

BADANIA SYMULACYJNE ZESPOŁU NAPĘDOWEGO POMP WODOCIĄGOWYCH PRZY DOŁĄCZANIU DODATKOWEGO SILNIKA

COMPUTER SIMULATIONS OF PUMPS DRIVE SYSTEM DURING ADDITIONAL INDUCTION MOTOR CONNECTING

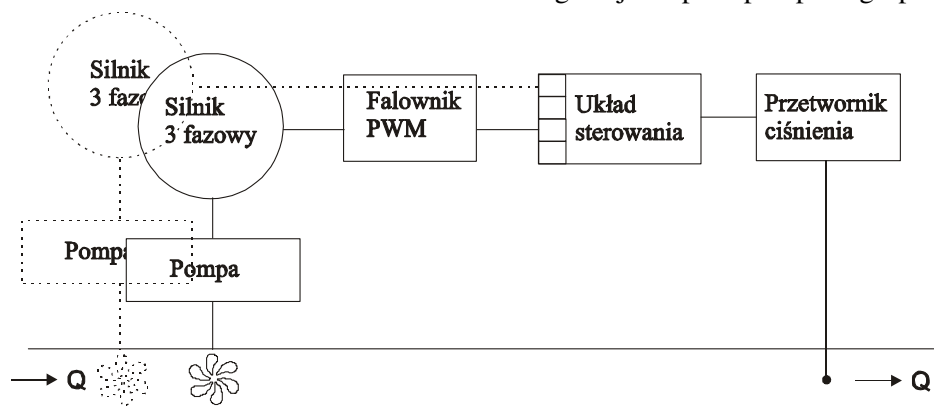
Abstract: The problem of suitable water pump drive system selection step forward in many water pump stations. It should be a compromise among the price of drive and the best technical parameters. The most important technical parameter for water receiver is pressure. It should be constant. The paper presents results of computer simulations of pump drive system during adding the second induction motor supply from power network. There is shown the mathematical model of PWM inverter, induction motor and the characteristic of pump. The pump drive system consists of two induction motors – one supply from PWM inverter, the second from power network. The second induction motor is connected when demand for water is higher than delivery of a pump fed by the controlled motor.

1. Wstęp

Problem doboru odpowiedniego układu napędowego występuje w wielu budowanych i modernizowanych stacjach wodociągowych. Musi on być kompromisem pomiędzy ceną napędu, a najlepszymi parametrami pracy układu. Zapewnienie zarówno dobrej pracy systemu poprzez prawidłowe dobranie parametrów technicznych, satysfakcjonujące użytkownika i możliwe do uzyskania w danym układzie, jak i możliwie najniższej ceny daje najlepsze efekty. Najważniejszym z punktu widzenia odbiorcy parametrem jest ciśnienie tłoczenia wody w wodociągu - najlepiej gdyby było stałe i takie

nia. Zmiany ciśnienia wywoływane są poprzez zmianę przepływu, co z kolei wynika ze zmiennego zapotrzebowania na wodę. Wahania zapotrzebowania mogą być na tyle duże, że celowe jest zastosowanie kilku silników napędzających pompy i w miarę potrzeby odpowiednie ich dołączanie bądź odłączanie. Zastosowanie w układach napędowych zasilających pompy silników indukcyjnych klatkowych jest uzasadnione charakterem obciążenia.

W pracy przedstawiono modele poszczególnych elementów wodociągu (rys. 1) oraz wyniki badań symulacyjnych zamkniętego układu regulacji zespołu pompowego przy zwiększają-



Rys.1. Schemat ideowy układu napędowego pomp

zadanie stawia się przed układem napędowym pomp. Ze względów technicznych dopuszczalne są jednak pewne niewielkie jego waha-

nym się zapotrzebowaniu na wodę, powodującym konieczność dołączenia dodatkowej pompy. W badaniach skoncentrowano się na

przedstawieniu zmian prądów, momentu oraz prędkości obrotowej silników napędzających pompy.

