

Modelling an aircraft fuel system

Abstract: The article presents the assumptions, scope, and selected results of modelling an aircraft fuel installation. The research object was the installation in the PZL-Mielec M-18 Dromader fitted as standard with the ASz-62IR engine. The tests were carried out using the Dymola software in the module for analysing fluid flow. The model parameters were identified on a special test bench. The research scope covers the analysis of the fuel flow inside the pipe system of the fuel installation, tanks, fuel pumps, and valves including the geometry developed based on the technical documentation of the aircraft installation under varied operation conditions. The sample results are presented in diagrams.

Keywords: a fuel system, an aircraft engine, modeling

Badania modelowe lotniczego układu paliwowego

Streszczenie: W artykule przedstawiono założenia, zakres oraz wybrane wyniki badań modelowych lotniczej instalacji paliwowej. Obiektem badań był instalacja samolotu PZL M18 Dromader wyposażonego standardowo w silnik ASz-62IR. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem programu Dymola w module do analizy przepływów płynów. Parametry modelu zostały zidentyfikowane na specjalnie opracowanym stanowisku badawczym. Zakres badań obejmował analizę przepływu paliwa wewnątrz systemu przewodów instalacji paliwowej, zbiorników, pompy paliwa oraz zaworów z uwzględnieniem geometrii opracowanej na podstawie dokumentacji technicznej samolotowej instalacji w różnych warunkach pracy. Przykładowe wyniki badań przedstawiono w formie wykresów.

Słowa kluczowe: układ paliwowy, silnik lotniczy, badania modelowe

1. Wstęp

Modelowanie jest przedstawieniem systemu, elementu systemu, pojęcia, procesu lub idei w formie uproszczonej, bliskiej, ale różnej od rzeczywistości. W zależności od celu stworzenia modelu dokonuje się uproszczeń i nadaje się mu cechy odwzorowujące rzeczywistość. Podstawowym zagadnieniem podczas modelowania każdego procesu zachodzącego w rzeczywistości jest przyjęcie odpowiedniego modelu fizycznego. Następnym krokiem jest stworzenie modelu matematycznego nadającego się do wprowadzenia do komputera. Tworzymy więc formalny opis matematyczny przyjętych zjawisk

Modelowanie komputerowe jest nieodłącznym etapem procesu tworzenia nowych produktów i doskonalenia już istniejących. Proces modelowania znacznie skraca czas projektowania, a co za tym idzie zmniejsza koszty opracowania konstrukcji. Oczywiście modelowanie nie eliminuje całkowicie badań eksperymentalnych, jednak dzięki niemu zawęża się zakres tych prób. W zależności od posiadanej wiedzy o obiekcie i zastosowanych

uproszczeń pozwala ono na znaczne zbliżenie się do optymalnego rozwiązania. Badania symulacyjne zmniejszają ryzyko późniejszego pojawienia się błędów koncepcyjnych podczas prac rozwojowych. Badania wykazują, że wykrywanie i naprawa błędów w fazie projektowania zmniejsza koszty 200-1000 razy [2], [3].

Firma Saab od początków produkcji układów zabudowanych na samolotach używa badań modelowych i symulacyjnych. Na bazie wielu lat doświadczeń powstał wielomodułowy program do symulacji układów samolotowych EASY5. Autorzy artykułu [4] przedstawili badania symulacyjne i koncepcyjne układu paliwowego samolotów wojskowych JAS 39 Gripen. Zakładano, że w zbiorniku paliwowym mieszczącym się w skrzydłach są trzy rodzaje mediów: ciekłe i lotne paliwo oraz powietrze. Innym oprogramowaniem dedykowanym do symulacji ciśnienia, temperatury i prędkości przepływu przez cały samolotowy układ paliwowy jest Flowmaster V7 z nakładką Aerospace. Oprogramowanie współpracuje z dostępnymi na rynku przemysłowymi narzędziami programowymi

m.in. ANSYS FLUENT, STAR-CD i MATLAB®/Simulink®.

Oprogramowanie AMESim firmy IMAGINE wg specyfikacji producenta pozwala projektować od podstaw układy paliwowe do większości paliw płynnych i gazowych z uwzględnieniem poszczególnych komponentów i ich charakterystyk.

