

Netočivá reaktance transformátoru

Pracoviště: KEV + RICE
Číslo dokumentu: Číslo výzkumné zprávy 22190–029–2022
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Bohumil Skala
Vedoucí projektu: Tomáš Komrska
Počet stran: 27
Datum vydání: 02. 09. 2022
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,
Information engineering - Electrical and electronic
engineering

Zadavatel / zákazník:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Zpracovatel / dodavatel:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:
Bohumil Skala
tel. 377 634 473
skalab@fel.zcu.cz

**Tato zpráva vznikla s podporou projektu NCK Národní centrum pro
energetiku TN01000007.**

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá výsledky zkoušky pro měření netočivé reaktance na transformátoru.

Klíčová slova

Netočivá reaktance, transformátor

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Measurement of zero sequence reactance of the transformer

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with results of the zero-sequence component reactance test of the transformer.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Zero sequence component reactance, transformer

Seznam symbolů a zkratk

U	napětí zdroje
I	proud zdroje
Z ₀	netočivá impedance
X _{0f}	netočivá reaktance jedné fáze
P	činný výkon
Q	jalový výkon
S	zdánlivý výkon
cos	účinník

Indexy

1	primár
2	sekundár
f	fázová hodnota
U, V, W	jednotlivé fáze

Obsah

1	ÚVOD	5
2	ŠTÍTEK TRANSFORMÁTORU	6
3	PROTOKOL ELPROENERGO O PROVEDENÝCH ZKOUŠKÁCH	7
4	SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ NETOČIVÉ REAKTANCE	8
5	POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ	8
6	PŘÍKLAD VYHODNOCENÍ JEDNOHO MĚŘENÉHO BODU	12
7	TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT	13
7.1	SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ ROZPOJENA – NAPRÁZDNO	13
7.2	SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ NAKRÁTKO	13
8	VÝPOČET REAKTANCE	14
9	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ	14
9.1	SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ ROZPOJENA – NAPRÁZDNO	14
9.2	SEKUNDÁRNÍ VINUTÍ NAKRÁTKO	17
10	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	19
11	DODATEK	19

1 Úvod

Podle smlouvy byl transformátor dodán pouze se základním měřením na zkušebně Elpro Energo. Bylo provedeno pouze měření:

- odporů vinutí
- převodu
- měření naprázdno
- měření nakrátko
- zkouška přiloženým napětím (vyhovělo)
- zkouška indukovaným napětím (vyhovělo)

Proto bylo nutné po doručení transformátoru provést před definitivním převzetím zbývající zkoušky.

V tomto protokolu je uvedeno zkoušení transformátoru v náhradním zapojení pro určení jeho reaktance pro netočivou složku. Měření bylo provedeno za studena.

2 Štítek transformátoru



Elpro-Energo
Transformers



Typ	OTC720S20	Výrobní číslo	32100431	3	fázový transformátor
Rok výroby	2022	Norma	EN 60076	Frekvence	50Hz
Jmenovitý výkon	720 kVA	Izolační hladina	LI 125	AC	50/3
Parametry pro provoz se souslednou složkou				Skupina spojení	YNiii +iii
Primar		Sekundár	Terciár	Um	25/1,1 kV
Napětí	1 25200 V	213 V	167 V	Chlazení	ONAN
	2 24000 V			Doba trvání zkratu	2.s
	3 20400 V			Hmotnost celkem	7.474 t
				Hmotnost olej	1.722 t
Proud	17.3 A	1126.7 A	5 A	Hmotnost jádra	2.416 t
Ztráty P0	0.401 kW			Hmotnost vinutí Cu	t
Ztráty Pk	8.266 kW			Hmotnost vinutí Al	0.474 t
Napětí nakrátko	7.58 %			Podíl PCB	<1ppm
Druh oleje NYNAS DISTRO DT-11 EU				Plněno při 20° C - tlak normální	

Parametry pro provoz se souslednou složkou + netočivou složkou

Vinutí vyššího napětí dimenzováno na $U_f=24\text{kV}$, proud $I_f=32.2\text{A}$, Výkon $S=3\times 775.2\text{kVA}$

Pásový vývod 1N dimenzován na proud $I=97\text{A}$

Vinutí sekundárního napětí dimenzováno na napětí $U_f=369\text{V}$, proud $I_f=1126.7\text{A}$

Výkon $S=3\times 415.7\text{kVA}$

Zatížení S1 - trvalý chod

Vyrobeno v České republice

Obr. 2.1 Štítek trasnsformátoru

3 Protokol ElproEnerg o provedených zkouškách

Jako výstupní protokol byl dodán následující list o výsledcích provedených zkoušek.

		Zkušební protokol transformátoru		Datum 08.03.2022 Sériové číslo 32200019 Typ OTC720S20			
TECHNICKÁ DATA							
Výkon	720 kVA	Napětí (VN)	24000 V	Proud (VN)	17.3 A		
Počet fází	3	Napětí (NN)	368.9 V	Proud (NN)	1126.8 A		
Frekvence	50 Hz	Odbočky	+5%, -15%	Napětí nakrátko	7 ±10%		
Třída izolace	A	Skupina zapojení	YNy6d1	Ztráty naprázdno	430 W +10%		
Chlazení	ONAN	Norma	IEC 60076-1	Ztráty nakrátko	17500 W +10%		
MĚŘENÍ PŘEVODU							
Číslo odbočky	1	2	3				
Převod	68.311	65.058	55.300				
Odschyty převodu	A-BC:b-a	-0.008 %	0.008 %	0.011 %			
	B-CA:c-b	-0.013 %	0.004 %	0.004 %			
	C-AB:a-c	0.041 %	0.054 %	0.039 %			
Prošlo	✓	✓	✓				
Číslo odbočky	1						
Převod	1.2754						
Odschyty převodu	a-bc:B3-A3	-3.131 %					
	b-ca:C3-B3	-3.140 %					
	c-ab:A3-C3	-3.156 %					
MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ							
				Jednotka Ω	Teplota 17.1 °C		
Číslo odbočky	2						
VN	A - B	5.8411					
	B - C	5.8110					
	C - A	5.8380					
NN	a - b	0.0018438					
	b - c	0.0018810					
	c - a	0.0018601					
MĚŘENÍ ZTRÁT NAPRÁZDNO A PROUD NAPRÁZDNO							
Napájení	Napětí	Proud				I ₀	Ztráty P ₀
		a	b	c	Průměr		
NN	368.900 V	886.200 mA	1.122 A	1.259 A	1.089 A	0.0966 %	401.404 W
MĚŘENÍ ZTRÁT NAKRÁTKO A IMPEDANCE NAKRÁTKO						T _{Ref.} 75.0 °C	T _{Med.} 17.6 °C
Napájení	Zkratováno	Proud	U _{k25}	Ztráty _{yk}	Ztráty P _{k25}		
VN / 2	NN	10.380 A	7.58 %	6.951 kW	8.266 kW		
ZKOUŠKA PŘILOŽENÝM NAPĚTÍM							
Napájení	Proti	Napětí	Proud	Frekvence	Doba trvání	Vydrželo	
Te	VN+NN+Nádoba	2.96 kV	17.36 mA	50.0 Hz	60 s	✓	
NN	VN+Te+Nádoba	3.01 kV	9.40 mA	50.0 Hz	60 s	✓	
VN	NN+Te+Nádoba	50.01 kV	119.27 mA	50.0 Hz	60 s	✓	
ZKOUŠKA INDUKOVANÝM NAPĚTÍ							
Napájení	Napětí	Proud	Frekvence	Doba trvání	Vydrželo		
NN	739.891 V	5.198 A	100.0 Hz	00:01:00	✓		
POZNÁMKY V čase dodávky je hodnota PCB v oleji menší než 1 ppm podle DIN EN 12766 Halogenové uhlovodíky nelze detekovat							
Zkoušel Sojka Testing Officer				Schválil Ing. Jan Šlosárek Vedoucí zkušebny			

Obr. 3.1 Protokol o provedených zkouškách transformátoru

4 Schéma zapojení pro měření netočivé reaktance

Primární vinutí – všechny tři fáze - byla zapojena paralelně a napájena jednofázově. Výhodou tohoto zapojení je nižší namáhání izolačního systému primárního vinutí, protože je napájeno napětím nižším než jmenovitým. Nevýhodou je nerovnoměrné rozdělení proudu do paralelně spojených vinutí jednotlivých fází. Toto bylo kontrolováno třemi klešťovými ampérmetry.

Měření bylo provedeno na primární odbočce 3 - 20 400V.

Terciární vinutí bylo rozpojeno.

Druhou možností je sériové spojení vinutí. Zde je proud v jednotlivých vinutí fázi nutně shodný. Nevýhodou je však napájení napětím vyšším než jmenovitým a jednotlivé fáze vinutí jsou značně napětově namáhána.

