

Politechnika Poznańska Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej	
Dz>AiR>Sem5	Napędy przekształtnikowe (NP)
Skład osobowy: Zuzanna Andrzejak 159522 Jan Andrzejewski 159512 Mateusz Banaszak 159416 Piotr Bednarek 159701	Identyfikacja parametrów modelu obwodowego silnika prądu stałego
Grupa 1	Ćwiczenie 2
	Zajęcia 2

Spis treści

1 Wprowadzenie	2
2 Rezystancja twornika R_a	2
2.1 Metodyka pomiarów	2
2.2 Pomiary i opracowanie wyników	2
2.3 Porównanie otrzymanych wartości	4
3 Indukcyjność uzwojenia twornika L_a	4
3.1 Metodyka pomiarów	4
3.2 Pomiary i opracowanie wyników	5
4 Współczynnik k_Φ	7
4.1 Metodyka pomiarów	7
4.2 Pomiary i opracowanie wyników	8
5 Moment bezwładności wirnika J_r	9
6 Współczynnik b_1	9

1 Wprowadzenie

W poprzednim ćwiczeniu laboratoryjnym zdefiniowano model obwodowy obcowzbudnego silnika prądu stałego z komutatorem, przyjmując określone parametry w celu zrealizowania uproszczonego modelu. Celem kolejnego ćwiczenia było eksperymentalne wyznaczenie tych parametrów na podstawie pomiarów przeprowadzonych na rzeczywistym, identyfikowanym obiekcie [1]. Podczas analizy uwzględniono wektor parametrów modelu w postaci:

$$P^T = [R_a, L_a, k_\Phi, J_r, b_1] \quad (1)$$

Pomiarów zrealizowano w sali C3 w budynku A22b, wyposażonej w stanowisko laboratoryjne z układem silnika umożliwiającym wymuszenie zadanej prędkości obrotowej wału. Stanowisko pomiarowe obejmowało ponadto multimeter, laboratoryjny zasilacz z ograniczeniem prądu oraz oscyloskop. W trakcie ćwiczenia wykorzystano również środowisko symulacyjne MATLAB do analizy zarejestrowanych danych pomiarowych oraz sporządzenia odpowiednich charakterystyk i wykresów.

2 Rezystancja twornika R_a

2.1 Metodyka pomiarów

W celu wyznaczenia rezystancji uzwojenia twornika R_a zastosowano **metodę techniczną**, cechującą się mniejszą niepewnością pomiarową w porównaniu z pozostałymi metodami. W układzie pomiarowym wykorzystano laboratoryjny zasilacz MCP M10-TP-303E, umożliwiający zadawanie określonych wartości prądu zasilania. Wartości prądu odczytywano bezpośrednio z wyświetlacza zasilacza.

Ze względu na niepewność pomiarową związaną z odczytem napięcia z wyświetlacza zasilacza, pomiar napięcia realizowano za pomocą multimetru UNI-T UT58C.

Rezystancję przewodów pomiarowych pominięto, ponieważ zastosowano przewody wysokiej klasy, a ich długość była niewielka ze względu na bezpośrednie umiejscowienie aparatury pomiarowej w pobliżu badanego obwodu, co skutkowało znakomitym wpływem na końcowy wynik pomiaru.

2.2 Pomiary i opracowanie wyników

Zebrano pomiary prądu uzwojenia twornika I_a oraz napięcia twornika U_a . W trakcie badań zmieniano wartość prądu zasilania w zakresie do 3 A. Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych możliwe było wyznaczenie rezystancji uzwojenia twornika dwiema niezależnymi metodami.

Pierwsza metoda polegała na obliczeniu wartości rezystancji dla każdego punktu pomiarowego na podstawie prawa Ohma, zgodnie z zależnością:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} \quad (2)$$

gdzie: R_a to rezystancja twornika, U_a to napięcie na zaciskach twornika, I_a to prąd uzwojenia twornika.

