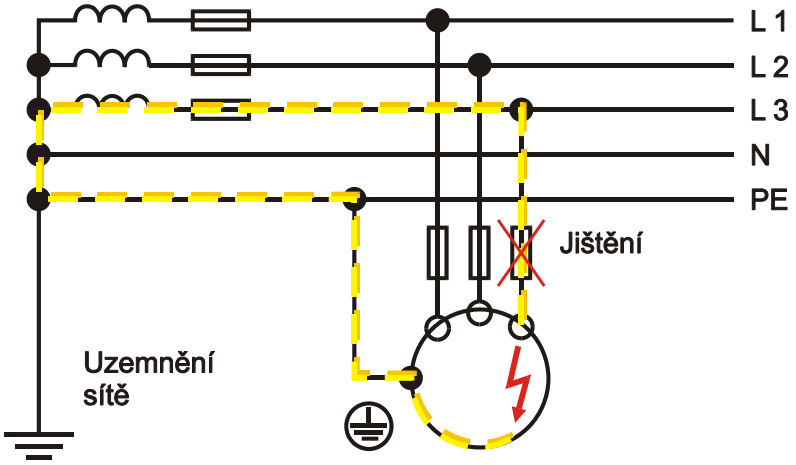
Měření při revizích elektrických instalací – měření impedance poruchové smyčky

Ing. Leoš KOUPÝ, ILLKO, s.r.o. Blansko, ČR

1. IMPEDANCE PORUCHOVÉ SMYČKY

Pokud dochází u sítí TN a TT k průtoku poruchového proudu obvodem, jehož součástí je PE vodič nebo uzemnění, je nutno zajistit, aby odpor tohoto obvodu nebyl natolik velký, že způsobí omezení poruchového proudu na hodnotu, která již nedokáže vybavit jistící prvek (jistič nebo pojistku). Z toho důvodu je nutno při revizích elektrických instalací měřit odpor PE obvodu (TN) a zjistit, zda je dostatečně malý, aby poruchový proud jím protékající způsobil bezpečné vybavení jistícího prvku v předepsaném čase.



Obr. 1 – Obvod poruchové smyčky

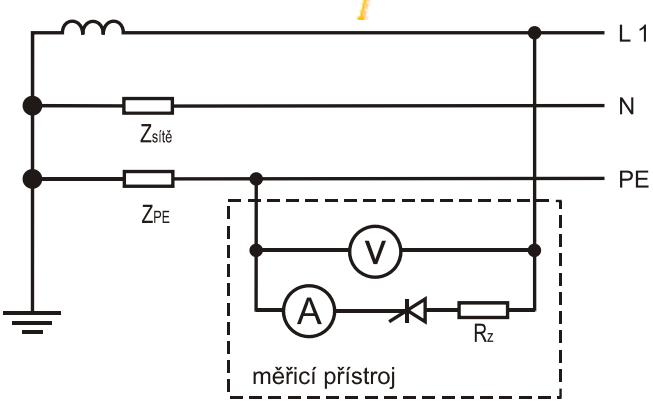
Na obr. 1 je naznačen průtok proudu obvodem poruchové smyčky při poruše izolace mezi živou a neživou částí elektrického zařízení. Je zřejmé, že v okamžiku vzniku poruchy se fázové napětí připojí na PE obvod a průtok poruchového proudu způsobí na všech částech spojených s PE obvodem vznik tzv. dotykového napětí. Poruchová smyčka tedy musí mít takové parametry, aby při poruše izolace mezi živou a neživou částí elektrického zařízení jistící prvky odpojily chráněnou část natolik rychle, aby nedošlo k jejímu dalšímu poškození, a aby na chráněných částech nevzniklo nebezpečné dotykové napětí. Toto je zajištěno tehdy, pokud není poruchová smyčka přerušená a pokud je její impedance dostatečně malá (čím menší impedance, tím větší poruchový proud a tím rychlejší vybavení jistících prvků). Velikost dotykového napětí lze pak omezit dobrým uzemněním PE obvodu.

