

CZESŁAW MYRCIK

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i EnergoelektronikiROZRUCH CZĘSTOTLIWOŚCIOWY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO -  
- POMIARY W UKŁADZIE RZECZYWISTYM

Streszczenie. W pracy zamieszczono oscylogramy z pomiarów dokonanych w układzie: prądnica synchroniczna o regulowanej prędkości obrotowej - silnik synchroniczny. Wnioski z uzyskanych przebiegów pozwalają ocenić możliwości rozruchu częstotliwościowego małych silników synchronicznych oraz znacznie uprościć równania silnika przy obliczaniu takiego rozruchu np. na maszynie analogowej.

1. Wstęp

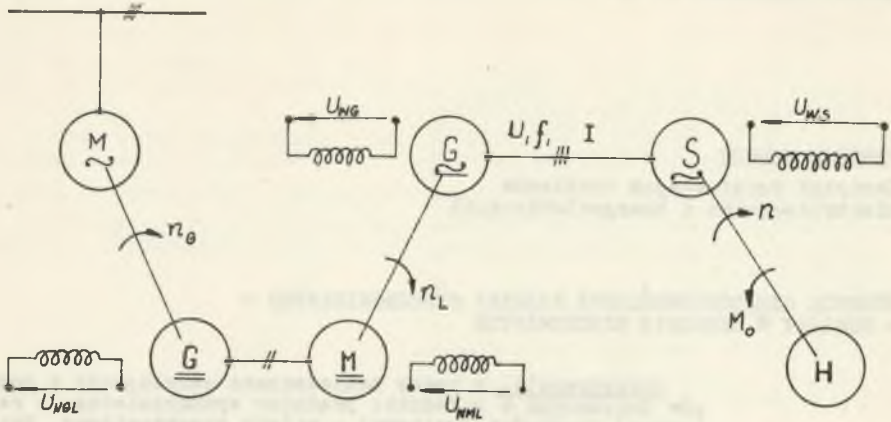
Praca jest kontynuacją artykułu "Analiza możliwości rozruchu częstotliwościowego silnika synchronicznego" - jest odpowiadającą mu częścią pomiarową.

Celem pomiarów było wyznaczenie maksymalnej szybkości wzrostu pulsacji napięcia zasilającego silnik ( $\frac{d\omega}{dt}$ ), przy której nie następuje wypadnięcie z synchronizmu podczas rozruchu i regulacji prędkości obrotowej. Przedmiotem badań był mały silnik synchroniczny zasilany z prądnicy, której prędkość obrotową regulowano w układzie Leonarda.

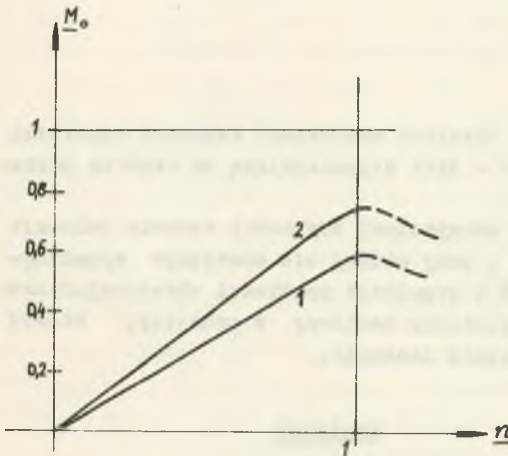
Dane maszyn synchronicznych:

<u>Silnik</u>	<u>Prądnica</u>
P = 15 kW	S = 18 kVA
U = 380 V	U = 400 V
I = 26,5 A	I = 26 A
$I_w$ = 17 A	$I_w$ = 26 A
n = 1000 obr/min	n = 1000 obr/min
$\cos \phi = 1$	$\cos \phi = 1$

Silnik prądu stałego, napędzający prądnicę posiada moc 15 kW i prędkość znamionową 1000 obr/min. Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 1. Podczas rozruchów silnik był obciążony asynchronicznym hamulcem pracującym w układzie hamowania dynamicznego. Charakterystykę momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej przedstawia rys. 2.



