

# Ověření maximálního zatěžovacího bodu 3D tištěného synchronního stroje.

**Pracoviště:** Research and Innovation Centre for Electrical Engineering  
**Číslo dokumentu:** 22190 – 028 – 2024  
**Typ zprávy:** Výzkumná zpráva  
**Řešitelé:** Sobotka L., Frank Z., Kaska J., Pechánek R.,  
**Vedoucí projektu:** Roman Pechánek  
**Počet stran:** 36  
**Datum vydání:** 8.1.2024  
**Oborové zařazení:** 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

**Zadavatel / zákazník:**

**Zpracovatel / dodavatel:**  
Západočeská univerzita v Plzni  
Research and Innovation Centre  
for Electrical Engineering  
Univerzitní 8  
306 14 Plzeň  
**Kontaktní osoba:**  
Ing. Lukáš Sobotka  
tel. 377634950  
sobotkal@fel.zcu.cz

## **Tato zpráva vznikla s podporou**

Tato výzkumná zpráva vznikla za podpory TN02000028 - NCK CAMAT - Center for advanced machines and manufacturing technology.

## **Anotace**

Tato výzkumná zpráva se zabývá měřením prvního prototypu 3D tištěného motoru. Konkrétně se bude jednat o maximální dovolené zatížení stroje s ohledem na jeho provozní teplotu

## **Klíčová slova**

3D tisk, PMSM, účinnost, ztráty

## **Název zprávy v anglickém jazyce / Report title**

Loading a 3D Printed Permanent Magnet Synchronous Machine

## **Anotace v anglickém jazyce / Abstract**

This research report deals with the first prototype 3D printed PMSM measurements. This research report focuses on the maximum allowable load of the machine in terms of maximum operating temperature.

## **Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords**

3D printing, PMSM, efficiency, losses

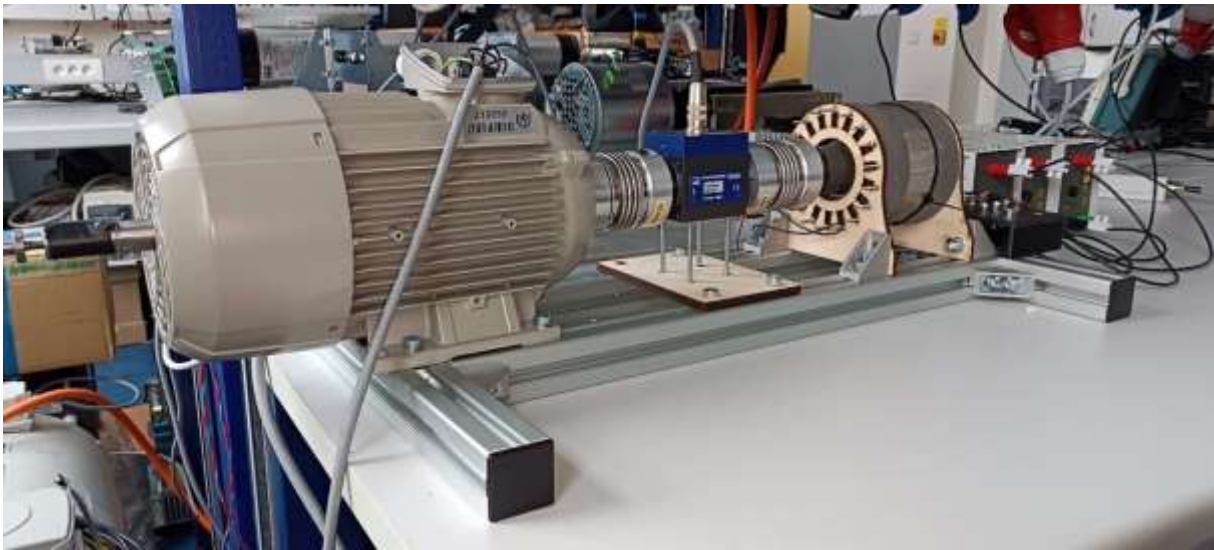
## Seznam symbolů a zkratek

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>NAMĚŘENÁ A DOPOČTENÁ DATA</b> .....	<b>5</b>
2.1	POUŽITÉ VZTAHY .....	5
2.2	NAMĚŘENÁ DATA .....	6
2.3	GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....	8
2.4	OSCILOGRAMY .....	10
2.4.1	<i>Měření stroje za studena</i> .....	10
2.4.1.1	10Hz 1A .....	10
2.4.1.2	10Hz 2A .....	11
2.4.1.3	20Hz 1A .....	12
2.4.1.4	20Hz 2A .....	13
2.4.1.5	50Hz 1,5A .....	14
2.4.1.6	50Hz 2,6A .....	15
2.4.1.7	60 Hz 1,5 A .....	16
2.4.1.8	60 Hz 2,5 A .....	17
2.4.2	<i>Měření při ustálené teplotě</i> .....	18
2.4.2.1	10Hz 1A .....	18
2.4.2.2	10Hz 2A .....	19
2.4.2.3	20Hz 1A .....	20
2.4.2.4	20Hz 2A .....	21
2.4.2.5	50Hz 1,5A .....	22
2.4.2.6	50Hz 2,5A .....	23
2.4.2.7	60Hz 1,4A .....	24
2.4.2.8	60Hz 2,3A .....	25
2.4.3	<i>Měření indukovaného napětí</i> .....	26
2.4.3.1	10Hz, studený stav .....	26
2.4.3.2	10Hz teplý stav .....	26
2.4.3.3	10Hz 50°C .....	27
2.4.3.4	10Hz 70°C .....	27
2.4.3.5	20Hz, studený stav .....	27
2.4.3.6	20Hz, teplý stav .....	27
2.4.3.7	20Hz 60°C .....	28
2.4.3.8	20Hz 80°C .....	28
2.4.3.9	50Hz studený stav .....	29
2.4.3.10	50 Hz teplý stav .....	29
2.4.3.11	50Hz 100°C .....	30
2.4.3.12	50Hz 125°C .....	30
2.4.3.13	60Hz studený stav .....	31
2.4.3.14	60Hz teplý stav .....	31
2.4.3.15	60Hz 100°C .....	32
2.4.3.16	60Hz 125°C .....	32
<b>3</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>33</b>

## 1 Úvod

Tato výzkumná zpráva se zabývá měřením zatěžovacích charakteristik prvního prototypu 3D tištěného motoru. Ve zprávě budou vyhodnoceny jednotlivé ztráty ve stroji. Cílem této výzkumné zprávy je zjistit maximální dovolený trvalý výkon dodávaný do obvodu. Motor je omezen teplotní třídou vinutí a konstrukčním uspořádáním stroje, které nedovoluje překročit teplotu 155°C. S ohledem na bezpečnost byly zatěžovací zkoušky měřeny do 125 °C ustálené teploty. Generátor byl zatěžován čistě odporovou zátěží. Při nízkých otáčkách byl reostat nastaven na minimální možnou hodnotu. Kvůli nízkým otáčkám a špatnému chlazení hnacího stroje nebylo možné synchronní generátor v této oblasti dlouhodobě zatěžovat. Z naměřených dat však vyplývá, že účinnost stroje v této oblasti je velmi nízká a data v této oblasti nemají téměř žádný přínos. Z tohoto důvodu je v této oblasti nízký počet bodů.



Obr. 1. Měřené soustrojí

## 2 Naměřená a dopočtená data

### 2.1 Použité vztahy

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60f}{8}$$

Kde  $n$  jsou otáčky,  $f$  je frekvence a počet pólpárů je 8

$$I = \frac{(I_1 + I_2 + I_3)}{3}$$

Kde  $I_1, I_2, I_3$  jsou proudy fází, a  $I$  je jejich průměr.

$$dP_j = 3 \cdot R_T \cdot I^2$$

Kde  $dP_j$  jsou Joulovy ztráty,  $R_T$  je odpor vztažený na teplotu vinutí.

$$M = U_m * \frac{50}{10}$$

Kde  $M$  je moment a  $U_m$  je napětí změřené na momentovém čidle, maximální rozsah momentového čidla bylo 50Nm při výstupním napětí momentového čidla 10V.

$$P_p = M \cdot \frac{n}{9,55}$$

Kde  $P_p$  je příkon

$$dP_{celk} = P_p - P_{el}$$

Kde  $\Delta P_{celk}$  jsou celkové ztráty a  $P_{el}$  je elektrický výkon

$$\Delta P_{ost} = \Delta P_{celk} - (\Delta P_{Fe} + \Delta P_m) - \Delta P_j$$

Kde  $\Delta P_{ost}$  jsou ostatní ztráty vzniklé ve stroji, většinou vzniklé v důsledku chyby měření,  $\Delta P_{fe}$  a  $\Delta P_m$  jsou ztráty v železe a mechanické ztráty naprázdno.

$$T = \frac{\left( \frac{U_{i1} \cdot f_2}{U_{i2} \cdot f_1} - 1 \right)}{\alpha} + T_0$$

Kde  $T$  je teplota magnetů,  $U_i$  je indukované napětí,  $f$  je frekvence,  $\alpha$  teplotní koeficient magnetů,  $T_0$  je studená teplota magnetů. Index 1 je pro studený stroj a 2 stroj při ustálené teplotě.

## 2.2 Naměřená data

V následujících tabulkách jsou vyhodnocena naměřená a dopočtená data. Některá data byla změřena nepřesně a po jejich porovnání s ostatními nedávají smysl. Jedná se například o vyhodnocení teplot z indukovaného napětí, které je v Tab. 3. Všechny špatně naměřené hodnoty jsou označeny červeně a nelze s nimi dále uvažovat ve vyhodnocení tohoto měření.

Tab. 1 je souhrnem ztrát vzniklých při měření naprázdno. Ztráty byly vyhodnocovány z momentu při studeném stroji a následně na konci oteplovací zkoušky naprázdno. Vlivem demagnetizace magnetů došlo k poklesu ztrát při vyšších teplotách než byla teplota okolí. Obr. 2 je pak grafickou interpretací výše zmíněné tabulky.

V Tab. 2 jsou shrnuta naměřená data vztahující se k maximální povolené teplotě a frekvenci. Pro tuto výzkumnou zprávu bylo nutné vyhodnotit činný výkon, který byl dodáván do zátěže, činný příkon a z nich vyhodnocená účinnost. Elektrický výkon byl vyhodnocován pro teplý a studený stav stroje. Účinnost pak byla vyhodnocována pro teplý stroj.

Tab. 1. Naměřená data z měření naprázdno

n (ot/min)	75	150	375	450	750
f (Hz)	10	20	50	60	100
$T_{stator}(^{\circ}C)$	39	56	86	94	130
$\Delta P_{teplé}(W)$	8,13	16,1	41,9	52,6	95,0
$\Delta P_{studené}(W)$	8,6	17,7	49,2	62,8	109,2

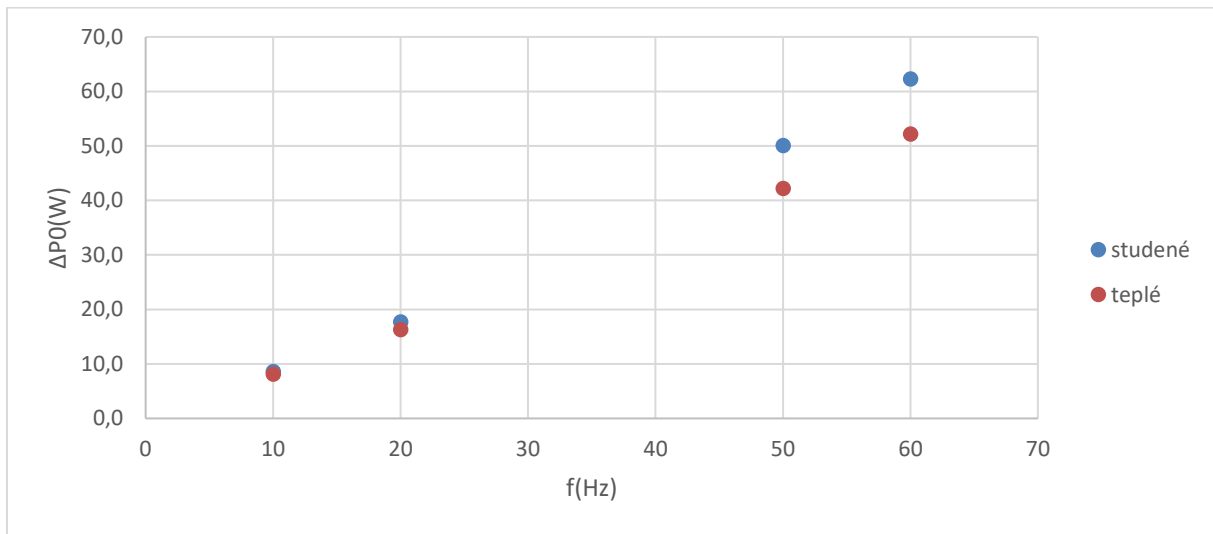
Tab. 2. Naměřená a dopočtená data

<b>f (Hz)</b>	<b>T<sub>coil</sub> (°C)</b>	<b>n (ot/min)</b>	<b>ΔP<sub>j</sub> (W)</b>	<b>ΔP<sub>ost</sub> (W)</b>	<b>ΔP<sub>celk</sub> (W)</b>	<b>P<sub>el tepley</sub> (W)</b>	<b>P<sub>el studeny</sub> (W)</b>
50,85	125	381	23	2,3	67,6	69,42	83,94
60,2	125	452	20	0,1	72,5	85,38	99,78
50,15	100	376	7	3,4	52,8	47,04	52,64
60,41	100	453	6	2,6	60,8	53,10	59,81
19,91	80	149	13	2,9	32,5	16,24	20,03
10,16	70	76,2	12	4,9	24,6	1,446	2,087
19,83	60	149	3	1,8	21,0	11,85	12,26
10,12	50	76	3	3,3	14,4	4,07	4,402
<b>U<sub>s</sub> (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>R (Ω)</b>	<b>η (%)</b>	<b>P<sub>p</sub> (W)</b>	<b>M (Nm)</b>	<b>U<sub>m</sub> (V)</b>	
16,960	2,61	1,13	50,7	136,98	3,43	0,686	
21,080	2,45	1,13	54,1	157,91	3,34	0,668	
19,300	1,52	1,04	47,1	99,84	2,54	0,507	
23,840	1,39	1,04	46,6	113,86	2,40	0,480	
5,400	2,13	0,98	33,3	48,71	3,12	0,623	
0,691	2,01	0,95	5,5	26,08	3,3	0,654	
7,200	1,04	0,92	36,1	32,86	2,11	0,422	
2,700	1,06	0,88	22,0	18,48	2,33	0,465	

