

## MODEL SYSTEMU „ZESPÓŁ POMPOWY – PRZEWÓD” ZE STEROWANYM UKŁADEM NAPĘDOWYM NA POTRZEBY DIAGNOSTYCZNE

Jacek BARTMAN, Anna KOZIOROWSKA

Instytut Techniki, Uniwersytet Rzeszowski  
ul. Rejtana 16a, 35-959 Rzeszów

[jbartman@univ.rzeszow.pl](mailto:jbartman@univ.rzeszow.pl), [akozioro@univ.rzeszow.pl](mailto:akozioro@univ.rzeszow.pl)

### Streszczenie

Przedmiotem pracy jest konstrukcja modelu systemu „zespół pompowy – przewód” składającego się z przemiennika częstotliwości, silnika napędowego, pompy oraz rurociągu. Idea pracy systemu opiera się na stabilizacji ciśnienia tłoczenia wody w rurociągu poprzez częstotliwościową regulację prędkości silnika napędzającego pompę tłoczącą. W pracy przedstawiono topologię systemu oraz jego opis analityczny, który zostanie wykorzystany jako model diagnostyczny w dalszych badaniach. Układ opisano wykorzystując modelowanie matematyczne, modelowanie neuronowe oraz charakterystyki statyczne. Szczególną uwagę zwrócono na dobór modelu neuronowego - porównując uzyskane z niego wyniki z danymi pomiarowymi.

Słowa kluczowe: układ napędowy, sztuczne sieci neuronowe, modelowanie.

### MODEL OF “PUMP AGGREGATE – PIPELINE” SYSTEM WITH CONTROLLED DRIVING MATCH ON DIAGNOSTIC REQUIREMENTS

### Summary

The aim of the paper is construction of “pump aggregate – pipeline” system model consists of frequency converter, driving motor, pumps and pipeline. Idea of system’s work is based on pressure stabilization in pipeline through frequency control of speed of motor which drives the pump. The paper presents the topology of analysed system and its analytical description which will be taken advantage as diagnostic model in farthest research. The system is described through using mathematical modeling, neuron modeling and static characteristics. There was paid the special attention on selection of neuron model comparing received results to measuring data.

Keywords: drive system, artificial neural network, modeling.

## 1. WSTĘP

Postęp techniczny jaki dokonał się w ostatnich latach daje możliwość obserwacji pracy systemu w celu wczesnego wykrycia symptomów awarii poszczególnych jego elementów. Ostatnio w diagnostyce technicznej układów napędowych badania doświadczalne na rzeczywistych układach często zastępuje się badaniami symulacyjnymi. Prowadzenie badań symulacyjnych wymaga opisu modelowanego obiektu w formie możliwej do algorytmizacji – charakterystyki, modele matematyczne, modele neuronowe itp. Istotną zaletą badań symulacyjnych – oprócz zdecydowanie niższych kosztów – jest możliwość rozważania nawet ekstremalnych stanów pracy układu, niedopuszczalnych w trakcie normalnej eksploatacji.

Nowoczesne systemy wodociągowe wymagają dużej elastyczności w dostosowywaniu się do wymogów odbiorców wody. Utrzymanie właściwych parametrów tłoczenia wody wymusza zastosowanie do napędu pomp silników z regulowaną prędkością obrotową (rys. 1).



Rys. 1. Układ napędowy pomp [18]

Dzięki postępowi jaki dokonał się w energoelektronice możliwe jest wykorzystanie w tym celu silników indukcyjnych zasilanych przez przemienniki częstotliwości [15] i takie rozwiązanie jest aktualnie najczęściej stosowane.

