

Měření impedancí v silnoproudých instalacích

Ing. Lubomír Harwoť, CSc.

1. Úvod

Článek popisuje vybrané typy moderních měřicích přístrojů, které jsou používány k měření impedancí v silnoproudých zařízeních. Jsou zde popsány vybrané metody měření a měřicí přístroje odpovídající současným normám EN 61557 a ČSN 33 1600 ed 2.

2. Měření odporů a impedancí během revizí

Při měření impedancí ve střídavých obvodech jsou reálné vlastnosti pasivních součástek (odpor, kapacita, indukčnost) vyjádřeny náhradním sériovým nebo paralelním zapojením.

Impedance mohou být obecně měřeny:

- analogovými metodami, mezi které lze zahrnout metody můstkové, např. Wheatstoneův můstek, Thomsonův můstek, transformátorový můstek doplněný diferenčním transformátorem a indukčním děličem apod.,
- digitálními metodami (digitální LCR měřiče), které mohou být realizovány převodem impedance (admitance) na napětí, popř. měřiče kapacit převodem kapacity na čas.

Měření impedancí z hlediska použitého frekvenčního a amplitudového pásma lze rozdělit na měření nízkofrekvenční a vysokofrekvenční.

Do nízkofrekvenčních pásem lze zařadit základní měřiče RLC, které měří impedance signálem o amplitudě $1 V_{\text{rms}}$ a frekvenci 1 kHz. Laboratorní přístroje určené k proměřování charakteristik umožňují nastavit jak testovací frekvenci, tak amplitudu. Měření impedancí je prováděno v tomto případě zpravidla ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 200 kHz

(např. LCR měřič HM 8118). Přístroje umožňují zobrazit na LC displeji absolutní hodnotu impedance, její reálnou a imaginární část, ztrátový činitel apod.

Vysokofrekvenční měření impedancí je samostatnou oblastí a přesahuje rámec tohoto článku.

Mezi rozdílné vlastnosti při nízkofrekvenčním měření impedancí v laboratorních podmínkách (měření při různých frekvencích, proměřování charakteristik apod.) a revizních měřeních (měření izolačního odporu, impedance smyčky, zemních odporů apod.) patří především, u revizních měření, splnění požadovaných parametrů testovacích přístrojů. Odlišné požadavky během revizních měření jsou kladeny jak na amplitudy (např. minimální proud tekoucí obvodem při testování izolačních odporů), tak použité frekvence (např. měření zemních odporů frekvencí odlišnou od síťové frekvence).

Mezi základní měření prováděná v revizních měřeních, ve vztahu k měření impedancí, lze zahrnout měření izolačního odporu, impedance smyčky (moderní testovací přístroje vyhodnocují reálnou a imaginární část naměřené impedance smyčky, včetně zkratového proudu apod.), zemních odporů a měření přechodových odporů.

Další veličiny měřené během revizí, jako jsou např. vlastnosti proudových chráničů, vyšší harmonické složky, sled fází, měření teploty v určitém bodu a celkové rozložení teplotního pole, nejsou v článku probírány.

Měření odporů (obecně impedancí), v našem případě izolačních, zemních a přechodových, lze obecně rozdělit na:

- měření malých odporů,
- měření středních odporů,
- měření velkých odporů.

Při měření odporů je nutné uvažovat především velikost proudu, který protéká měřeným obvodem.

Při měřeních laboratorních je v základních úlohách používán většinou proud o hodnotě několika mA. Revizní měření prováděná podle EN 61557 mají uveden proud, kterým je nutné měřit – např. minimální proud 200 mA při měření přechodových odporů.

Zcela odlišné hodnoty proudů jsou tedy používány např. při měření izolačních odporů (měření velkých odporů) a při měření malých odporů (měření Kelvinovou metodou).

