

ZASTOSOWANIE OPROGRAMOWANIA SYMULACYJNEGO DO MODELOWANIA I ANALIZY UKŁADÓW ENERGETYCZNYCH

Streszczenie

W artykule dokonano przeglądu metod modelowania, w którym scharakteryzowano modelowanie matematyczne, graficzne i fizyczne. W związku z coraz powszechniejszym użyciem oprogramowania komputerowego do modelowania i symulacji w następnej części artykułu przedstawiono trzy programy wspomagające ten proces. Pierwszy z nich opracowano w celu wspierania modelowania za pomocą grafów wiązań. Drugi z opisywanych programów jest oprogramowaniem służącym do modelowania, symulacji i analizowania układów dynamicznych. Ostatni z nich natomiast jest wyposażony w interfejs graficzny pozwalający w łatwy sposób budować modele w postaci schematów blokowych. Dokonano również porównania cech przedstawionych programów i wybrano oprogramowanie AMESim do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Po wyborze oprogramowania przedstawiono model układu chłodzenia w postaci schematu blokowego, na podstawie którego wykonano symulacje dla dwóch wartości nadciśnienia w układzie chłodzenia. Artykuł zakończono wnioskami, w których stwierdzono, m. in. że oprogramowanie umożliwia zaprojektowanie i ocenę właściwości danej konstrukcji oraz wprowadzenie ewentualnych zmian bez konieczności budowy drogich prototypów.

WSTĘP

Model systemu jest realnie istniejącym lub wyobrażonym obrazem, który odzwierciedla pewne, rzeczywiste lub hipotetyczne własności badanego układu, jego budowę i jest do niego podobny pod względem wybranych cech strukturalnych.

Podstawowym celem modelowania jest uproszczenie złożonej rzeczywistości, pozwalające na poddanie jej procesowi badawczemu. Stosując modelowanie można zmniejszyć lub powiększyć obiekt badań do dowolnej wielkości, analizować procesy trudne do uchwycenia ze względu na zbyt szybkie lub zbyt wolne tempo ich przebiegu, czy też badać jeden wybrany aspekt zagadnienia, pomijając inne, mniej istotne. Zakres branych pod uwagę zjawisk zależy od dostępnej wiedzy i celu badań modelowych [5]. Obecnie modelowanie i symulacja poprzez wykorzystanie oprogramowania komputerowego jest coraz powszechniej stosowana w rozwiązywaniu wielu problemów inżynierskich we wczesnej fazie projektowania bez budowy drogich prototypów.

1. METODY MODELOWANIA UKŁADÓW

Model matematyczny to zbiór symboli i funkcji matematycznych oraz ścisłych zasad operowania nimi, przy czym zawarte w modelu symbole i relacje mają interpretację odnoszącą się do konkretnych elementów modelowanego wycinka rzeczywistości. Modelowanie matematyczne polega na tworzeniu modeli i wykorzystaniu aparatu matematycznego do ich analizy za pomocą komputerów (symulacja komputerowa) [3].

Modelowanie sprowadza się do wyznaczenia zależności matematycznej między wielkościami wyjściowymi y i wejściowymi x , z , u [6]:

$$y = f(x, z, u) \quad (1)$$

gdzie:

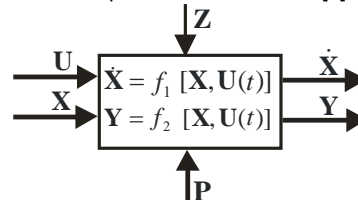
y - wielkości wyjściowe badanego systemu,
 x , z , u - wielkości wejściowe.

Modelowanie matematyczne poprzedzone jest najczęściej modelowaniem graficznym bądź fizycznym.

Do rozwiązania równań różniczkowych zwyczajnych oraz ich układów stosowanych jest wiele metod, z których bardzo popularna jest metoda Runge–Kutty. Ze względu na nieskomplikowany proces programowania oraz dużą dokładność otrzymywanych wyników jest ona wykorzystywana do rozwiązywania równań różniczkowych w wielu programach (np. MATLAB, Amesim) [6].

Model graficzny odzwierciedla dynamiczną strukturę obiektu i może być w prosty sposób modyfikowany. Jednym ze sposobów modelowania graficznego jest metoda grafów wiązań, która jest sposobem modelowania układów fizycznych z przepływem energii charakteryzujących się złożoną budową [2].

