

# Indukce proti indukci

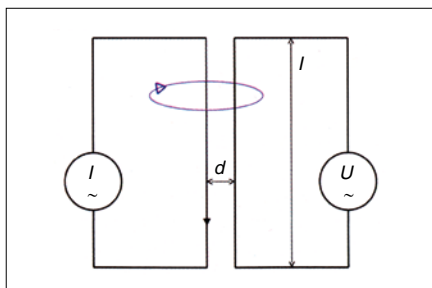
## Dočasné snížení svodových proudů ve vodiči PE pomocí kruhového jádra

z německého originálu časopisu *de*,  
23–24/2008, vydavatelství Hüthig & Pflaum Verlag GmbH München,  
upravil Ing. Josef Košťál, redakce Elektro

Elektroodborníky začíná nyní po problémech s harmonickými očividně trápit otázka kvality sítě. Odrušovací filtry, používané pro snížení pravděpodobnosti vysokofrekvenčního rušení, představují řešení typu „vyhánění čerta ďáblem“, neboť posílají nekontrolovatelné proudy na vodič, který by měl být v běžném provozu trvale bez proudu. Zde je tedy v současnosti každá rada drahá a každé řešení, které by tento problém udržovalo v určitých alespoň přijatelných mezích do doby, než odborníci najdou konečné řešení, je vítáno. V dalším textu je na základě situace v jedné rozhlasové stanici a nastíněna možná cesta k vyřešení problému s kvalitou sítě.

### Úvod

Stalo se to již před lety v jedné rozhlasové stanici. Analogová technika, která tam byla použita a kterou asi nebude nikdy zcela možné v elektroakustických zařízeních nahradit, je citlivá na infiltrace magnetických polí. Všechna vedení mikrofonů zachytávala síťové brnění. Přitom celý komplex měl k dispozici napájecí elektrickou síť se soustavou TN-S. Navíc zde byla věnována mimořádná pozornost tomu, aby soustava byla provedena jako tzv. čistá soustava TN-S, ve které existuje pouze jedno spojení mezi středním vodičem a uzem-



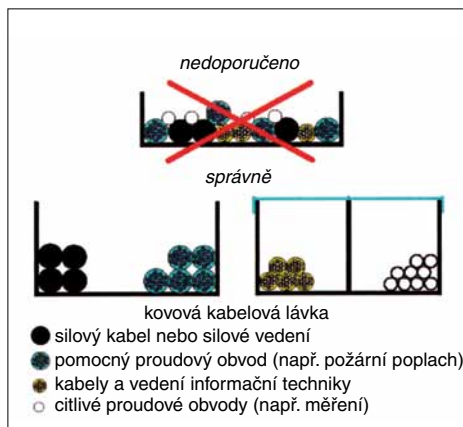
Obr. 1. Vazební mechanismus indukčního rušení

ňovací soustavou (ta je však sama o sobě značně zesměřkována). Přesto se na stíněních mikrofonních vedení objevovaly proudy!

### Galvanická vazba

Zodpovědný technik začal pečlivě hledat a přesněji analyzovat. A tak díky mnoha nelineárním zátěžím v tomto prostředí se mu podařilo objevit značný podíl 3. harmonických, tj. frekvencí 150 Hz v proudu tekoucím středním vodičem, jehož hodnota byla 150 A. Toto zjištění však ještě samo o sobě nic neznamená. Je-li síť zbudována patřičným způsobem, tedy v soustavě TN-S s plným průřezem středního vodiče a jen jedním spojením s uzemňovací soustavou, je třeba se s tím nějak vyrovnat. V takovéto čisté sou-

stavě TN-S pouze s jednou uzemňovací přípojkou by měl tento proud téci středním vodičem (ale jen tam). Technik objevil ale rovněž proud s frekvencí 150 Hz na vodiči PE, který měl hodnotu 32 A, což ale bylo neobvyklé a zvláštní.



Technik analyzoval situaci dál. Hodnota tohoto proudu ve vodiči PE byla pětinaová oproti proudu, který tekł středním vodičem. Na 9. harmonické, tedy na frekvenci 450 Hz, zjistil, že středním vodičem teče proud 14 A a vodičem PE 12 A. To tedy byly u vodiče PE téměř čtyři pětiny proudu tekoucího středním vodičem.

