

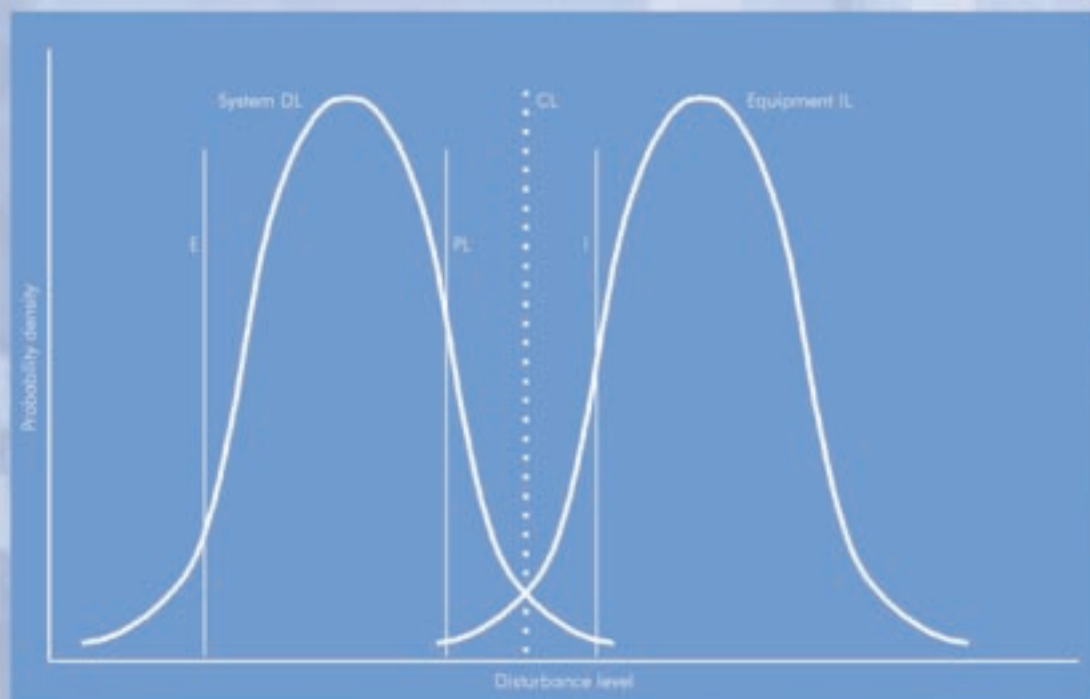
Kvalita elektrické energie - průvodce



Harmonické

3.4.1

pochopení pojmu kompatibilní úroveň



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE



Harmonické

Harmonické

Část 3.4.1. Harmonické - pochopení pojmu kompatibilní úroveň

Autor: Rafael Asepsi, Universidad Politécnica de Madrid, March 2005

Autoři překladu: Josef Gavlas, Pavel Santarius, Petr Krejčí
FEI Technická univerzita Ostrava, Prosinec 2005



Tento Průvodce byl vytvořen v rámci programu Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), což je evropský vzdělávací program podporovaný Evropskou komisí (v rámci programu Leonardo da Vinci) a Mezinárodní asociací mědi (International Copper Association). Více informací naleznete na www.lpqi.org.

Hungarian Copper Promotion Centre (HCPC)

HCPC je nezisková organizace financovaná producenty mědi a výrobci zpracovávajícími měď. Jejím cílem je podporovat používání mědi a měděných slitin a napomáhat jejich správné a účinné aplikaci. Služby HCPC, mezi něž patří i poskytování informací a technického poradenství, jsou dostupné zájemcům o využití mědi ve všech oborech. Sdružení rovněž slouží jako prostředník mezi výzkumnými organizacemi a průmyslovými uživateli a udržuje těsné styky s obdobnými středisky mědi ve světě.

Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB Technická univerzita Ostrava (FEI - TUO)

Fakulta elektrotechniky a informatiky zahájila svou činnost na VŠB Technické univerzitě v Ostravě od 1. ledna 1991. Fakulta zajišťuje všechny formy vysokoškolského studia (tj. bakalářské, magisterské a doktorské) ve studijním programu Elektrotechnika a informatika s ucelenou strukturou elektrotechnických oborů a inženýrské informatiky. Nedílnou součástí činností pedagogů na fakultě je i vědecko-výzkumná činnost, kde jedním z nosných programů je kvalita elektrické energie s hlavním zaměřením na problematiku monitorování parametrů kvality a na problematiku harmonických v elektrických sítích.

