SPIS TREŚCI

W skrócie 2
Od Redakcji 3

Nauka i Technika

Robert JAKUBOWSKI, Marek ORKISZ

Wpływ zmian sprawności procesów przepływowo-cieplnych w turbinowym silniku odrzutowym na jego charakterystyki użytkowe

How changes of thermal-flow process efficiencies in the turbojet engine influence on its work characteristics 4

Leszek PIASECZNY

Projektowanie zmiany posadowienia maszyn na podkładki odlane z polimeru na przykładzie mechanizmów siłowni okrętowej

Designing of power plant rechocking using a pourable polymer on example of ship's power plant 26

Mieczysław DZIUBIŃSKI

Koncepcja diagnostyki wyposażenia elektrycznego samochodu

Conception of car electric equipment diagnostics 39

Maria KONIECZNA, Marian SZARYCZ, Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI

Zmiany warunków suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego w przypadku utrzymywania stałej temperatury nagrzania nasion dla różnych poziomów mocy mikrofal i ich wpływ na jakość biologiczną nasion

Changes in conditions of microwave-convectional drying at constant temperature of heating and at different microwave power levels and their effect on biological quality of seeds 48

Jacek CZARNIGOWSKI, Paweł DROŹDZIEL, Paweł KORDOS

Charakterystyczne zakresy prędkości obrotowych wału korbowego podczas pracy silnika spalinowego w warunkach eksploatacji samochodu

Characteristic rotational speed ranges of a crankshaft during combustion engine operation at car maintenance 55

Jan BANASIAK, Jarzy BIENIEK, Jerzy DETYNA

Aktualne problemy użytkowania maszyn rolniczych

Current issues relating to the use of agricultural machinery 63

JAKUBOWSKI R., ORKISZ M.: **Wpływ zmian sprawności procesów przepływowo-cieplnych w turbinowym silniku odrzutowym na jego charakterystyki użytkowe;** EiN nr2/2002, s.4-25.

W pracy przedstawiono zastosowanie metody bilansu energetycznego do analizy konwersji energii w różnych rozwiązaniach przepływowych turbinowych silników odrzutowych. Dało to możliwość znalezienia relacji pomiędzy jakością procesów przepływowo-cieplnych występujących w zespołach składowych silnika, a całkowitą konwersją energii w silniku i jego parametrami użytkowymi tj.: ciągiem jednostkowym i jednostkowym zużyciem paliwa. Przedstawiono model obliczeniowy silnika, a wyniki obliczeń zaprezentowano w postaci wykresów i tabel. Wnioski wynikające z pracy odnoszą się do istoty doskonalenia procesów przepływowo-cieplnych zachodzących w silnikach lotniczych.

PIASECZNY L.: **Projektowanie zmiany posadowienia maszyn na podkładki odlane z polimeru na przykładzie mechanizmów siłowni okrętowej;** EiN nr 2/2002, s.26-38.

Przedstawiono wady posadawiania mechanizmów siłowni okrętowej na fundamentach przez sztywne podkładki stalowe i korzyści posadawiania ich przez odlewane na miejscu podkładki polimerowe. Na przykładzie siłowni okrętu projektu 206 przedstawiono projekt zamiany sztywnych podkładek stalowych na podkładki polimerowe przy posadawianiu mechanizmów na fundamentach.

DZIUBIŃSKI M.: **Koncepcja diagnostyki wyposażenia elektrycznego samochodu;** EiN nr 2/2002, s.39-47.

W artykule przedstawiono koncepcje diagnostyki funkcjonalnej alternatora, wykorzystującej procedury diagnostyczne. Opracowany układ badawczy umożliwia symulacje uszkodzeń i weryfikacje przydatności poszczególnych sygnałów do celów diagnostycznych.

KONIECZNA M., SZARYCZ M., JAŁOSZYŃSKI K.: **Zmiany warunków suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego w przypadku utrzymywania stałej temperatury nagrzania nasion dla różnych poziomów mocy mikrofal i ich wpływ na jakość biologiczną nasion;** EiN nr 2/2002, s.48-54.

Przedstawiono rzeczywiste czasy nagrzewania nasion bobiku do założonej temperatury 40±2°C podczas ich suszenia w polu mikrofal. W kolejnych doświadczeniach zastosowano różne poziomy mocy mikrofal (od 72 do 168W na 180 g nasion o wilgotności początkowej 20%). Temperatura powietrza wynosiła każdorazowo 35°C a jego prędkość przepływu 0,1m/s. Wyznacznikiem przydatności metody mikrofalowo-konwekcyjnej suszenia nasion była ocena wyników kiełkowania i rozwoju siewek.

CZARNIGOWSKI J., DROŹDZIEL P., KORDOS P.: **Charakterystyczne zakresy prędkości obrotowych wału korbowego podczas pracy silnika spalinowego w warunkach eksploatacji samochodu;** EiN nr 2/2002, s.55-62.

Badania empiryczne silników spalinowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów umożliwiają uzyskanie wielu informacji o ich pracy. Analiza posiadanych wyników pozwala na określenie skali obciążeń mechanicznych i cieplnych silnika w warunkach eksploatacji samochodu. Jest to szczególnie istotne przy ocenie trwałości i niezawodności silnika. Niniejszy artykuł prezentuje przeprowadzone badania samochodów LUBLIN oraz STAR. Przedstawiono w nim także analizę porównawczą uzyskanych wyników prędkości obrotowych wału korbowego trzech różnych silników: C22NED, 359M oraz 4CT90.

BANASIAK J., BIENIEK J., DETYNA J.: **Aktualne problemy użytkowania maszyn rolniczych;** EiN nr 2/2002, s.63-72.

W publikacji przedstawiono zagadnienia związane z ogólnie pojętym użytkowaniem maszyn w rolnictwie. Wskazano na ścisłe powiązania pomiędzy projektowaniem, konstruowaniem i eksploatacją obiektów. Pokrótce wspomniano o istotnej roli systemów satelitarnej nawigacji (GPS), a także o rozwijającej się elektronice i automatyce.

JAKUBOWSKI R., ORKISZ M.: **How changes of thermal-flow process efficiencies in the turbojet engine influence on its work characteristics;** EiN nr2/2002, s.4-25.

In the paper, the energy balance method has been applied to present energy cycle in the different types of turbojet engines. It gave a possibility to answer how the quality of the thermal-flow processes in the engine components influence the overall energy conversion in the jet engine and its work parameters i.e. the specific thrust and the specific fuel consumption. The mathematical model of the turbojet engine is presented. The results of simulation are shown as graphs and tables and are discussed. The principle conclusions of the analysis relate to essence of the improvement of turbojet engine inner processes.

PIASECZNY L.: **Designing of power plant rechocking using a pourable polymer on example of ship's power plant;** EiN nr 2/2002, s.26-38.

The disadvantages of rigid, steel chocking and the advantages of chocking with on site poured polymer of the marine plant machinery were presented. On example of the 206 ship project power plant the proposal for replacement of the rigid steel on polymer chocks for the machinery foundation were presented.