2. Topologia układu

Jednym ze sposobów umożliwiających dokonanie analizy pracy wodociągu jest opracowanie modelu matematycznego zespołu pompowego i przeprowadzenie badań symulacyjnych dla wybranych stanów pracy układu. W modelu matematycznym uwzględnić należy wszystkie elementy wchodzące w skład wodociągu: zespoły silnik-pompa, regulator, falownik, rurociąg. Każdy z tych elementów opisany jest za pomocą odpowiednich równań lub charakterystyk.

2.1 Model matematyczny falownika

Model matematyczny falownika składa się z obwodu zasilającego, trójfazowego prostownika diodowego, obwodu pośredniczącego napięcia stałego (filtr dolnoprzepustowy LC typu Γ) oraz zbudowanego z tranzystorów IGBT trójfazowego falownika napięcia [10], [11]. W modelu przyjęte zostały następujące założenia upraszczające:

- załączenie tranzystora następuje natychmiast,
- tranzystor zastąpiony jest przez łącznik o rezystancji w stanie załączenia odpowiadającej rezystancji przewodzącego tranzystora,
- wyłączony tranzystor nie przewodzi prądu,

Wartość średnia napięcia wyprostowanego U_d wytwarzanego przez prostownik zależy głównie od wartości skutecznej napięcia międzyfazowego U_{ac} po stronie sieci zasilającej. Dla nieobciążonego trójfazowego diodowego prostownika mostkowego z wyjściem pojemnościowym wartość średnią napięcia można przedstawić zależnością:

$$U_d = \sqrt{2}U_{ac} \quad (2.1)$$

Równania napięć międzyfazowych odbiornika wyrażone za pomocą funkcji przełączających przybierają wówczas postać:

$$\begin{bmatrix} u_{AB}(t) \\ u_{BC}(t) \\ u_{CA}(t) \end{bmatrix} = U_d \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

a równania napięć fazowych:

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Przedstawione funkcje przełączające zostały wykorzystane do sterowania łączników tranzystorowych w modelu symulacyjnym przekształtnika PWM.

2.2 Model matematyczny silnika

Podstawowe równania silnika możemy zapisać następująco [2]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{K} \mathbf{A}(i)(\mathbf{u} - \mathbf{Ri} + \Omega\Psi) \quad (2.4)$$

poszczególne elementy równania można opisać zależnościami:

$$K = \alpha_r + \alpha_s + \alpha_m \quad (2.5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 \\ 0 & \alpha_s(\alpha_r + \alpha_m) & 0 & -\alpha_s\alpha_r \\ -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) & 0 \\ 0 & -\alpha_s\alpha_r & 0 & \alpha_r(\alpha_s + \alpha_m) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{u} = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad 0 \quad 0]^T \quad (2.7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2r_{sa} + r_{sb}) & \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sb}) & 0 & 0 \\ \frac{1}{3}(r_{sc} - r_{sa}) & \frac{1}{3}(2r_{sb} + r_{sc}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{i} = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{ra} \quad i_{rb}]^T \quad (2.9)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\sqrt{3}} & -\frac{2\omega}{\sqrt{3}} \\ \frac{\omega}{\sqrt{3}} & \frac{2\omega}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \frac{i_{sa} + i_{ra}}{\alpha_m} + \frac{i_{ra}}{\alpha_r} \\ \frac{i_{sb} + i_{rb}}{\alpha_m} + \frac{i_{rb}}{\alpha_r} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Równanie ruchu możemy zapisać:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_e - T(\omega)) \quad (2.12)$$

$$T_e = \frac{\sqrt{3}p(i_{ra}i_{sb} - i_{rb}i_{sa})}{\tau} \quad (2.13)$$

gdzie:

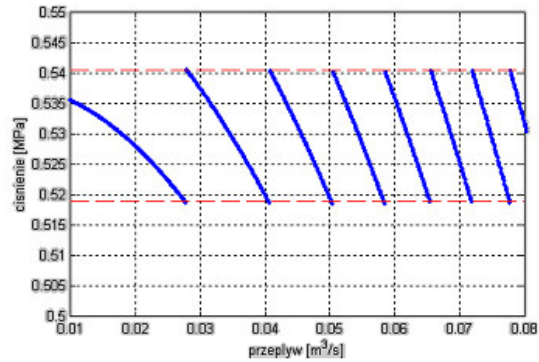
- $T(\omega)$ – moment mechaniczny;
- p – liczba par biegunów;
- J – moment bezwładności;
- $i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}, i_{rb}$ – wartości prądów stojana i wirnika;
- T_e – moment elektromagnetyczny;
- r_{sa}, r_{sb}, r_{sc} – wartości rezystancji faz stojana;
- r_r – wartość rezystancji wirnika;
- α_m – odwrotność indukcyjności magnesującej;
- α_s – odwrotność indukcyjności stojana;
- α_r – odwrotność indukcyjności wirnika;
- Napięcia zasilające mają wartości:
- $u_{sa} = U_m \sin(\omega t + \varphi)$,
- $u_{sb} = U_m \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)$

2.3 Charakterystyka pompy

Pompa jest maszyną hydrauliczną bierną, ponieważ otrzymuje od silnika napędowego energię mechaniczną i przenosi ją na ciecz przez nią przepływającą za pośrednictwem wirnika [3]. Można też powiedzieć, że działanie pompy polega na wytwarzaniu różnicy ciśnień pomiędzy stroną ssawną (wlotem do pompy), a tłoczną (wylotem z pompy).

Charakterystykę pompy pokazano na rys.2. Wykres obrazuje zbiór krzywych dla określonych prędkości obrotowych zespołu silnik-pompa. Podczas pracy poprzez zmianę prędkości obrotowej pompa przechodzi na kolejne krzywe dzięki czemu utrzymuje się założone ciśnienie tłoczenia pompy w przyjętych granicach.

Do obciążenia układu falownik – silnik – pompa przyjęty został uproszczony model rurociągu. Pominięte zostały zjawiska rozchodzenia się cieczy w rurociągu oraz zjawisko kawitacji.

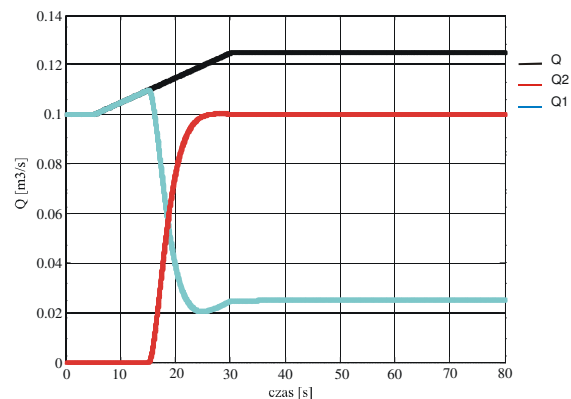


Rys.2 Fragment charakterystyki pompy.

3. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono w inżynierskim środowisku modelowania Matlab [12]. Pakiet Matlab umożliwia zasymulowanie pracy całego złożonego układu, dysponując specjalnymi funkcjami przeznaczonymi do tego typu zadań. Program ten pozwala na odtworzenie pracy rzeczywistego układu napędowego i przeprowadzenie badań dynamicznych stanów pracy zespołu pompowego.

