



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH ústav automatizace  
TECHNOLOGIÍ a měřicí techniky**

## **LABORATORNÍ ÚLOHA**

# **Měření otáček**

|                 |                                |
|-----------------|--------------------------------|
| <b>AUTOR 1:</b> | <b>Václav Horáček (256296)</b> |
| <b>AUTOR 2:</b> | <b>Jan Holík (256295)</b>      |
| <b>ROČNÍK:</b>  | <b>3</b>                       |
| <b>PŘEDMĚT:</b> | <b>Snímače</b>                 |
| <b>DATUM:</b>   | <b>23. 9. 2025</b>             |

## ZADÁNÍ

1. Změřte a vynesete do grafu závislost výstupního napětí tachodynamu na otáčkách v rozsahu  $\pm 2000$  ot/min. Určete pomocí MNČ konstantu  $K$  tachodynamu a porovnejte ji s údaji výrobce (vypočítejte relativní odchylku). Určete linearitu. Nejistotu konstanty  $K$  určete ze dvou měřených bodů (pro tyto dva body hodnotu otáček změřte pomocí čítače).
2. Určete počet lamel komutátoru tachodynamu.
3. U fotoelektrického odrazového snímače stanovte kolik impulzů připadá na jednu otáčku. Na čem závisí tato hodnota? Je možné na daném přípravku dosáhnout různých výsledků? Podmínky měření si zaznamenejte!
4. Na osciloskopu si prohlédněte a zaznamenejte tvar výstupních impulzů indukčního snímače a Hallovy sondy pro levé ozubené kolo. Průběh si zakreslete spolu s průběhem vzdálenosti čela snímače od ozubeného kola tak, aby byla patrná souvislost výstupního signálu s tvarem ozubeného kola. Kdy se indukuje napětí na výstupu snímačů?
5. Zaznamenejte průběh signálů pro různé typy ozubených kol, včetně integrace. Jak souvisí tvar zubu a průběh integrálu výstupního napětí? U kterého tvaru zubu lze rozlišit směr otáčení?
6. Zobrazte na osciloskopu výstupní signál z optického inkrementálního snímače a kvadrurního dekodéru pro oba směry otáčení. Průběhy si zaznamenejte (důležitá je fáze signálů) a zhodnoťte, jak se projeví změna směru na výstupních signálech. U kvadrurního dekodéru určete, v jakém módu pracuje ( $x1$ ,  $x2$  nebo  $x4$ ). Srovnajte s teoretickými předpoklady.
7. Určete rozlišení inkrementálního optického snímače (počet impulzů na jednu otáčku) pomocí čítače.
8. Změřte efektivní hodnotu výstupních napětí resolveru v závislosti na úhlu natočení v rozsahu  $0$  až  $360^\circ$ . Pro oba výstupy stanovte body, ve kterých se mění fáze vzhledem k budícímu signálu  $U_{ref}$ . V intervalech vymezených těmito body změřte, má-li signál souhlasnou nebo opačnou fázi. Naměřená napětí vynesete do grafu. Fázi v grafu rozlište znaménkem (opačná = záporné). Z naměřených napětí vypočtete úhel natočení a vyčíslete chybu v procentech z rozsahu. Změřte pracovní frekvenci resolveru ( $U_{ref}$ ).
9. Na přípravku nastavte otáčky  $900$  ot/min, stroboskopem určete přesnou hodnotu a vypočítejte relativní odchylku.

## Úkol 1 - Převodní charakteristika tachodynamu

Cílem měření bylo změřit závislost výstupního napětí na měřených otáčkách, určit převodní konstantu  $K$  a chybu linearity. Je nutné poznamenat, že pro tento bod není vypočtena nejistota kvůli organizačním pokynům k prvnímu měření.

### Teoretický rozbor

Tachodynamo je DC motor, který místo běžného pracovního režimu, kdy se transformuje elektrický proud na kroutící moment, koná tento převod naopak. Otáčením hřídele tachodynamu je generováno stejnosměrné elektrické napětí  $U$ , které je přímo úměrné otáčkám. Převodní konstantu je možné odečíst jako směrnici převodní charakteristiky  $U = f(n)$ . Chyba linearity průběhu bývá menší jak 1% [1].

Pomocí tachodynamu lze měřit velice jednoduše díky vysoké hodnotě výstupního signálu a možnosti zjištění směru otáčení díky polaritě výstupního signálu.

Nevýhodou je vysoká zvlněnost výstupního signálu a nutnost senzor zatěžovat minimálně.

Napětí na svorkách tachodynamu lze vyjádřit následujícím způsobem:

$$E = B \cdot l \cdot v \rightarrow U = \frac{B \cdot l \cdot \pi \cdot d \cdot n}{60} \quad [\text{V}; \text{T}; \text{m}; \text{m}; \text{ot/min}] \quad (1)$$

$E$  – elektromotorické napětí [V]

$B$  – magnetické sycení [T]

$l$  – aktivní délka vodiče [m]

$U$  – elektrické napětí [V]

$d$  – průměr vinutí [m]

$n$  – otáčky [ot/min]

### Postup měření

1. Na základní desku s motorem bylo připojen přípravek s tachodynamem.
2. K výstupním svorkám byl připojen multimetr Keysight 34450A (DC napětí).
3. Pro rozsah otáček  $[-2000, 2000]$  ot/min po kroku 250 ot/min odečítáno měřené DC napětí na svorkách tachodynamu.
4. Z naměřených hodnot byla vypočtena převodní konstanta  $K$  a chyba linearity  $\delta_n$ .

