

František Rajský¹

Porovnání výsledků simulace a experimentálního měření harmonických frekvencí

Klíčová slova: AC a DC trakční proudová soustava, modelování a simulování, kvalita elektrické energie, PSpice, elektromagnetická kompatibilita, harmonické frekvence

1. Normalizace sledované oblasti

Základní směrnici kvality elektrické energie je norma ČSN EN 50 160 ed.2 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“ [07], která definuje sledované parametry, tolerance a statistické vyhodnocení. Dále pak se touto problematikou zabývají jednotlivé části normy ČSN EN 60 555 „Rušení v distribučních sítích způsobená domácími spotřebiči a podobnými elektrickými zařízeními“ [08], a to hlavně v částech: 2 – harmonické a 3 – kolísání napětí, kterou v současné době nahradila norma ČSN EN 61 000-3 „Elektromagnetická kompatibilita (EMC)“ [02]. Podrobněji problematiku kvality elektrické energie též norma PNE 33 3430 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“ [09].

Základním předpisem jsou Technicko kvalitativní podmínky staveb státních drah (TKP) [10]. Kapitola 33 obsahuje podmínky pro elektromagnetickou kompatibilitu. Platí pro jednotlivé části:

- silnoproudých technologických zařízení
- trakčních napájecích a spínacích stanic AC a DC trakce
- trakční vedení a zařízení, která jsou z něho napájena
- napájecí transformovny 6 kV, 50 Hz, nebo 75 Hz napájené z TNS DC, z distribučních transformoven i z trakčního vedení (TV)
- rozvody vn pro napájení zabezpečovacího zařízení i rozvody vn v železničních uzlech.

¹ Ing. František RAJSKÝ, 1982, doktorand Západočeské univerzity v Plzni, Fakulty elektrotechnické, Katedry elektroenergetiky a ekologie – specializace: distribuční soustava

V současné době: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace; Technická ústředna dopravní cesty; Úsek elektrotechniky a energetiky; Oddělení elektromagnetické kompatibility; Malletova 10, 190 00 Praha 9-Libeň; e-mail: frantisek.rajsky@tudc.cz.

Dalo by se tedy říci, že všechny předpisy a normy o kvalitě elektrické energie u drážních zařízení obsahují zkratku EMC. Pro ukázkou zde vypíši další normy, které budou při měření a následném vyhodnocování respektovat a dodržovat:

- ČSN EN 50 121 ed.2 – Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita [03]
- ČSN EN 50 123 ed.2 – Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení [04]
- ČSN EN 50 163 ed.2 – Drážní zařízení–Napájecí napětí trakčních soustav
- ČSN EN 50 388 – Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability

2. Zpětný vliv trakční proudové soustavy na distribuční síť

První část příspěvku je věnovaná problematice stejnosměrné trakce 3 kV DC, kde za zdroj harmonických frekvencí lze považovat diodový měnič umístěný v trakční měničárně. Takto vzniklé harmonické frekvence ovlivňují přívodní vedení 22 kV nebo vedení 110 kV. Praktické měření bylo provedeno na úseku SDC SEE Ústí nad Labem- Střekov, mezi měničárnami TM Hoštka a TM Mělník.

Druhá část příspěvku se zabývá nesymetrií a harmonickými frekvencemi distribuční sítě 110 kV (neboli elektromagnetickou kompatibilitou AC trakce) způsobenou elektrickým hnacím vozidlem (EHV) s tyristorovým trakčním usměrňovačem, který vykazuje ve svém proudu odebíraném sběračem z trakčního vedení 25 kV 50 Hz všechny liché násobky harmonických frekvencí. Toto EHV lze tedy prezentovat jako generátor proudových harmonických frekvencí. Měření a modelování normálního provozu proběhlo v úseku napájecí stanice TT Bohatice, která se nachází v obvodu SDC SEE Plzeň (SDC Karlovy Vary).

Tyto dvě části jsou řešeny z hlediska ovlivnění distribuční sítě čtyřmi způsoby:

- pomocí takzvaného „Amplitudového zákona“
- dle norem PNE 33 3430-0, ČSN EN 50 160 ed.2
- simulace pomocí PSpice verze 9.1 (DEMO) reálného schématu
- porovnání s výsledky praktických měření

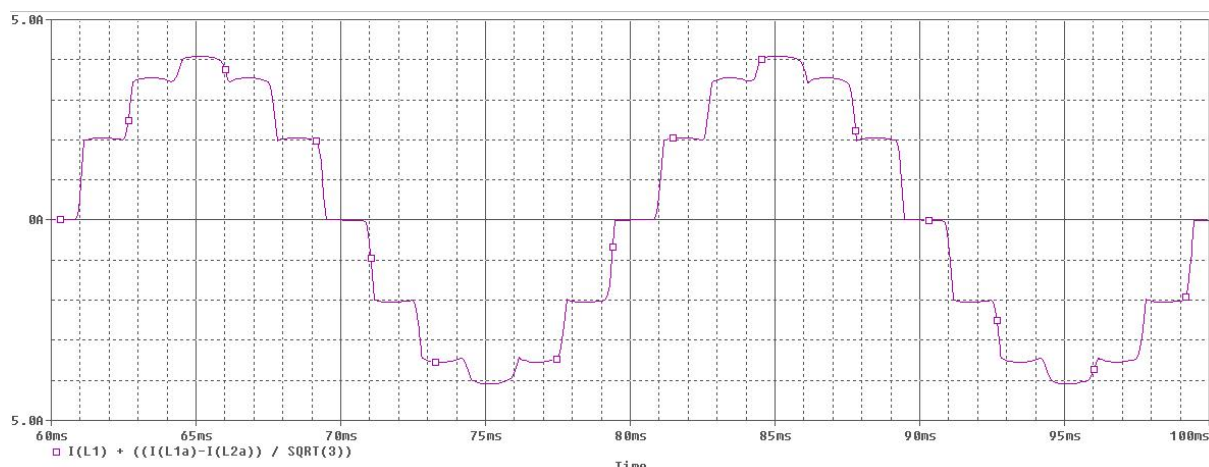
2.1 Hodnoty proudových harmonických podle „Amplitudového zákona“

„Amplitudový zákon“ definuje poměrné hodnoty jednotlivých proudových harmonických I_h vůči základní složce výrazem I_1 , kde h je řád harmonické složky proudu [05].

$$I_h = \frac{I_1}{h} \text{ [A, A,-]} \quad (01)$$

Tento výraz (01) udává největší možné hodnoty jednotlivých spektrálních složek v ustáleném stavu, které může nelineární spotřebič s neřízenými (diodovými) prvky generovat do napájecí sítě. Hodnoty z tohoto vztahu však nemohou vznikat v podmínkách reálného spotřebiče. Tento zákon je založen na pravoúhlém časovém průběhu proudu. V praktických podmínkách však tyto strmé nárůsty nejsou

realizovatelné především vlivem rozptylové reaktance napájecího transformátoru a reaktance napájecí sítě. Na následujícím obrázku č.01 je ukázán teoretický průběh proudu modelovaný Amplitudovým zákonem.