DZIUBIŃSKI M.: **Conception of car electric equipment diagnostics;** EiN nr 2/2002, s.39-47.

The conception of alternator functional diagnostics, making use of diagnostic procedures, is presented in the paper. The worked out test unit makes it possible to simulate faults and verify the usability of particular signals in diagnostics.

KONIECZNA M., SZARYCZ M., JAŁOSZYŃSKI K.: **Changes in conditions of microwave-convectional drying at constant temperature of heating and at different microwave power levels and their effect on biological quality of seeds;** EiN nr 2/2002, s.48-54.

The actual times in which broad bean seeds heat up to a temperature of 40±2°C during their drying in a microwave field are given. Different microwave power levels (in a range of 72-168 W for 180 g of seeds with an initial moisture content of 20%) were used in successive experiments. In each case, the air temperature was 35° and the air flow velocity - 0.1 m/s. The usefulness of the microwave-convectional method of drying seeds was determined by assessing seedling germination and development.

CZARNIGOWSKI J., DROŹDZIEL P., KORDOS P.: **Characteristic rotational speed ranges of a crankshaft during combustion engine operation at car maintenance;** EiN nr 2/2002, s.55-62.

The combustion engines' studies run at actual vehicle maintenance provide significant information on some parameters of their operation. The analysis of results makes it possible to determine the scale of mechanical and thermal load at car maintenance. The results of maintenance studies are regarded as very helpful in designing new and improving existing engine structures as well as systems presently used to control admission, combustion and exhaust processes. The paper presents the studies carried out on two truck types: LUBLIN and STAR. Rotational speeds of the crankshaft for three different engine types: C22NED, 359M and 4CT90 were also compared.

BANASIAK J., BIENIEK J., DETYNA J.: **Current issues relating to the use of agricultural machinery;** EiN nr 2/2002, s.63-72.

Issues connected with the use, in broad sense, of machines in agriculture are discussed. It is shown that there are close links between the design, construction and operation of machinery. The significant role of satellite navigation (GPS) and the advances in electronics and automation are touched upon.

Od Redakcji

W początku bieżącego roku kalendarzowego, czwartego już w historii kwartalnika "Eksploatacja i Niezawodność" miały miejsce dwie istotne zmiany uatrakcyjniające nasze wydawnictwo oraz zwiększające grono jego czytelników.

Pierwszą z nich jest rozpoczęcie notowania kwartalnika w bazie danych o zawartości polskich czasopism technicznych - BAZTECH. Baza ta, dostępna na stronie internetowej o adresie: http://baztech.icm.edu.pl/, tworzona jest przez 20 krajowych bibliotek akademickich dzięki dotacji Komitetu Badań Naukowych. Baza obejmuje polską literaturę z zakresu inżynierii, techniki oraz nauk ścisłych i ochrony środowiska (w wyborze). Zawiera opisy bibliograficzne wraz ze streszczeniami z około 250 tytułów począwszy od 1998 roku. BAZTECH rejestruje artykuły z wybranych czasopism, zeszytów naukowych oraz materiałów konferencyjnych z w/w wydawnictw. W bazie danych można wyszukiwać informacje o czasopismach (wg fragmentu tytułu lub wydawcy) oraz o artykułach z czasopism - wg słów z tytułu, słów kluczowych, nazwisk autorów, tytułu czasopisma, roku, typu i języka publikacji. W wyniku wyszukiwania wyświetlone zostają rekordy zawierające między innymi: opis bibliograficzny, miejsce zatrudnienia oraz e-mail pierwszego polskiego autora, informacje o czasopiśmie, język i typ dokumentu, streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz autorskie słowa kluczowe w obydwu językach - polskim i angielskim.

Aktualnie do bazy wprowadzane są pierwsze dane o publikacjach w "Eksploatacja i Niezawodność" z roku 1999. Mamy nadzieję, że do końca czerwca 2002 roku w BAZTECH znajdą się już rekordy dotyczące wszystkich artykułów recenzowanych, jakie dotychczas ukazały się w naszym kwartalniku. W momencie ukazanie się każdego nowego numeru odpowiadające mu dane na bieżąco będą przekazywane do bazy danych.

BAZTECH to nie jedyna możliwość wyszukiwania informacji o pracach opublikowanych w kwartalniku "Eksploatacja i Niezawodność". Drugą z nich jest nasza własna strona internetowa, znajdująca się pod adresem: http://archimedes.pol.lublin.pl/~ein/.

Na stronie tej można znaleźć wszystkie podstawowe informacje dotyczące kwartalnika - skład Rady Naukowej i redakcji, adres kontaktowy, wymagania dla autorów zgłaszających swoje prace do druku oraz informacje dla zainteresowanych stałych prenumeratą. W odrębnym menu znajduje się zestawienie wszystkich numerów wydanych w poszczególnych latach wraz z dwujęzycznym spisem treści oraz streszczeniami wszystkich artykułów.

A zatem, serdecznie zapraszamy do lektury bieżącego numeru oraz do stałego korzystania z danych zawartych w bazie BAZTECH oraz na naszej stronie internetowej.

Dr inż. Dariusz Mazurkiewicz
Redaktor naczelny

NAUKA I TECHNIKA

Robert JAKUBOWSKI
Marek ORKISZ

WPŁYW ZMIAN SPRAWNOŚCI PROCESÓW PRZEPŁYWOWO-CIEPLNYCH W TURBINOWYM SILNIKU ODRZUTOWYM NA JEGO CHARAKTERYSTYKI UŻYTKOWE

HOW CHANGES OF THERMAL-FLOW PROCESS EFFICIENCIES IN THE TURBOJET ENGINE INFLUENCE ON ITS WORK CHARACTERISTICS

W pracy przedstawiono zastosowanie metody bilansu energetycznego do analizy konwersji energii w różnych rozwiązaniach przepływowych turbinowych silników odrzutowych. Dało to możliwość znalezienia relacji pomiędzy jakością procesów przepływowo-cieplnych występujących w zespołach składowych silnika, a całkowitą konwersją energii w silniku i jego parametrami użytkowymi tj.: ciągiem jednostkowym i jednostkowym zużyciem paliwa. Przedstawiono model obliczeniowy silnika, a wyniki obliczeń zaprezentowano w postaci wykresów i tabel. Wnioski wynikające z pracy odnoszą się do istoty doskonalenia procesów przepływowo-cieplnych zachodzących w silnikach lotniczych.

Słowa kluczowe: turbinowe silniki odrzutowe, bilans energetyczny, współpraca zespołów konstrukcyjnych, parametry pracy.

In the paper, the energy balance method has been applied to present energy cycle in the different types of turbojet engines. It gave a possibility to answer how the quality of the thermal-flow processes in the engine components influence the overall energy conversion in the jet engine and its work parameters i.e. the specific thrust and the specific fuel consumption. The mathematical model of the turbojet engine is presented. The results of simulation are shown as graphs and tables and are discussed. The principle conclusions of the analysis relate to essence of the improvement of turbojet engine inner processes.