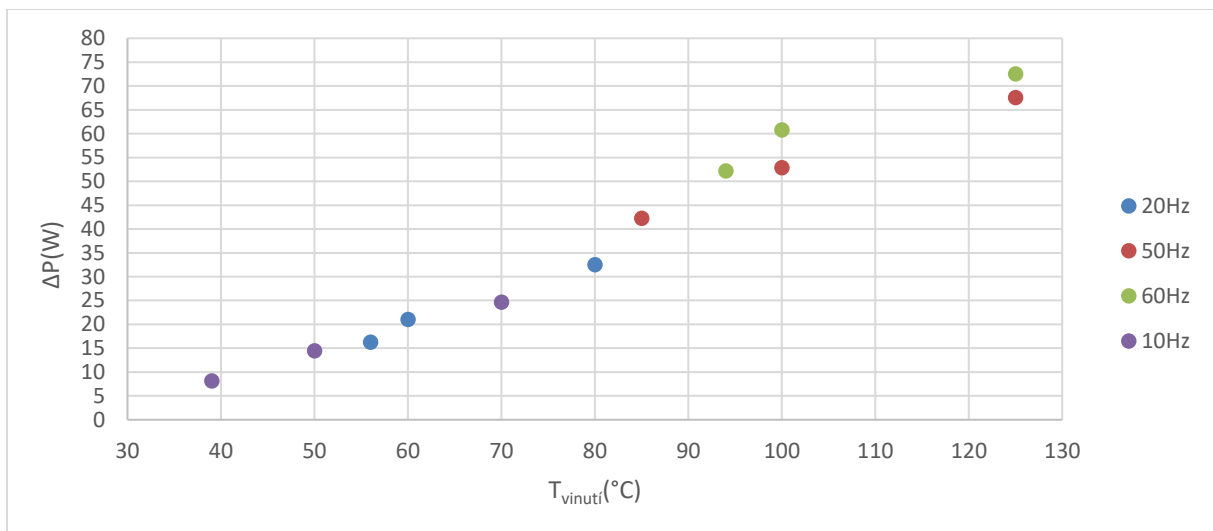
Tab. 3. Naměřená indukovaná napětí

<b>T<sub>vinuti</sub></b>	<b>f (Hz)</b>	<b>U<sub>i</sub> (V)</b>	<b>T<sub>mag</sub> (°C)</b>
23	10,03	2,779	23
23	19,78	5,337	23
23	49,7	13,26	23
23	60,89	16,3	23
50	10,61	2,636	119
60	20,22	5,438	26
80	20,86	5,58	30
100	49,94	12,78	58
100	59,86	15,37	58
120	50,44	12,89	60
120	60,81	15,44	68

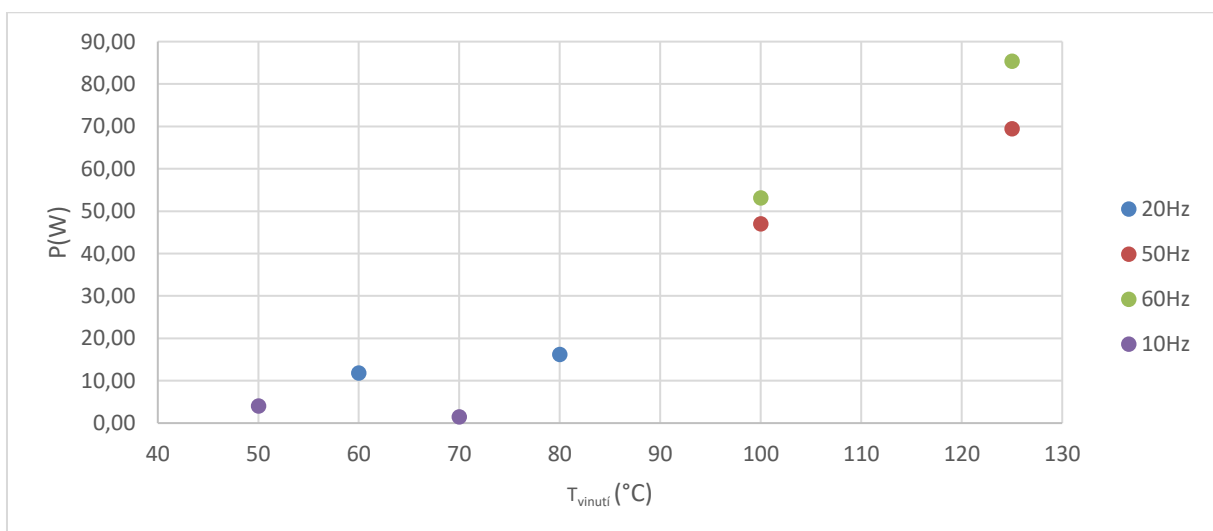
### 2.3 Grafické zobrazení naměřených dat



Obr. 2. Závislost ztrát naprázdno na otáčkách a teplotě

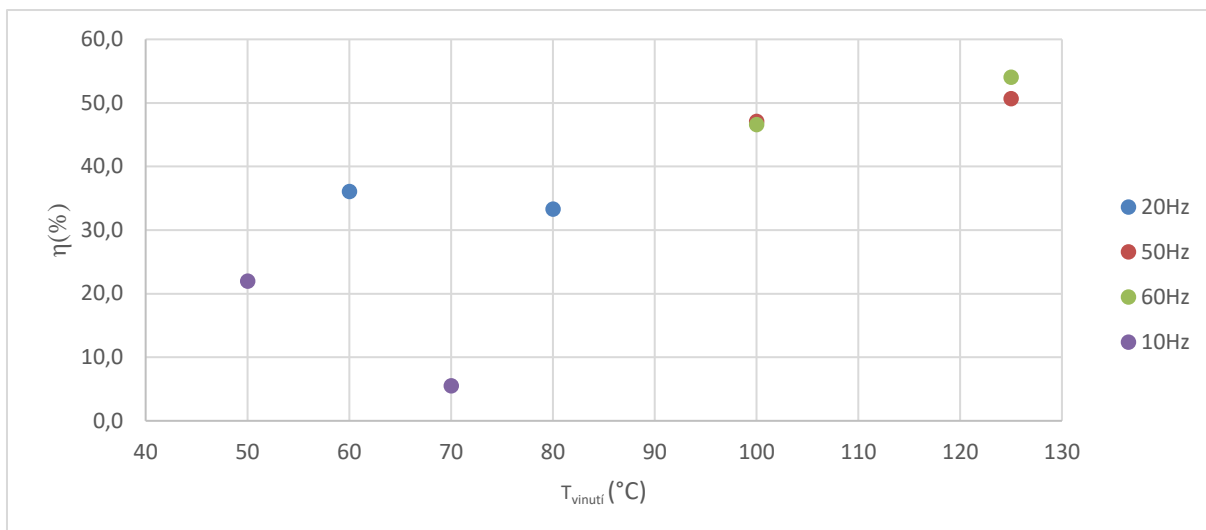


Obr. 3. Závislost celkových ztrát na teplotě a frekvenci

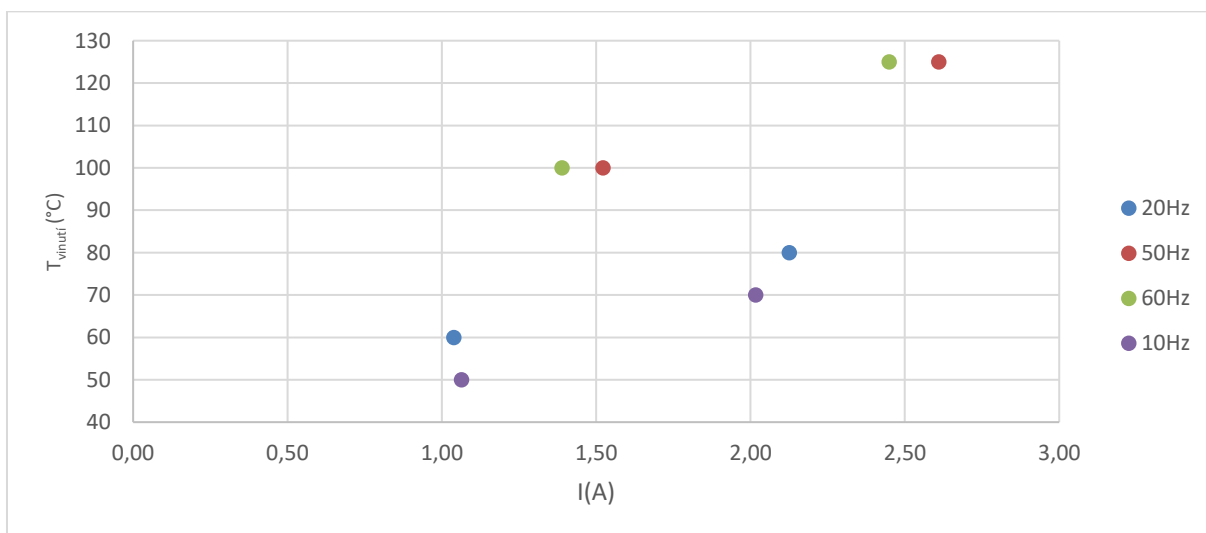


Obr. 4. Možný dodávaný výkon při odporové zátěži





Obr. 5. Účinnost motoru při různém zatěžování



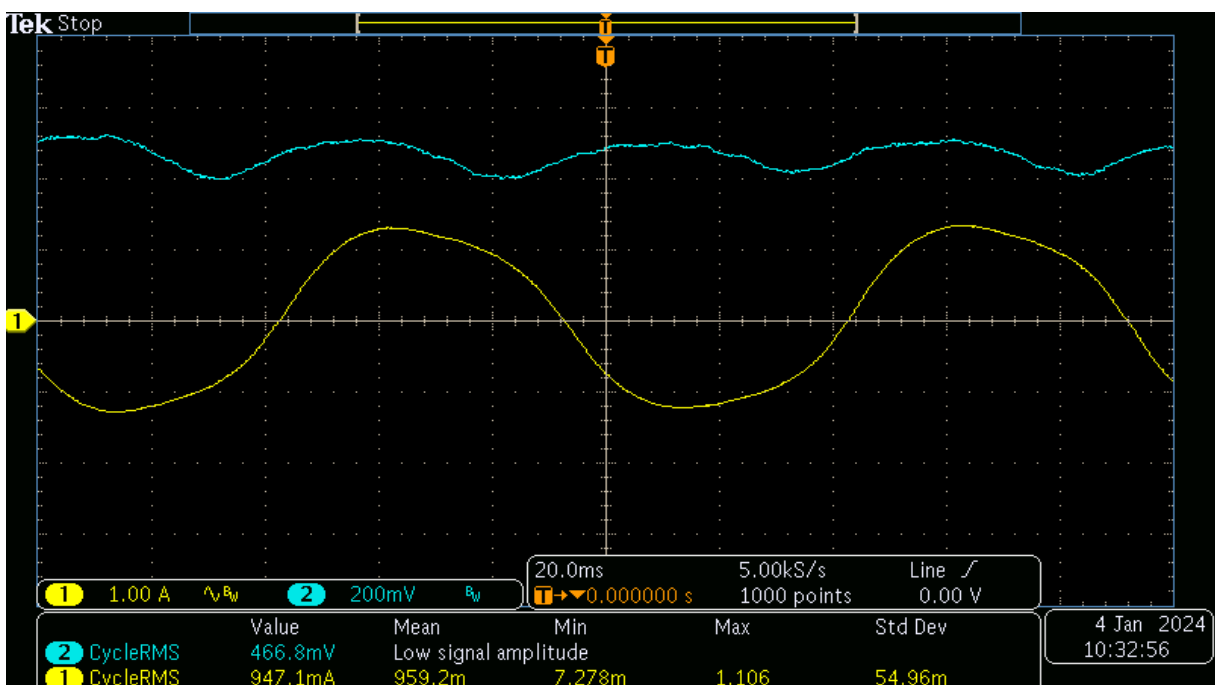
Obr. 6. Závislost teploty motoru na frekvenci a proudu zátěží

## 2.4 Oscilogramy

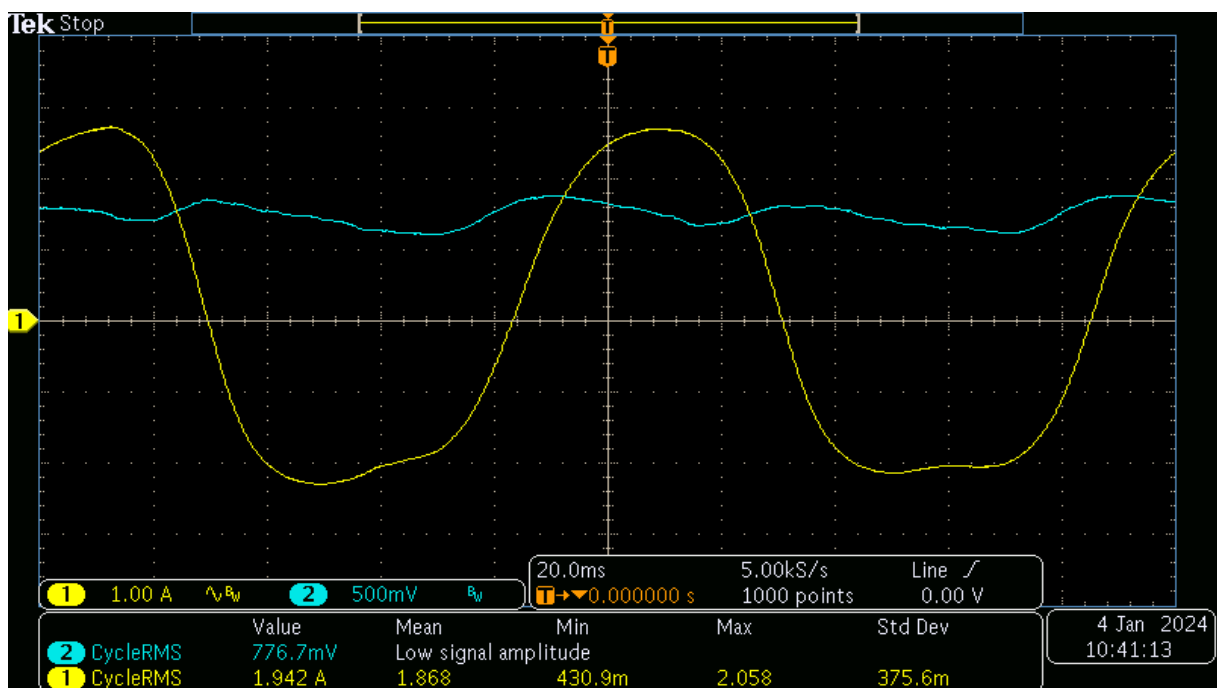
Na následujících oscilogramech jsou zobrazeny naměřená data z výše uvedených tabulek. Zpravidla první oscilogram zobrazuje elektrické veličiny a druhý zbylý proud zátěží a napětí generované momentovým čidlem. Činný výkon byl měřen v Aronově zapojení.