Obr.01: Průběh proudu při amplitudovém zákonu

Metoda Amplitudového zákona je vhodná pro rychlé získání přibližných maximálních hodnot. Porovnání této metody s ostatními metodami i se samotným měřením bude ukázáno v tabulkách č.04, č.05 a č.06 uvedené v kapitole „5 Porovnání výsledků“.

2.2 Hodnoty proudových harmonických podle PNE 33 3430-0

Podniková norma PNE 33 3430-0 [09] „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě, část 0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav“ 4.vydání (s účinností od 01.01.2009), v kapitole „4 Harmonické“ udává mezní emisní hodnoty popsané v tabulce č.6 (její opis je uveden následně v tabulce č.01), vzorce pro výpočet „celkového harmonického zkreslení proudu“ (THD_i) zařízení uživatele elektrické sítě, ale především také udává postup posouzení vlivu na síť.

Mezní emisní hodnoty pro jednotlivé harmonické jsou udány jen pro nejdůležitější řády h , typické pro usměrňovače. Pro harmonické proudy I_h , vztahované k proudu zákazníka I_A , platí podmínka:

$$\frac{I_h}{I_A} \leq \frac{p_h}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \quad [A, A, -, VA, VA] \quad (02)$$

- I_h proud harmonické řádu h emitovaného do sítě
- I_A proud zařízení zákazníka (v tomto případě SŽDC s.o.)
- p_h poměrný koeficient
- h řád harmonické
- S_{kV} zkratový výkon sítě ve společném napájecím bodu
- S_A přípojný výkon zařízení uživatele sítě

Tabulka 01 : Hodnoty p_h

h	3	5	7	11	13	17	19	>19
p_h	6	15	10	5	4	2	1,5	1

Kromě omezení proudů jednotlivých harmonických musí být rovněž omezena i hodnota pro celkový činitel harmonického zkreslení THD_{iA} proudu zařízení uživatele sítě. Ta musí vyhovět podmínce:

$$THD_{iA} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_A} \leq \frac{20}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot 100 \quad [\%, A, A, VA, VA] \quad (03)$$

THD_{iA} celkové harmonické zkreslení proudu zařízení uživatele sítě.

3 Metodika modelování

Základní principy, jak modelovat jednotlivé prvky soustavy, co se musí respektovat či za určitých okolností zanedbat, jsou popsány v mnoha literaturách. Zároveň jsou tam i postupy pro simulování potřebných dějů. Nebývá v nich však rozebrána problematika trakčního vedení, proto bude ve zkratce vysvětlena v následujících podkapitolách. Nejprve se bude jednat o technologické celky, které jsou potřeba jak pro stejnosměrnou, tak i pro střídavou trakci. Poté jednotlivé celky jednotlivých trakčních proudových soustav.

3.1 Model přívodního vedení

Přívodní vedení distribuční soustavy se obvykle modeluje jako Π článek s rozprostřenými parametry, přesně tak jak bylo popsáno v rigorózní práci. Rozdíl modelu mezi linkou 22 kV a linkou 110 kV bude v jiných pasivních parametrech. Ty jsou uvedeny v tabulce č. 02.

Pro výpočet parametrů Π článku je zapotřebí znát následující vzorce:

$$Y = G \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot l \quad [S] \quad (04)$$

$$Z = R \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot l \quad [\Omega] \quad (05)$$

Tabulka 02 : Pasivní parametry vedení

	Linka 22 kV	Linka 110 kV	Trakční vedení
Indukčnost L [mH/km]	0,94	1,24	1,00
Odpor R [Ω /km]	0,30	0,39	0,4
Kapacita C [nF/km]	12	9,44	15
Svod G [mS/km]	3,76	2,96	100

V počítačovém programu PSpice je však výhodnější využívat možnost modelování ztrátového homogenního vedení na místo Π článku. Podrobnější vysvětlení v následující kapitole. Pro jednoduchost budou modelována přírodní vedení také jako ztrátové vedení namísto Π článku.

3.2 Model trakčního vedení

Trakční vedení se skládá z trolejového drátu a nosného lana, která jsou do maximální vzdálenosti 2 m spojeny laníčky. V měřených lokalitách bylo použito trolejové vedení v sestavě trolejový drát 100 mm² Cu (měď) + nosné lano 50 mm² Bz (bronz). Toto vedení lze simulovat náhradním schématem ztrátového homogenního vedení. Parametry jsou zaneseny v předchozí tabulce č.02.

Z teorie vedení vyplývá, že reálné vedení pouze pro jednu frekvenci lze nahradit jedním Π -článkem nebo jedním T-článkem se soustředěnými parametry. Tedy „Elektricky krátké“ vedení s délkou l , pro které platí, že [06]:

$$|\gamma| \cdot l \ll 1 \quad (06)$$

lze jedním dvojbranem nahradit dobře. Konstanta šíření γ je obecně dána výrazem :

$$\gamma = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)} = \alpha + j \cdot \beta \quad (07)$$

Uvedené elektrické parametry jsou vesměs parametry měrnými, vztaženými na 1 km délky vedení.

Zde je nutno definovat meze přesnosti této náhrady, za podmínky:

$$l_{\max} \leq 0,03 \cdot \lambda = \frac{0,03 \cdot v}{f_{\max}} \quad (08)$$

Kde λ značí vlnovou délku pro sledovanou frekvenci f_{\max}

v značí rychlost šíření

Což po úpravách dává :

$$l_{\max} \leq \frac{0,03}{f_{\max} \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (09)$$

Výraz (09) definuje největší délku úseku homogenního dlouhého vedení l_{\max} , kterou lze nahradit pro frekvenci f_{\max} jedním Π -článkem nebo jedním T-článkem.