Model grafów wiązań (GW) umożliwia generowanie równań stanu, co oznacza tworzenie matematycznego modelu przyczynowo–skutkowego, takiego jak na przykład na rysunku 1. Model graficzny składający się z pojedynczych grafów wiązań jest tworzony w celu łatwiejszego generowania, modyfikowania oraz weryfikowania matematycznego modelu w postaci równań stanu [1].

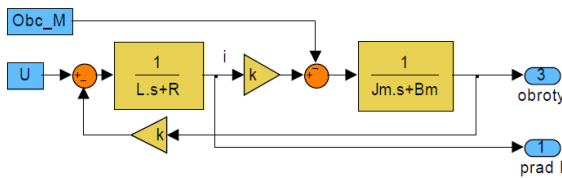


Rys. 1. Model przyczynowo-skutkowy opisany równaniami stanu w modelu graficznym: U – wektor wymuszeń (wejść), X – wektor stanów, Y – wektor wyjść, Z – wektor zakłóceń, P – wektor nastaw i parametrów konstrukcyjnych [2]

Sam model graficzny odzwierciedla w przejrzystej postaci dynamiczną strukturę obiektu i może być w prosty sposób modyfikowany, lecz nie pozwala na bezpośrednie prowadzenie eksperymentów symulacyjnych. Model GW umożliwia natomiast w sposób „ręczny” lub automatyczny generowanie równań stanu, co oznacza tworzenie matematycznego modelu przyczynowo-skutkowego przepływu energii.

Model fizyczny jest to uproszczony obraz oryginału zawierający zbiór istotnych informacji o jego naturze fizycznej. W modelowaniu fizycznym bardzo ważne jest wyodrębnienie istotnych właściwości fizycznych badanego urządzenia spełniających prawa fizyki (np. prawa zachowania energii) w miejscu połączenia elementów modelu. Jest to pewna analogia do grafu wiązań, i jednocześnie stanowi istotną różnicę w porównaniu do schematów blokowych [4].

Przykład modelu fizycznego silnika prądu stałego opracowanego w oprogramowaniu SIMULINK, zgodnie z oznaczeniami stosowanymi w układach automatyki, przedstawia rysunek 2.



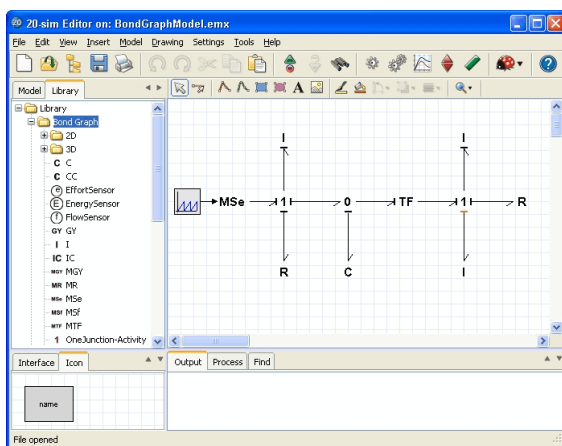
Rys. 2. Model fizyczny silnika prądu stałego w oprogramowaniu Simulink [4]

2. ANALIZA PROGRAMÓW DO SYMULACJI KOMPUTEROWEJ UKŁADÓW ENERGETYCZNYCH

Budowę modelu symulacji komputerowej imitującego działanie rzeczywistego obiektu można prowadzić od podstaw budując jego model fizyczny, a następnie układając układy równań systemu i dobierając metody ich rozwiązywania numerycznego. Można do tego wykorzystywać również gotowe, specjalistyczne biblioteki podprogramów do układania modeli złożonych układów energetycznych i poszukiwania ich rozwiązań optymalnych, sterowania, badania odpowiedzi na wymuszenia itd. [6].