European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute je organizací založenou podporujícími členy ICA (International Copper Association) a IWCC (International Wrought Copper Council). ECI zastupuje největší světové producenty mědi a přední evropské výrobce při propagaci mědi v Evropě. ECI, který byl založen v roce 1996, se opírá o síť deseti národních organizací mědi (Copper Development Associations - 'CDAs') v Beneluxu, Francii, Německu, Řecku, Maďarsku, Itálii, Polsku, Skandinávii, Španělsku a Spojeném království. Navazuje na činnost sdružení Copper Products Development Association založeného v roce 1959 a INCRA (International Copper Research Association) založeného v roce 1961.

Upozornění

Obsah tohoto materiálu nemusí nutně vyjadřovat názor Evropského společenství a není pro něj ani závazný. European Copper Institute a Hungarian Copper Promotion Centre odmítají odpovědnost za jakékoliv přímé, nepřímé či vedlejší škody, které mohou být způsobeny nesprávným využitím informací v této publikaci.

Copyright© European Copper Institute a Copper Development Association.

Česká verze byla připravena ve spolupráci HCPC a Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB – Technické Univerzity Ostrava. Reprodukce je možná za předpokladu, že materiál bude otištěn v nezkrácené podobě a s uvedením zdroje.



Hungarian Copper
Promotion Centre
Képiró u. 9
H - 1053 Budapest
Maďarsko
Tel.: 00 361 266 4810
Tel.: 00 361 266 4804
E-mail: hpcp@euroweb.hu
Website: www.hcpcinfo.org



VŠB-TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky
a informatiky
Katedra el. měření
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel.: +420 597324279
Tel.: +420 596919597
E-mail: pavel.santarius@vsb.cz
Website: homen.vsb.cz/san50/



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B - 1150 Brussels
Belgium
Tel.: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Úvod

Teoreticky mají proudy a napětí v elektrickém trojfázovém distribučním systému ideální sinusový průběh, mají účinník roven jedné, jsou symetrické (tj. napětí a proudy mají stejné amplitudy a jejich fáze jsou posunuty o 120°).

V praxi způsobuje charakter zátěže (primárně) zkreslení proudu a napětí a fázovou nesymetrii [1]. V posledních dvou desetiletích se situace zhoršuje a současné sítě mají zkreslené proudy i napětí a dokonce ani v ustáleném stavu nelze uvažovat o „symetrickém, sinusovém režimu“.

Důvody tohoto stavu jsou:

- Harmonické proudy generované nelineární zátěží jako jednofázové a trojfázové usměrňovače, elektrické obloukové pece, statická kompenzace, atp.
- Meziharmonické proudy generované střídavými a stejnosměrnými elektrickými obloukovými pecemi, střídavými pohony, atp.
- Nesymetrie vyvolaná připojenou jednofázovou zátěží k trojfázovému systému
- Flikr způsobený proměnlivou zátěží
- Změny napětí (poklesy, přerušení) při poruchách v síti, bleskem, atp.

V deregulovaném trhu, kde mnohé společnosti soupeří o zákazníky v téže síti, je hlavním zájmem kvalita elektrické energie, protože schopnost dodávat „čistou energii“ tyto společnosti rozděluje. Aby se zajistila dobrá kvalita elektrické energie, je nutno mít řadu norem jasně specifikujících limity, které musí být stanoveny pro zátěže v sítích.

Je nutno zajistit prostředí, ve kterém je dosažena elektromagnetická kompatibilita (EMC), která je definována v normách IEC [2] jako

„Schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení čehokoliv v tomto prostředí“.

Problém elektromagnetické kompatibility

Jsou zde dvě hlediska problému elektromagnetické kompatibility. Zařízení spotřebitele, které je připojeno do sítě, způsobuje rušení v této síti a výsledné rušení v této síti ovlivňuje řádný chod jiných zařízení v této síti. Aby se zajistila kompatibilita, je nutné hlídat maximální úroveň rušení, která může být v libovolném bodě sítě a stanovit úroveň rušení, pro kterou budou všechna zařízení imunní.