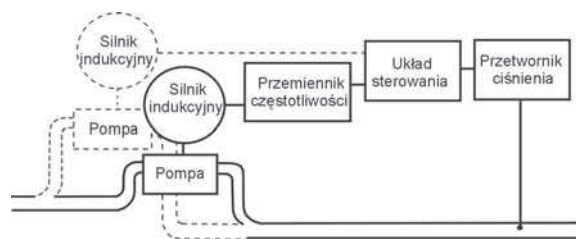
Celem pracy jest przedstawienie kompleksowego modelu układu „zespół pompy – przewód” wraz z zastosowaniem jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej do opisu rurociągu. Poprawnie opracowany model może zostać wykorzystany do diagnozowania potencjalnych stanów awaryjnych systemu. Modelowanie neuronowe bazuje na danych pomiarowych uzyskanych w przepompowni wody Rzeszów-Pobitno wyposażonej w przemiennik częstotliwości ACS 503-100-3 firmy ABB oraz silniki SLg 280M2 firmy Celma o mocy znamionowej 90 kW. Pomiary parametrów elektrycznych - wykorzystanych w modelowaniu neuronowym - przeprowadzone zostały za pomocą miernika Skylab firmy Amprobe Instrument, model 9030.

## 2. OPIS UKŁADU

W analizowanym systemie „zespół pompy - przewód” można wyodrębnić następujące elementy:

- silniki indukcyjne,
- przemiennik częstotliwości z falownikiem PWM,
- pompy,
- rurociąg

i każdy z nich opisać niezależnie przy pomocy określonych metod zadaną dokładnością.



Rys. 2. Schemat ideowy układu

Przynajmniej jeden z zespołów silnik-pompa musi mieć regulowaną prędkość obrotową.

## 3. MODEL UKŁADU

Model systemu wykorzystywany do analizy jego pracy, stanowi odzwierciedlenie aktualnego stanu wiedzy o procesach w nim zachodzących. Jego dokładność (precyzja odwzorowania zachodzących zjawisk) zależy od celu badań, do realizacji których został on opracowany. Adekwatny model to taki model, który odwzorowuje z wystarczającą dokładnością pracę analizowanego układu [7]. Jednocześnie należy brać pod uwagę fakt, iż uwzględnienie zbyt wielu czynników w opisie może prowadzić do dużego wzrostu złożoności obliczeniowej modelu. Najczęściej powoduje to również poprawę uzyskiwanych rezultatów, jednak nie zawsze ta poprawa jest znacząca, a często bywa tak, iż z punktu widzenia analizy układu jest ona nieistotna.

Poszczególne elementy składowe analizowanego systemu najwygodniej jest modelować stosując różne (przystosowane do specyfiki obiektu) metody ich opisu.

### 3.1. Model matematyczny silnika napędowego

W literaturze [5, 8, 14] opisanych jest wiele różnych postaci modeli silników asynchronicznych. Modele te w różnym stopniu uwzględniają zjawiska występujące w czasie pracy maszyny lub też odtwarzają je różnymi metodami. Model może uwzględniać zjawiska nasycenia, strat w rdzeniu lub też może je pomijać. Ponadto przy tworzeniu modelu mogą być przyjęte inne uproszczenia, jak np.: założenie symetryczności zasilania, zastąpienie parametrów rozłożonych skupionymi itd.

W niniejszej pracy wykorzystane zostały modele obwodowe, zapisane w postaci znanej jako modele typu A [4, 5]. Końcowe równania opisujące zależność prądów stojana i wirnika silnika indukcyjnego klatkowego w funkcji napięcia zasilania oraz parametrów silnika i obciążenia można przedstawić w następującej postaci:

$$\frac{d\mathbf{I}}{dt} = \frac{1}{K} \mathbf{A}(\mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Psi}) \quad (1)$$

Poszczególne składniki równania (1) opisane są następującymi zależnościami:

$$\mathbf{I} = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{ra} \quad i_{rb}]^T$$

$$K = \alpha_r + \alpha_s + \alpha_m$$

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

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \frac{i_{sa} + i_{ra}}{\alpha_m} + \frac{i_{ra}}{\alpha_r} \\ \frac{i_{sb} + i_{rb}}{\alpha_m} + \frac{i_{rb}}{\alpha_r} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U} = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad 0 \quad 0]^T$$

$$u_{sa} = U_m \sin(2\pi ft + \varphi),$$

$$u_{sb} = U_m \sin(2\pi ft + \varphi + 120^\circ)$$

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

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

Równanie ruchu ma postać:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_e - T(\omega)) \quad (2)$$

gdzie:

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

- $i_{sa}, i_{sb}, i_{ra}, i_{rb}$  – wartości prądów stojana i wirnika;
- $r_{sa}, r_{sb}, r_{sc}$  – wartości rezystancji faz stojana;
- $r_r$  – wartość rezystancji wirnika;
- $\alpha_m$  – odwrotność indukcyjności magnesującej;
- $\alpha_s$  – odwrotność indukcyjności stojana;
- $\alpha_r$  – odwrotność indukcyjności wirnika;
- $t$  – czas;
- $f$  – częstotliwość zasilania;
- $\omega$  – prędkość obrotowa silnika;
- $T_e$  – moment elektromagnetyczny;
- $T(\omega)$  – moment mechaniczny;
- $p$  – liczba par biegunów;
- $J$  – moment bezwładności.

### 3.2. Model matematyczny przemiennika częstotliwości

Najczęściej stosowaną obecnie metodą sterowania prędkością silników prądu przemiennego jest zmiana częstotliwości zasilania [6]. W tym celu stosuje się pośrednie przemienniki częstotliwości, w skład których wchodzi: prostownik sieciowy, obwód pośredniczący napięcia/prądu stałego i falownik napięcia/prądu. Najczęściej w układach napędowych pomp wodociagowych stosuje się falowniki napięcia o modulowanej szerokości impulsów PWM (ang. Pulse Width Modulation) [1]. Charakteryzują się one zbliżonym do sinusoidalnego kształtem prądu oraz małymi stratami - jest to efekt wysokiej częstotliwości łączeń.

Porównując wzorcowy sygnał sinusoidalny ( $u_{sk}$ ) z przebiegiem trójkątnym ( $u_{ST}$ ) uzyskuje się przebieg napięcia zasilającego silnik z regulowaną prędkością obrotową (rys. 3):

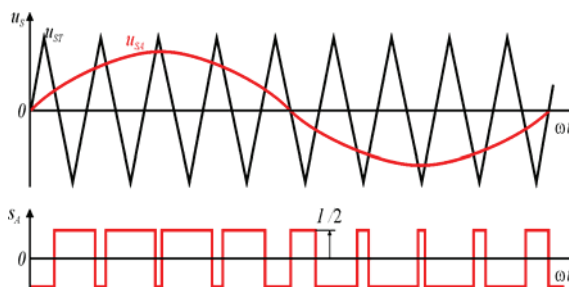
$$s_k = \text{sign}(u_{sk} - u_{ST}), \quad k \in \{A, B, C\}$$

oraz

$$u_{sk} = \sin\left(2\pi f t \pm \frac{2\pi}{3}\right), \quad k \in \{A, B, C\}$$

$$u_{ST} = \frac{2 \arcsin(\sin(m_f f \pi t))}{\pi}$$

gdzie:  $t$  – czas;  
 $f$  – częstotliwość;  
 $m_f$  – współczynnik modulacji częstotliwości.



Rys. 3. Uzyskiwanie przebiegu napięcia w falowniku PWM

Uzyskany przebieg ma charakter dwuwartościowej funkcji przełączającej:

$$s_k(t) = \begin{cases} 1 & \text{dla } u_{ST}(t) \leq u_{sk}(t) \\ -1 & \text{dla } u_{ST}(t) > u_{sk}(t) \end{cases}, \quad k \in \{A, B, C\} \quad (3)$$

Napięcia międzyfazowe oraz fazowe odbiornika mają amplitudy proporcjonalne do amplitudy napięcia zasilającego i wyrażone są za pomocą funkcji przełączających (3). Równania opisujące je mają postać:

$$\begin{bmatrix} u_{AB}(t) \\ u_{BC}(t) \\ u_{CA}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}U_{ac} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix}$$