2. PRINCIP MĚŘENÍ

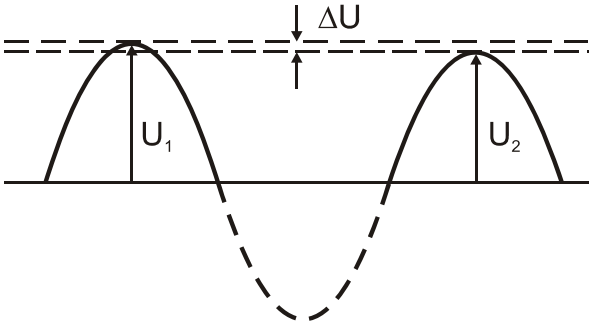
Princip měření impedance smyčky je ve všech měřicích přístrojích použit shodný (viz obr. 2). Přístroj simuluje vznik poruchy izolace mezi živou a neživou částí sítě a z průtoku simulovaného poruchového proudu vyhodnotí velikost impedance obvodu.

Měřič impedance je připojen mezi fázový vodič L a vodič PE (případně mezi L a N pokud se měří impedance sítě). Po zahájení měření přístroj změří nejprve napětí zdroje naprázdno U_1. Potom do obvodu připojí zatěžovací odpor R_Z , kterým proteče měřicí proud I a zároveň voltmetr změří napětí U_2 v obvodu při zatížení simulovaným poruchovým proudem. Rozdíl U_1 - U_2 je úbytek napětí na měřené impedanci Z při průtoku proudu I a přístroj vyhodnotí impedanci jako:

$$Z = \frac{U1 - U2}{I}$$



Obr. 2 - Princip měření impedance poruchové smyčky



Obr. 3 – Úbytek napětí na měřené impedanci

Měření úbytku napětí během dvou po sobě následujících půl period síťového napětí je zachycen na obr. 3. Pro lepší názornost je zobrazen jako rozdíl vrcholových hodnot, ovšem ve skutečnosti přístroj měří efektivní hodnoty těchto napětí. Je zřejmé, že čím menší je impedance smyčky, tím menší je úbytek napětí na ní, a tím menší je tedy rozdíl napětí při nezatížené a zatížené síti. Na přesnost měření takto malých napěťových rozdílů mají samozřejmě vliv jakékoliv rušivé jevy v síti a velké nároky jsou také kladeny na elektronické měřicí obvody přístroje. Proto čím menší je měřená impedance, s tím větší nejistotou (chybou) je měření provedeno.

3. TECHNICKÉ PARAMETRY MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE

Přesnost měření, tzn. definování nejistoty měření a další údaje důležité pro vyhodnocení měření lze nalézt v návodu k použití každého měřicího přístroje v kapitole označené obvykle jako „Technické parametry“. Které údaje důležité pro provoz měřicího přístroje by v jeho návodu k použití neměly chybět, definují normy ČSN EN 61557. Vysvětleme si nejdůležitější pojmy z technických parametrů nutné pro správné stanovení chyby měření.

Základní nejistota (chyba) měření – nejistota měření určená za referenčních podmínek. *Tento údaj je důležitý pro kalibrační laboratoř, která má provést kalibraci přístroje.*

Pracovní nejistota (chyba) měření – nejistota měření určená za pracovních podmínek. *Tento údaj je důležitý pro uživatele přístroje. Není-li v návodu k použití tato nejistota uvedena, nelze prakticky měřicí přístroj pro revize použít.*

Měřicí rozsah – rozsah hodnot, které je přístroj schopen měřit s definovanou přesností, jinak řečeno nalézá-li se hodnota měřené veličiny v tomto rozsahu, lze stanovit, s jakou absolutní nejistotou byla změřena.

Rozlišovací schopnost – nejmenší rozdíl mezi indikacemi zobrazovacího zařízení, který může být prokazatelně rozlišován. U digitálních přístrojů se jedná o nejmenší hodnotu, kterou je přístroj schopen rozlišit, např. jedno číslo na posledním místě zobrazovaného údaje, které se pro účely udávání nejistoty měření nazývá digit.

Jmenovitý rozsah – pod tímto pojmem je v technických podmínkách míněn rozsah, ve kterém přístroj měří s relativní pracovní nejistotou menší nebo rovnou hodnotě požadované příslušnou normou.

Jak bude vysvětleno dále, je jmenovitý rozsah pro měřiče impedance jedním z nejdůležitějších údajů, které lze z technických podmínek vyčíst, neboť z něj vyplyne vhodnost použití přístroje pro konkrétní měření. Na základě tohoto údaje můžeme usoudit, zda pro měření obvodu s daným jištěním nám přístroj bude z hlediska přesnosti stačit, nebo zda budeme muset použít přesnější přístroj.