### 2.4.1 Měření stroje za studena

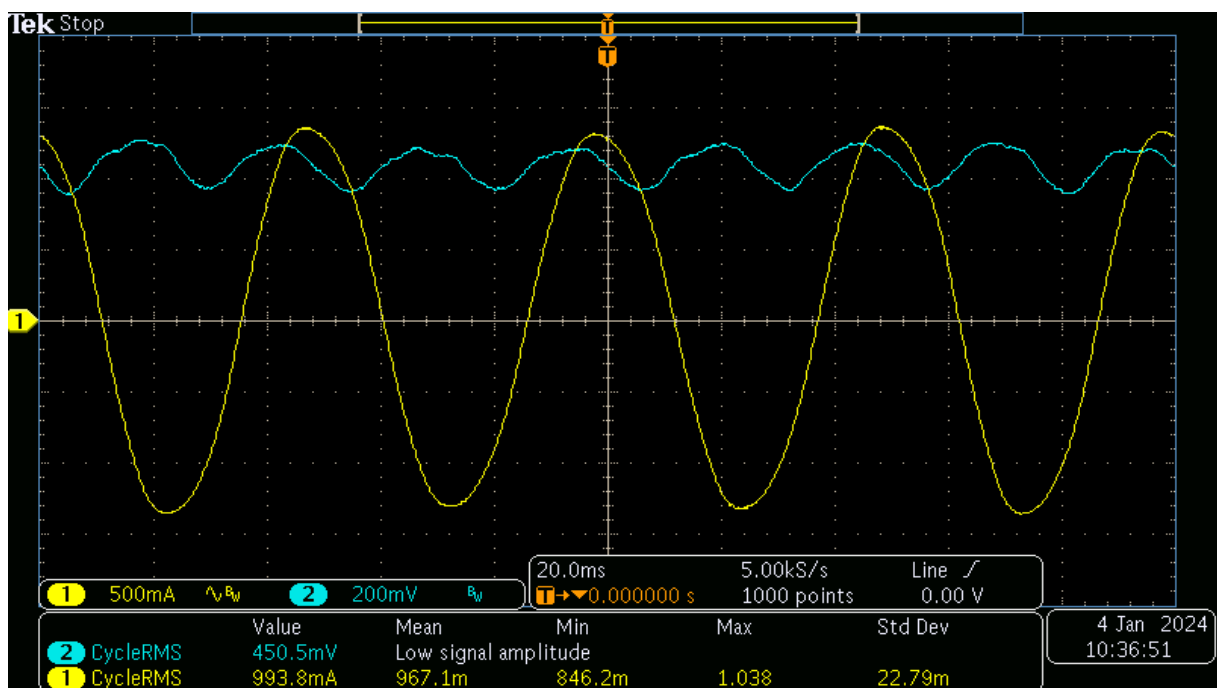
#### 2.4.1.1 10Hz 1A



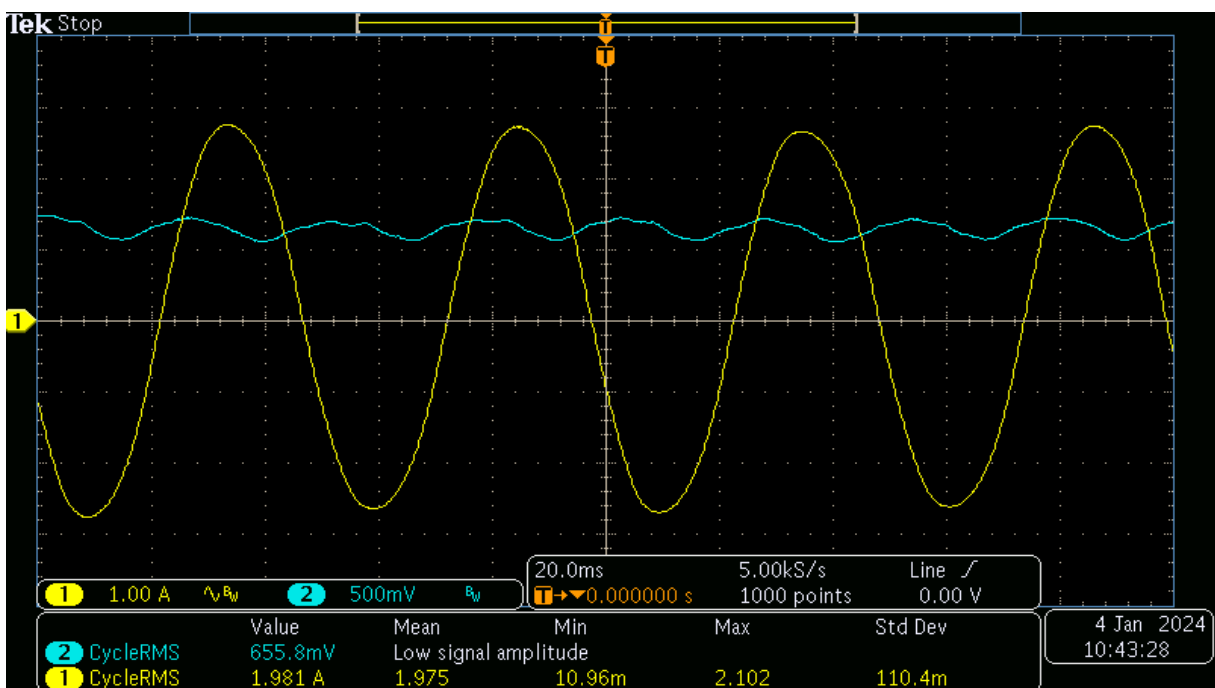
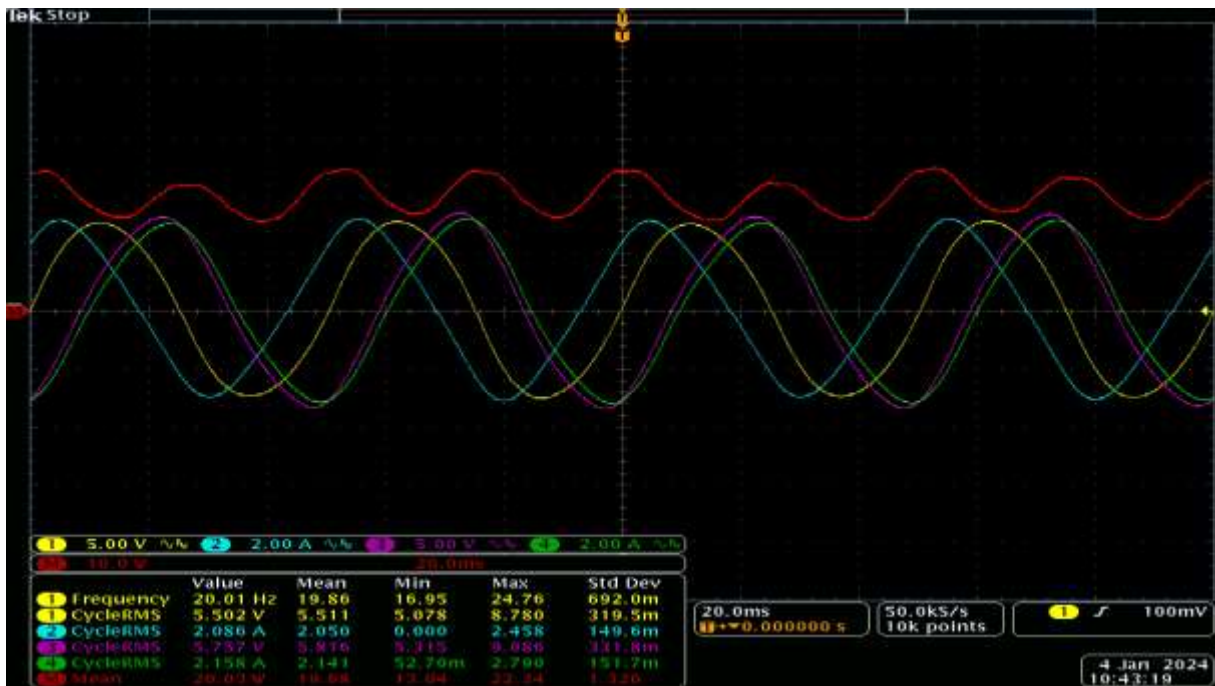
### 2.4.1.2 10Hz 2A



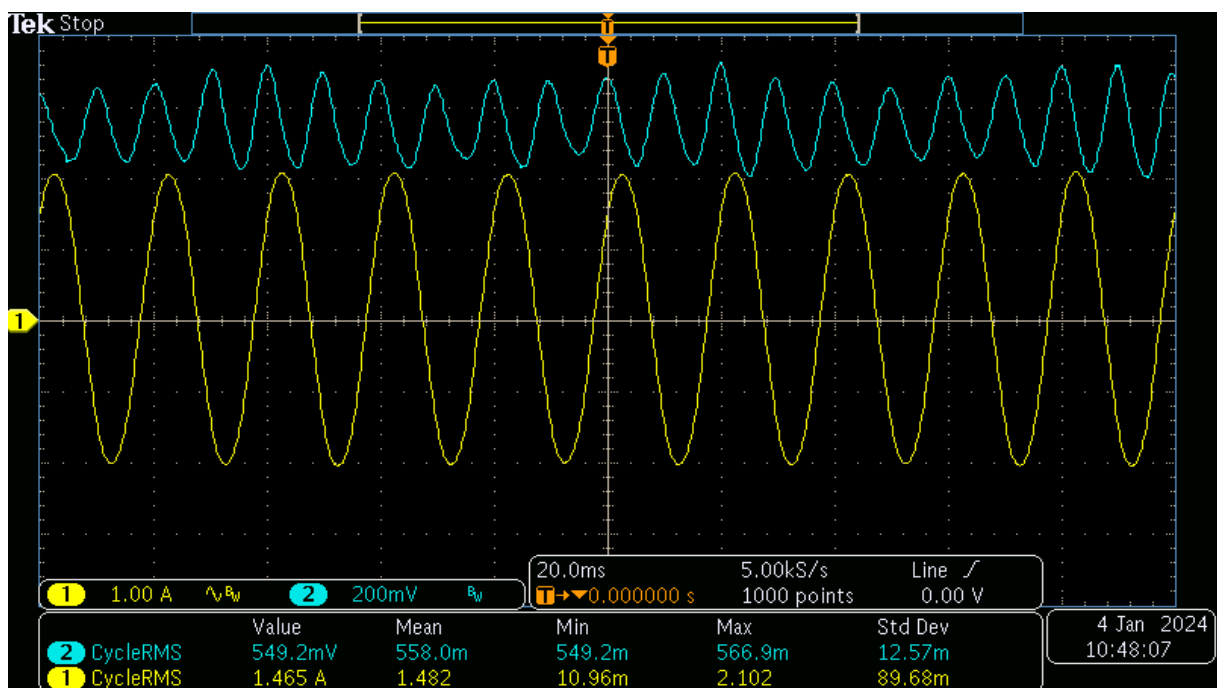
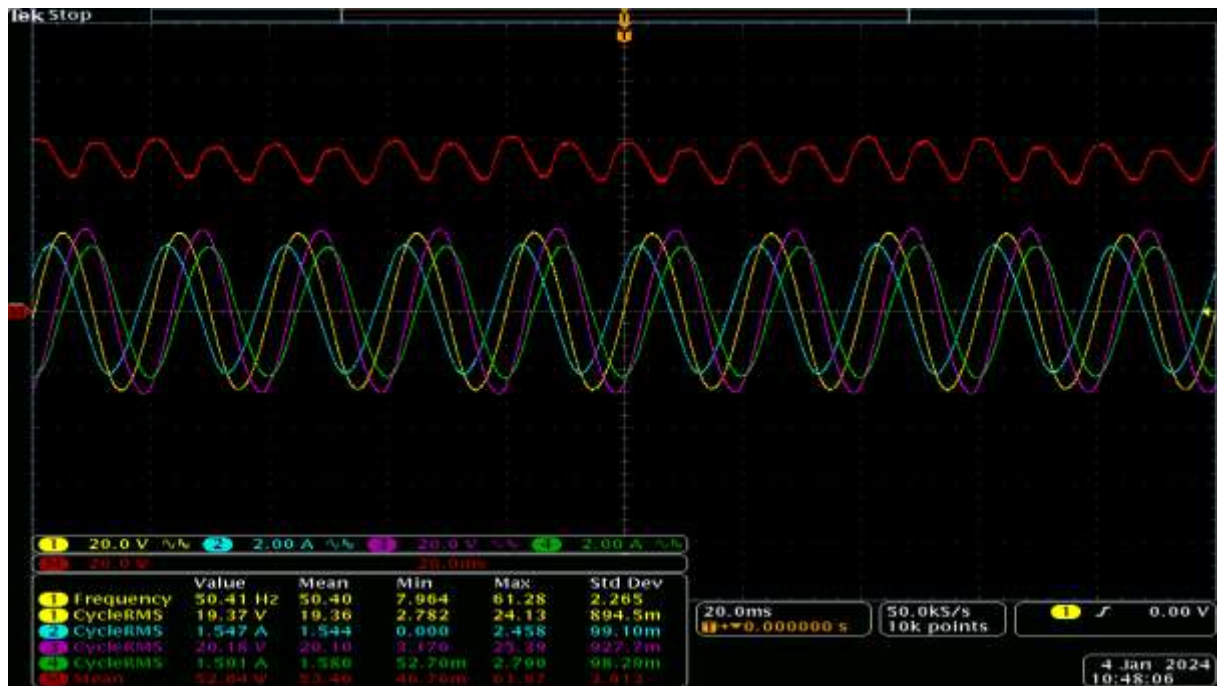
### 2.4.1.3 20Hz 1A



