

Arkadiusz Małek*, Jacek Czarnigowski*, Mirosław Wendeker*

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA SYSTEMU STEROWANIA OGNIWEM PALIWOWYM

WPROWADZENIE

W każdej dziedzinie życia możemy dziś zaobserwować dążenia związane ze zwiększaniem wydajności, sprawności czy lepszym wykorzystaniem substratów do produkcji wszelkiego rodzaju wyrobów. Tendencje te mają ogromne znaczenie w sektorze energetycznym. Na skutek kurczenia się zasobów paliw kopalnianych ludzie są zmuszeni do oszczędnego korzystania z nich. Coraz częściej mało efektywne silniki spalinowe są zastępowane wodorowymi ogniwami paliwowymi charakteryzującymi się wysoką sprawnością przetwarzania energii chemicznej paliwa na energię elektryczną. Ale również systemy ogniw paliwowych można optymalizować w celu uzyskiwania jak największej sprawności. Można to czynić na wiele sposobów. Odpowiedni dobór komponentów do budowy takiego systemu oraz efektywne sterowanie nimi umożliwiają realizację takich celów.

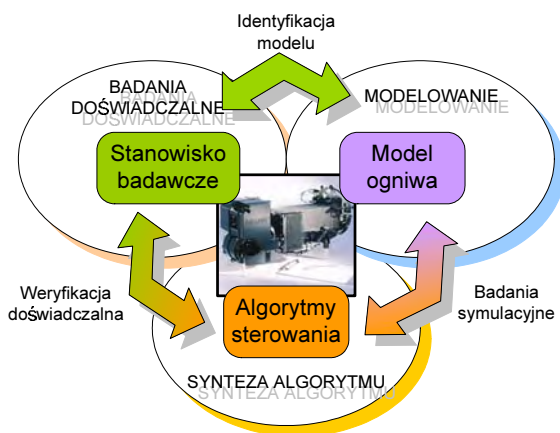
Zarówno sterowanie w czasie rzeczywistym takim ogniwem paliwowym jak i projektowanie takiego systemu może być wspomagane komputerowo za pomocą specjalnych służących do tego systemów programowych wspomagających projektowanie (Computer Aided Control System Design – CACSD). Celem artykułu jest uwydatnienie jakie korzyści płyną z komputerowego wspomaganie projektowania układu sterowania na przykładzie budowy sterownika zarządzającego przepływem powietrza w ogniwie paliwowym typu PEM. Zwrócono także uwagę na ogromną rolę modelowania w dzisiejszej technice, nauce i dydaktyce.

METODOLOGIA PROJEKTOWANIA SYSTEMU STEROWANIA

Nowoczesne projektowanie systemów sterowania powinno zawierać wszystkie procedury, czynności i narzędzia badawcze przedstawione na rysunku 1.

Na stanowisku badawczym wykonuje się szereg badań eksperymentalnych w celu wyznaczenia charakterystyk opisujących zachowanie się obiektu badań zarówno w stanach ustalonych jak i stanach dynamicznych. Taka analiza systemowa obiektu stero-

* Arkadiusz MAŁEK, Jacek CZARNIGOWSKI, Mirosław WENDEKER – Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.



Rys. 1. Obiekt badań w powiązaniu z narzędziami, procedurami i czynnościami badawczymi

wania obejmuje zazwyczaj także wstępne sprecyzowanie celu sterowania oraz ustalenie wielkości charakteryzujących obiekt czyli wielkości sterowanych, wielkości sterujących i zakłóceń [5].

Zbudowanie dynamicznego modelu obejmującego wszystkie elementy modułu ogniw paliwowych jest kolejnym krokiem służącym, nie tylko do zrozumienia zachowania się układu, ale także do rozwoju i projektowania bazującej na modelu metodologii sterowania. Tworzenie dynamicznego modelu ma zazwyczaj także na celu:

- zmniejszenie kosztu eksperymentu,
- przeprowadzenie badań w warunkach trudnych do wyeliminowania na stanowisku badawczym (np.: przy braku zakłóceń),
- wstępną kalibrację parametrów algorytmu sterowania.