5 Použité přístroje a zařízení

Osciloskop

Tektronix MSO 4104B

Current probe

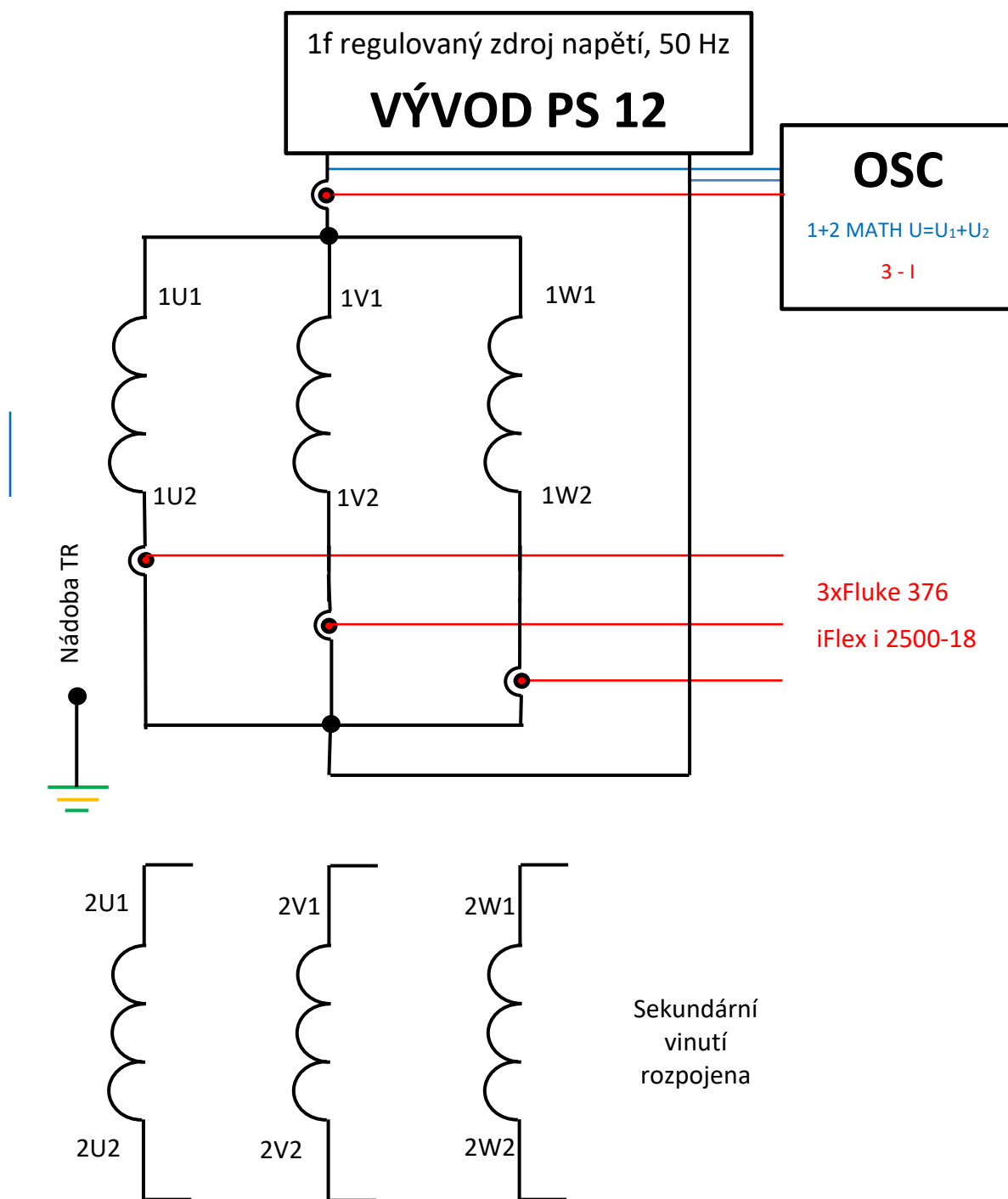
Tektronix A621 10-**100**-1000A

Voltage probe

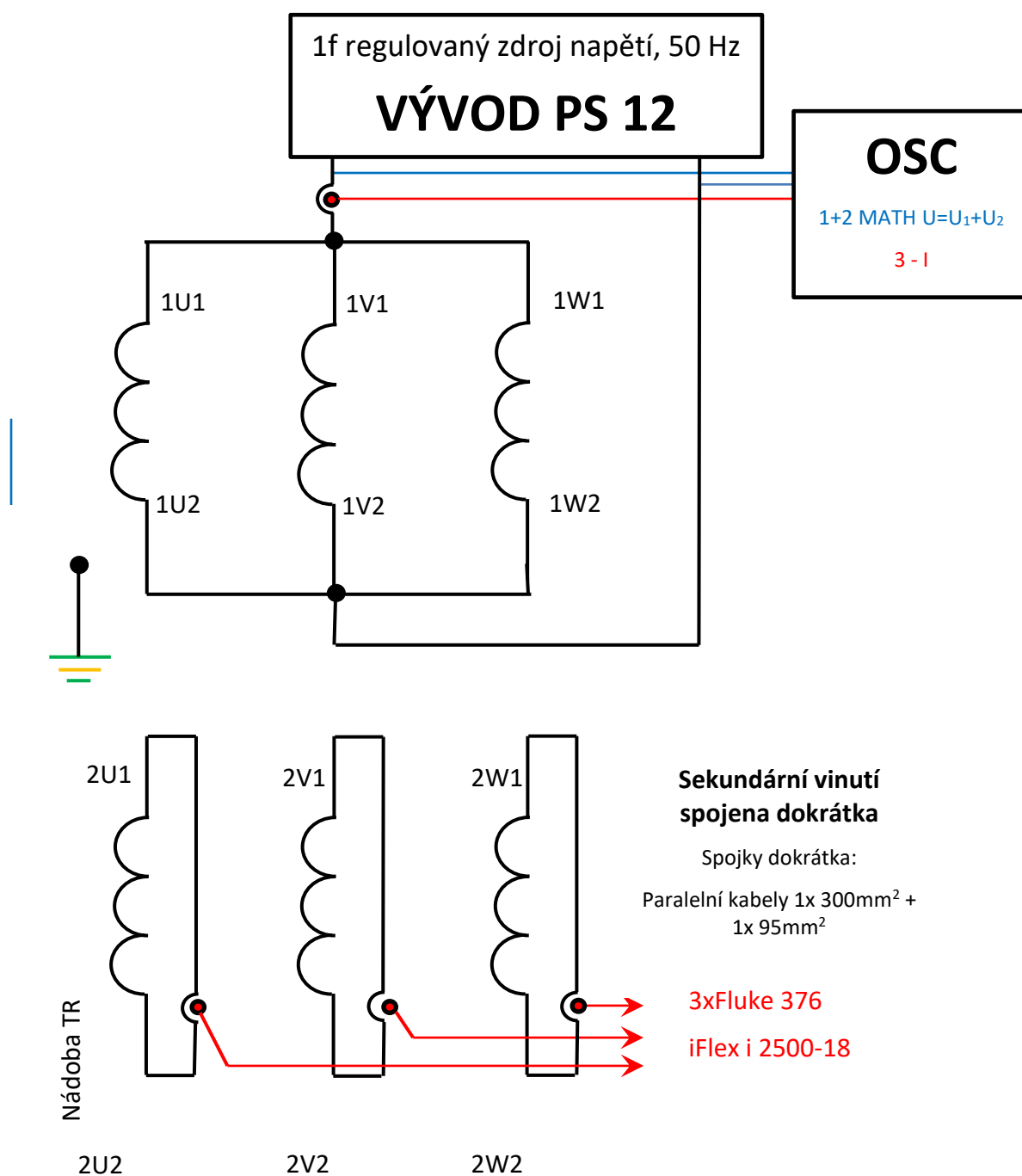
Tektronix 6015A 20 kV

3x klešťové ampérmetry Fluke se sondou

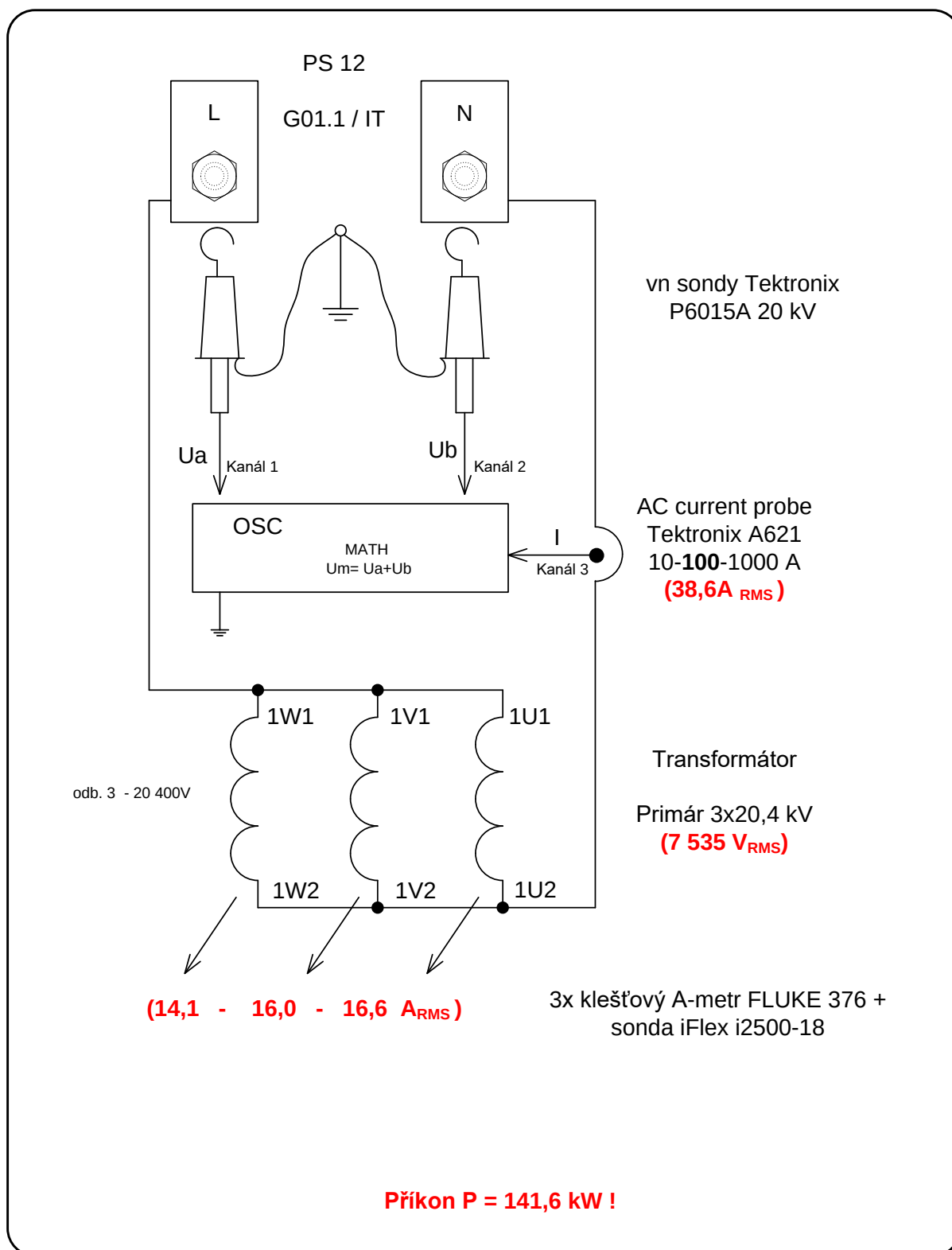
Fluke 376 + sonda iFlex2500-18



Obr. 5.1 Zapojení pro zkoušku netočivé reaktance naprázdno.