Keywords: turbojet engines, energy cycle, cooperation the components share, work parameters.

1. Wstęp

Doskonalenie konstrukcji turbinowych silników odrzutowych w celu poprawy ich właściwości użytkowych przebiega w różnych kierunkach, z których najważniejsze to: opracowywanie nowych form konstrukcyjnych (silniki dwuprzepływowe, typu propfan, czy też „silniki o zmiennym obiegu termodynamicz-

1. Introduction

The improvement of turbojet engines goes in different directions. The main of them are: designing of new engine forms ("by-pass" engines, prop fan engines, variable cycle engines and variable stream control engines), optimisation of the engine thermodynamic cycle (the increase in compressor pres-

nym"), dobór optymalnych parametrów termodynamicznych obiegu silnika (wzrost temperatury przed turbiną i towarzyszący mu wzrost sprężu sprężarki), czy też doskonalenie poszczególnych zespołów konstrukcyjnych, w celu poprawy zachodzących w nim procesów przepływowo-cieplnych.

O ile zagadnieniom związanym z rozwojem konstrukcji oraz doborem optymalnych parametrów pracy silnika poświęconych jest wiele pozycji literaturowych np. [2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13], o tyle ocena wpływu zmiany sprawności procesów przepływowo-cieplnych na parametry użytkowe silnika jest prezentowana sporadycznie i w postaci nie do końca wyczerpującej. Poprawa jakości procesów w zespołach silników lotniczych przyczynia się do podwyższenia parametrów użytkowych silnika, o czym jest mowa m.in. w [5, 7, 9]. Brakuje jednak szerszego omówienia, jak na te zależności wpływają warunki lotu czy też konstrukcyjne i przepływowe formy silnika.

Stąd też niniejsza praca poświęcona jest analizie wpływu zamiany sprawności procesów przepływowo-cieplnych w poszczególnych zespołach silnika na jego parametry użytkowe, takie jak ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa. Przeprowadzono ją w oparciu o metodę bilansu energetycznego, a jakość procesów przepływowo-cieplnych uwzględniono poprzez odpowiednie wskaźniki.

2. Bilans energetyczny silnika

Bilans energetyczny silnika [14,15,16] pozwala związać przemiany energetyczne zachodzące w zespołach składowych silnika z całkowitą konwersją energii w silniku, stąd też jest to metoda bardzo użyteczna przy ocenie wpływu jakości procesów przepływowo-cieplnych w kanałach silnika na jego parametry użytkowe. Szczególnie wygodne w interpretacji jest graficzne zobrazowanie bilansu energetycznego za pomocą wykresu Sankey'a. Wadą tej interpretacji jest jednak to, że pozwala na przedstawienie zależności energetycznych jedynie dla pojedynczego punktu pracy silnika. Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcyjny silnika z odpowiadającym mu wykresem Sankey'a, na którym zaznaczono stosowany w teorii silników lotniczych podział silnika na dwa urządzenia [2, 3, 4, 13] (por. rys. 1):

- **„silnik cieplny"**, którego zadaniem jest zamiana ciepła dostarczonego do strumienia przepływającego powietrza na przyrost energii kinetycznej strumienia spalin i powietrza,
- **„silnik napędowy",** którego zadaniem jest zamiana przyrostu energii kinetycznej strumienia powietrza i spalin na pracę użyteczną ciągu.

sure ratio connected with the temperature rise in the combustor) and the improvement of jet engine components to decrease losses.

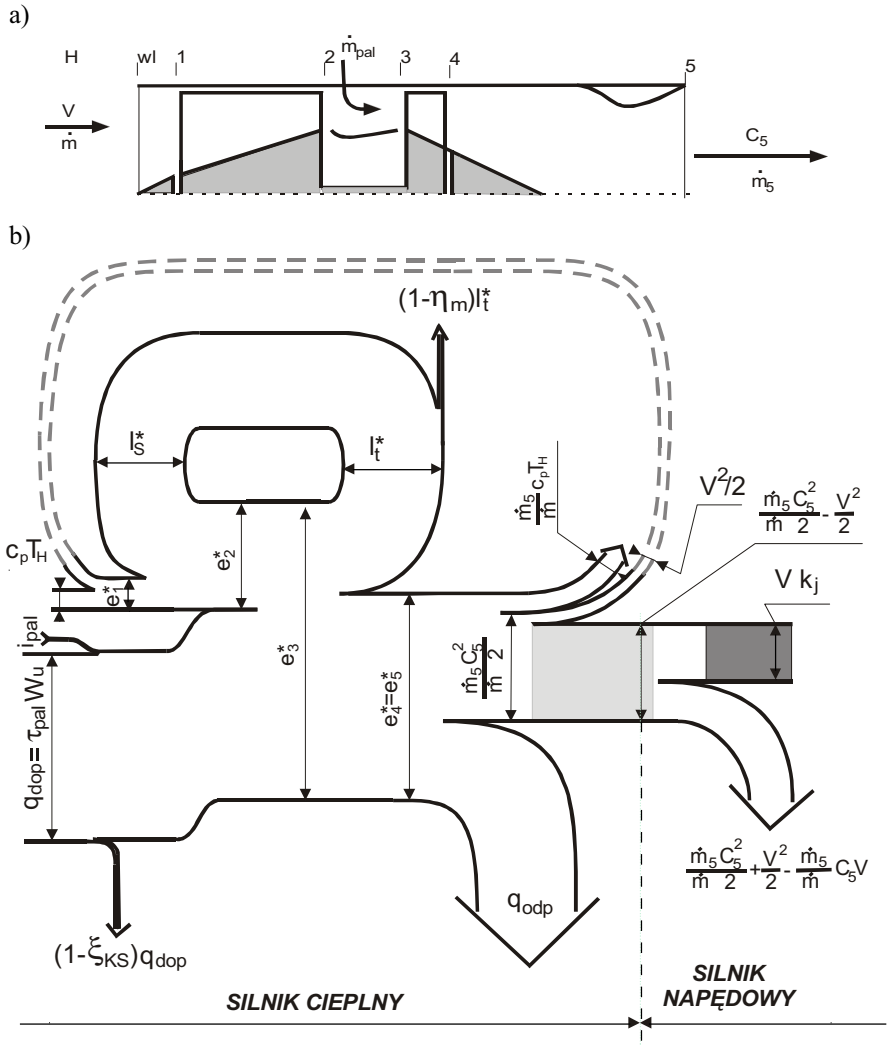
There are many papers, which involve the optimisation processes and ways of the jet engine improvement [2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13], but there are only a few papers, where the influence of the thermal-flow process efficiency on the jet engine characteristics is described. An increase in the jet engine inner processes efficiency raises overall engine efficiency, and its work parameters [5, 7, 9], but how it depends on the flight speed and the turbojet engine form isn't present in detail.

The purpose of this paper is to present the energy balance of different types of turbojet engines and how the quality of the jet engine inner processes influences on the specific thrust and specific fuel consumption. The energy balance method is used for the analysis. The quality of the thermal-flow processes is described by the proper quality coefficients.