Elektrická síť je velice rozsáhlá a nehomogenní, například impedance ve společném napájecím bodě závisí na struktuře sítě a „síle“ lokální sítě, přičemž hustota připojených zařízení se enormně mění. Každé zařízení produkuje nějaké rušení, které se skládá jistým způsobem s rušením od jiných zařízení. Normy pro tato zařízení jsou navrženy tak, aby zajistily, že:

- emisní úroveň pro každou třídu zařízení jsou takové, že připojením tohoto zařízení k síti nedojde k přílišnému nárůstu celkové úrovně rušení
- zařízení nebude citlivé na úroveň rušení, kterou je možno očekávat v síti

Jsou zde různé parametry, které je nutno definovat a regulovat:

- emisní úroveň, úroveň vyzařování (emission level - EL)
- úroveň odolnosti (immunity level - IL)
- kompatibilní úroveň (compatibility level - CL)
- mez vyzařování (emission limit - E)
- mezní odolnost (immunity limit - I)
- plánovací úroveň (planning level - PL)

Tyto meze a úrovně jsou popsány v následujících kapitolách.

Emisní úroveň (emission level)

Emisní roveň je úroveň rušení produkována jednotlivou zátěží v určitém místě. Její hodnota většinou závisí na dvou faktorech:

- charakteristikách zařízení, včetně jejich změn při hromadné výrobě
- charakteristikách napájecí sítě v bodě připojení

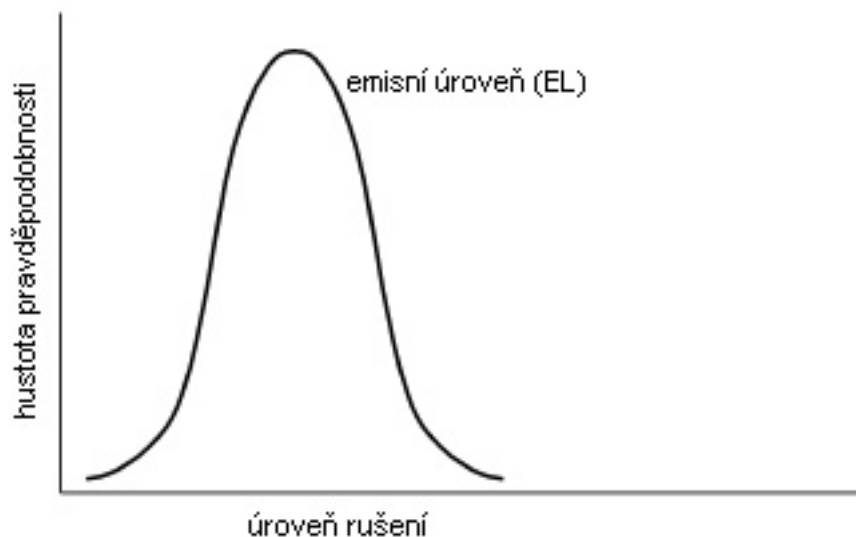
Ačkoliv je zařízení navrhováno a vyráběno tak, aby vyhovělo normám (včetně dovolené emisní úrovně), individuální výrobky v hromadné výrobě budou mít nevyhnutelně malé odchylky v jejich emisích rušení. Zařízení je „typově testováno“, aby se zajistilo dosažení požadavků norem, ale změny prvků a náhodně sestavené součásti povedou k malým změnám v emisních úrovních. To znamená, že úroveň rušení produkována různými vzorky téhož zařízení ve stejné síti bude různá.

Protože mnohá rušení se projevují jako změny nebo zkreslení proudu zařízení, výsledné rušení, měřené jako napěťové rušení, bude záviset na impedanci napájecí sítě, jenž bývá někdy vyjádřena zkratovým výkonem.

Statistický aspekt emisní úrovně

V síti je připojen velký počet zátěží, každá má svou emisní úroveň. Vlivem rozdílné síťové impedance (zkratového výkonu), prostorové hustoty zátěží a jejich provozních podmínek budou emisní úrovně měřené v různých bodech sítě rozdílné. Jinými slovy je měřená hodnota emisní úrovně rozdělena statisticky, jak je ukázáno na obr. 1.

Graf ukazuje pravděpodobnost (p) výskytu jednotlivé hodnoty emisní úrovně při určitém rušení. Jestliže je výskyt hodnot emisní úrovně častější, jejich pravděpodobnost výskytu je větší.



