

Tento dokument obsahuje výsledky měření intenzity magnetického pole v případě použití nosného rádiového systému na vodičích rozvodné sítě. Měření bylo provedeno pro případ, kdy signály z frekvenčního rozsahu 150kHz až 30 MHz byly přenášeny vodiči rozvodné sítě budov. Jsou prezentovány vztahy mezi nepřizpůsobením rozvodné sítě a vyzářeným elektromagnetickým polem. Ač použité modely selhávají v predikci pole na frekvencích nižších než 4 MHz, výsledek ukazuje důležitost řízení komunikace po silových vedeních tak, aby se zabránilo rušení rádiových frekvenčních pásem.

1 Úvod

Přenos dat po elektrorozvodné síti, označované zkratkou PLC (Power-Line Communication) najde uplatnění během příštích několika let v domácnostech i průmyslu. Typickým příkladem sítě nízkého napětí je připojení několik stovek domácností na jednu transformátorovou stanici. Několik nových služeb může být proto zavedeno bez nutnosti instalace nových komunikačních médií.

Přenos dat rozvodnou sítí 230V bylo již použito v budovách pro řízení rozličných funkcí, jako například ovládání osvětlení, nebo ovládání pohybu záclon. Systémy založené na protokolu EIP jsou stále komercializovány. Přenos dat s širším pásmem otevírá nové možnosti komunikačním technologiím. Na trhu ve Spojených státech jsou k dispozici zařízení pro přenos zvuku, obrazu a dat z prostředí LAN (Local Area Network) na různých nosných frekvencích prostřednictvím rozvodné sítě. Použití podob-

ných zařízení není v Evropě povolené ve shodě s předpisy obsahující pravidla a omezení využití rádiového spektra.

V případě potřeby zvýšit sířku pásma přenášených dat je nezbytně nutné použít signály z frekvenčního rozsahu nad 150 kHz. S tím přichází nebezpečí elektromagnetického vyzařování, kdy elektrorozvodná síť se na vyšších frekvencích začne chovat jako anténa. Tento dokument předkládá výsledky měření elektromagnetického pole v případě použití PLC.

2 Vyzařování nepřizpůsobeného systému

Při přenosu dat elektrorozvodnou sítí bude modulovaný signál symetricky navázán mezi fází a pracovní nulou, nebo mezi dvě fáze v případě třífázového systému. Signál může být k silovým vodičům navázán pomocí balunu a vazebních kapacit. Pokročilé systémy dokáží přizpůsobit výstupní impedanci k impedanci sítě.

2.1 Nepřizpůsobení systému

Jé známé, že útlum symetrických signálů v silových vodičích je podstatně větší, než útlum asymetrických signálů. Na druhou stranu však asymetrický signál silněji vyzařuje proti signálům symetrickým. To přináší reálné nebezpečí rušení při použití PLC systémů produkujících asymetrické signály na vedení.

I v případě, že by byly signály navázány symetricky na silové vodiče, asymetrické napětí a proudy budou vznikat na vedeních z důvodu nepřizpůsobení systému. Zvláště pak v bodech

s velkým nepřizpůsobením, jako například v místě elektrického spotřebiče.

Připojíme-li symetrické napětí k rozvodnému systému, potřebujeme vhodnou metodu k odhadu vzniklého asymetrického napětí. Podélná převodní ztráta (LCL) a příčná převodní ztráta (TCL) jsou definovány v doporučeních ITU. Jsou to poměry mezi symetrickou a asymetrickou složkou ve specifickém testovacím bodě.

LCL konkrétního testovacího bodu je určeno vazebním asymetrickým napětím, připojeným k systému a naměřeným výsledným symetrickým napětím. LCL je logaritmus poměru mezi asymetrickým napětím (E_L) a výsledným symetrickým napětím (V_T).

$$LCL = 20 \times \log \frac{E_L}{V_T} ; [\text{dB}]$$

TCL je poměr mezi symetrickým a asymetrickým napětím, kde symetrické napětí je vstupem systému.

$$TCL = 20 \times \log \frac{E_T}{V_L} ; [\text{dB}]$$

Sonda, umožňující měření obou veličin, tedy LCL a TCL je popsána v [1].