W dostępnej literaturze naukowej występuje wiele prac poświęconych badaniom symulacyjnym układów zasilania w paliwo. Prace te dotyczą klasycznych konstrukcji napędowych. Przeważają prace dotyczące nowoczesnych układów wysokociśnieniowego wtrysku oleju napędowego common rail [1], [5], [8] oraz badaniom poszczególnych składników układu paliwowego, np. szyny paliwowej. Niestety brakuje prac poświęconych silnikom gwiazdowym.

Obecnie wciąż produkowane są układy wtrysku benzyny do silników gwiazdowych. Jednak są to głównie systemy wtrysku mechanicznego. W latach 2006 – 2010 Politechnika Lubelska prowadziła prace nad elektronicznym układem zasilania wtryskiem paliwa dla lotniczego, gwiazdowego silnika ASz-62IR w ramach projektu celowego 03605/CT-12/6/2005 „Opracowanie i wdrożenie elektronicznego układu sterowania pracą lotniczego silnika tłokowego dużej mocy K9-E”.

Czterosuwowy, benzynowy silnik lotniczy ASz-62IR to 9 cylindrowa jednostka w układzie pojedynczej gwiazdy o łącznej pojemności 29,87 dm³, doładowana przez jednobiegową sprężarkę odśrodkową napędzaną z wału korbowego silnika. Silnik posiada podwójny układ zapłonowy, bezwładnościowy rozrusznik i jest chłodzony powietrzem. Układ zasilania stanowi czterogardzielowy gaźnik pływakowy typu opadowego. Moc startowa wynosi 860 kW (1000 KM) przy zużyciu paliwa 312 kg/h. Układ zasilania musiał zapewnić duże wydatki a także stabilność pracy. Zastosowano szynę wtryskową w kształcie torusa by zapewnić odpowiednią pojemność i nie wywoływać spadków ciśnienia w układzie. Przede wszystkim taki kształt był możliwy do zabudowania na silniku bez zmiany jego konstrukcji, jak również zapewnił możliwie najmniejszą długość przewodów zasilających (szyna-wtryskiwacz). Układ doprowadzenia paliwa składa się z dwóch pomp (mechanicznej i elektrycznej) umieszczonych równolegle. Pompa elektryczna służy do rozruchu, a mechaniczna do zasilania w paliwo w czasie normalnej pracy silnika. Konstrukcja silnikowego układu paliwowego została opracowana na podstawie badań stanowiskowych i symulacyjnych przedstawionych w pracach [7], [9], [10].

Silnik z nowym układem wtryskowym został zabudowany na płatowcu. Zaproponowano zmiany w płatowcowej instalacji paliwowej, których poprawność sprawdzono przy użyciu badań symulacyjnych i doświadczalnych.

2. Program Modelica

Modelowanie przeprowadzono w programie Dymola v5.3d pozwalającego na symulację przepływu cieczy. Program Dymola umożliwia prowadzenie badań jednowymiarowych. Pakiety uniwersalne oprogramowania umożliwiają symulacje praktycznie dowolnego systemu jeśli jego model może być przedstawiony w postaci układu równań różniczkowych lub różniczkowo-algebraicznych. Jeśli modele są zadawane w postaci schematów blokowych, to o możliwościach użycia takiego pakietu decyduje dostępność potrzebnych bloków w bibliotekach lub możliwość samodzielnego ich zbudowania. Modele budowane są w celu lepszego zrozumienia struktury i działania rzeczywistego lub projektowanego systemu. W większości przypadków tworzy się wiele modeli, ujmujących w różny sposób te same lub różne elementy systemu.

Pakiet Dymola zawiera podstawowe bezpłatne biblioteki, dzięki którym możliwe jest tworzenie różnorodnych modeli oraz biblioteki komercyjne umożliwiające budowanie układów pneumatycznych, hydraulicznych oraz układów napędowych pojazdów. Podczas opracowywania modelu korzystano z komercyjnej biblioteki programu Dymola o nazwie Hydraulics.