Vysvětleme si ještě, co je to absolutní a relativní nejistota měření. S těmito pojmy se sice v technických údajích přístrojů nesetkáme, ale jsou důležité pro pochopení toho, co je míněno nejistotou měření uvedenou v návodu k použití a jaké požadavky na přesnost přístrojů kladou normy.

Absolutní nejistota měření – tento údaj bývá uváděn v technických parametrech přístroje jako základní nebo pracovní nejistota (chyba) a lze z něj stanovit absolutní hodnotu (velikost) nejistoty, s jakou byla konkrétní hodnota naměřena přímo v jednotkách měřené veličiny. Je-li absolutní hodnota nejistoty přičtena a odečtena od naměřené hodnoty, definuje interval, ve kterém se nachází skutečná (pravá) hodnota měřené veličiny.

Relativní nejistota měření – pro účely posouzení použitelnosti přístroje z hlediska STN a stanovení jmenovitého pracovního rozsahu je touto nejistotou míněn procentuální podíl absolutní hodnoty nejistoty z naměřené hodnoty vztažený k jmenovité hodnotě.

Pokud příslušné normy (např. STN EN 61557) požadují, aby pracovní nejistota měření nepřesáhla ve vyznačeném rozsahu maximální odchylku 30 % od naměřené hodnoty, mají na mysli právě tuto relativní nejistotu, kterou nelze zaměňovat s absolutní nejistotou uváděnou v technických parametrech přístroje!

4. VYJÁDŘENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ A VÝPOČET NEJISTOTY

V technických parametrech měřicího přístroje je přesnost měření vyjádřena absolutní nejistotou. Obvykle se nejistota měření skládá ze dvou částí. První část bývá proměnná a její absolutní hodnota závisí na velikosti naměřené hodnoty. Nazývá se nejistotou z měřené hodnoty. Druhá část je konstantní v celém měřicím rozsahu, na velikosti naměřené hodnoty nezávisí a nazývá se nejistotou z měřicího rozsahu. Součet obou částí je absolutní hodnotou nejistoty a jejím přičtením a odečtením od naměřené hodnoty lze stanovit interval, ve kterém se pohybuje skutečná (pravá) hodnota měřené veličiny.

V technických podmínkách se lze setkat s různými tvary vyjádření nejistot měření. Digitální přístroje, které na trhu převládají, mají nejistot y měření uváděny nejčastěji ve tvaru:

$$\pm (x\ \%\ z\ MH + y\ D)$$

x % z MH je proměnná část nejistoty a spočítá se jako příslušné procento z naměřené hodnoty, tzn. z údaje na displeji přístroje.

y D je neproměnná část nejistoty a značí počet digitů, tj. čísel udávaných v technických parametrech jako rozlišovací schopnost. Místo v digitech může být někdy tato část nejistoty uvedena přímo v příslušných jednotkách (např. u ohmmetru přímo v Ω

Příklad výpočtu nejistoty měření

Postup výpočtu nejistoty měření a jejího vyhodnocení pro měřič impedance je vysvětlen na následujícím příkladu:

Bylo provedeno měření impedance poruchové smyčky přístrojem, u kterého lze v technických parametrech v návodu k použití vyčíst, že nejistota měření přístroje je ± *(2% z MH + 5 D)*. Přístrojem byla změřena impedance poruchové smyčky. Na displeji měřicího přístroje se zobrazil údaj 0,50 Ω.