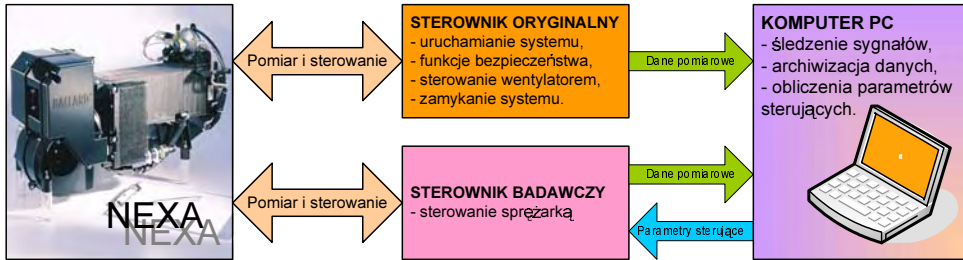
Następnym krokiem jest opracowanie algorytmu sterowania, który jest podstawą komputerowego programu sterującego.

Opisane powyżej czynności badawcze często zamykają się w pętłę w celu poszukiwania najlepszych rozwiązań. Istotną cechą procesu projektowania systemu sterowania jest iteracyjny charakter poszukiwania rozwiązań, który prowadzi do zmian w kolejności realizacji kolejnych faz projektowania oraz nawrotów związanych z wynikami bieżącej oceny układu. Na każdym z tych etapów nieocenioną rolę odgrywają specjalistyczne programy wspomagające projektowanie.

KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA STEROWNIKA BADAWCZEGO

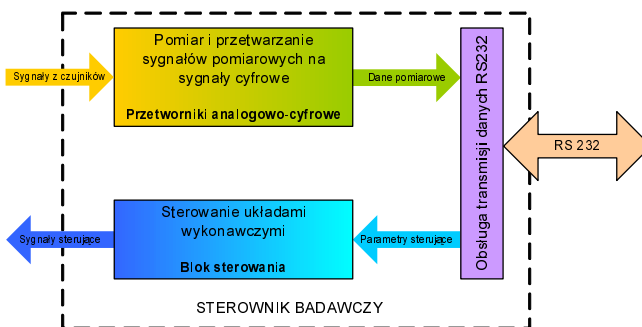
Zbudowanie stanowiska badawczego jest pierwszym krokiem do dokładnego poznania właściwości sterowanego obiektu.

W celu wykonania systemu sterowania przepływem powietrza zasilającego stronę katodową ogniwa konieczne było przejście kontroli nad wydatkiem powietrza wytwarzanego przez sprężarkę. W tym celu wykonano sterownik w układzie master-slave. Za funkcje związane z procesem rozpoczynania i kończenia pracy systemu ogniwi paliwowych oraz funkcje bezpieczeństwa odpowiadał sterownik oryginalny (rys. 2).



Rys. 2. Schemat przepływu informacji pomiędzy systemem ogniwi paliwowych i sterownikami

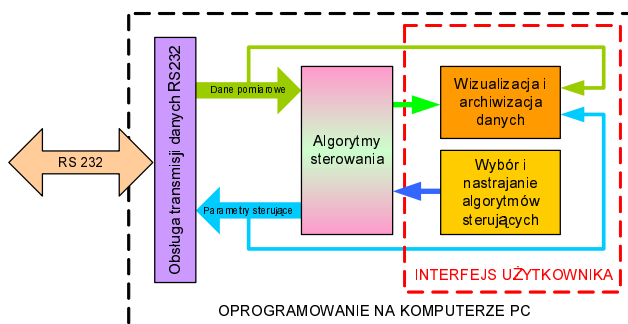
Sterownik badawczy współpracując z regulatorem prędkości obrotowej silnika bezszczotkowego, zmieniał wydatek pompy powietrza. W tym samym czasie do wyjścia sterującego sterownika oryginalnego został podłączony inny silnik bezszczotkowy. Takie rozwiązanie umożliwiło testowanie różnych metod sterowania wydatkiem powietrza bez względu na procedury zapisane na stałe w pamięci sterownika oryginalnego. Sterownik badawczy zbierał informacje dotyczące aktualnego stanu systemu, a następnie po przekonwertowaniu na sygnał cyfrowy wykorzystywał je do obliczenia wartości sterującej dla następnego kroku czasowego. Hardware sterownika badawczego stanowił układ scalony zawierający 32-bitowy procesor i szereg wejść i wyjść zarówno analogowych jak i cyfrowych. Ze względu na dostępność i szybkość obliczeń do napisania oprogramowania sterownika badawczego zostało wykorzystane środowisko C++. Układ badawczy zbudowany został w konfiguracji umożliwiającej zaimplementowanie algorytmów sterowania na komputerze PC (rysunek 3).