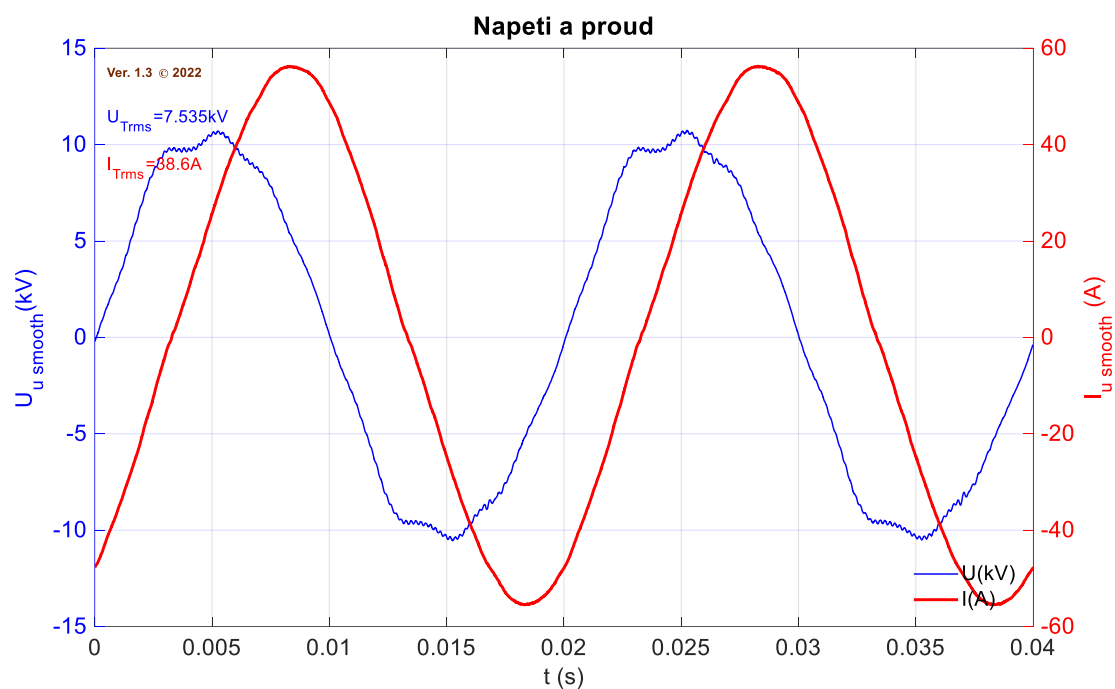


Obr. 5.2 Zapojení pro zkoušku netočivé reaktance nakrátko.

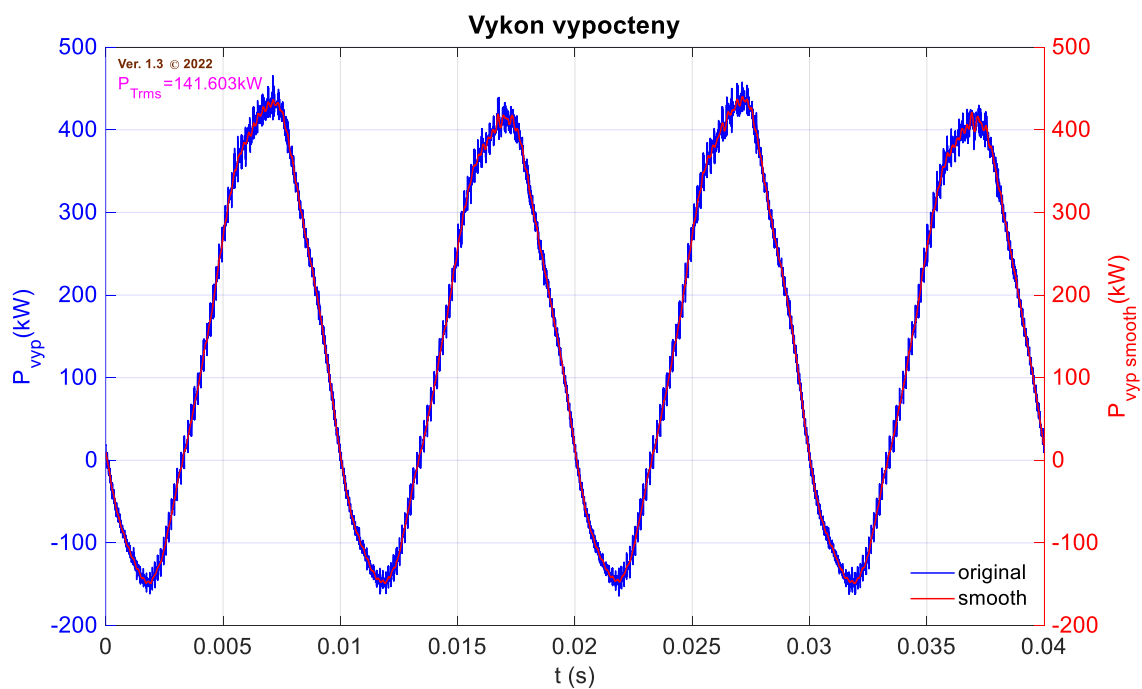


Obr. 5.3 Detail zapojení VN vinutí a VN sond OSC, příklad naměřených hodnot.

6 Příklad vyhodnocení jednoho měřeného bodu



Obr. 6.1 Napětí a proud v přívodu.



Obr. 6.2 Okamžitý příkon a jeho TRMS hodnota.