Rys. 1. Układ pomiarowy



Rys. 2. Charakterystyka momentu obciążenia w funkcji prędkości obrotowej:

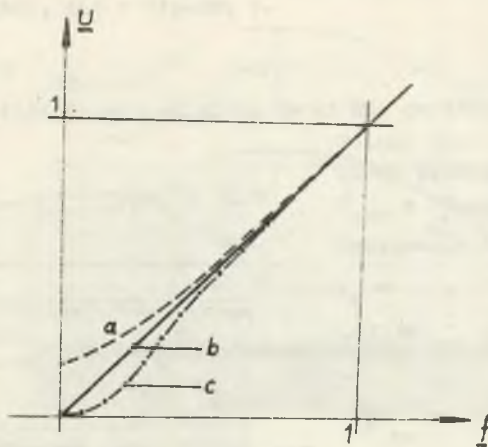
$$1. - M_0 = C_1 n, \quad 2. - M_0 = C_2 n$$

Rys. 3 przedstawia zależność napięcia od częstotliwości w trzech przypadkach:

- Wymagany kształt napięcia, uwzględniający kompensację spadku na rezystancji uzwojenia twornika,
- zależność idealna dla  $R_a = 0$
- zależność napięcia od częstotliwości w układzie pomiarowym.

Ponieważ rezystancje tworników są dla małych maszyn dość znaczne (w tym przypadku ok. 10%  $X_d$ ), wpływ ich dla częstotliwości 0 ÷ 10 Hz jest decydujący.

Niedomiar mocy układu Leonarda, jak też jego inercja powodują, że sygnał zadanej częstotliwości nie rośnie w czasie liniowo - lecz według krzywych wykładniczych. Dlatego też każdorazowo określono średnią i maksymalną chwilową wartość pochodnej częstotliwości ( $\frac{df}{dt}$ ),  $\frac{df}{dt}_{sr}$ ,  $\frac{df}{dt}_{mx}$ . Oscylogramy 1 + 5 obejmują rozruchy i hamowania silnika począwszy od pewnej częstotliwości (10 Hz) natomiast 6, 7 - rozruchy od postoju układu. Istotna różnica w sposobie prowadzenia rozruchu w tych przypadkach wynika stąd, że w obszarze małych częstotliwości napięcie na zaciskach silnika jest zbyt małe.



Rys. 3

We wszystkich przypadkach zarejestrowano sześć wielkości:

- $f$  - częstotliwość zadawana
- $U_w$  - napięcie wzbudzenia
- $n$  - prędkość obrotowa silnika
- $i_w$  - prąd wzbudzenia silnika
- $i$  - prąd fazy silnika (podwójna amplituda)
- $t$  - czas w sekundach.

Prądnicą synchroniczną w czasie wszystkich pomiarów była wzbudzona znamionowo.

## 2. Opis oscylogramów

### Oscylogram nr 1

Silnik synchroniczny nieobciążony  $M_0 = 0$

Wzbudzenie znamionowe  $I_w = I_{wN}$

Częstotliwość zadana rośnie od 11 Hz do 46 Hz, a następnie maleje do 10 Hz.

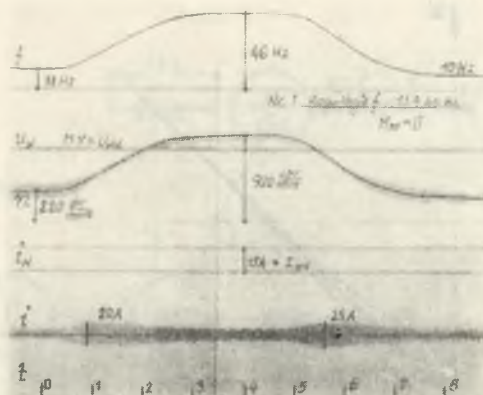
Czas rozruchu  $t_r = 2,6$  s

Czas hamowania  $t_h = 2,3$  s

Prąd maksymalny  $I_{mx} \approx 7$  A = 0,27  $I_N$  przy częstotliwości rosnącej

$I_{mx} \approx 9$  A = 0,35  $I_N$  przy częstotliwości malejącej.

Średnia pochodna częstotliwości  $\left(\frac{df}{dt}\right)_{\delta r} = 15 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$ ,  $\left(\frac{df}{dt}\right)_{mx} \approx \left(\frac{df}{dt}\right)_{\delta r}$ .