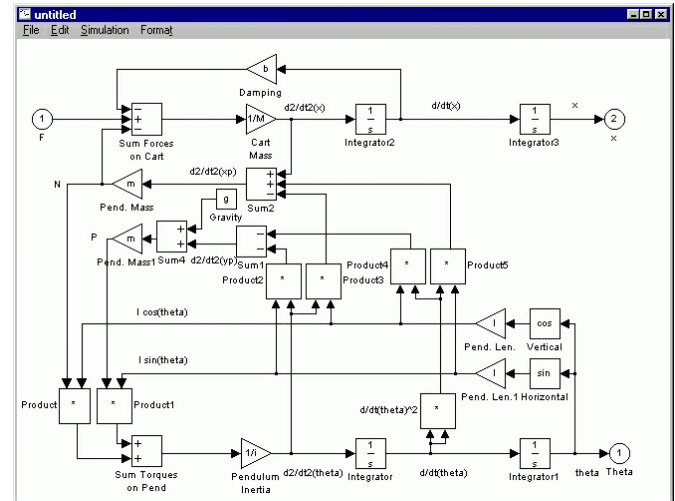
Program 20-sim był pierwszym oprogramowaniem opracowanym do wsparcia modelowania układów przemiany energii kinetycznej i potencjalnej za pomocą grafów wiązań. Każdy element grafu opisuje określony proces fizyczny. Aby ułatwić konstruowanie systemów energetycznych, wspólne elementy są oznaczone przez specjalne symbole.

Program 20-sim ma dużą bibliotekę zawierającą wszystkie typowe elementy, którego interfejs graficzny pokazany jest na rysunku 3. Obok standardowych elementów, oprogramowanie umożliwia opracowanie przez użytkownika własnych modeli. Elementy są łączone za pomocą portów. Program 20-sim został wyposażony w symulator do przeprowadzania symulacji. Dostępna jest duża liczba narzędzi umożliwiających analizowanie modeli. Modele mogą być transformowane do przestrzeni stanów albo mogą być wyeksportowane do środowiska Matlab m-file albo S-Funkcji [7].



Rys. 3. Interfejs graficzny oprogramowania 20-sim z modelem w postaci grafów wiązań [8]

Simulink jest pakietem oprogramowania służącym do modelowania, symulacji i analizy układów dynamicznych. Model wykonany w tym programie zaprezentowany został na rysunku 4. Można implementować w nim zarówno układy liniowe, jak i nieliniowe działające w trybie ciągłym, dyskretnym lub w hybrydowym, w którym część układu pracuje w czasie dyskretnym natomiast inna część w czasie ciągłym.



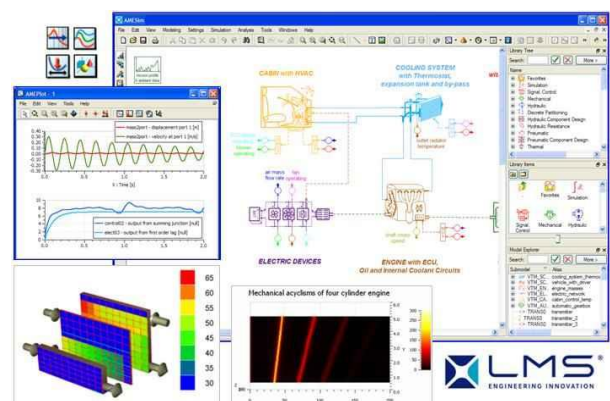
Rys.4. Model wykonany w oprogramowaniu Simulink [10]

Program zawiera biblioteki źródeł i rejestratorów sygnału, elementów liniowych i nieliniowych oraz połączeń między nimi. Po zdefiniowaniu modelu można przeprowadzać symulacje z użyciem wybranej metody całkowania z poziomu menu SIMULINK lub po wpisaniu odpowiednich poleceń w oknie komend MATLAB. Wykorzystując oscyloskopy lub inne bloki wyświetlaczy można obserwować wyniki podczas uruchamiania symulacji. Wyniki symulacji mogą być umieszczane w przestrzeni roboczej MATLAB pozwalając w ten sposób na ich dalszą obróbkę [9].

Platforma Imagine.Lab AMESim to oprogramowanie symulacyjne do modelowania i analizy wielodyscyplinowych systemów mechatronicznych pokazane na rysunku 5.

Oprogramowanie AMESim pozwala na rozwiązywanie wielu problemów inżynierskich we wczesnej fazie projektowania. Elementy systemu są opisane przez modele analityczne, reprezentujące zachowanie elementów systemu: hydraulicznych, pneumatycznych, elektrycznych lub mechanicznych. Jest on oparty na teorii grafów wiązań, gdzie przyczynowość jest wymuszana poprzez łączenie wyjść jednego podmodelu do wejścia innego podmodelu (i odwrotnie).