7 Tabulky naměřených hodnot

7.1 Sekundární vinutí rozpojena – naprázdno

Tab. 1 – Naměřené a vypočítané hodnoty

ř.	U (kV)	I (A)	P (kW)	cos (-)	S (kVA)	uhel (deg)	uhel (rad)	sin (-)	Q (kVAr)	Z _{0f} (Ω)	X _{0f} (Ω)	I1-U (A)	I1-V (A)	I1-W (A)
1	0,532	2	0,415	0,390	1,064	67,0	1,17	0,921	0,980	798	734,8	-	-	-
2	1,542	6,5	4,306	0,430	10,023	64,6	1,13	0,903	9,051	712	642,7	-	-	-
3	3,052	14,6	21,078	0,473	44,5592	61,8	1,08	0,881	39,259	627	552,5	-	-	-
4	6,074	33,3	98,003	0,485	202,2642	61,0	1,06	0,875	176,936	547	478,7	13,3	13,1	11,7
5	6,555	32,7	101,913	0,475	214,3485	61,6	1,08	0,880	188,571	601	529,1	14,5	14,1	12,6
6	6,842	33,9	111,073	0,479	231,9438	61,4	1,07	0,878	203,619	605	531,5	14,6	14	12,5
7	7,535	38,6	141,603	0,487	290,851	60,9	1,06	0,873	254,053	586	511,5	16,6	16	14,1

7.2 Sekundární vinutí nakrátko

Tab. 2 – Naměřené a vypočítané hodnoty

ř.	U (V)	I (A)	P (kW)	cos (-)	S (kVA)	uhel (deg)	uhel (rad)	sin (-)	Q (kVAr)	Z _{0f} (Ω)	X _{0f} (Ω)	I2-U (A)	I2-V (A)	I2-W (A)
1	131	8	0,156	0,149	1,048	81,4	1,42	0,989	1,036	49,13	48,58	140	135	138
2	231	15,1	0,543	0,156	3,4881	81,0	1,41	0,988	3,446	45,89	45,33	265	255	255
3	328	22,4	1,188	0,162	7,3472	80,7	1,41	0,987	7,251	43,93	43,35	400	381	387
4	425	29,6	2,043	0,162	12,58	80,7	1,41	0,987	12,413	43,07	42,50	526	504	509
5	528	37	3,21	0,164	19,536	80,5	1,41	0,986	19,270	42,81	42,23	654	625	634

8 Výpočet reaktance

Protože se jedná o měření na výstupu přechodové skříně, odkud se napájí všechny tři paralelně spojené fáze, je nutné fázovou hodnotu netočivé impedance vypočítat podle vztahu

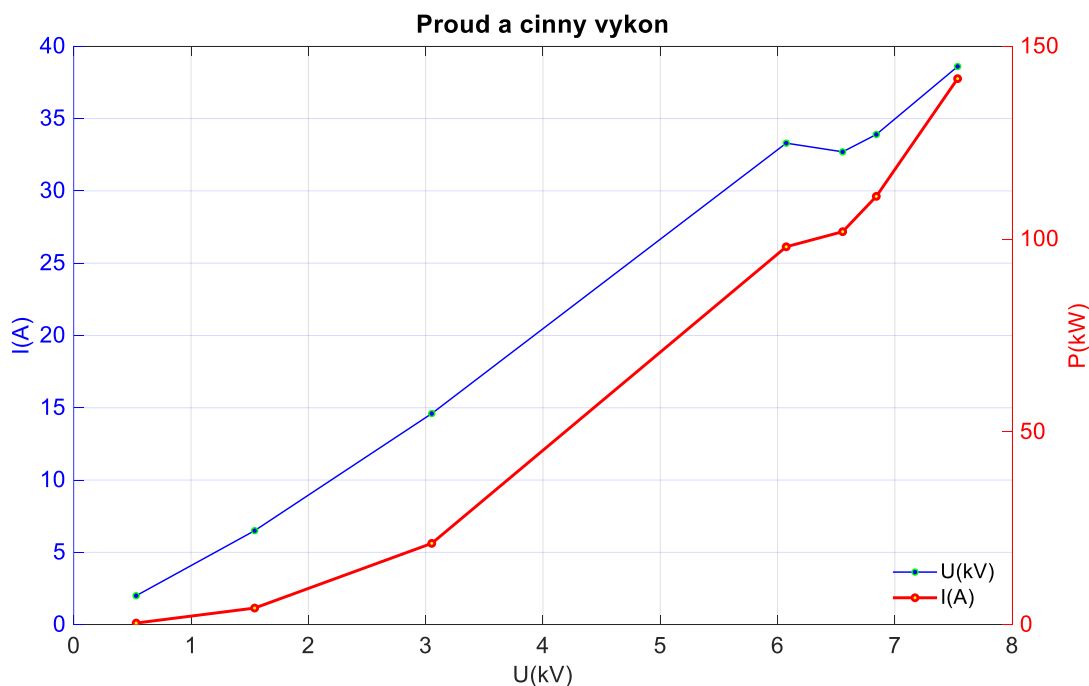
$$Z_{0f} = \frac{U}{I/3} = \frac{7535}{38,6/3} = 585,6\Omega$$

a následně pak netočivou reaktanci

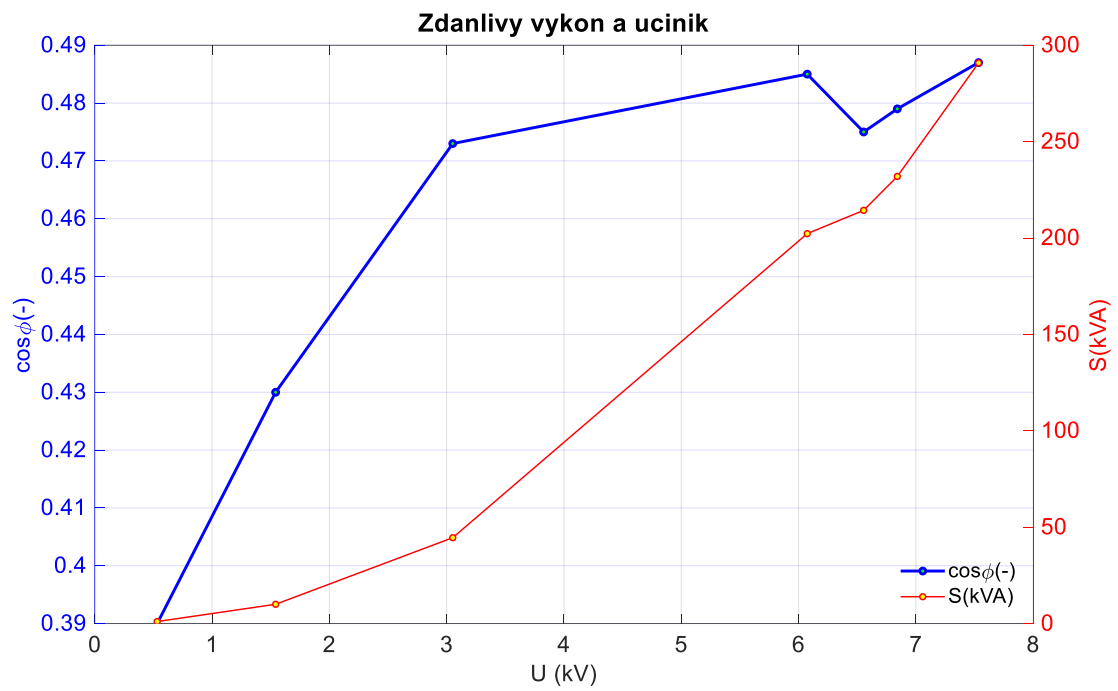
$$cX_{0f} = Z_{0f} \cdot \sin\varphi = 585,6 \cdot 0,873 = 511,2\Omega$$

9 Grafické znázornění

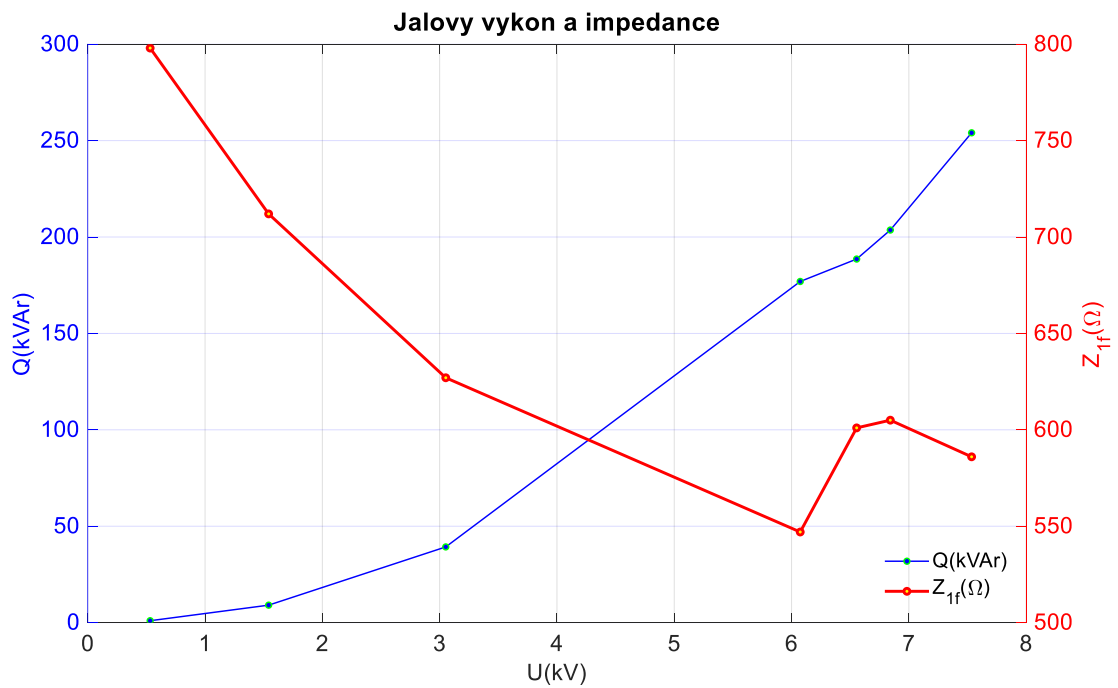
9.1 Sekundární vinutí rozpojena – naprázdno