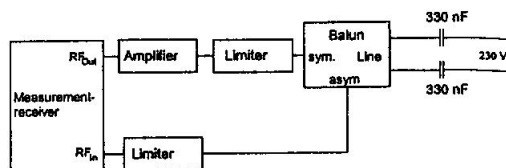
Změna podmínek elektrorozvodné sítě, zvláště pak neslučitelnost vlnových impedancí mezi měřicím přístrojem a silovým vedením, vede k resonanci v TCL. Toto chování vyžaduje určení TCL v různých testovacích bodech uvnitř budovy. Hledaná hodnota, kterou je minimální naměřená hodnota, může být použita jako TCL.

Jakmile je hodnota TCL známá, je možné ji

použít k výpočtu asymetrického napětí, které určuje amplituda symetrického signálu. Toto napětí může být použito, s využitím vhodného modelu, k určení intenzity vyzařovaného elektromagnetického pole.

2.2 Měřicí sestava

Zkoumání bylo zaměřeno k získání přehledu o vyzařovaném elektromagnetickém poli vznikajícím během komunikace po elektrorozvodné síti. Dále jsou uvedené souvislosti mezi TCL a vyzářeným polem. Měřicí pracoviště, znázorněné na obrázku 1, je navrženo tak, aby umožnilo měření TCL a intenzitu vyzářeného magnetického pole H bez změny vazebních podmínek.



Obrázek 1: Blokové schéma zapojení měřicího pracoviště

K měření byl použit měřicí přijímač R&S ESHS30 s vnitřním signálním generátorem. To umožnilo příjem na frekvenci, která byla pevně svázaná s frekvencí vysílače. Symetrický signál byl na silová vedení navázán pomocí balunu - symetrizačního vazebního členu. Výsledné asymetrické napětí bylo měřeno přímo na vazebním členu. Vyzářené elektromagnetické pole bylo měřeno pomocí rámové antény, která byla připojena na vstup přijímače, v okruhu přibližně 30 m od místa, ve kterém byl signál na-

vázán na rozvodnou síť.

3 Postup měření

Měření bylo provedeno v pěti rozdílných budovách, ale také na podzemním kabelu. Tento dokument však obsahuje pouze údaje naměřené uvnitř budov. Uvnitř budovy byl do elektrické sítě přiveden signál o velikosti $105 \text{ dB}_{\mu V}$ a bylo měřeno vyzařené elektromagnetické pole. Budovy vybrané pro měření byly rodiný domek, přestavěná vila, administrativní budova, dům pro dvě domácnosti a 12 podlažní budova z roku 1964.

3.1 Výsledky měření magnetického pole

Magnetické pole bylo měřeno v 192 bodech uvnitř budov, za použití minimálně dvou různých umístění vazebního obvodu. Měření bylo postupně provedeno na 70 vybraných frekvencích. Frekvence byly vybrány tak, aby obsahovaly minimální šum pozadí. Byly pozorovány velké rozdíly v naměřených hodnotách magnetického pole. V případě resonance elektrorozvodné sítě byla maximální naměřená hodnota intenzity pole $120 \text{ dB}_{\mu V/m}$. Výsledky byly rozděleny do skupin podle vzdálenosti d , mezi vazebním obvodem a místem měření.

Byly vybrány následující skupiny:

- měření do 3 m od vazebního členu
- měření ve vzdálenosti od 3 m do 5 m od vazebního členu

- měření ve vzdálenosti nad 5 m od vazebního členu.