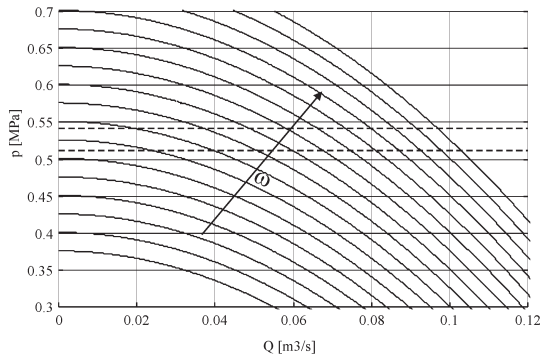
$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3}U_{ac} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_A(t) \\ s_B(t) \\ s_C(t) \end{bmatrix}$$

Główne korzyści z zastosowania układów z regulacją prędkości kątowej to możliwość realizacji łagodnych rozruchów i wyłączeń zespołów pompowych lub fragmentów układu wodociagowego oraz możliwość płynnego dostosowania wydajności pomp lub ich zespołów do aktualnego zapotrzebowania odbiorców w wodę. Ponadto płynna regulacja prędkości pozwala unikać uderzeń hydraulicznych w sieci wodociagowej.

### 3.3. Matematyczny opis pompy

Na potrzeby modelowania układów wodociagowych wystarczającą dokładność uzyskuje się traktując pompy jako elementy statyczne [3, 10]. Wówczas ich funkcjonowanie można opisać za pomocą zbioru charakterystyk, określających zależność ciśnienia tłoczenia od przepływu przy różnych prędkościach obrotowych (rys. 4).

Podczas pracy pompy wzrost zapotrzebowania na wodę (wzrost przepływu  $Q$ ) powoduje spadek ciśnienia wody w rurociągu ( $p$ ). Poprzez wzrost prędkości obrotowej pompy następuje przejście na kolejną charakterystykę i przywrócenie ciśnienia do wartości pożądanej. Analogicznie przy zmniejszaniu się zapotrzebowania na wodę prędkość obrotowa pompy maleje i ciśnienie wody może być utrzymane na właściwym poziomie.



Rys. 4. Zbiór charakterystyk pompy

Analitycznie charakterystyki przepływu w modelach przedstawione są w postaci wzoru aproksymującego przyjmującego przy zmieniającej się prędkości pompy formę [11]:

$$p = \left( \frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 p_m - aQ^2 \quad (4)$$

gdzie  $p$  – ciśnienie;

$p_m$  – max ciśnienie wytwarzane przez pompę;

$\omega$  – prędkość obrotowa pompy;

$\omega_n$  – nominalna prędkość obrotowa pompy;

$Q$  – przepływ;

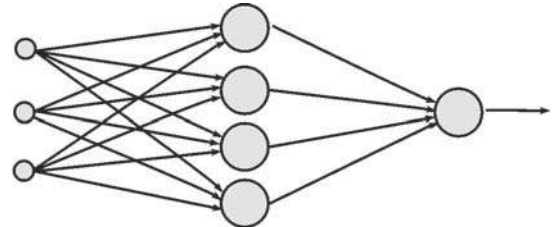
$a$  – stała pompy.

### 3.4. Sieć neuronowa jako model rurociągu

Rurociąg został opisany w oparciu o modelowanie neuronowe [9, 17]. Zaletą tej metody jest możliwość zastosowania jej do opisu obiektów nieliniowych oraz obiektów o nieznanach parametrach. Metoda nie wymaga jawnego określenia parametrów modelowanego obiektu co zwykle stanowi poważną trudność i ograniczenie przy stosowaniu metod analitycznych.