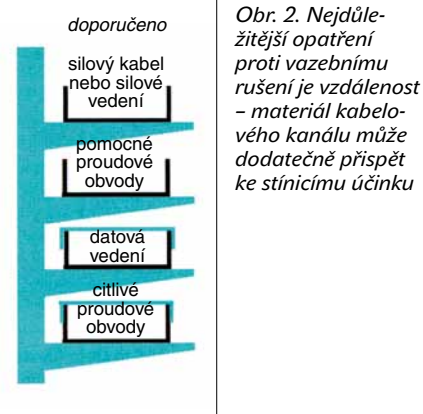
Proud, který se vyskytoval v soustavě PE, se částečně podílel na 9. harmonické (při trojnásobné frekvenci) přibližně s trojnásobnou velikostí vzhledem k 3. harmonické. Tímto bylo jasné, že nejde o galvanicky vázaný dílčí proud, který si hledá přes ilegální sekundární můstek paralelní cestu ke střednímu vodiči uzemňovací soustavou a zpětně se uzavírá přes legální primární můstek. Tyto proudy jsou pravděpodobně ve vodiči PE indukované bezkontaktně magnetickým polem středního vodiče.

Je třeba poznamenat, že je nejprve indukované napětí, které je velmi malé s hodno-

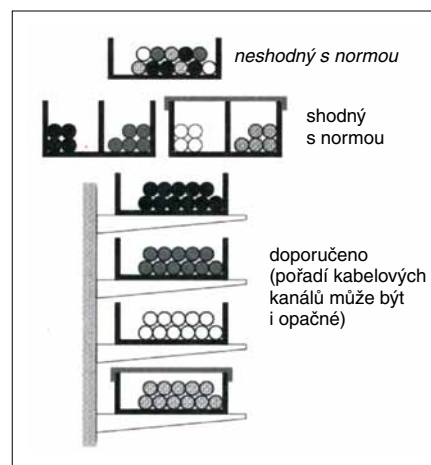
tami zpravidla menšími než 1 V. Teprve uzavřením proudového obvodu se začne příslušným obvodem protlačovat proud. Tento obvod je v zesměřkované uzemňovací soustavě uzavřen hned několikrát. Napětí, které je indukováno ve vodiči střídavým proudem paralelně uloženého vodiče, je:

- úměrně paralelní délce  $l$  tohoto vodiče,
- nepřímo úměrně vzdálenosti  $d$  tohoto vodiče (obr. 1),
- úměrně rychlosti změn magnetického střídavého pole.

Čím silnější je tedy vazba proudů k přílehlým soustavám, tím vyšší jsou jejich frekvence. Vazbu proudů z energetických, dato-



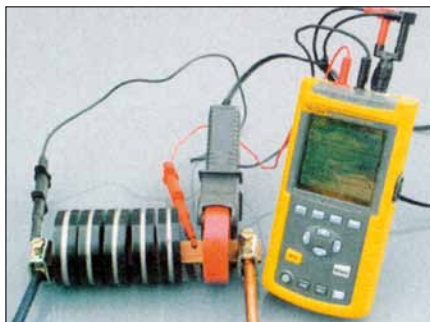
Obr. 2. Nejdůležitější opatření proti vazebnímu rušení je vzdálenost – materiál kabelového kanálu může dodatečně přispět ke stínicímu účinku



Obr. 3. Budoucí znění prHD 60364-4-44 (Elektrické instalace budov – Část 4-44: Bezpečnost – Ochrana před rušivým napětím a elektromagnetickým rušením) rozlišuje v tomto smyslu zcela vědomě mezi opatřeními odporujícími normě, shodnými s normou a doporučenými

vých a signálních vedení lze tak omezit jednak maximálním zkrácením paralelní délky  $l$  (pro toto zde není příliš velký prostor), jednak zvětšením vzdálenosti  $d$  (obr. 2 a obr. 3), na což poukazují mj. i normy. Impedance vodiče PE je zpravidla velmi malá, neboť tvoří s pospojováním budovy a všemi tímto způsobem uzemněnými částmi velmi silně zesmyčkovanou uzemňovací soustavu. Tak je to také požadováno, neboť uzemňovací soustava má fungovat ve své tradiční roli redundantně jako ochrana před úrazem elektrickým proudem a omezovat dotykové napětí v případě poruchy na 50 V.