2. Energy balance of the turbojet engine

The energy balance [14, 15, 16] connects the energy processes inside the turbojet engine with the overall energy conversion in the engine. Therefore, it is a very useful method to estimate how the quality of the thermal-flow inner processes of the engine influence its work characteristics. The graphical presentation of this method – Sankey diagram is more comfortable for interpretation, but the disadvantage of it is that it shows the single point of the jet engine work only. Figure 1 shows the turbojet engine diagram and Sankey diagram, where the engine division into two sections [2, 3, 4, 13] is presented:

- **"thermal engine"** – the heat of fuel is changed into kinetic energy of the exhaust stream,
- **"propulsive engine"** – the kinetic energy of the exhaust stream is changed into useful work of vehicle power.



Rys. 1. Bilans energetyczny silnika jednoprzepływowego a) schemat konstrukcyjny, b) wykres Sankey'a
Fig. 1. Energy balance of the turbojet engine a) schematic diagram, b) Sankey diagram

W konsekwencji wyżej przedstawionego podziału, efektywność pracy poszczególnych „silników" oceniana jest przez sprawności [2, 3, 4, 13]:

sprawność cieplną:

$$\text{def.}\quad \eta_c = \frac{\dot{m}_5 c_5^2 - \dot{m} V^2}{2\dot{m} q_{dop}} \tag{1}$$

gdzie:

$$q_{dop} = \frac{\dot{m}_{pal}}{\dot{m}} Wu = \tau_{pal} \cdot Wu \tag{2}$$

sprawność napędową:

$$\text{def.}\quad \eta_k = \frac{2 \cdot V \cdot k_j \cdot \dot{m}}{\dot{m}_5 c_5^2 - \dot{m} V^2} \tag{3}$$

The action of this "engine" is characterised by proper efficiency [2, 3, 4, 13]:

thermal efficiency:

$$\text{def.}\quad \eta_{th} = \frac{\dot{m}_5 c_5^2 - \dot{m} V^2}{2\dot{m} q_{in}} \tag{1}$$

where:

$$q_{in} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} Wu = \tau_f \cdot Wu \tag{2}$$

propulsive efficiency:

$$\text{def.}\quad \eta_p = \frac{2 \cdot V \cdot k_j \cdot \dot{m}}{\dot{m}_5 c_5^2 - \dot{m} V^2} \tag{3}$$

i *sprawność ogólną*, która ocenia efektywność przemian energetycznych w całym silniku:

$$\text{def. } \eta_o = \frac{V \cdot k_j}{q_{dop}} \tag{4}$$

Na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 1 bilans energetyczny „silnika cieplnego" można opisać zależnością:

$$q_{in} = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2} + q_{out} + \left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} - 1 \right) c_p T_H - i_f + (1 - \eta_m) l_t^* + (1 - \xi_B) q_B \tag{5}$$

Wynika z niej, że ciepło doprowadzone w paliwie do silnika wykorzystywane jest na: przyrost energii kinetycznej strumienia $\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2}$, wytworzenie pracy mechanicznej niezbędnej do napędu agregatów silnikowych oraz pokonanie oporów tarcia wirnika $(1-\eta_m) l_t^*$. Pozostała część ciepła jest tracona: w wyniku niedoskonałości procesu spalania $(1-\xi_{ks}) q_{dop}$ z odprowadzanymi spalinami o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia q_{odp} oraz z uwagi na różnicę pomiędzy entalpiami statycznymi odprowadzonych z silnika i doprowadzonych do silnika czynników po osiągnięciu przez nie temperatury otoczenia $\left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} - 1 \right) c_p T_H - i_{pal}$.

Z bilansu energii dla „silnika napędowego" otrzymuje się zależność:

$$\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2} = V \left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} c_5 - V \right) + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} + V^2 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} c_5 V = V \cdot k_j + str_{sil_nap} \tag{6}$$

która pozwala na znalezienie relacji między procesami energetycznymi w silniku, a ciągiem, bądź też ciągiem jednostkowym silnika. Znajomość ciągu pozwala na określenie jednostkowego zużycia paliwa z następującej relacji:

$$c_j = \frac{\dot{m}_{pal}}{K} = \frac{\tau_{pal}}{k_j} \tag{7}$$

W silniku dwuprzepływowym z mieszalnikiem zależności opisujące procesy wewnętrzne w silniku znacząco różnią się od silnika jednoprzepływowego,

overall efficiency:

$$\text{def. } \eta_o = \frac{V \cdot k_j}{q_{in}} \tag{4}$$

Figure 1 shows that energy balance of the "thermal engine" is described by the equation:

The heat delivered to the engine is used to change the kinetic energy of the stream $\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2}$, to make mechanical work drive the jet engine aggregates and to overcome the friction resistance $(1-\eta_m) l_t^*$. Another part of the heat supplied to the engine is lost: by the irreversibility of the combustion process $(1-\xi_B) q_B$, by the heat removed with exhaust fumes q_{out} and by the difference of static enthalpy between supplies mediums and exit products $\left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} - 1 \right) c_p T_H - i_f$.