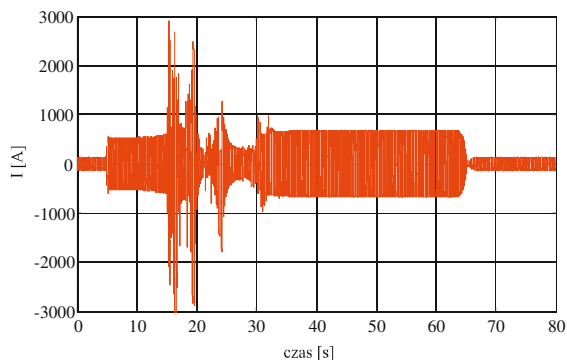
W badanym przypadku pracy układu pompowego dołączano silnik zasilany z sieci przy zapotrzebowaniu na wodę przekraczającym możliwości jednej pompy (napędzanej silnikiem regulowanym). Dołączenie dodatkowego silnika napędowego spowodowało zmniejszenie prędkości obrotowej silnika regulowanego. Pociągało to za sobą zmiany przepływu, momentu obciążenia oraz częstotliwości napięcia zasilającego ten silnik. Na rys.3 pokazano zmiany przepływu wody podczas pracy w opisanym układzie pompowym.



Rys.3 Wyniki badań symulacyjnych zmian przepływu wody w układzie pompowym, Q – przepływ całkowity, $Q1$ – przepływ pompy napędzanej silnikiem regulowanym, $Q2$ – przepływ pompy bez regulacji

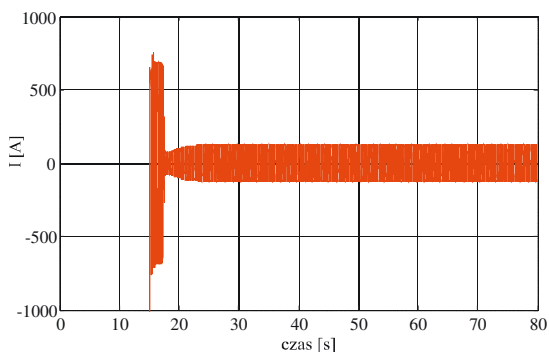
3.1 Badania przebiegów prądów

Dołączanie drugiego zespołu pompowego powoduje stan nieustalony w przebiegu prądu pierwszego silnika, co przedstawione jest na rys. 4. Wartość amplitudy pojedynczych przetężeń prądu w pierwszej fazie zmian kilkakrotnie przewyższają wartości amplitud prądu w stanie ustalonym.



Rys. 4 Wyniki badań symulacyjnych przebiegu wartości chwilowej prądu zasilającego silnik sterowany poprzez falownik PWM przy dołączeniu silnika zasilanego z sieci

Nieregulowany silnik zasilający pompę rusza bez obciążenia dzięki temu szybciej uzyskuje prędkość znamionową. Wartość amplitudy prądu zasilającego dołączany silnik ustala się po stosunkowo krótkim czasie. Stany dynamiczne w silniku regulowanym trwają dłużej.

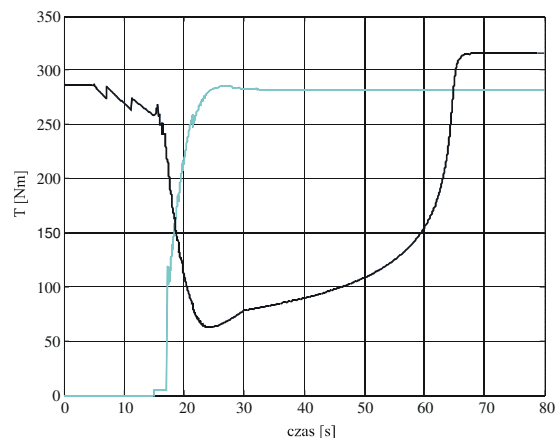


Rys. 5 Wyniki badań symulacyjnych przebiegu wartości chwilowej prądu zasilającego dodatkowy silnik zespołu pompowego

3.2 Badania zmian momentu

Dołączanie drugiego zespołu pompowego powoduje chwilowy spadek momentu obciążenia silnika z regulowaną prędkością obrotową. Jest to wynikiem przejęcia obciążenia przez silnik nieregulowany oraz innych procesów dynamicznych zachodzących w układzie silnik re-

