

Raport z badań agregatu prądotwórczego MAP-32

Tytuł projektu:

Budowa innowacyjnego magnetycznego agregatu
prądotwórczego.

Numer umowy:

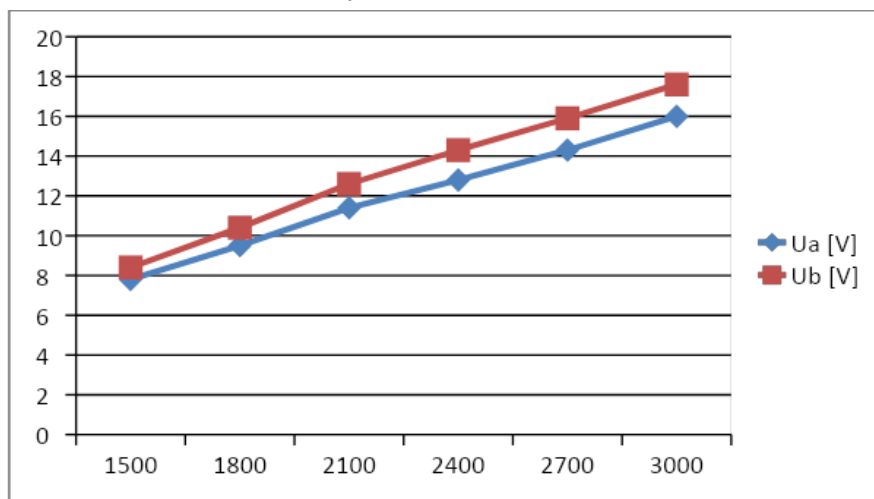
POIR.01.01.01-00-0282/15

1. BADANIA LABORATORYJNE I SYMULACJE.

1.1 Pomiary na stanowisku oryginalnym

Na opracowanym w ramach projektu stanowisku przeprowadzono serię pomiarów, z których do prezentacji wybrano najbardziej miarodajne:

- bieg jałowy z otwartym uzwojeniem kompensacyjnym $U_a(n)$
- bieg jałowy z zamkniętym uzwojeniem kompensacyjnym $U_b(n)$

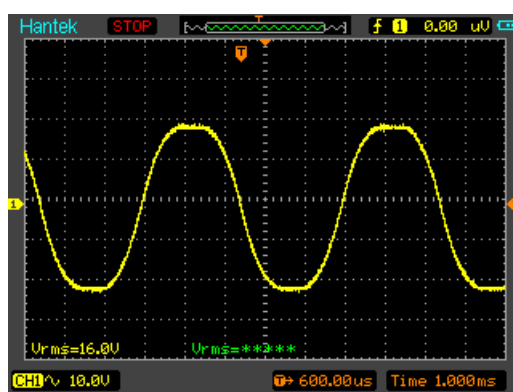


n [obr/min]	Ua [V]	Ub [V]
1500	7,8	8,4
1800	9,5	10,4
2100	11,4	12,6
2400	12,8	14,3
2700	14,3	15,9

3000

16*

17,6



* - na oscylogramie

- napięcia w uzwojeniach L , L' oraz L'' dla biegu jałowego z otwartym uzwojeniem kompensacyjnym dla $n=3000$ obr/min oraz ich rezystancje

U_L [V]	$U_{L'}$ [V]	$U_{L''}$ [V]	R_L [Ω]	$R_{L'}$ [Ω]	$R_{L''}$ [Ω]
16	16,1	32,1	5,6	5,6	10,5

- zasilanie z generatora napięcia sinusoidalnego pozwalające zidentyfikować parametry zastępcze uzwojenia L generatora dla częstotliwości 200 Hz odpowiadającej prędkości obrotowej wynoszącej $n=3000$ obr/min.

U [V]	I [A]	Z [Ω]	R_L [Ω]	X_L [Ω]	L_L [H]
0,30	0,03	7,9	5,6	5,56	0,00
5	9				42

Na tej podstawie wyznaczono również indukcyjności pozostałych uzwojeń. Uzwojenie L'' ma dwukrotnie ($z''=200$) więcej zwojów niż pozostałe ($z=z'=100$) co skutkuje cztery razy większą

indukcyjnością (**UWAGA - w materiałach dostarczonych przez firmę niepoprawnie zidentyfikowano połączenia z zaciskami dla uzwojeń L', L''**).