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1.

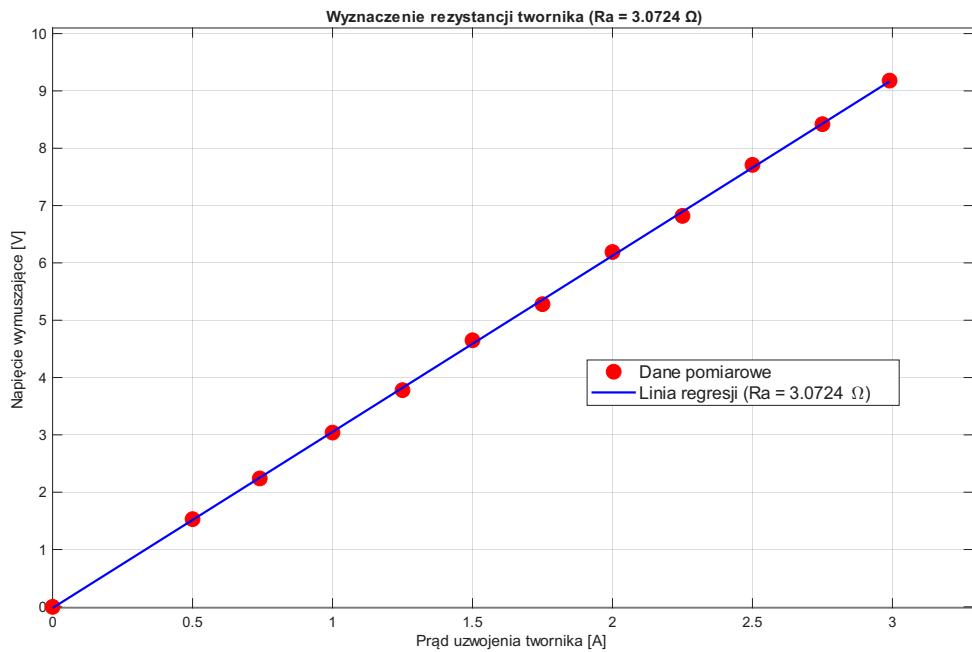
Tabela 1: Wyniki pomiarów i obliczona rezystancja

Prąd I_a [A]	Napięcie U_a [V]	Rezystancja R_a [Ω]
0.00	0.00	0.00
0.50	1.53	3.06
0.74	2.24	3.03
1.00	3.04	3.04
1.25	3.78	3.02
1.50	4.65	3.10
1.75	5.28	3.02
2.00	6.19	3.10
2.25	6.82	3.03
2.50	7.71	3.08
2.75	8.42	3.06
2.99	9.18	3.07

Następnie wyznaczono wartość średnia arytmetyczną rezystancji na podstawie wszystkich przeprowadzonych pomiarów:

$$R_a \approx 3.0555 \Omega \quad (3)$$

co stanowiło pierwsze przybliżenie wartości parametru R_a .



Rysunek 1: Wyznaczenie rezystancji twornika metodą regresji liniowej

Drugą metodą wyznaczenia rezystancji uzwojenia twornika było zastosowanie regresji liniowej. Linię regresji wyznaczono z wykorzystaniem skryptu w środowisku MATLAB. Współczynnik kierunkowy dopasowanej charakterystyki stanowił poszukiwaną wartość rezystancji. Regresję przeprowadzono w postaci funkcji liniowej $y = ax$, bez uwzględnienia wyrazu wolnego, co pozwoliło ograniczyć wpływ niepożądanych zakłóceń i błędów offsetu pomiarowego. Charakterystyka została przedstawiona na rysunku 1

Wartość rezystancji twornika wyznaczona metodą regresji liniowej wyniosła:

$$R_a = 3.0724 \Omega \quad (4)$$

Uzyskane wartości rezystancji różnią się ze względu na odmienny charakter błędów pomiarowych występujących w obu metodach. Metoda regresji liniowej charakteryzuje się mniejszą wrażliwością na błędy losowe, ponieważ wykorzystuje globalną informację zawartą w całym zbiorze punktów pomiarowych. Analizowana charakterystyka opisuje wzajemnie powiązane punkty, których trend oceniany jest w całym zakresie pomiarowym, w przeciwieństwie do metody średniej arytmetycznej, w której każdy pomiar traktowany jest niezależnie.