## Naměřené hodnoty

Tabulka 1: Měřená napětí  $U$  na svorchách tachodynamu v závislosti na otáčkách  $n$

|                    |         |          |          |           |         |
|--------------------|---------|----------|----------|-----------|---------|
| $n[\text{ot/min}]$ | -2000   | -1750    | -1500    | -1250     | -1000   |
| $U[\text{V}]$      | -3.9757 | -3.4787  | -2.9858  | -2.4873   | -1.9902 |
| $n[\text{ot/min}]$ | -750    | -500     | -250     | -0        | 250     |
| $U[\text{V}]$      | -1.4922 | -0.99557 | -0.50150 | -0.000092 | 0.50022 |
| $n[\text{ot/min}]$ | 500     | 750      | 1000     | 1250      | 1500    |
| $U[\text{V}]$      | 1.0033  | 1.5076   | 2.0117   | 2.5144    | 2.9930  |
| $n[\text{ot/min}]$ | 1500    | 2000     | X        | X         | X       |
| $U[\text{V}]$      | 3.4802  | 3.9793   | X        | X         | X       |

## Zpracované výsledky měření

Pomocí metody nejmenších čtverců[2](0.12) byla určena lineární regrese naměřených bodů:

$$K = \left( \frac{m \sum_i^m U_i n_i - \sum_i^m U_i \sum_i^m n_i}{n \sum_i^m n_i^2 - (\sum_i^m n_i)^2} \right) = \frac{17 \cdot 50810 + 0}{25500000 + 0} = 0.001993 \text{ V} \cdot \text{min} \cdot \text{ot}^{-1} \quad (2)$$

$$U_0 = \frac{1}{n} \left( \sum_i^n U_i - K \sum_u^n n_i \right) = \frac{1}{17} (0.08265 - 0.001993 \cdot 0) = 0.08265 \text{ V} \quad (3)$$

Lineární aproximace převodní charakteristiky je tedy:

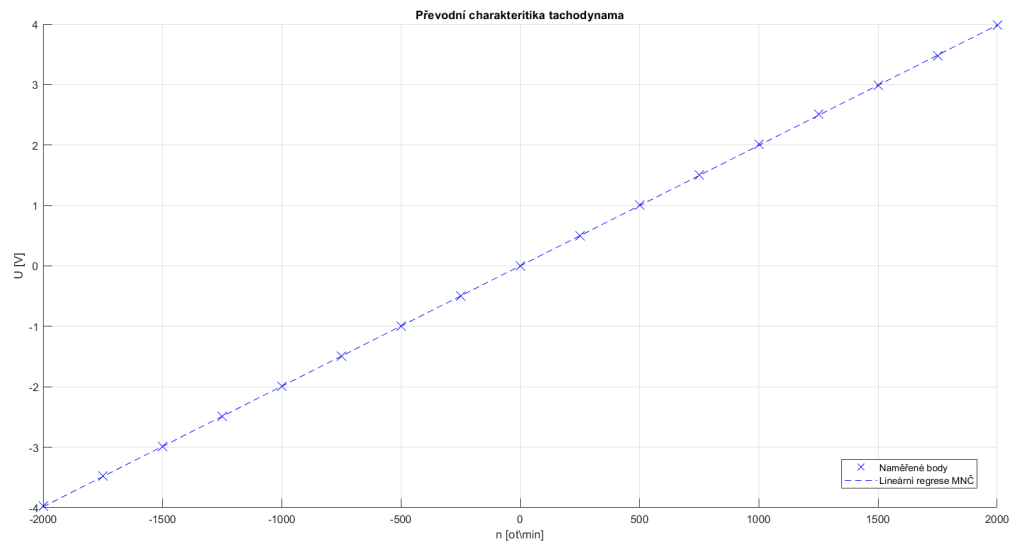
$$U_L = K \cdot n + u_0 = 0.001993 \cdot n + 0.08265[\text{V}] \quad (4)$$

Výrobce udává pro měřené tachodynamo hodnotu  $K = 2 \text{ V}/1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ [1]. Relativní odchylka  $\delta_K$  je tedy:

$$\delta_K = \frac{K_m - K_v}{K_v} \cdot 100 = \frac{0.001993 - 0.002}{0.002} \cdot 100 = -0.35\% \quad (5)$$

Výpočet chyby linearit[2](0.10):

$$\delta_L = \left( \left| \frac{U_N - U_L}{U_{Lmax} - U_{Lmin}} \right| \right)_{max} \cdot 100 = \frac{2.514 - 2.491}{3.985 - (-3.985)} \cdot 100 = 0.2975\% \quad (6)$$



Obrázek 1: Převodní charakteristika tachodynamu

## Závěr

Pro změřená napětí vychází převodní charakteristika jako lineární s nejvyšší chybou linearity pouze 0.2975%, což je i oproti obvyklým nízkým hodnotám velice dobrý výsledek.

Oproti katalogové hodnotě vyšla relativní odchylka převodní konstanty  $\delta_K = -0.35\%$ .

Nejistota konstanty  $K$  kvůli pokynům k prvním laboratorním cvičením nebyla vypočtena.

## Úkol 2 - Počet lamel tachodynamu

Cílem měření je pomocí zvlnění průběhu výstupního napětí na nízkých otáčkách určit počet lamel tachodynamu.

### Teoretický rozbor

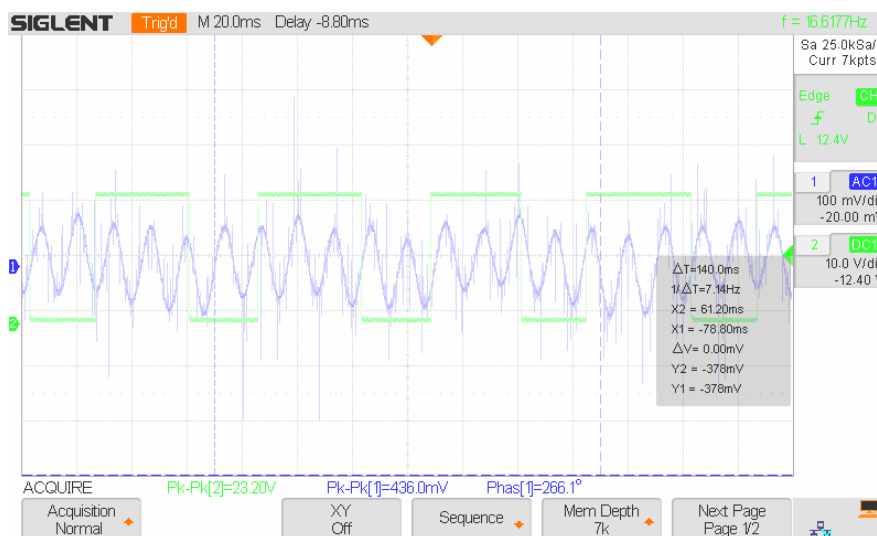
V kartáčových DC motorech se polarita budicího napětí mění za běhu pomocí lamel, kterých se musí kotva rotoru dotýkat a tím měnit polaritu magnetického pole k otáčení.

Už jen to, že se kotva rotoru nedotýká pořád, způsobuje zvlnění výstupního napětí. Podle zvlnění na průběhu zvlnění lze určit spočítáním period zvlnění na otáčku tachodynamu.

