

# Měření dekompenzačních tlumivek při proudech o vyšších harmonických.

**Pracoviště:** Západočeská univerzita v Plzni, Research and Innovation Centre for Electrical Engineering  
**Číslo dokumentu:** 22190-009-2023  
**Typ zprávy:** Výzkumná zpráva  
**Řešitelé:** Bohumil Skala, Martin Zavřel, Miroslav Tyrpekl, Martin Skalický, Lukáš Sobotka  
**Vedoucí projektu:** Bohumil Skala  
**Počet stran:** 17  
**Datum vydání:** 29.5.2023  
**Oborové zařazení:** 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

**Zadavatel / zákazník:**  
Elzat, spol. s r.o.  
Bezděkovska 760  
262 42, Rožmitál pod Třemšínem  
Česká republika

**Zpracovatel / dodavatel:**  
Západočeská univerzita v Plzni  
Research and Innovation Centre  
for Electrical Engineering  
Univerzitní 8  
306 14 Plzeň  
**Kontaktní osoba:**  
Ing. Bohumil Skala  
tel. 377634473  
[skalab@fel.zcu.cz](mailto:skalab@fel.zcu.cz)

**Práce vznikla za finanční podpory projektu Návrh energeticky úsporných tlumivek – NEUTlum, OP PIK c. CZ.01.1.02/0.0/0.0/20\_321/0024444, MPO, EU a EF pro regionální rozvoj a podnikání.**



EVROPSKÁ UNIE  
Evropský fond pro regionální rozvoj  
OP Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost



## Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá problematikou vlivu proudu o vyšších harmonických na ztráty vstupní tlumivky vyvinuté ve spolupráci ZČU/FEL/RICE a Elzat, spol. s.r.o. Konkrétně tato zpráva zpracovává výsledky z měření vstupní tlumivky při proudech o 1. až 15. harmonické s celkovým  $I_{rms}$  až do  $1,3 \cdot I_n$ .

## Klíčová slova

Vstupní, tlumivka, vyšší harmonické, měření, ztráty

## Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Measurement of decompensation chokes at currents with higher harmonics.

## Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the issue of the higher harmonics current effect on the input choke. Tested choke in developed in the cooperation between ZČU/FEL/RICE and Elzat, spol. s.r.o. Specifically, this report processes input choke measurement results at 1st to 15th harmonic currents with total  $I_{rms}$  up to the  $1.3 \cdot I_n$ .

## Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Input chokes, higher harmonics, measurement, losses

## Seznam symbolů a zkratk

VZ	výzkumná zpráva
AC	střídavý, sinusový
U	napětí
I	proud
f	kmitočet
R	odpor
$F_n$	řád harmonické složky
$P_j$	ztráty ve vinutí / činné / Jouleho ztráty
$P_{Fe}$	ztráty v magnetickém obvodu

## Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>4</b>
A) MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ .....	4
<b>2. TESTOVACÍ SPEKTRUM</b> .....	<b>5</b>
<b>3. POPIS VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>4. VYHODNOCENÍ SOUHRNNÉ</b> .....	<b>9</b>
A) CELKOVÉ ZTRÁTY .....	10
B) SKLADBA ČINNÝCH ZTRÁT U OBR. 5-7 .....	11
C) ROZLOŽENÍ ČINNÝCH ZTRÁT A ZTRÁT V MAG. OB. ....	12
<b>5. VYHODNOCENÍ PODRUŽNÉ</b> .....	<b>13</b>
A) ZTRÁTY VE VINUTÍ .....	13
B) ZTRÁTY V MAGNETICKÉM OBVODU .....	14
<b>6. KONTROLA RELEVANTNOSTI VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>15</b>
<b>7. ZÁVĚR</b> .....	<b>16</b>
<b>8. PŘÍLOHY</b> .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
A) KOMPLEXNÍ HARMONICKÁ SPEKTRA .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
B) SEPARÁTNÍ HARMONICKÁ SPEKTRA .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
C) VÝSLEDKY Z KOMPLEXNÍCH MĚŘENÍ .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
D) VÝSLEDKY ZE SEPARÁTNÍCH MĚŘENÍ .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
E) POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

## 1. Úvod

Tato výzkumná zpráva se zabývá problematikou vlivu vyšších harmonických proudů na ztráty vstupní tlumivky vyvinuté ve spolupráci ZČU/FEL/RICE a Elzat, spol. s.r.o. Konkrétně tato zpráva zpracovává výsledky z měření vstupní tlumivky při proudech o 1. až 15. harmonické s celkovým  $I_{rms}$  až do  $1,3 \cdot I_n$ .

Detailní popis konstrukce jednotlivých tlumivek není předmětem této výzkumné zprávy. Výchozí VZ pro předmětné měření a porovnání je [5].

Důležitými vstupy jsou také technické listy použitého vybavení [1-4].

### a) Měřící pracoviště

Jednoduché měřící pracoviště (tab. I, Obr. 1) sestavené v laboratoři RICE sestává z elektronického zdroje s vestavěným výstupním filtrem MX 30 značky California instruments [1], precizního vysokofrekvenčního výkonového analyzátoru WT 1806E značky Yokogava [2,3] a precizního mikroohmmetru Cropico DO 500 [4] značky Seaward.

Výkonový zdroj je pro účely popisovaného měření nastaven do 1-fázového DC režimu o rozsahu 400 V<sub>ph</sub>. Proudové omezení bylo z důvodu ochrany všech zařízení nastaveno na 83 A<sub>p</sub>.

Střídavý proud o volitelné skladbě harmonických tvoří napěťový střídač [7] řízený DSP Texas Instruments F28335 [8] v platformě MLC interface [9]. Zapojení zachycuje Obr. 1, který je rozdělen na dvě části: pro třífázová měření při  $F_n = 1,5,7,11,13$  a pro jednofázová měření při  $F_n = 3,9,15$  a při  $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$ . Testovací systém je řízen následovně:

- Střídač generuje výstupní harmonické napětí dle požadavků na harmonickou skladbu proudu testovanou tlumivkou.
- MX 30 generuje potřebné napětí v DC-meziobvode pro dosažení požadovaného  $I_{rms}$ .