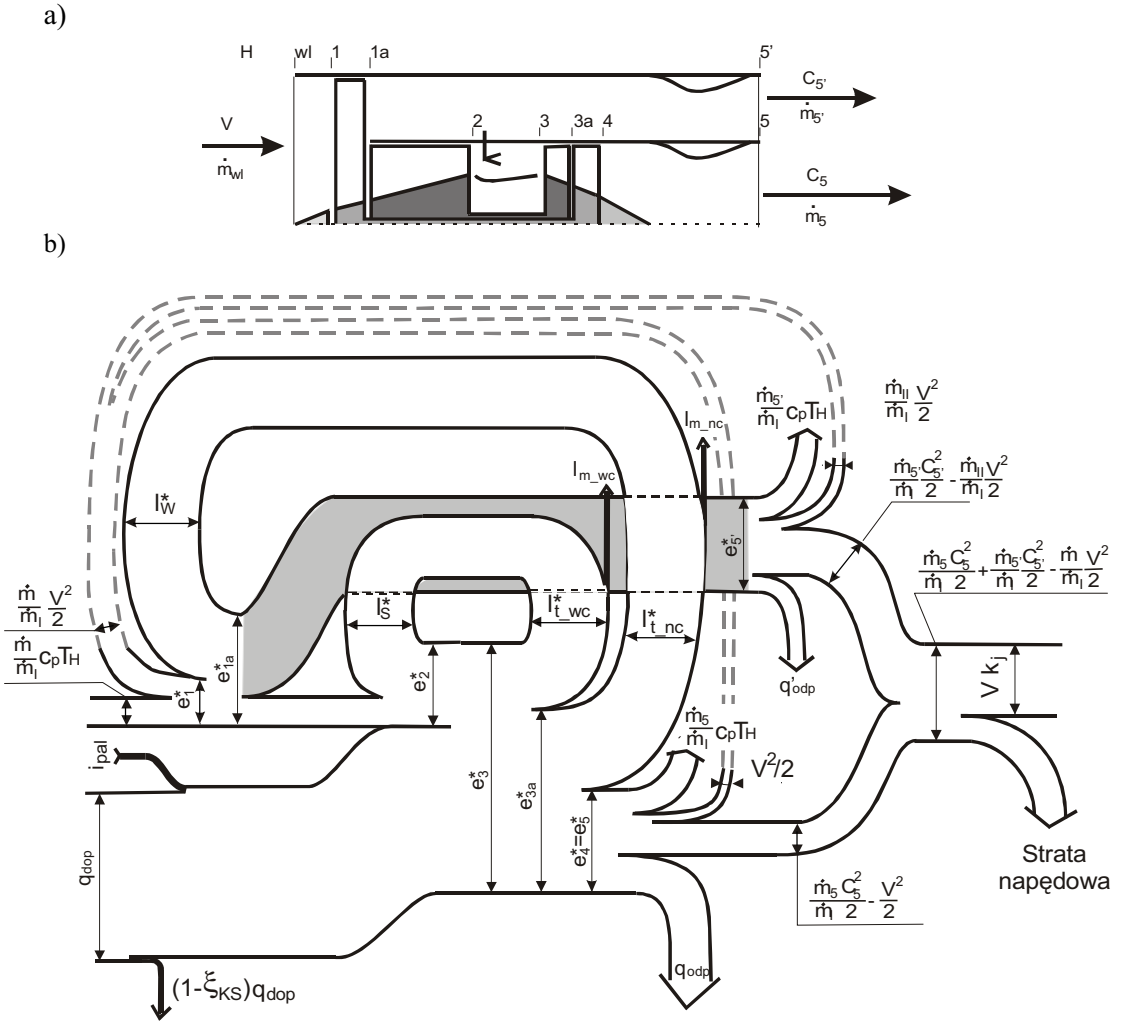
From energy balance for the "propulsive engine" is:

$$\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} - \frac{V^2}{2} = V \left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} c_5 - V \right) + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} \frac{c_5^2}{2} + V^2 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} c_5 V = V \cdot k_j + loss_{prop_engine} \tag{6}$$

This equation gives a possibility to find the relation among the energy processes in the turbojet engine and its thrust or specific thrust, which are used to determine the specific fuel consumption:

$$c_j = \frac{\dot{m}_f}{K} = \frac{\tau_f}{k_j} \tag{7}$$

The relations describing inner processes in the turbofan engine with mixed exhaust streams differ from the relations for the turbojet engine. Nevertheless, the



Rys. 2. Bilans energetyczny silnika dwuprzepływowego a) schemat konstrukcyjny, b) wykres Sankey'a

Fig. 2. Energy balance of the turbofan engine wit separate exhaust streams a) schematic diagram; b) Sankey diagram

mimo to formuła opisująca bilans energetyczny całego silnika jest podobna. Różnice wynikają z liczby wirników oraz uwzględnienia wielkości strumienia przepływającego w kanale wewnętrznym i zewnętrznym silnika. Bilans energetyczny dla dwuprzepływowego „silnika cieplnego" z mieszalnikiem przedstawia zależność:

equations describing the energy balance of whole engine are similar. The differences come from the amount of spools and bypass ratio. The energy balance for the "thermal engine" of the turbofan engine with mixing exhaust streams is described:

$$q_{in} = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}\frac{c_5^2}{2} - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_I}\frac{V^2}{2} + q_{out} + \left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I} - 1\right) c_p T_H - i_f + (1-\eta_{mHP}) l_{tHP}^* + (1-\eta_{mLP}) l_{tLP}^* + (1-\xi_B) q_B \tag{8}$$

W silniku dwuprzepływowym z osobnymi dyszami wylotowymi równanie bilansu jest bardziej złożone. Wynika to stąd, że na całkowitą konwersję energii w silniku ma wpływ czynnik wypływający przez

The energy balance equations, for the turbofan engine with separate exhaust streams, are more complicated than discussed earlier. It follows from the fact that overall energy conversion depends on the inner

zewnętrzną i wewnętrzną dyszę wylotową, co przedstawiono na rys. 2. Wówczas równanie bilansu energetycznego „silnika cieplnego" jest opisane związkiem:

and outer exhaust streams, as it is shown in fig. 2. From here the energy balance equation for the "thermal engine" is described:

$$q_{in} = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}\frac{c_5^2}{2} + \frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I}\frac{c_{5'}^2}{2} - \frac{\dot{m}}{\dot{m}_I}\frac{V^2}{2} + q_{out} + q'_{out} + \left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I} + \frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I} - 1\right)c_p T_H - i_f + (1-\eta_{mHP})l^*_{tHP} + (1-\eta_{mLP})l^*_{tLP} + (1-\xi_B)q_B \tag{9}$$

a równanie bilansu energetycznego „silnika napędowego" ma postać:

and the equation for the "propulsive engine" is:

$$\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}\frac{c_5^2}{2} + \frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I}\frac{c_{5'}^2}{2} - \frac{\dot{m}_{II}}{\dot{m}_I}\frac{V^2}{2} = V\left(\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}c_5 - V\right) + \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}\frac{c_5^2}{2} + V^2 - \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_I}c_5 V + V\left(\frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I}c_5 - \frac{\dot{m}_{II}}{\dot{m}_I}V\right) + \frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I}\frac{c_{5'}^2}{2} + \frac{\dot{m}_{II}}{\dot{m}_I}V^2 - \frac{\dot{m}_{5'}}{\dot{m}_I}c_{5'}V = V\cdot\frac{K_I}{\dot{m}_I} + loss_{prop_engine} + V\cdot\frac{K_{II}}{\dot{m}_I} + loss'_{prop_engine} \tag{10}$$

Zależności opisujące odpowiednie sprawności silnika dwuprzepływowego z osobnymi dyszami wylotowymi różnią się od podanych we wzorach: (1), (3) i (4) tym, że uwzględnia się w nich ciąg całkowity silnika oraz sumę zmian energii kinetycznej strumienia w obydwu kanałach, stąd [3, 4, 13]:

The relations describing efficiencies of the turbofan engine without mixing exhaust streams differ from equation (1), (3), (4). It is caused by the energy conversion and the thrust production by two separated nozzles [3, 4, 13]. From here:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_5 c_5^2 + \dot{m}_{5'} c_{5'}^2 - \dot{m}V^2}{2\dot{m}_I q_{dop}}$$
$$\eta_k = \frac{2\cdot V\cdot K}{\dot{m}_5 c_5^2 + \dot{m}_{5'} c_{5'}^2 - \dot{m}V^2} \tag{11}$$
$$\eta_o = \frac{V\cdot K}{m_I\cdot q_{dop}}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_5 c_5^2 + \dot{m}_{5'} c_{5'}^2 - \dot{m}V^2}{2\dot{m}_I q_{in}}$$
$$\eta_p = \frac{2\cdot V\cdot K}{\dot{m}_5 c_5^2 + \dot{m}_{5'} c_{5'}^2 - \dot{m}V^2} \tag{11}$$
$$\eta_o = \frac{V\cdot K}{m_I\cdot q_{in}}$$