### Postup měření

1. Na základní desku s motorem bylo připojen přípravek s tachodynamem.
2. Výstup tachodynamu a výstup z odrazového snímače byl vyveden na osciloskop Siglent SDS 1102X+.
3. Za nízkých otáček při AC vazbě vstupu byl změřen průběh zvlnění výstupního napětí.
4. Ze zobrazeného průběhu byl spočítán počet lamel.

### Naměřené hodnoty



Obrázek 2: Měřené zvlnění výstupního napětí tachodynamu

## **Zpracované výsledky měření**

Aby bylo možné spočítat počet lamel, tak je nutné si určit délku jedné otáčky a k ní počet period "harmonického" zvlnění vztáhnout.

Na druhý vstup osciloskopu byl přiveden výstup z odrazového snímače. Čtyři periody tohoto snímače jsou jedna otáčka motoru a teď už jen stačí spočítat počet period harmonického zvlnění, kterých se v průběhu na jednu otáčku vyskytuje 19.

## **Závěr**

Naměřený počet lamel je rovný s reálným počtem lamel na měřeném tachodynamu. V obou případech vychází 19 lamel.

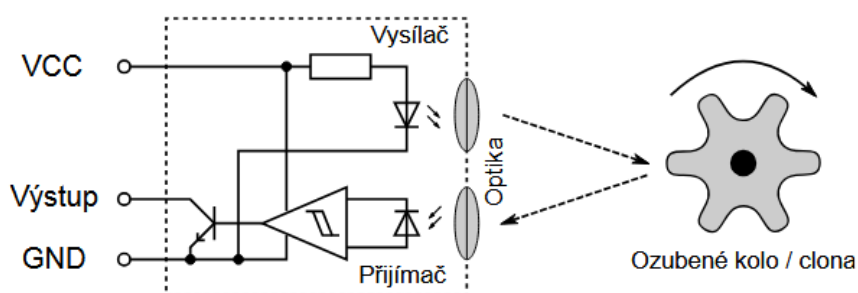
## Úkol 3 - Odrazový snímač

Cílem měření bylo zjistit, kolik impulsů připadá na jednu otáčku, na čem tato hodnota závisí a zda-li lze na přípravku změnit.

### Teoretický rozbor

Odrazový snímač je LED a prvek reagující na světlo (např. fototranzistor) [1]. V reakci na odražený signál z LED diody od otáčející se hřídele generuje snímač obdélníkové pulzy.

Frekvence pulzů je závislá na otáčkách hřídele a na počtu odrazových ploch [1].



Obrázek 3: Schématický náčrtek fotoelektrického reflexního snímače [1]

### Postup měření

1. Signál z odrazového snímače byl připojen na osciloskop Siglent SDS 1102X+.
2. Ze spočítání odrazových ploch na motoru a přípravku s tachodynamem byl stanoven počet pulzů na otáčku.
3. Po odpojení přípravku byly znovu spočítány odrazové plochy.
4. Byly zapsány podmínky měření ( $t = 24.4^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 988.1\text{hPa}$ ,  $RV = 58.1\%$ )

### Naměřené hodnoty

- Počet odrazových ploch (obdélníkových pulzů na otáčku) s připojeným přípravkem: 4
- -//- bez připojeného přípravku: 2



## **Závěr**

Pro změnu měřené frekvence obdélníkových pulzů, které jsou výstupem odrazového snímače je možné na přípravku buď možné změnit otáčky motoru nebo odpojit přípravek s jiným snímačem.

Pokud je připojen přípravek tak jsou pro snímač připraveny 4 odrazové plochy, tudíž by se pro získání frekvence otáčení musela frekvence výstupní pulzů dělit 4.

V případě odpojeného přípravku je počet odrazových ploch tudíž by se pro získání frekvence otáčení dělit pouze 2.

## Úkol 4 - Indukční snímač/Hallova sonda

V tomto úkolu bylo cílem zaznamenat průběhy signálů z indukčního snímače a snímače s Hallovou sondou pro levé ozubené kolo. Zároveň bylo třeba vypočítat souvislost tvaru ozubeného kola s výstupním signálem

### Teoretický rozbor

Indukční snímač k detekci vodivých předmětů patří k jednomu z nejpoužívanějších na světě díky svému vysoké výstupní úrovni a jednoduchosti. Snímač využívá indukčního zákona pro elektromotorické napětí[1]:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \cdot N \quad [\text{V}; \text{Wb/s}, -] \quad (7)$$

$E$  – elektromotorické napětí [V]

$\phi$  – magnetický tok [Wb/s]

$N$  – počet závitů cívky [-]

Jelikož je snímač většinou používán k měření polohy, tak je jeho použití limitováno nízkými otáčkami a nutností použít ozubená kola nebo nepravidelné hřídele.

Další snímač pro detekci otáčení ozubených kol je snímač s Hallovou sondou. Podobně jako indukční snímač, tak i snímač s Hallovou sondou reaguje výstupním dvoustavovým signálem na změnu magnetického pole. Tyto snímače mají automatické nastavování rozhodovací úrovně a omezený dolní mezní kmitočet. Tyto okolnosti mohou zabránit zjištění, zda-li je snímač měří zub kola nebo mezeru[1].

### Postup měření

1. Byl připojen přípravek se snímači a ozubenými koly.
2. Výstupní signály byly přivedeny na vstup osciloskopu Siglent SDS1102+.
3. Průběhy signálů byly zaznamenány pomocí PC interface pro osciloskop.

## Naměřené hodnoty



Obrázek 4: Průběhy výstupních signálů z indukčního a snímače s Hallovou sondou

## Závěr

Ze zobrazených průběhů lze vypočítat, že jsou snímače od sebe umístěny tak, že ve chvíli kdy na indukční zachytí zub, tak snímač s Hallovou sondou detekuje mezeru.

Toto chování si lze odvodit z fyzikální podstaty indukčního snímače. Pokud si určíme signál ze senzoru jako kopii reálného otáčení kola, kdy je vysoká úroveň zub a nízká mezeru, tak jeho derivace a otočení polarity vytvoří signál podobný výstupu indukčnímu snímači, což je ve shodě s rovnicí (7).

Z toho plyne i to, že napětí se na snímači s Hallovou sondou generuje úměrně magnetickému poli, které je nejvyšší při přítomnosti zubu u snímače. Indukční snímač generuje napětí při změně magnetického pole, což je v našem případě přechod zub/mezera.