2.1 Měření velkých odporů – izolačních odporů

Běžně používané měřicí přístroje určené k revizním měřením izolačních odporů jsou konstruovány v souladu s EN 61557-2 *Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 2: Izolační odpor.*

Mezi vybrané podmínky ve vztahu k normě pro výrobce měřicí techniky lze zařadit:

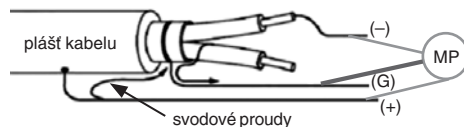
- maximální nejistota měření se pohybuje v rozmezí $\pm 30\%$,
- použité testovací napětí je stejnosměrné (DC),
- testovací napětí nemá překročit hodnotu $1,5 \times U_N$ (U_N je jmenovité testovací napětí) během kalibrace je naměřeno většinou vyšší testovací napětí,
- minimální hodnota testovacího proudu by měla být 1 mA (některé starší přístroje, u kterých vyžadují revizní technici provedení kalibrace, již této podmínce nevyhovují),
- další specifikace jsou uvedeny v příslušné části normy.

Měřicí přístroje určené k měření izolačních odporů (izolační odpory mezi žilami vodičů, izolační odpory elektrických spotřebičů, nářadí a strojních součástí, klasických a antistatických podlah, zemních vodičů atd.) je možné rozdělit, podle měřených veličin na:

- sružené revizní přístroje (kromě měření izolačních odporů měří také impedanci smyčky, proudové chrániče, zemní odpory, sled fází, napětí, frekvence, harmonické složky apod.),
- kombinované měřicí přístroje (měří kromě zemních odporů podobné veličiny jako sružené revizní přístroje),
- jednoúčelové přístroje (měření izolačních odporů).



Obr. 1. Měřič izolačních odporů Sonelec MIC 10



Obr. 2. Měření izolačních odporů – připojení vodičů k měřenému kabelu

Podle užitných vlastností jsou měřiče izolačních odporů rozděleny dále na:

- přístroje se základními funkcemi (nastavení testovacího napětí v předem dané posloupnosti, např. 50, 100, 250, 500 V a 1 kV),
- přístroje s funkcemi rozšířenými (možnost volby testovacího napětí v rozsahu od ... do (V) s krokem 10, 25 nebo 50 V, měření parametrů PI, DAR, DD, časovač, nastavení nárůstu proudu $R = f(t)$ apod.)

Měřiče izolačních odporů mají zpravidla zabudovanou funkci měření přechodových odporů proudem 200 mA, což je možné použít při revizi spotřebičů a nářadí podle ČSN 33 1600 ed. 2 *Revize a kontroly elektrického ručního nářadí během používání*. Obecné připojení měřicích kabelů při měření izolačních odporů je uvedeno na obr. 2.



Obr. 3. Měřič izolačních odporů Sonelec MIC 30

2.1.1 Měřiče izolačních odporů se základními funkcemi

Měřiče izolačních odporů se základními funkcemi umožňují odečítat na LC displeji naměřené hodnoty izolačních odporů, popř. nastavené testovací napětí. Na obr. 1 je zobrazen měřič izolačních odporů Sonelec MIC 10 s možností nastavení testovacího napětí v posloupnosti 50 až 1 000 V a měřicím rozsahem do 10 TΩ. Na obr. 3 je zobrazen přístroj MIC 30, který

umožňuje také nastavit testovací napětí jak v předem nastavené posloupnosti 50 až 1000 V, tak s krokem 10 V, měření absorpčních parametrů, přenos dat do počítače apod.

2.1.2 Měřiče izolačních odporů s rozšířenými funkcemi

Přístroje s rozšířenými funkcemi jsou určeny zpravidla ke speciálním měřením izolačních odporů s možností vyhodnocení nestandardních stavů měřeného zařízení. Kromě uvedených vlastností vyhodnocují také např. polarizační index, dielektrický absorpční poměr, dielektrický vybíjecí index, vykonávají zkoušku v předem nastavené posloupnosti napětí s vyhodnocením izolačního odporu v závislosti na čase funkcí $R = f(t)$ apod.



Obr. 4. Měřič izolačních odporů MIC 5010

K eliminaci změn ovlivňujících izolační odpor (např. vliv teploty, vlhkosti, stárnutí materiálů) je vhodné měřit izolační odpory v delším časovém intervalu. Z naměřených hodnot následně přístroje automaticky vypočítávají polarizační index (PI) a dielektrický absorpční poměr (DAR). Při měření vícevrstevných izolací a izolací z různých materiálů vyhodnocují přímo měřiče izolačních odporů s rozšířenými funkcemi také dielektrický vybíjecí index (DD).