V současné době je stále více požadováno, aby uzemňovací soustava sváděla v běžném provozu navíc také vysokofrekvenční proudy. Při určité vysoké frekvenci se však může stát, že podélná indukčnost některé odbočky spolu s její příčnou kapacitou (proti zemi) vytvoří rezonanční blokovací obvod a zabráni svedení právě této rušivé frekvence. To by nemusel být až tak závažný problém, jsou-li k dispozici jiné paralelní cesty s jinými rezonančními frekvencemi, kterými pak takovéto rušení může být svedeno. Uzemňovací soustava má tedy velkým rozsahem frekvencí vytvořit



Obr. 4. Principiální zkušební uspořádání pro zjišťování proudově závislé impedance vodiče s kruhovým jádrem



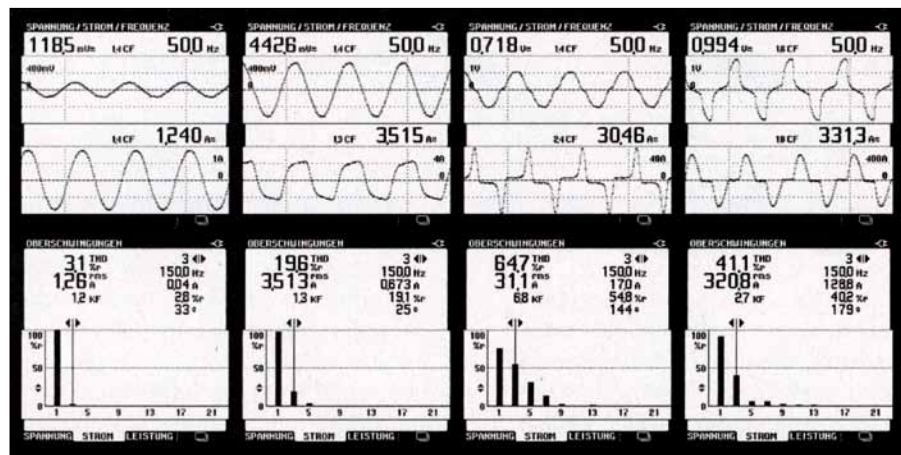
Obr. 5. Podrobné zkušební uspořádání s napájením zkušební proudu

svodovou cestu k zemi o velmi malé impedanci. Tato cesta je tvořena jak elektrickým vedením, tak uzemněnými **cizími vodivými částmi** či téměř zcela přirozeně vytvářenými smyčkami. Impedance takovýchto smyček se pohybují u stejnosměrného proudu, síťové frekvence a jejich harmonických většinou výrazně pod hodnotou 1  $\Omega$ .

## Indukční vazby

Malé napětí, které je za zmíněných podmínek indukováno do smyčky, již postačí na to, aby protlačilo relativně velký proud příslušné frekvence tekoucí touto smyčkou. Jsou-li nyní oboustranně uzemněna stínění vedení tónové frekvence (což zpravidla bývá pro odstínění např. kapacitních vyzářených rušení), tvoří stínění nucenou součást min. jedné takové smyčky. Proud ve stínění indukuje na-

čích nepřímo úměrně k jejich impedancím. Kruhové jádro nasazené na jednom z těchto vodičů může impedanci tohoto vodiče znásobit. Předpokladem ovšem je, že napětí mezi konci vodiče je velmi malé. Toto je zpravidla dáno v případě, že má proud, kterému je tímto způsobem bráněno v toku, k dispozici volnou paralelní cestu. V opačném případě dojde k magnetickému nasycení jádra, čímž dramaticky klesne impedance umístěná doplňkově do proudového obvodu. Kruhové



Obr. 6. Měření impedance a zobrazení tvaru křivek, resp. obsahu harmonických při různých proudových úrovních

pět v signálním vedení, které se tam překrývá s přenášeným napětovým signálem, což se projevuje jako velmi rušivé síťové bzučení. Pokud by nebylo harmonických složek, pak by pouze při frekvenci 50 Hz byla:

- vazba mnohem slabší,
- signál sotva rozlišitelný (lidské ucho je při frekvenci 50 Hz ještě mnohem méně citlivé než při 150 Hz, nebo dokonce při 450 Hz).

jádro téměř vůbec neovlivní podmínky odpojení zemního spojení.