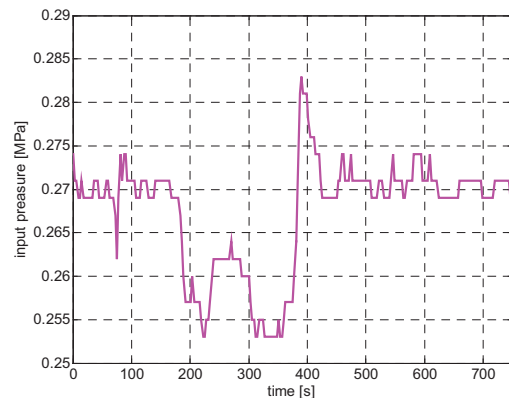
Do modelowania rurociągu wybrano sieć neuronową jednokierunkową wielowarstwową uczoną metodą nadzorowaną. Wektor wejściowy oraz oczekiwane odpowiedzi do uczenia sieci uzyskano z pomiarów w stacji przepompowni wody. Wybór odpowiedniej architektury sieci neuronowej dla danego zadania jest problemem, który nie jest jednoznacznie zdefiniowany analitycznie. Według literatury [17] do rozwiązania każdego problemu wystarcza sieć złożona z trzech warstw (wejściowej, ukrytej i wyjściowej). Architektura sieci wpływa na szybkość jej uczenia oraz na jakość pracy sieci

nauczonej. Sieci o zbyt małej liczbie neuronów nie potrafią z wystarczającą dokładnością identyfikować obiektu. Przewymiarowanie sieci neuronowej prowadzi natomiast najczęściej do wystąpienia efektu tzw. przeuczenia – sieć bardzo dobrze identyfikuje wzorce uczące, natomiast jej efektywność gwałtownie spada w przypadku prezentacji wzorców spoza zbioru uczącego.

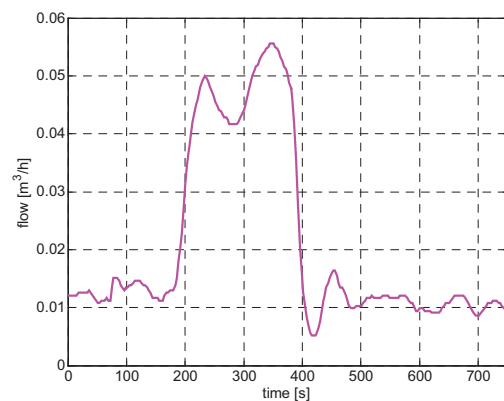


Rys. 5. Schemat sieci neuronowej wykorzystanej jako model rurociągu

Na potrzeby identyfikacji rurociągu wykorzystano sieć złożoną z 3 neuronów w warstwie wejściowej, 4 w warstwie ukrytej oraz 1 neuronu w warstwie wyjściowej (rys. 5). Ilość neuronów w warstwie zerowej wynika z długości wektora wejściowego, w skład którego wchodzi: ciśnienie wejściowe (rys. 6), przepływ (rys. 7) oraz prędkość kątowna pompy (rys. 8).

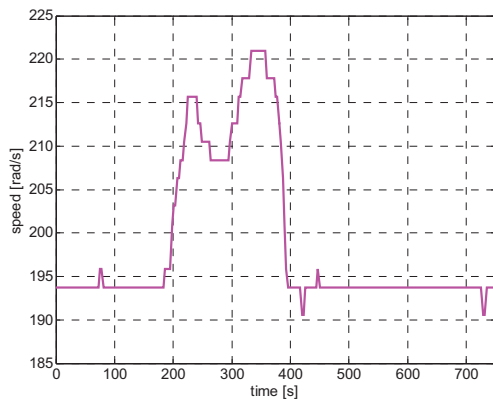


Rys. 6. Przebieg ciśnienia wejściowego



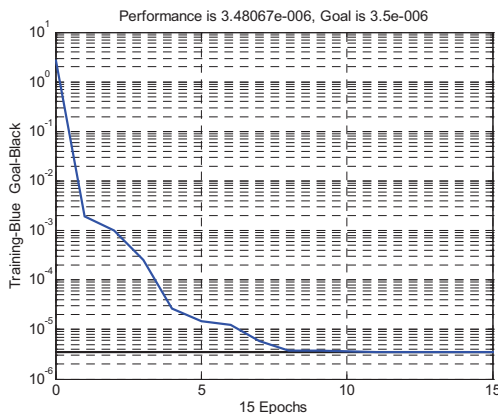
Rys. 7. Przebieg przepływu (zapotrzebowania na wodę)

Liczba neuronów w warstwie wyjściowej jest równa ilości wyznaczanych sygnałów – w przypadku rurociągu jest to tylko ciśnienie wyjściowe. Długość warstwy ukrytej wyznaczono heurystycznie gdyż brak metod, które umożliwiałyby wyznaczenie jej w sposób analityczny.