Oprogramowanie umożliwia zaprojektowanie i ocenę właściwości danej konstrukcji oraz wprowadzenie ewentualnych zmian bez konieczności budowy drogich prototypów [11].



Rys. 5. Modelowanie i symulacja w AMESim [10]

Spośród wielu różnych programów do symulacji komputerowych w artykule przedstawiono trzy dostępne programy. Program 20-sim był pierwszym oprogramowaniem opracowanym do wspierania modelowania za pomocą grafów wiązań. Simulink jest oprogramowaniem służącym do modelowania, symulacji i analizowania układów dynamicznych. Program jest wyposażony w interfejs graficzny pozwalający w łatwy sposób budować modele w postaci schematów blokowych.

Platforma Imagine Lab AMESim to oprogramowanie symulacyjne do modelowania i analizy wielodzielzinowych systemów mechatronicznych. Jest on oparty na teorii grafów wiązań i również jest wyposażony w interfejs graficzny, dzięki któremu łączy zalety programu 20-sim i Simulink. Cechy oprogramowania AMESim zdecydowały o jego wyborze przy badaniach działania układu chłodzenia o podwyższonej temperaturze płynu chłodzącego.

3. MODEL UKŁADU CHŁODZENIA SILNIKA O PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE PŁYNU CHŁODZĄCEGO OPRACOWANY W PROGRAMIE AMESIM

Rysunek 6 przedstawia opracowany w programie AMESIM schemat stanowiska badawczego wyrażony za pomocą schematów blokowych oraz wykonano symulacje przedstawiające przebiegi ciśnienia, temperatury cieczy chłodzącej dla założonych parametrów ciśnienia.

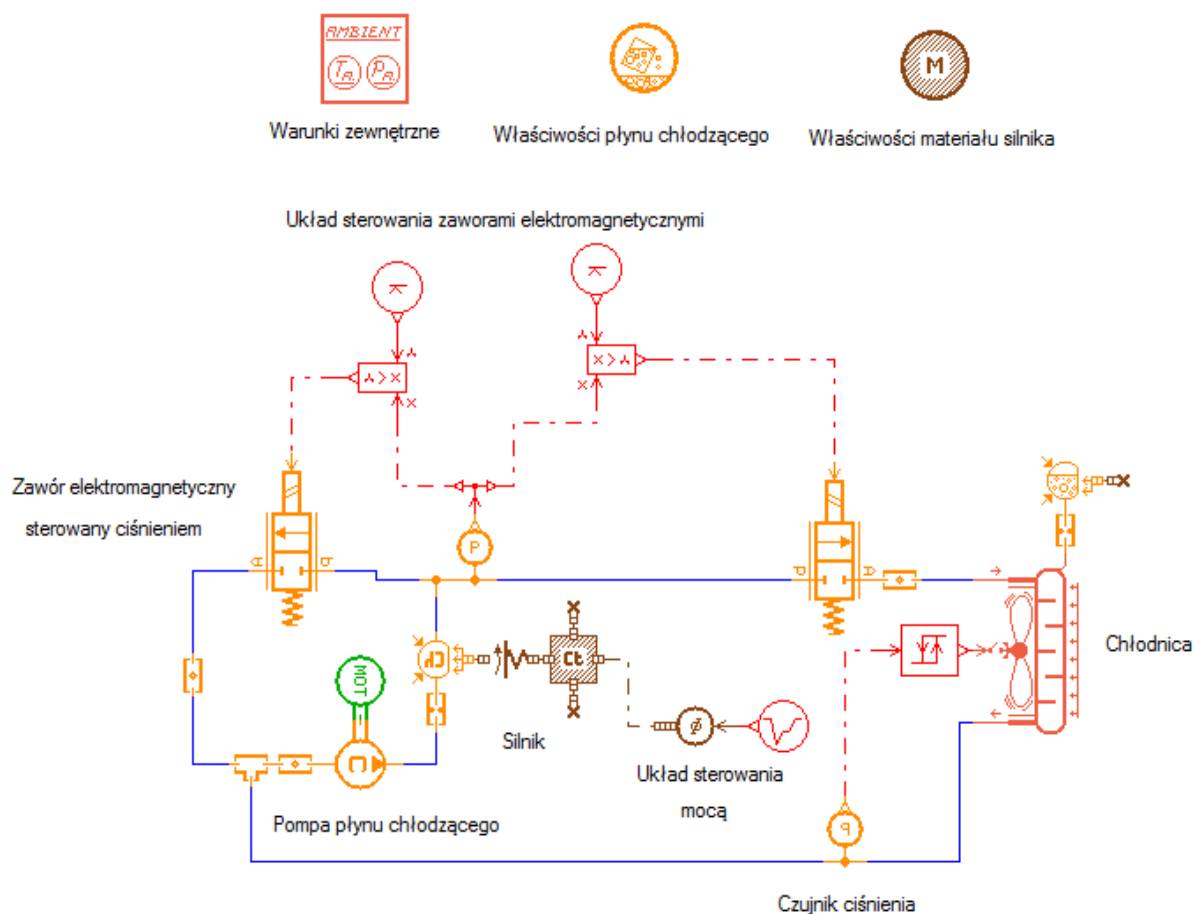
W przedstawionym modelu występują elementy, które reprezentują blok silnika wraz z układem odpowiedzialnym za odebranie ciepła od ścianek i przekazaniem do cieczy chłodzącej. Podstawowym źródłem ciepła na stanowisku są po trzy elementy grzejne o