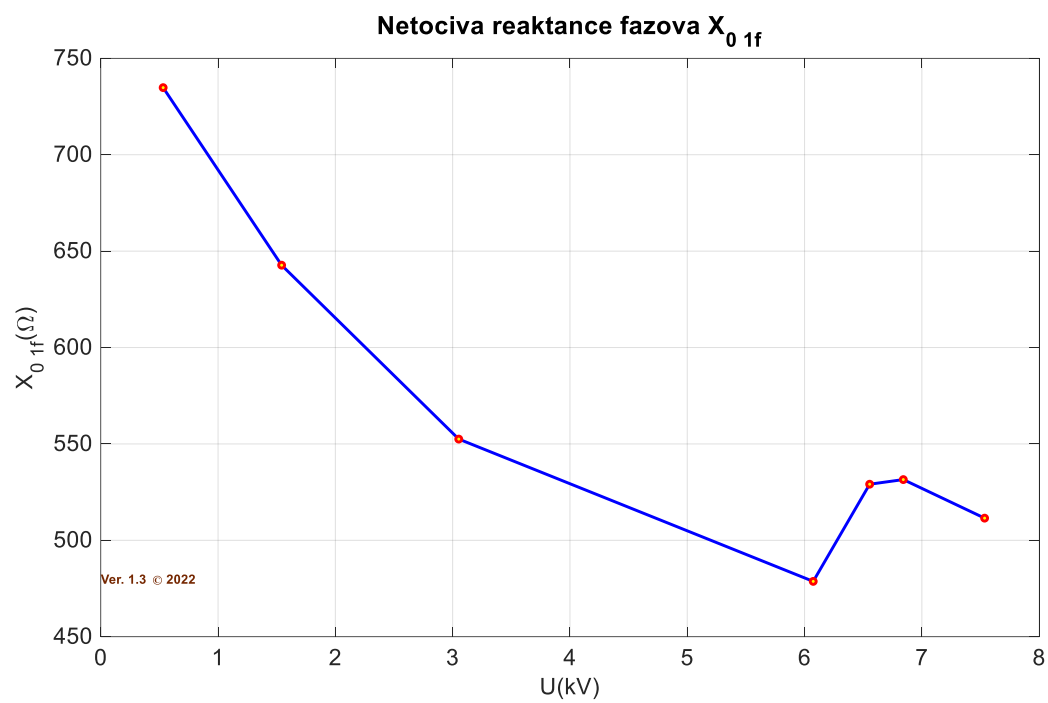
Obr. 9.1 Charakteristika VA a příkon.



Obr. 9.2 Charakteristika zdánlivého výkonu a účinníku.

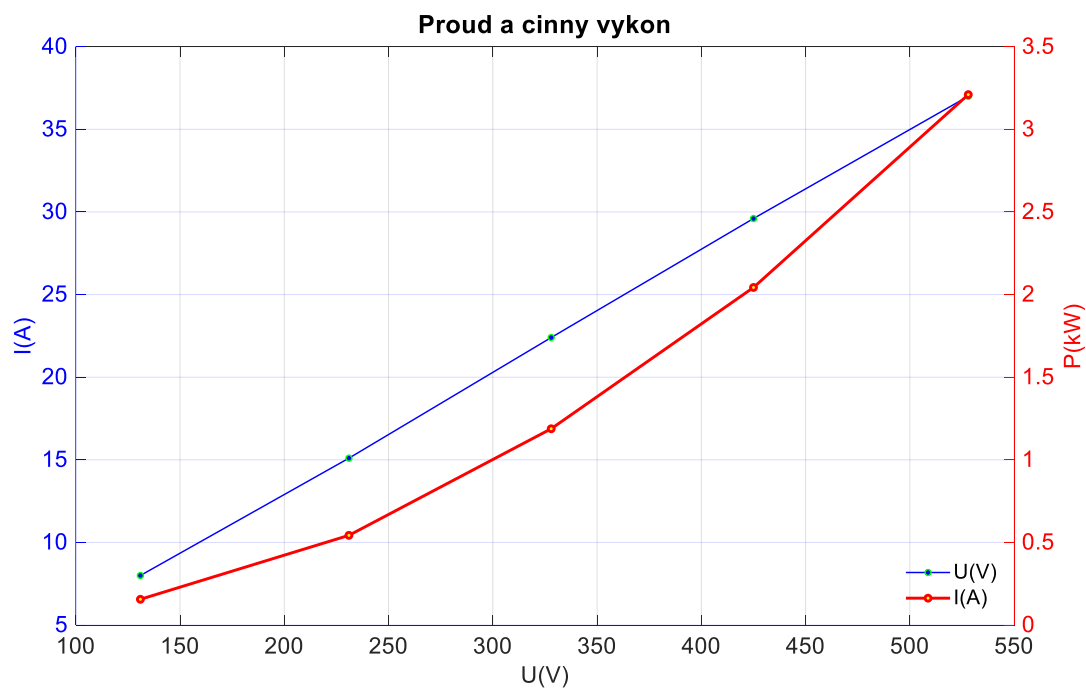


Obr. 9.3 Charakteristika jalového příkonu a fázové impedance.

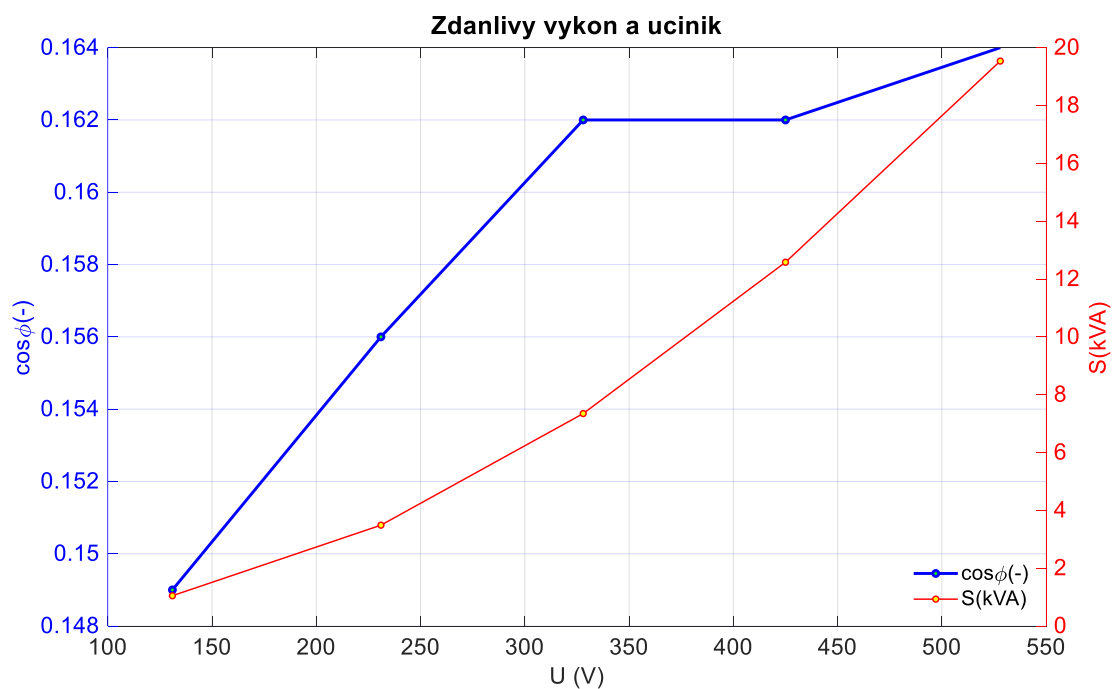


Obr. 9.4 Charakteristika fázové hodnoty netočivé reaktance.