W związku z powyższym, jako bardziej wiarygodną metodę wyznaczania rezystancji uzwojenia twornika przyjęto metodę regresji liniowej, która zapewnia mniejszą niepewność pomiarową oraz lepsze odwzorowanie rzeczywistej zależności pomiędzy mierzonymi wielkościami.

2.3 Porównanie otrzymanych wartości

Dla ilościowego porównania obu metod wyznaczono różnicę bezwzględną oraz względową pomiędzy uzyskanymi wartościami rezystancji uzwojenia twornika. Różnica bezwzględna wynosi

$$\Delta R_a = |R_{a \text{ reg}} - R_{a \text{ sr}}| = 0.0169 \Omega \quad (5)$$

Różnicę względną, odniesioną do wartości uzyskanej metodą regresji liniowej, wyznaczono ze wzoru

$$\delta R_a = \frac{\Delta R_a}{R_{a \text{ reg}}} \cdot 100\% \approx 0.55\% \quad (6)$$

Niewielka wartość różnicy względnej potwierdza spójność otrzymanych wyników oraz poprawność przeprowadzonych pomiarów. Jednocześnie metoda regresji liniowej zapewnia większą odporność na błędy losowe i lepsze wykorzystanie informacji zawartej w całym zbiorze danych pomiarowych, dlatego jej wynik został przyjęty do dalszych analiz.

3 Indukcyjność uzwojenia twornika L_a

3.1 Metodyka pomiarów

Pomiar indukcyjności uzwojenia twornika L_a , w przeciwieństwie do pomiaru rezystancji, możliwy jest wyłącznie w stanie dynamicznym. Efekt indukcyjności ujawnia się w odpowiedzi układu na wymuszenie nieustalone, w szczególności o charakterze skokowym. Ze względu na właściwości zastosowanego zasilacza laboratoryjnego uzyskanie idealnego wymuszenia skokowego było utrudnione, ponieważ obecność transformatora powodowała istotne zakłócenia w momentach przełączania przekaźników.

Z tego względu do obserwacji wpływu indukcyjności uzwojenia twornika wykorzystano **zjawisko zaniku prądu w obwodzie**, występujące w procesie komutacji. Analiza przebiegu czasowego prądu w fazie jego wygaszania umożliwiła pośrednie wyznaczenie wartości indukcyjności L_a .

Proces zaniku prądu w obwodzie twornika ma charakter wykładniczy i zachodzi od wartości początkowej A do zera ze stałą czasową τ_a . Przebieg ten można aproksymować przy pomocy równania:

$$I_a(t) = A e^{-\frac{t}{\tau_a}} \quad (7)$$

Dla każdego układu typu RL stała czasowa τ_a określona jest zależnością:

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (8)$$

Oznacza to, że wyznaczając chwilę czasu, w której wartość prądu osiąga poziom $\frac{A}{e}$, możliwe jest określenie stałej czasowej układu, gdyż zachodzi zależność:

$$I_a(t = \tau_a) = Ae^{-1} = \frac{A}{e} \quad (9)$$

Po wyznaczeniu wartości stałej czasowej τ_a oraz znanej rezystancji uzwojenia twornika R_a , określonej w poprzednim punkcie, indukcyjność uzwojenia twornika jest możliwa do obliczenia z przekształconej zależności (8):