Rys. 3. Schemat blokowy oprogramowania sterownika badawczego

Zasada pracy układu opierała się zatem na ciągłej wymianie informacji między sterownikiem a komputerem PC. Sterownik badawczy kontaktował się z panelem sterowania umieszczonym na komputerze przenośnym za pomocą łącza RS 232. Umożliwiło to archiwizację danych na dysku twardym komputera a także wykorzystanie mocy obliczeniowej procesora komputera przenośnego.

Dane uzyskane z czujników są przesyłane do komputera PC. Dane odebrane przez moduł obsługi transmisji danych RS 232 są rozkodowywane i przesyłane do modułu algorytmów sterowania. Odebranie transmisji uruchamia obliczenia parametrów sterujących. Wybór aktualnie aktywnego algorytmu sterowania dokonywany jest przez użytkownika, bez konieczności wyłączania programu. Pozwala to na przełączanie algorytmów w czasie pracy ogniwa. Obliczone w module algorytmów sterowania parametry są następnie przesyłane do sterownika (rysunek 4).



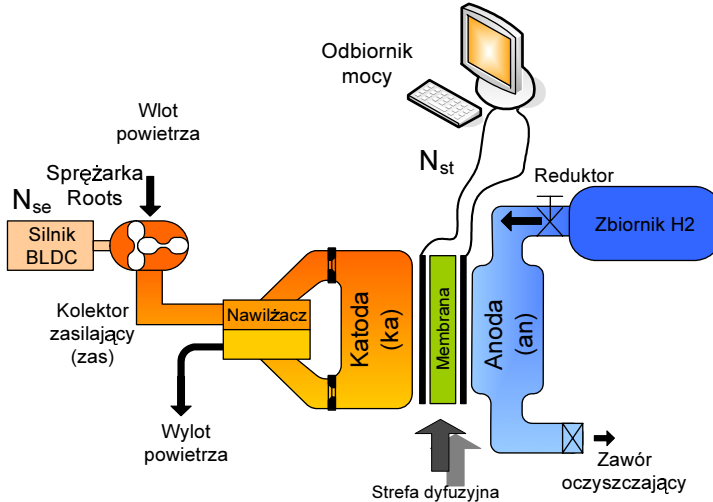
Rys. 4. Schemat blokowy programu sterującego

Podczas pracy programu możliwy jest ciągły podgląd sygnałów pomiarowych oraz sygnałów sterujących. Są one przechwytywane przez moduł wizualizacji danych. Moduł dokonuje ponadto archiwizacji na dysku twardym wszystkich wartości pomiarowych i sterujących oraz niektórych zmiennych algorytmów sterujących. Nastawianie parametrów regulatorów przeprowadza się podczas pracy programu dzięki specjalnemu polu okna dialogowego. Możliwość taka pozwala na znaczne skrócenie czasu badań.

Wykonany sterownik badawczy jest efektywnym narzędziem służącym do testowania wszelkiego rodzaju algorytmów sterujących.