L_L	L_L'	L_L''
[H]	[H]	[H]
0,00	0,00	0,01
42	42	68

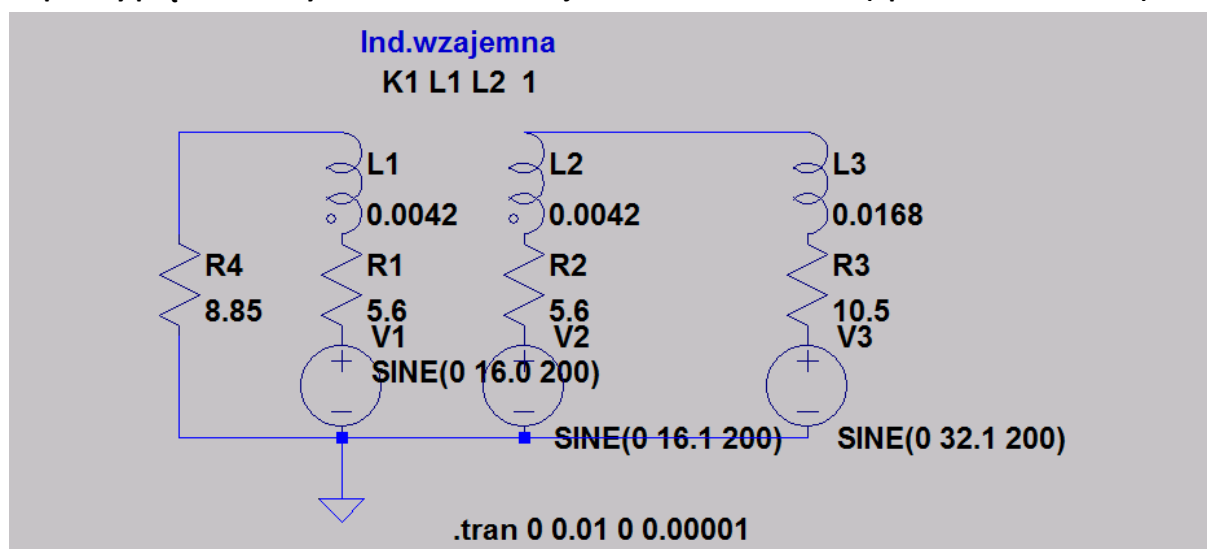
(**UWAGA - Obracając wirnik w trakcie tego pomiaru nie wykryto zmian indukcyjności w zależności od kąta obrotu.**).

Ze względu na bifilarne nawinięcie uzwojeń L i L' ich współczynnik sprzężenia wzajemnego założono na poziomie $K1=1$. Pozwoliło to zidentyfikować elektryczny schemat zastępczy układu w postaci przedstawionej poniżej za pomocą programu LTSpice. Parametry uzwojeń przedstawione na schemacie dotyczą:

L	L'	L''
L1,	L2,	L3,
R1	R2	R3

Rezystancja R4 jest rezystancją obciążenie uzwojenia L generatora dołączoną do zacisków 1,3.

UWAGA - w programie LTSpice wpisano wartości skuteczne napięć w miejsce amplitud. Jest to dopuszczalne ze względu na liniowość obwodu magnetycznego. Z tego powodu w obliczeniach amplitudy prądów należy również traktować jako wartości skuteczne (np. do obliczenia strat).



Poprawność schematu zweryfikowano porównując wyniki dla różnych stanów pracy.

1.2 Weryfikacja modelu symulacyjnego

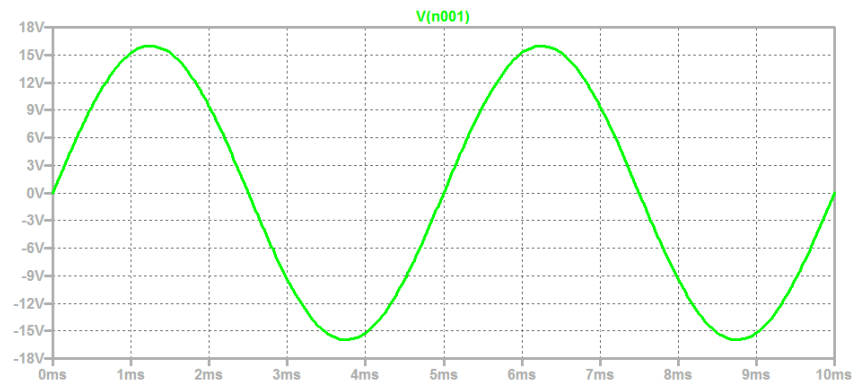
Bieg jałowy:

- A. identyfikacja biegu jałowego ($R_4=100000\ [\Omega]$) z otwartym ($R_3=100000\ [\Omega]$) uzwojeniem kompensacyjnym dla $n=3000\text{ obr/min}$

Pomiar:

n [obr/min]	U [V]
3000	16

Symulacja:

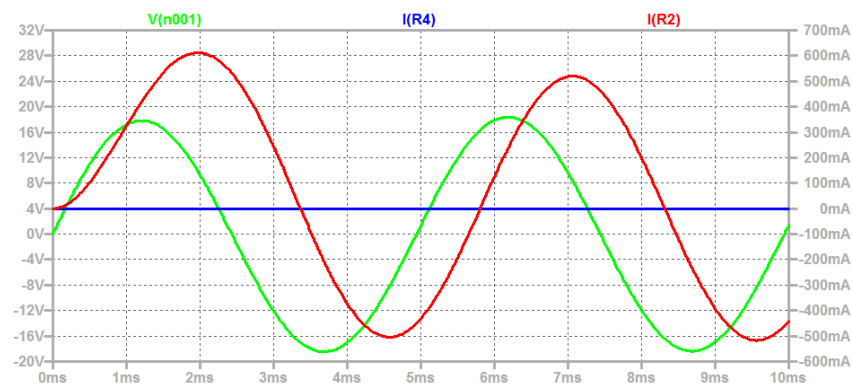


- B. identyfikacja biegu jałowego ($R_4=100000\ [\Omega]$) z zamkniętym uzwojeniem kompensacyjnym dla $n=3000\text{ obr/min}$

Pomiar:

n [obr/min]	U [V]
3000	17,6

Symulacja:



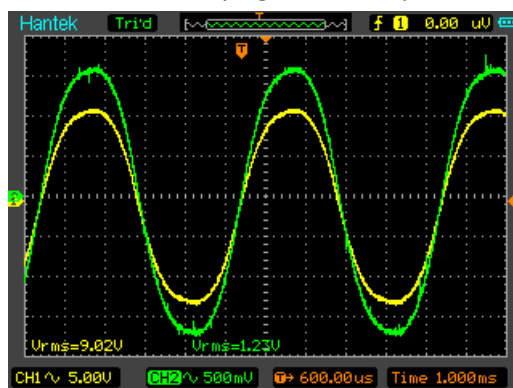
Stan obciążenia:

- A. stan obciążenia ($R_4=8,85 \text{ } [\Omega]$) z otwartym ($R_3=100000 \text{ } [\Omega]$) uzwojeniem kompensacyjnym dla $n=3000 \text{ obr/min}$

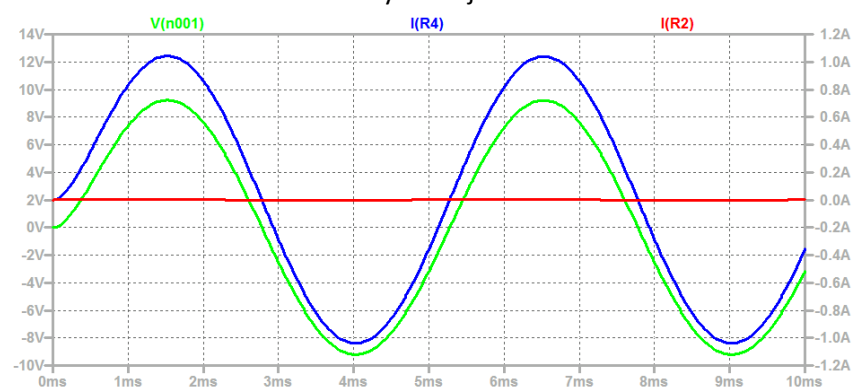
Pomiar:

U_L [V]	I_L [A]
9,02 *	1,02 3

* - na oscylogramie (żółty)



Symulacja:



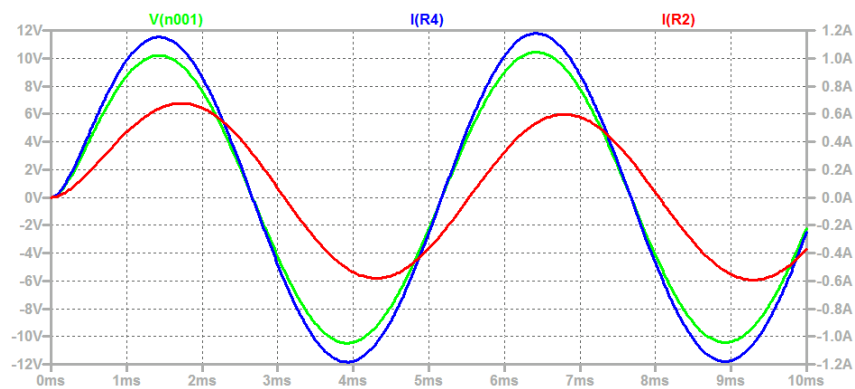
$$U_L = V(n001); I_L = I(R4)$$

- B. stan obciążenia ($R_4=8,85 \text{ } [\Omega]$) z zamkniętym uzwojeniem kompensacyjnym dla $n=3000 \text{ obr/min}$

Pomiar:

U_L [V]	I_L [A]
10,2	1,15 2

Symulacja:

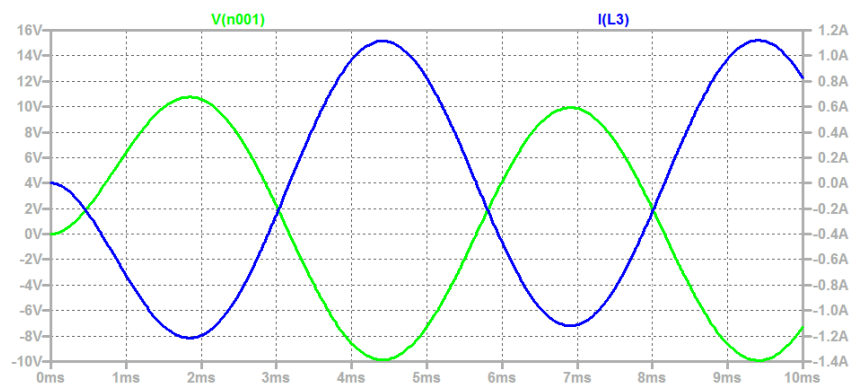


C. stan obciążenia ($R_4=8,85 \text{ } [\Omega]$) dla samego uzwojenia silnika kompensacyjnego L'' dla $n=3000 \text{ obr/min}$

Pomiar:

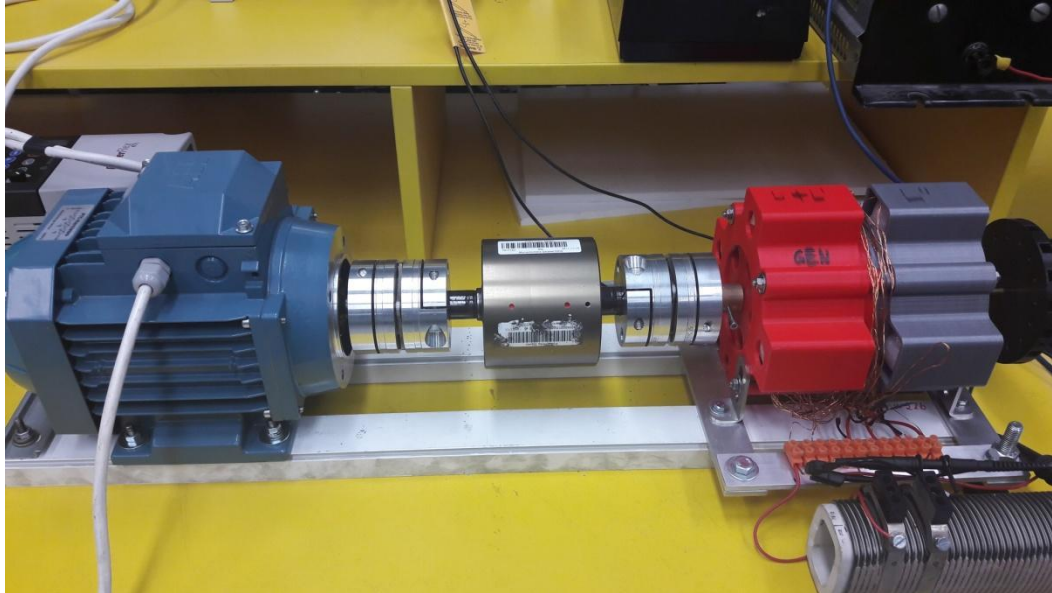
U_L	I_L
"[V]	"[A]
10,1	1,15
	9

Symulacja:



1.3 Pomiary na stanowisku z momentomierzem

W celu pomiaru momentu napędowego przygotowano stanowisko zmodyfikowane przedstawione na poniższym zdjęciu. Dzięki temu można było wyznaczyć moc i całkowitą sprawność układu.



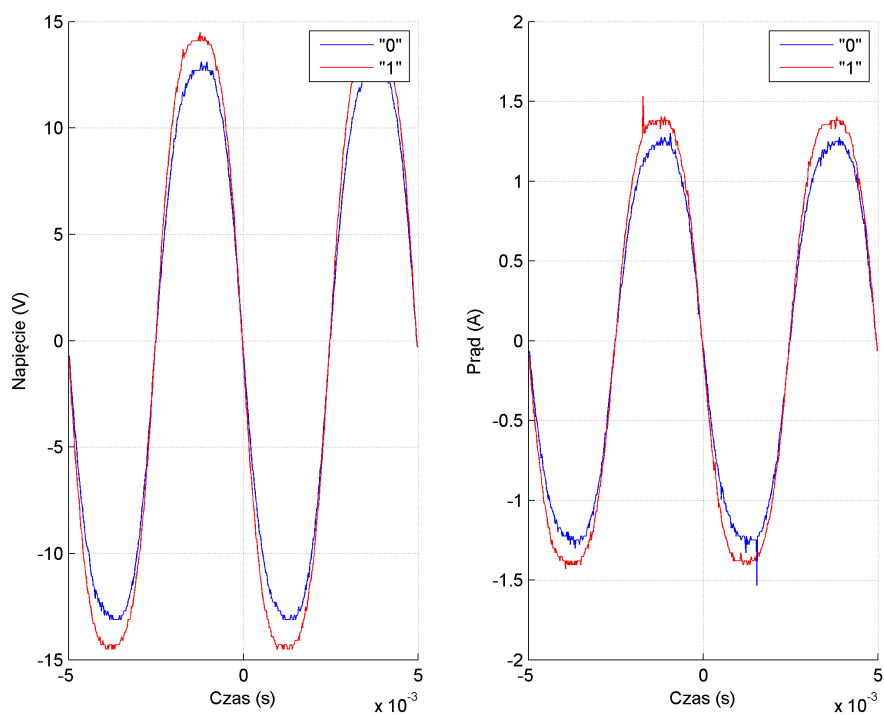
W układ pomiędzy silnikiem napędowym a badanym prototypem wprowadzono dla potrzeb pomiaru miernik momentu DATAFLEX 22/20 firmy KTR. Wybór tego przetwornika wynika z możliwie małego zakresu pomiarowego, jakim dysponował zespół realizujący badania.

Wykorzystano momentomierz DATAFLEX 22/20 o zakresie pomiarowym do 20 Nm, oraz wysoką częstotliwość przenoszonego sygnału (nawet do 15 kHz). Podstawowe parametry użytkowe momentomierza zestawiono w tablicy 1.