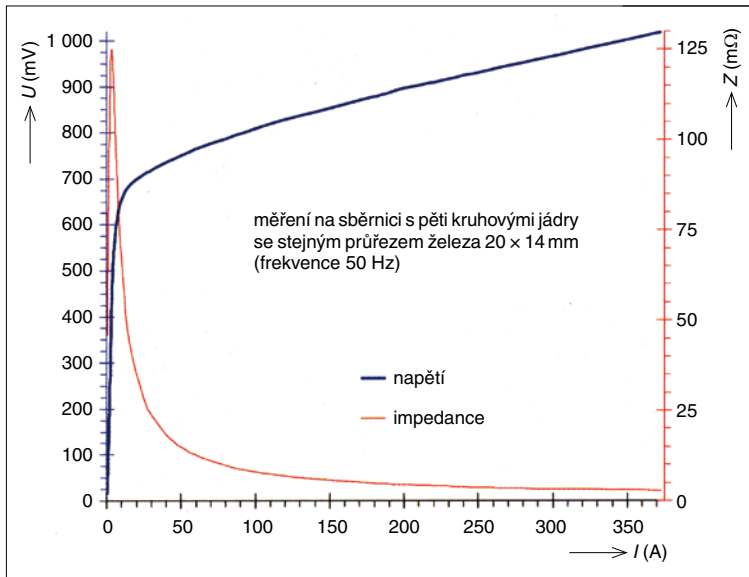
## Chování proudového obvodu

Na obr. 4 je znázorněno principiální uspořádání, pomocí kterého lze zjišťovat vliv kruhového jádra na proudový obvod. Zkoušené předměty jsou zde nasazené na sběrnici, kterou protéká proměnlivý proud, zatímco je snímán pokles napětí před a za sadou kruhových jader. Na obr. 5 je kromě toho uspořádání, pomocí kterého lze vhodně formovat proměnný proud. Pro generování napětí a proudu o požadované velikosti se použije běžný transformátor s kruhovým jádrem s dostatečným zbytkovou dírou. Nastavovací transformátor budí primární vinutí. Sekundární vinutí zůstává nevyužito, protože zbytkovou dírou je protaženo provizorní sekundární vinutí vytvořené např. ze silného drátu pouze s jedním nebo několika málo závitů.

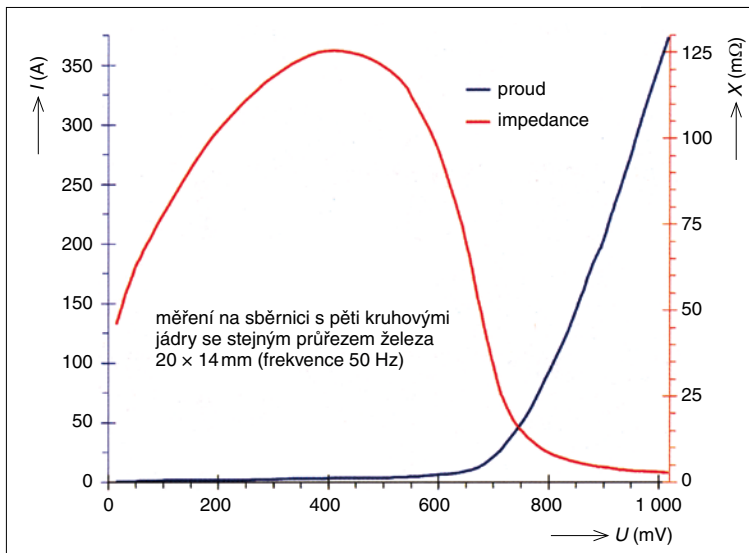
## Indukčnost proti indukčnímu rušení

V mnoha situacích by bylo lepší, kdyby byl proud tekoucí dvěma paralelními vodiči vázán jen v jednom z nich (jako v těchto případech rušení způsobeného harmonickými složkami proudu v elektroakustických zařízeních) a rušení měla pouze galvanické nebo indukční vazby. V případě galvanické vazby je zde „nečistá“ TN-S soustava s více než jedním spojením mezi středním vodičem a uzemňovací soustavou. Ačkoliv by se takové vícenásobné spojení neměla vyskytovat, neboť zase maří výhody soustavy TN-S, lze se s nimi přesto v praxi často setkat. Lokalizace a odstranění přebytečných můstků jsou mnohdy obtížné a časově náročné.