## Úkol 5 - Průběhy signálů z měření ozubených kol

Cílem tohoto úkolu bylo zaznamenat výstupních průběhů indukčního snímače pro různé tvary ozubených kol a zjistit pro jaký tvar lze zjistit tvar otáčení kola.

## Teoretický rozbor

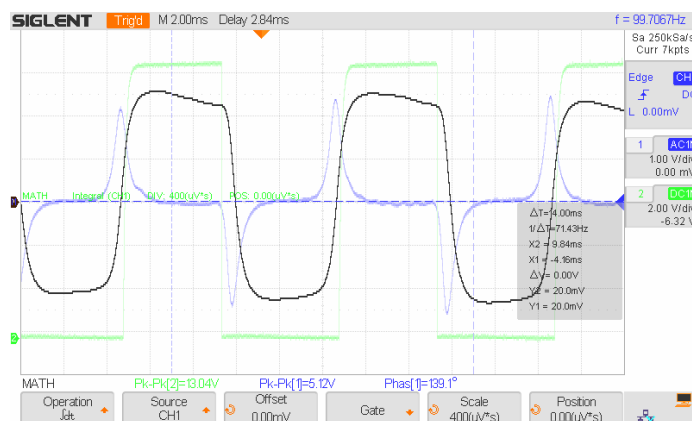
V úkolu 4 bylo možné pozorovat derivační vztah mezi přítomností zubu u snímače a napětím na výstupu snímače, kdy bylo možné vidět jak hrantatý zub generuje špičatý napěťový pulz.

Pokud bude zákon fungovat obdobně i pro jiné tvary zubů, tak je možné to pozorovat derivační charakter senzoru detailněji. Pomocí integrace je možné z průběhu výstupného napětí snímače odhadnou tvar zubů ozubeného kola a v některých případech i směr otáčení kola.

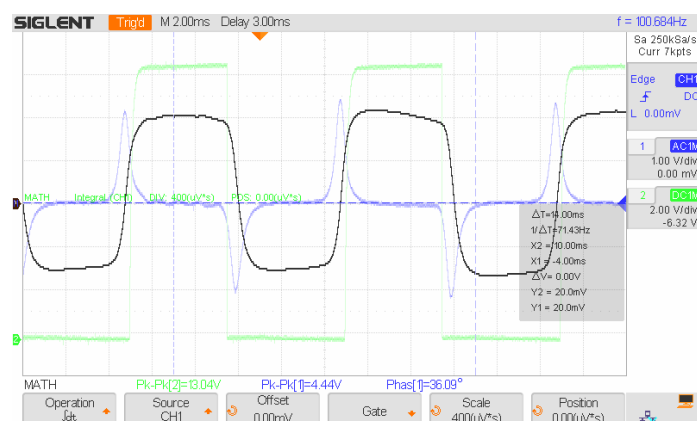
## Postup měření

1. Byl připojen přípravek se snímači a ozubenými koly.
2. Výstupní signály byly přivedeny na vstup osciloskopu Siglent SDS1102+.
3. Přípravek s motorem byl spuštěn na frekvenci otáčení v nižších stovkách ot/min.
4. Na při osciloskopu byla zobrazen integrál napětového výstupu snímače.
5. Body 3 a 4 byly provedeny pro všechny 4 ozubená kola.
6. Průběhy signálů byly zaznamenány pomocí PC interface pro osciloskop.

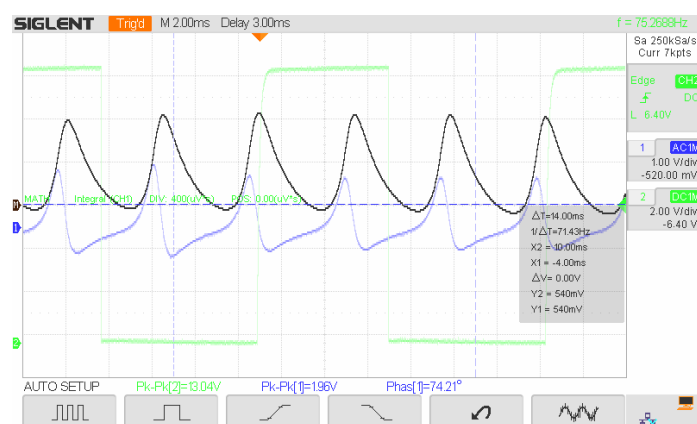
### Naměřené hodnoty



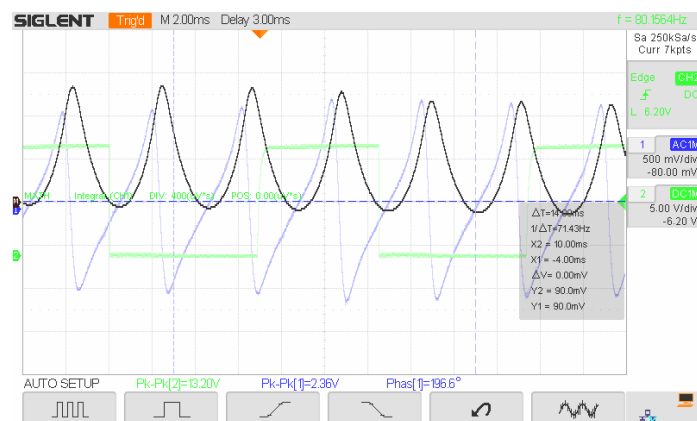
Obrázek 5: Průběh výstupního signálu pro kolo s hranatými zuby



Obrázek 6: Průběh výstupního signálu pro kolo s mělkými hranatými zuby



Obrázek 7: Průběh výstupního signálu pro kolo s zuby ve tvaru rampy



Obrázek 8: Průběh výstupního signálu pro kolo s trojúhelníkovými zuby

## Závěr

Tvar integrálu výstupního napětí přibližně odpovídal tvaru zubů na odpovídajícím ozubeném kolu. Zajímavý bylo zejména třetí kolo, které mělo zuby ve tvaru pily (periodicky opakující-se lineární funkce).

U tohoto kola je totiž možné pozorovat, kterým směrem se otáčí pomocí směrnice lineární části integrálu průběhu. Na obdélníkových a trojúhelníkových kolech nelze kvůli symetrii zubů pozorovat směr otáčení.