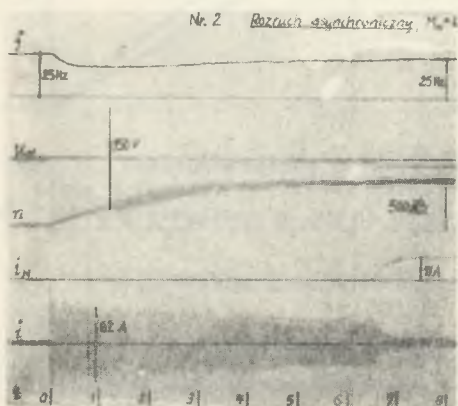
Osc. 1

Z oscylogramu wynika, że  $15 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$  nie jest bynajmniej maksymalną możliwą prędkością wzrostu częstotliwości.

Prąd twornika jest bardzo mały, co świadczy o niewielkim kącie mocy w stanie przejściowym. Nie widać kołysań w prądzie i napięciu wzbudzenia – kąt mocy w czasie regulacji jest zmienny w niewielkich granicach.

#### Oscylogram nr 2

Jest to rozruch asynchroniczny od postoju do 500 obr/min. Spadek częstotliwości w początkowym okresie rozruchu jest spowodowany ustępliwością



Osc. 2

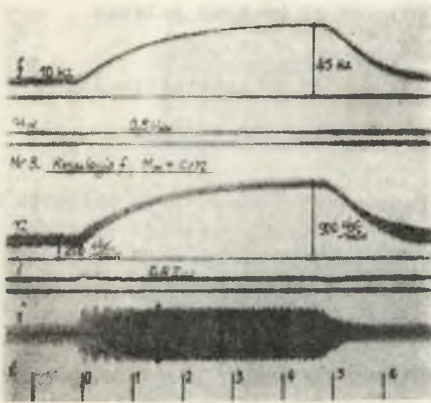
charakterystyki układu Leonarda. Napięcie na rozwartym uzwojeniu wzbudzenia wykazuje dość znaczną amplitudę – ponad 100 V. Prąd twornika nieznacznie przewyższa prąd znamionowy, co dowodzi znacznego spadku napięcia na prądnicę i rezystancji twornika silnika, przy zasilaniu bowiem z sieci prąd rozruchu przekracza  $3,5 I_N$ . W momencie  $t_0 \approx 7 \text{ s}$  następuje synchronizacja. Porównanie tego rozruchu z poprzednim uwidacznia zalety rozruchu częstotliwościowego:

$$t_r \approx 4 \text{ s}, \quad \text{co odpowiada} \quad \left( \frac{df}{dt} \right)_{sr} \approx 6 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$$

Czas rozruchu jest więc dwukrotnie większy, zaś prąd rozruchowy - około 3-krotnie większy, niż w wypadku 1.

## Oscylogram nr 3

Rozruch częstotliwościowy od 10 Hz do 45 Hz, po czym spadek do 10 Hz.



Oso. 3

Silnik jest obciążony momentem liniowo zależnym od  $n$ ,

$$M_{0\text{mx}} \approx 0,6 M_N \text{ przy } 1000 \text{ obr/min}$$

$$\text{Wzbudzenie osłabiono } I_w = 0,8 I_{wN}$$

$$t_r \approx 4 \text{ s}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\dot{\omega}_r} = 8,5 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ przy częstotliwości rosnącej}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\text{mx}} \approx 23 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$$

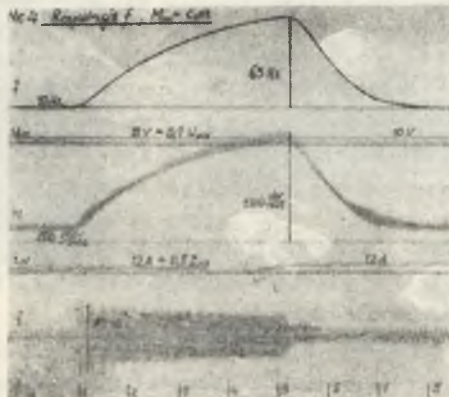
$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{\text{mx}} \approx 25 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ przy częstotliwości malejącej}$$

$I_{\text{mx}} \approx 0,6 I_N$  co świadczy o niewykorzystaniu pełnych możliwości.

Na początku rozruchu pochodna  $\frac{df}{dt}$  jest największa - wpływa to na prąd wzbudzenia, którego oscylacje wskazują na znaczne wahania kąta mocy.

## Oscylogram nr 4

Rozruch i hamowanie w granicach 10 ÷ 65 Hz.



Oso. 4

Moment obciążenia analogiczny jak w (3) z tym, że maksimum ok.  $1,3$  x większe,  $M_{omx} \approx 0,8 M_N$ .