Výsledek lze nyní odečíst z měření (obr. 6) a z grafů (obr. 7 a obr. 8) – impedance zkoušeného předmětu se zvyšuje až do proudu 5 A. Impedance přípojnice testovaného předmětu se v tomto případě zvýšila na 125 m $\Omega$ . V důsledku toho zde pokleslo napětí o asi 0,5 V. Poté se ale začíná impedance opět přikře zvyšovat. Při proudu 30 A poklesne napětí již jen o 0,7 V a při proudu 350 A klesne impedance na asi 3 m $\Omega$ , což přibližně odpovídá činnému odporu této přípojnice. Indukčnost je téměř nulová a kruhové jádro jako by tady z elektrotechnického hlediska ani nebylo. Napětí ne-



Obr. 7. Napětí a impedance zkoušeného předmětu v závislosti na proudu



Obr. 8. Proud a impedance zkoušeného předmětu v závislosti na přiloženém napětí

dosahuje ani 1 V. Na tuto hodnotu by napětí kleslo u této přípojnice také v případě zkratu.

Na obr. 6 lze rozpoznat začínající nasycení jádra podle toho, že má proud na snímku při hodnotě 1,24 A ještě zcela sinusový průběh, avšak při hodnotě 3,5 A jsou již patrná první zkreslení. Při hodnotě 30 A vykazuje proudová křivka již velké zkreslení, protože magnetovatelnost jádra je nyní překročena o činitel  $>10$ . Při hodnotě proudu 330 A je zkreslení překvapivě opět menší. Tento na první pohled překvapivý průběh naznačuje, že nelineární vliv nasyceného jádra je nyní značně převýšen činným odporem přípojnice.

Teď již sice není možné v plném provozu (tj. bez přerušení proudového obvodu) nasaďit kruhové jádra na vodič, avšak lze použít v případě potřeby vinuté C-jádro, které má podobné vlastnosti, dá se však otevřít a vyhovuje mnohem více tvaru přípojnice.

Tato metoda však není vhodná jako trvalé řešení, protože jádro zabraňuje dalšímu postupu vysokofrekvenčního rušení, které má být mj. eliminováno vodičem PE. Toto dočas-

né řešení by tedy mělo být nahrazeno při nejbližší příležitosti řešením finálním. Doplnkové můstky se musí odstranit a s nimi na konci také i kruhová jádra.

### Soustava TN-S-S

Jinak to vypadá v případě zatím nenormalizované soustavy TN-S-S se šesti vodiči (L1, L2, L3, N, PE, FE). Jejím smyslem a účelem je vést trvale tekoucí proudy, tj. vysokofrekvenční proudy považované za pracovní proudy, vodičem funkčního uzemnění (FE – *Functional Earthing*), a udržovat je tak mimo vodič PE, který by měl být v normálním provozu bez proudu. Je-li soustava FE zřízena jako ryze paprsková, je pak také imunní vůči indukčním vazbám z fázových vodičů a ze středního vodiče.

Protože je soustava PE/pospojování zesmýčkováná, je také náchylná k vytváření vazeb, podle okolností i s vysokými frekvencemi sousední soustavy FE. Proudové tekoucí touto soustavou jsou sice zpravidla podstatně

menší než harmonické proudy, nicméně vazba je v přímém poměru k frekvenci. Za této situace mohou trvale pomoci některá kruhová jádra nebo vinutá C-jádra, aniž by to narušovalo svod vysokofrekvenčních proudů nebo podmínky odpojení.