Většinou je délka vedení dána, pak je tedy nutno vypočítat, kolika články se má takto dlouhé vedení nahradit.

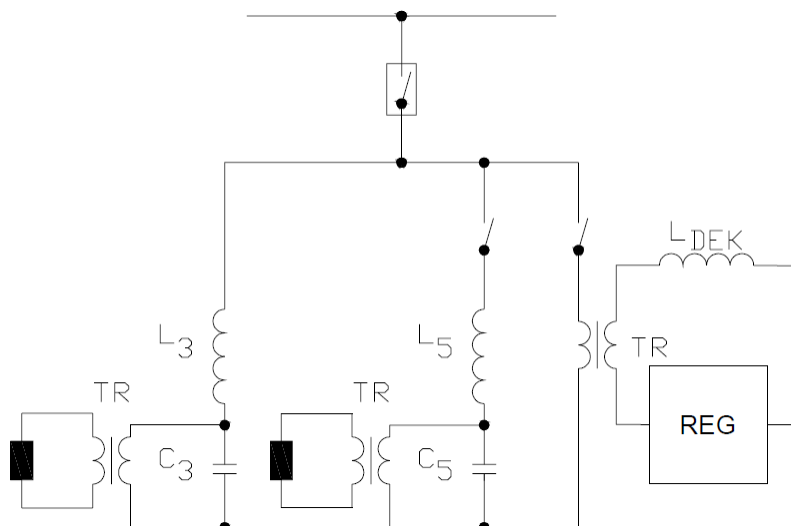
$$pocet_clanku = \frac{potrebna_frekvence}{f_{\max}} \quad (10)$$

3.3 Model FKZ

Požadavky na filtračně kompenzační zařízení (FKZ):

- upravit indukční účinník základní harmonické trakčního odběru hnacích vozidel jednofázové trakce v připojovacím bodě TNS na hodnotu požadovanou dodavatelem elektrické energie ($\cos \varphi = 0,95$ až $1,00$) při dostatečném kompenzačním výkonu,
- podstatně omezit přestup složek 3. a 5., příp. 7. proudových harmonických tak, aby odpovídající složky v napětí a proudu připojovacího bodu TNS ležely pod mezními hodnotami předepsanými dodavatelem elektrické energie,
- zajistit, aby vstupní impedance TNS jako celku (tj. včetně kapacity trakčního vedení a trakčního odběru hnacích vozidel) pro pracovní kmitočet soustavy „hromadného dálkového ovládání“ dodavatele elektrické energie byla větší než jím požadovaná hodnota.

Principiální schéma FKZ je ukázáno na následujícím obrázku č.02. V dekompenzační větvi je pod zkratkou REG naznačen Compact.



Obr.02: Schématický model FKZ

TNS, kde bylo prováděno měření, byla osazena zařízením s hodnotami: $L_3 = 0,137mH$, $C_3 = 8,5\mu F$, větev 3. harmonické má výkon 2,3 MVAR pro frekvenci 50Hz, $L_5 = 0,169mH$, $C_5 = 2,4\mu F$, větev 5. harmonické má výkon 0,6 MVAR pro 50 Hz, nezapojená připravená kompenzace 7. harmonické by měla výkon 0,2 MVAR, $L_{DEK} = 0,596H$ a TR dekompenzační větve má výkon 4 MVAR. TR kompenzačních větví jsou pouze měřicí, které mají ale i úkol vybijet kondenzátor.

3.4 Simulace v programu PSpice

Nejprve se modelovala a simulovala problematika harmonických frekvencí v programu Matlab. Ačkoliv program Matlab nemá přednastavené homogenní vedení, nebylo těžké ho namodelovat, ale problém nastal při pokusu simulace ztrátové homogenní vedení. Další problém nastal při simulaci 30° napětového posunu mezi sekundárními vinutími transformátoru.

Oproti tomu program PSpice má v základu ztrátové homogenní vedení a proto nebylo nutné jej vymýšlet a zároveň je schopen pracovat i s rozprostřenými parametry stejně jako Matlab.

Pomocí neoficiálního manuálu k programu PSpice [02] bylo možné naprogramovat moduly, které nejsou v programu PSpice implementovány, jako jsou dvanácti-pulzní měnič a zátěžové charakteristiky EHV střídavé i stejnosměrné trakce. Pro zjednodušení se uvažuje trakční vedení v železničních stanicích také za homogenní, jelikož jeho rozvinutá délka je v těchto případech mnohonásobně menší než rozvinutá délka vedení na širé trati.

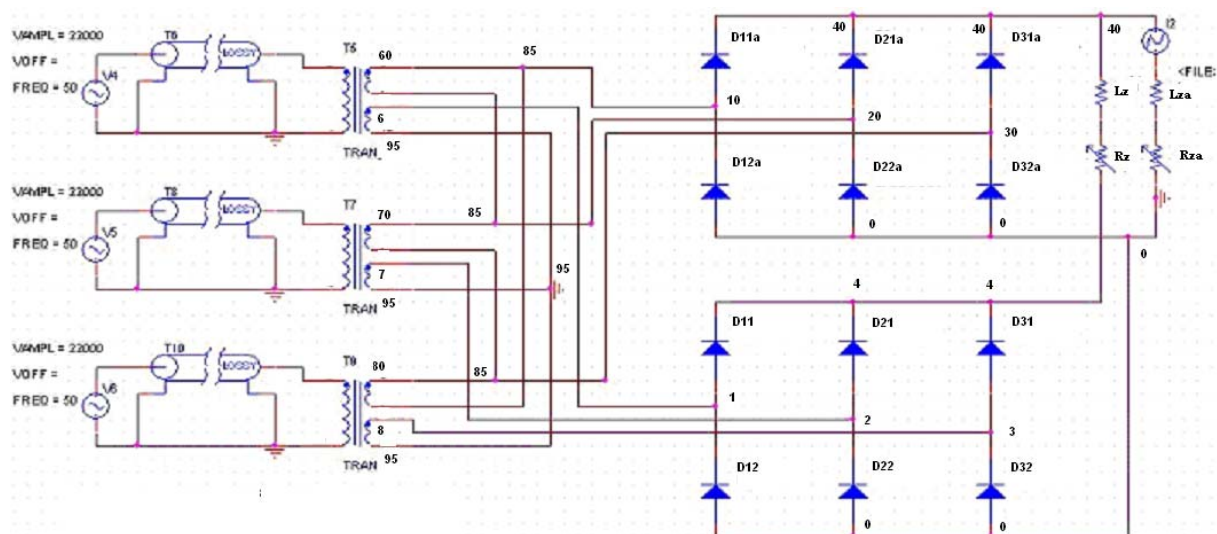
3.4.1 Model DC trakce v programu PSpice

Modelování traťového úseku, to je trakčního vedení, napájecí stanice, dvanácti-pulzního měniče a přívodního vedení bylo vysvětleno v předchozích kapitolách.