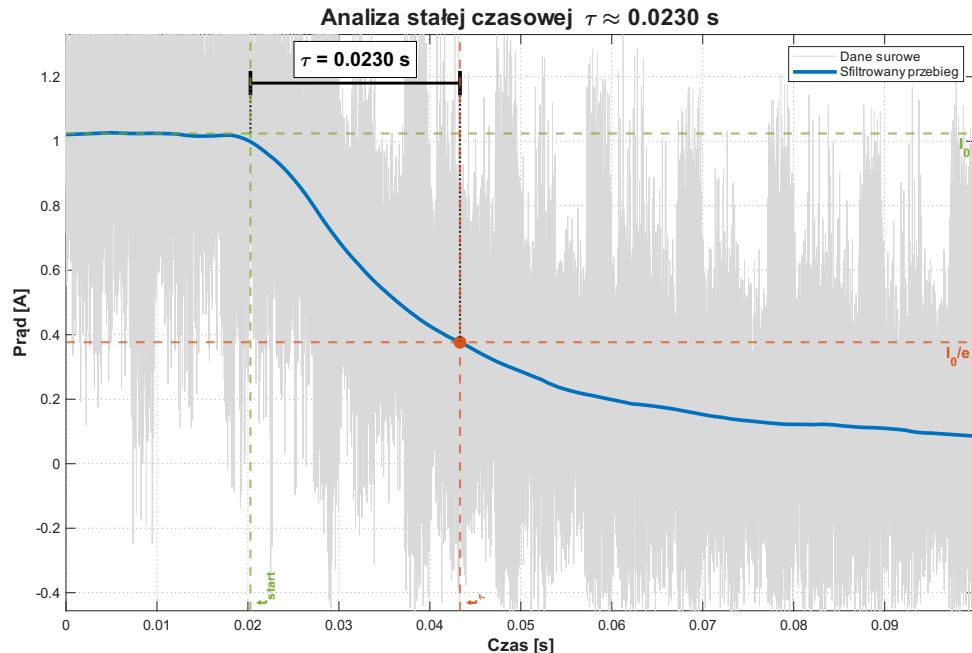
$$L_a = \tau_a R_a \quad (10)$$

3.2 Pomiary i opracowanie wyników

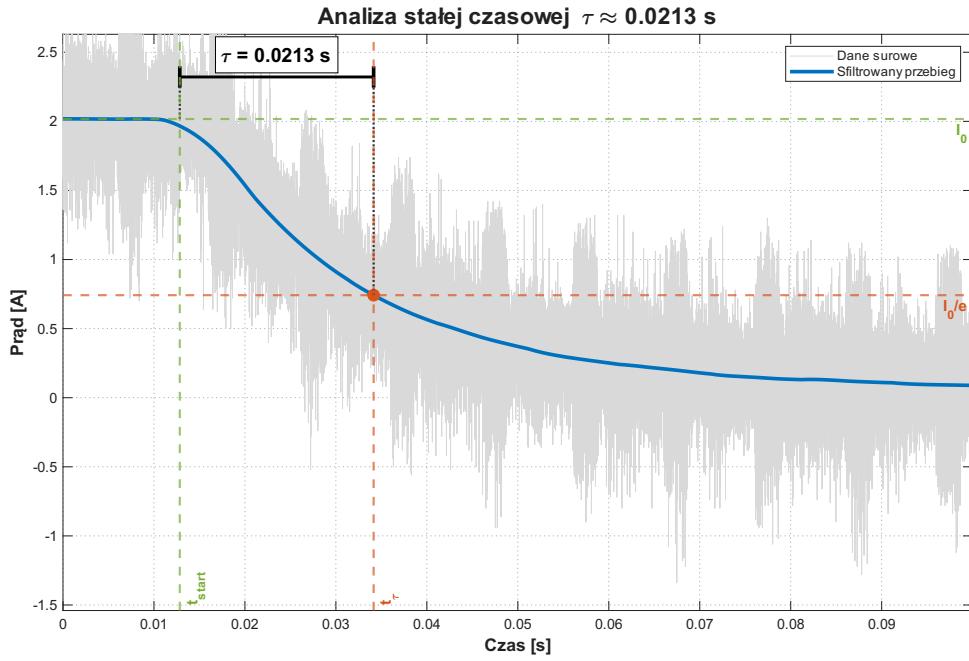
W celu wyznaczenia indukcyjności uzwojenia twornika L_a utworzono układ pomiarowy z wykorzystaniem wcześniej stosowanego zasilacza laboratoryjnego, umożliwiającego wymuszenie zadanej wartości prądu twornika. Układ pomiarowy składał się także z badanego obwodu typu RL oraz przełącznika sterującego.