Moduł Dymosim służy do symulacji modeli zadanych w postaci zgodnej ze standardem Modeliki, z uwzględnieniem systemów źle uwarunkowanych. Na podstawie modelu symulacyjnego generowany jest plik *dsmode.c*, po czym jest on kompilowany, linkowany i wykonywany. W razie potrzeby można wygenerować kod binarny na inny procesor docelowy. Może to być przydatne zwłaszcza w zastosowaniach czasu rzeczywistego. Dymosim jest programem do rozwiązywania układów równań różniczkowych (ODE) i różniczkowo-algebraicznych (DAE). Wykorzystuje różnorodne metody jedno- i wielokrokowe oraz ekstrapolację. Obsługuje zdarzenia zależne od czasu i od zmiennych stanu. W przypadku równań różniczkowych obliczana jest wartość pochodnych przy założeniu, że znane są wszystkie potrzebne dane (czas, warunki początkowe, współczynniki). W przypadku równań DAE oblicza się residuum dla znanych wartości pochodnych. Równania modelu są wykorzystywane do obliczania sygnałów wyjściowych i dodatkowych, w tym potrzebnych do stwierdzenia, czy wystąpiło zdarzenie zmieniające warunki pracy symulowanego systemu. Zdarzeniem takim może być osiągnięcie zadanej wartości czasu lub przejście sygnału przez wartość zero.

Dymosim daje możliwość dokonania wyboru metody całkowania spośród:

- wielokrokowa metoda Shampine/Gordon/ Watts,
- wielokrokowa metoda Hindmarsh,
- wielokrokowa metoda Petzold/Hindmarsh przełączająca się automatycznie dla równań dobrze i źle uwarunkowanych,
- metoda Runge-Kutta rzędu 5-8,
- wielokrokowa metoda Petzold dla równań DAE,

– wielokrokowa metoda Führer dla nadokreślonych i sztywnych równań DAE.

Podczas symulacji można zmieniać parametry modelu, krok, metodę całkowania. Można też powtórzyć obliczenia dla innych warunków początkowych.

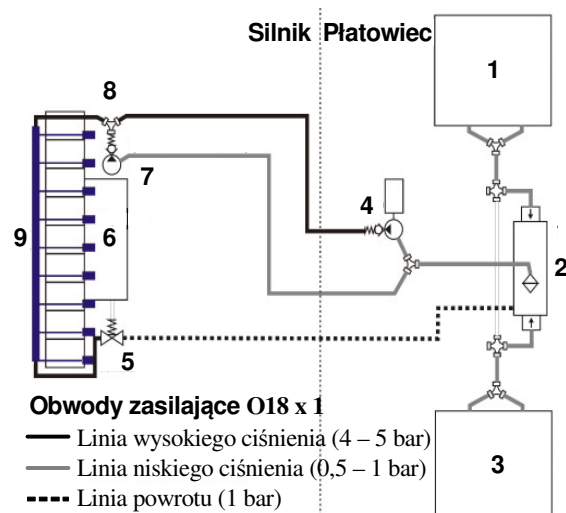
3. Obiekt badań

Obiekt badań stanowi instalacja paliwowa zabudowana w samolocie Dromader M18. Instalacja ta składa się z dwóch zbiorników skrzydłowych o pojemności 200 lub 356 dm³ każdy. Połączone są one ze zbiornikiem rozchodowym o pojemności 14 dm³ zlokalizowanym w kadłubie samolotu. Dodatkowo zbiorniki skrzydłowe połączone są ze sobą przewodem wyrównawczym zapewniającym równomierny rozkład masy samolotu podczas lotu. Do silnika paliwo doprowadzane jest przewodem elastycznym o średnicy 18 mm.

Wprowadzenie zasilania wtryskiem benzyny wymagało zmian konstrukcyjnych układu paliwowego znajdującego się na płatowcu. Wynika to z zasady działania tego typu układu. Paliwo zasysane ze zbiornika tłoczne jest pompą paliwa do filtra paliwa, a stąd dalej do zespołu wtryskowego (szyna wtryskowa, wtryskiwacze). Regulator ciśnienia paliwa, połączony z zespołem wtryskowym, utrzymuje stałe ciśnienie w układzie zasilania paliwem. Nadmiar paliwa z regulatora ciśnienia jest odprowadzany przewodem powrotnym do zbiornika paliwa.

W celu zapewnienia wymaganego wydatku wtryskiwaczy zastosowana pompa paliwa zapewnia odpowiednio duże objętościowe natężenie przepływu. Wynosi ono około 24 dm³/min w porównaniu z maksymalnym zapotrzebowaniem na paliwo dla mocy startowej około 5,5 dm³/min.