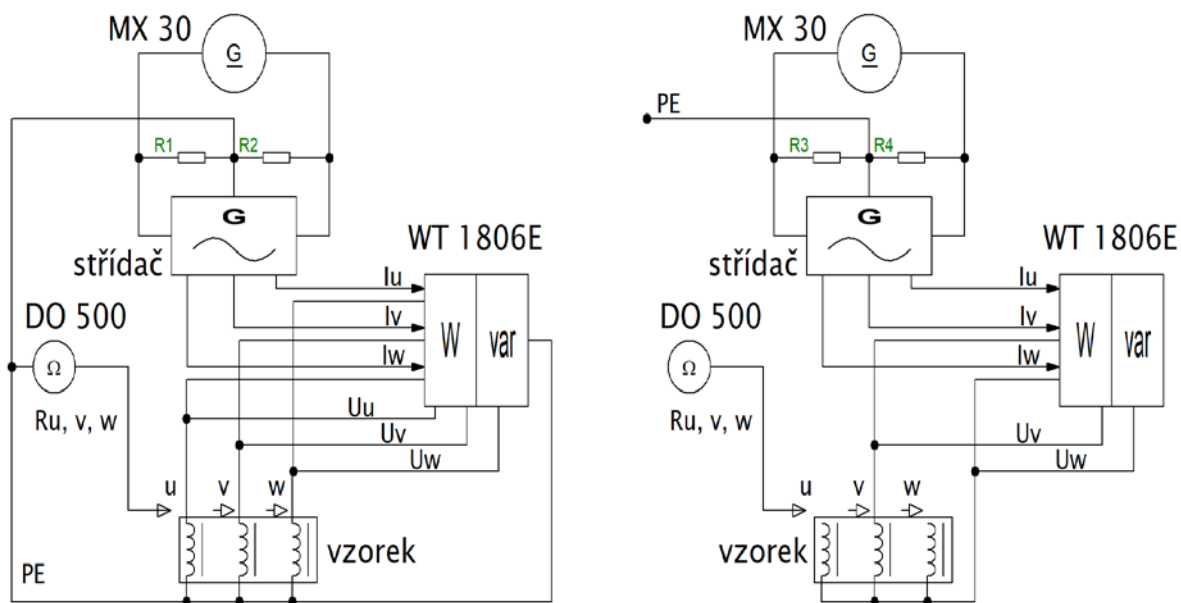
Precizní výkonový analyzátor byl k testovanému vzorku připojen v režimu 3P4W (Obr. 1), kdy jsou nezávisle měřeny fázové výkony. Rozsahy byly přepínány automaticky a sběr dat prováděn firemním programem WT Viever E.

Před zahájením měření a po jeho dokončení byl připojován precizní mikroohmmetr (Obr. 1) pro měření parazitního sériového odporu vinutí. Měřící proud byl nastaven na konstantní 1 A.

Bližší parametrizace měřícího zařízení je uvedena v předchozí výzkumné zprávě [6].

Tab. I Použité přístroje

	výrobce	model	Požitý rozsah
zdroj	California instruments	MX 30	AC 400 V <sub>ph</sub>
analyzátor	Yokogava	WT 1806E	auto (přímé měření proudu)
mikroohmmetter	Cropico	DO 500	1 A



obr. 1 Schéma zapojení měřícího stanoviště: VLEVO: třífázová měření, VPRAVO: jednofázová měření

## 2. Testovací spektrum

Testovací spektrum proudu se řídí předpisem (1), který je pro příslušné  $F_n$  rozepsán v Tab. II.

$$I_{(F_n)} = \frac{I_{(1)}}{n} \quad (1)$$

Tab. II

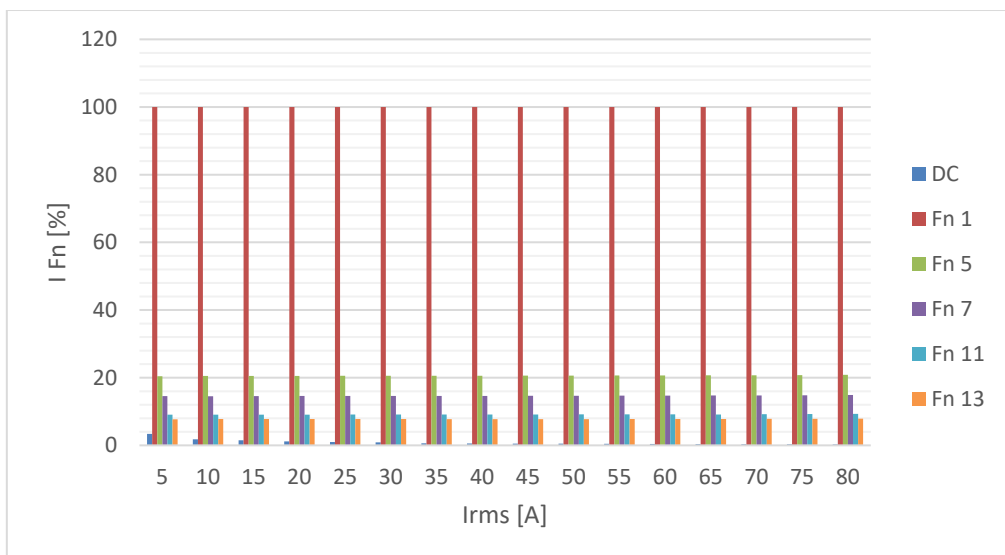
$F_n$	1	3	5	7	9	11	13	15
$I_{(F_n)} [\%]$	100	33,33	20	14,28	11,11	9,09	7,69	6,66

Skutečné průměrné hodnoty harmonické skladby testovacího proudu jsou uvedeny v Tab. III. Grafické vyjádření skladby testovacího proudu je uvedeno takto:

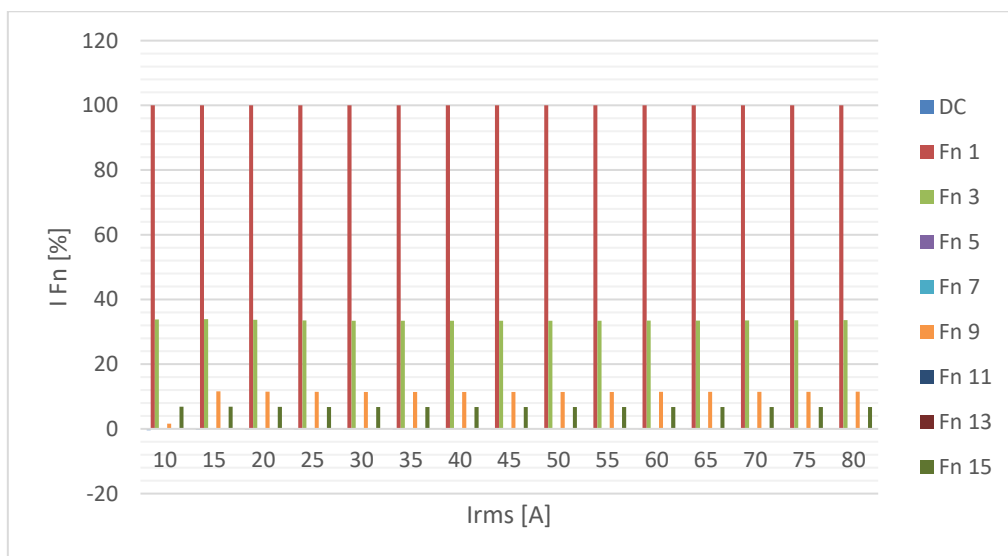
- Obr. 2 skladba při třífázovém měření  $F_n = 1,5,7,11,13$
- Obr. 3 skladba při jednofázovém měření  $F_n = 1,3,9,15$
- Obr. 4 skladba při jednofázovém měření  $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$

Tab. III

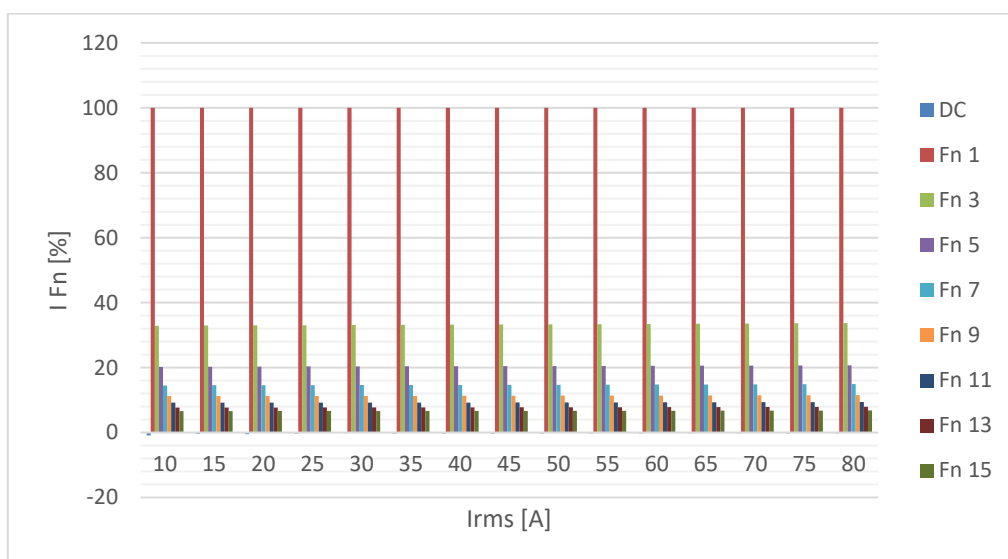
$F_n$	DC	1	3	5	7	9	11	13	15
$I_{(F_n)} [\%]$	0,3	100	33,28	20,45	14,69	11,36	9,26	7,78	6,68



obr. 2 – Skladba proudu při třífázovém měření



obr. 3 Skladba proudu při jednofázovém měření pro Fn = 1,3,9,15



obr. 4 Skladba proudu při jednofázovém měření pro Fn = 1,3,5,7,9,11,13,15

Měřící proud byl dále pro třífázová měření rozdělen na:

- $F_n = 1,5$
- $F_n = 1,7$
- $F_n = 1,11$
- $F_n = 1,13$

a pro jednofázová měření na:

- $F_n = 1,3$
- $F_n = 1,9$
- $F_n = 1,15$

Souhrnně tak byla vstupní tlumivka testována pro případy:

- Balík lichých harmonických  $F_n = 1,5,7,11,13$  3f měření
- Balík lichých harmonických  $F_n = 1,3,9,15$  1f měření
- Balík lichých harmonických  $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$  1f měření
- Páry první harmonické a liché harmonické 5; 7; 11; 13 3f měření
- Páry první harmonické a liché harmonické 3; 9; 15 1f měření

### 3. Popis vyhodnocení výsledků

Základní vyhodnocení výsledků je analogické s předchozími měřeními [add, add]. V souvislosti s měřením vyšších harmonických a vlivu skinefektu je nutné při vyhodnocení výsledků zohlednit následující specifika:

Efektivní hodnota měřeného proudu je efektivní hodnota celého souboru aktuálně generovaných harmonických. Jednotlivé efektivní složky proudu je možné stanovit dle (2).

$I_{rms}(F_n) = I_{rms} \frac{I_{F_n\%}}{100}$	(2)
--	-----

Hloubku vniku pro měděné vinutí při jednotlivých harmonických složkách testovacího proudu je možné stanovit dle (3). Rozměry testovaného vinutí činí  $0,008 \cdot 0,0045$  m. Vliv hloubky vniku je zřetelný od  $F_n = 7$ , kdy přestává platit nerovnost (4). Pro případy  $F_n < 7$  platí při výpočtu činného odporu vinutí pro danou harmonickou složku (5), pro případy  $F_n \geq 7$  pak platí (6)

$\delta_{F_n} = \frac{1}{\sqrt{\pi 50 F_n \gamma \mu}}$	(3)
$[a; b] \geq 2[\delta_{F_n}; \delta_{F_n}]$	(4)
$R_{F_n} = R_{DC}; F_n < 7$	(5)
$R_{F_n} = R_{DC} \frac{a}{2\delta_{F_n}}; F_n \geq 7$	(6)

Výpočet činných ztrát lze komplexně popsat rovnicí (7). (7) je možné upravit pro případy, kdy  $F_n$  netvoří úplné spektrum, ale jen vybrané složky.