DYNAMICZNY MODEL OGNIWA PALIWOWEGO ZORIENTOWANY NA STEROWANIE

Nieliniowy dynamiczny model układu zasilania ze stosem ogniw paliwowych jest wyprowadzony na podstawie zasad elektrochemicznych, termodynamicznych i teorii bezwymiarowego płynu. Elementy tego systemu zostały przedstawione na rysunku 5. W modelu skoncentrowano się przede wszystkim na dynamice ogniwa PEM zasilanego sprężonymi substratami z uwzględnieniem dynamiki związanej z



Rys. 5. Objętości i elementy występujące w systemie ogniw paliwowych

regulacją temperatury. Model został użyty do analizy i projektowania sterownika przepływu powietrza zasilającego stronę katodową ogniwa paliwowego. Model systemu zawiera następujące modele główne i podmodele:

1. Model sprężarki typu Roots,
2. Model kolektora zasilającego:
 - Model przepływu czynnika przez kolektor zasilający,
 - Model nawilżacza powietrza.
3. Model stosu ogniw paliwowych:
 - Model przepływu czynnika przez katodę,
 - Model przepływu przez anodę,
 - Model napięcia stosu ogniw paliwowych,
 - Model degradacji napięcia stosu ogniw paliwowych,
 - Model układu chłodzenia stosu.

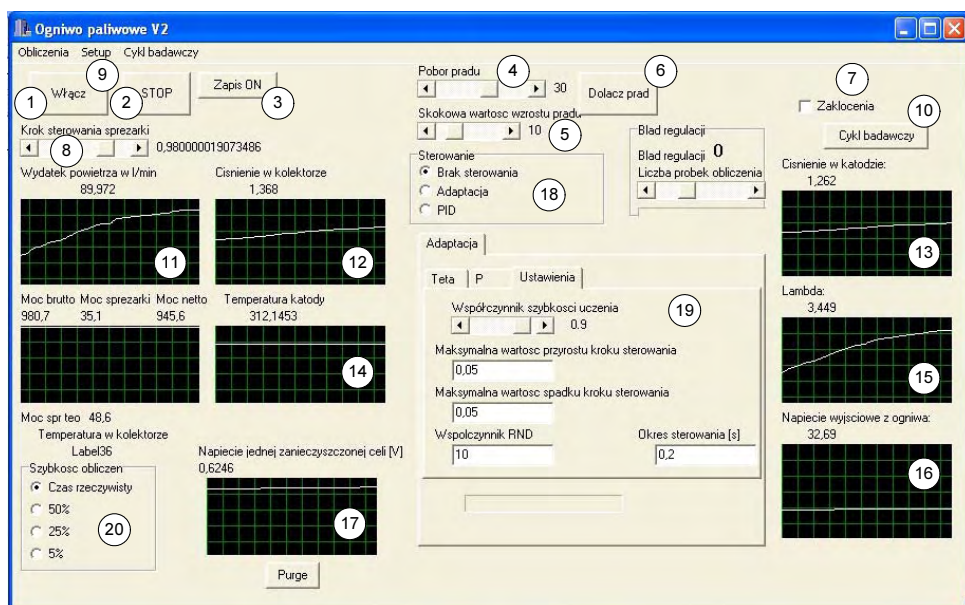
Model został zbudowany na podstawie danych literaturowych i następnie rozwinęty o dodatkowe moduły [1, 2, 3, 4]. Badania stanowiskowe dostarczyły nowej wiedzy o obiekcie dzięki czemu model ogniwa paliwowego został rozbudowany o kolejne moduły opisujące niepowtarzalność jego pracy. Należy tu wymienić moduł zanieczyszczania poprzez wodę i azot strony anodowej ogniwa. Przeprowadzone badania pomogły lepiej poznać naturę tych zjawisk. Do dynamiki układu wprowadzono również zwłokę czasową związaną z bezwładnością sprężarki powietrza a także z kumulacją masy powietrza w kolektorze dolotowym jak i w zbiorniku katodowym.