W związku z powyższym niezbędne jest zastosowanie przewodu odprowadzającego paliwo do zbiornika. Zdecydowano się na odprowadzanie paliwa do zbiornika rozchodowego. Takie rozwiązanie nie będzie powodować zmian rozkładu masy samolotu. Dodatkowo zastosowano pompę zasadniczą napędzoną przez silnik oraz drugą identyczną pompę wstępną umieszczoną na płatowcu napędzającą silnikiem elektrycznym. Uproszczony schemat instalacji paliwowej przedstawiono na rysunku 1. Odpowiedni kierunek przepływu zapewniają zawory zwrotne.



Rys. 1. Schemat układu paliwowego samolotu przy zasilaniu wtryskowym, 1 – prawy zbiornik skrzydłowy, 2 – zbiornik rozchodowy, 3 – lewy zbiornik skrzydłowy, 4 – elektryczna pompa paliwa, 5 – regulator ciśnienia, 6 – wtryskiwacz, 7 – mechaniczna pompa paliwa, 8 – zawór zwrotny, 9 – szyna paliwowa.

Fig. 1 Aircraft injection fuel system diagram, 1 – right wing tank, 2 – surge tank, 3 – left wing tank, 4 – electrical fuel pump, 5 – pressure regulator, 6 – injector, 7 – mechanical fuel pump, 8 – return valve, 9 – fuel rail.

4. Model układu paliwowego w programie Dymola

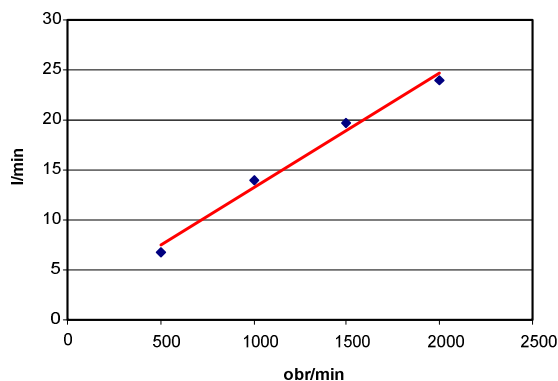
Model opracowano poprzez odwzorowanie układu paliwowego przedstawionego w rozdziale trzecim (rys. 1). Model obejmuje tor paliwowy, w skład którego wchodzi: zbiorniki skrzydłowe, zbiornik rozchodowy, pompa zasadniczą, pompa wstępną, zawory zwrotne, regulator ciśnienia, przewody paliwowe, szyna paliwowa.

Badania przeprowadzono przy założeniu braku odbioru paliwa rozchodowego (około 24 dm³/min). Zakres ciśnień podczas pracy wynosi od 3,5 do 5 bar.

Charakterystykę pracy pompy paliwa (rys. 2) uzyskano poprzez wprowadzenie wydatku objętościowego na obrót oraz poprzez wprowadzenie jej masowego momentu bezwładności do dostępnego w programie modelu (tab. 1). Wartości te odpowiadają rzeczywistym wartościom stosowanej pompy. Podczas badań modelowych instalacji paliwowej płatowca przeprowadzono obliczenia umożliwiające określenie czasu pracy pompy wstępnej. Napęd pomp został zrealizowany zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi opracowanej instalacji. Pompa zasadnicza jest napędzana przez model silnika spalinowego natomiast pompa wstępna jest napędzana przy pomocy modelu silnika elektrycznego.

Tab. 1. Parametry mechanicznej pompy paliwa
Tab. 1. Mechanical fuel pump parameters

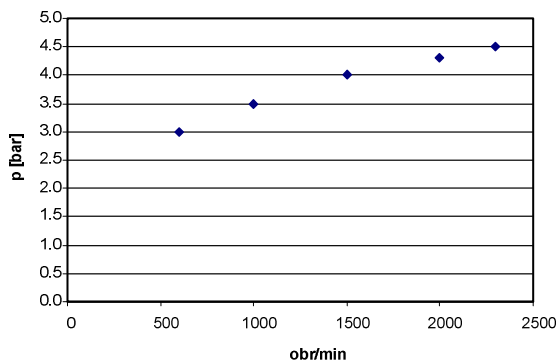
objętościowy wydatek na obrót [m ³]	0,000012
masowy moment bezwładności [kgm ²]	0,0000541



Rys. 2. Zależność wydatku objętościowego pompy od prędkości obrotowej.

Fig. 2. Dependence of the pump delivery on rotational speed.