$P_j = \sum_{x=u,v,w} \sum_{Fn=1,3,5}^{15} R_{Fn} I_{rms} x (Fn)^2$	(7)
---	-----

Ztráty v magnetickém obvodu jsou dané vztahem (8), přičemž platí stejná možnost jako u (7), tedy možná úprava dle aktuálního spektra.

$P_{Fe} = -P_j + \sum_{x=u,v,w} (P_x)$	(8)
--	-----

V případech měření jednofázovou metodou je předpokládána identičnost jednotlivých cívek a tedy i činných výkonových ztrát (9). Pro ztráty v magnetickém obvodu je však nutné složky  $P_{Fe}$  pro  $F_n = 3, 9$  a  $15$  korigovat dle (10).

$P_j = 3 \sum_{Fn=1,3,5}^{15} R_{Fn} I_{rms} (Fn)^2 ; \text{jednofázová měření}$	(9)
$P_{Fe} = \frac{-P_j + 3P_v}{3} \Leftrightarrow F_n = 3; 9; 15$	(10)

Vyhodnocené výsledky jsou graficky znázorněny v následující kapitole. Kompletní výsledky z měření a dopočtů jsou uvedeny v přílohách této výzkumné zprávy a v elektronické podobě ve formátu .x/sx.



## 4. Vyhodnocení souhrnné

Souhrnné vyhodnocení porovnává rozložení ztrát  $P_j$  a  $P_{Fe}$  v závislosti na skladbě proudu tlumivkou a celkové efektivní hodnotě proudu.

Kapitola 1.2 zprostředkovává komplexní pohled na rozložení ztráty při skladbě proudu o:

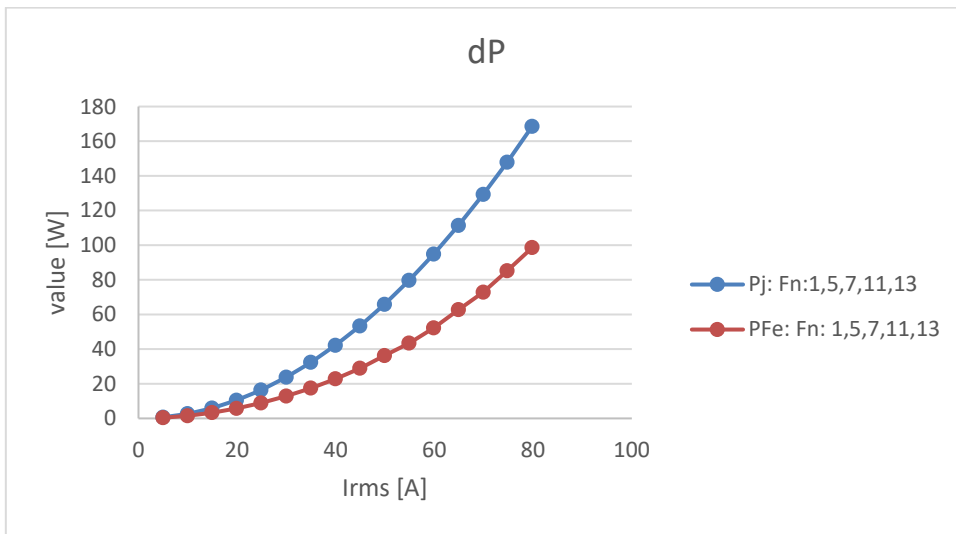
- $F_n = 1,5,7,11,13$  Obr. 5
- $F_n = 1,3,9,15$  Obr. 6
- $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$  Obr. 7

Detailní pohled na rozložení činných ztrát přes jednotlivé harmonické složky zprostředkovává Obr. 8 v kapitole 1.3

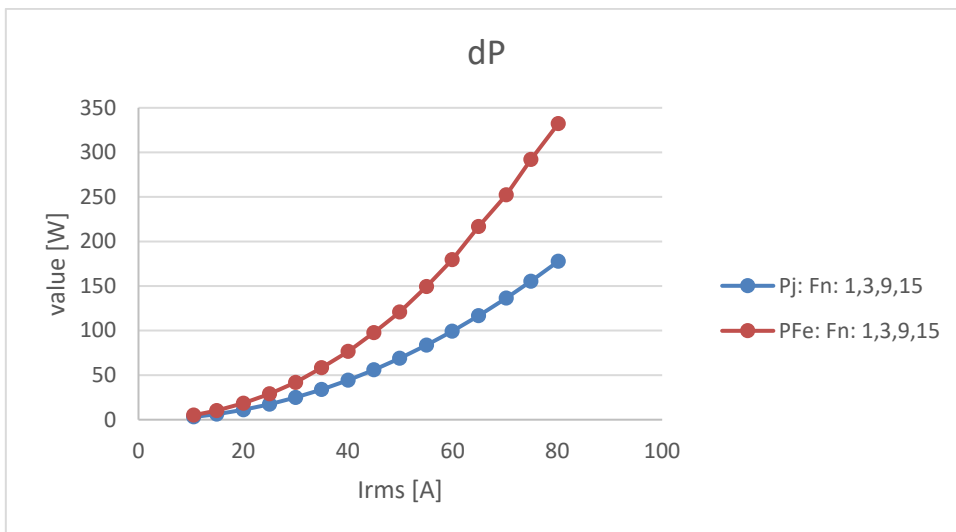
Rozložení  $P_j$  a  $P_{Fe}$  je uvedeno v kapitole 1.4 pro tyto případy:

- $F_n = 1,5,7,11,13$  Obr. 9
- $F_n = 1,3,9,15$  Obr. 10
- $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$  Obr. 11