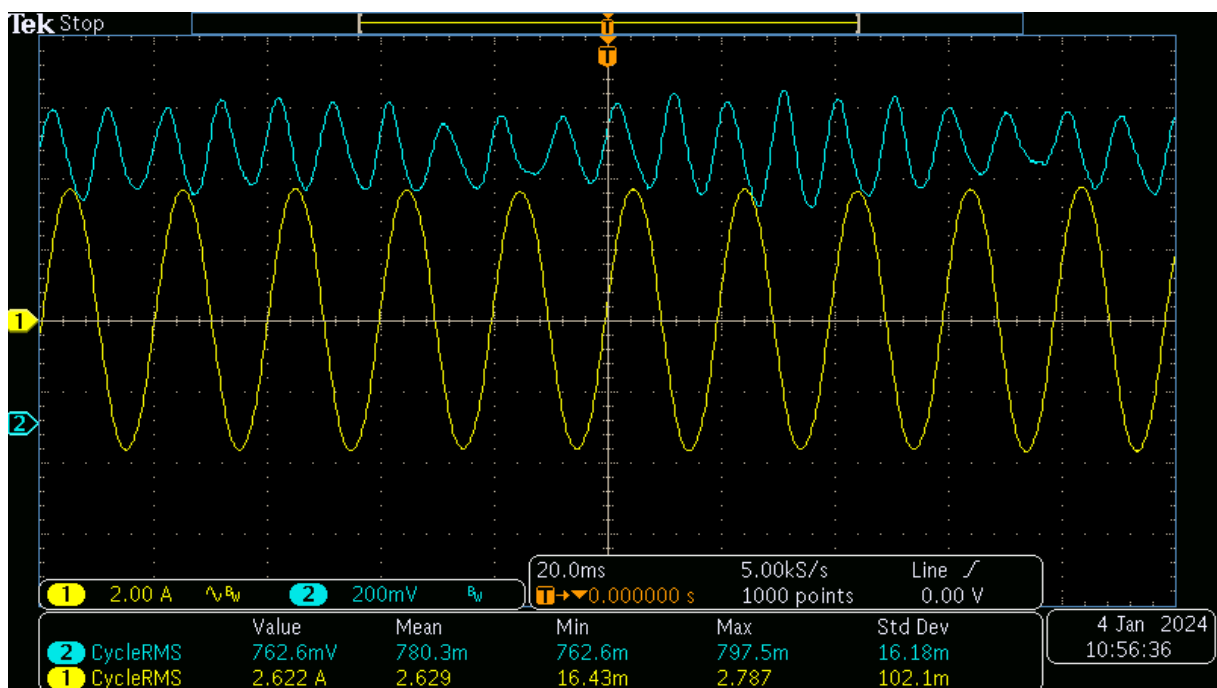
### 2.4.1.4 20Hz 2A



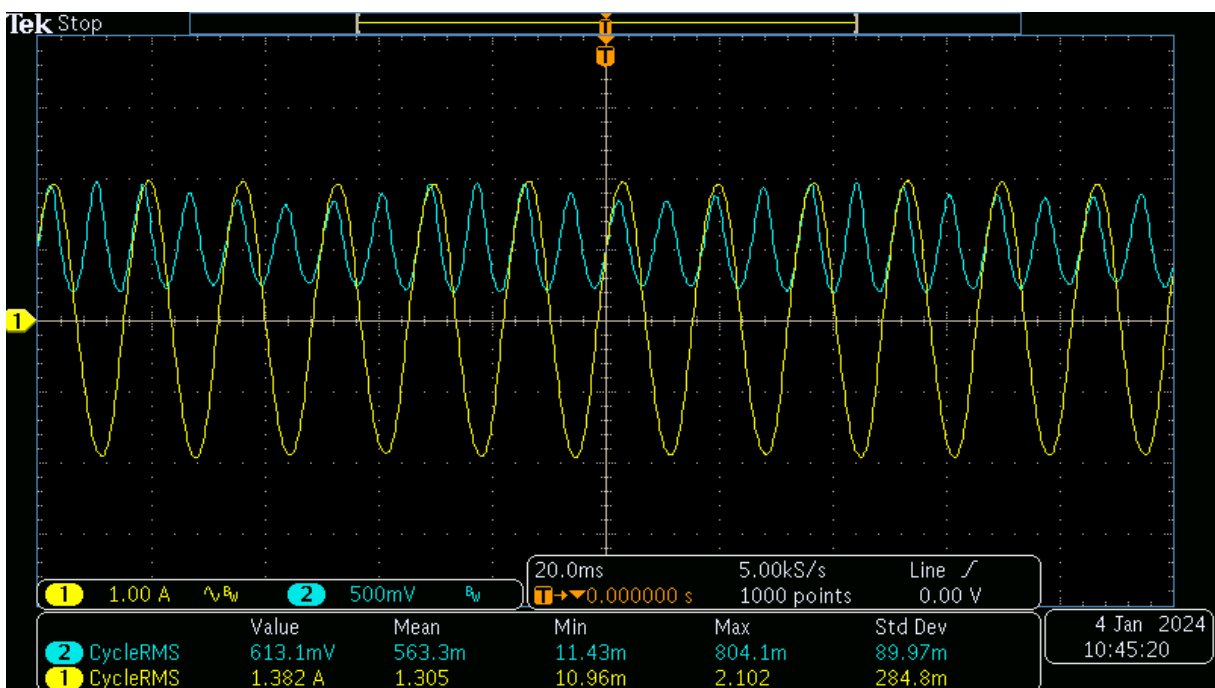
### 2.4.1.5 50Hz 1,5A



### 2.4.1.6 50Hz 2,6A

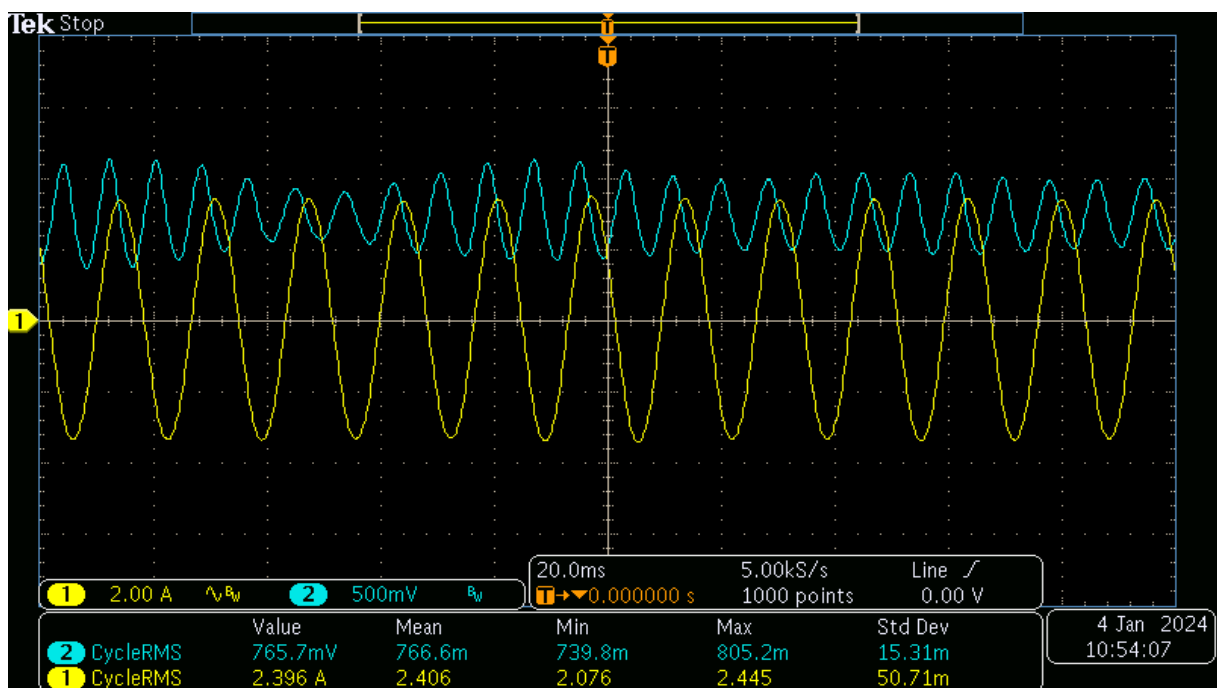


### 2.4.1.7 60 Hz 1,5 A



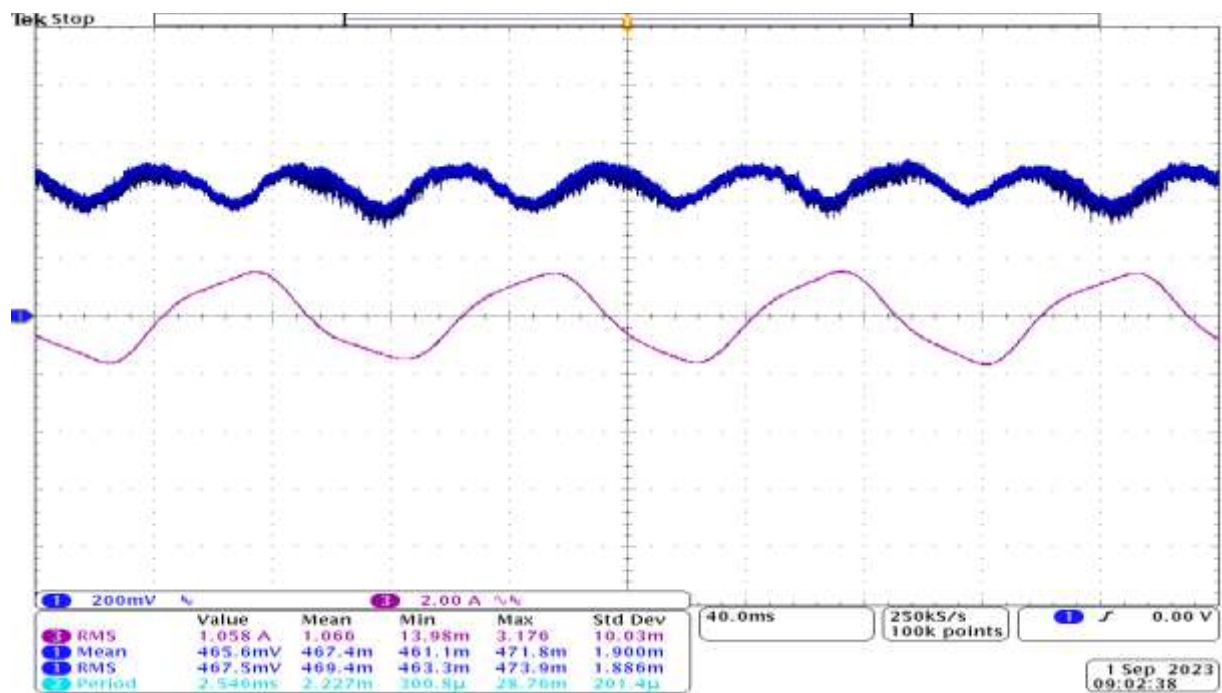
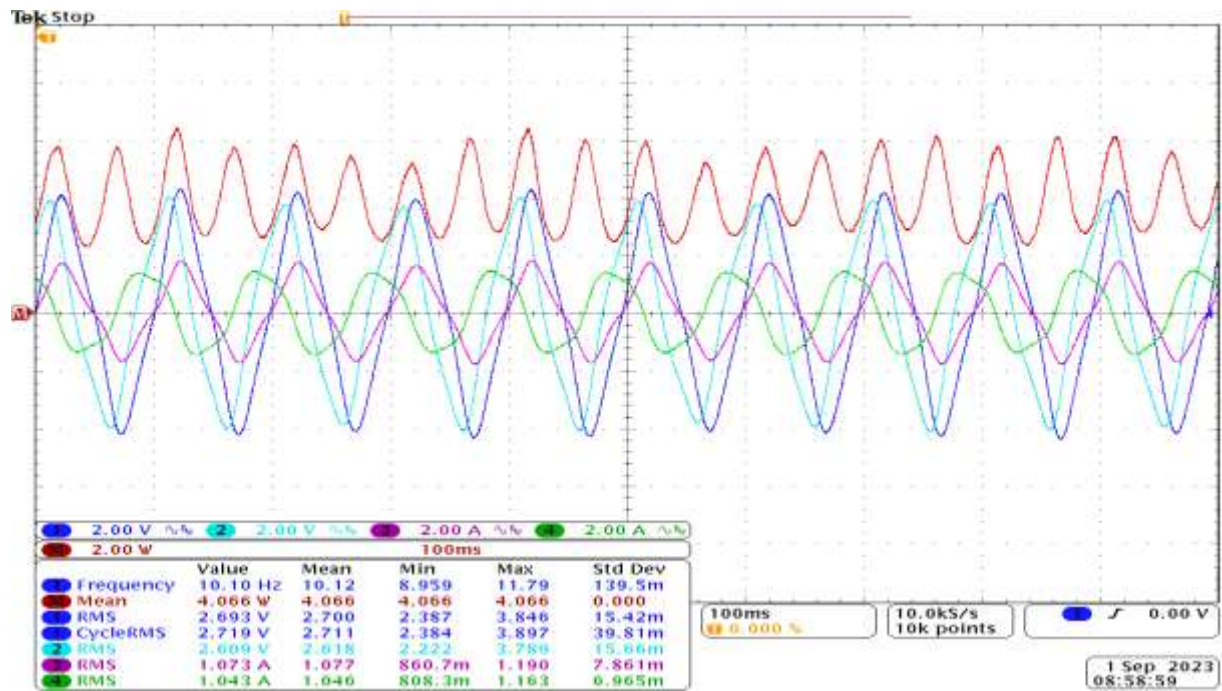


### 2.4.1.8 60 Hz 2,5 A

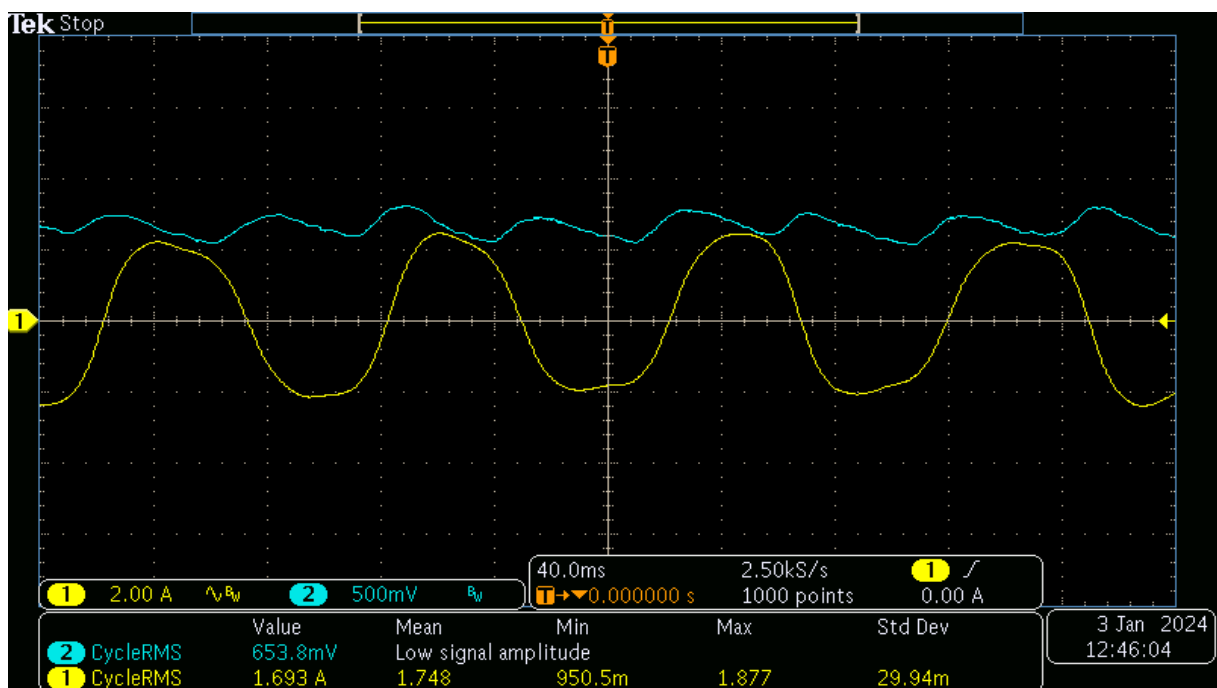


## 2.4.2 Měření při ustálené teplotě

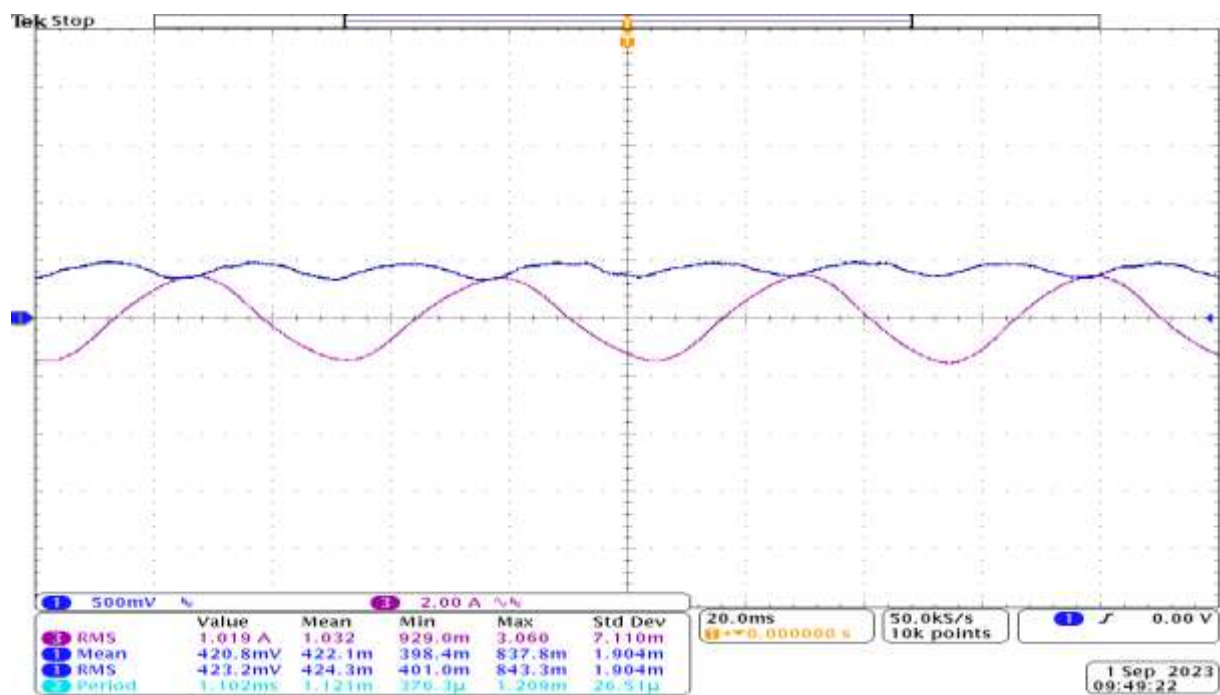
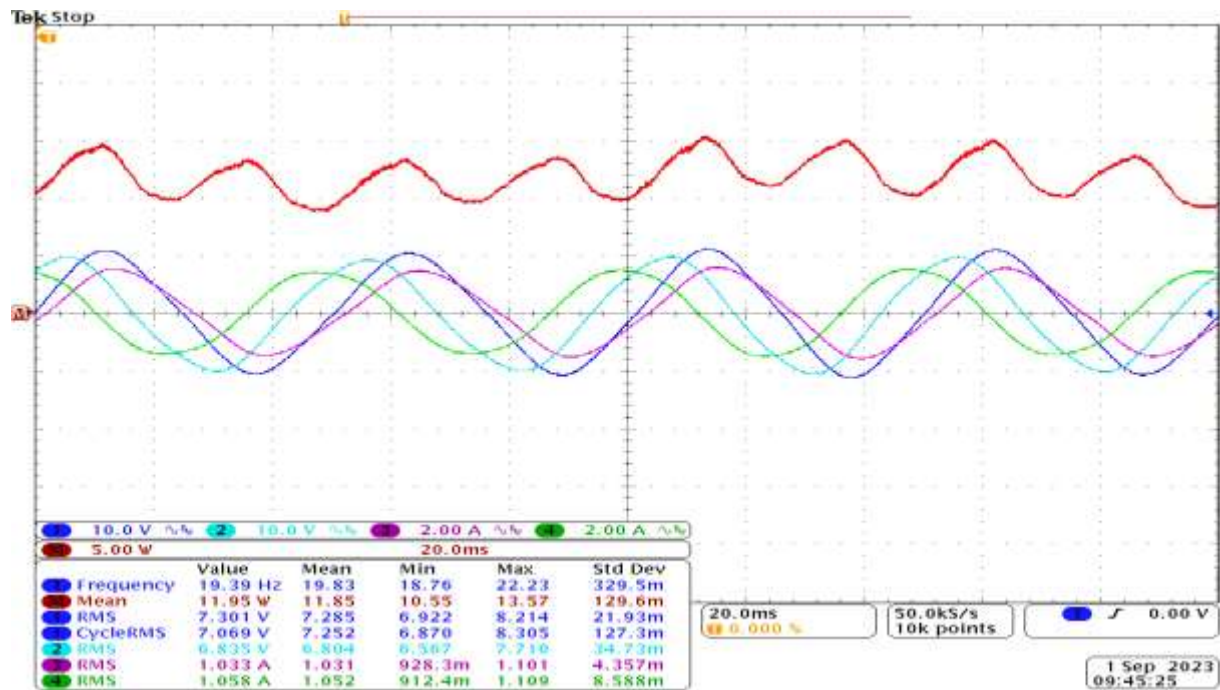
### 2.4.2.1 10Hz 1A