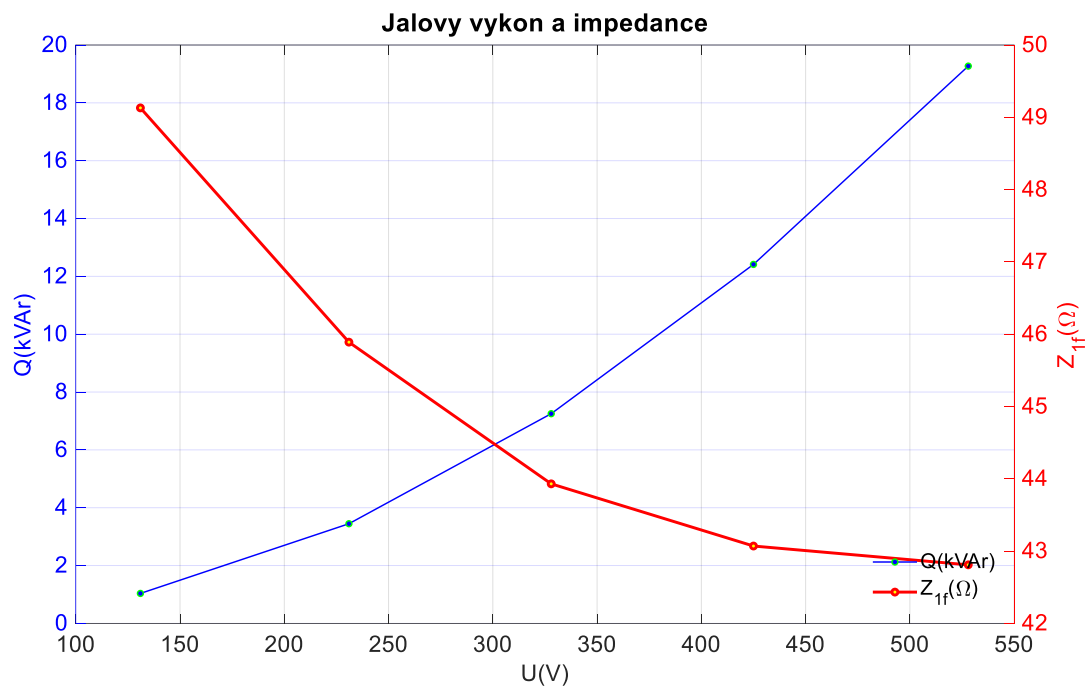
9.2 Sekundární vinutí nakrátko



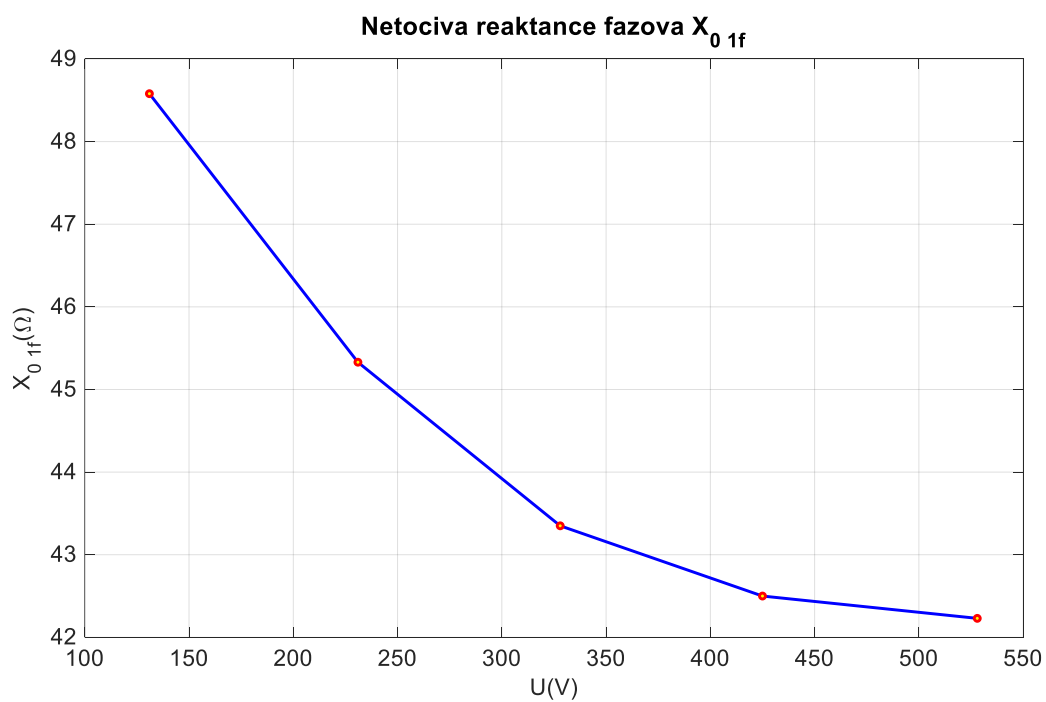
Obr. 9.5 Charakteristika VA a příkon.



Obr. 9.6 Charakteristika zdánlivého příkonu a účinníku



Obr. 9.7 Charakteristika jalového příkonu a impedance



Obr. 9.8 Charakteristika fázové hodnoty netočivé reaktance

10 Závěry a doporučení

Transformátor nesplňuje požadovanou hodnotu netočivé reaktance. Požadovaný fázový proud byl stanoven na hodnotu 15A pro hodnotu netočivé složky napětí 13,8 kV.

Naměřen byl však pro napětí 7,5 kV proud 12,8A. Lineárním přepočtem vyjde pro napětí 13,8 kV proud 23,5A, tj. o 57% více.

Naprostο nepřijatelné jsou však ztráty vznikající v nádobě, které jsou pro napětí pouhých 7,5kV asi 145 kW!

Jako příčinu nesouladu se zadáním lze považovat nevhodný materiál nádoby, který měl být nemagnetický. Nádoba je však vyrobena z materiálu magnetického.

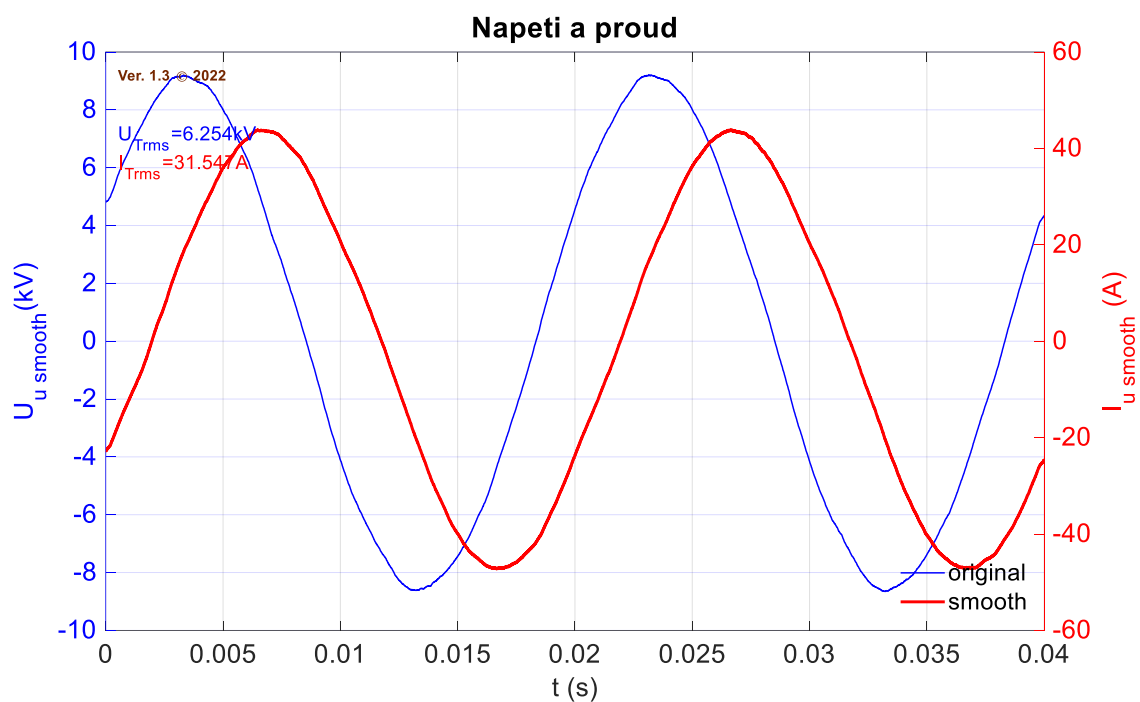
Skoková a nelogická změna veličin pro vyšší napětí může být způsobena chybou měření nebo rušením. Podstatný bude zřejmě též vliv změny teploty transformátoru a tím má na měření vliv i doba měření, po kterou byt transformátor zapnut a vznikaly v něm výše uvedené velké ztráty.