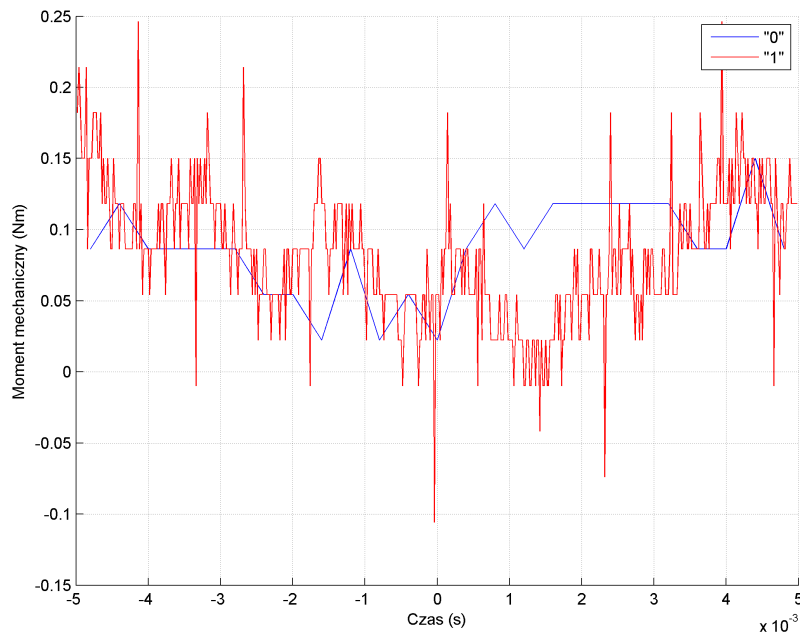
Tablica 1. Podstawowe parametry elektryczne i mechaniczne dla momentomierza DATAFLEX 22/20.

rozmiar DATAFLEX®	22/20	22/50
	wymiary [mm]	
wymiar d		22
wymiar D		98
wymiar L ₁		150
wymiar L ₂		30
wymiar L ₃		90
wymiar L ₄		64
wymiar L ₅		5
	dane elektryczne	
moment znamionowy T _{KN} [Nm]	-20 ... +20 Nm	-50 ... +50 Nm
maksymalna częstotliwość sygnału [kHz]		16
błąd pomiaru [%] ¹⁾		1
wpływ temperatury [%/K]		0,05
zakres temperatur pracy [°C]		0 ... 55
napiecie zasilania [V] DC		24 ± 4
maksymalny pobór prądu [mA]		100
	sygnał wyjściowy dla momentu obrotowego	
napiecie wyjściowe [V]		0 ... 10
prąd wyjściowy [mA]		4 ... 20
	sygnał wyjściowy dla prędkości	
liczba impulsów / obrót		60
napiecie wyjściowe [V]		24
	dane mechaniczne	
maksymalne obciążenie statyczne T _{Kmax} [%] ¹⁾		150
moment niszczący T _{Kniszcza} [%] ¹⁾		300
maksymalny moment zginający [Nm]	5	10
maksymalna siła promieniowa [N]	42	84
maksymalna siła osłowa [kN]	3	5
masa [kg]	1,5	1,5
szywność skrętna CT [Nm/rad]	2865	7163
kąt skręcenia dla T _{KN} [stopnie]		0,4
moment bezwładności [kgm ²]	0,000131	0,000132
maksymalna prędkość robocza [1/min] ²⁾		9000
prędkość szczytowa [1/min] ²⁾		12000