Modelování zátěže neboli průjezdu elektrického hnacího vozidla je komplikované. Jako první úkol bylo stanoveno najít čas, kde se pokud možno nepotkávají dvě a více elektrických vozových souprav, neboť simulace jedné vlakové soupravy je sama o sobě velmi složitá. Stanovení modelovaného úseku bylo dáno místem s možností měření.

Na následujícím obrázku č. 03 je znázorněna část simulace v programu PSpice. V jeho levé části je znázorněna napájecí soustava 22 kV a její ztrátové vedení. Tuto část simulace je možno ještě rozšířit o náhradní indukčnost transformátoru 110 kV / 22 kV a sledovat vliv harmonických frekvencí napětí a proudu na vyšší distribuční síť, jako je tomu u nemnoha TNS DC trakce.

Střední část obrázku je věnována trakčnímu transformátoru a dvanácti-pulznímu usměrňovači. Pravou část obrázku tvoří zátěž elektrického hnacího vozidla. Hodnoty výkonu spotřebované elektrickým hnacím jsou zpracovány do tabulky a jako takové jsou použity pro simulaci. Soubor je nahrán do proudového generátoru se zápornou hodnotou.

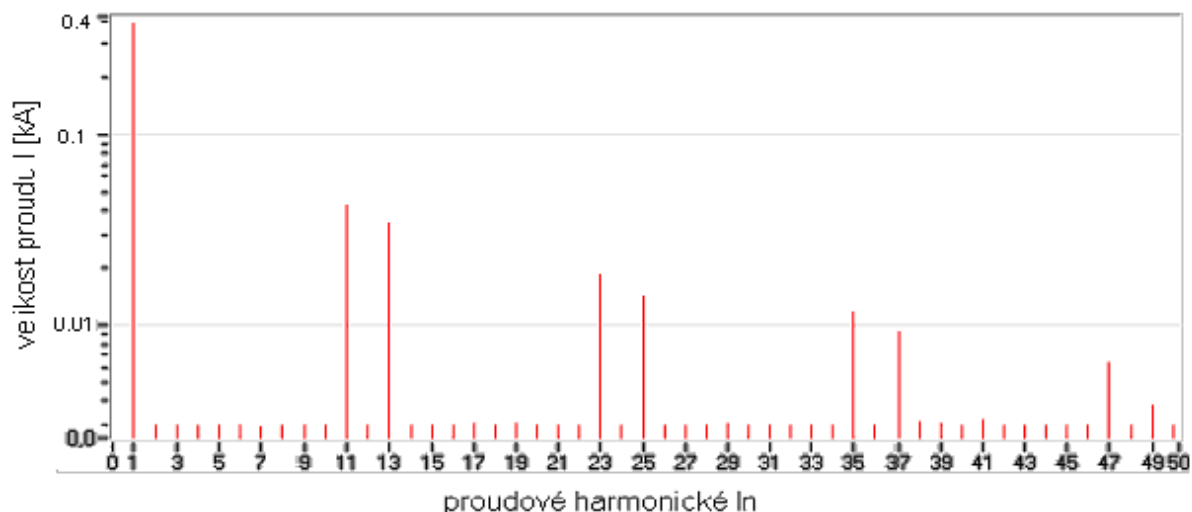


Obr.03: Simulace DC odběru v programu PSpice

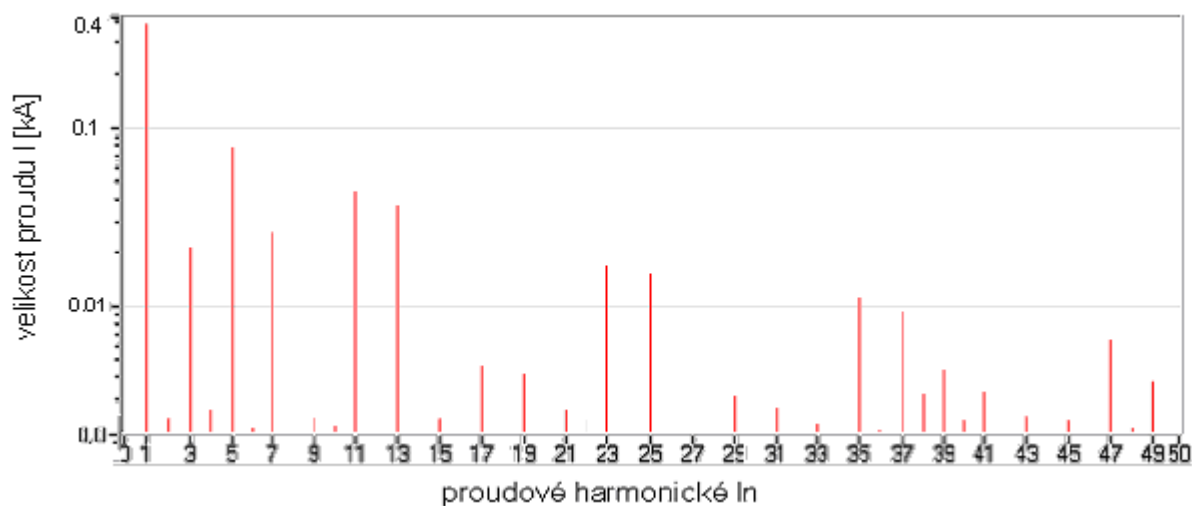
Na následujících obrázcích č.04 a č.05 jsou vyobrazeny grafy jednotlivých proudových harmonických složek. První z obrázků zobrazuje simulované harmonické proudy a druhý naměřené hodnoty.