Během tohoto měření je po měření izolace (např. 500 V/30 min) měřena kapacita a následně po 1 minutě je měřen svodový proud. Z těchto hodnot je vypočítán dielektrický vybíjecí index DD.

Zmíněné činitele jsou přístroji vypočítány podle vztahů:

– polarizační index PI

$$PI = R_{10min} / R_{1min}$$

kde

R_{10min} je izolační odpor v čase deseti minut,

R_{1min} izolační odpor v čase jedné minuty

– dielektrický absorpční poměr DAR

$$DAR = R_{1min} / R_{30sec}$$

kde

R_{1min} je izolační odpor v čase jedné minuty,

R_{30sec} izolační odpor v čase třiceti sekund

– dielektrický vybíjecí index DD

$$DD = \frac{I_{1min}}{U_t \cdot C} \quad (-; \text{mA}, \text{V}, \text{F})$$

kde

I_{1min} je proud měřený po jedné minutě,

U_t napětí během testu,

C naměřená kapacita

Hodnoty činitelů PI, DAR a DD ve vztahu k obecnému hodnocení izolace jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1. Činitele PI, DAR a DD ve vztahu k hodnocení izolace

PI	DAR	DD	Obecné hodnocení izolace
<1	<1,25	>4	velmi špatná
1 až 2	<1,25	4 až 7	horší/špatná
2 až 4	1,25 až 1,6	2 až 4	dobrá/horší
>4	>1,6	<2	velmi dobrá

Mezi přístroje s rozšířenými funkcemi s testovacím napětím až do 5 kV lze zařadit např. řadu měřičů izolačních odporů Sonel MIC 5005 a MIC 5010. Novinkou je také např. měřič izolačních odporů Metrel MI 3200, který umožňuje měření napětím do 10 kV. Uvedené přístroje vyhodnocují automaticky, ve vztahu k nastavené teplotě, také uvedené činitele PI, DAD, DD.



Obr. 5. Měřič izolačních odporů MIC 2510

je možné měřit těmito přístroji izolační odpory (podle normy je požadováno testovací napětí 500 V) a propojení obvodu proudem 200 mA (odpojitelné a prodlužovací přívody, PE vodič, spotřebiče třídy I. apod.). Testery izolačních odporů není možné měřit např. dotykové proudy, což norma ČSN 33 1600 ed. 2 vyžaduje (častý dotaz revizních techniků na přístroj sdružující obě normy).

Norma pro měření propojení elektrického obvodu předepisuje:

- nejistota měření podobně jako část předešlá $\pm 30\%$,
- měřicí proud minimálně 200 mA,
- měřicí napětí AC/DC od 4 do 24 V,
- rozlišení 0,01 Ω (některé přístroje měří s rozlišením 0,001 Ω),

2.2 Měření středních odporů – propojení elektrického obvodu

Testery izolačních odporů umožňují zpravidla měřit také pospojování elektrických obvodů podle EN 61557-4 *Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 4: Odpor vodičů uzemnění, ochranného pospojování a vyrovnání potenciálu*. Ve vztahu k měření spotřebičů a náradí podle ČSN 33 1600 ed. 2.

- s možností kompenzace měřicích kabelů,
- měřicí rozsah 0,2 až 2 Ω ,
- další specifikace jsou uvedeny v příslušné části normy.

Funkcí umožňující měření propojení elektrického obvodu proudem 200 mA jsou vybaveny také moderní přístroje určené k testování proudových chráničů, měření impedance smyčky a většina sdružených a kombinovaných revizních přístrojů předních evropských výrobců (např. Sonel, Metrel, Chauvin Arnoux, Megger apod.).



Obr. 6. Sdrúžený revizní přístroj Sonel MPI 525 (měření izolačních odporů napětím 2,5 kV)

2.3 Měření středně malých odporů – impedance smyčky

Pro konstrukce měřicích přístrojů určených k měření impedance smyčky platí z hlediska měření v elektrických instalacích části normy EN 61557-3 *Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 3: Impedance smyčky*. Bezpečnostní hledisko podle EN 61010 *Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení* je bráno jako samozřejmost, a tudíž není na tomto místě a v předcházejících kapitolách diskutováno.