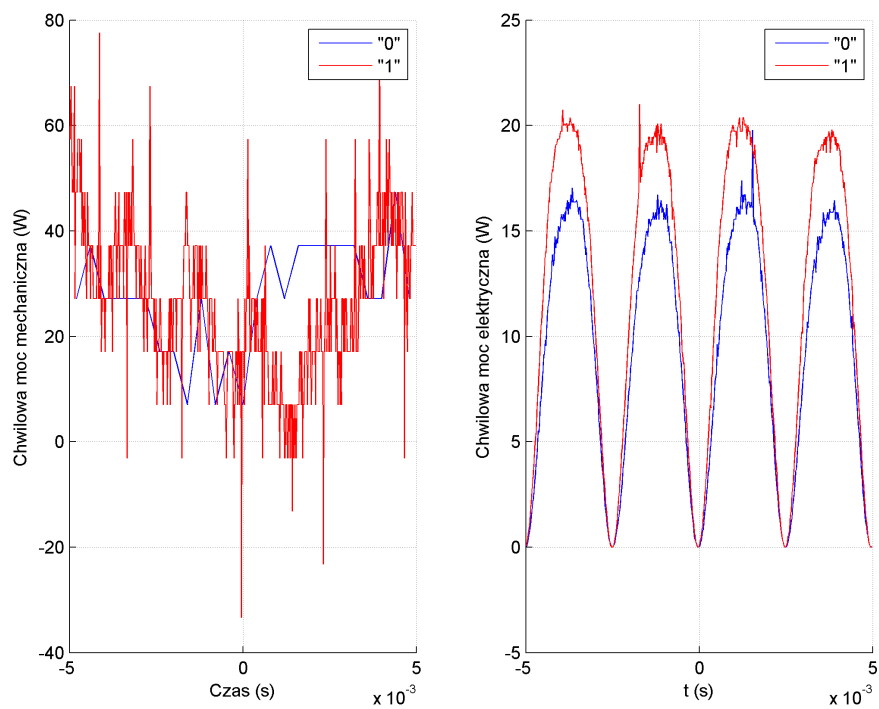
W celu wyznaczenia orientacyjnej sprawności całkowitej badanego generatora, napędzono go z prędkością obrotową $n = 3000$ obr/min, a następnie obciążono opornicą o rezystancji bliskiej tej, dla której wydawana przez generator moc powinna jest największa. Za pomocą oscyloskopu rejestrowano przebiegi prądu $i(t)$ i napięcia $u(t)$ (Rys. 1) w obwodzie obciążenia oraz przebieg momentu $T(t)$ na wale generatora (Rys. 2). Przebiegi zapisywano dla czasu t należącego do przedziału $(-t_m, t_m)$, $t_m = 0,2$ s. Pomiar prowadzono dla dwóch konfiguracji połączeń uzwojeń generatora i "silnika kompensacyjnego": przy rozłączonych uzwojeniach silnika (konfiguracja opisywana jako "0") i przy uzwojeniach generatora połączonych z uzwojeniami silnika (konfiguracja "1").



Rysunek 1. Przebiegi prądu i napięcia dla rozłączonego ("0") i włączonego ("1") silnika kompensacyjnego.



Rysunek 2. Przebiegi momentów mechanicznych na wale generatora dla rozłączonego ("0") i włączonego ("1") silnika kompensacyjnego.



Rysunek 3. Przebiegi mocy chwilowych mechanicznej i elektrycznej dla rozłączonego ("0") i włączonego ("1") silnika kompensacyjnego.

Z użyciem zarejestrowanych danych obliczano całkowite energie rejestrowane w czasie pomiaru: mechaniczną E_{mech} dostarczaną do generatora (1) i E_{el} wydzielaną na obciążeniu (2). Przebiegi mocy chwilowych przedstawiono na Rys. 3.

$$E_{mech} = \omega \int_{-t_m}^{t_m} T(t) dt \quad (1)$$

$$E_{el} = \int_{-t_m}^{t_m} u(t)i(t) dt \quad (2)$$

Na podstawie obliczonych w ten sposób energii obliczono średnie moce: mechaniczną dostarczaną do generatora P_{mech} i elektryczną wydzielaną na obciążeniu P_{el} (3):

$$P_{mech} = \frac{E_{mech}}{2t_m}, P_{el} = \frac{E_{el}}{2t_m} \quad (3)$$

Sprawność oblicza się ze wzoru (4):

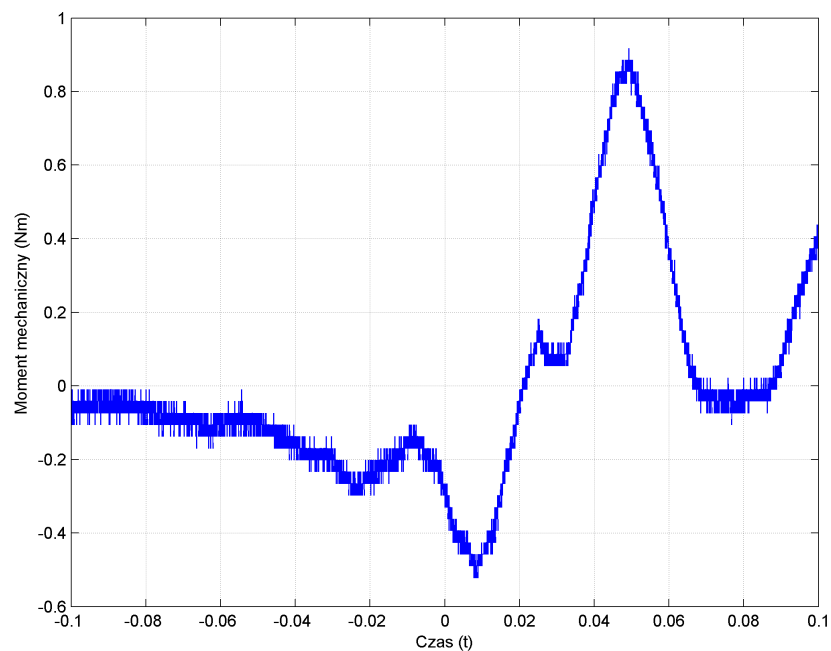
$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}} \quad (4)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Sprawność i moc średnia w badanym generatorze.