Porovnáním obou grafů zjistíme, že graf reálného měření obsahuje i harmonické frekvence, které nebyly modelovány. Jedná se o harmonické frekvence 3., 5. a 7. řádu.

Měření bylo provedeno na TNS TM Hoštka i při vypnutém stavu. Z kterého lze usuzovat, že nenasimulované harmonické frekvence proudu pocházejí z distribuční sítě. Tento graf zde nebude uveden.



Obr.04: Simulace proudových harmonických složek



Obr.05: Reálné měření dvanácti-pulzního usměrňovače

Z obr. č. 04 a č. 05 vyplývá, že hodnoty nepřesáhly přípustné limity norem:

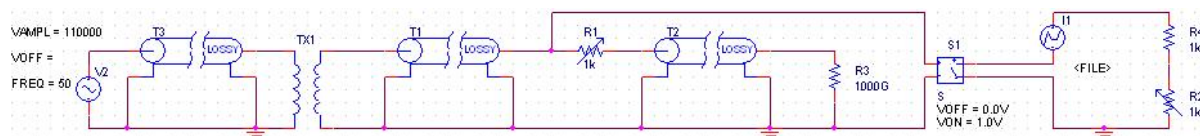
- ČSN EN 50 160 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“
- ČSN EN 60 555 „Rušení v distribučních sítích způsobená domácími spotřebiči a podobnými elektrickými zařízeními“, nyní ČSN EN 61 000-3-3 ed.2 „EMC“.

3.4.2 Model AC trakce v programu PSpice

Modelování traťového úseku jakožto trakčního vedení, trakční napájecí stanice, filtračně kompenzačního zařízení a přívodního vedení bylo vysvětleno v předchozích kapitolách.

Další informace pro správnou simulaci je znalost traťového úseku, tedy rozmístění návěstidel, převýšení a poloměrů oblouků, strmost stoupání a klesání. Tyto informace byly konzultovány s předním odborníkem Ing. Jiřím Krupicou, který poskytl potřebné informace a sestavil vzorový plán spotřeby výkonu.

Na následujícím obrázku č. 06 je ukázán matematický model propojení distribuční soustavy 110 kV s AC trakční proudovou soustavou. Model a simulace byla provedena v programu PSpice.



Obr.06: Simulace AC odběru v programu PSpice

Vlevo je distribuční soustava 110 kV, střed obrázku zobrazuje trakční vedení a vlevo je simulována lokomotiva proudovým zdrojem. Do něhož jsou nahrány hodnoty z experimentálního měření se zápornou hodnotou. Potenciometr uprostřed obrázku a potenciometr vpravo mění polohu lokomotivy v traťovém úseku.

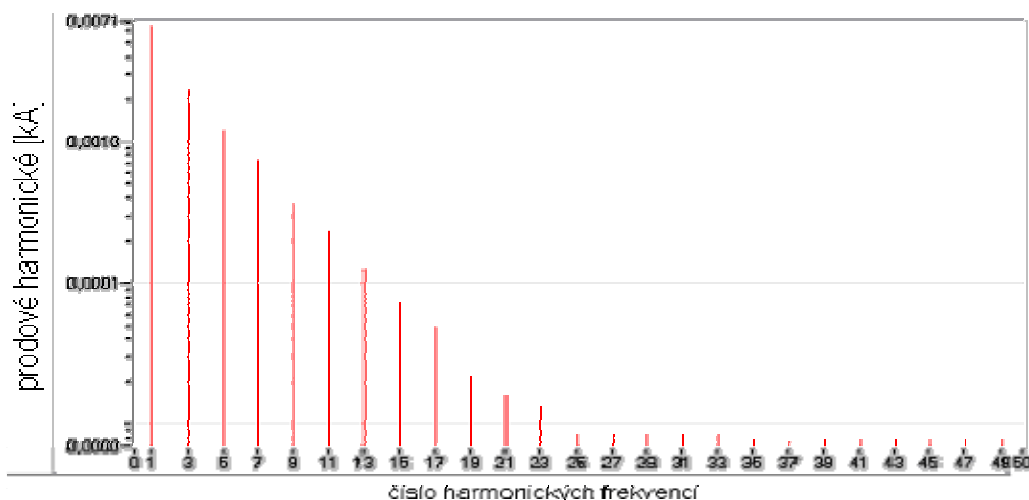
Z dlouhodobého sledování procentního obsahu pro 3. harmonickou v jedné z trakčních napájecích stanic SŽDC, s.o. při normálním provozu hnacími vozidly s diodovými trakčními měniči vznikla tabulka hodnot provozu a hodnot pro dimenzování (tabulka č.03). Pro následné analýzy se používají střední nejpravděpodobnější procentní hodnoty jednotlivých proudových harmonických pod názvy obvyklé či pesimistické hodnoty, uvedené v tabulce č.03:

Tabulka 03 : Proudové spektrum EHV

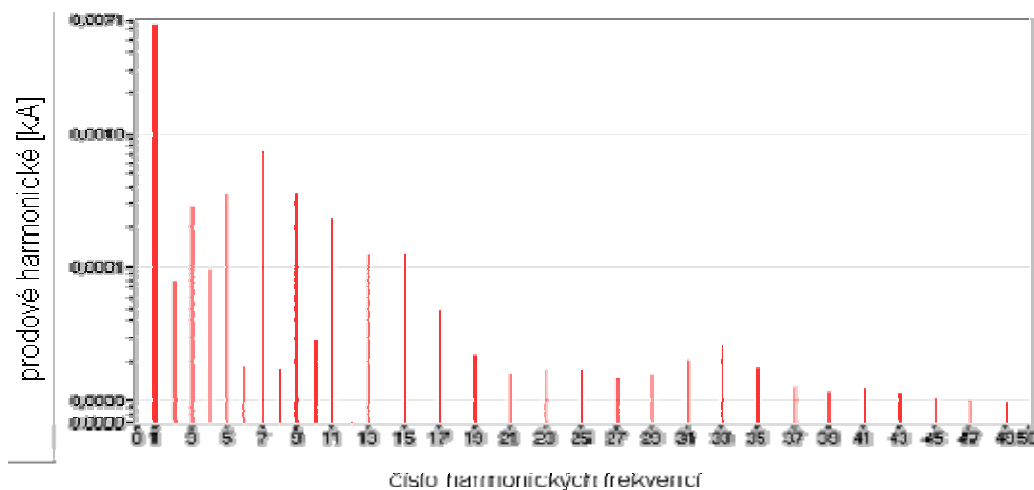
	Obvyklé hodnoty	Pesimistické hodnoty
Harmonické frekvence	Vliv FKZ	Dimenzování
3.	25 %	35 %
5.	10 %	25 %
7.	5 %	15 %
9.	3 %	12 %
11.	2 %	10 %
13.	1 %	9 %

Na následujících obrázcích č. 07 a č. 08 jsou vyobrazeny grafy jednotlivých proudových harmonických složek. První z obrázků zobrazuje simulované harmonické proudy a druhý naměřené hodnoty.