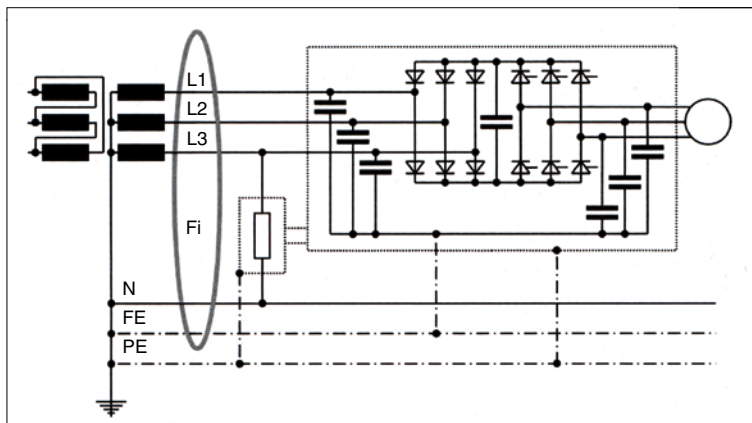
### Svodové proudy v zařízeních

Zda bude šestivodičová soustava převzata do systému technických norem přímo nebo zda se etabloje přes oblast radiotechniky, to lze jen sotva odhadnout. Náklady na přestavbu by však byly velmi vysoké. Byly by třeba např. nově koncipované konektory, pětipólové proudové chrániče (obr. 9), které zatím k dispozici nejsou. Byly by ale nezbytné, protože je třeba vést proudovým chráničem také svodový proud tekoucí vodičem FE. Vnějškem by byl veden pouze vodič PE. Toto je jediný možný způsob, jak se zbavit nechtěných a z hlediska bezpečnosti zbytečných vypnutí proudového chrániče, která tak trápí v současné době uživatele i provozovatele elektrických zařízení.

Svodový proud menších měničů může překročit hodnotu 0,5 A. V tomto případě by proudový chránič s reziduálním proudem 500 mA neustále vybavoval. Hodnota frekvence svodového proudu může odpovídat taktovací frekvenci. Avšak napětí taktované tímto způsobem může být ideálně pravouhlé, a rozpadne se tak opět spontánně na teoreticky nekonečné spektrum harmonických. Čím blíže se měnič v praxi přiblíží tomuto ideálu, tím menší má ztrátový výkon, avšak tím dále bude sahat spektrum svodových proudů také do vysokých frekvencí. Tyto vysokofrekvenční harmonické se mohou vyvinout jak do prostupujících rušení šířících se po vedení, tak do vyzářených rušení. Je proto třeba je odvádět přes vhodné filtry (obr. 10 a obr. 11) do země.

V souvislosti s třífázovými aplikacemi vyvstává otázka, proč jsou rušení vedena na střední vodič N, a ne na vodič PE. Zda toto opatření ještě i potom pomůže, závisí na rozsahu frekvence potlačovaného rušení, neboť účinek filtru spočívá v tom, že nulový bod kondenzátorů z obr. 10 bude mít stejný potenciál jako kovový kryt měniče. Pouze v tomto případě může kryt uplatnit svůj stínící účinek. Je-li nulový bod kondenzátorů připojen uvnitř krytu přímo na jeho těleso, je stínící účinek optimální.

Je-li kryt (jak to je ostatně zvykem) připojen ke svorce PE, ale nulový bod filtru ke svorce N přípojného vedení, musejí tato rušení za daných okolností urazit celkem dlouhou cestu k centrálnímu bodu uzemnění (CBU) a zpět (právě z důvodu nízkofrekvenční elektromagnetické kompatibility, která je nezbytně požadována v této čisté soustavě TN-S). Indukční odpor je však při vysokých frekvencích také značně velký. Tato trasa vedení není při vysokých frekvencích téměř k dispozici, kryt visí obrazně řečeno ve vzduchu a neplní stínící funkci.



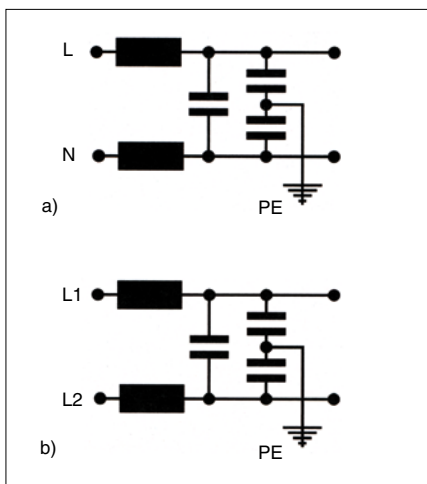
Obr. 9. Šestivodičová síť, tedy soustava TN-S-S, je použitelná např. při nadměrných svodových proudů z pohonů s měniči proudu (zatím se využívá pouze v radiotechnice)

Z tohoto hlediska by bylo vhodné znovu promyslet používání šestivodičové soustavy. Nehledě k tomu, že byla tato soustava vymyšlena k potlačení nízkofrekvenčních rušení a zde představuje jediné dobré řešení, je trasa vedení pro vysokofrekvenční rušivé signály (viz obr. 9) podobně dlouhá jako u pokusu o odrušení přes střední vodič N. Jde-li pouze o jeden velký rušič, doporučuje se vyřešit tuto situaci zřízením spojení mezi vodičem PE/pospojováním a vodičem FE ne u CBU, ale v blízkosti příslušného velkého rušiče.