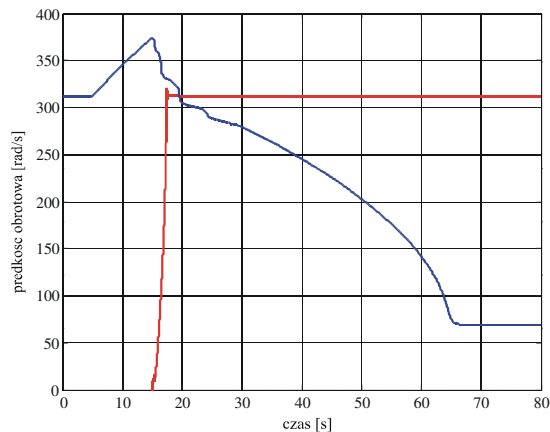
gulowany – pompa. Po ustaleniu się parametrów pracy układu wartość momentu obciążenia silnika regulowanego nieznacznie wzrosła w porównaniu z sytuacją sprzed zmian.



Rys. 6 Wyniki badań symulacyjnych przebiegu momentu silnika z regulowaną prędkością (kolor czarny) oraz dodatkowego zasilanego z sieci przy dołączeniu silnika

3.3 Badania zmian prędkości obrotowej

Silnik dołączany szybko uzyskuje prędkość znamionową jest to efektem tego, iż proces jego rozruchu odbywa się bez obciążenia. Obciążenie silnika jest zwiększane stopniowo wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

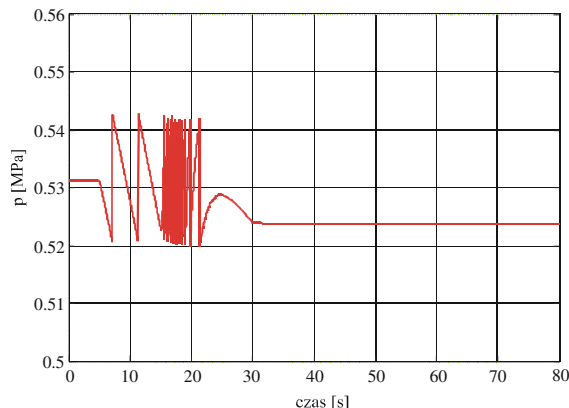


Rys. 7 Wyniki badań symulacyjnych przebiegu prędkości silnika sterowanego poprzez falownik PWM oraz silnika dodatkowego zasilanego z sieci

Prędkość silnika regulowanego stabilizuje się znacznie wolniej, co jest związane z bezwładnością tłoczonyj wody. Nowa prędkość jest mniejsza gdyż układ silnik regulowany–pompa po załączeniu silnika dodatkowego musi dostarczyć mniejsze ilości wody (wymusza mniejszy przepływ)

3.4 Zmiany ciśnienia tłoczenia

Głównym zadaniem układu regulacji sterującego falownikiem zasilającym silnik regulowany było utrzymanie ciśnienia tłoczenia w założonym przedziale. Na rys. 8. pokazano wyniki badań symulacyjnych obrazujących zmiany ciśnienia tłoczenia podczas wzrostu zapotrzebowania na wodę, wymuszającego konieczność dołączenia drugiego silnika.



Rys. 8 Wyniki badań symulacyjnych przebiegu ciśnienia podczas dołączenia dodatkowego silnika zasilającego układ pompy

Analiza przebiegu pozwala zauważyć, iż w układzie wodociągowym udało się utrzymać ciśnienie na praktycznie stałym poziomie (z bardzo niewielką założoną tolerancją).