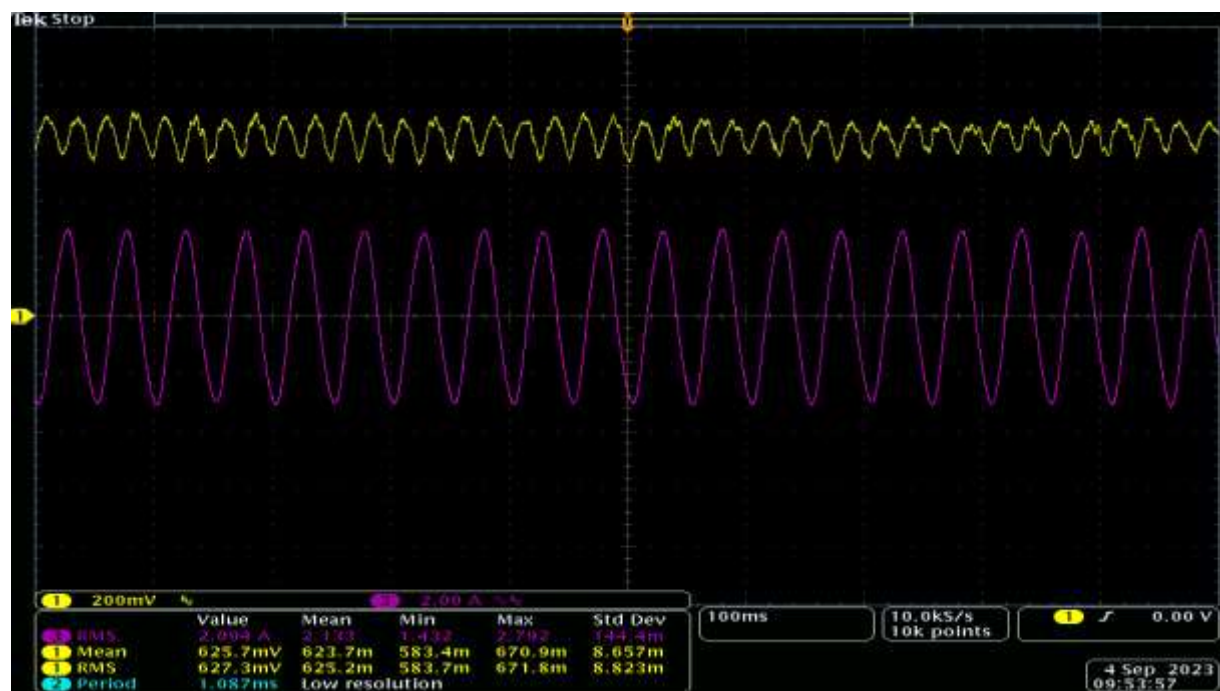
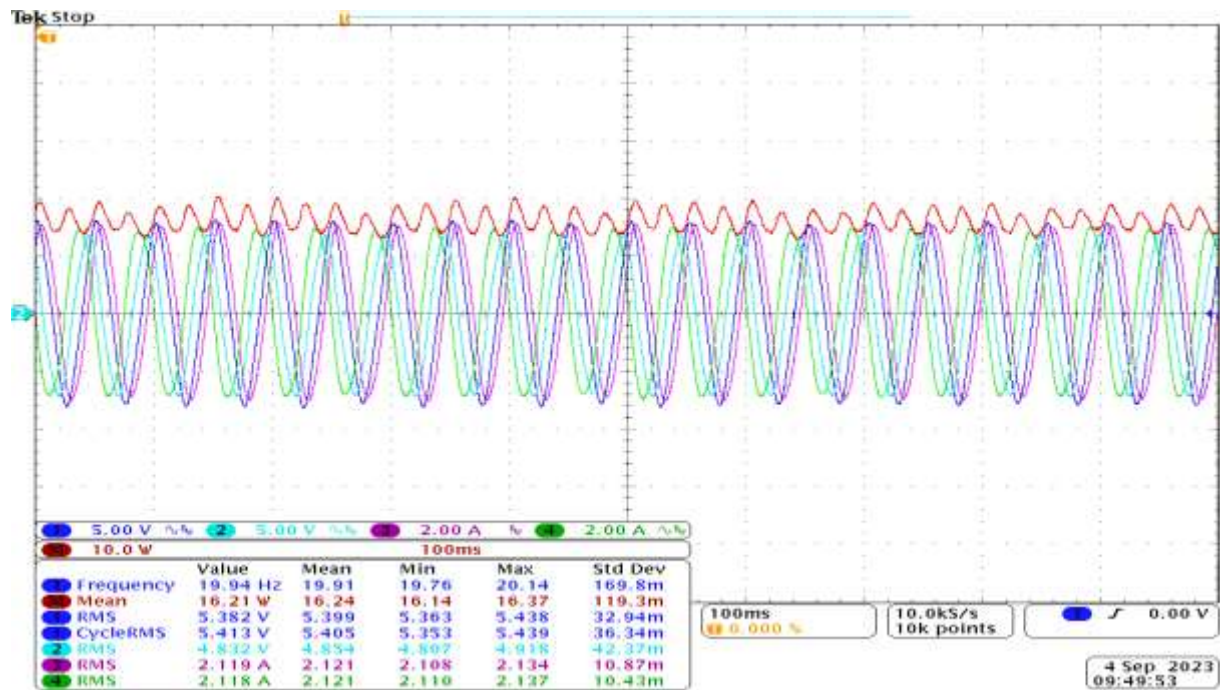
### 2.4.2.2 10Hz 2A



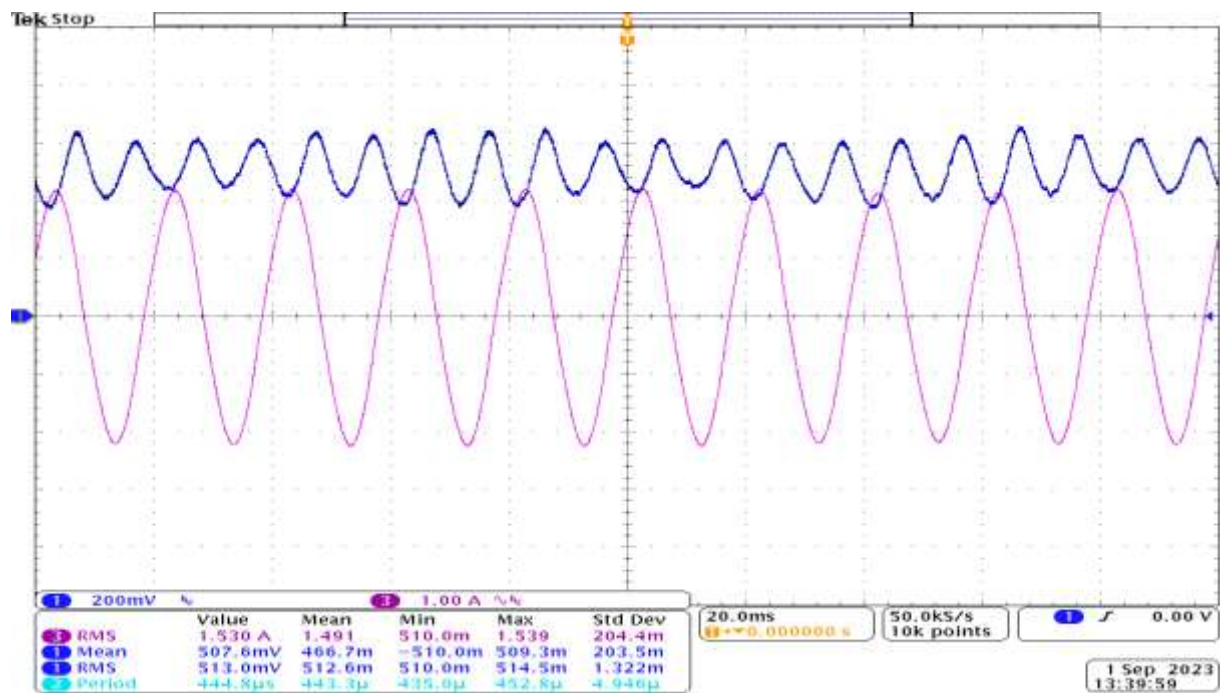
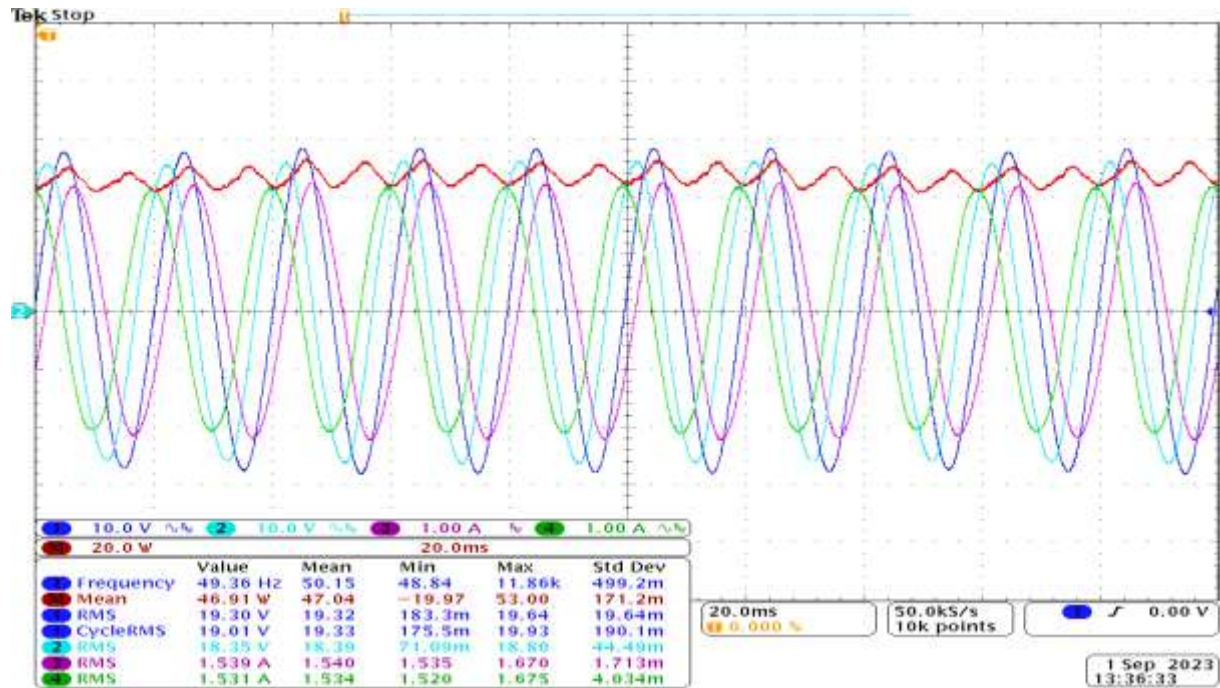
### 2.4.2.3 20Hz 1A



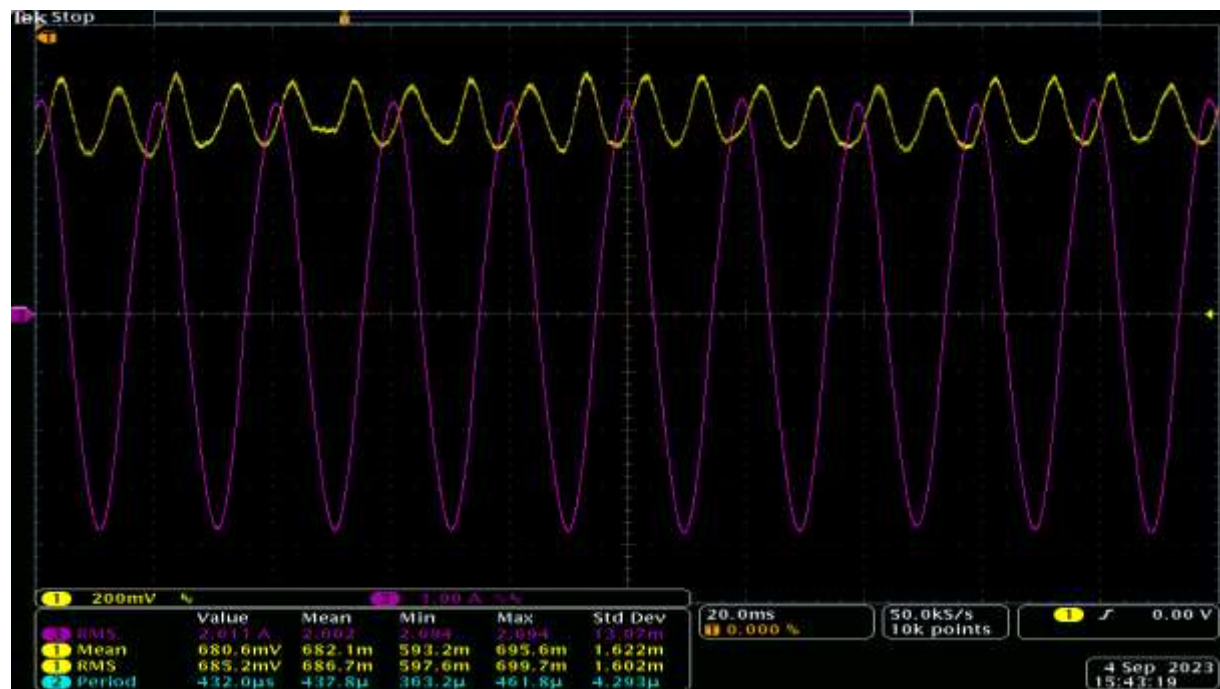
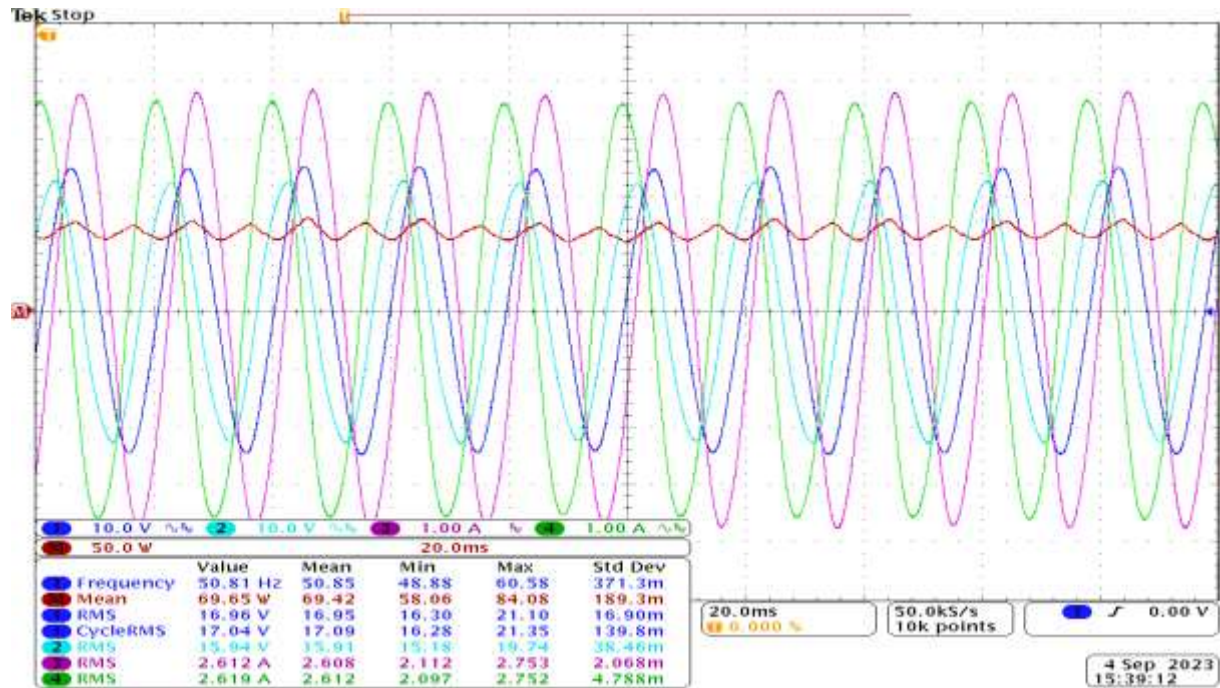
### 2.4.2.4 20Hz 2A