W celu odwzorowania działania zastosowanego regulatora ciśnienia wykorzystano dostępny model zaworu zwrotnego. Dodatkowo zabudowano za nim zwężkę. Poprzez wprowadzenie odpowiedniej wartości średnicy tego zwężenia uzyskano charakterystykę ciśnienia od prędkości obrotowej pompy zbliżoną do wartości rzeczywistych (rys. 3).

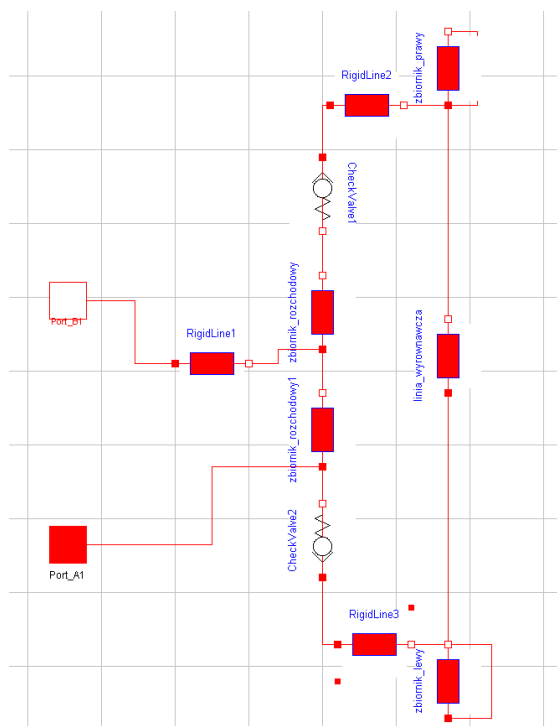


Rys. 3. Zależność ciśnienia w układzie od prędkości obrotowej pompy.

Fig. 3. Dependence of the fuel system pressure on the pump rotational speed.

Ze względu na optymalizację procesu symulacji analizowany układ podzielono na trzy podmodele obejmujące:

- układ zbiorników,
- napęd pomp paliwowych,
- układ zasilania silnika.



Rys. 4. Schemat blokowy modelu zbiorników paliwa.

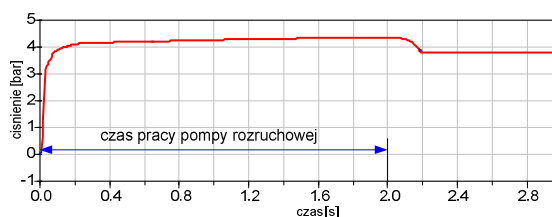
Tab. 4. Flowchart for the model of the fuel tanks

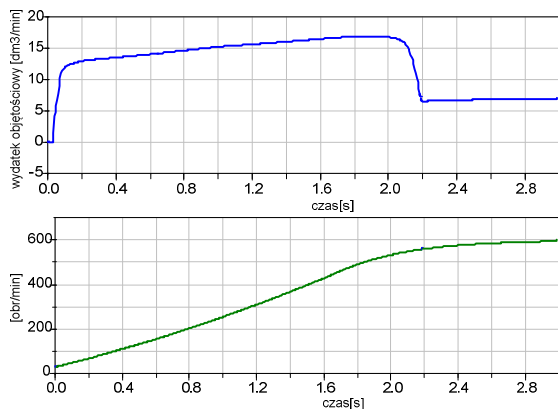
5. Analiza wyników badań

Przeływ w akumulatorze paliwowym

Badania wykonano dla wybranych prędkości obrotowych silnika. Są to prędkości eksploatacyjne silnika i wynoszą kolejno: 600 obr/min, 1000 obr/min, 1700 obr/min, 2300 obr/min. Dodatkowo wykonano obliczenia umożliwiające określenie zachowania ciśnień w układzie podczas rozruchu silnika. W tym przypadku wstępne ciśnienie w układzie jest generowane przez pompę wstępną napędzaną elektrycznie, znajdującą się w kadłubie samolotu. Przewidziano pracę tej pompy przez około 2 sekundy. Po tym czasie ciśnienie i wydatek generowany przez pompę napędzaną przez silnik jest wystarczające dla zapewnienia poprawnej pracy. Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie symulacji przyspieszania silnika do wartości prędkości obrotowych określonych powyżej.

Przetastawione na wykresach (rysunek 5) przebiegi ciśnień podane są jako wartości względem ciśnienia atmosferycznego.