Jeżeli dysza wylotowa nie pozwala na całkowity rozprężwypływającego przez nią strumienia, w bilansie energetycznym uwzględnia się oddziaływanie ciśnienia statycznego na przekrój wylotowy dyszy. W tym przypadku wygodne jest posługiwanie się prędkością wypływającego czynnika po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia poza silnikiem [6, 7]. Wynika to z analizy modelu rozszerzonego o strefę rozprężania się czynnika poza dyszą wylotową. Zależność na ciąg jednostkowy ma wtedy postać:

If the stream decompression to the ambient pressure isn't possible in the exhaust nozzle, the static pressure reaction to the exhaust area is taken into account. Therefore, it is more comfortable to use a stream speed after the decompression to the ambient pressure outside the engine nozzle c_{5H} [6, 7] in the energy balance method. It results from the fact that the area where the stream decompresses outside the engine is considered. The thrust equation can be written:

$$k_j = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}}c_{5H} - V \tag{12}$$

gdzie prędkość spalin c_{5H} po ich zupełnym rozprężeniu poza przekrojem dyszy wylotowej do ciśnienia otoczenia wyraża zależność:

$$k_j = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}}c_{5H} - V \tag{12}$$

where, c_{5H} – the speed of the exhaust stream after the decompression to the ambient pressure outside the engine nozzle. It is described by en equation:

$$c_{5H} = c_5 + \frac{(p_5 - p_H)A_5}{\dot{m}_{spal}} \qquad (13)$$

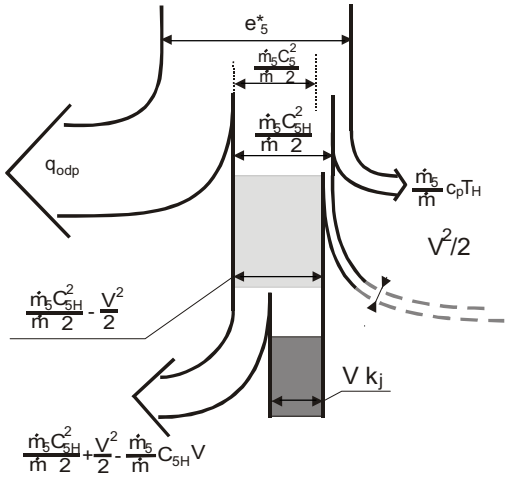
Prędkość c_{5H} zgodnie z zależnością (13) jest sumą prędkości strumienia w przekroju wyjściowym z dyszy i przyrostu jednostkowej energii kinetycznej wynikającej z różnicy ciśnień statycznych działających na przekroje kontrolne silnika (H i 5).

Wykres bilansu energii w dyszy wylotowej silnika o niezupełnym rozprężu spalin przedstawiono na rys. 3. Szerokości gałęzi wykresu związane z prędkościami c_5 i c_{5H} nie są sobie równe, a różnica między nimi powiększa się ze wzrostem różnicy ciśnienia w dyszy wylotowej p_5 i ciśnienia otoczenia p_H. Wynika to stąd, że strumień spalin po wyjściu z dyszy na skutek różnicy ciśnień podlega dalszemu rozprężaniu, czemu towarzyszy wzrost prędkości. Ostatecznie siła wynikająca z prędkości spalin po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia c_{5H} i ich ilości $\dot{m}_5$ oddziałuje na silnik powodując powstawanie ciągu. Stąd też w silniku o niezupełnym rozprężu spalin w dyszy wylotowej definicje poszczególnych sprawności silnika, zamiast prędkości w przekroju wyjściowym dyszy wylotowej, uwzględniają prędkość po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia [6, 7].

$$c_{5H} = c_5 + \frac{(p_5 - p_H)A_5}{\dot{m}_5} \qquad (13)$$

According to the equation (13), the speed c_{5H} equals the sum of the speed in the nozzle exit area and the increase in the specific kinetic energy caused by the difference of the static pressure in the engine station numbers 5 and H.

The diagram of the energy balance for the turbojet engine with the choked nozzle is shown in fig. 3. The widths of diagram branches, which are connected with speed c5 and c5H, aren't equal. The difference among them increases while the difference between the static pressure in the engine exit p_5 and the ambient pressure p_H rises. That is because the stream decompresses outside the exhaust nozzle until it achieves the ambient pressure. The stream speed increases during this process. The force, associated with the stream speed after decompression to the ambient pressure and its amount, acts on the turbojet engine. From that, the thrust and efficiency equations contain the speed after decompression to the ambient pressure instead of the speed in the exhaust nozzle [6, 7].



Rys. 3. Końcowa gałąź wykresu Sankey'a dla silnika o niezupełnym rozprężu w dyszy wylotowej
Fig. 3. Ending branch of Sankey diagram for engine with choked nozzle

Zastosowanie w silniku dopalacza, który umożliwia chwilowe zwiększenie ciągu modyfikuje bilans energetyczny silnika [7]. Paliwo do silnika doprowadzane jest do komory spalania oraz do dopalacza, stąd ciepło doprowadzane do silnika jest równe sumie ciepła doprowadzonego w obydwu jego zespołach konstrukcyjnych:

$$q_{dop} = q_{KS} + q_{dopal} \qquad (14)$$

The afterburner is used to increase a thrust level in the turbojet engine. That modifies the energy balance of the engine [7], because the heat and fuel are supplied into the engine in the combustor and the afterburner. Therefore, the overall heat is equal:

$$q_{in} = q_B + q_{AB} \qquad (14)$$

Wielkość ta jest podstawą do oceny jednostkowego zużycia paliwa oraz sprawności cieplnej i ogólnej silnika wyposażonego w dopalacz.

3. Model matematyczny silnika

W celu prowadzenia analizy parametrów pracy silnika w szerokim zakresie zmian jego parametrów termodynamicznych, w oparciu o metodę bilansu energetycznego, został zbudowany model obliczeniowy, w którym energię strumienia w poszczególnych przekrojach silnika uzależniono od warunków lotu (prędkości i wysokości) oraz cech konstrukcyjnych silnika (sprężu, temperatury przed turbiną, rodzaju dyszy wylotowej, stopnia dwuprzepływowości – dla silnika dwuprzepływowego) oraz wektora wskaźników jakości procesów przepływowo-cieplnych. Wskaźniki te w postaci wektorowej są opisane związkami:

dla silnika jednoprzepływowego:

$$[\eta] = \left[\sigma_{inl}, \sigma_B, \sigma_{AB}, \sigma_N(\phi_N), \eta^*_{C_LP}, \eta^*_{C_HP}, \eta^*_{t_HP}, \eta^*_{t_LP}, \eta_{m_HP}, \eta_{m_LP}, \xi_B, \xi_{AB}\right] \tag{15}$$

dla silnika dwuprzepływowego:

$$[\eta] = \left[\sigma_{inl}, \sigma_B, \sigma_{outer_duct}, \sigma_{AB}, \sigma_{MIX}(\eta_{MIX}), \sigma_N(\phi_N), \sigma_{N'}(\phi_{N'}), \eta^*_F, \eta^*_{C_LP}, \eta^*_{C_HP}, \eta^*_{t_HP}, \eta^*_{t_MP}, \eta^*_{t_LP}, \eta_m, \xi_B, \xi_{AB}\right] \tag{16}$$

Energię strumienia przepływającego przez poszczególne przekroje silnika (patrz rys. 1-3) można zapisać w postaci

$$e^* = f\left(\text{warunki lotu, cechy konstrukcyjne silnika, } [\eta]\right) \tag{17}$$

Pozwala to na rozszerzenie zakresu analizy silnika metodą bilansu energetycznego na więcej niż jeden punkt pracy.