Obr. 1 Distribuční funkce emisní úrovně

Základní úroveň rušení je tvořena příspěvky mnoha jednotlivých zařízení. Některá rušení mají v podstatě náhodný charakter a tedy nemají vztah ani k amplitudě ani k fázi hodnoty rušení, která jsou produkována jinými zařízeními. To má za následek, že pro tato rušení není výsledným rušením pouhý součet s jiným rušením zařízení v systému. Ačkoli jsou některá významná rušení, jako například proudy třetí harmonické a poklesy napětí jimi způsobené, které se lokálně sčítají.

Úroveň odolnosti (immunity level)

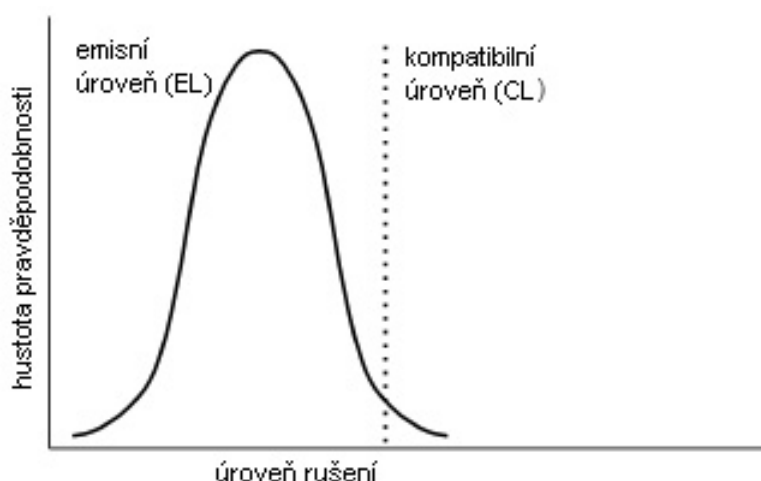
Každé zařízení je navrženo a vyrobeno podle norem, které vyžadují odolnost proti rušení do určité úrovně. Úroveň odolnosti je maximální hodnota rušení, která je přítomná v síti a která nezhorší provoz zařízení při testovacích podmínkách. V praxi je odolnost zařízení proti rušení ovlivněna i jinými faktory. Například tolerance parametrů prvků a precizní montáž součástí bude ovlivňovat úroveň odolnosti ve vztahu k typově testovaným vzorkům. Také montážní podmínky, jako například délky kabelů a podmínky zemnění, způsobují odchylky úrovně odolnosti.

Výsledkem je, že úroveň odolnosti je rozdělena statisticky stejně, jak je ukázáno pro emisní úroveň na obr. 1.

Kompatibilní úroveň (compatibility level)

Rušení produkovaná individuálními zátěžemi vytvářejí svou kombinací úroveň rušení ve všech bodech napájecí sítě. Úroveň rušení bude různá pro různé body napájecí sítě v závislosti na impedanci sítě a zatížení, a bude se měnit během denní, týdenní i roční periody.

Kompatibilní úroveň je definována jako úroveň rušení, která nepřekročí 95% měřených hodnot v celé síti [2]. Všimněte si, že kompatibilní úroveň je statistická hodnota, která charakterizuje stav v celé síti – nemůže být použita pro popis situace v jednotlivých místech sítě. Na obr. 2 je ukázán výsledek postupného měření úrovně rušení ve všech bodech sítě během týdne.



Obr. 2 Kompatibilní úroveň

Kompatibilní úroveň je definována absolutně, například kompatibilní úrovně pro některé harmonické napětí v sítích nízkého napětí jsou uvedeny v Tab. 1 (viz [2]) jsou vyjádřeny v procentech základní harmonické složky napětí. Nicméně úrovně rušení (jako 95% hodnota) jsou statistické hodnoty, které jsou výsledkem vlivu mnoha proměnných.

Harmonická	CL [%]
5	6
7	5
11	3.5
13	3

Tab. 1 - Kompatibilní úrovně pro některé harmonické napětí v sítích nízkého napětí

Zatímco stanovit amplitudu kompatibilní úrovně je jednoduché, definovat normy pro návrh zařízení a pravidla pro plánování sítě, která to umožní, je mnohem komplexnější úloha, při níž se často opíráme o provozní zkušenosti. Meze vyzařování popsané v následující kapitole jsou jednou komponentou pro řešení této úlohy.