11 Dodatek

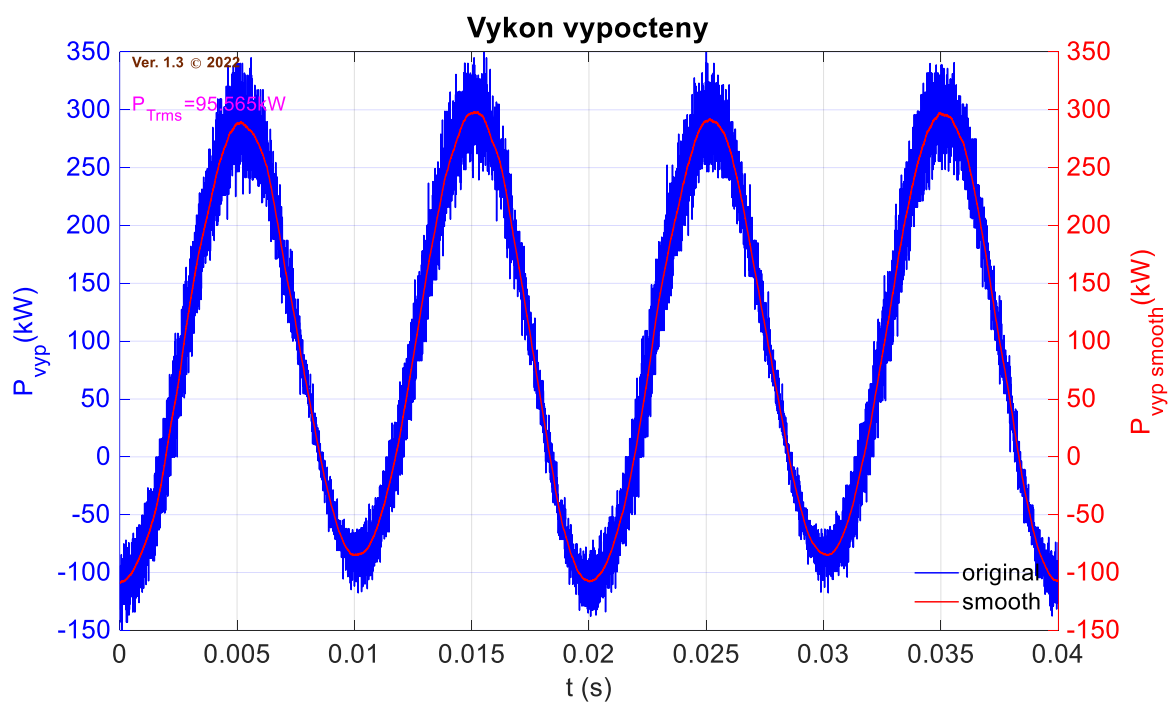
Na požadavek p. Stuchla ze dne 03.10.22 (Elpro Energo) bylo provedeno opakované měření netočivé reaktance dne 07.10.22. Schéma zapojení i přístroje byly shodné, změna byla pouze ve zdroji napájení. Nebyl použit měnič, ale přímo síťové napětí. Protože nebylo možné toto napětí plynule regulovat, bylo odebíráno napětí z různých odboček transformátorů. Proto bylo měření provedeno pouze pro několik málo bodů.

Opakované měření pro harmonické napětí

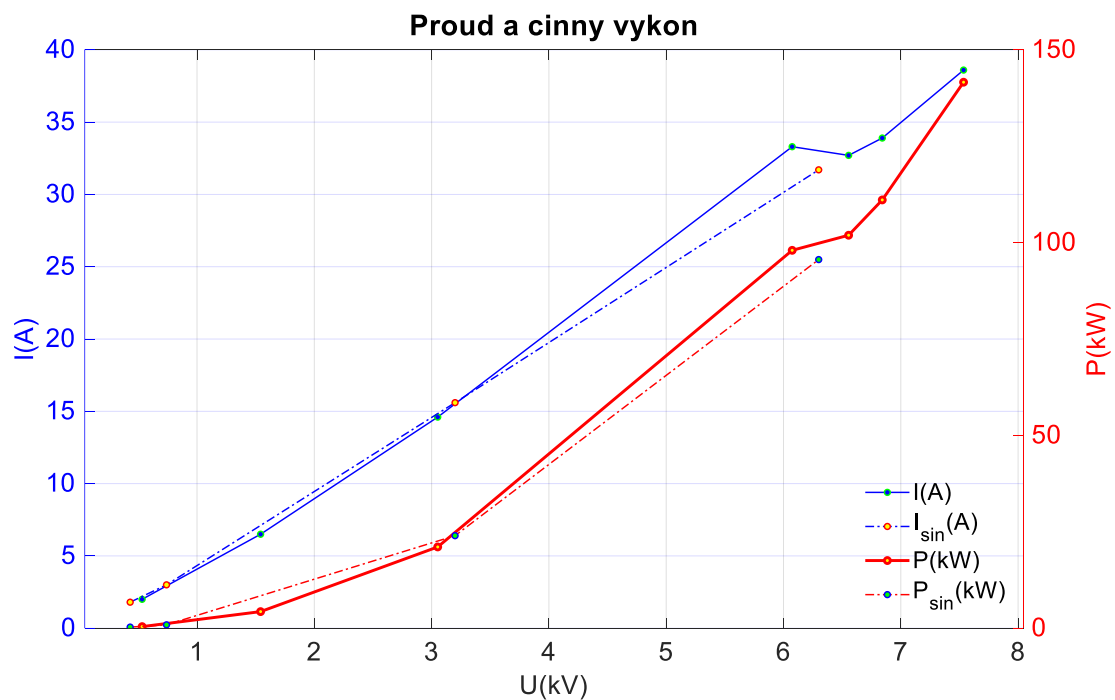
ř.	U (kV)	I (A)	P (kW)	cos (-)	S (kVA)	Q (kVAr)	Zf (Ohm)	Xof (Ohm)
1	0,427	1,83	0,292	0,374	0,78141	0,725	700	649,3
2	0,735	3,07	0,881	0,390	2,25645	2,077	718	661,2
3	3,2	15,6	24,06	0,482	49,92	43,739	615	539,2
4	6,26	31,7	95,57	0,482	198,442	173,913	592	519,2



Obr. 11.1 Napětí a proud v přívodu.



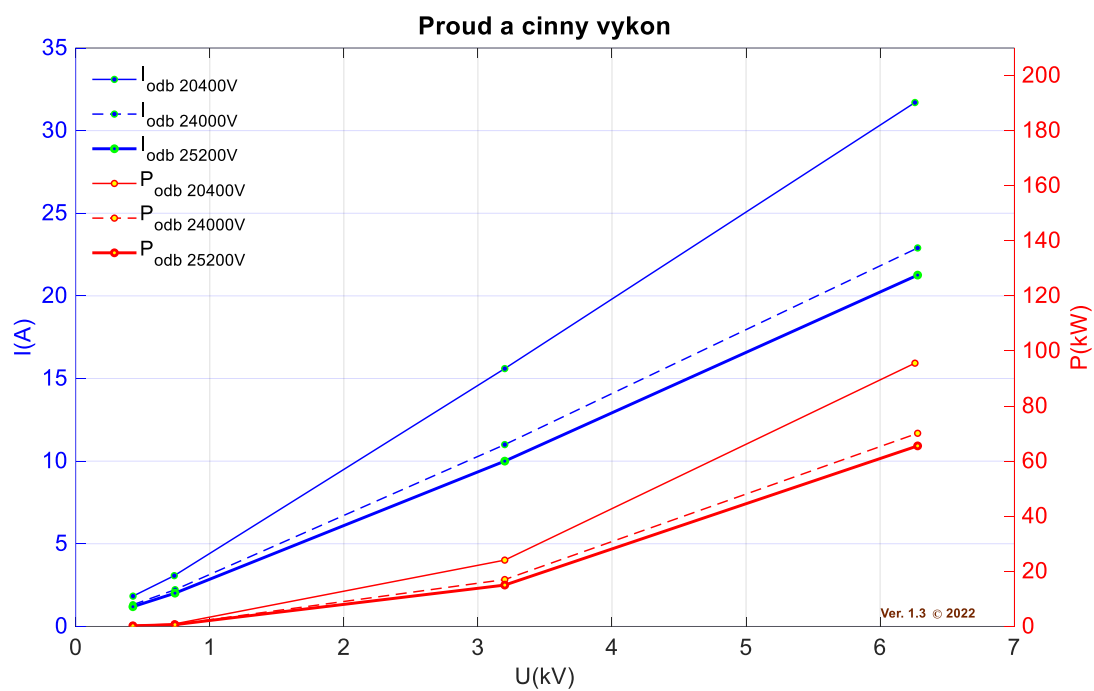
Obr. 11.2 Okamžitý výkon a jeho TRMS hodnota.



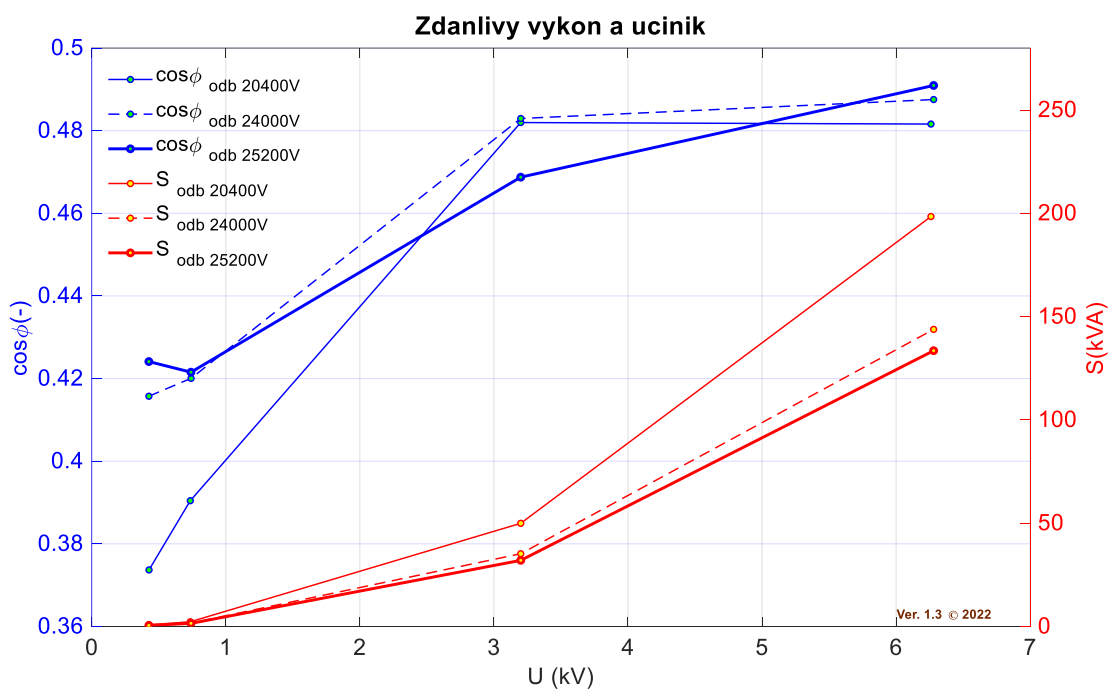
Obr. 11.3 Charakteristika VA (opakované měření) a příkon pro harmonické napájení.