## Úkol 6 - Inkrementálního optický snímač/Kvadraturní dekodér

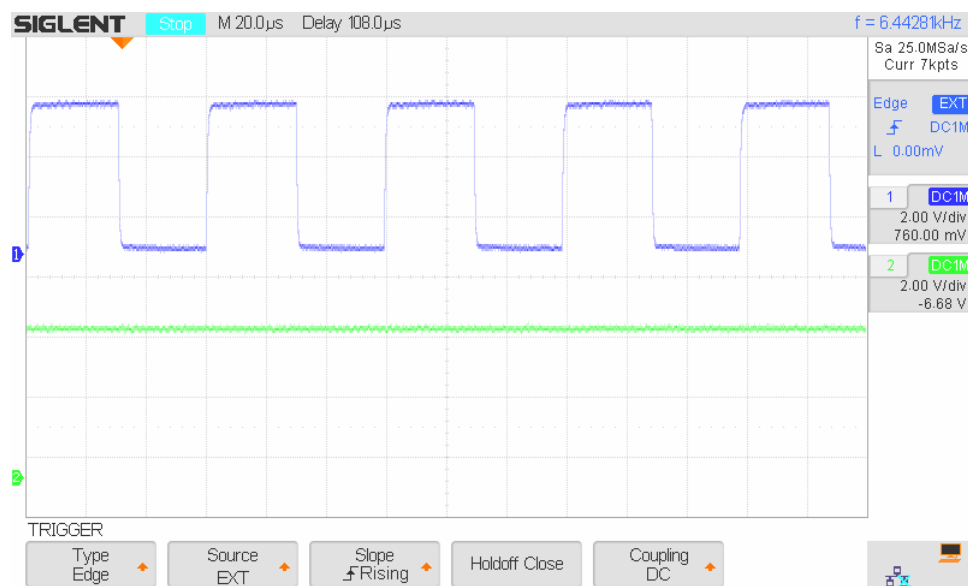
### Teoretický rozbor

Rozlišení závisí na počtu rysek optické clony. Skládá se ze zdroje světla, otočné clony, tří fotocitlivých přijímačů a tvarovacích obvodů. Paprsek světla je přerušován značkami na cloně. Vznikají obdelníkové signály. Výstupní signály kanálů A a B jsou vzájemně fázově posunuty o  $90^\circ$ . Toto uspořádání se nazývá kvadraturní dekodér (slouží k vyhodnocení směru). Ten může pracovat s rozlišením x1 (jedna hrana signálu), x2 (náběžná i sestupná hrana) a x4 (náběžná i sestupná hrana obou signálů). Při kladném směru otáčení je při náběžné hraně signálu A signál B vždy v logické úrovni 1. Při záporném směru otáčení je to naopak.

### Postup měření

1. Připojili jsme na desku modul s inkrementálním optickým snímačem.
2. Na kanály X a Z jsme postupně přivedli signály A,B,U,D. Na vstup EXT jsme přivedli Z.
3. Zobrazili jsme a uložili výstupní signály z optického inkrementálního snímače a kvadraturního dekodéru.