Do napisania dynamicznego modelu również użyto środowiska C++. Wykonanie oprogramowania sterownika i napisanie dynamicznego modelu ogniwa paliwowego w tym samym języku programowania, otwiera możliwość łatwej aktualizacji algorytm-

mów sterowania i testowania wszelkiego rodzaju algorytmów bazujących na modelu obiektu. Przedstawione rozwiązanie daje możliwość wykonania aplikacji, która będzie w stanie nie tylko przeprowadzać obliczenia matematyczne wewnątrz modelu cyfrowego z wystarczającą szybkością, ale także prezentować wyniki w postaci liczbowej, graficznej lub w postaci wykresów. Bogata paleta dostępnych komponentów pozwala na zbudowanie przejrzystego i funkcjonalnego interfejsu użytkownika zapewniającego wygodny i łatwy sposób obsługi całego programu jak i oddzielnych modułów. Model cyfrowy, ze względu na przejrzystość i łatwość wprowadzania późniejszych korekt, napisany został w sposób modułowy. Interfejs użytkownika programu został przedstawiony na rysunku 6.

Na panelu sterowania zostały umieszczone okna do śledzenia w czasie rzeczywistym najważniejszych zmiennych, jak również suwaki i włączniki, których opis znajduje się poniżej:

- 1) przycisk włączania programu,
- 2) przycisk zatrzymania programu,
- 3) przycisk umożliwiający zapis danych do pliku,
- 4) suwak służący do obciążania ogniwa paliwowego,
- 5) suwak umożliwiający określenie wartości skoku obciążenia,
- 6) przycisk włączający i wyłączający obciążenie,
- 7) moduł zakłóceń,
- 8) suwak umożliwiający ręczną zmianę wydatku sprężarki,
- 9) zakładka głównych ustawień konstrukcyjnych systemu,

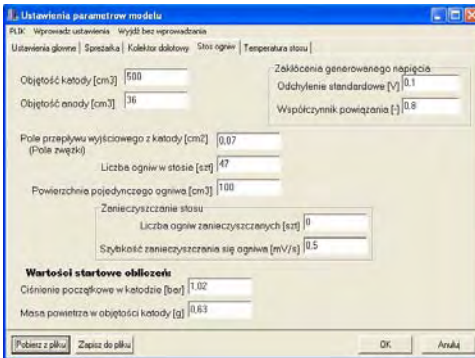


Rys. 6. Interfejs użytkownika programu

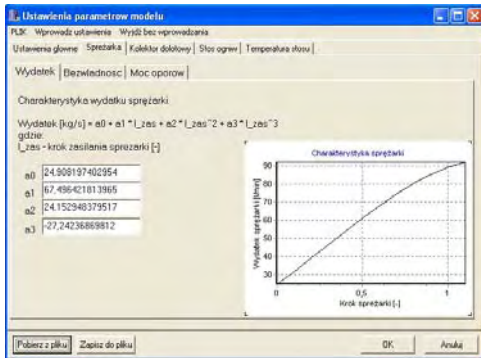
- 10) zakładka wprowadzania cyklu obciążenia z pliku,
- 11) okno umożliwiające śledzenie zmian wydatku sprężarki,
- 12) okno umożliwiające śledzenie zmian ciśnienia w kolektorze zasilającym,
- 13) okno umożliwiające śledzenie zmian ciśnienia w zbiorniku katodowym,
- 14) okno umożliwiające śledzenie zmian temperatury w zbiorniku katodowym
- 15) okno umożliwiające śledzenie zmian współczynnika nadmiaru powietrza λ ,
- 16) okno umożliwiające śledzenie zmian napięcia na wyjściu z ogniwa paliwowego,
- 17) okno umożliwiające śledzenie zmian napięcia komórki zanieczyszczonej,
- 18) zakładka wyboru rodzaju sterowania,
- 19) zakładka ustawień algorytmu adaptacyjnego,
- 20) zakładka szybkości obliczeń.

Wykonany model jest narzędziem uniwersalnym i może być użyty do symulacji systemów opartych na ogniwach paliwowych o różnych zakresach mocy. Główne parametry konstrukcyjne definiuje się w zakładce ustawień parametrów modelu (rysunek 7). Należą do nich liczba ogniw w stosie oraz czynna powierzchnia pojedynczego ogniwa, które mają decydujący wpływ na generowaną przez system moc. Na rysunku 8 została przedstawiona zakładka sprężarki, której właściwości są wprowadzane do modelu za pomocą charakterystyk.