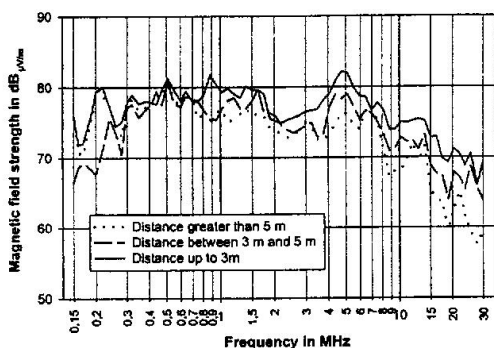
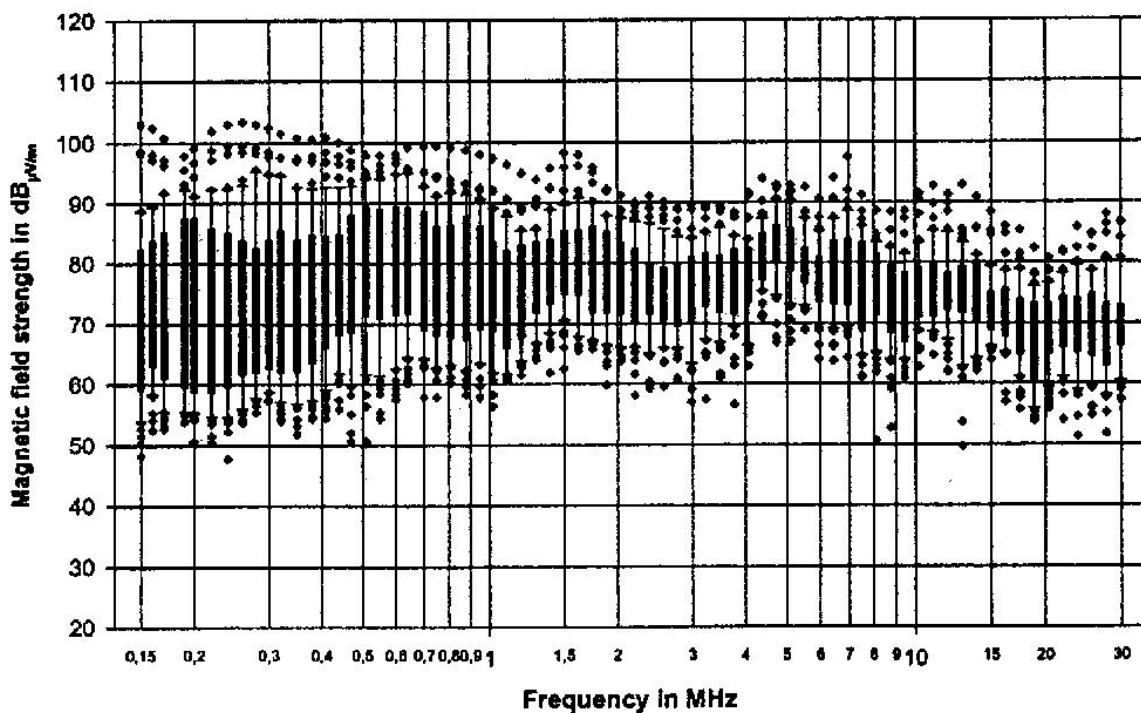
Výsledky měření znázorňuje nejlépe graf. V grafu jsou zobrazeny hodnoty z intervalu 25% - 75% tlustou čarou, hodnoty z intervalu 10% - 90% tenkou čarou a ostatní hodnoty mimo tyto meze jsou vyneseny jako samostatné body. Takto sestavený graf je vhodnou grafickou reprezentací naměřených hodnot. Grafy pro vzdálenosti do 3 m a nad 5 m jsou na obrázcích 2 a 3.

Jak je vidět z obrázků 2 a 3 je rozptýlen intenzity magnetického pole, jakožto i naměřených hodnot značný.

Zvolme konkrétní hodnotu, kde požadavkem k určení této hodnoty je nerušený příjem rozhlasových přijímačů. Tato podmínka je splněna v 90% případů. Použití tohoto 90% intervalu umožní vypočítat vazební faktor pro magnetické pole velikosti přibližně $-15 \text{ dB}_{1/m}$. Symetrické napětí o velikosti $105 \text{ dB}_{\mu V}$ vyprodukuje v 90% případů pole o velikostech do $90 \text{ dB}_{\mu V/m}$. Závislost magnetického pole na frekvenci a vzdálenosti od vazebního obvodu je zobrazena na obrázku 4.