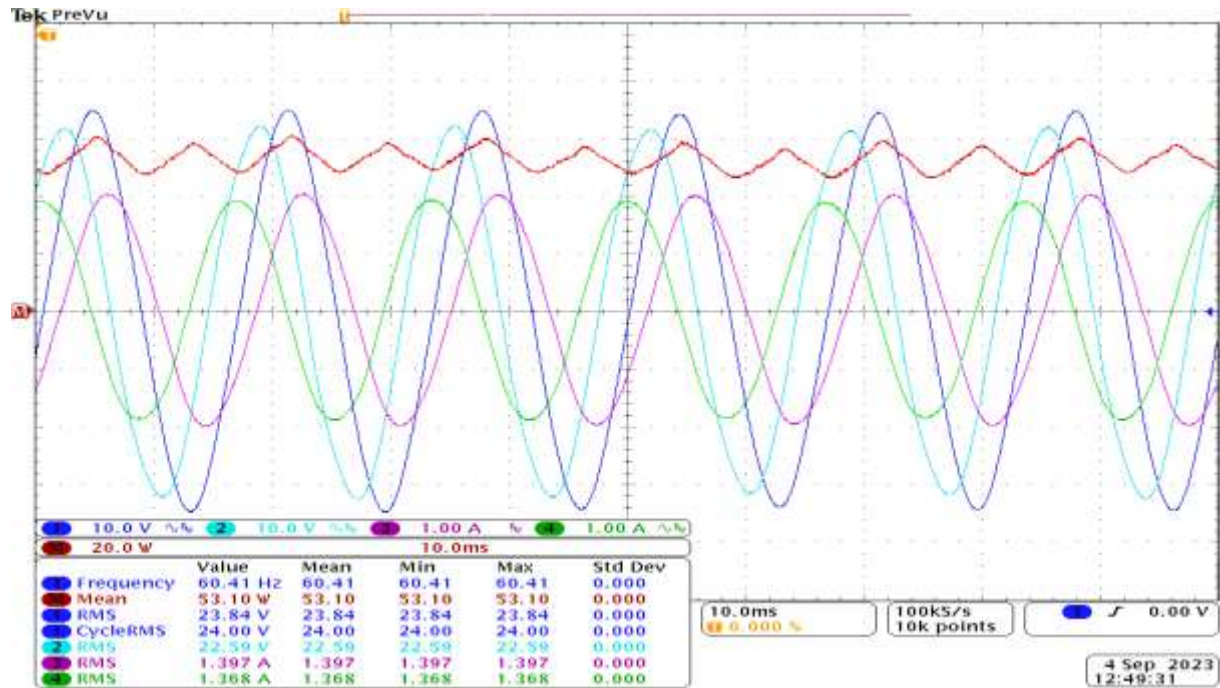
### 2.4.2.5 50Hz 1,5A



### 2.4.2.6 50Hz 2,5A

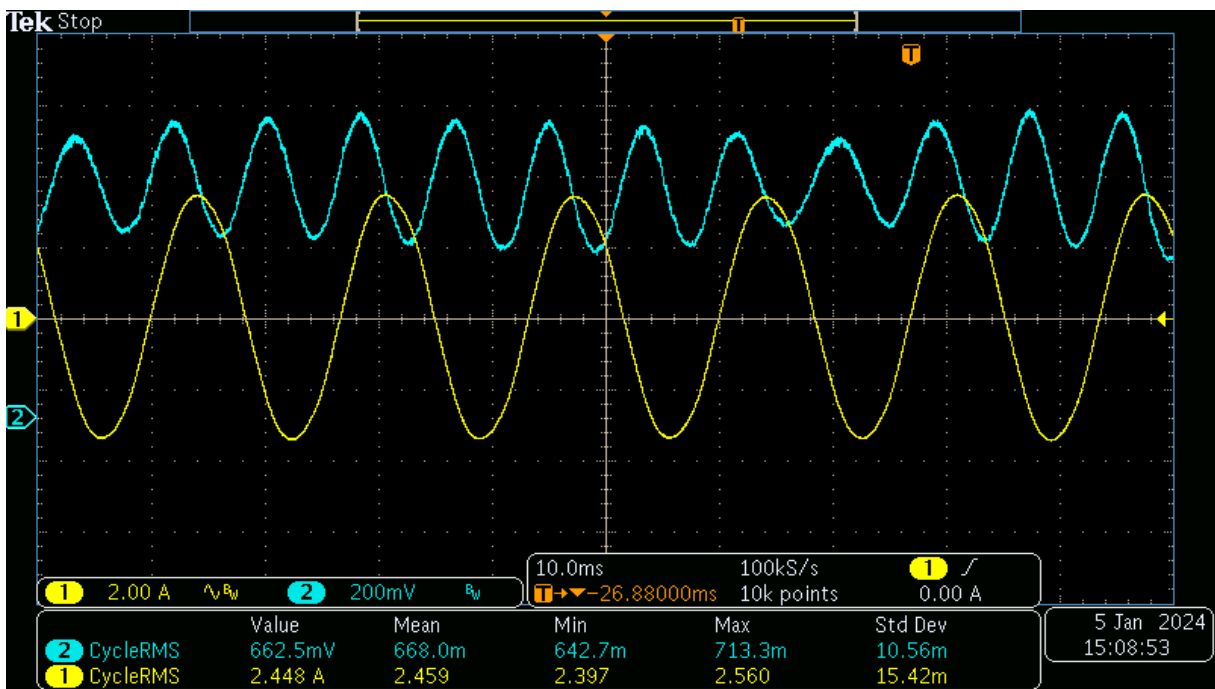
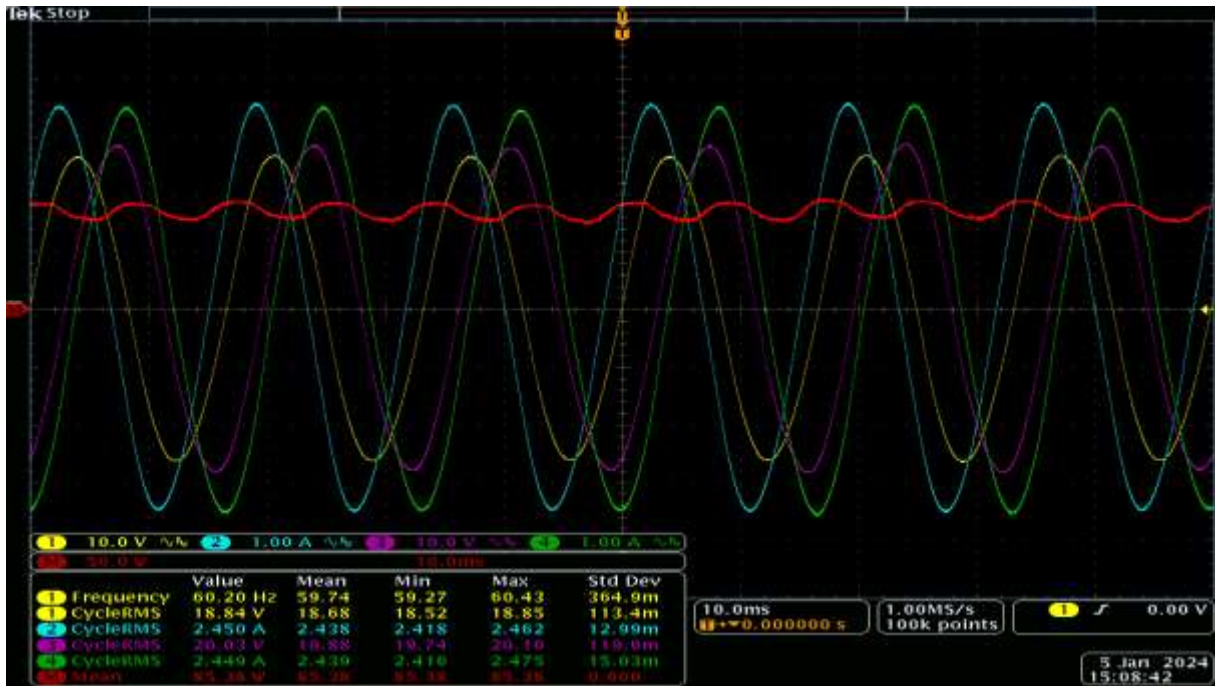