Bardzo użyteczną funkcją jest możliwość wprowadzania z pliku cyklu obciążenia prądowego ogniwa (rysunek 9).



Rys. 7. Zakładka głównych ustawień konstrukcyjnych systemu



Rys. 8. Zakładka głównych ustawień konstrukcyjnych systemu – sprężarka

Przed użyciem tak uniwersalnego modelu musi zostać dokonana identyfikacja poszczególnych jego modułów. Tak rozwinięty model może służyć jako narzędzie do testowania algorytmów sterujących rzeczywistym ogniwem paliwowym. Pozwoli to zmniejszyć czas potrzebny na ich kalibrację jak i zaoszczędzić pieniądze związane z pracą rzeczywistego stanowiska badawczego. Model stanowi także doskonałe narzędzie dydaktyczne gdyż posiada możliwość zmiany ustawień pracy systemu, możli-



Rys. 9. Zakładka wprowadzania cyklu obciążenia z pliku

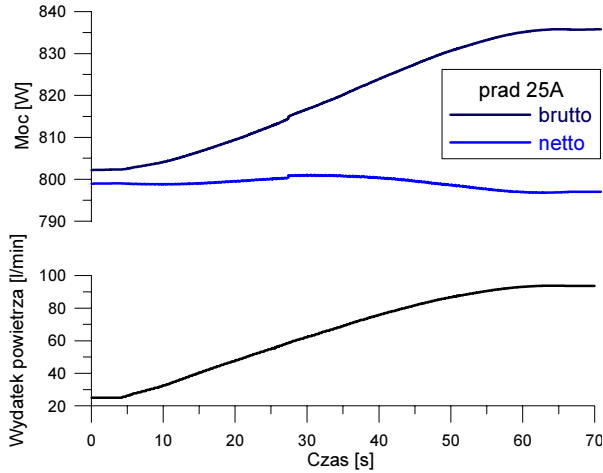
wość łatwego dodawania i wyłączania poszczególnych modułów jak i możliwość śledzenia on-line parametrów pracy systemu ogniwo paliwowych. Wszystko to może pomóc studentom jak i młodym pracownikom nauki zrozumieć fenomen zjawisk fizycznych zachodzących w pracy takiego systemu.

WSPOMAGANY KOMPUTEROWO WYBÓR TECHNIKI STEROWANIA

Na podstawie badań modelowych możliwe było wstępne sprecyzowanie celu sterowania systemem ogniwo paliwowych. Przeprowadzono następujący eksperyment. Dla stałego obciążenia prądowego, wynoszącego 25A, zmieniano wydatek sprężarki powietrza od wartości minimalnej do maksymalnej wynoszącej około 95 l/min. Zwiększenie wydatku powietrza wpływa na poprawę mocy brutto stosu ogniwo. Jest to wynikiem większej dostępności molekuł tlenu do obszarów trójfazowych, w pobliżu porowatych elektrod, na których zachodzą reakcje chemiczne. W mniejszych zakresach wydatków powietrza obserwujemy również wzrost mocy netto. Jednak po przekroczeniu optymalnej wartości następuje bardzo szybki jej spadek spowodowany zwiększonym zapotrzebowaniem mocy na napęd silnika elektrycznego sprężarki (rys. 10). Zatem moc potrzebna do napędu sprężarki, P_{spr} , jest stratą bierną dla systemu ogniwo paliwowych.

$$P_{netto} = P_{brutto} - P_{spr} \quad (1)$$

Przeprowadzone najpierw badania symulacyjne, a następnie badania stanowiskowe wykazały, że dla poszczególnych obciążeń prądowych stosu ogniwo, istnieje optymalna wartość wydatku powietrza, której odpowiada maksimum mocy netto. W takiej sytuacji możliwe było wstępne sprecyzowanie celu sterowania i wyłonienie odpowiedniej techniki sterowania przepływem powietrza zasilającego stronę katodową ogniwo paliwowego.