Jednotlivé křivky mohou být popsány následovně:

- $d < 3 \text{ m}$: Intenzita magnetického pole H se pohybuje okolo $79 \text{ dB}_{\mu V/m}$ až do 5 MHz, poté klesá s poklesem 15 dB na dekádu.
- $3 \text{ m} \leq d \leq 5 \text{ m}$: Ve frekvenčním rozsahu od 150 kHz do 500 kHz roste intenzita magnetického pole od $67 \text{ dB}_{\mu V/m}$ do $77 \text{ dB}_{\mu V/m}$. V rozsahu od 0.5 MHz do 5 MHz se pohybuje kolem hodnoty $77 \text{ dB}_{\mu V/m}$. A konečně



Obrázek 2: Průměrné hodnoty magnetického pole, za předpokladu, že na rozvodnou síť je navázán signál o velikosti $105 \text{ dB}_{\mu V}$

na frekvencích nad 5 MHz je vidět pokles 15 dB na dekádu.

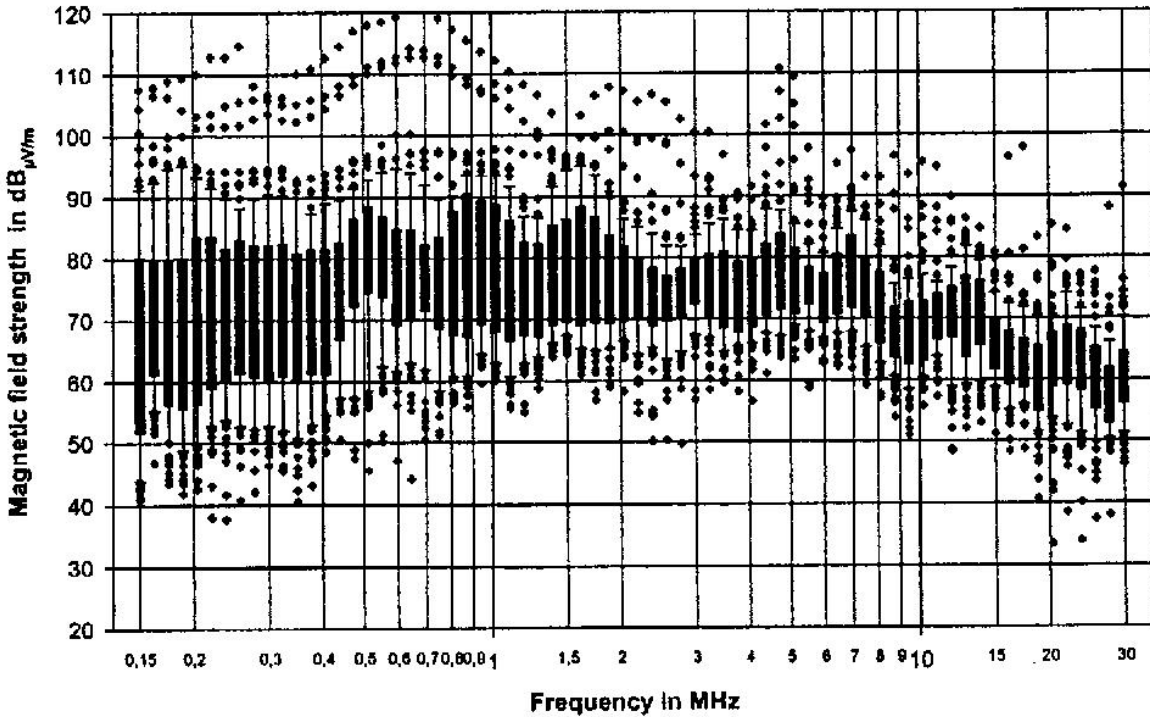
- $d > 5 \text{ m}$: Intenzita elektromagnetického pole

H se pohybuje kolem hodnoty $76 \text{ dB}_{\mu V/m}$ až do frekvence 5 MHz, poté klesá s poklesem 20 dB na dekádu.

Závislost na vzdálenosti, přibližně 10 dB na dekádu, je diskutabilní na frekvencích vyšších než 10 MHz.

3.2 Lokální šíření magnetického pole

Lokální šíření magnetického pole bylo měřeno v jednom pokoji rodinného domku. Velikost pokoje je 4×6 metrů, vodiče elektrického rozvodu jsou instalovány podél stěn a stropu (přípojný bod osvětlení je umístěn ve výšce 2.5 m). Příklad lokálního šíření elektromagnetického pole na frekvenci 30 MHz uvnitř této místnosti je vidět na obrázku 5.