Mezi vybrané podmínky ve vztahu k normě pro výrobce lze zařadit:

- nejistota měření může být max. $\pm 30\%$,
- přístroj musí umožnit kompenzaci měřicích kabelů,

- přístroj měří dotykové napětí, zkratový proud, složky impedance,
- další požadavky ve vztahu k odolnosti přístrojů jsou uvedeny v normě.

Standardní měřiče impedance smyčky měří dvou vodičovou metodou s max. rozlišením $0,01 \Omega$. Minimální měřitelné hodnoty vzhledem k uváděným nejistotám mohou být diskutabilní (tato otázka je někdy pokládána u zkoušek revizních techniků). Uvážíme-li dvou vodičové měření, je problematické zpřesnit měření nebo zvýšit rozlišení (LSB).



Obr. 7. Měřič impedance smyčky Sonel MZC 310S

Speciální měřiče impedance smyčky měří čtyřvodičově – Kelvinovou metodou, což umožňuje vzhledem k eliminaci měřících kabelů (proudové a napěťové svorky) měřit impedanci ochranné smyčky s rozlišením až $0,001 \Omega$, tedy podstatně s větším rozlišením, než je uváděno u měření dvou vodičového. Typickým představitelem měření impedance smyčky čtyřvodičově je přístroj Sonel MZC 310S (obr. 7). Přístroj měří impedanci smyčky jak při fázovém, tak při sdruženém napětí proudem až 280 A. Naměřené hodnoty impedance smyčky lze rozložit do složek v komplexní rovině a odečítat jak reálnou, tak imaginární složku impedance.

K měřičům impedance smyčky lze obecně říci, že většina provádí také měření za proudovým chráničem s vybavovacím proudem 30 mA bez jeho vybavení (přístroje měří zpravidla proudem 7 nebo 12 mA). Testování proudového (imitace vybavovacího tlačítka) chrániče 30 mA umožňují také pokročilejší testery napětí, např. Fluke T110, T130 a T150.

2.4 Měření středně malých odporů – zemních odporů a specifického odporu půdy

Měřicí přístroje určené k měření zemních odporů a specifického odporu půdy jsou konstruovány podle EN 61557-5 *Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 5: Zemní odpor.*



Obr. 8. Měřič zemních odporů MRU 200

Mezi vybrané podmínky ve vztahu k uvedené části normy lze zařadit:

- nejistota měření může být max. $\pm 30 \%$ ve vztahu k podmínkám uvedeným v normě,
- testovací napětí je střídavé,
- napětí během měření by nemělo překročit hodnotu 50 VEF nebo testovací proud $IMAX < 3,5 \text{ mA}$, průběh testu by měl být omezen 30 ms,
- přístroje indukují mezní, popř. nastavené hodnoty,
- další specifikace jsou opět uvedeny v příslušné části normy.

Měření zemních odporů souvisí také s často užívanými pojmy, jako je měření zemních odporů a testování uzemňovacích smyček.

Základní měření zemních odporů (revizní měření) používá zemní měřicí sondy (napěťová a proudová zemní sonda). Měření je také uváděno pod označením *metoda 62 %*. Při této měřicí metodě je důležité, aby byly měřicí sondy umístěny separátně od kovových konstrukcí apod. Přesný postup výpočtu vzdáleností sond a celkové měření je opět popsán v EN 61557-5.

Typickým představitelem měřicím zemní odporů může být např. měřič zemních odporů Sonel MRU 120, který zobrazuje naměřené hodnoty s rozlišením 0,001 Ω , umožňuje provádět měření dvěma, třemi a čtyřmi sondami (4 sondy – Wennerova metoda měření specifického odporu půdy). Vybrané hodnoty specifického odporu materiálů jsou uvedeny v tab. 2. Měření je prováděno harmonickým průběhem o frekvenci 125 Hz, aby byly zemních odporů MRU 200 měří také impulzním průběhem s nárůstem (4/10, 8/20 a 10/350 μ s), což více eliminuje zemní proudy. Přístroj vyhodnocuje samozřejmě interferenční napětí a frekvenci. Měření zemních odporů mohou být prováděna tímto přístrojem v průmyslových sítích o frekvencích 16^{2/3}, 50, 60 a 440 Hz s automatickou nebo manuální volbou měřicí frekvence. Uvedené přístroje mohou být také doplněny proudovými kleštěmi pro měření uzemňovacích smyček.