Rys. 10. Wpływ ilości zasilającego powietrza na moc generowaną przez system ogniw paliwowych

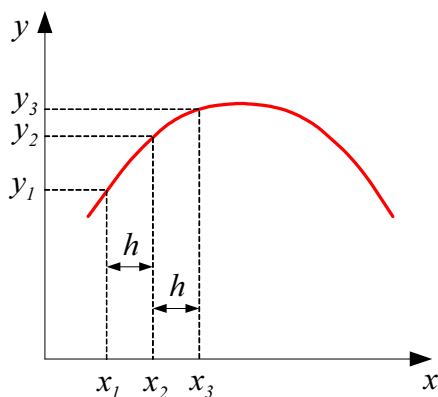
Zatem celem sterowania było odnalezienie i utrzymanie optymalnej wartości mocy netto produkowanej przez stos ogniw paliwowych w każdych warunkach pracy. Do spełnienia celu sterowania wykorzystano sterowanie ekstremalne. Termin ten oznacza zastosowanie odpowiedniego algorytmu szukania ekstremum (minimum lub maksimum) wskaźnika jakości, który charakteryzuje pracę systemu [5]. W naszym przypadku został obrany wskaźnik jakości w postaci mocy netto generowanej przez system ogniw paliwowych. Zadaniem algorytmu sterowania było zaś, odnalezienie i utrzymanie pracy systemu z maksymalną mocą netto bez względu na zmieniające się właściwości obiektu sterowania i jego otoczenia.

GRADIENTOWE STEROWANIE PRZEPLYWEM POWIETRZA

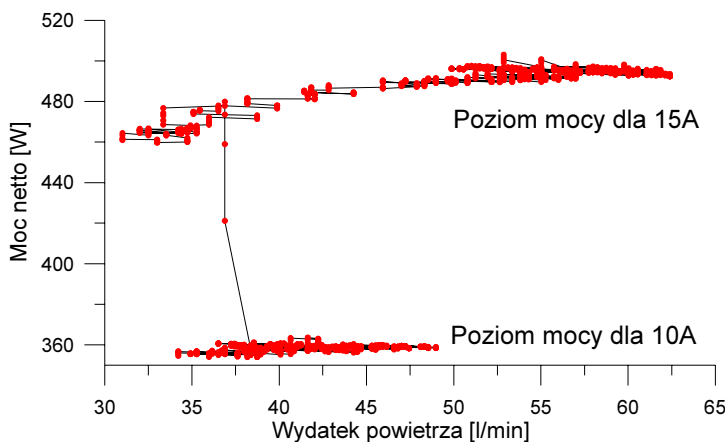
Najprostszym przykładem sterowania ekstremalnego jest algorytm gradientowy. Wykorzystuje on technikę nazywaną wspinaczką na szczyt by wyruszyć z pozycji wyjściowej i krok po kroku dojść do punktu optymalnego (rys. 11) [6]. Tego typu algorytmy są odpowiednie do wprowadzenia do sterowania ekstremalnego. Ten bardzo prosty algorytm nie używa informacji o kształcie krzywej własności systemu. Z pozycji wyjściowej x_1 , jest wykonywany ruch próbny do $x_1 + h$. Następnie są porównywane wartości y_1 i y_2 . Jeżeli y_2 jest większa niż y_1 wówczas $x_2 = x_1 + h$ jest przyjmowany jako wartość $x(t)$, w przeciwnym razie $x_3 = x_1 - h$ jest wykonywany. Proces wykonywania kroków próbnych jest kontynuowany. Szybkość działania algorytmu zależy od wartości h . To podejście nie zakłada żadnej wiedzy o parametrach krzywej własności i jest ogólnie rzecz biorąc niezawodne.

Na rysunku 12 przedstawiono ścieżkę algorytmu gradientowego w celu poszukiwania maksymalnej mocy netto systemu w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku obciążenia z 10 do 15A. Algorytm gradientowy wykonując kroki próbne poszukuje punktów pracy z maksymalną mocą netto.

Uzyskane wyniki pokazują, że zastosowanie algorytmu gradientowego pozwala na odnalezienie punktu pracy z maksymalną mocą netto. Jednak pojawia się pytanie, czy nie można odnaleźć optymalnych warunków pracy w mniejszej liczbie kroków i uzyskać większą odporność układu na wszelkiego rodzaju zakłócenia występujące w tego typu obiektach.