W prezentowanych dalej obliczeniach wykorzystano uproszczony opis czynnika roboczego przedstawiony w [1, 11].

4. Wyniki badań

Przeprowadzone badania, którymi objęto różne rozwiązania konstrukcyjne silników lotniczych, polegały na określeniu wpływu zmiany wybranego wskaźnika określającego jakość procesu przepływowo-cieplnego na badane parametry pracy silnika. W celu umożliwienia porównania uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wielkości względnych przez odniesienie ich do wartości dla przyjętego wstępnie silnika (tab. 1).

It is used for evaluating the specific fuel consumption and thermal and overall efficiency of the turbojet engine with the afterburner.

3. The mathematical model of the turbojet engine

The mathematical model of the turbojet engine was based on the energy balance method. The energy of the stream in the engine stations depends on the flight condition (i.e. the altitude and the flight speed), the engine design features (i.e. the compressor pressure ratio, the inlet turbine temperature, the type of the exhaust nozzle, the bypass ratio – for a turbofan engine) and thermal-flow processes quality coefficients. Those coefficients are shown below as vector:

for turbojet engine:

$$[\eta] = \left[\sigma_{inl}, \sigma_B, \sigma_{AB}, \sigma_N(\phi_N), \eta^*_{C_LP}, \eta^*_{C_HP}, \eta^*_{t_HP}, \eta^*_{t_LP}, \eta_{m_HP}, \eta_{m_LP}, \xi_B, \xi_{AB}\right] \tag{15}$$

for turbofan engine:

$$[\eta] = \left[\sigma_{inl}, \sigma_B, \sigma_{outer_duct}, \sigma_{AB}, \sigma_{MIX}(\eta_{MIX}), \sigma_N(\phi_N), \sigma_{N'}(\phi_{N'}), \eta^*_F, \eta^*_{C_LP}, \eta^*_{C_HP}, \eta^*_{t_HP}, \eta^*_{t_MP}, \eta^*_{t_LP}, \eta_m, \xi_B, \xi_{AB}\right] \tag{16}$$

The stream energy in the engine stations is described by the formula:

$$e^* = f\left(\text{flight condition, designe features of the turbojet engine, } [\eta]\right) \tag{17}$$

Such an approach to the task permits to extend the range of the method application to more than a single point calculation only.

The gas model described in [1, 11], was used in the analysis.

4. The results of the analysis

The research has been conducted for different types of the turbojet engines. During that, the influence of single coefficients of processes qualities on the turbojet engine work parameters was studied. The results are presented as values related to the preliminarily chosen parameters (tab. 1).

4.1. Wpływ jakości procesów przepływowo-cieplnych w zespołach silnika na bilans energetyczny

Straty mechaniczne i wynikające z niezupełności spalania są wyraźnie uwidocznione na wykresie bilansu energetycznego silnika, natomiast straty wynikające z niedoskonałości procesów w pozostałych zespołach silnika nie są bezpośrednio widoczne na wykresie bilansu energetycznego. Kumulują się one w ilości ciepła odprowadzonego do otoczenia ze spalinami, co przedstawiono w tabeli 2, na podstawie symulacji zmiany bilansu energetycznego spowodowanej uwzględnieniem nieidealności procesu zachodzącego w wybranym zespole silnika w porównaniu z silnikiem idealnym.

Przytoczone wyniki wskazują, że:

- Zmiana współczynników strat ciśnienia w poszczególnych podzespołach silnika oraz zmiana sprawności turbiny nie powodują istotnych zmian w wewnętrznym przepływie energii silnika, prowadzą natomiast do zmiany w ilości energii odprowadzonej z silnika w postaci gorących spalin i zmiany energii kinetycznej strumienia (wzrost

4.1. The influence of thermal-flow processes in the turbojet engine components on the energy balance

Some losses in the turbojet engine are easy visible on the energy balance diagram (see fig 1, 2). Those are the power transmission losses and losses coming from the imperfection of combustion. The other losses aren't so evident on the Sankey diagram. They are cumulated in the heat removed from the engine to the environment (see tab. 2).

The results in tab. 2 indicate that:

- Changes of the total pressure losses coefficients in the turbojet engine components and the change of the turbine efficiency don't change the inner energy of the turbojet engine, but they increase the amount of energy removed from the engine as hot fumes. The kinetic energy of

Tab. 1. Parametry termodynamiczne pracy silnika i wartości wskaźników jakości dla przyjętego wstępnie silnika

Tab. 1. The preliminarily chosen thermodynamic parameters and process quality parameters

	Turbojet engine		Turbofan engine	
	one-shaft	two-shaft	$\mu = 1$	$\mu = 6$
T_3^*	1450 K		1600 K	
T_{AB}^*	2000	-	-	
$\pi_C^* (\pi_{C_HP}^*)$	15	4	8	15
$\pi_F^* (\pi_{C_LP}^*)$	-	4	2,5	1,5
σ_{inl}	0,98 for Ma≤0.8; 0,96 for 0.8<Ma>1,4; 0,94 for 1.4≤Ma			
$\eta_F^* (\eta_{C_LP}^*)$	-	0,87	0,88	0,89
$\eta_C^* (\eta_{C_HP}^*)$	0,86	0,87	0,86	0,86
σ_B	0,98			
ξ_B	0,985			
$\eta_t^* (\eta_{t_HP}^*)$	0,89	0,88	0,89	0,89
$\eta_{t_LP}^*$	-	0,88	0,89	0,89
η_{m_LP}, η_{m_HP}	0,99			
σ_N	0,97		0,98	
$\sigma_{N'}$	-		0,97	
σ_{AB}	0,98	-	-	
ξ_{AB}	0,97	-	-	

Tab. 2. Zestawienie energii strumienia w poszczególnych przekrojach kontrolnych silnika jednoprzepływowego w [kJs/kg] dla silnika idealnego i z uwzględnieniem strat w poszczególnych jego podzespołach konstrukcyjnych. Oznaczenia w tabeli: e - ennergia statyczna, e - energia spiętrzenia, l* - praca, ek - energia kinetyczna, q - ciepło, Δ - zmiana, indeksy dolne zgodnie z rys.1.*