U decentralizovaných rušení je třeba upustit od paprskové koncepce a provést jak soustavu FE, tak soustavu PE/pospojování jako zesmyčkovanou. Proti vazbám obvodových proudů do soustavy PE/pospojování mohou pomoci kruhová jádra umístěná na určitých místech v rámci soustavy PE/pospojování. U tohoto řešení smí mezi soustavou FE a PE existovat skutečně jen jedno spojení, neboť v opačném případě by mohl poruchový zemní proud téct přes soustavu FE. Tento dílčí proud by tak mohl být veden na cestě tam a zpět proudovým chráničem, který by na tento chybový proud nereagoval.

### Ochrana osob a majetku

Norma IEC 950 (ČSN EN 60950-1 ed. 2:2006 *Zařízení informační technologie*



Obr. 10. Mnoho elektronických zařízení obsahuje odrušovací filtr pro odvádění svodových proudů k zemi

a) jednofázové přístroje (např. počítače),  
b) třífázové přístroje (např. měniče frekvence)

– *Bezpečnost – Část 1: Všeobecné požadavky*) uvádí pro odrušovací filtry postup měření pro určení svodového proudu, podle kterého je měřen svodový proud při napětí 230 V a frekvenci 50 Hz. Svodový proud obsahuje ale frekvence, které mohou snadno překročit i tisícnásobek síťové frekvence (50 Hz). Je-li výskyt takovýchto frekvencí vyloučen, není odrušo-

vací filtr třeba. Takovýto postup je tedy velmi vzdálen potřebám uživatelů norem. To je zvláště nezodpovědné z toho důvodu, že účelem norem je především a hlavně bezpečnost zařízení a přístrojů, a ne už tolik hledisko použitelnosti a elektromagnetické kompatibility. Elektrotechnik přitom pomyslí např. na možné přerušení ochranného vodiče, které zamezí odvedení svodového proudu, čímž se vytvoří na konci přerušovaného vodiče ze strany zařízení napěťový potenciál tohoto svodového proudu (řádově většinou v hodnotě provozního napětí) a na druhém konci čistý potenciál země. Ten, kdo tyto dva konce zvedne a v tom horším případě uchopí každý jednou rukou, utrpí elektrický šok při průtoku proudu tělem ve velikosti svodového proudu. Proto se pro určité případy použití, překračuje-li svodový proud filtru 10 mA, vyžaduje u ochranného vodiče zesílené nebo dvojitě provedení přípojky (redundance). Filtr, který této podmínce vyhoví, může bez problémů vést mnohaampérový svodový proud na ochranný vodič.

### Výhled

V současné době se proto snaží DKE (*Deutsche Kommission Elektrotechnik*, Německá elektrotechnická komise) najít zcela nové řešení, jak tento problém zvládnout jednak normativně, jednak technicky. Hmotné škody, které vznikají nepotřebným odpojením zařízení v plném provozu, jsou velké a nepřijatelné, stejně jako jsou nepřijatelné značné finanční náklady na dosažení vysoké úrovně bezpečnostního standardu. Vyřešení tohoto problému je zatím ještě v nedohlednu. Má-li ale nějaké řešení reálnou naději na úspěch, pak je to zavedení šestivodičové soustavy. Její hlavní nevýhodou jsou však vysoké realizační náklady. Finanční náročnost nespočívá v celkem zanedbatelných vícenásobcích na instalaci šestého vodiče v nově zřizovaném stavebním objektu, ale v modernizaci dosavadních staveb a v zajištění nezbytných součástí a montážních skupin, jako jsou např. vidlice CEE, zásuvky, konektory či proudové chrániče.

☒

AMT měřicí technika

## AUTORIZOVANÝ DISTRIBUTOR MĚŘICÍ TECHNIKY

KONZULTACE – PRODEJ – KALIBRACE – SERVIS



www.amt.cz

T Cert ISO 9001

AMT měřicí technika, spol. s r. o., Leštínská 2418/11, 193 00 Praha - Horní Počernice, fax: 281 924 344, tel.: 281 925 990, tel.: 602 366 209, e-mail: info@amt.cz