Wielkość	Jednostka	Konfiguracja "0"	Konfiguracja "1"
Średnia moc mechaniczna	W	34,09	30,95
Średnia moc elektryczna	W	9,50	12,05
Sprawność	%	27,9	38,9

Podczas pomiarów zarejestrowano też przebieg momentu przy poruszeniu wirnika niezasilonego generatora (Rys. 4). Przebieg ten obrazuje wielkość momentu zaczepowego. Jego amplituda wyznaczona jako połowa wartości międzyszczytowej wynosi ok. 0,7 Nm.



Rysunek 4. Przebieg momentu zaczepowego.

2. MODEL ANALITYCZNY CZĘŚCI ELEKTRYCZNEJ

Przy tworzeniu modelu przyjęto następujące założenia upraszczające:

- Model liniowy magnetycznie,
- Sinusoidalne rozłożenie uzwojeń,
- Sinusoidalny przebieg napięć generowanych przez magnesy trwałe (PM),
- Założenie stałej prędkości wirowania (brak zmian napięć indukowanych).

Do stworzenia modelu części elektrycznej urządzenia wykorzystano program typu PSpice (LTspice). Schemat elektryczny zaproponowanego modelu został przedstawiony w punkcie dotyczącym pomiarowej identyfikacji jego parametrów elektrycznych w poprzednim rozdziale (p.1.1). Wykonane z jego wykorzystaniem sprawdzające symulacje dla poszczególnych stanów pracy przedstawiono również w poprzednim rozdziale porównując je z odpowiadającymi im wynikami pomiarów (p.1.2). Otrzymana bardzo dobra zgodność wyników tych symulacji z wartościami uzyskanymi pomiarowo dowodzi poprawności przedstawionego modelu uproszczonego.

Model pozwala ocenić sprawność η_e części elektrycznej układu. Szczególnie istotne jest porównanie stanów przedstawionych w poprzednim rozdziale a dotyczących stanu obciążenia przy:

a) otwartym uzwojeniu kompensacyjnym

U_L [V]	I_L [A]	P_{wyj} [W]	ΔP_L [W]	η_e [%]
9,02	1,02	9,22	5,86	61

$$\eta_e = P_{wyj} / (P_{wyj} + \Delta P_L) * 100\%$$

ΔP_L - straty w obwodzie generatora (L)

b) zamkniętym obwodzie uzwojenia kompensacyjnego ($K=L'+L''$)

U_L [V]	I_L [A]	P_{wyj} [W]	ΔP_L [W]	I_K [A]	ΔP_K [W]	η_e [%]
10,2	1,15	11,7	7,43	0,6*	5,77	47

* - wynik symulacji

$$\eta_e = P_{wyj} / (P_{wyj} + \Delta P_L + \Delta P_K) * 100\%$$

ΔP_K - straty w obwodzie kompensacyjnym

Wyniki powyższe pokazują, iż sprawność części elektrycznej układu po włączeniu obwodu kompensacyjnego maleje w stosunku do układu oryginalnego. Wynika to ze strat rezystancyjnych w tym obwodzie.

Weryfikacja otrzymanych wyników pomiarowych wskazujących na poprawę sprawności całego układu elektromechanicznego wymagałaby jednak stworzenia znacznie bardziej skomplikowanego, polowo-obwodowego modelu agregatu.

3.FINANSOWANIE

Projekt dofinansowano ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.