Ponieważ celem pomiaru była obserwacja odpowiedzi dynamicznej układu, konieczne było wytworzenie wymuszenia skokowego. Zrealizowano je poprzez gwałtowne zwarcie obwodu za pomocą przełącznika, co powodowało zanik prądu w obwodzie pomiarowym. Przebieg wygaszania prądu stanowił podstawę do dalszej analizy indukcyjności uzwojenia twornika.

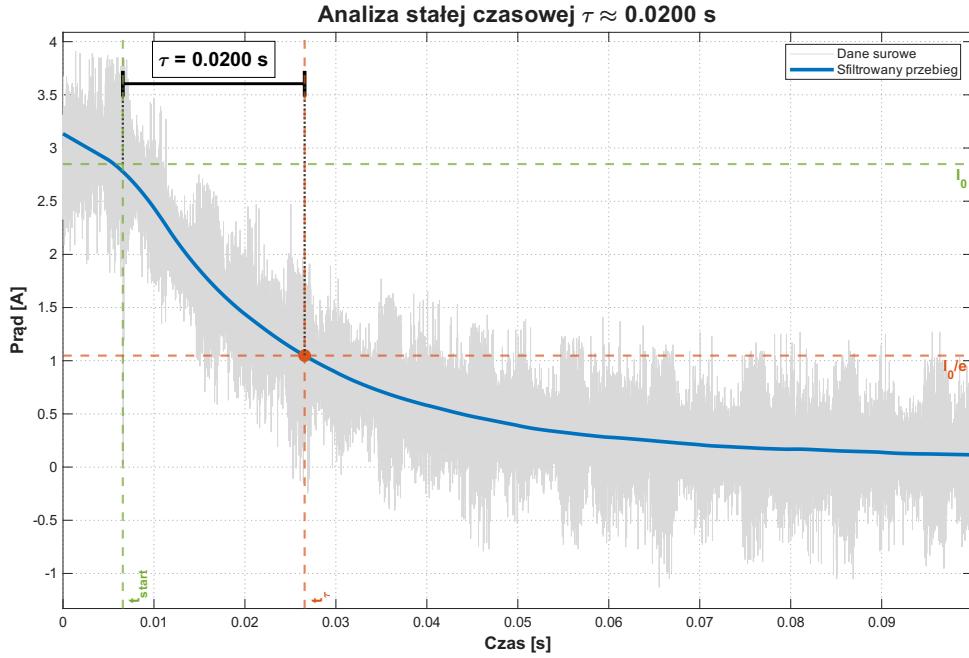
Pomiary przeprowadzono dla trzech nastaw wartości prądu początkowego: $A = I_a = 1.01 \text{ A}$, 2.02 A oraz 3.10 A . Dane niezbędne do wyznaczenia indukcyjności uzwojenia twornika zarejestrowano za pomocą oscyloskopu w postaci plików .csv.