Mez vyzařování (emission limit)

Mez vyzařování je maximální dovolená hodnota emisní úrovně generované jednotlivým zařízením. Všimněme si, že mez vyzařování je aplikována na jednotlivá zařízení, zatímco kompatibilní úroveň je aplikována na celou síť. Meze vyzařování mohou být potvrzeny testováním, které vyloučí nevyhovující zařízení. V praxi je řízení tohoto procesu ponecháno trhu, který se spoléhá, že výrobce bude testovat řádně své výrobky a že uživatel bude upozorňovat na vadné výrobky.

Mez vyzařování je úroveň rušení nastavená o něco níže, než kompatibilní úroveň. Důvodem je to, že rušení produkovaná všemi zátěžemi v systému se komplexně sčítají, čímž stanovíme „globální“ úroveň rušení. Některá rušení, jako například proudy třetí harmonické, se jednoduše aritmeticky sčítají, ale mohou se lokálně omezit například průchodem přes delta vinutí transformátorů. Jiné harmonické složky mají sklon se sčítat jako efektivní hodnoty, ale jsou omezovány při směšování s harmonickými z jiných zdrojů, čemuž přispívají změny fáze při průchodu harmonických vinutí transformátorů a také vlivem indukčností a kapacit v síti. Lokálně mohou harmonické neočekávaně vzrůst vlivem rezonančních efektů.

Meze vyzařování jsou definovány v absolutních hodnotách, tj. absolutní limity proudu na jednotlivých harmonických frekvencích na rozdíl od úrovně rušení v síti, která je definována statisticky. Soulad mezi nimi závisí na charakteristikách sítí a je odvozena od dlouholetých provozních zkušeností. Regulační a normalizační úřady musí specifikovat meze vyzařování pro zařízení, které by mohly vést k takovým úrovním rušení, které nepřekročí vyžadované kompatibilní úroveň.

Jako příklad jsou uvedeny v Tab. 2 meze vyzařování některých harmonických proudů v sítích nízkého napětí (EN 61000-3-2 [3]). Proudů jsou uvedeny v Ampérech.

Harmonická	Meze vyzařování [A]	
	Třída A	Třída B
5	1.14	1.710
7	0.77	1.155
11	0.33	0.495
13	0.21	0.315

Tab. 2 – Meze vyzařování harmonických proudů v sítích nn

Kompatibilní úroveň je stanovena jako úroveň rušení, která je větší než 95% naměřených hodnot v celém systému v určitém čase. Výsledkem je, že pouze v 5% případech překročí v systému úroveň rušení kompatibilní úroveň.

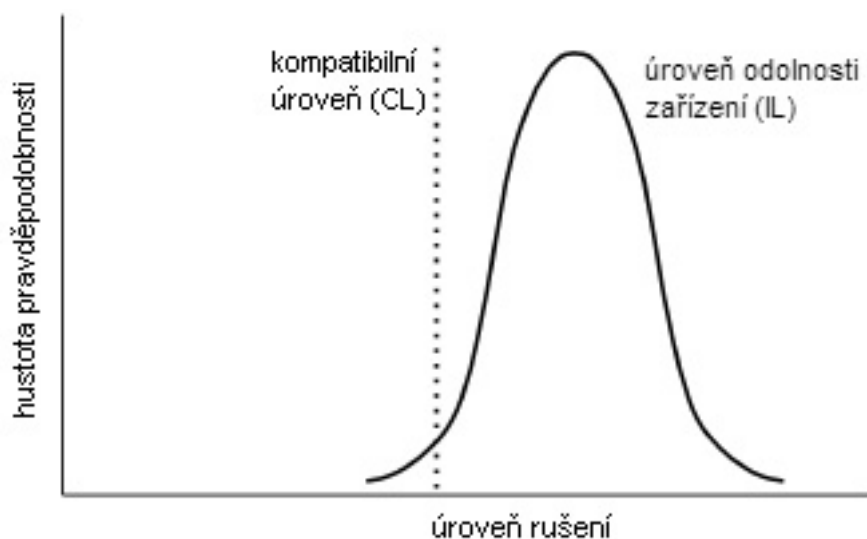
Distribuční funkce úrovně odolnosti je rozložena tak, že pouze 5% hodnot je pod kompatibilní úrovní. Kompatibilní úrovní můžeme definovat hodnotu, kterou překročí pouze 5% naměřených hodnot úrovně rušení v systému a na kterou pouze 5% zařízení bude citlivých. Pouze v případě, kdy problémem u zařízení je spojen s jeho umístěním v systému, může pravděpodobně nastat problém. Jinými slovy s požadavky na EMC se setkáme u velké většiny případů.