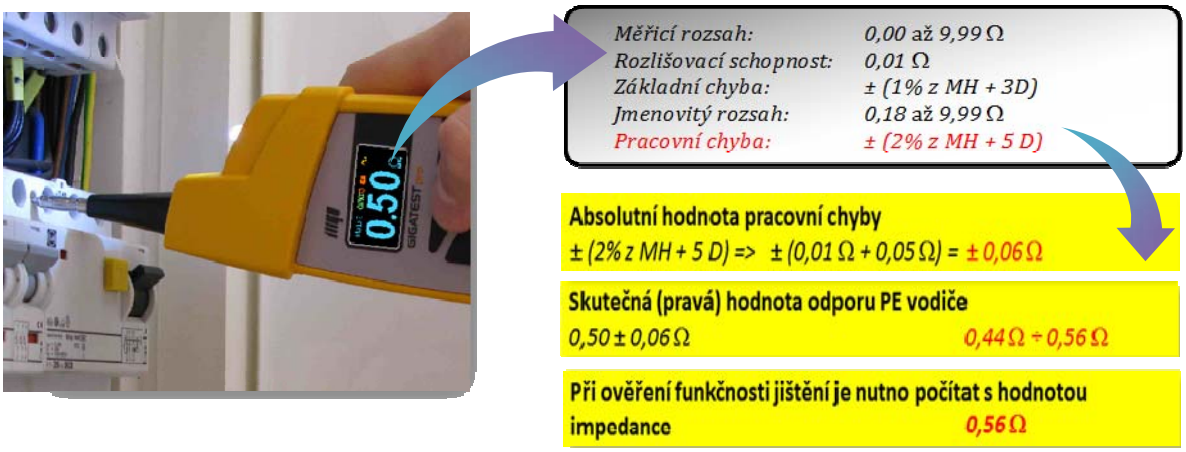
Absolutní hodnotu pracovní nejistoty měření lze vypočítat takto:

$$\pm (2\%\ z\ MH + 5\ D) \Rightarrow \pm (0{,}01\ \Omega + 0{,}05\ \Omega) = \pm 0{,}06\ \Omega$$

Skutečná (pravá) hodnota odporu PE vodiče se tedy nachází v rozmezí:

$0{,}50 \pm 0{,}06\ \Omega$, tj. $0{,}44\ \Omega$ až $0{,}56\ \Omega$

Z hlediska vyhodnocení měření impedance poruchové smyčky je důležitá horní hranice vypočteného pásma nejistoty měření, tzn. při výpočtu, zda je impedance poruchové smyčky dostatečně malá, aby jištění instalace vypnulo v předepsaném čase, je nutno počítat s tím, že skutečná hodnota impedance může být až *0,56* Ω a nikoliv naměřených *0,50 Ω.*



Obr. 3 – Postup při stanovení maximální možné impedance zjištěné měřením

5. OVLIVNĚNÍ IMPEDANCE VNĚJŠÍMI VLIVY

Při revizi je třeba ověřit, že jištění obvodů instalace bude spolehlivě fungovat nejen tehdy, kdy je měření prováděno, ale především v okamžiku budoucího možného průchodu poruchového proudu, kdy se velikost impedance může změnit. Impedance poruchové smyčky může být v době vzniku skutečné poruchy značně vyšší, než ve chvíli, kdy je prováděno měření. Hlavní příčinou je především oteplení vodičů, jehož příčinou může být vyšší okolní teplota nebo vyšší proudové zatížení sítě, případně ohřátí vlivem průtoku vysokého poruchového proudu.

Proto je v STN 33 2000-6 v příloze C. 61.3.6.3 doporučeno, aby se změna impedance způsobená možným oteplením vodičů zohlednila vynásobením naměřené impedance koeficientem 1,5 a při výpočtu jištění se pak pracovalo s touto zvýšenou hodnotou.

Koeficient 1,5 však nezahrnuje vliv nepřesnosti měření způsobené měřicím přístrojem. Z toho důvodu je nutno naměřenou hodnotu zvýšit o možnou nejistotu měření a pro výpočet jištění použít hodnotu zvýšenou o absolutní nejistotu měření vynásobenou navíc koeficientem 1,5. Podmínku pro správnou funkci ochrany samočinným odpojením od zdroje lze pak vyjádřit vzorcem:

$$1{,}5 \times \left(Zs(m) + \Delta Zs(m)\right) \leq \frac{Uo}{Ia}$$

nebo po úpravě

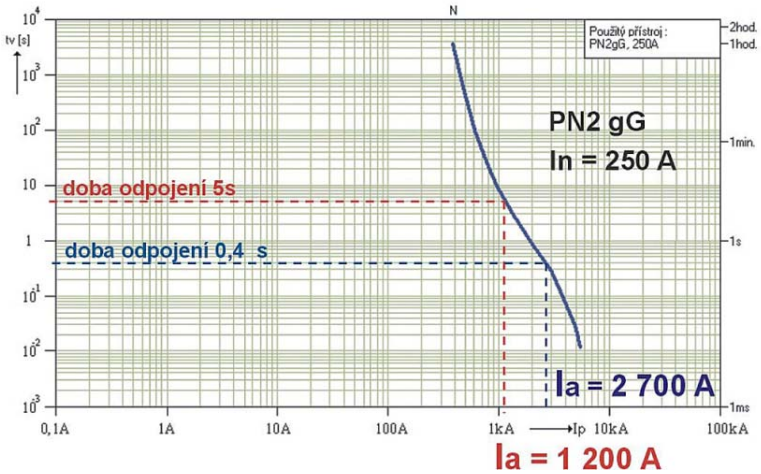
$$\left(Zs(m) + \Delta Zs(m)\right) \geq \frac{2}{3} \times \frac{Uo}{Ia}$$

Ia -	*proud zajišťující samočinné působení odpojovacího ochranného prvku v předepsané době (STN 33 2000-4-41 kap. 411.4.)*
Uo -	*jmenovité střídavé napětí proti zemi*
Zs(m) -	*naměřená hodnota impedance smyčky L – PE*
ΔZs(m) -	*absolutní nejistota měření*

6. PŘÍKLAD PRAKTICKÉHO OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI JIŠTĚNÍ

Nyní si ukažme, jak v praxi postupovat při ověření jištění u konkrétního ochranného obvodu. Aby z příkladu vyplynula i úvaha o vhodnosti volby měřicího přístroje, byl zvolen případ ověření jištění u stroje, který je napájen ze sítě o napětí 400 V / 50 Hz, tedy 3 x 230 V proti zemi. Stroj je jištěn pojistkami o jmenovitém vypínacím proudu In = 250 A.

Předepsaná doba odpojení pro stroje je 5 s. Z charakteristiky pojistek se zjistí proud Ia, který vyvolá vypnutí jištění v předepsané době (viz obr. 4).



Obr. 4 – Stanovení vybavovacího proudu jištění

Výpočtem podle příslušného vzorce zjistíme, jakou maximální hodnotu může mít impedance smyčky:

$$Zs(m) \leq \frac{230\ V}{1200\ A}\ x\ \frac{2}{3} = 0{,}13\ \Omega$$

Srovnáme-li technické parametry několika různě přesných měřičů impedance, například přístroje ZEROLINE 60, EUROTEST 61557 a ZEROTEST 46 (viz následující tabulka), zjistíme porovnáním spodních hranic jejich jmenovitých rozsahů, že pro měření impedance poruchové smyčky u stroje s jištěním pojistkami 250 A je nejvhodnější přístroj ZEROLINE 60. Přístroj EUROTEST 61557 lze také použít, ale mezní hodnota 0,13 Ω, která je rozhodující pro vyhodnocení funkčnosti ochrany automatickým odpojením od zdroje, je již na hranici jeho jmenovitého rozsahu. Přístrojem ZEROTEST 46 by bylo možno měření sice také provést, ale z hlediska požadavků STN EN 61557 je přístroj pro měření impedance poruchové smyčky v obvodech s takovým jištěním nevhodný, neboť požadovaná maximální hodnota 0,13 Ω, kterou máme měřením ověřit, je mimo jmenovitý rozsah přístroje.

Technické parametry	ZEROLINE 60	EUROTEST 61557	ZEROTEST 46
Měřicí rozsah	0,000 ÷ 1,500 Ω	0,00 ÷ 19,99 Ω	0,00 ÷ 1,00 Ω
Rozlišení	0,001 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω
Pracovní chyba měření	± (3% z MH + 10 D)	± (3% z MH + 3 D)	± 9 D
Jmenovitý rozsah	0,038 ÷ 1,500 Ω	0,11 ÷ 1999 Ω	0,30 ÷ 22,9 Ω

Provedeme tedy měření přístrojem EUROTEST 61557 a naměříme u stroje hodnotu impedance poruchové smyčky ***0,11 Ω***. Připočítáním chyby měření zjistíme, jaké maximální hodnoty může impedance poruchové smyčky stroje dosáhnout:

Chyba měření = 3 % z 0,11 Ω + 3 D = 0,003 + 0,03 = ± 0,033 Ω

Výsledná hodnota impedance = 0,11 Ω + 0,033 Ω = **0,14 Ω**

Měřením zjištěná velikost impedance poruchové smyčky stroje po zohlednění nejistoty měření je 0,14 Ω. Do revizní zprávy by tedy bylo nutno uvést, že impedance poruchové smyčky stroje je pro dané jištění nevyhovující. Interval, ve kterém se může nacházet skutečná impedance je ovšem od 0,09 Ω do 0,14 Ω.