Wzbudzenie silnika znacznie osłabione  $I_w = 0,7 I_{wN}$

$$t_r = 4 \text{ s}$$

$$t_h = 2,5 \text{ s}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{sr} = 14 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ przy wzroście}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{sr} = 22 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ przy maleniu}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{mx} = 25 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ częstotliwości}$$

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{mx} = 35 \frac{\text{Hz}}{\text{s}} \text{ częstotliwości}$$

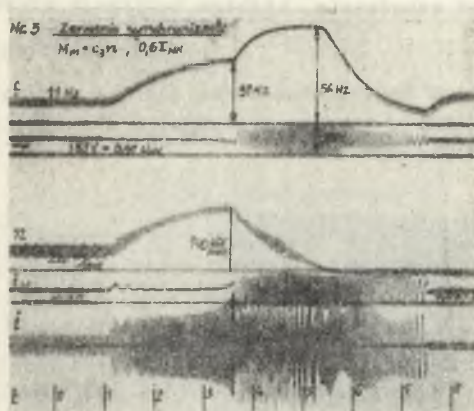
Prąd twornika  $I_{mx} \approx 0,8 I_N$

Widać wyraźnie drgania kąta mooy (w prądzie wzbudzenia) przy początku rozruchu ( $\max \frac{df}{dt}$ ), oraz w obszarze 1000 obr/min (na tą prędkość przypada maksimum  $M_N$ ). Jest to rozruch na granicy stabilności.

Bardzo duża pochodna częstotliwości -  $35 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$  - przy hamowaniu tłumaczy się współdziałaniem momentu obciążającego z polem twornika.

Oscylogram nr 5

Jest to przypadek zerwania synchronizmu.



Osc. 5

$\omega \approx 0$  - nakładania się bliskich częstotliwości  $f_0$  oraz  $(1-s)f_0$ . Prąd dochodzi do  $1,8 I_N$ .

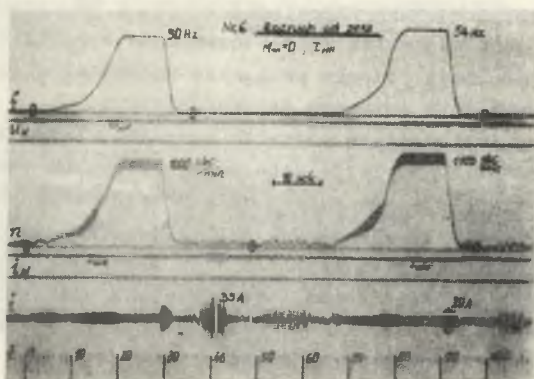
W n i o s e k: W tym przypadku pierwszorzędne znaczenie posiada moment obciążenia  $M_0$  i jego kształt w zależności od  $\omega$ . Moment bezwładności jest mały i pozwala na bardzo znaczne pochodne  $\frac{df}{dt}$  - np.  $25 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}$ , obciążenie zaś dość poważnie ograniczona prędkość wzrostu  $f$ .

Przy wzroście częstotliwości do 37 Hz silnik wypada z synchronizmu. W początkowym okresie rozruchu widać silne drgania kąta mooy lecz układ utrzymuje stabilność; po około 2,5 s następuje gwałtowny wzrost  $\psi$  i utrata synchronizmu. Spowodowane jest to rosnącym (analogicznie jak w p. 4) momentem obciążenia, pochodną częstotliwości nie jest bowiem w tym obszarze zbyt wielka. W następnych trzech sekundach moment hamujący zatrzymuje silnik. W prądzie pracy asynchronicznej widać charakterystyczne zdudnienia w pobliżu

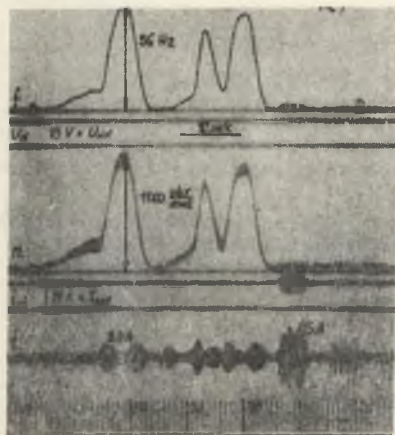
## Osyclogramy 6, 7

Jest to seria rozruchów i regulacji prędkości obrotowej począwszy od postoju silnika. Silnik był nieobciążony  $M_0 = 0$ .