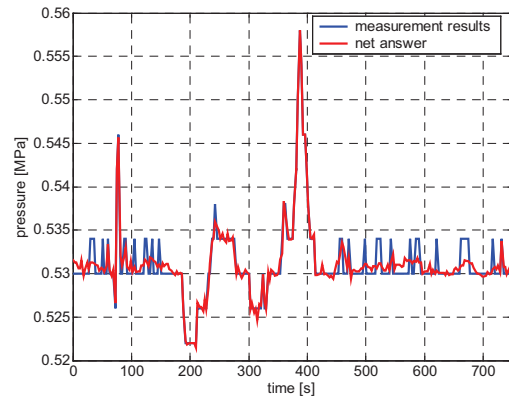


Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej pompy

Sieć uczono metodą Levenberga-Marquardta, zastosowanie tej metody było możliwe poprzez wykorzystanie danych pomiarowych z przepompowni. Przebieg procesu uczenia pokazano na rys. 9.



Rys. 9 Przebieg procesu uczenia sieci

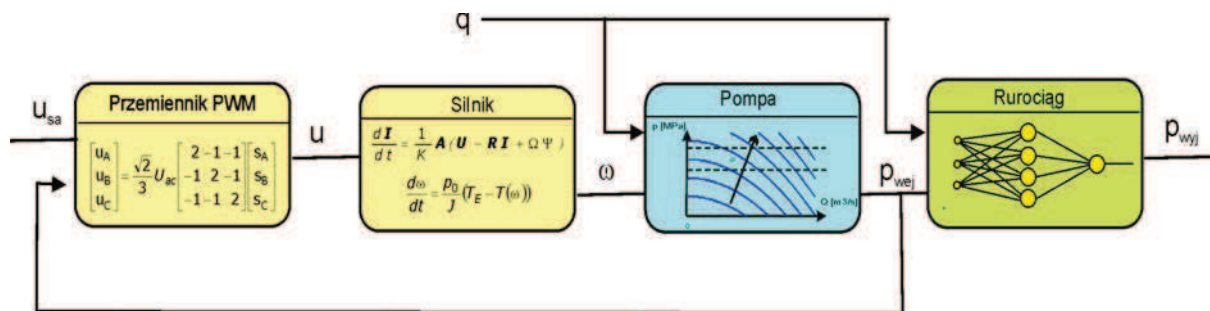


Rys. 10 Przebieg ciśnienia tłoczenia uzyskany z pomiarów (k. niebieski) oraz z modelu neuronowego (k. czerwony)

#### 4. PODSUMOWANIE

Idea wykorzystania modelowania w procesach diagnostycznych jest powszechnie stosowana. Jej bezinwazyjny charakter wpływa na obniżenie kosztów badań, a bardzo często skraca również czas ich trwania. W pracy podjęto próbę opracowania modelu systemu „zespół pompowy – przewód”, wydzielając z niego główne elementy składowe, z których każdy opisano niezależnie wykorzystując różne metody. Schemat modelu analizowanego systemu uwzględniający specyfikę modeli poszczególnych jego elementów przedstawiono na rys. 11.

Jednym z najistotniejszych problemów przy opracowywaniu opisu analitycznego układu jest konieczność znajomości jego parametrów. Dlatego też jeden z elementów opisano wykorzystując modelowanie neuronowe, a inny bazując na charakterystykach statycznych. Oceniając uzyskany model układu nie można pominąć problemu jego adekwatności z układem rzeczywistym. Adekwatność przedstawionego w artykule modelu rurociągu określono porównując wyniki symulacyjne z rezultatami uzyskanymi z pomiarów.