Spektrum obsahu harmonických složek při reálném měření na TNS Bohatice (TT Karlovy Vary) je mírně odlišné od obrázku č.08: 3. a 5. harmonické jsou omezeny funkcí FKZ TT, kterou nebylo možno vypnout. Absolutní chyba mezi simulací a reálným měřením je jinak do 5 %. Bohužel při tomto měření nebylo možno vypnout TNS, a proto nejsou k dispozici měření pozadí distribuční soustavy. Tedy její chování při vypnuté TNS Bohatice. Obrázek č. 08 zobrazuje skutečně naměřené spektrum harmonických složek.



Obr.07: Simulace proudových harmonických složek



Obr.08: Měření na TNS Bohatice

Z grafů č.07 a č.08 vyplývá, že hodnoty nepřesáhly přípustné hodnoty norem:

- ČSN EN 50 160 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“
- ČSN EN 60 555 „Rušení v distribučních sítích způsobená domácími spotřebiči a podobnými elektrickými zařízeními“, nyní ČSN EN 61 000-3-3 ed.2 „EMC“.

4 Experimentální část

Experimentální část řešení úkolu spočívala v měření na konkrétních trakčních napájecích stanicích DC (TM Hoštka) a AC (TT Bohatice) trakčních proudových soustav. Měření na TNS probíhala na základě kontrolních měření SŽDC, s.o. Technické ústředny dopravní cesty, úseku elektrotechniky a energetiky, oddělení elektromagnetické kompatibility.

Měření elektrických veličin DC trakční proudové soustavy je za normálního provozu složité. Trakční vedení stejnosměrné trakce je za standardních podmínek napájeno z obou okrajů trakčními měnírnami. Po dohodě s příslušným elektrodispečinkem bylo možné při respektování určitých provozních podmínek napájet potřebný úsek z jedné TM a tím celou problematiku značně zjednodušit.

Měření činitele THD je jednodušší u AC trakční proudové soustavy, kde je traťový úsek napájen jen jednou TNS. V tomto případě stačí totiž osadit měřícím přístrojem jedno přívodní vedení do TT respektive vstup transformátoru, a rozdělit napájení obvodů tak, aby měřený přívod napájel jen trakční vedení. Ostatní spotřeba elektrické energie (zabezpečovací zařízení, vlastní spotřeba, osvětlení, IT technologie a samotné měření) byla napájena z druhého přívodu.

Pro měření byly použity měřící přístroje ENA 500.11 a BK 550 od firmy Elcom a.s. Praha, jelikož umožňují monitorovat nejen napětí a proud, ale současně též harmonické vlivy a výkonové charakteristiky. Data jsou zaznamenávána:

- vzorkovací frekvencí 9,6 kHz
- výpočet hodnot v základním intervalu 10ti period, tedy 200 ms
- výpočet 200 milisekundových minimálních, středních a maximálních hodnot pro zvolený interval

5 Porovnání výsledků

V této kapitole jsou porovnané výsledky harmonických složek získaných ze simulací, experimentálních měření a příslušných norem ČSN EN a PNE.

V rámci tohoto příspěvku byly vysvětlené následující výpočetní a simulační metody:

- První metodu výpočtu harmonických proudů uvedené v kapitole 2.1 Hodnoty proudových harmonických frekvencí podle „Amplitudového zákona.“
- Druhou metodou výpočtu harmonických frekvencí proudu bylo použití souboru norem PNE 33 3430-0 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“, jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.
- Třetí výpočetní metodou byla simulace. Pro modelování zadaných problematik byl nakonec zvolen program PSpice, ve kterém byly provedeny i matematické simulace výpočtu proudových harmonických frekvencí. Což je uvedeno v kapitole 3 Metodika modelování.

- Čtvrtou metodou, jak získat potřebné hodnoty harmonických frekvencí napětí a proudu, bylo provést experimentální měření. Problematika této metody byla popsána v kapitole 4 Experimentální část práce.
- Další metoda je jen pro porovnání spektra harmonických napětí. Maximální možné hodnoty harmonických udává norma ČSN EN 50 160 ed.2 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“ [07].
- Poslední použitou metodou pro získání teoretických hodnot harmonických frekvencí proudu bylo použití „Reálného, optimistického a pesimistického spektra proudových harmonických frekvencí“. Tato tabulka se používá při dimenzování TNS, jak je popsáno v kapitole 3.6.2.

Všechny tyto metody budou nyní vyhodnoceny a porovnány společně pro jednotlivé naměřené případy :

- DC trakční odběr
- AC trakční odběr

5.1 Provozní stavy DC trakce

Provoz stejnosměrné trakce byl simulován a měřen v TM Hoštka. Tato trakční napájecí stanice se nachází na konci napájecí linky 22 kV, proto bylo napájecí napětí charakteru měkkého zdroje. Měření bylo prováděno na straně 22 kV.

Následující tabulka č. 04 ukazuje porovnání vypočtených, nasimulovaných a změřených hodnot **proudových harmonických složek**.