Je zřejmé, že se magnetické pole uvnitř místnosti mění jen minimálně, to již bylo demonstrováno simulacemi. Maxima asymetrického proudu, či napětí podél vedení způsobují lokální maxima magnetického pole uvnitř místnosti.

3.3 Doporučení NB 30

Limity stanovené regulačním orgánem pošt a telekomunikací v Německu pro vyzáření magnetického pole ve vzdálenosti 3 m od telekomunikačního stanovuje doporučení NB 30, tyto hodnoty ukazuje obrázek 6.

Symetrické napětí produkující magnetické pole splňující tyto limity lze spočítat jako:

$$U_{S,NB30} = U_{0,sym} \times \frac{H_{NB30}}{H_{ist}}$$

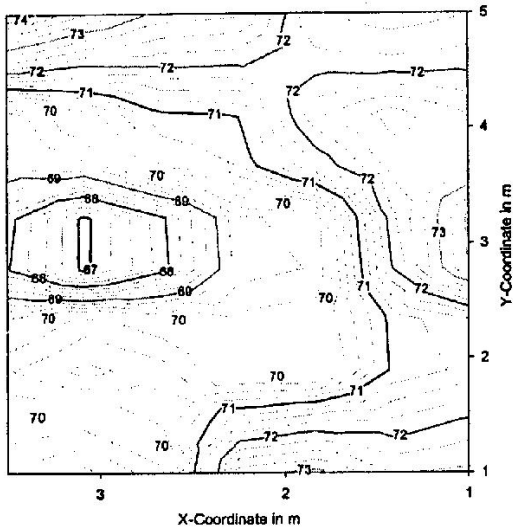
kde $U_{0,sym}$ je symetrické napětí použité pro měření, H_{NB30} je limit určený doporučením NB 30 a H_{ist} je naměřená hodnota intenzity magnetického pole.

Napětí $U_{0,sym}$ pro rodiný domek ukazuje obrázek 7.

Použitím těchto hodnot napětí je možné omezit symetrické nebo nesymetrické napětí. Je vhodné předpokládat nesymetrické napětí o 6 dB menší, než symetrické napětí.

4 Použití jednoduchého modelu

K určení síly elektrického a magnetického pole ve vzdálenosti 10 m od zdroje bylo použito půl-

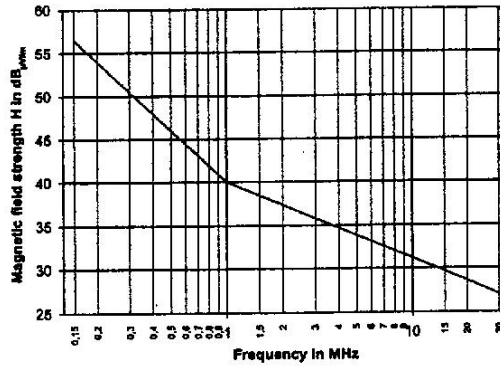


Obrázek 3: Lokální šíření magnetického pole na frekvenci 30 MHz. Symetrický signál o velikost $105 \text{ dB}_{\mu V}$ je do sítě připojen v místě o souřadnicích 0, 0 m a výšce 1 m.

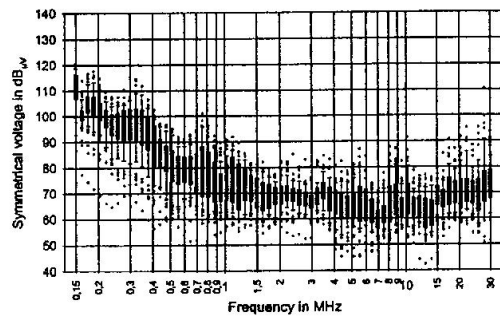
vlného dipólu. Amplituda napětí zdroje byla $105 \text{ dB}_{\mu V}$ a dipól byl v rezonanci pro každou nastavenou frekvenci. Vypočítané magnetické pole bylo přepočítáno pomocí TCL v každém konkrétním měřicím bodě. Byla určena průměrná hodnota z naměřených hodnot. Tu ukazuje obrázek 8 včetně spočítaných aproximací. Výpočty byly provedeny pro mnoho měřicích bodů a vzdáleností.