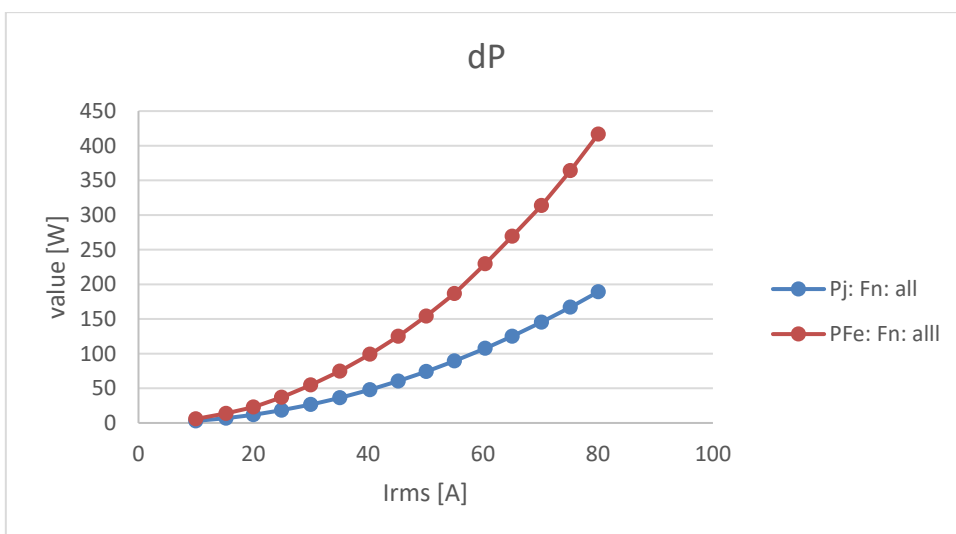
**a) Celkové ztráty**



obr. 5 Celkové ztráty pro proudy obsahující Fn = 1,5,7,11,13

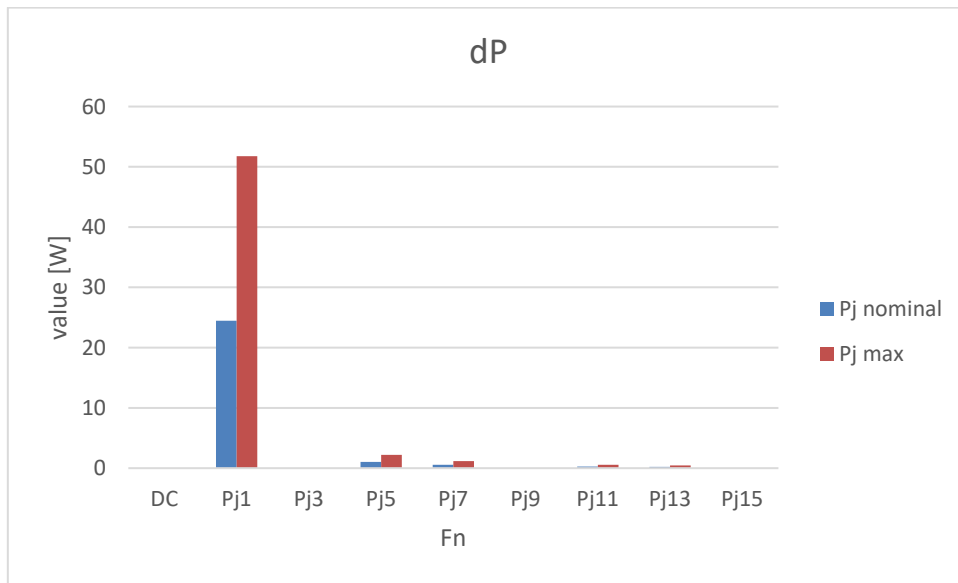


obr. 6 Celkové ztráty pro proudy obsahující Fn = 1,3,9,15



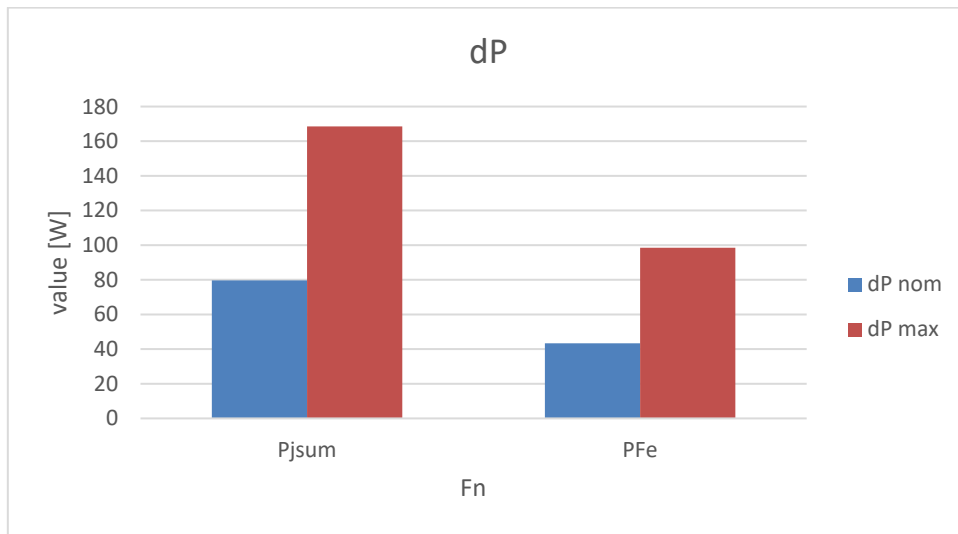
obr. 7 Celkové ztráty pro proudy obsahující Fn = 1,3,5,7,9,11,13,15