### 2.4.2.7 60Hz 1,4A



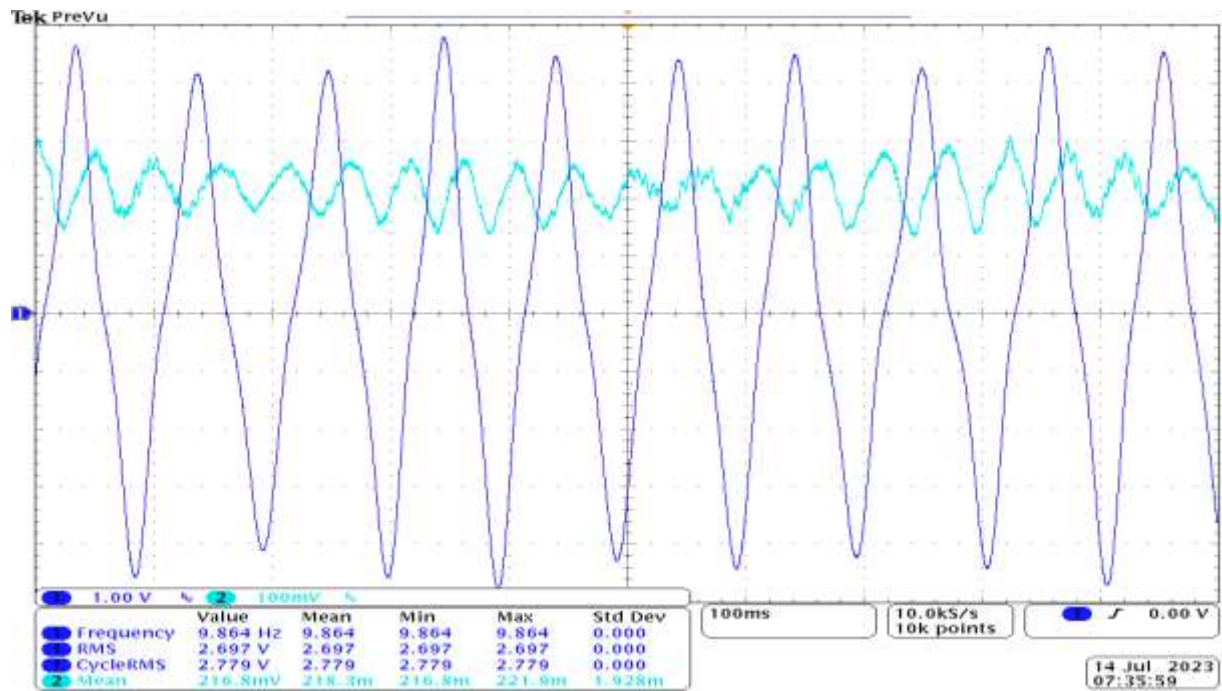


### 2.4.2.8 60Hz 2,3A

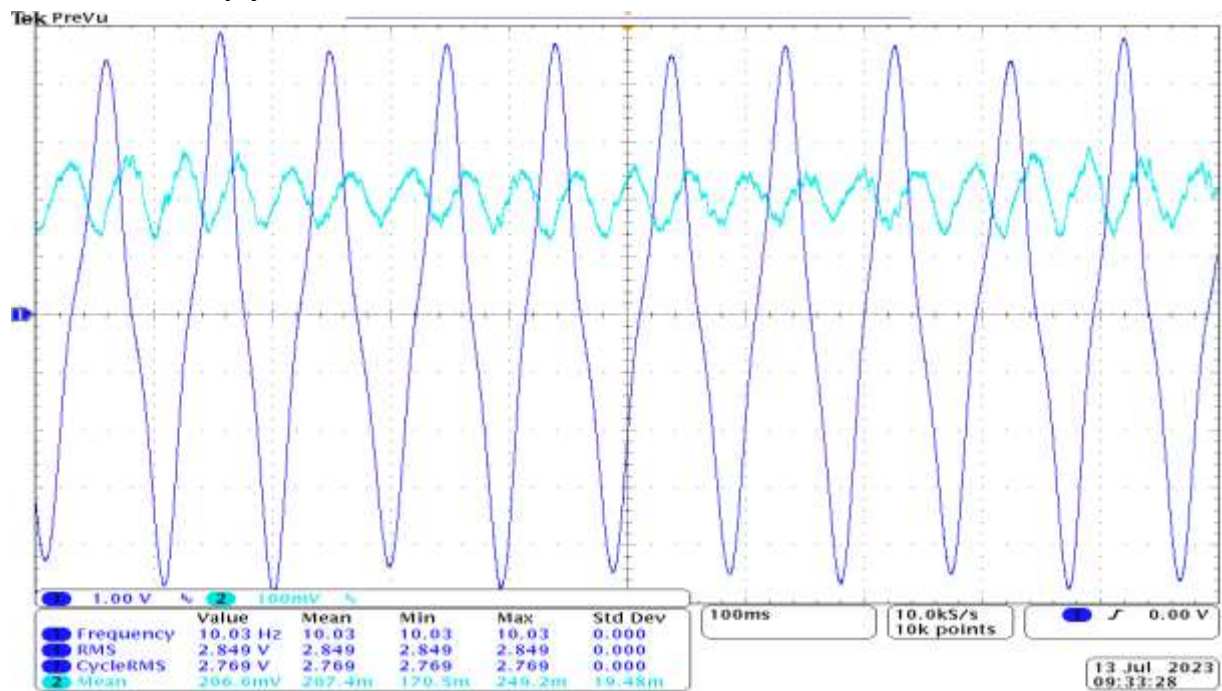


## 2.4.3 Měření indukovaného napětí

### 2.4.3.1 10Hz, studený stav



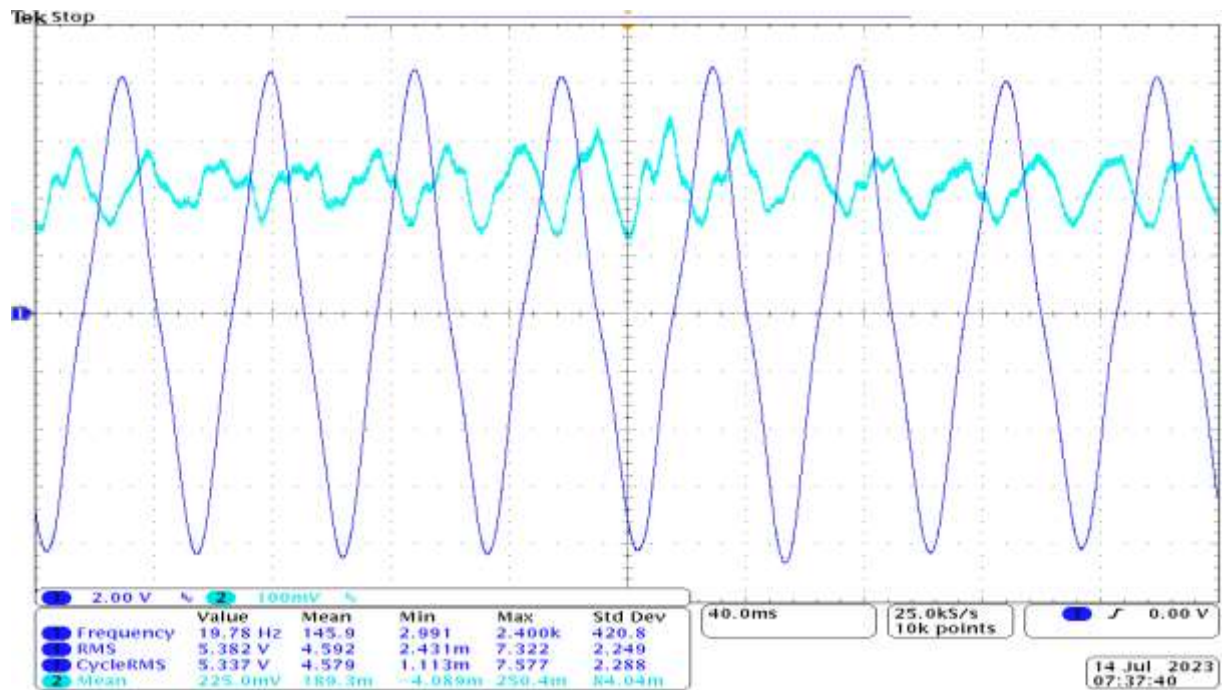
### 2.4.3.2 10Hz teplý stav



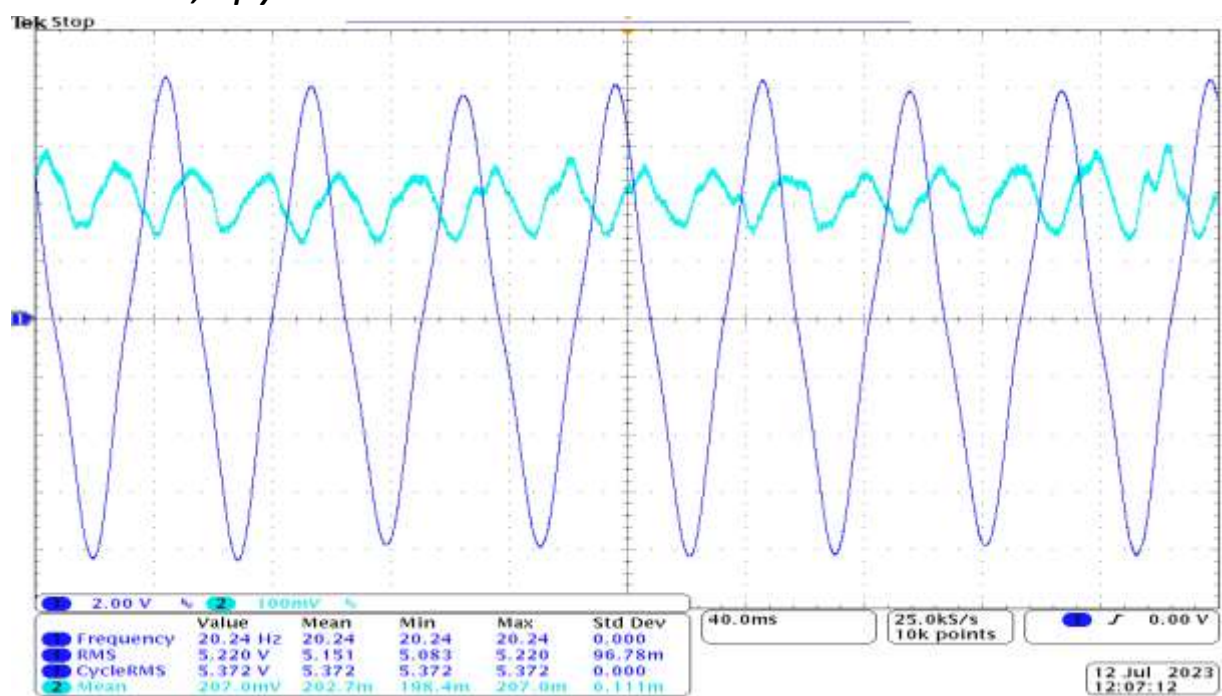
### 2.4.3.3 10Hz 50°C

### 2.4.3.4 10Hz 70°C

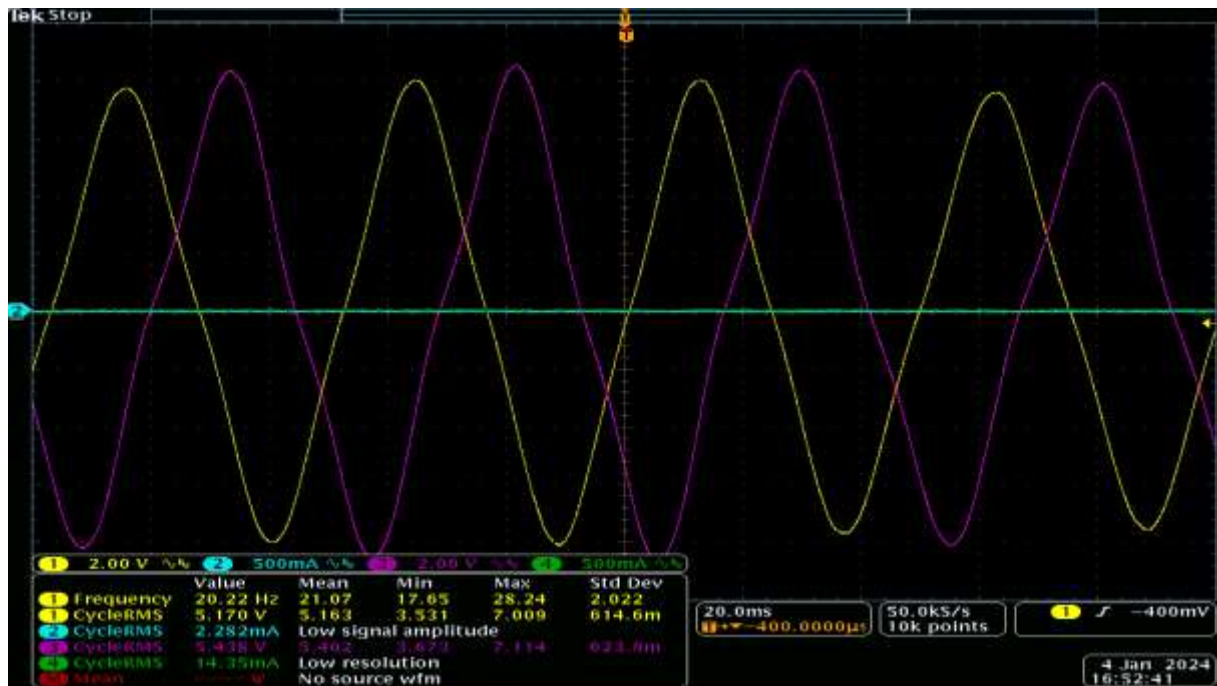
### 2.4.3.5 20Hz, studený stav



### 2.4.3.6 20Hz, teplý stav



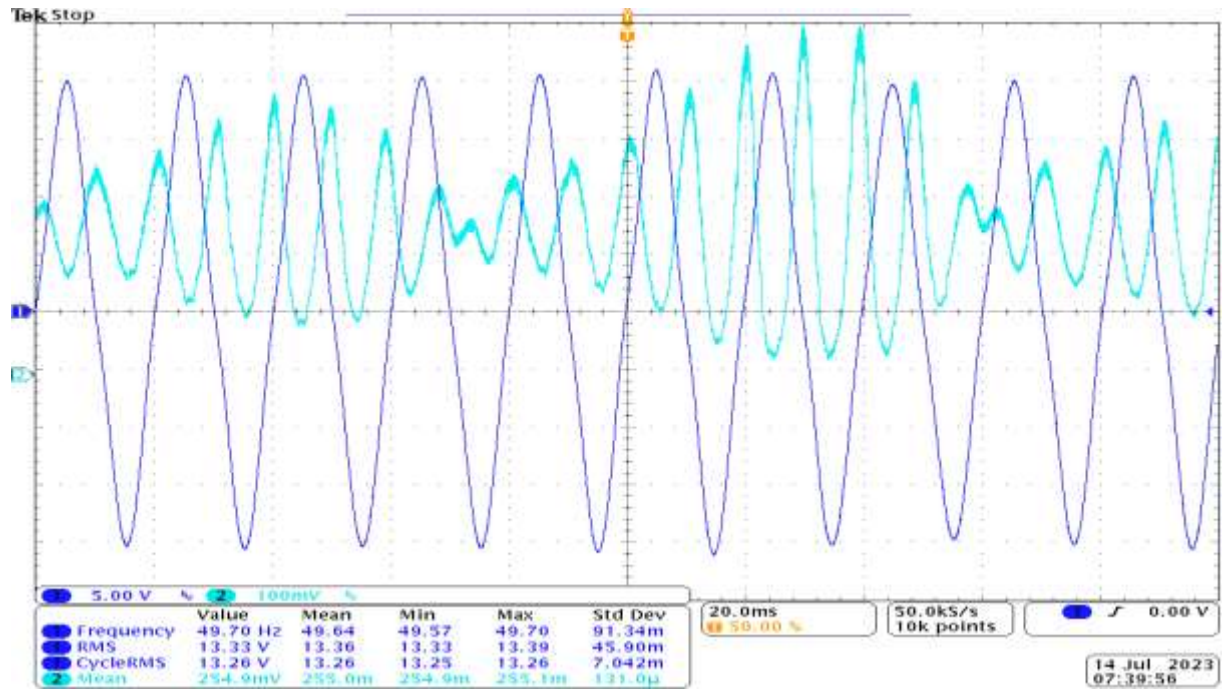
### 2.4.3.7 20Hz 60°C



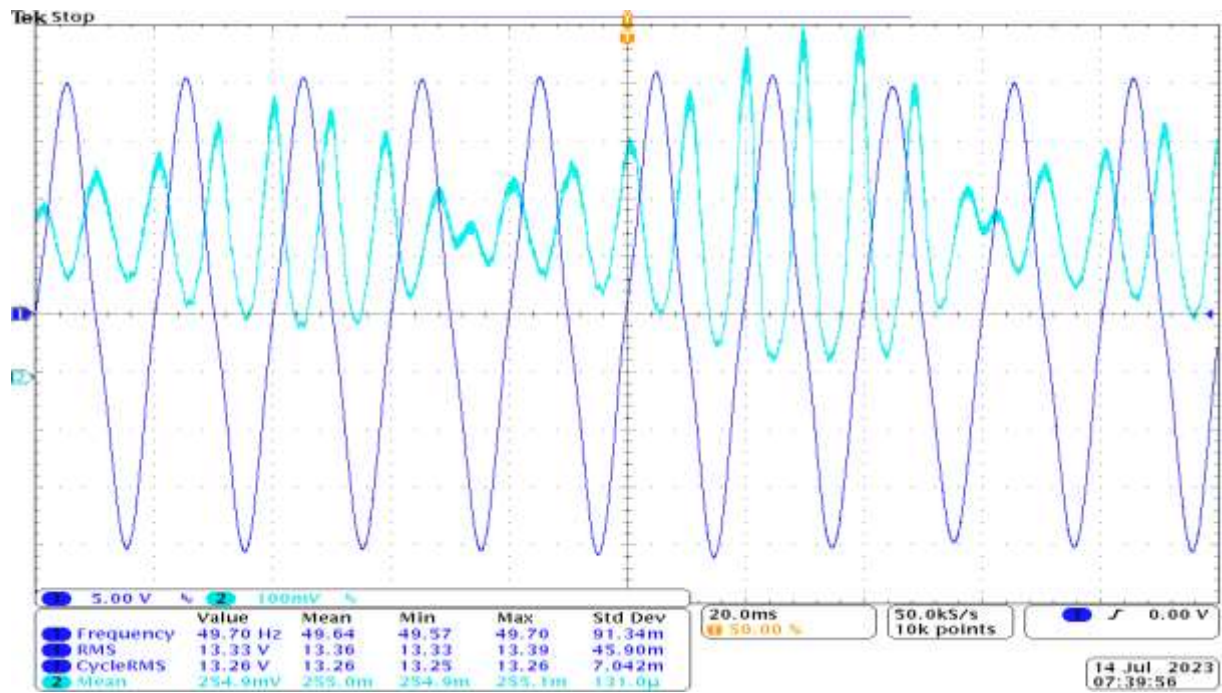
### 2.4.3.8 20Hz 80°C



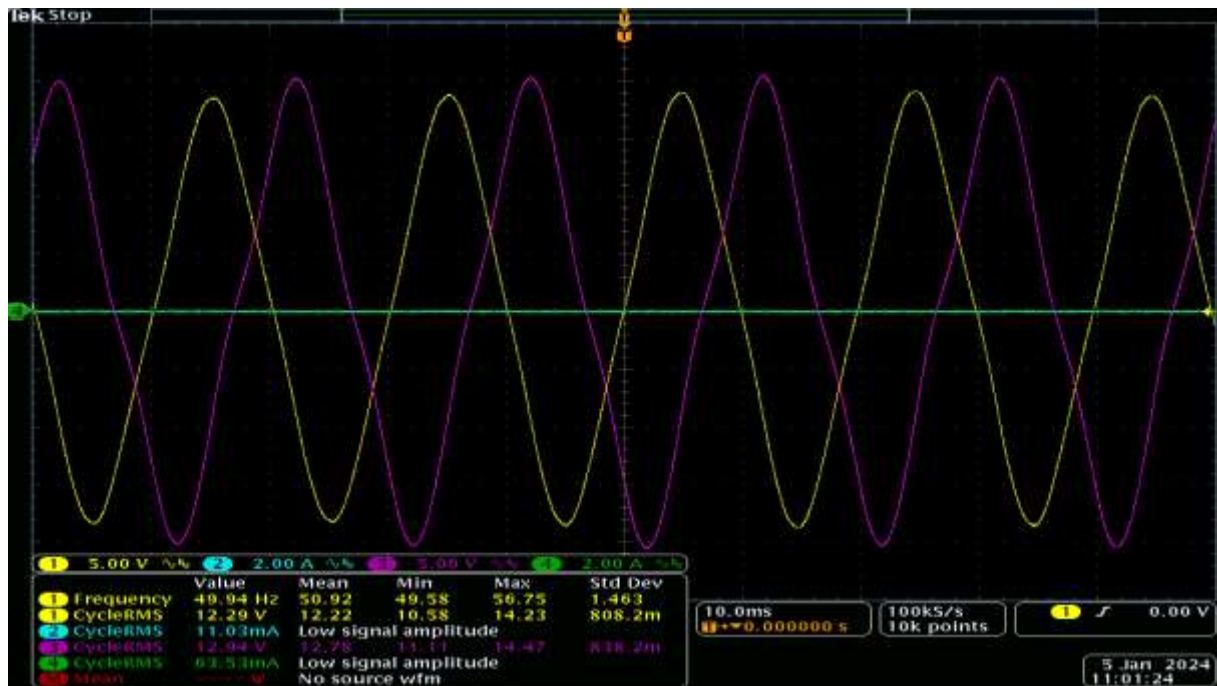
### 2.4.3.9 50Hz studený stav



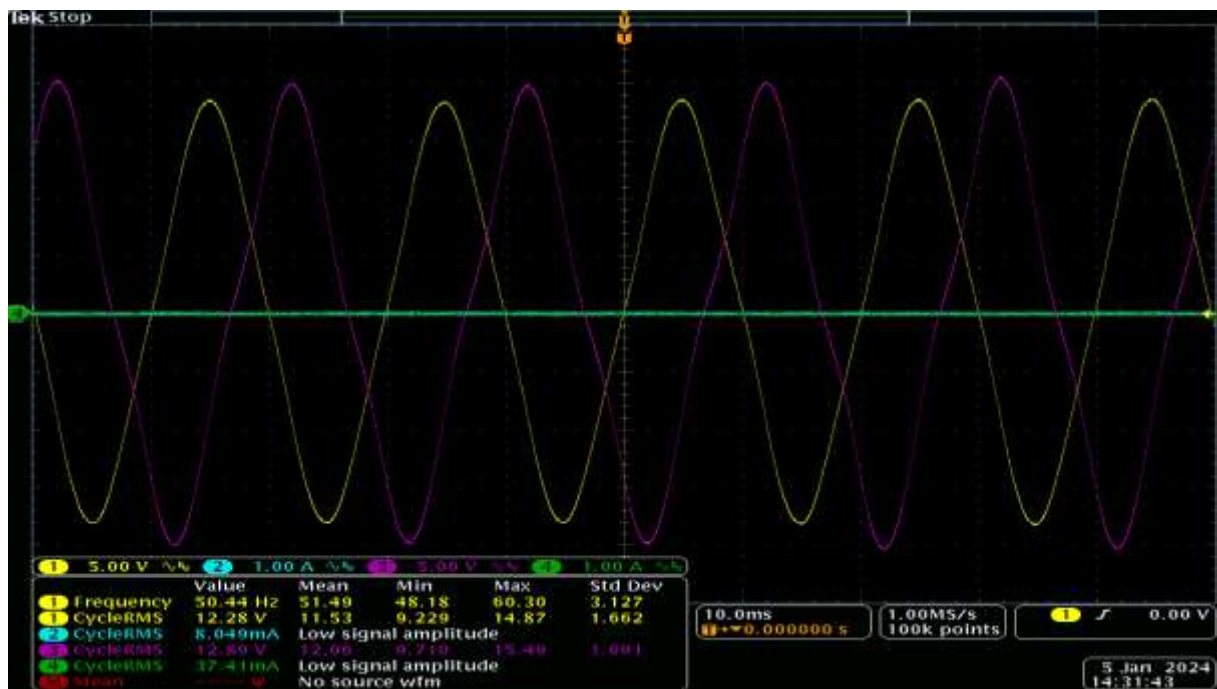
### 2.4.3.10 50 Hz teplý stav



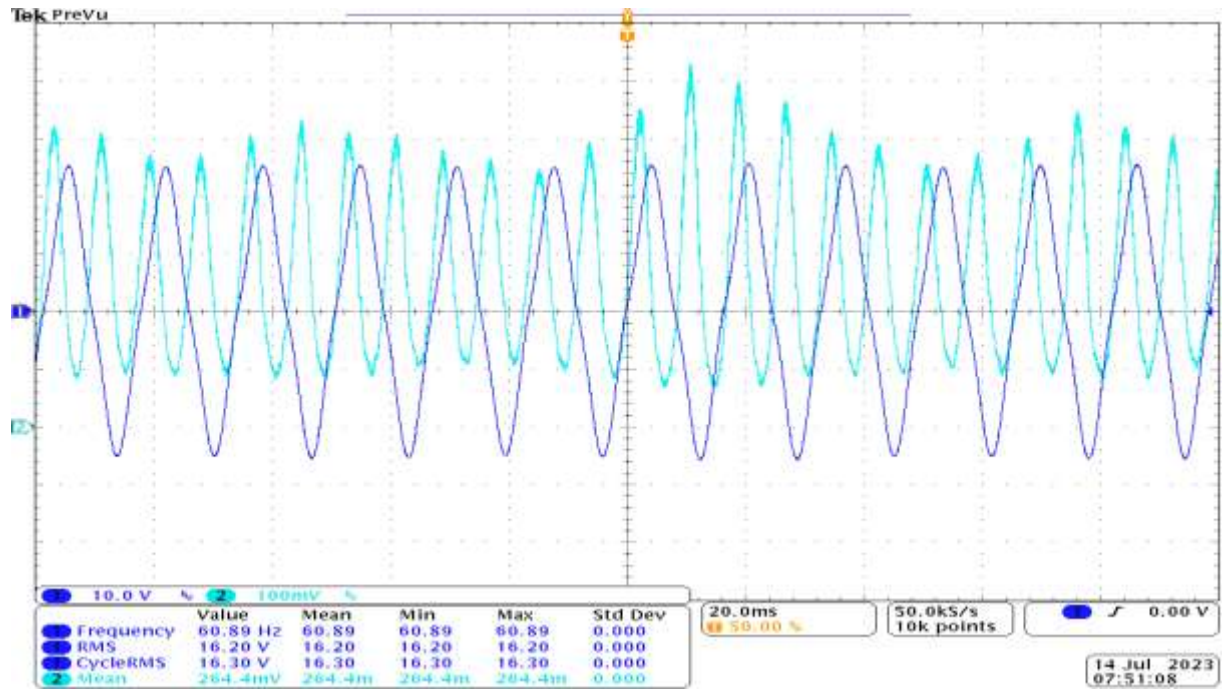
### 2.4.3.11 50Hz 100°C



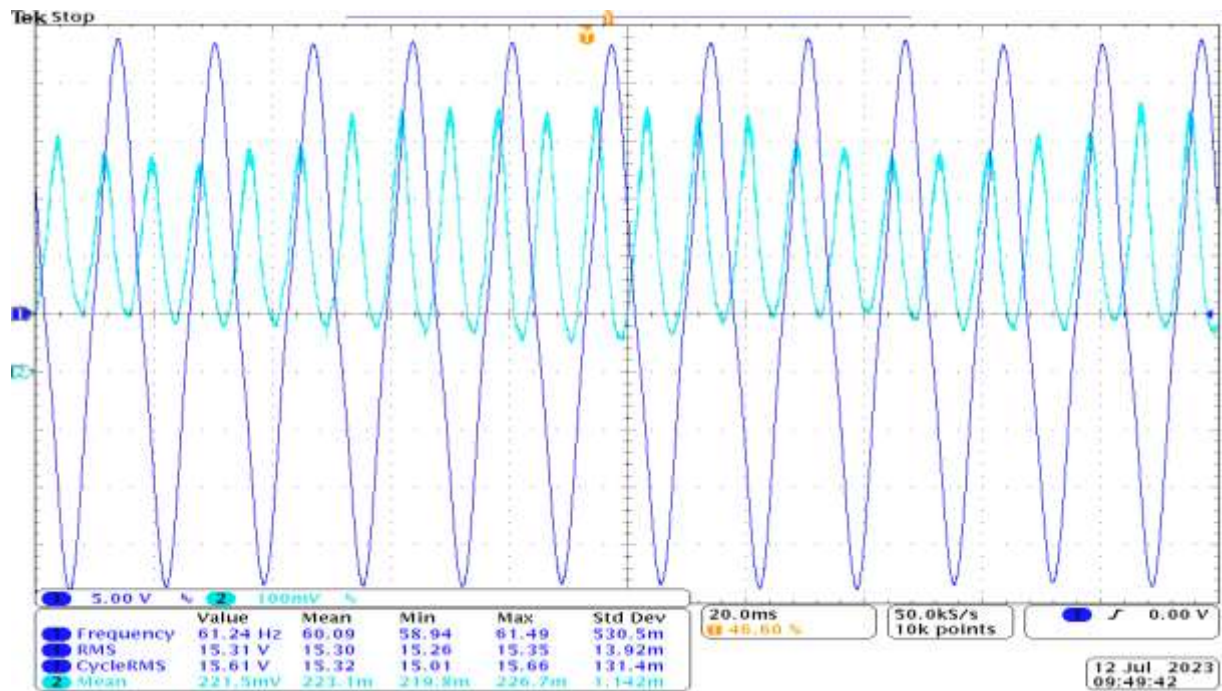
### 2.4.3.12 50Hz 125°C



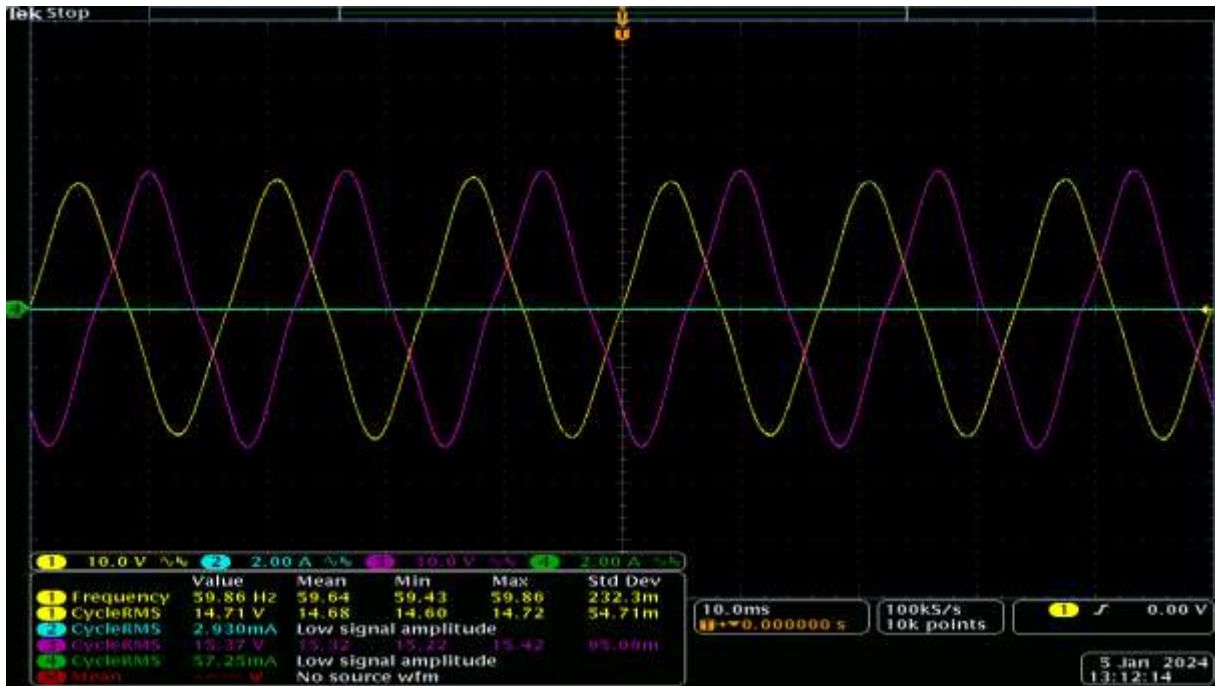
### 2.4.3.13 60Hz studený stav



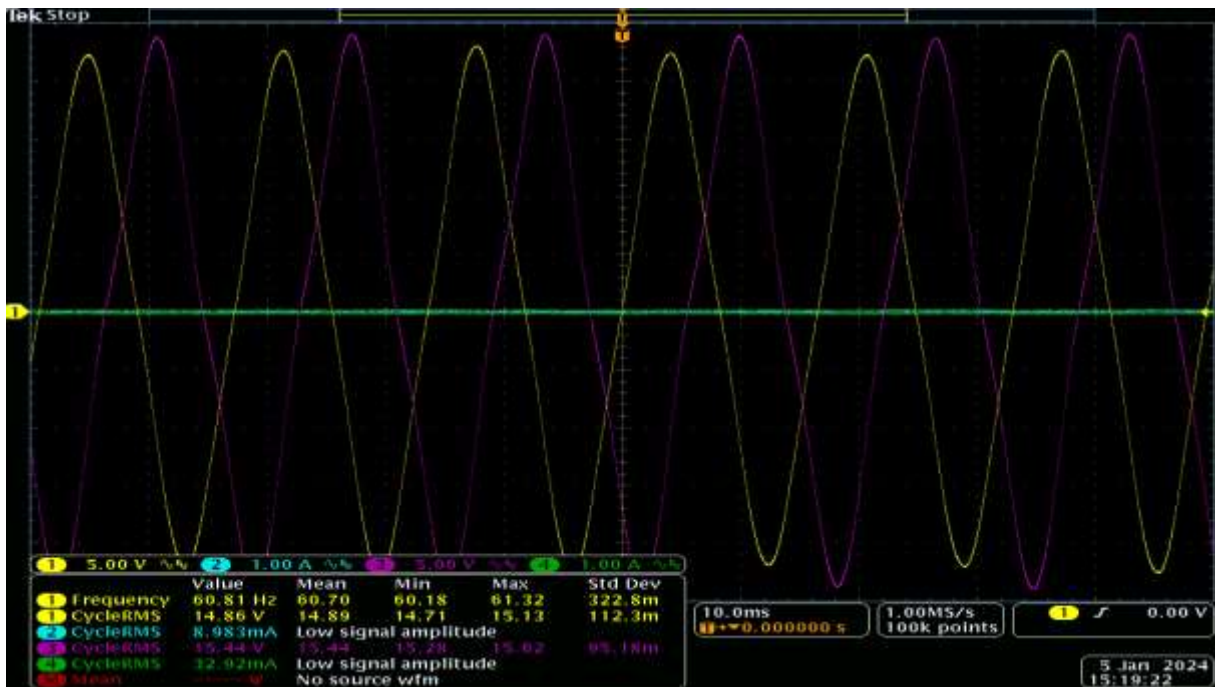
### 2.4.3.14 60Hz teplý stav



### 2.4.3.15 60Hz 100°C



### 2.4.3.16 60Hz 125°C





### 3 Závěr

Výše zpracovaná výzkumná zpráva je zaměřena na vyhodnocení měření 3D tištěného generátoru v teplém a studeném stavu. Stroj byl zatěžován odporovou zátěží. Jako limitní teplota na vinutí byla určena teplota 125 °C, která byla