Wzbudzenie znamionowe  $I_w = I_{wN}$ .



Osc. 6



Osc. 7

Wyraźnie widać trudności związane z synchronizacją wstępną i przyspieszaniem pola twornika w obszarze małych częstotliwości. W tym okresie rozruchu zbyt szybka zmiana  $f$  prowadzi do wypadnięcia z synchronizmu – silnik kołysze się nie nabierając prędkości.

Do 10 – 15 Hz rozruch trzeba prowadzić bardzo wolno, następnie można już zmieniać częstotliwość szybciej. Główną przyczyną trudności w początkowym okresie rozruchu jest niedobór napięcia twornika – określonego zależnością (o) z rys. 3.

Przy prawidłowym kształcie  $U = U(f)$  [krzywa (a) na rys. 3] byłoby możliwe dużo szybsze zadawanie częstotliwości od początku rozruchu.

Podsumowanie

Badany silnik synchroniczny małej mocy, przy znamionowym poziomie wzbudzenia jest układem bardzo stabilnym. Spowodować wypadnięcie z synchronizmu

przy osiągalnych w układzie Leonarda przyrostach częstotliwości, trzeba było obciążyć wzbudzenie do  $0,6 I_{wN}$ .

Rozruch częstotliwościowy ma wielką przewagę nad asynchronicznym - prądy rozruchowe są kilkakrotnie mniejsze, np. przy  $M_0 = 0$ ,  $I_{roz}^{oz} \approx 0,3 \cdot I_{roz}^{as}$  szybkość rozruchu jest dużo większa. Nie występuje nagrzewanie uzwojeń tłumiących, straty są dużo mniejsze. Średni przyrost prędkości obrotowej przy rozruchu asynchronicznym odpowiada tu ok.  $6 \frac{Hz}{s}$ , gdy przy częstotliwościowym nawet pod obciążeniem znamionowym może wynosić  $15 \div 20 \frac{Hz}{s}$  byle tylko  $I_w \gg I_{wN}$ . Na biegu jałowym osiągalne przyspieszenia są ok. 5 x większe od przyspieszeń przy rozruchu asynchronicznym.

Pod obciążeniem momentem stałym początek rozruchu winien być łagodny, występują tu bowiem duże oscylacje kąta mocy, natomiast po ich ustaleniu można zmieniać  $f$  szybciej. Dla zapewnienia prawidłowego szybkiego rozruchu konieczna jest kompensacja spadku napięcia na rezystancji twornika.

Z pomiarów wyraźnie wynika, że o ile więż magnetyczna przepływów twornika i magneśnicy nie jest zerwana, nie występują zjawiska tłumienia, a wpływ małych zmian prądu twornika na wzbudzenie, jak też wpływ drgań prądu wzbudzenia na twornik jest pomijalny.

W analizie takiej pracy można z bardzo dobrym przybliżeniem zastąpić zależności różniczkowe między  $\psi$ ,  $i$  - algebraicznymi, co niezmiernie ułatwia rozwiązanie układu równań silnika, np. na maszynie analogowej [2]. Sposób rozwiązania musi jednak zapewnić w takim wypadku małą zmienność kąta mocy w całym procesie.

#### LITERATURA

1. Laboratorium napędu elektrycznego - praca zbiorowa, skrypt Politechniki Śląskiej. Gliwice 1971.
2. Myroik Cz.: Analiza możliwości rozruchu częstotliwościowego silnika synchronicznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka. 38
3. Kuczewski Z., Gogolewski Z.: Napęd elektryczny, WNT, Warszawa 1971.

#### ЧАСТОТНЫЙ ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ - ИЗМЕРЕНИЯ В РЕАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

#### Резюме

В статье помещены осциллограммы измерений, выполненные в системе: синхронный генератор с регулируемой скоростью вращения - синхронный двигатель.



Выводы из проведенных исследований позволяют оценить возможности частотного пуска малых синхронных двигателей а также упростить уравнения двигателя, требуемые, к примеру, для расчета такого пуска на аналоговой машине.

#### A FREQUENCY STARTING OF SYNCHRONOUS MOTOR-MEASUREMENTS IN REALLY CIRCUIT

#### S u m m a r y

The oscillograph records taken in the laboratory system consisting of synchronous generator with controlled rotational speed and synchronous motor are given in the paper. The analysis of the records permits to estimate possibilities of a frequency starting of the small synchronous motors and to simplify the equations of the motor for analog computation of the frequency starting.