zróżnicowanej mocy elektrycznej przylegające do jego ścianek każdego cylindra. Układ sterowania mocą grzania umożliwi regulację wartości ciepła jakie jest odprowadzane do układu chłodzenia. Zastosowano pompę odśrodkową napędzaną elektrycznie, z regulowaną prędkością obrotową, dzięki czemu intensywność chłodzenia nie zależała od założonej prędkości obrotowej silnika. Przepływ strumienia cieczy jest ciśnieniem pomiędzy małym i dużym obiegiem, był sterowany za pomocą zaworów elektromagnetycznych. Aby wykonać symulacje parametrów pracy obiegu chłodzenia, takich jak temperatura i ciśnienie cieczy, wydajność pompy, parametry robocze pompy, zaworów elektromagnetycznych, trzeba było wprowadzić dużą liczbę danych, w tym przede wszystkim własności cieczy, własności materiału silnika, parametry otoczenia, objętość cieczy w małym i dużym obiegu, masa silnika, itp. Szczegółowe dane wprowadzono odpowiednio do wymagań programu.

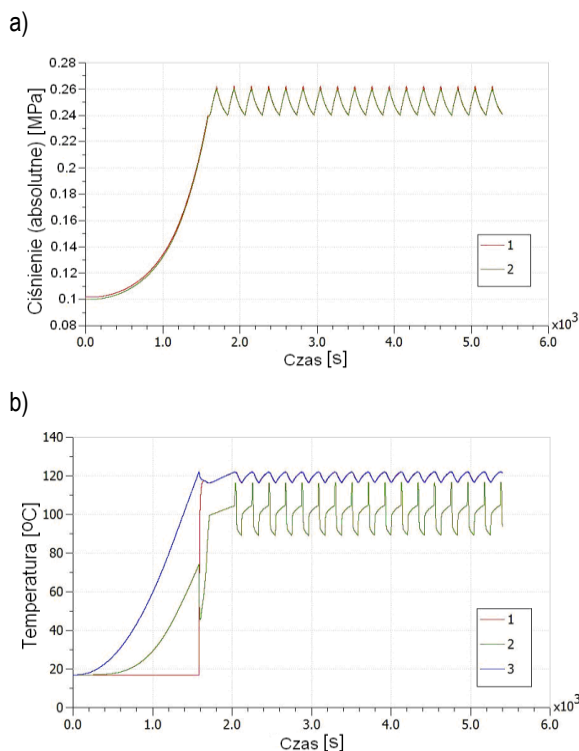
4. WYNIKI SYMULACJI W OPROGRAMOWANIU AMESIM

Korzystając z opracowanego programu wykonano wstępne obliczenia i symulacje, które przeprowadzono dla nadciśnienia 0,15 MPa oraz dla 0,2 MPa. Symulacje wykonano dla napełnienia układu chłodzenia płynem chłodzącym wynoszącym 9 dm³, co w przybliżeniu stanowi 80% wypełnienia układu w ciecz, przy całkowitej objętości układu około 11 dm³.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych wyznaczono charakterystyki przebiegów temperatury cieczy przed i za chłodnicą oraz na wyjściu z silnika, nadciśnienia cieczy w małym i dużym obiegu, a także pomiary wydatku pompy cieczy chłodzącej, a wyniki przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Schemat stanowiska modelowego układu chłodzenia opracowany w oprogramowaniu AMESIM