## Naměřené hodnoty



Obrázek 9: Výstupy A a D při záporném směru otáčení

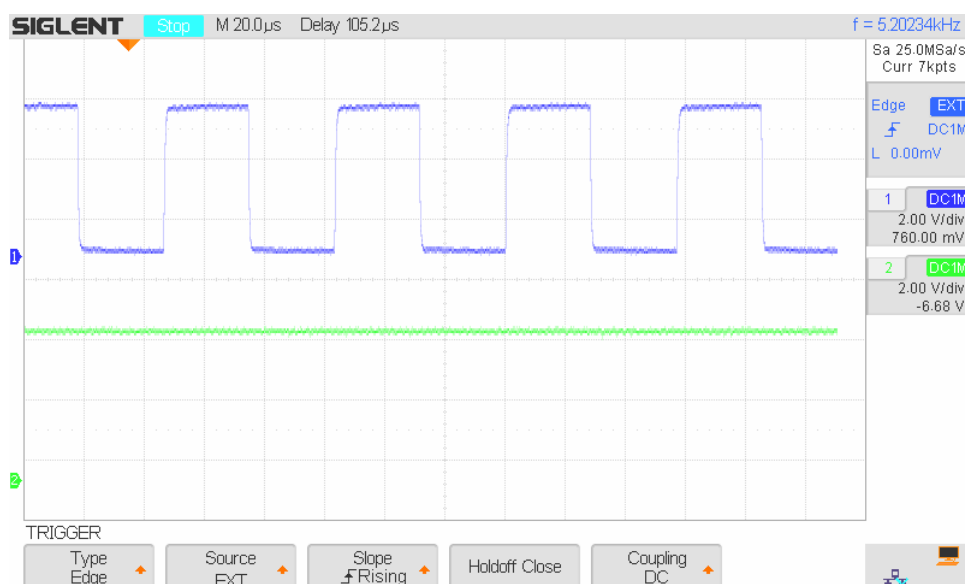


Obrázek 10: Výstupy A a D při kladném směru otáčení

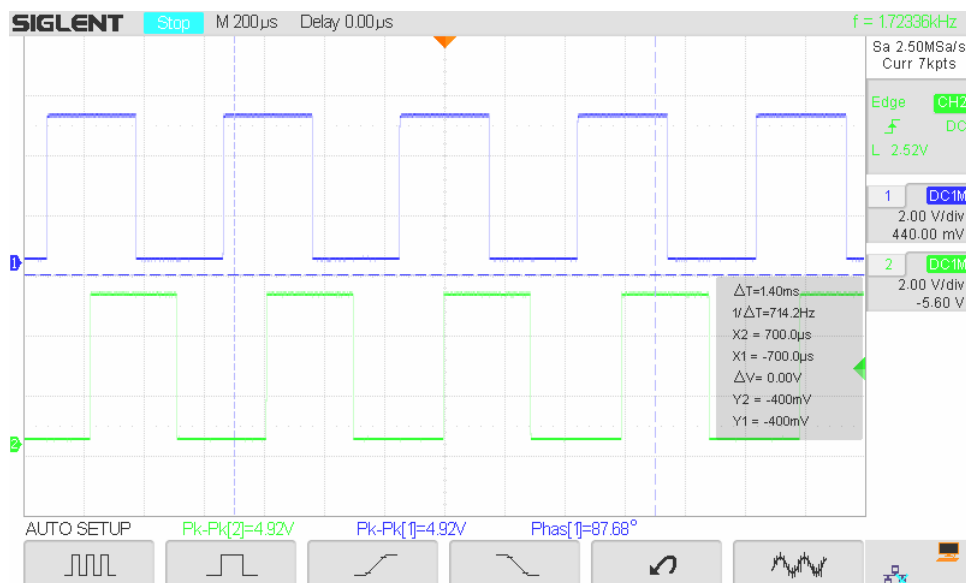




Obrázek 11: Výstupy B a U při záporném směru otáčení



Obrázek 12: Výstupy B a U při kladném směru otáčení



Obrázek 13: Výstupy A a B při při záporném směru otáčení



Obrázek 14: Výstupy A a B při při kladném směru otáčení

## Zpracované výsledky měření

Z obrázků je jasné vidět, že když se clona otáčí v kladném směru, tak čítač snižuje svou hodnotu. Pokud se clona otáčí v záporné směru, hodnota čítače se zvyšuje.

Na obrazcích je vidět, že za jednu periodu signálu A/B proběhnou 4 pulzy signálu U/D tzn., že kvadrantní dekodér reaguje na náběžnou i sestupnou hranu signálů A a B, které jsou vzájemně fázově posunuty o  $90^\circ$ . Z toho lze vyvodit že dekodér pracuje v módu x4.

## Závěr

Zobrazili jsme na osciloskopu výstupní signály optického inkrementálního snímače a kvadrantního dekodéru pro oba směry otáčení. Z uložených obrázků je jasné poznat, že dekodér pracuje v módu x4 díky četnosti pulzů a jejich buzení oběma hranami signálů A a B.

## Úkol 7 - Rozlišení inkrementálního optického snímače

### Teoretický rozbor

Rozlišení závisí na počtu rysek optické clony. Skládá se ze zdroje světla, otočné clony, tří fotocitlivých přijímačů a tvarovacích obvodů. Paprsek světla je přerušován značkami na cloně. Vznikají obdelníkové signály. Výstupní signály kanálů A a B jsou vzájemně fázově posunuty o  $90^\circ$ . Toto uspořádání se nazývá kvadrurní dekodér (slouží k vyhodnocení směru). Ten může pracovat s rozlišením  $x1$  (jedna hrana signálu),  $x2$  (náběžná i sestupná hrana) a  $x4$  (náběžná i sestupná hrana obou signálů). Při kladném směru otáčení je při náběžné hraně signálu A signál B vždy v logické úrovni 1. Při záporném směru otáčení je to naopak.

### Postup měření

1. Připojili jsme na desku modul s inkrementálním optickým snímačem.
2. Změřili jsme počet pulzů na jednu otáčku pomocí čítače.

### Naměřené hodnoty

Změřená hodnota: 2049,9 pulzů za otáčku

### Zpracované výsledky měření

$$2049,9 \doteq 2048 \text{ pulzů za otáčku} \quad (8)$$

### Závěr

Pomocí čítače jsme změřili počet pulzů za otáčku. Naměřená hodnota 2049.9 se téměř neliší od výrobcem udávané hodnoty 2048 pulzů za otáčku. Odchylka může být způsobena neideálností použitých měřících přístrojů a vlivem okolí.

## Úkol 8 - Výstupní napětí resolveru

### Teoretický rozbor

Resolver se používá k měření absolutní hodnoty úhlové polohy. Dvě vzájemně otočené satorové vinutí o  $90^\circ$  a jedno rotorové vinutí[1]. Na vinutí rotoru přivedeme střídavý proud. Vzniká magnetické pole. To indukuje napětí v cívkách statoru jehož amplituda je dána úhlem natočení rotoru. V ustáleném stavu platí:

$$\left( \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right) = \left( \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} \right) = \tan \varphi \quad (9)$$

### Postup měření

1. Připojili jsme modul se stupnicí indikující natočení a nastavili nulovou polohu resolveru.
2. Připojili jsme výstupy resolveru  $U_{\sin}$  a  $U_{\cos}$  na kanály X a Y osciloskopu a referenční signál  $U_{ref}$  na vstup externí synchronizace. Změřili jsme efektivní hodnoty napětí  $U_{\sin}$  a  $U_{\cos}$  pro všechna natočení s krokem  $15^\circ$ .
3. Následně jsme změřili fázi obou výstupních signálů resolveru vůči referenčnímu signálu.
4. Z naměřených dat jsme vynesli do grafu průběh výstupních napětí resolveru a spočítali úhel natočení, který jsme následně porovnali s předpokládaným úhlem natočení.

**Naměřené hodnoty**

$$f_{ref} = 8\text{kHz}$$

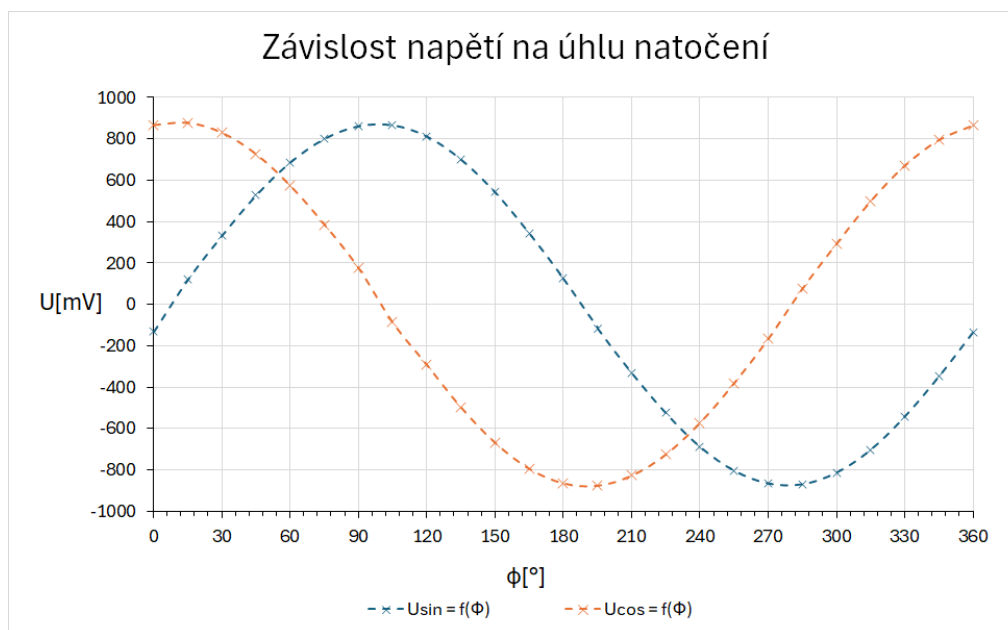
Tabulka 2: Závislost  $U_{\sin}$  na úhlu natočení  $\varphi_{ref}$ 