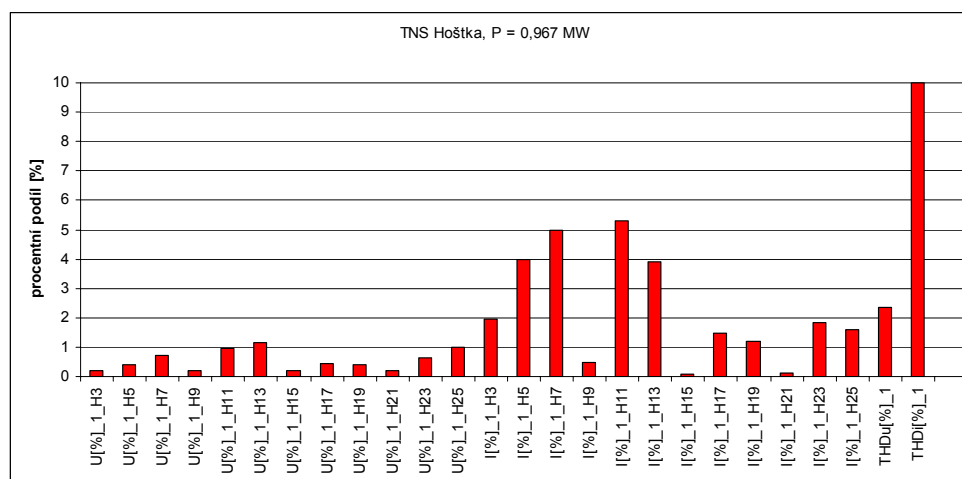
- Výsledky simulace vycházejí vždy nižší než výsledky reálně naměřené. Toto může být způsobeno harmonickým zkreslením z jiného zdroje nebo chybou simulace. Maximální chyba je 7 A, což je méně než 1 %.
- Porovnáním vypočtených hodnot z amplitudového zákona s reálným měřením zjistíme, že hodnoty z amplitudového zákona jsou většinou vyšší. Dají se tedy použít pro dimenzování zařízení či pro rychlý výpočet. Maximální chyba je 10 A, což je méně než 1,3 %.
- Poslední porovnání je s normou PNE 33 3430-0. Tato norma stanoví maximální povolený proud jednotlivých harmonických frekvencí. Podle grafického znázornění průběhu harmonických proudů, zvláště pak závislosti těchto proudů na zátěži, se dá konstatovat porucha větve usměrňovače.

Tabulka 04 : Porovnání výsledků DC trakce

Harmonické proudy	Simulace PSpice	Reálné měření	Amplitudový zákon	norma PNE 33 3430-0
I_1	780 A	780 A	780 A	780 A
I_{11}	77	77	70,91	70,20
I_{13}	55	50	60,00	56,16
I_{23}	30	34	33,91	14,04
I_{25}	21	28	31,20	14,04
I_{35}	12	16	22,29	14,04
I_{37}	8	11	21,08	14,04

Hodnoty **napěťových harmonických složek** byly porovnány s hodnotami udávanými v normě ČSN EN 50 160 ed.2 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“. Žádná z maximálních hodnot nepřekročila maximální možnou hodnotu. Maximální naměřené hodnoty jsou vyobrazeny v první polovině obrázku č. 09 a nepřekračují povolené procentní hodnoty.

Na následujícím obrázku č. 09 je zobrazeno shrnutí naměřených nenulových harmonických složek napětí a proudu. Na konci obrázku jsou uvedeny i hodnoty celkového harmonického zkreslení napětí a proudu.



Obr.09: Shrnutí harmonických složek U a I, DC trakce

Z obrázku č. 09 je patrné, že největšího zkreslení dosahují proudové harmonické frekvence. Celkový činitel harmonického zkreslení proudu dosahuje hodnoty 10 %, zatímco celkový činitel harmonického zkreslení napětí dosahuje 2,2 %.

Z grafu vyplývá:

- $I_h [\%] \gg U_h [\%]$
- $THD_I [\%] \gg THD_U [\%]$
- Hodnoty napěťových harmonických složek jsou většinou dány impedancí přípojného bodu distribuční sítě.
- Hodnoty proudových harmonických složek jsou dány generátory proudových harmonických frekvencí, jako jsou elektrická hnací vozidla na AC TPS a dvanácti-pulzní diodový usměrňovač na DC trakční proudové soustavě.

5.2 Provozní stavy AC trakce

Provoz jednofázové střídavé trakce byl simulován a měřen v TT Bohatice. Tato trakční napájecí stanice se nachází v blízkosti transformace 400 kV / 110 kV, dodávané napětí je tedy velmi stálé, má charakter tvrdého zdroje. Měření se provádělo na straně 110 kV.

Následující tabulka č. 05 ukazuje porovnání vypočtených, nasimulovaných a změřených hodnot **proudových harmonických složek**.

- Výsledky simulace vycházejí vždy vyšší než výsledky reálně naměřené. Toto může být způsobeno chybou měření. Proudový klešťový transformátor měří s minimální odchylkou až od proudu 8,8A. Maximální rozdíl je 0,06 A, což je méně než 0,8 % z první harmonické.
- Porovnáním vypočtených hodnot z amplitudového zákona s reálným měřením zjistíme, že hodnoty z amplitudového zákona jsou vždy vyšší, dají se tedy použít pro dimenzování zařízení či pro rychlý výpočet. Maximální chyba je 0,3 A, to je méně než 4,3 % z první harmonické.
- Předposlední porovnání je s normou PNE 33 3430-0. Tato norma stanoví maximální povolený proud jednotlivých harmonických frekvencí. Z tabulky č. 05 je patrné, že hodnoty měřeného úseku ani jednou nepřekročily hodnoty zadané normou.
- Poslední porovnání můžeme provést se spektry harmonických frekvencí vydávanými elektrickými hnacími vozidly, a to buď optimistickým, nebo pesimistickým spektrem, jak bylo popsáno v tabulce č. 03. Porovnáním zjistíme, že naměřené hodnoty leží mezi těmito spektry.