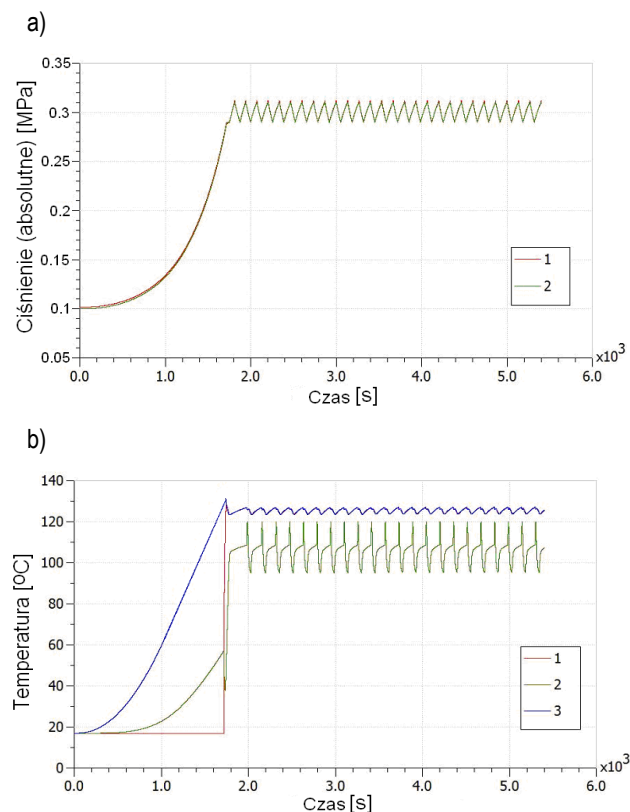


Rys. 7. Przebiegi wyznaczone przy nadciśnieniu 0,15 MPa i 80 % wypełnienia układu w ciecz: a) nadciśnienia: 1 – w małym obiegu, 2 – w dużym obiegu, b) temperatury: 1 – wejście do chłodnicy, 2 – wyjście z chłodnicy, 3 – wyjście z bloku cylindrów

Podczas symulacji dla średniego nadciśnienia 0,15 MPa i 80% wypełnienia układu w ciecz chłodzącą, chwilowe nadciśnienie utrzymywane było w granicach $0,14 \div 0,16$ MPa. Do uzyskania założonego nadciśnienia podczas grzania kadłuba silnika, co trwało ok. 23 minut, następował jego łagodny wzrost. Po tym czasie konieczne było utrzymanie nadciśnienia o wartości średniej 0,15 MPa w przedziale $0,14 \div 0,16$ MPa poprzez zmianę intensywności chłodzenia. Przebieg nadciśnienia odznaczał się stosunkowo dużą równomiernością oraz stabilnością w ciągu całego cyklu grzania trwającego około 100 minut.

Przebiegi temperatury na wyjściu z bloku silnika i wejściu do chłodnicy po uzyskaniu założonego nadciśnienia kształtowały się na poziomie $116 \div 120$ °C przy 80 % wypełnienia układu chłodzenia w ciecz chłodzącą. Natomiast temperatura na wyjściu z chłodnicy zawierała się w granicach $90 \div 115$ °C. Rozpiętość zmian temperatury na wyjściu z chłodnicy wynosiła około 30 °C. Taki wzrost przedziału zmian temperatury wynika w pewnym stopniu z nieco większej częstotliwości zmian wydajności pompy wodnej i włączenia wentylatora oraz mniejszej częstotliwości przełączania przepływu cieczy między małym i dużym obiegiem.

Kolejne symulacje wykonano przy nadciśnieniu 0,2 MPa i 80 % wypełnienia układu w ciecz, co widać na rysunku 8. Przez około 27 min. następował łagodny wzrost nadciśnienia na skutek rozgrzewania układu i po tym czasie utrzymywało się nadciśnienie średnie około 0,2 MPa (ciśnienie bezwzględne 0,3 MPa) przy zmianach nadciśnienia w granicach $0,19 \div 0,21$ MPa.