Rys. 11. Schemat modelu systemu „zespół pompowy – przewód” uwzględniający specyfikę modeli poszczególnych jego elementów. Kolorem żółtym oznaczono elementy opisane poprzez równania matematyczne, niebieskim opisane przez charakterystyki a zielonym modelowane neuronowo

Porównanie to (rys. 10) pokazało, iż praca rurociągu dla przypadku charakteryzującego się relatywnie niewielkimi dużymi zmianami zapotrzebowania na wodę (rys. 7) jest modelowana w sposób zadawalający. Jednak dla pełnej oceny modelu należy wykonać dodatkowe badania obejmujące jak najszerszy zakres pracy rurociągu. Wówczas możliwe będzie wykorzystanie modelu w celu monitorowania jego pracy i diagnozowania stanów awaryjnych.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Bagiński J. Ptaszyński L.: *Zastosowanie przetwornic częstotliwości do regulacji pracy pomp wirowych*, Pompy Pompowanie, (2001), nr 1, str. 36-38.
- [2] Bamberski J.: *Ważniejsze aspekty techniczne regulowanego napędu elektrycznego pomp*, Pompy Pompowanie, (2003), nr 2, str. 43-45.
- [3] Bartman J., Koziorowska A., Kwater T.: *Badania symulacyjne układu wodociągowego podczas pracy ciągłej*, IV Krajowa konferencja „Modelowanie i symulacja”. Referaty. Tom II, str 341-348.
- [4] Buczek K., Bartman J., Koziorowska A.: *Model pracy systemu wodociągowego z pompą napędzaną silnikiem indukcyjnym z regulowaną prędkością*, Przegląd Elektrotechniczny, 83 (2007), nr 1, str. 9-14.
- [5] Czaban W.: *Modelowanie matematyczne procesów elektromechanicznych*, Lwów 1997 (w języku ukraińskim).
- [6] Kaźmierkowski M., Tunia H.: *Automatic Control of Converter-fed Drives*. Elsevier, Amsterdam-Warsaw 1994.
- [7] Kołodziński E.: *Symulacyjne metody badania systemów* – WAT Warszawa 2001.
- [8] Koralewski B.: *Problemy związane z modelowaniem silników indukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 78 (2002), nr 9, str. 283-287.
- [9] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D.: *Sztuczne sieci neuronowe: podstawy i zastosowania*. PLJ, Warszawa 1994.
- [10] Korczak A.: *Dynamika układów pompowych*. Warszawa 1996.
- [11] Kulbik M.: *Komputerowa symulacja i badania terenowe miejskich systemów wodociągowych*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2004.
- [12] Kulesza A., Kołodziej H.: *Układy automatycznej regulacji pomp*, Pompy Pompowanie, (2001), nr 1, str. 48-51.
- [13] Ławrowski Z.: *Eksploatacja silników elektrycznych napędzających pompy*, Pompy Pompownie (2002), nr 1, str. 23 – 25.
- [14] Moulahoum S., Touhami O., *Induction machine models in presence of saturation and iron loss: a comparative study*, Archives of Electrical Engineering, LV, (2006), no. 2 pp. 129-146.
- [15] Orłowska-Kowalska T.: *Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego*, Przegląd Elektrotechniczny 80, (2004), nr 3, str. 185-197.
- [16] Skowroński M.: *Współpraca pomp z napędami elektrycznymi* Pompy Pompownie (2001), nr 5, str. 26 – 29.
- [17] Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM Warszawa 1993.
- [18] [www.hydro-vacuum.com.pl](http://www.hydro-vacuum.com.pl), kwiecień 2008

Dr inż. **Jacek BARTMAN** jest adiunktem w Zakładzie Elektrotechniki i Informatyki Instytutu Techniki Uniwersytetu Rzeszowskiego. Jego zainteresowania naukowe obejmują: zastosowania matematyki i informatyki w naukach technicznych i biologicznych, modelowanie matematyczne, sztuczne sieci neuronowe.



Dr inż. **Anna KOZIOROWSKA** jest adiunktem w Zakładzie Elektrotechniki i Informatyki Instytutu Techniki Uniwersytetu Rzeszowskiego. Jej zainteresowania naukowe obejmują: zastosowania matematyki i informatyki w naukach technicznych i biologicznych, modelowanie matematyczne