Vybrané hodnoty specifického odporu půdy jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2. Vybrané hodnoty specifického odporu materiálů

Měřený materiál	Specifický odpor (m)
slaná voda	0,4
sladká voda	15 až 95
vlhký štěrč	220 až 380
písek	450 až 520
suchý štěrč	1 100 až 1 900
kámen	120 až 2 900

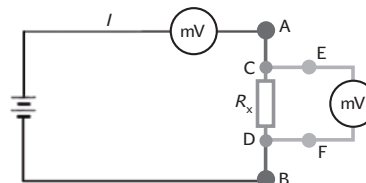
Vedle měřicích přístrojů určených k měření zemních odporů se používají také přístroje k testování uzemňovacích smyček. Typickými představiteli jsou např. testery Chauvin Arnoux (C.A 6410, C.A 6412, C.A 6415 a nová řada C.A 6416, C.A 6417) a Megger (DET 14C, DET 24C). Přístroje obsahují v jedné kleštěti jak budicí, tak snímací cívky. Jsou vhodné zejména k měření v místech, kde nelze použít klasické zemní sondy. Pokud je to

možné, je vhodné kombinovat měření zemních odporů klasickou metodou (rozpojení svorky) a měření uzemňovacích smyček proudovými kleštěmi.

Plnohodnotné měření zemních odporů kleštěmi umožňují také vybrané sružené revizní přístroje, např. Sonel MPI 350. Přístroj umožňuje měření zemních odporů *metodou 62 %* (proudová a napěťová sonda), čtyřmi sondami (Wennerova metoda), třemi sondami plus kleštěmi a dvěma kleštěmi (C1, N1).

2.5 Měření velmi malých odporů – Kelvinova metoda měření

Měřicí přístroje určené k měření velmi malých odporů podle EN 61557-4 *Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V – Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany – Část 4: Odpor vodičů uzemnění, ochranného pospojování a vyrovnání potenciálu* měří proudem v rozsahu od 200 mA do 25 A. Přístroje měřící většími hodnotami proudů, např. do 600 A (Megger), jsou zařazeny do vyšší kategorie testerů.



Obr. 9. Měření malých odporů proudové a napěťové svorky

A-B proudové svorky, E-F napěťové svorky, C-D definice odporu

Standardně probíhá měření čtyřvodičově z důvodu eliminace přívodních měřicích kabelů. Konce měřicích kabelů jsou zpravidla opatřeny čtyřmi měřicími hroty nebo krokosvorkami (napěťové a proudové svorky). V případě, že jsou všechny čtyři koncové body měřicích kabelů propojeny s měřeným objektem, probíhá měření automaticky nebo manuálně (obr. 9).

Testery malých odporů nejsou používány pouze při revizních měřeních elektrických strojů (vinutí motory, přechodové odpory kontaktů relé), ale i při kontrole pospojování mechanických součástí, např. drak letadla, karoserie vozidel apod.



*Obr. 10.
Mikroohmmetr
MMR 630*

Obecně je možné rozdělit mikroohmmetry podle minimálního měřicího rozsahu na přístroje s rozlišením 0,1 a 1 $\mu\Omega$. Nejmenší hodnoty odporů jsou měřeny zpravidla proudem 10 A. Přístroje umožňují volbu odporového a indukčního režimu měření (podle předpokládané zátěže) a mají ochranu vstupních obvodů do 440 V. Typickým představitelem může být např. přístroj MMR 630 s rozlišením 0,1 $\mu\Omega$ (obr. 10) a měřicím rozsahem do 2 k Ω .

3. Závěr

V článku je pojednáno o měření v elektrických sítích z hlediska měření impedancí. Je zde zmíněno měření impedancí jak v laboratorních, tak v průmyslových podmínkách, zejména při revizních měřeních. V jednotlivých částech byly mj. popsány současné měřicí přístroje vyhovující platným normám.