**b) Skladba činných ztrát u Obr. 5-7**

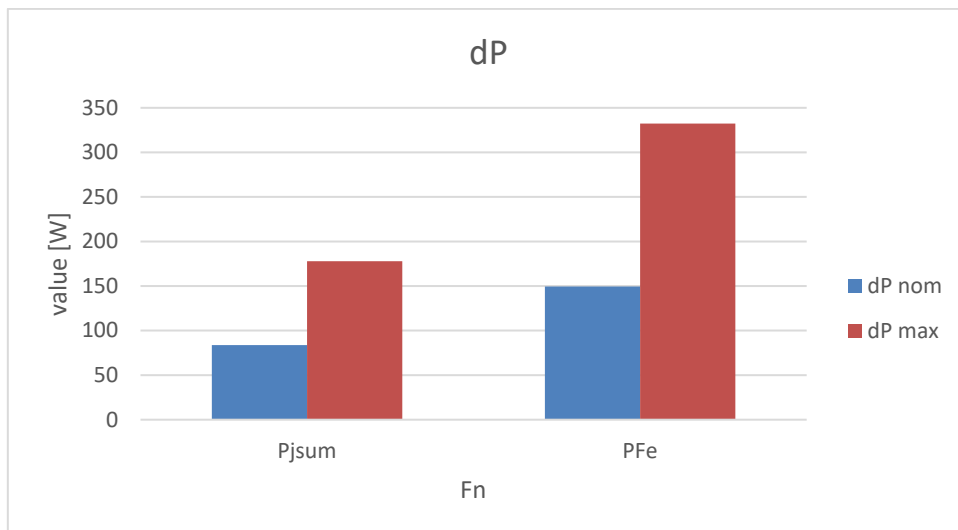


obr. 8 Skladba činných ztrát z Obr. 5-7

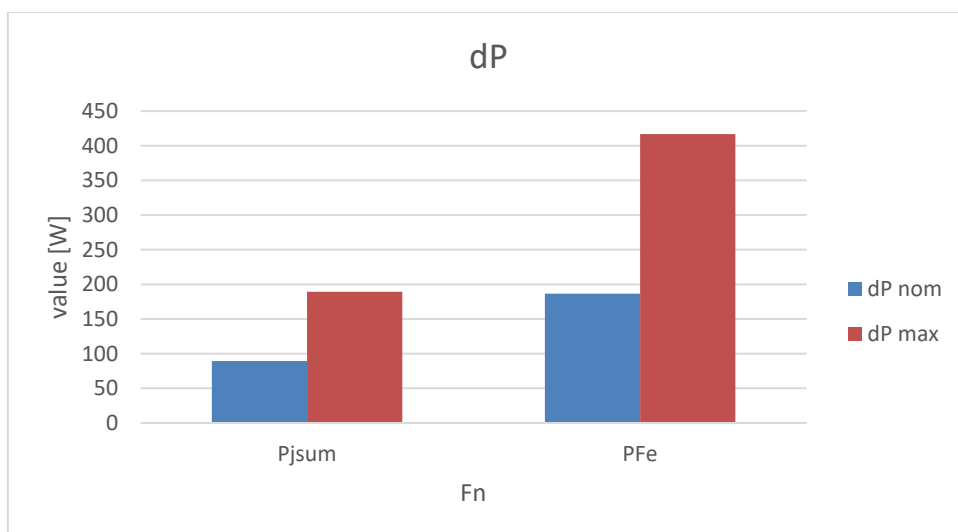
**c) Rozložení činných ztrát a ztrát v mag. ob.**



obr. 9 Rozložení  $P_j$  a  $P_{Fe}$  pro případ  $F_n = 1, 5, 7, 11, 13$



obr. 10 Rozložení  $P_j$  a  $P_{Fe}$  pro případ  $F_n = 1, 3, 9, 15$



obr. 11 Rozložení  $P_j$  a  $P_{Fe}$  pro případ  $F_n = 1, 3, 5, 7, 9, 13, 15$

## 5. Vyhodnocení podružné

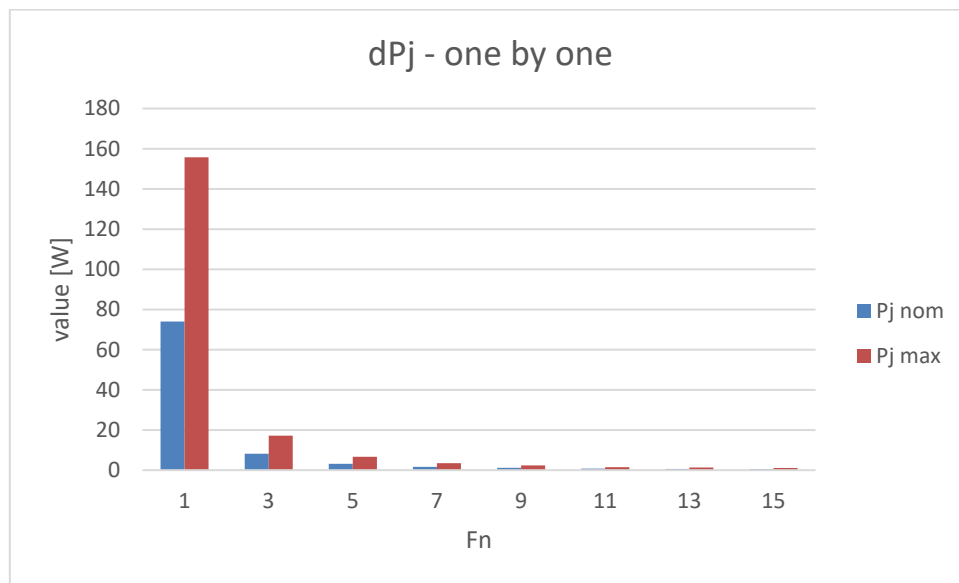
Podružné vyhodnocení je zaměřeno na rozložení  $P_j$  a  $P_{Fe}$  napříč spektrem  $F_n$ .

Kapitola 1.5 je zaměřena na činné ztráty, kde zachycuje výsledky dosažené dvojím způsobem měření a vyhodnocení:

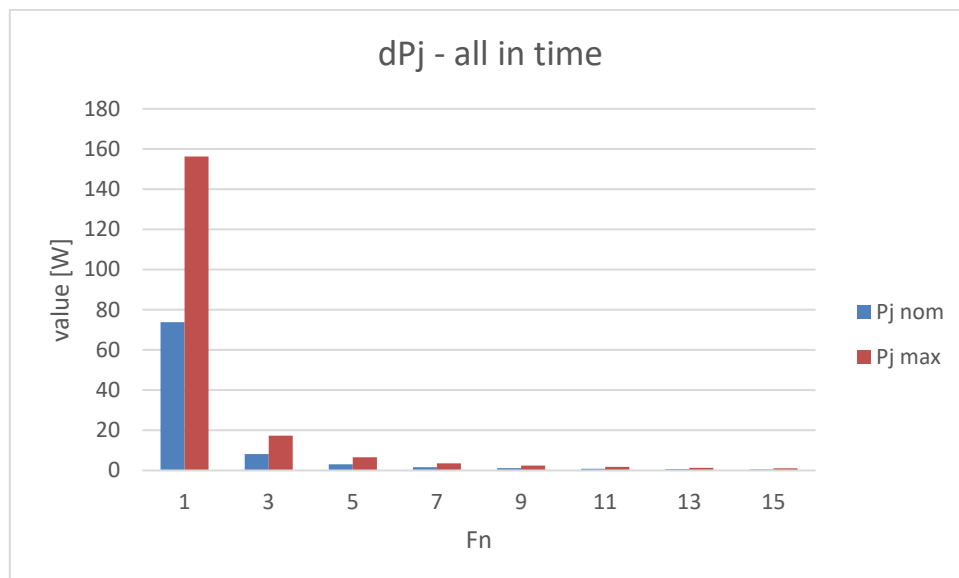
- $P_{j(F_n)}$  stanovené ze separátních měření Obr. 12
- $P_{j(F_n)}$  stanovené z komplexního měření Obr. 13

Kapitola 1.6 zachycuje ztráty v magnetickém obvodu získané z komplexního měření.

### a) Ztráty ve vinutí

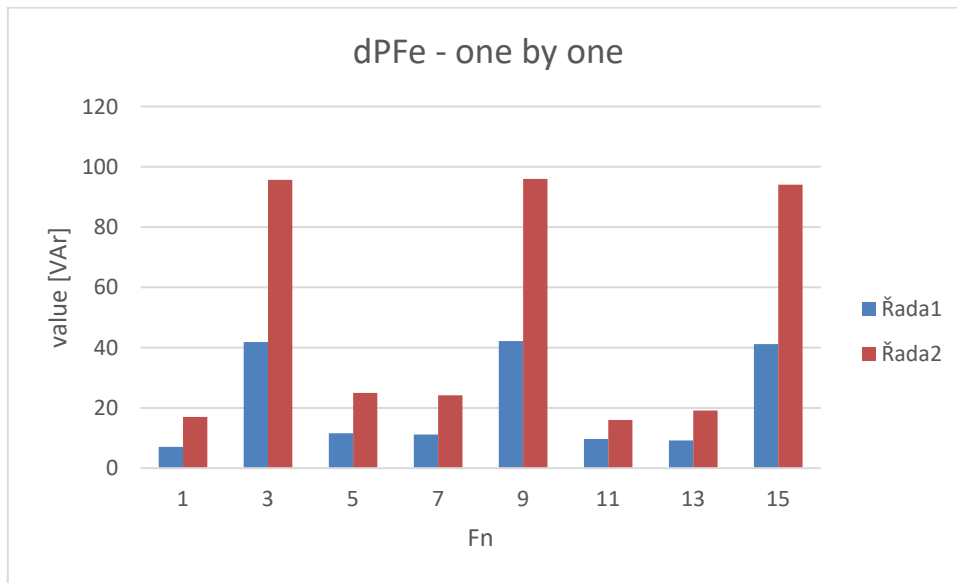


obr. 12 Ztráty  $P_j$  stanovené ze separátních měření (např.  $F_n = 1,3$  a  $F_n = 1,5$  atd.)



obr. 13 Ztráty  $P_j$  stanovené z komplexního měření ( $F_n = 1,3,5,7,9,13,15$ )

**b) Ztráty v magnetickém obvodu**

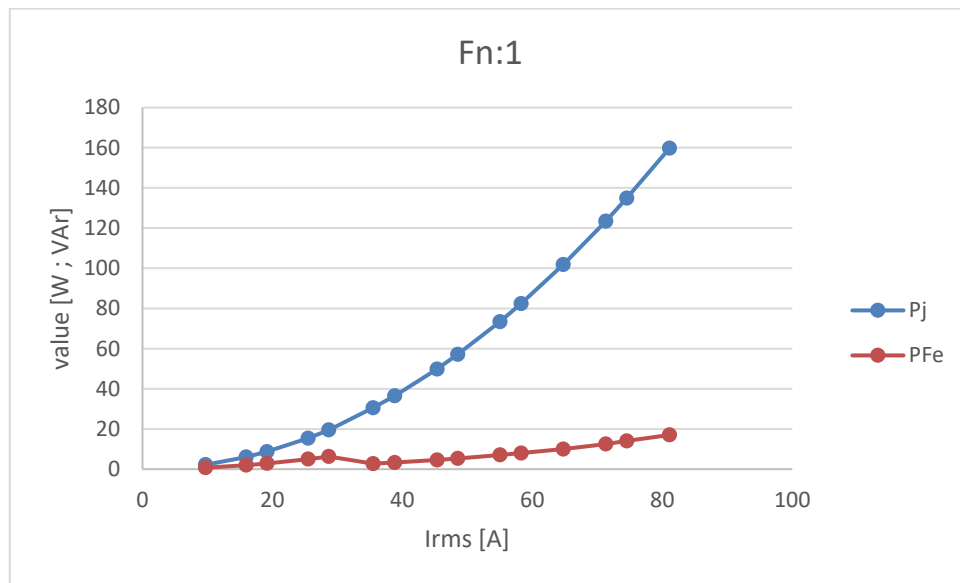


obr. 14 Ztráty  $P_{Fe}$  stanovené ze separátních měření (např.  $F_n = 1,3$  a  $F_n = 1,5$  atd.)