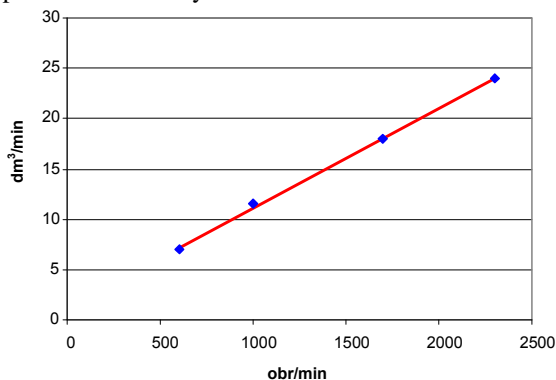




Rys. 5. Przykładowe zmiany parametrów w szynie wtryskowej w funkcji czasu podczas rozruchu silnika; 600 obr/min.

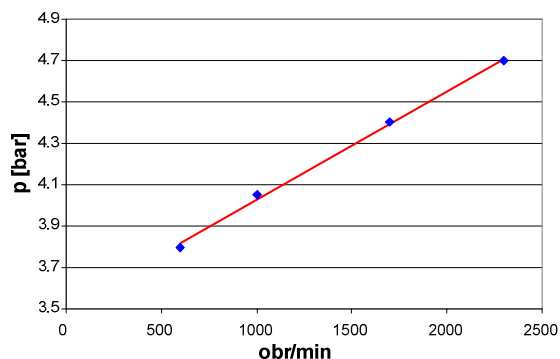
Fig. 5. Samples of changing the parameters in the fuel rail as a function of the time during a start-up - 600 rpm.

Na podstawie otrzymanych wyników badań opracowano zależność ciśnienia w układzie wtryskowym oraz zależność wydatku objętościowego paliwa od prędkości obrotowej silnika. Charakterystyki przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Zależność wydatku objętościowego paliwa od prędkości obrotowej silnika.

Fig. 6. Dependence of the fuel volumetric efficiency on rotational speed

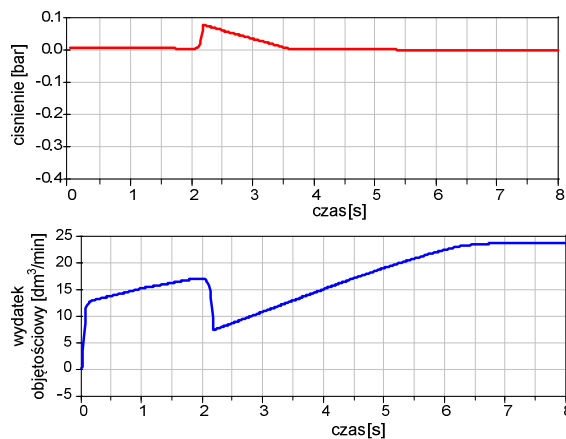


Rys. 7. Zależność ciśnienia paliwa od prędkości obrotowej silnika.

Fig. 7. Dependence of the fuel pressure on rotational speed.

Przepływ w zbiorniku rozchodowym

Paliwo krąży w obiegu zamkniętym, tj. powraca do zbiornika rozchodowego znajdującego się w kadłubie płatowca. Wykonano obliczenia umożliwiające określenie czy w tym elemencie nie wystąpią zaburzenia przepływu w postaci pulsacji ciśnienia lub pulsacji natężenia przepływu.



Rys. 8. Zmiana ciśnienia i wydatku objętościowego paliwa w zbiorniku rozchodowym w funkcji czasu podczas rozpędzania silnika do prędkości obrotowej 2300 obr/min.

Fig. 8. Change in the pressure and fuel volumetric efficiency in the day tank as a function of the time during running up the engine up to 2300 rpm

Przeprowadzone obliczenia wykazały poprawność zastosowanego rozwiązania. Zmiany ciśnienia paliwa w zbiorniku rozchodowym nie przekroczyły 0,1 bar. Natomiast wydatek objętościowy paliwa odpowiada wartościom otrzymanym podczas analizy przepływu przez szynę wtryskową.