Ve skutečnosti situace je taková, že kompatibilní úroveň byla stanovena při návrhu norem používaných distribučními společnostmi a při faktu, že vyráběné zařízení bude akceptováno na trhu, pokud bude dostatečně imunní, a je schopno spoluxistence s jinými zařízeními. Tyto problémy jsou řešeny, jak je uvedeno výše.

Protože různé typy zařízení působí na systém různě, jsou v normě EN 61000-3-2 definovány různé třídy zařízení. Pro ilustraci jsou uvedeny dva příklady. Třída A zahrnuje zařízení jako trojfázové symetrické systémy nebo domácí spotřebiče. Zařízení třídy B jsou přenosná zařízení (zařízení s nízkým činitelem využití).

Mezní odolnost (immunity limit)

Mezní odolnost je úroveň rušení, kterému musí zařízení odolat bez omezení činnosti. Mezní odolnost je určena konstrukcí zařízení a je zajištěna typovým testem, ale mohou zde být malé rozdíly mezi jednotlivými produkty téže konstrukce. Jelikož se mění podmínky instalace, bude zde větší rozptyl charakteristik mezi podobnými zařízeními v různých instalacích. Proto zde bude statistické rozdělení mezní odolnosti pro zařízení v napájecí síti. Má-li být dosaženo správné EMC, pak 95% distribuční funkce pro mezní odolnost instalovaného zařízení musí ležet nad kompatibilní úrovní, jak je ukázáno na obr. 3.



Obr. 3 Distribuční funkce mezní odolnosti

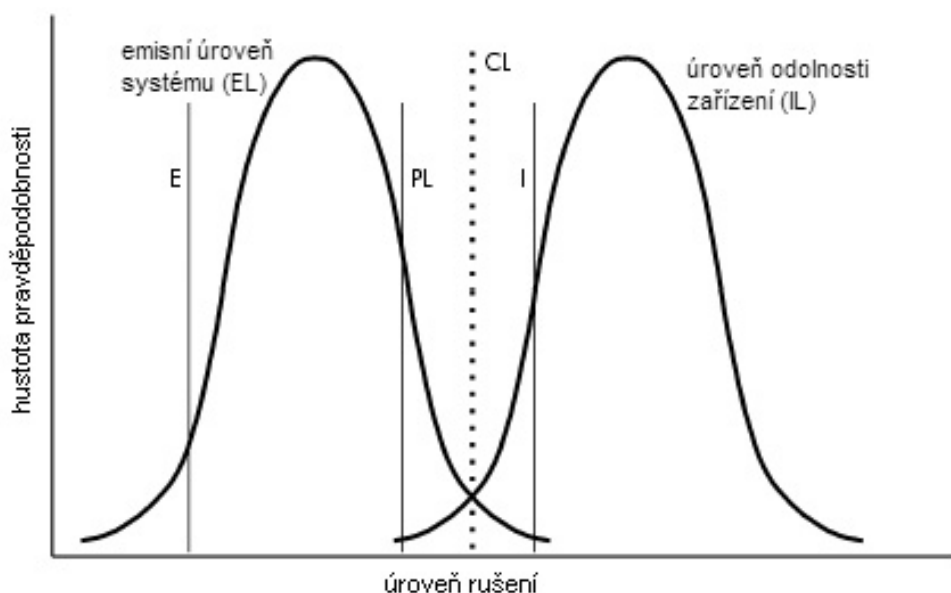
Této ideální situace může být dosaženo při rozumné volbě kompatibilní úrovně a při zavedení vhodných norem pro odolnosti zařízení a při využití dobrých instalačních postupů.

Plánovací úroveň (planning level)

Plánovací úrovně se používají v sítích vysokého a velmi vysokého napětí a reprezentují interní cíle energetických společností. Jsou užívány při návrhu sítí, například při rozhodování jak připojit novou zátěž. V mnoha regulačních režimech jsou plánovací úrovně využity pro průmyslové a obchodní odběratele, aby se omezily harmonické proudy, které mohou být přidány do sítě od těchto odběratelů. Plánovací úrovně jsou nižší než kompatibilní úrovně částečně proto, že je neznáma zátěž v síti (např. domácí spotřebiče), která může být pouze odhadnuta a částečně proto, že problém je statistický, který vyžaduje jistou opatrnost.