Rys. 8. Przebiegi wyznaczone przy nadciśnieniu 0,2 MPa i 80 % wypełnienia układu w ciecz: a) nadciśnienia: 1 – w małym obiegu, 2 – w dużym obiegu, b) temperatury: 1 – wejście do chłodnicy, 2 – wyjście z chłodnicy, 3 – wyjście z bloku cylindrów

Przebieg nadciśnienia też odznaczał się podobną równomiernością jak w przypadku mniejszego nadciśnienia, przy czym większa była częstotliwość zmian intensywności chłodzenia widoczna na przebiegach nadciśnienia i temperatury. Zarejestrowane przebiegi potwierdzają możliwość utrzymania nadciśnienia na stabilnym poziomie przy zmianach intensywności chłodzenia.

W tym przypadku przebiegi temperatury przy 80% wypełnienia układu w ciecz chłodzącą wyglądały następująco - temperatura na wyjściu z silnika wzrosła prawie do 125°C, natomiast na wyjściu z chłodnicy zawierała się pomiędzy $97 \div 120$ °C.

PODSUMOWANIE

Badania symulacyjne przeprowadzone w oprogramowaniu pokazały prawidłowość działania układu i zadowalającą zgodność wyników z uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych [7]. Przez dłuższy okres czasu możliwe było utrzymanie ciśnienia w układzie na założonym poziomie.

Sterując chłodzeniem silnika ze względu na dopuszczalne wartości ciśnienia uzyskano zbliżone wartości temperatury i częstotliwości zmian tej temperatury. Z tego względu model umożliwia optymalizację charakterystyk parametrów obiektu, sposobu jego sterowania i eksploatacji. Może być także stosowany podczas badań nad wprowadzeniem zmian modernizacyjnych, które można poprzedzać symulacją przy zastosowaniu opracowanego modelu matematycznego, co powinno obniżyć koszty budowy następnych wersji stanowiska badawczego, czy też drogich prototypów.

BIBLIOGRAFIA

1. Breedveld P., *Thermodynamic bond graphs and the problem of thermal interface*. Journal of the Franklin Institute 1982, Vol. 314, No 1.
2. Cichy M., *Modelowanie systemów energetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2001.
3. Gajda J., Szyper M., *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1998.
4. Mrozek Z., *Modelowanie fizyczne. Pomiary Automatyka Robotyka*, 2003, nr 3.
5. Rosenberg R.C., Karnopp D. C., *Introduction to physical system Dynamics*. McGraw-Hill Book Company, 1983.
6. Tarnowski W., Bartkiewicz S., *Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa dynamicznych procesów ciągłych*. Wyd. Ucz. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1998.
7. Walentynowicz J., Krakowski R., *Modeling of the higher pressure cooling system for transport vehicles engines*. Transport Problems 2010, T. 5 z. 4.
8. *20-SIM Twente Sim Reference Manual*, version 2.1, Control Laboratory University of Twente, November 1997.
9. http://www.abbpol.com/software/matlab/Simulink_opis.html
10. <http://www.library.cmu.edu/ctms/ctms/simulink/examples/pend/pendsim.htm>
11. <http://www.lmsintl.com/engine-cooling-system>

APPLICATION OF SIMULATION SOFTWARE FOR MODELING AND ANALYSIS OF ENERGY SYSTEMS

Abstract

In this article an overview of modeling methods was done. Mathematical modeling, graphical and physical has been made. Due to the increasingly widespread use of computer software for modeling and simulation in the next section of the article three programs supporting this process were presented. The first one was designed to support the modeling using bond graphs. The second of these programs is a software used for modeling, simulation and analysis of dynamical systems. The last one, however, is equipped with a graphical interface that allows you to easily build models in the form of block diagrams. Comparison of the features presented programs were made. AMESim software to conduct simulation research have been selected. After selecting the software, model of the cooling system in block diagram form was shown. Based on this model, simulations for two values of overpressure in the cooling system were made. The article was completed conclusions, which stated that the software allows you to design and evaluation of the properties of the construction and make any changes without having to build expensive prototypes.

Autor:

Dr inż. **Rafał Krakowski** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, Katedra Siłowni Okrętowych, e-mail: r.krakowski@am.gdynia.pl