4. Wnioski

Przedstawione powyżej wyniki badań symulacyjnych dotyczą przypadku dołączenia dodatkowego silnika napędowego zasilanego z sieci. Dołączenie silnika wymuszone jest wzrostem zapotrzebowania na wodę (wzrostem przepływu Q) powyżej wydajności silnika regulowanego. Zastosowany regulator poprzez odpowiednie wysterowanie falownika zasilającego silnik regulowany pozwala na utrzymanie ciśnienia tłoczenia w założonych granicach (rys.8.). Skutkiem zastosowania regulacji prędkości obrotowej za pomocą przemiennika częstotliwości jest zmniejszenie kosztu zużywanej energii elektrycznej, w stosunku do wcześniej stosowanych układów (np. poprzez dławienie). Optymalizacja kosztów rozwiązania układu napędowego pomp polega na wykorzystaniu sekwencyjnego załączania pomp połączonych równolegle i ciągłej regulacji przy pomocy jednego przemiennika częstotliwości. Dzięki temu możliwa jest regulacja prędkości jednego silnika napędzającego pompę oraz załączanie i wyłączanie kolej-

nych silników napędzających pompy. Rezultatem tego jest elastyczne dostosowywanie się układu do wolnozmiennego zapotrzebowania na wodę.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można zauważyć iż:

- dołączenie dodatkowego silnika powoduje krótkotrwały stan nieustalony układu związany z przejmowaniem części przepływu przez pompę nieregulowaną;
- silnik z regulowaną prędkością obrotową niezależnie od obciążenia pracuje przy praktycznie stałym momencie (zmiany wartości momentu dla pracy ustalonej były rzędu kilku procent);
- przedział zmian wartości ciśnienia tłoczenia wody jest zdeterminowany przez charakterystykę pompy. Zawężenie przedziału implikuje konieczność bardzo płynnego regulowania prędkością silnika sterowanego poprzez falownik PWM;
- charakter i wielkość zmian zapotrzebowania na wodę (przepływu Q) mają wpływ na stabilność pracy układu.

Praca systemów wodociągowych z regulacją prędkości obrotowej pompy stabilizującej ciśnienie pozwala na uzyskanie efektywności pracy zadawalającej zakłady zajmujące się dostarczaniem wody (minimalizacja kosztów) oraz użytkowników (niewielkie zmiany ciśnienia tłoczonyj wody).

5. Literatura

- [1]. Barlik R., Nowak M.: *Technika tyrystorowa*, WNT, Warszawa 1994
- [2]. Czaban W.: *Modelowanie matematyczne procesów elektromechanicznych*, Lwów 1997 (po ukraińsku)
- [3]. Danfoss – *Regulacja pomp i wentylatorów* – Warszawa 1998
- [4]. Jackowski K., Jankowski Z., Jędral W. – *Układy pompy* – Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej – 1992
- [5]. Kaczorek T. – *Teoria układów regulacji automatycznej* – WNT Warszawa 1977
- [6]. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R. - *Podstawy teorii sterowania* - Helion Warszawa 2005
- [7]. Kaźmierkowski M., Tunia H.: *Automatic control of converter-fed drives*. ELSEVIER- PWN, Warszawa 1994.
- [8]. Kozirowska A. – *Water pumps drive system at vary lead* – 4-th International Conference of PhD Students, Hungary August 2003, pp. 363-368
- [9]. Kozirowska A., Bartman J., Kwater T. – *Badania symulacyjne układu wodociągowego ze stero-*

wanym silnikiem indukcyjnym – 9-th International Modelling School of AMSE – UAPL, Crimea 2004, pp. 109 – 114

[10]. Sobczyński D. – *Wysokoobrotowy układ napędowy z silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika* – rozprawa doktorska, Rzeszów 2004

[11]. Tunia H., Barlik R. – *Teoria przekształtników* – Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003

[12]. Matlab, Reference Guide, The Math Works Inc., Natic MA, 1992

POLITECHNIKA RZESZOWSKA,
Wydz. Elektrotechniki i Informatyki
ul. Pola 2, 35-959 Rzeszów

UNIWERSYTET RZESZOWSKI,
Instytut Techniki
ul. Rejtana 16a, 35-305 Rzeszów