Kdybychom, i přes - z hlediska normy - nevyhovující přesnost, provedli měření přístrojem ZEROTEST 46 a naměřili stejnou hodnotu, tedy 0,11 Ω, dojdeme po zohlednění chyby měření k následujícímu výsledku:

Chyba měření = 9 D = ± 0,09 Ω

Výsledná hodnota impedance = 0,11 Ω + 0,09 Ω = **0,20 Ω**

Impedance **0,20 Ω** je již pro správnou funkci jištění nevyhovující, ale skutečná hodnota impedance se může pohybovat kdekoliv mezi 0,02 Ω až 0,20 Ω. To je vzhledem k požadované mezní hodnotě 0,13 Ω příliš velký interval a těžko tedy můžeme rozhodnout, zda jištění v případě poruchy zareaguje v předepsaném čase, nebo ne.

7. PŘÍSTROJE MĚŘÍCÍ IMPEDANCI SMYČKY

Ověření funkčnosti předřazeného jištění je nedílnou součástí každé revize elektrické instalace. Proto je funkcí měření impedance vybaven každý univerzální měřicí přístroj, určený k revizím instalací.

Zmiňme se tedy o přístroji EUROTEST 61557 (výrobce METREL), který je vybaven velmi dobrým měřičem impedance. Přístroj měří impedanci poměrně značným proudem (až 24 A), což umožňuje měřit s velkou přesností. Spodní hranice jmenovitého rozsahu je 0,11 Ω, zatím co u jiných podobných přístrojů začíná až od hodnoty 0,2 Ω nebo ještě výše. Určitou slabinou přístroje je pouze měření impedance v obvodech s proudovými chrániči. Použitá metoda měření polovinou vybavovacího proudu chrániče již z principu vede k velké chybě měření a v obvodech jištěných chrániči s malými reziduálními proudy je naměřená hodnota spíše orientační.

Vybrané technické parametry pro funkci měření impedance poruchové smyčky:

- Měřicí proud – cca 23 A
- Měřicí rozsah – 0,00 Ω ÷ 1999 Ω
- Nejvyšší rozlišovací schopnost – 0,01 Ω
- Jmenovitý rozsah - 0,11 Ω ÷ 1999 Ω
- Jmenovitý rozsah při měření bez vybavení RCD –7,47 Ω ÷ 1999 Ω
- Použitelné pro obvody s jištěním pojistkami do 150 A pro dobu odpojení do 0,4 s nebo do 230 A pro dobu odpojení do 5 s a jističi B do 100 A, C do 100 A, D do 63 A

Obr. 5 – Eurotest 61557

Naproti tomu novější typ - přístroj EUROTEST XC má lépe řešeno měření impedance za chráničem metodou výpočtu ze změřeného odporu R_{LINE} a $R_{N\text{-}PE}$, ovšem standardní měření impedance je z důvodu použití nižšího měřicího proudu méně přesné.

- Měřicí proud – cca 6,5 A
- Měřicí rozsah – 0,00 Ω ÷ 9,99 kΩ
- Nejvyšší rozlišovací schopnost – 0,01 Ω
- Jmenovitý rozsah - 0,25 Ω ÷ 9,99 kΩ
- Jmenovitý rozsah při měření bez vybavení RCD - 0,46 Ω ÷ 9,99 kΩ
- Použitelné pro obvody s jištěním pojistkami do 70 A pro dobu odpojení do 0,4 s nebo do 100 A pro dobu odpojení do 5 s a jističi B do 100 A, C do 50 A, D do 25 A

Obr. 5 – Eurotest XC

Jednoúčelové měřiče impedance jsou oblíbené, především pokud mají tvar rozměrově nevelkého přístroje drženého v ruce. S výhodou se pak využívají jak pro měření impedance při revizích na obtížně přístupných místech tak i pro rychlé orientační měření a hledání závad. Velmi oblíbené je také jejich použití při měření zemních odporů za použití externího (síťového) zdroje proudu. Zástupcem jednoúčelových měřičů impedance je přístroj ZEROTESTpro.