Rys. 11. Idea działania algorytmu gradientowego



Rys. 12. Odpowiedź układu na wymuszenie w postaci skoku obciążenia z 10 do 15A

WNIOSKI

Artykuł przedstawił konieczność wykorzystywania komputerowych programów wspomagających projektowanie systemu sterowania na wszystkich jego etapach. Zostało także podkreślone, że przy badaniu systemów sterowania dla różnych obiektów bardzo ważną rolę odgrywa ciągle rozwijająca się grupa badań symulacyjnych, które często są jedynym sposobem wiodącym do przeprowadzenia skutecznej analizy porównawczej reguł sterowania obiektami nieliniowymi o stochastycznie zmiennych parametrach i warunkach pracy. Badania takie dodatkowo znacznie zmniejszają koszt eksperymentu i pozwalają na precyzyjną analizę, która nie zależy od czynników zakłócających trudnych do wyeliminowania na stanowisku badawczym. Wykonanie dynamicznego modelu zorientowanego na sterowanie, zawierającego wszystkie elementy układu, jest bardzo pomocne w zrozumieniu zachowania się systemu jak i we wstępnym sprecyzowaniu celu sterowania i ustaleniu pierwotnej wersji algorytmów sterujących. Taki model może stanowić także doskonałe narzędzie dydaktyczne pomagające studentom jak i młodym pracownikom nauki zrozumieć fenomen zjawisk fizycznych zachodzących w pracy takiego systemu.

Wszelkie działania wspomagane komputerowo doprowadziły do wyłonienia techniki sterowania, która była w stanie zrealizować postawiony cel sterowania. Przygotowane narzędzia w postaci modelu i sterownika badawczego mogą być wykorzystywane w przyszłości do komplikacji istniejącej lub wykorzystywania nowych technik sterowania przepływem powietrza w ogniach paliwowych typu PEM.

LITERATURA

1. Wendeker M., Taccani R., Małek A., Czarnigowski J.: „Adaptive control of the fuel cell system”. International Conference HYPOTHESIS V, 7-10 września 2003 r. Porto Conte, Sardinia, Włochy.
2. Małek A.: „Sterowanie ogniwem paliwowym jako jednostką napędową pojazdu”. Sympozjum doktoranckie „Współczesne technologie w budowie maszyn” 3–4 czerwiec 2004 r. Lublin.
3. Pukrushpan J.T., Stefanopoulou A.G., Peng H.: „*Modeling and control for PEM fuel cells stacks systems*” American Control Conference TP09-2, 2002.
4. Pukrushpan J.T., Peng H., Stefanopoulou A.G.: „*Simulation and analysis of transient fuel cell system based on dynamic reactant flow model*” Proceedings of IMECE'02, 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, November 17–22, 2002, New Orleans, Louisiana, USA, IMECE2002-DSC-32051.
5. Bubnicki Z.: „*Teoria i algorytmy sterowania*”.
6. Wellstead P.E., Scotson P.G.: „*Self-tuning extremum control*” IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. D, No. 3, MAY 1990.

Streszczenie

Efektywne sterowanie przepływem zasilającego powietrza może zwiększyć osiągi systemu ogniwo paliwowych. Wykorzystując komputerowe oprogramowanie wspomagające projektowanie systemów sterowania można w krótkim czasie poznać właściwości obiektu sterowania i dobrać odpowiednią metodę sterowania nim. W artykule podkreślono też ogromną rolę modelowania i badań symulacyjnych w dzisiejszej nauce, technice i dydaktyce.

COMPUTER AIDED FUEL CELL CONTROL SYSTEM DESIGN

Summary

This paper points out that effective control of the air supply flow can increase performance of fuel cell system. It presents how to get to know in a short time the properties of the object of control and select appropriate method of controlling it by using computer software which supports designing control system. This article also emphasizes the huge significance of modeling and simulation in science, technology and didactics.