|                          |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 0      | 15     | 30     | 45     | 60     |
| $U_{\sin} [\text{V}]$    | -131.9 | 120.5  | 333.8  | 528.4  | 687.6  |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 75     | 90     | 105    | 120    | 135    |
| $U_{\sin} [\text{V}]$    | 801.5  | 862.7  | 867.1  | 812.9  | 701.4  |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 150    | 165    | 180    | 195    | 210    |
| $U_{\sin} [\text{V}]$    | 542.5  | 344.6  | 126.4  | -114.8 | -330.4 |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 225    | 240    | 255    | 270    | 285    |
| $U_{\sin} [\text{V}]$    | -524.2 | -687.0 | -802.5 | -864.1 | -868.3 |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 300    | 315    | 330    | 345    | 360    |
| $U_{\sin} [\text{V}]$    | -812.4 | -702.2 | -541.4 | -348.1 | -134.1 |

Tabulka 3: Závislost  $U_{\cos}$  na úhlu natočení  $\varphi_{ref}$ 

|                          |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 0      | 15     | 30     | 45     | 60     |
| $U_{\cos} [\text{mV}]$   | 866.2  | 877.2  | 828.9  | 725.2  | 573.0  |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 75     | 90     | 105    | 120    | 135    |
| $U_{\cos} [\text{V}]$    | 385.7  | 175.5  | -871.8 | -291.2 | -496.3 |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 150    | 165    | 180    | 195    | 210    |
| $U_{\cos} [\text{V}]$    | -667.2 | -792.7 | -862.7 | -874.3 | -825.5 |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 225    | 240    | 255    | 270    | 285    |
| $U_{\cos} [\text{V}]$    | -723.6 | -571.3 | -380.0 | -166.1 | 75.79  |
| $\varphi_{ref} [^\circ]$ | 300    | 315    | 330    | 345    | 360    |
| $U_{\cos} [\text{V}]$    | 293.0  | 498.0  | 669.8  | 793.7  | 864.4  |

## Zpracované výsledky měření



Obrázek 15: Závislost napětí na úhlu natočení

Výpočet úhlu natočení:

$$\varphi_{vyp} = \arctan\left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}\right) = \arctan\left(\frac{-131.9}{866.2}\right) = -8.658^\circ \quad (10)$$

Jelikož  $\arctg$  nabývá pouze hodnot od  $-90^\circ$  do  $+90^\circ$ , tak logicky nejsme schopni při počítání dosáhnout plného rozsahu  $0-360^\circ$ , proto bylo nutno provést posun mezi kvadranty.

Pro 1. kvadrant (tj.  $0-90^\circ$ ) platí:

$$\varphi_{prep} = \varphi_{vyp} \quad (11)$$

Pro 2. a 3. kvadrant (tj.  $90-270^\circ$ ) platí:

$$\varphi_{prep} = 180^\circ + \varphi_{vyp} \quad (12)$$

Pro 4. kvadrant (tj.  $270-360^\circ$ ) platí:

$$\varphi_{prep} = 360^\circ + \varphi_{vyp} \quad (13)$$

Výpočet absolutní odchylky:

$$\Delta_\varphi = \varphi_{prep} - \varphi_{ref} = -8.658 - 0 = -8.658^\circ \quad (14)$$

Tabulka 4: Úhel natočení vypočtený z naměřených napětí a jeho absolutní odchylka

|                          |        |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\varphi_{ref}[^\circ]$  | 0      | 15     | 30     | 45     | 60     |
| $U_{\sin}[\text{mV}]$    | -131.9 | 120.5  | 333.8  | 528.4  | 687.6  |
| $U_{\cos}[\text{mV}]$    | 866.2  | 877.2  | 828.9  | 725.2  | 573.0  |
| $\varphi_{prep}[^\circ]$ | -8.658 | 7.822  | 21.93  | 36.08  | 50.19  |
| $\Delta_\varphi[^\circ]$ | -8.658 | -7.175 | -8.065 | -8.921 | -9.806 |
| $\varphi_{ref}[^\circ]$  | 75     | 90     | 105    | 120    | 135    |
| $U_{\sin}[\text{mV}]$    | 801.5  | 862.7  | 867.1  | 812.9  | 701.4  |
| $U_{\cos}[\text{mV}]$    | 385.7  | 175.5  | -871.8 | -291.2 | -496.3 |
| $\varphi_{prep}[^\circ]$ | 64.30  | 78.50  | 95.74  | 109.7  | 125.3  |
| $\Delta_\varphi[^\circ]$ | -10.70 | -11.50 | -9.259 | -10.29 | -9.717 |
| $\varphi_{ref}[^\circ]$  | 150    | 165    | 180    | 195    | 210    |
| $U_{\sin}[\text{mV}]$    | 542.5  | 344.6  | 126.4  | -114.8 | -330.4 |
| $U_{\cos}[\text{mV}]$    | -667.2 | -792.7 | -862.7 | -874.3 | -825.5 |
| $\varphi_{prep}[^\circ]$ | 140.9  | 156.5  | 171.7  | 187.5  | 201.8  |
| $\Delta_\varphi[^\circ]$ | -9.115 | -8.495 | -8.335 | -7.520 | -8.187 |
| $\varphi_{ref}[^\circ]$  | 225    | 240    | 255    | 270    | 285    |
| $U_{\sin}[\text{mV}]$    | -524.2 | -687.0 | -802.5 | -864.1 | -868.3 |
| $U_{\cos}[\text{mV}]$    | -723.6 | -571.3 | -380.0 | -166.1 | 75.79  |
| $\varphi_{prep}[^\circ]$ | 215.9  | 230.3  | 244.7  | 259.1  | 275.0  |
| $\Delta_\varphi[^\circ]$ | -9.079 | -9.746 | -10.34 | -10.88 | -10.01 |
| $\varphi_{ref}[^\circ]$  | 300    | 315    | 330    | 345    | 360    |
| $U_{\sin}[\text{mV}]$    | -812.4 | -702.2 | -541.4 | -348.1 | -134.1 |
| $U_{\cos}[\text{mV}]$    | 293.0  | 498.0  | 669.8  | 793.7  | 864.4  |
| $\varphi_{prep}[^\circ]$ | 289.8  | 305.3  | 321.1  | 336.2  | 351.2  |
| $\Delta_\varphi[^\circ]$ | -10.17 | -9.656 | -8.949 | -8.681 | -8.818 |



