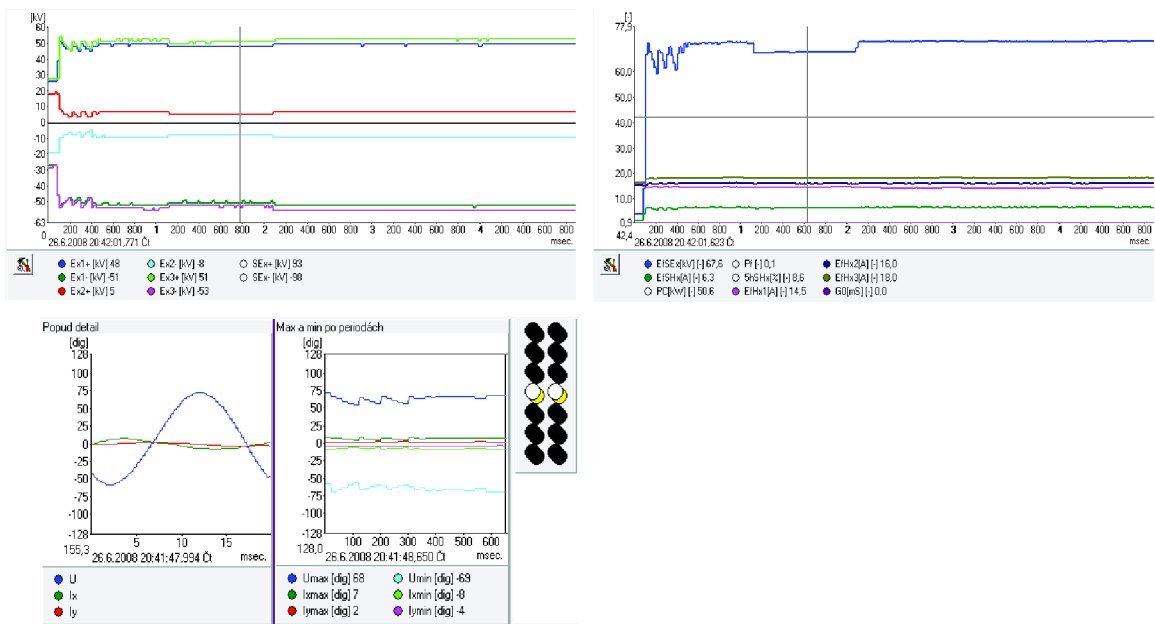


Obr. 79. Krátkodobé zemní spojení v síti.

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení

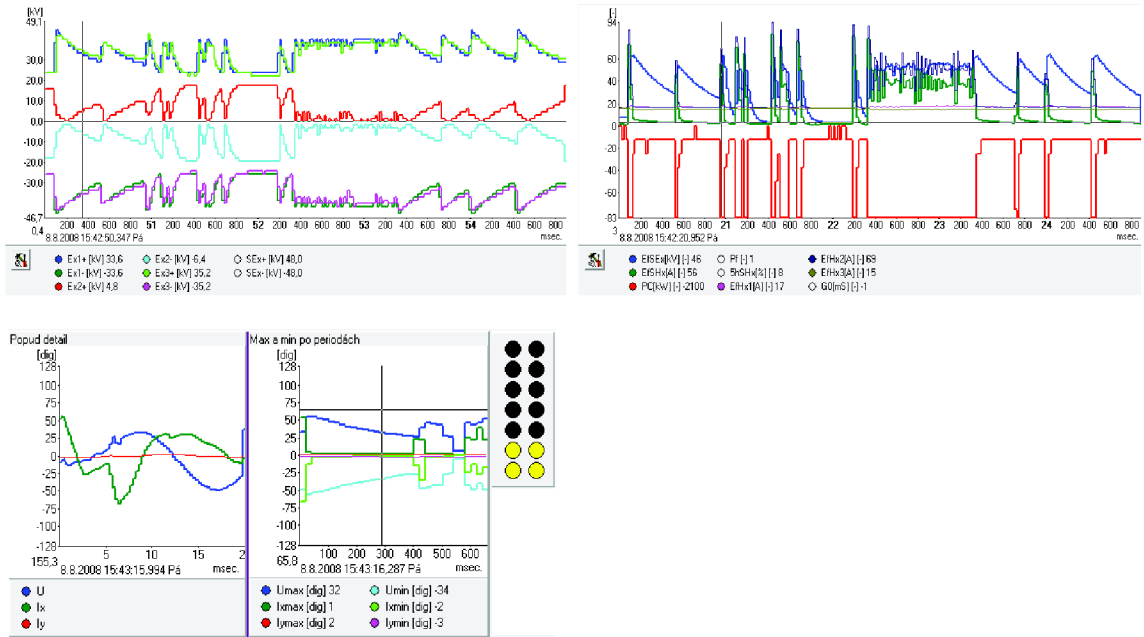


Obr. 80. Krátkodobé zemní spojení zde (v místě indikátoru).

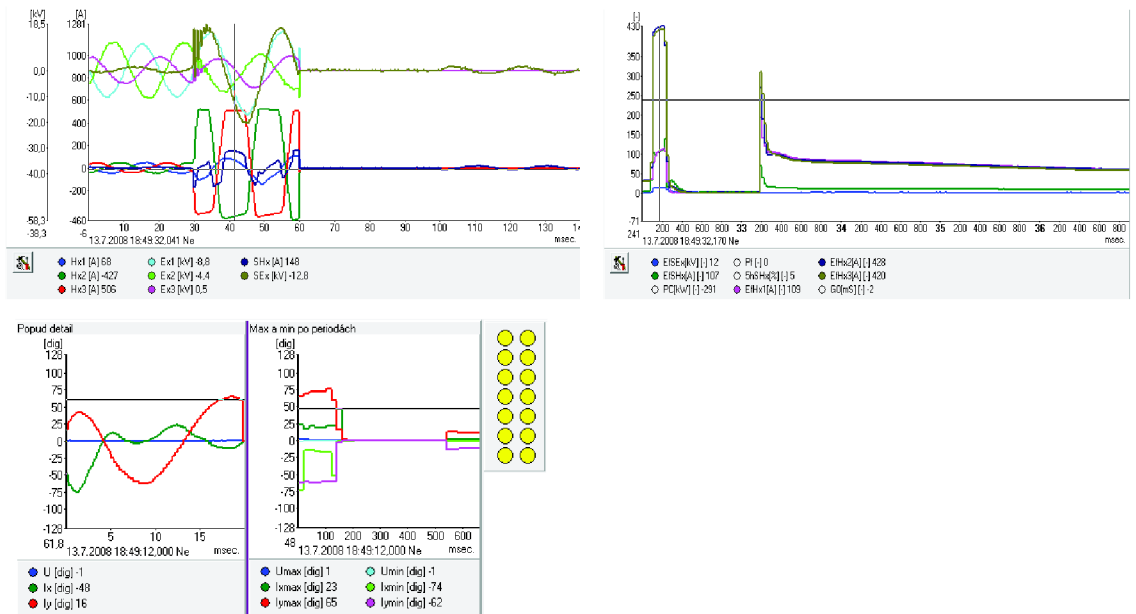


Obr. 81 Dlouhodobé zemní spojení v síti

Nekontaktní indikátory poruchových stavů na VN vedení



Obr. 82 Přerušované zemní spojení



Obr. 83 Zkrat.