měřena článkem PT100 umístěným ve vinutí. Pro tuto omezující podmínku byly měřeny zatěžovací body pro frekvence 10, 20, 50 a 60 Hz. Frekvence 60 Hz byla volena jako limitní, kdy bylo měření ještě účelné. Jak plyne z výše uvedených tabulek, pro frekvenci 100 Hz byla teplota vinutí již 130 °C při stavu naprázdno a nebyl tak prostor pro jeho zatěžování ztrátami vzniklými od proudu.

Nejvyšší činný výkon získaný ze stroje byl při 60Hz a maximální povolené teplotě 125°C. V tomto bodě dosahoval dodávaný výkon téměř 100W. Obdobných parametrů dosáhl stroj i při 50Hz, kdy byl výkon stroje 84W. Oba body jsou však silně závislé na oteplení magnetů a jejich výkon klesl v prvním případě na 85W při účinnosti 54%, respektive na 70W s účinností 50%.

## Literatura

## Seznam obrázků

Obr. 1. Měřené soustrojí .....	5
Tab. 1. Naměřená data z měření naprázdno.....	6
Tab. 2. Naměřená a dopočtená data.....	7
Tab. 3. Naměřená indukovaná napětí .....	7
Obr. 2. Závislost ztrát naprázdno na otáčkách a teplotě .....	8
Obr. 3. Závislost celkových ztrát na teplotě a frekvenci .....	8
Obr. 4. Možný dodávaný výkon při odporové zátěži .....	8
Obr. 5. Účinnost motoru při různém zatěžování.....	9
Obr. 6. Závislost teploty motoru na frekvenci a proudu zátěží.....	9

## Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	8.01.2024	L. Sobotka