Rysunek 2: Przebieg zaniku prądu w obwodzie twornika, $I_a = 1.01 \text{ A}$



Rysunek 3: Przebieg zaniku prądu w obwodzie twornika, $I_a = 2.02$ A



Rysunek 4: Przebieg zaniku prądu w obwodzie twornika, $I_a = 3.10$ A

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów, z wykorzystaniem dedykowanego skryptu w środowisku MATLAB, opracowano charakterystyki czasowe prądu, przedstawione na rysunkach 2, 3, 4, na podstawie których wyznaczono wartości stałej czasowej układu:

$$\tau_a = \begin{bmatrix} 23.0 \\ 21.3 \\ 20.0 \end{bmatrix} \text{ ms} \quad (11)$$

Na ich podstawie, zgodnie z zależnością (10), obliczono wartości indukcyjności uzwojenia twornika:

$$L_a = \begin{bmatrix} 70.665 \\ 65.442 \\ 61.448 \end{bmatrix} \text{ mH} \quad (12)$$

Następnie wyznaczono średnią arytmetyczną otrzymanych wartości indukcyjności:

$$\bar{L}_a = 65.852 \text{ mH} \quad (13)$$

W celu oceny rozrzutu wyników obliczono odchylenie standardowe:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (L_{a,i} - \bar{L}_a)^2} = 4.622 \text{ mH} \quad (14)$$

gdzie $N = 3$ oznacza liczbę przeprowadzonych pomiarów.

Ostatecznie wartość **indukcyjności uzwojenia twornika** określono jako:

$$L_a = (65.852 \pm 4.622) \text{ mH} \quad (15)$$

4 Współczynnik k_Φ

4.1 Metodyka pomiarów

Z poprzedniego ćwiczenia laboratoryjnego wiadomo, że współczynnik k_Φ stanowi uproszczenie przyjęte w analizowanym modelu silnika. W ujęciu rzeczywistym rozróżnia się stałą napięciową k_v oraz stałą momentową k_m . W niniejszym ćwiczeniu nadal rozpatrywana jest uproszczona postać parametru, zakładająca równość obu stałych.

Przy takim założeniu współczynnik k_Φ może zostać wyznaczony na podstawie dwóch zależności opisujących pracę silnika prądu stałego:

$$T_e = k_\Phi \cdot i_a \quad (16)$$

$$\varepsilon = k_\Phi \cdot \omega_r \quad (17)$$

gdzie T_e oznacza moment elektromagnetyczny, i_a to prąd twornika, ε to siła elektromotoryczna, ω_r to prędkość kątową wirnika.

Wybór metody wyznaczenia współczynnika k_Φ podyktowany był możliwościami oferowanymi przez stanowisko laboratoryjne. Bezpośredni pomiar momentu elektromagnetycznego jest procesem złożonym i obarczonym dużą niepewnością, natomiast pomiar siły elektromotorycznej oraz prędkości obrotowej jest znacznie prostszy do realizacji. Z tego względu do wyznaczenia współczynnika k_Φ wykorzystano zależność (17), którą przekształcono do postaci:

$$k_\Phi = \frac{\varepsilon}{\omega_r} \quad (18)$$

Takie wyznaczenie współczynnika k_Φ jest możliwe wyłącznie w przypadku, gdy napięcie na zaciskach twornika spełnia zależność:

$$U_a = \varepsilon \quad (19)$$

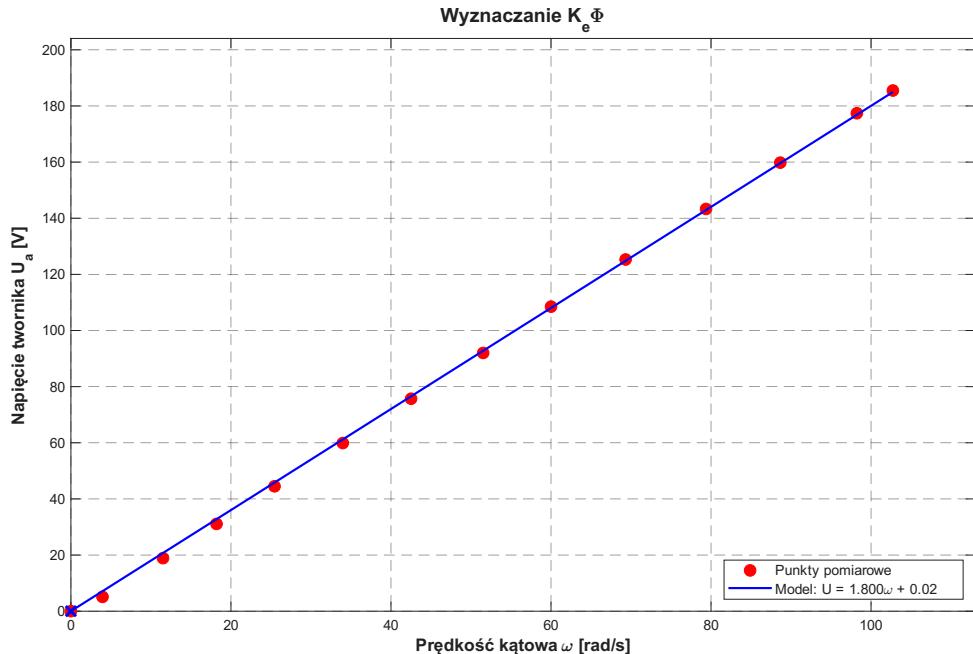
Warunek ten zachodzi jedynie przy rozwartym obwodzie twornika, gdy prąd twornika jest równy zeru, a spadki napięcia na rezystancji i indukcyjności uzwojenia nie występują.

Ponieważ podczas pomiaru zaciski twornika muszą pozostać rozwarte, a jednocześnie konieczne jest zapewnienie niezerowej prędkości obrotowej wirnika, realizacja pomiarów wymagała zastosowania aktywnego wzbudzenia mechanicznego. W tym celu do napędu obcego wykorzystano urządzenie Microverter AEG, pracujące jako przekształtnik częstotliwości, umożliwiający sterowanie prędkością obrotową silnika napędzającego badany obiekt.

4.2 Pomiary i opracowanie wyników

W celu wyznaczenia stałej k_Φ z zależności (18) przeprowadzono pomiary zależności siły elektromotorycznej ε od zadanej prędkości obrotowej ω_r . Prędkość obrotowa była wymuszana za pomocą przekształtnika częstotliwości Microverter AEG, pracującego jako napęd obcy.

Ponieważ analizowana charakterystyka ma charakter liniowy, do wyznaczenia współczynnika k_Φ zastosowano metodę regresji liniowej. W przeciwieństwie do wcześniejszych analiz, wykorzystano model regresji liniowej z wyrazem wolnym. Decyzję tę podjęto ze względu na występowanie stałego przesunięcia (offsetu) toru pomiarowego napięcia twornika, który w badanym układzie powodował pojawienie się napięcia rzędu 0.02 V przy zerowej prędkości obrotowej.



Rysunek 5: Wyznaczenie stałej k_Φ metodą regresji liniowej

Uwzględniając wyraz wolny w modelu regresji liniowej, otrzymano równanie opisujące zależność siły elektromotorycznej od prędkości obrotowej:

$$\varepsilon = 1.800 \omega_r + 0.02 \text{ [V]} \quad (20)$$

Współczynnik kierunkowy otrzymanej charakterystyki odpowiada wartości współczynnika k_Φ , który dla analizowanego silnika wynosi:

$$k_\Phi = 1.800 \quad (21)$$

5 Moment bezwładności wirnika J_r

6 Współczynnik b_1

Literatura

- [1] Materiały do ćwiczenia laboratoryjnego dostępne na platformie eKursy, Politechnika Poznańska, <https://ekursy.put.poznan.pl/mod/folder/view.php?id=3022726>
- [2] K. Zawirski, J. Deskur, T. Kaczmarek, *Automatyka napędu elektrycznego*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2012
- [3] J. Sidorowicz, *Napęd elektryczny i jego sterowanie*, Oficyna Wydawicza Politechniki Warszawskiej, 1997