## Závěr

V tomto úkolu jsme měřili amplitudu výstupních napětí resolveru a jejich fázi. Při určování fáze u napětí jsme si nebyli jistí jaké znamínko zvolit v místech kde bylo napětí ve fázi. Zvolili jsme proto takové znamínko, které co nejlépe sedělo do harmonického průběhu. U výpočtu úhlu natočení nám všechny úhly vyšli posunuté a to v intervalu od  $-7,520^\circ$  do  $-11,50^\circ$ . Jelikož byl tento posun velmi konzistentní, tak usuzujeme, že se jedná o chybu aditivní. Také připouštíme, že mohlo dojít i k nepřesnostem při měření a vlivem vnějšího okolí.

## Úkol 9 - Měření otáček stroboskopem

### Teoretický rozbor

Zařízení, které vytváří rychlé, periodické záblesky světla, aby vytvořilo iluzi zpomaleného nebo zmrazeného pohybu. Při souhlasném nastavení frekvence záblesků světla s rychlostí otáček se začne jevit tečka na otáčejícím se disku nehybně.

### Použité přístroje a přípravky

#### Postup měření

1. Na otáčkoměru jsme nastavili otáčky.
2. Pomocí stroboskopu jsme změřili rychlost otáček.

### Naměřené hodnoty

$$n_{ref} = 900 \text{ ot/min}$$

$$n_{strob} = 900.5 \text{ ot/min}$$

### Zpracované výsledky měření

$$\delta_n = \frac{n_{ref} - n_{strob}}{n_{strob}} * 100 = \frac{900 - 900.5}{900.5} * 100 = -0.055\% \quad (15)$$

### Závěr

Nastavili jsme rychlost otáček na otáčkoměru a potom pomocí stroboskopu ověřili opravdovost hodnotu ukazovaných na otáčkoměru. Zjistili jsme, že se hodnota liší o -0,055%. To je způsobeno vlivy okolí a neideálností měřících přístrojů.

## Závěr

Při měření otáček tachodynamem bylo možné pozorovat lineární převodní charakteristiku s velice nízkou chybou linearit ( $\delta_L = 0.2975\%$ ) a nízkou chybou převodní konstanty  $K = \delta_K = -0.35\%$ .

Podle počtu harmonických kmitů v po odfiltrování DC složky výstupního signálu Tachodynamu bylo možné vypočítat počet lamel tachodynamu, což v bylo v tomto případě 19.

Při měření odrazovým snímačem se výsledná frekvence inverzí periody obdélníkového pulzu podělenou počtem odrazových ploch. Na přípravku bylo možné odebráním modulu snímače od motoru odebrat 2 odrazové plochy.

Indukční snímač a snímač s Hallovou sondou reagují na magnetické pole, které vzniká přiblížením zubů ozubeného kola ke snímačům. Indukční snímač reaguje na změnu magnetického pole a snímač s Hallovou sondou se rozhoduje dvoustavově.

Při integrování průběhů výstupního napětí indukčního snímače jsme schopni rekonstruovat tvar zubu detekovaného ozubeného kola. Aby bylo možné poznat směr otáčení, tak je nutné aby zub nebyl symetrický.

V 6. úkolu byly vyobrazeny výstupní signály kvadrurního dekodéru a inkrementálního snímače. Na obrázku 9 je vidět, že při záporném směru otáčení se na výstupu D nic neděje, tedy nedochází ke snižování hodnoty čítače. Na obrázku 10 je naopak vidět, že při kladném směru otáčení ke snižování hodnoty dochází. Na obrázcích 11 a 12 lze vidět to samé akorát naopak s výstupem, který na kladný směr nereaguje, ale na při záporném směru generuje impulzy. Na obrázcích 13 a 14 jde poznat, že při kladném směru otáčení je při náběžné hraně signálu A signál B vždy v logické úrovni 1 a při záporném směru otáčení má ve stejné situaci signál B vždy logickou úroveň 0. Tedy tak, jak to je řečeno v teoretických podkladech.

Z obrázku 2 je zřejmé, že kvadrurní dekodér pracuje v módu x4, jelikož za jednu periodu signálu A nastanou 4 pulzy signálu D.

7. úkol obnášel určení rozlišení inkrementálního optického snímače. Za pomocí čítače byla naměřena hodnota 2049,9 impulzů za otáčku, což téměř přesně odpovídá výrobcem daným 2048 impulzům za otáčku.

V 8. úkolu se změřila efektivní hodnota napětí  $U_{\sin}$  a  $U_{\cos}$  pro natočení z rozsahu 0 až 360°. U  $U_{\sin}$  se mění fáze při úhlu natočení v 10° a 200°. U  $U_{\cos}$  se mění fáze při úhlu natočení v 90° a 270°. Z naměřených napětí byly vypočteny úhly natočení, tyto úhly se velmi konzistentně liší od referenčních hodnot natočení. Byla také změřena pracovní frekvence resolveru  $f = 8 \text{ kHz}$ .

V posledním úkolu se pomocí stroboskopu "zastavila" točící tečka. Hodnota při které se tak stalo byla zdokumentována. Relativní odchylka vyšla -0,055%.

## Seznam použitých přístrojů

Tabulka 5: Seznam použitých přístrojů

| Přístroj               | Typ                  | Inventární číslo |
|------------------------|----------------------|------------------|
| Keysight 34450A        | Digitální multimetr  | X                |
| Hewlett Packard 53131A | Digitální čítač      | X                |
| Siglent SDS 1102X+     | Digitální osciloskop | X                |
| Stroboskop DT-2249     | Stroboskop           | X                |
| Přípravky se snímači   | Přípravky            | X                |

## Reference

- [1] B. P. a spol., *Úloha 5 - Měření otáček*, UAMT FEKT VUT, 2025.
- [2] ———, *Základní terminologie a výpočty*, UAMT FEKT VUT, 2025.