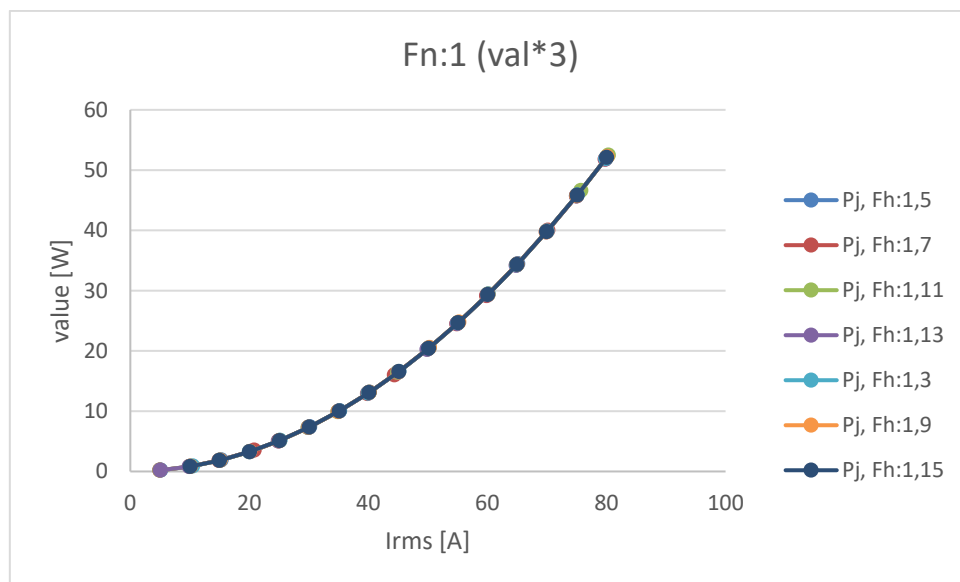
## 6. Kontrola relevantnosti výsledků

Aby bylo možné získané výsledky stanovit jako relevantní, byla provedena kontrola porovnáním naměřených ztrát při napájení sinusovým proudem (Obr. 15) se ztrátami první harmonické získané z jednotlivých separátních měření (Obr. 16).

Shodu separátních měření s komplexním pak potvrzují výsledky uvedené na Obr. 12 a Obr. 13 v části Vyhodnocení podružné, kapitola 1.5.



obr. 15 Ztráty na testované tlumivce při  $F_n = 1$



obr. 16 Ztráty  $P_j$  složky  $F_n = 1$  pro případy měření uvedené v legendě (hodnoty je nutné násobit třemi)

## 7. Závěr

Z kapitoly 4 je možné usoudit na minimální, ne však nulový, vliv harmonické skladby na ztráty ve vinutí. Harmonické spektrum má však značný vliv na ztráty v magnetickém obvodu.

Kapitola 5 potvrzuje závěry z kapitoly 4. Dále je zřejmé, že nejméně příznivé složky spektra pro ztráty v magnetickém obvodu činní třetí harmonická a její násobky ( $F_n = 3, 9, 15$ ).

## Literatura

- [1] California Instruments, Ametek, series MX, datasheet, available online on: <https://www.programmablepower.com/products/test-compliance/e2aac536-dd69-4564-9c79-843e65f4bacc>
- [2] Yokogawa, model WT1800E datasheet, available online on: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMWT1801E-01EN.pdf>
- [3] Yokogawa, model WT1800E brochure, available online on: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/1/2678/files/BUWT1800E-01EN.pdf>
- [4] Seaward, model cropico DO 500 datasheet, available online on: <https://www.seaward.com/gb/support/resistance/930076-cropico-do5000/specifications-and-manuals/342-do5000-series-datsheet/>
- [5] Skala B a kolektiv, Protokol o měření kompenzační tlumivky TTc 34075 – 0024, výzkumná zpráva, ZČU/FEL/ RICE, 2022
- [6] Skala B a kolektiv, Měnič - ELZAT verze: CAS 300 V1\_3ph, výzkumná zpráva, ZČU/FEL/ RICE, 2023, číslo: 22190-008-2023
- [7] Skala B a kolektiv, Měření charakteristik dekompenzačních tlumivek na sinusovém zdroji, výzkumná zpráva, ZČU/FEL/ RICE, 2023, číslo: 22190-010-2023
- [8] Skala B a kolektiv, Měření opakovatelnosti dekompenzačních tlumivek na sinusovém zdroji, výzkumná zpráva, ZČU/FEL/ RICE, 2023, číslo: 22190-011-2023
- [9] Texas Instruments, F28335, dokumentace aj., dostupné online z: <https://www.ti.com/product/TMS320F28335>
- [10] Košan T, MLC interface V3, ZČU/FEL/RICE



## Seznam obrázků, tabulek a rovnic

Tab. I Použité přístroje.....	4
obr. 1 Schéma zapojení měřícího stanoviště: VLEVO: třífázová měření, VPRAVO: jednofázová měření .....	5
Tab. II	5
Tab. III	5
obr. 2 – Skladba proudu při třífázovém měření .....	6
obr. 3 Skladba proudu při jednofázovém měření pro $F_n = 1,3,9,15$ .....	6
obr. 4 Skladba proudu při jednofázovém měření pro $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$ .....	6
obr. 5 Celkové ztráty pro proudy obsahující $F_n = 1,5,7,11,13$ .....	10
obr. 6 Celkové ztráty pro proudy obsahující $F_n = 1,3,9,15$ .....	10
obr. 7 Celkové ztráty pro proudy obsahující $F_n = 1,3,5,7,9,11,13,15$ .....	10
obr. 8 Skladba činných ztrát z Obr. 5-7 .....	11
obr. 9 Rozložení $P_j$ a $P_{Fe}$ pro případ $F_n = 1,5,7,11,13$ .....	12
obr. 10 Rozložení $P_j$ a $P_{Fe}$ pro případ $F_n = 1,3,9,15$ .....	12
obr. 11 Rozložení $P_j$ a $P_{Fe}$ pro případ $F_n = 1,3,5,7,9,13,15$ .....	12
obr. 12 Ztráty $P_j$ stanovené ze separátních měření (např. $F_n = 1,3$ a $F_n = 1,5$ atd.) .....	13
obr. 13 Ztráty $P_j$ stanovené z komplexního měření ( $F_n = 1,3,5,7,9,13,15$ ).....	13
obr. 14 Ztráty $P_{Fe}$ stanovené ze separátních měření (např. $F_n = 1,3$ a $F_n = 1,5$ atd.) .....	14
obr. 15 Ztráty na testované tlumivce při $F_n = 1$ .....	15
obr. 16 Ztráty $P_j$ složky $F_n = 1$ pro případy měření uvedené v legendě (hodnoty je nutné násobit třemi) .....	15

## Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	29.5.203	M. zavřel