To může znamenat, že bude úzká korelace mezi TCL a produkovaným magnetickým polem. Tento model podhodnocuje magnetické pole. Na frekvenci 20 MHz je naměřené pole stále o 20 dB silnější, než odhad. Tyto neshody jsou na vyšších frekvencích menší.

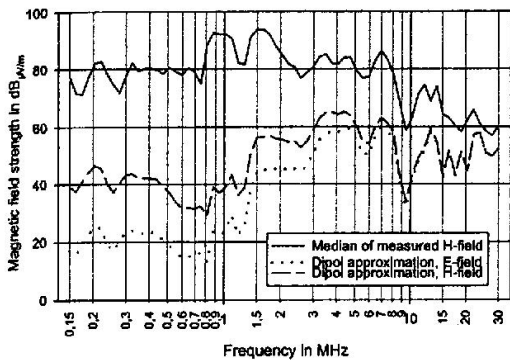
Na nízkých frekvencích není proto odhad použitelný. To je způsobeno dlouhou vlnovou délkou a vlastnostmi rozvodné sítě. Pokroči-



Obrázek 4: Limity vyzářeného magnetického pole, určené doporučením NB 30 úřadu pro regulaci pošt a telekomunikací v Německu



Obrázek 5: Hodnoty symetrického napětí, produkující pole, které vyhovuje doporučení NB 30



Obrázek 6: Srovnání modelu a naměřených hodnot

lejší modely rozvodné sítě, použité pro výpočet magnetického pole, jsou přesné i na frekvencích pod 1 MHz.

Je několik příčin, které vedou k neshodám skutečnosti a modelu. Opírají se o existenci silových vodičů, které jsou na jednom konci ukončené bez zátěže. To je podrobně popsáno v [2]. V těchto případech může symetrický signál produkovat vysoké hodnoty elektrického pole. To je způsobeno nesymetrickým vedením, jako jsou jednofázové spínané obvody (obvody osvětlení). Jakmile je vypnuta zátěž, je k této zátěži připojen pouze jeden vodič. Takto neukončené silové vodiče se chovají jako anténa. Výsledkem tohoto pracovního módu jsou vysoké hodnoty elektrického pole.

Jsou ještě další nepopsané vlivy, které způsobují nesrovnalosti mezi modelem a měřením na nízkých frekvencích. V tuto chvíli je možné využít statistické vyjádření měření k překonání nepřesnosti modelů. Proto mohou být zavedeny limity pro symetrické a nesymetrické napětí. Tyto limity by měly být ve vztahu k existu-

jícím standardům CISPR.

5 Závěr

Magnetické pole vyzářené silovými vodiči bylo měřeno při navázání symetrického signálu na rozvodnou síť 230 V. Výsledky měření ukazují potenciální nebezpečí vyzářování při neregulované komunikaci po silových vodičích. Maximální napětí, které může být vázáno na silové vodiče se pohybuje do 60 dB_{µV} (1 mV). Takto stanovené hodnoty vyhoví Německému doporučení NB 30 v 90 % případů. Toto je přibližně platné pro frekvence od 150 kHz do 30 MHz. Vyzářené magnetické pole je na frekvencích do 10 MHz uvnitř budov nezávislé na vzdálenosti od vazebního bodu.

Jednoduché modely nejsou vhodné k odhadu vyzářování na nízkých frekvencích, zvláště pak na frekvencích pod 4 MHz. Je několik příčin, které způsobují vysoké hodnoty pole i když stav systému je stále uspokojivý. Jednou z příčin jsou vysoké hodnoty elektrického pole, v případě existence vodičů ukončených na prázdko.

Výsledek experimentu ukazuje na nutnost regulace symetrického, či nesymetrického napětí během komunikace po silových vodičích z důvodu ochrany radiového vysílání před případným rušením.

Reference

- [1] Mafarlane, I.P., „A Probe for the Measurement of Electrical Unbalance of Networks and Devices”
- [2] R. Vick; „PLC - Studie”, EMV - Beratungs- und Planungsburo Prof. Gonschorek und Dr. Vick, Dresden