6. Wnioski

Otrzymane wyniki badań modelowych przepływu paliwa w płatowcowej instalacji paliwowej pozwalają na następujące wnioski i uwagi:

- z charakterystyki pompy wynika, że wzrost ciśnienia wiąże się ze wzrostem natężenia przepływu. Zatem wzrost prędkości obrotowej pompy napędzanej bezpośrednio przez silnik (przełożenie 1:1) zapewni wymagane natężenie przepływu w całym zakresie obciążenia silnika. Jak wynika z badań modelu płatowcowej instalacji zmniejszenie przepływu paliwa wynikające z konstrukcji zastosowanego regulatora ciśnienia nie wpłynie niekorzystnie na parametry pracy wtryskiwaczy;
- badania wykazały, że magistrala powrotu paliwa połączona z ze zbiornikiem rozchodowym zapewni zrównoważony obieg paliwa w układzie;
- największe opory przepływu stawiają zagięcia i zwężenia przewodów, w których występują spiętrzenia prędkości;

- w symulacjach nie uwzględniono chropowatości gumowych przewodów mającej wpływ na opory przepływu.

Podsumowując, z uwagi na planowane zastosowanie mechanicznej pompy paliwa oraz na konieczność użycia przewodów o większej długości, przed przystąpieniem do budowy układu zasilania silnika badawczego należy starannie dobrać wymiary jego elementów. Pozwoli to na zminimalizowanie opo-

rów przepływu i na utrzymanie założonego wydatku pomp paliwa. Szczególną uwagę należy zwrócić na zwiększenie średnicy przewodów, przez które przepływa sumaryczny wydatek, zarówno po stronie ssącej jak i tłoczącej. Należy też unikać małych promieni zakrzywień przewodów oraz nagłych zmian średnic.

Bibliography/Literatura

- [1] K. Ahlin: Modelling of pressure waves in the Common Rail Diesel Injection System, LiTH-ISY-EX-3081, December 11, 2000,
- [2] Bergman B, Klefsjö B.: Kvalitet från behov till användning. 2nd edition, Studentlitteratur, 1995. In Swedish. Backlund G.
- [3] The Effects of Modelling Requirements in Early Phases of Buyer-Supplier Relations. Linköping Studies in Science
- [4] B. Lantto, H. Ellström, S. Steinkellner, M. Jareland: Simulation of fluid mechanical aircraft systems from concept evaluation to qualification tests, ICAS 2006.
- [5] Q. Hu, S. F. Wu, S. Stottler, R. Raghupathi: Modelling of dynamic responses of an automotive fuel rail system, part I: injector, Journal of Sound vibration 245(5), 801-814, 2001.
- [6] Q. Hu, S. F. Wu, S. Stottler, R. Raghupathi: Modelling of dynamic responses of an automotive fuel rail system, part II: entire system, Journal of Sound vibration 245(5), 815-834, 2001.
- [7] J. Czarnigowski, M. Wendeker, P. Jakliński., A. Nazarewicz, K. Pietrykowski, Gęca M. Gęca, T. Zyska: Model of injection system for SI radial aircraft engine, SAE Technical Paper Nr 2007-01-1903.
- [8] U. Iben, M. Voß, W. Bauer: Simulation of Cavitating Flow in Automotive Injection Systems, ANSYS Solutions, Zima 2005
- [9] M. Gęca, M. Wendeker, J. Czarnigowski, P. Jakliński, A. Nazarewicz, K. Pietrykowski, G. Barański: Test bed for aircraft injection system research, PTNSS CONGRESS-2007 P07-C149.
- [10] A. Nazarewicz, K. Pietrykowski, M. Wendeker, J. Czarnigowski, P. Jakliński, M. Gęca: CFD simulation research of the fuel rail of the aircraft radial engine, PTNSS CONGRESS-2007 P07-C150.
- [11] J. Z. Li, Ch. Treusch, B. Honel, S. Neyrat: Simulation of pressure pulsations in a gasoline injection system and development of an effective damping technology, SAE Technical Paper Nr 2005-01-1149.

Mr Mirosław Wendeker, Prof. DSc., Ph.DEng. – head of the Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion Systems, in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



Prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker – kierownik Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Mr Łukasz Grabowski, DEng, doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



Dr inż. Łukasz Grabowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej

Mr Rafał Sochaczewski, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



mgr inż. Rafał Sochaczewski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Mr Michał Gęca, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



mgr inż. Michał Gęca – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Mr Marcin Szlachetka, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



mgr inż. Marcin Szlachetka – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Mr Grzegorz Barański, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.



mgr inż. Grzegorz Barański – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.