Obr. 6 – ZEROTESTpro

Z dalších funkcí lze jmenovat:

- Okamžité vyhodnocení měření pomocí v paměti uložené tabulky charakteristik jistících prvků.
- Zobrazení 1,5 násobku změřené hodnoty impedance.
- Zobrazení velikosti zkratového proudu odpovídajícího naměřené impedanci.
- Zobrazení naměřené hodnoty impedance zvýšené o chybu měření.

Vybrané technické parametry:

- Měřicí proud – cca 4,5 A
- Měřicí rozsah – 0,00 Ω ÷ 200 Ω
- Nejvyšší rozlišovací schopnost – 0,01 Ω
- Jmenovitý rozsah - 0,27 Ω ÷ 200 Ω
- Použitelné pro obvody s jištěním pojistkami do 70 A pro dobu odpojení do 0,4 s nebo do 100 A pro dobu odpojení do 5 s a jističi B do 100 A, C do 50 A, D do 25 A

Pro obvody jištěné jistícími prvky s poměrně vysokými vybavovacími proudy nejsou běžné měřicí přístroje z hlediska přesnosti měření použitelné. Proto se ve většině případů využívá pro ověření funkce jištění výpočet založený na údajích o parametrech ochranného obvodu získaných z projektové dokumentace.

Nevýhody tohoto postupu při pravidelných revizích jsou zřejmé. Pokud je projektová dokumentace vůbec k dispozici, nemusí odpovídat skutečnému stavu a bez fyzického prověření ochranného obvodu aby se vyloučily možné závady vzniklé během montáže, nebo provozu instalace se stejně nelze obejít.

Pro účely měření impedance v obvodech jištěných prvky s vysokými vybavovacími proudy jsou určeny speciální přesné měřiče impedance. Jedním z nich je přístroj ZEROLINE 60, který je určen pro běžná provozní měření v instalacích jištěných přístroji s vybavovacími proudy do cca 400 A, ale vzhledem k volitelnému měřicímu proudu jej lze použít i pro měření v běžných instalacích s méně proudově zatížitelnými jistícími prvky.

Obr. 7 – ZEROLINE 60

Přístroj měří skutečnou impedanci poruchové smyčky s rozlišením 1 mΩ. Pro velmi přesné měření lze využít tzv. „čtyřvodičovou metodu“, která zajistí eliminaci přechodového odporu v místě připojení přístroje k měřenému obvodu.

Přístroj je na rozdíl od jiných podobných přístrojů relativně malý – lze jej při měření nosit zavěšený na krku. Z důležitých technických parametrů lze uvést:

- Měřicí proud – volitelný 30 A, 20 A, 10 A
- Měřicí rozsah – 0,000 Ω ÷ 20,00 Ω
- Nejvyšší rozlišovací schopnost – 0,001 Ω
- Jmenovitý rozsah - 0,038 Ω ÷ 1,500 Ω pro měřicí proud = 30 A
- Použitelné pro obvody s jištěním pojistkami do 350 A pro dobu odpojení do 0,4 s nebo do 500 A pro dobu odpojení do 5 s a všemi typy jističů.

8. ZÁVĚR

Cílem článku bylo shrnout problematiku měření impedance poruchové smyčky především z hlediska použitelnosti měřicích přístrojů pro měření za konkrétních podmínek, které se mohou v elektrických instalacích vyskytovat. Jak bylo ukázáno, nelze v mnoha případech pro měření využít jakýkoliv měřič impedance, který je právě k dispozici, ale je nutno podle konkrétních podmínek zvážit, jaké parametry by měl pro dané měření přístroj mít.

Vlastnosti přístroje, především přesnost měření, je nutno zvažovat zvláště při měření velmi malých impedancí, kdy použití méně přesných přístrojů může ovlivnit výsledek revize. V obvodech jištěných prvky s vysokými vybavovacími proudy mohou při poruše téci značné zkratové proudy a chybné vyhodnocení funkčnosti předřazeného jištění může vést ke značným škodám na instalaci nebo v případě vzniku požáru i na objektu.