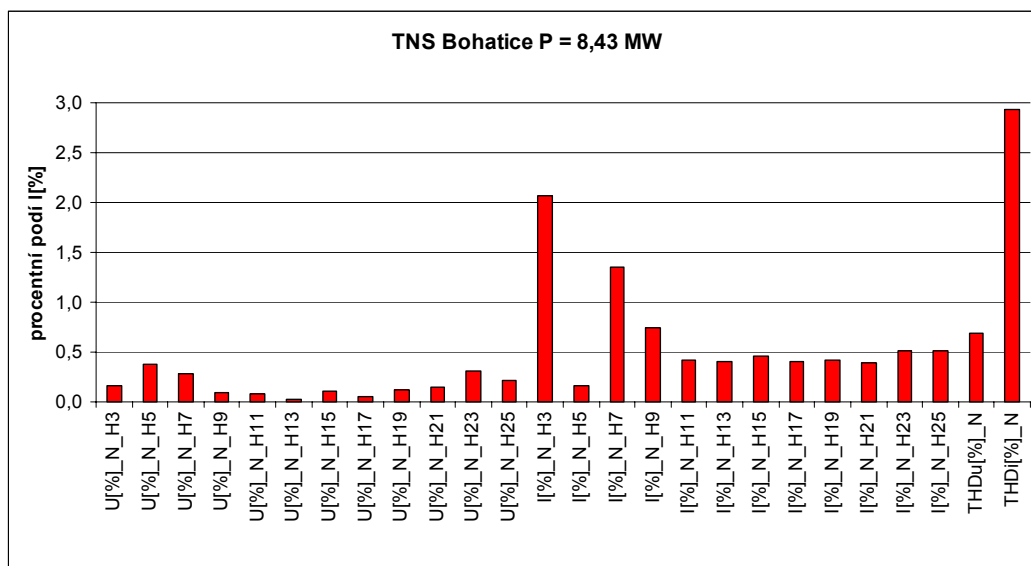
Tabulka 05 : Porovnání výsledků AC trakce

Harmonické proudy	Simulace PSpice	Reálné měření	Amplitudový zákon	norma PNE 33 3430-0	Spektrum EHV optimistické
I_1	7,1 A	7,1 A	7,1 A	7,1 A	7,1 A
I_7	0,81	0,79	1,014	1,278	0,355
I_{11}	0,29	0,22	0,645	0,639	0,142
I_{13}	0,15	0,12	0,546	0,511	0,071
I_{17}	0,05	0,05	0,418	0,256	---
I_{19}	0,02	0,02	0,374	0,192	---
I_{21}	0,01	0,01	0,338	0,128	---

Proudový klešťový transformátor měřícího přístroje se připojuje až na sekundární vinutí měřícího transformátoru proudu (MTP). MTP má v tomto případě převod 600 A / 5 A. Proudové kleště mají nejbližší vyšší rozsah od 10 A. Chyba proudových kleští je 1% z rozsahu, tedy 0,1 A. Proto veškeré naměřené hodnoty proudu pod hodnotu 0,1 A jsou zatíženy chybou měření.

Norma udávající maximální povolenou hodnotu napěťové harmonické je ČSN EN 50 160 ed.2 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“. Hodnoty **napěťových harmonických složek** byly porovnány s touto normou a ani maximální naměřené hodnoty nepřesahují normou povolené procentní hodnoty. Na následujícím obrázku č.10 je v první polovině zobrazeno spektrum napěťových harmonických.

Z naměřených grafů, které jsou shrnuty v obrázku č.10, vyplývá, že největšího zkreslení dosahují proudové harmonické. Celkový činitel harmonického zkreslení proudu dosahuje hodnoty 3 %, zatímco celkový činitel harmonického zkreslení napětí dosahuje 0,65 %. Hodnoty THD proudu i napětí, vykreslené na konci tohoto obrázku, nedosahují ani 33 % hodnot THD stejnosměrné trakce.



Obr.10: Shrnutí harmonických složek U a I, AC trakce

6 Závěr

Výsledky měření byly vyhodnoceny a porovnány s výpočty a maximálními přípustnými hodnotami příslušných norem. Shrnutí je uvedeno v kapitole č. 5 Porovnání výsledků. Případné rozdíly ve výsledcích jsou v jednotlivých kapitolách podrobně popsány a též jsou vysvětleny možné příčiny rozdílů mezi simulací a reálným měřením.

Vytvořené matematické modely v programu PSpice a jejich simulace provozu jsou z praktického hlediska použitelné, protože jejich maximální chyba u hodinových simulací je pod 3 %. Matematický model propojení DC trakční proudové soustavy s distribuční soustavou je v praxi použitelný i pro modelování ostatních používaných zařízení a pro simulaci jejich vlivu na kvalitu elektrické energie. Tento model může být rozšířen o možnost simulace ovlivnění drážního provozu na distribuční síť 110 kV. Matematický model propojení AC trakční proudové soustavy s distribuční soustavou je vhodný i pro simulaci provozu zabezpečovacího zařízení, předtápěcího zařízení a mnohého dalšího zařízení například používaného přímo v trakční transformovně.

Literatura

- [01] Hlava K., Doleček R.: Připnutí LC větví FKZ k přípojnici 27 kV trakční napájecí stanice; Vědeckotechnický sborník ČD č. 22/2006, ISSN 1214-9047
- [02] ČSN EN 61 000 ed.2 - Elektromagnetická kompatibilita část 3 -3 Meze
- [03] ČSN EN 50 121 ed.2 – Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita
- [04] ČSN EN 50 123 ed.2 – Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Spínače DC
- [05] Hlava K.: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení. Pardubice 2004, ISBN 80-7194637-0
- [06] TUDC, výzkumná zpráva. Zpětný vliv trakčních měření Českých drah vůči napájecí síti 22 kV, 50 Hz. Praha 2006
- [07] ČSN EN 50 160 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“

- [08] ČSN EN 60 555 „Rušení v distribučních sítích způsobená domácími spotřebiči a podobnými elektrickými zařízeními“
- [09] Soubor norem PNE 33 3430 „Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě“
- [10] Technicko kvalitativní podmínky staveb státních drah, kapitola 33 Elektromagnetická kompatibilita 2009
- [11] Rajský F.– Vliv trakční soustavy na distribuční síť. In: Elektrotechnika a informatika 2009. Část 3., Elektroenergetika. Plzeň, Západočeská univerzita 2009. s. 59-63. ISBN 978-80-7043-811-4
- [12] Rajský F.– Simulace výskytu harmonických frekvencí v distribuční síti způsobené provozem elektrické trakce. In Elektrotechnická zařízení v dopravě, Pardubice 2010 ISBN: 978-80-7395-237-2
- [13] Rajský F.– Simulation harmonical frequency incurred from Czech railway, 5 th PhD Conference, Department of Electrical Power Engineering and Ekology, UWB 2010, Pernink

Praha, březen 2010

Lektoroval: Ing. Jiří Hajzl

SŽDC, TÚDC