Vztah mezi těmito parametry

Na obr. 4 je ukázán vztah mezi těmito limity.



Obr. 4 – Vztah mezi mezí vyzařování (E), mezní odolností (I), kompatibilní úrovní (CL) a plánovací úrovní (PL)

Závěry

V normách jsou popsány hlavní limity, které regulují vyzařování rušení a odolnost zařízení připojených do sítě a je vysvětlen vztah mezi nimi.

Zavedení těchto limitů je kompromis. Velmi nízká mez vyzařování vede k velmi nízké úrovni rušení, což dovoluje zavedení velmi nízké kompatibilní úrovně. Nižší úroveň odolnosti bude přijatelná, ale zvýší se výrobní náklady zařízení s nízkou emisí rušení. Naopak dovolíme-li vyšší úroveň vyzařování, bude nutno zvýšit kompatibilní úroveň a rovněž zvýšit úroveň odolnosti zařízení, což opět zvýší výrobní náklady.

Odkazy a literatura

- [1] Bollen, Math H J, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Marketing, 2000.
- [2] IEC 61000-2-12. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public medium voltage power supply systems.
- [3] IEC 61000-3-2. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤16A per phase).

Reference & Founding* Partners

European Copper Institute* (ECI) www.eurocopper.org	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid www.etsii.upm.es	LEM Instruments www.lem.com
Akademia Gornicza-Hutnicza (AGH) www.agh.edu.pl	Fluke Europe www.fluke.com	MGE UPS Systems www.mgeups.com
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC) www.citcea.upc.edu	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) www.htw-saarland.de	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg www.uni-magdeburg.de
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) www.ceiuni.it	Hogeschool West-Vlaanderen Departement Pih www.pih.be	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) www.miedz.org.pl
Copper Benelux* www.copperbenelux.org	International Union for Electricity Applications (UIE) www.iue.org	Università di Bergamo* www.unibg.it
Copper Development Association* (CDA UK) www.cda.org.uk	ISR - Universidade de Coimbra www.isr.uc.pt	University of Bath www.bath.ac.uk
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) www.kupferinstitut.de	Istituto Italiano del Rame* (IIR) www.iir.it	The University of Manchester www.manchester.ac.uk
Engineering Consulting & Design* (ECD) www.ecd.it	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) www.kuleuven.ac.be	Wrocław University of Technology* www.pwr.wroc.pl
EPRI Solutions Inc www.epri.com/eprisolutions	Laborelec www.laborelec.com	

Editorial Board

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Azaceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	ad Almeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@hvwest.be
Dr Ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gornicza-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	LEM Instruments	sho@lem.com
Dr Antoni Klajn	Wrocław University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Kees Kokke	Fluke Europe BV	kees.kokke@fluke.nl
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wrocław University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI Solutions	mmcgranaghan@eprisolutions.com
Dr Jovica Milanovic	The University of Manchester	jovica.milanovic@manchester.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr Ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA-UPC	sumper@citcea.upc.edu
Roman Targosz	PCPC	rom@miedz.org.pl

Dr Rafael Asensi



Universidad Politécnica de Madrid
c/ José Gutiérrez Abascal 2
28006 Madrid
Spain

Tel: 00 34 913 363025
Fax: 00 34 913 363008
Email: rasensi@ineletsil.upm.es
Web: www.etsil.upm.es



HUNGARIAN COPPER
PROMOTION CENTRE

Hungarian Copper
Promotion Centre
Képiró u. 9
H - 1053 Budapest
Magarsko
Tel.: 00 361 266 4810
Tel.: 00 361 266 4804
E-mail: hcpc@euroweb.hu
Website: www.hcpcinfo.org



VŠB-TU Ostrava
Fakulta elektrotechniky
a informatiky
Katedra el. měření
17. listopadu 15
CZ 708 33 Ostrava-Poruba
Tel.: +420 597324279
Tel.: +420 596919597
E-mail: pavel.santarius@vsb.cz
Website: homen.vsb.cz/san50/



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B - 1150 Brussels
Belgium

Tel.: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org