Opakované měření na odbočce č. 3 při harmonickém napájení ze dne 07.10.2022 je znázorněno v původním grafu čerchovanou čarou. Zapnutí transformátoru a vlastní měření bylo provedeno vždy pouze na několik sekund. Proto nedošlo k výraznější změně teploty. Mezi jednotlivými body byla zpravidla prodleva asi 10-15 minut, nutná na přepojení přívodních kabelů.

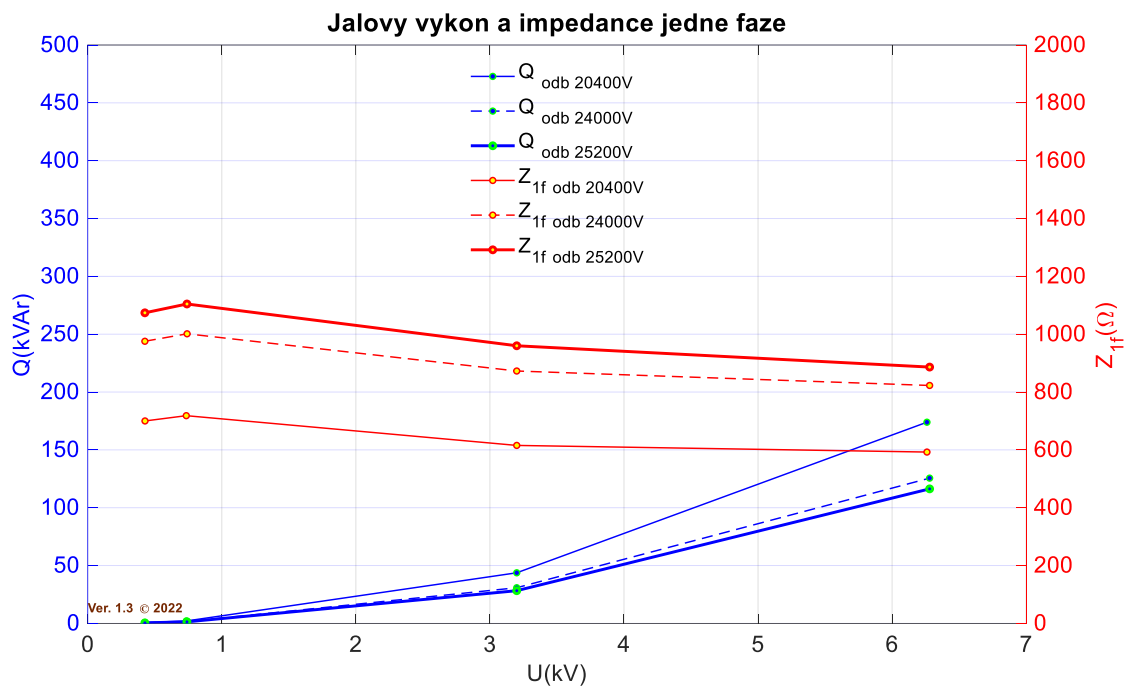
Dne 10.10.2022 bylo provedeno za přítomnosti p. Stuchla detailnější měření, a to na všech odbočkách.



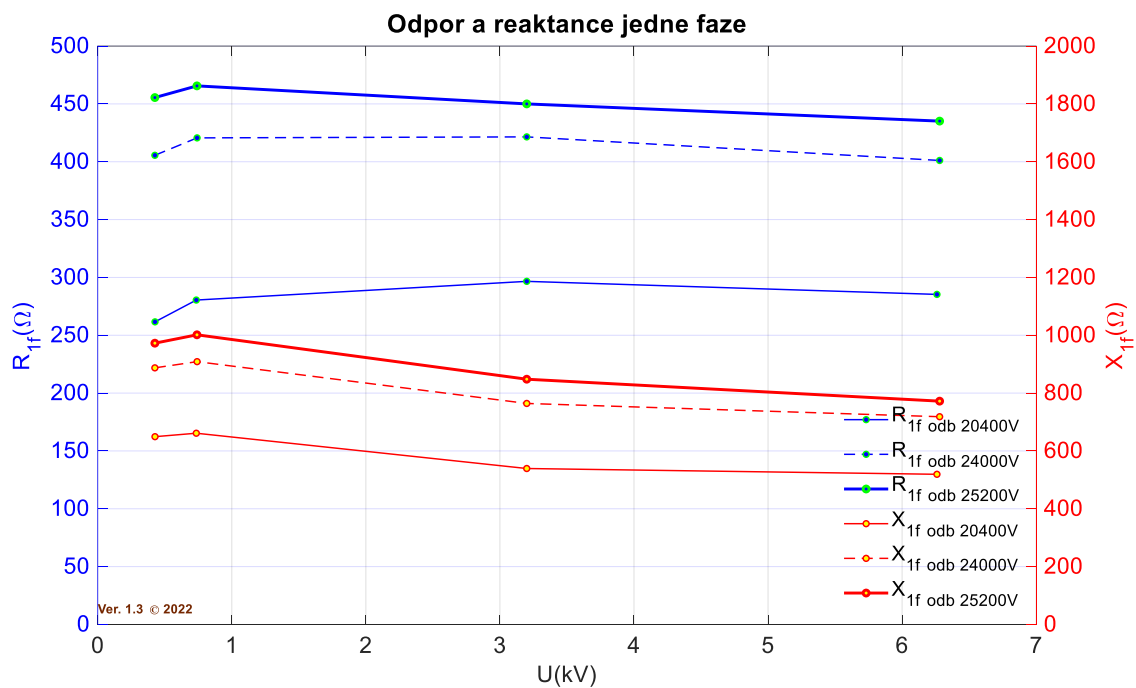
Obr. 11.4 Charakteristika VA (opakované měření) a příkon pro harmonické napájení.



Obr. 11.5 Charakteristika účinníku a zdánlivého příkon (opakované měření) pro harmonické napájení.



Obr. 11.6 Charakteristika impedance (opakované měření) pro harmonické napájení.



Obr. 11.7 Odporová a reaktanční část impedance (opakované měření) pro harmonické napájení.

Literatura

- [1] ČSN EN 60076-5 ed. 2

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Štítek transformátoru	6
Obr. 3.1 Protokol o provedených zkouškách transformátoru	7
Obr. 5.1 Zapojení pro zkoušku netočivé reaktance naprázdno.	9
Obr. 5.2 Zapojení pro zkoušku netočivé reaktance nakrátko.	10
Obr. 5.3 Detail zapojení VN vinutí a VN sond OSC, příklad naměřených hodnot.	11
Obr. 6.1 Napětí a proud v přívodu.	12
Obr. 6.2 Okamžitý příkon a jeho TRMS hodnota.	12
Obr. 9.1 Charakteristika VA a příkon.	15
Obr. 9.2 Charakteristika zdánlivého výkonu a účinníku.	15
Obr. 9.3 Charakteristika jalového příkonu a fázové impedance.	15
Obr. 9.4 Charakteristika fázové hodnoty netočivé reaktance.	16
Obr. 9.5 Charakteristika VA a příkon.	17
Obr. 9.6 Charakteristika zdánlivého příkonu a účinníku	17
Obr. 9.7 Charakteristika jalového příkonu a impedance	18
Obr. 9.8 Charakteristika fázové hodnoty netočivé reaktance	18
Obr. 11.1 Napětí a proud v přívodu.	20
Obr. 11.2 Okamžitý příkon a jeho TRMS hodnota.	20
Obr. 11.3 Charakteristika VA (opakované měření) a příkon pro harmonické napájení.	21
Obr. 11.4 Charakteristika VA (opakované měření) a příkon pro harmonické napájení.	22
Obr. 11.5 Charakteristika účinníku a zdánlivého příkon (opakované měření) pro harmonické napájení.	22
Obr. 11.6 Charakteristika impedance (opakované měření) pro harmonické napájení.	23
Obr. 11.7 Odporová a reaktanční část impedance (opakované měření) pro harmonické napájení.	23

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	02.09.2022	B.Skala
1	7-10	Připomínky, opravy – p. P. Stuchl	08.09.2022	B.Skala
2	11	Opakované měření – p. P. Stuchl	07.10.2022	B. Skala
3	11	Opakované měření – p. P. Stuchl	17.10.2022	B. Skala