Tab. 2. The comparison of the stream energy in the turbojet engine station [kJs/kg] for the ideal and nonideal turbojet engine. Table denotation: e - static energy, e - total energy, l* - specific work, ek - kinetic energy, q - heat, Δ - change, subscript according to fig. 1*

	ideal engine	σ_{inl}=0.97	η_C=0.89	σ_B=0.98	ξ_B=0.985	η_t=0.91	σ_N=0.98	η_m=0.99
e_{inl}	217,6	217,6	217,6	217,6	217,6	217,6	217,6	217,6
ek_{inl}	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9
e_{inl}*	315,5	315,5	315,5	315,5	315,5	315,5	315,5	315,5
l_C*	427	427	479,8	427	427	427	427	427
e_2*	742,5	742,5	795,3	742,5	742,5	742,5	742,5	742,5
q_{in}	1104,8	1104,8	1049,7	1104,8	1122,4	1104,8	1104,8	1104,8
q_{in_r}	1104,8	1104,8	1049,7	1104,8	1105,6	1104,8	1104,8	1104,8
e_3*	1847,3	1847,3	1845	1847,3	1848,1	1847,3	1847,3	1847,3
l_t*	427	427	479,8	427	427	427	427	431,4
e_4*	1420,3	1420,3	1365,2	1420,3	1421,1	1420,3	1420,3	1416
l_m	0	0	0	0	0	0	0	4,3
q_{out}	412,9	417,7	412,4	416,1	413,1	432,4	416,1	412,9
ek_N	784,1	779,3	729,8	780,9	784,6	764,6	780,9	779,8
Δ(ek)	686,2	681,4	631,9	683	686,7	666,7	683	681,9
V*kj	365,6	363,8	345,4	364,4	365,9	358,5	364,4	364,0
prop_loss	320,6	317,6	286,5	318,6	320,8	308,2	318,6	317,9
η_{th}	0,6211	0,6167	0,602	0,6182	0,6118	0,6034	0,6182	0,6172
η_p	0,5328	0,534	0,5467	0,5336	0,5328	0,5375	0,5336	0,5339
η_o	0,3309	0,3293	0,3291	0,3299	0,326	0,3245	0,3299	0,3295

ilości odprowadzonego ciepła powoduje zmniejszenie energii kinetycznej wypływającego strumienia). Wynika to stąd, że wskutek nieidealności zachodzących procesów następuje zmniejszenie ciśnienia spiętrzenia w dyszy wylotowej w stosunku do silnika idealnego, co przy zachowaniu stałej wartości ciśnienia otoczenia zmniejsza rozprężw dyszy, a przez to także prędkość wypływających spalin. Dalszą konsekwencją tego jest zmniejszenie pracy użytecznej ciągu silnika.

- Zmiana sprawności sprężarki powoduje największe zmiany w bilansie energetycznym silnika. Wpływa na pracę przekazaną od turbiny do sprężarki oraz na energię czynnika w przekrojach za sprężarką. Przyczynia się to do znaczących zmian parametrów użytkowych silnika. Ciepło odprowadzone ze spalinami do otoczenia w przedstawionym przykładzie jest nieznacznie mniejsze niż dla silnika idealnego, ale za to znacząco zmalała energia kinetyczna wypływającego strumienia. Wynika to stąd, że aby uzyskać taką samą wartość sprężu do sprężarki rzeczywistej trzeba doprowadzić większą pracę, co wiąże się ze zwiększeniem rozprężu na turbinie. Prowadzi to

exhaust stream decreases, because the stagnation pressure in the engine nozzle decreases by losses. That conducts to the increase in the exhaust fumes heat removed from the engine. The propulsive power and the efficiency decrease in consequence.

- Changes of the compressor efficiency cause the greatest changes in the energy balance diagram of the turbojet engine. The work delivered from the turbine to the compressor increases while the compressor efficiency decreases and the compressor pressure ratio is constant. The combustor inlet temperature rises therefore the heat (fuel) supplied into the combustion chamber becomes smaller. The decrease in the temperature and the pressure of the turbine outlet is a consequence of the growth of the turbine power. That leads to the decrease in the pressure and the temperature of fumes in the exhaust nozzle of the turbojet engine, and to the drop of the thrust and the engine efficiency.
- The change of the combustion efficiency (x_{KS}), while the inlet turbine temperature is constant, leads to a very small modification in the energy

do obniżenia temperatury spalin w przekroju wylotowym dyszy silnika – przez to zmniejszeniu ulega ilość ciepła odprowadzonego do otoczenia oraz obniżenia ciśnienia całkowitego spalin w dyszy wylotowej, co w powiązaniu z obniżeniem temperatury prowadzi do znaczącego zmniejszenia energii kinetycznej spalin w przekroju wylotowym dyszy. W następstwie tego zmniejsza się praca użyteczna ciągu silnika.

- Zmiana sprawności procesu spalania w komorze spalania (x_{KS}), przy zachowaniu niezmiennej temperatury przed turbiną, wpływa nieznacznie na ilość energii przepływającej przez przekroje kontrolne silnika. Wzrost energii strumienia spowodowany jest zwiększeniem ilości czynnika w przekrojach za komorą spalania. Efektem tego jest nieznaczna poprawa analizowanych parametrów pracy w odniesieniu do silnika idealnego, jednak jak zostanie przedstawione dalej, bardzo niekorzystnie wpływa na wartość jednostkowego zużycia paliwa.
- Zmiana sprawności mechanicznej powoduje zmianę ilości pracy wytwarzanej przez turbinę w celu zapewnienia wymaganego sprężu sprężarki. Konsekwencją tego jest nieznaczny wzrost rozprężu na turbinie, a przez to zwiększenie ilości ciepła odprowadzonego ze spalinami do otoczenia.

Sprawności: cieplna, napędowa i ogólna silnika idealnego są wielkościami granicznymi (górnymi lub dolnymi) dla danej formy przepływowej silnika, przy określonych parametrach termodynamicznych pracy. Sprawności silnika rzeczywistego w odniesieniu do sprawności analogicznego silnika idealnego (o takim samym schemacie przepływowymi i tych samych parametrach termodynamicznych pracy) stanowią więc podstawę oceny stopnia zaawansowania konstrukcji, a także pozwalają określić, jakie są potencjalne możliwości rozwojowe analizowanego silnika.

4.2. Wpływ jakości procesów przepływowo-cieplnych w zespołach silnika na jednostkowe parametry pracy i sprawności silnika

Na rys. 4 przedstawiono wpływ sprawności izentropowej turbiny i sprężarki na parametry jednostkowe i sprawności silnika. Wynika z tego, że im bardziej proces zbliża się do doskonałości, tym mniejsze są zmiany badanych parametrów. Oznacza to, że istnieją granice ekonomiczne poprawy określonych wskaźników, gdyż od pewnego momentu koszty doskonalenia konstrukcji mogą okazać się niewspółmierne do uzyskanych korzyści.

balance diagram of the turbojet engine. The increase in the stream energy in the combustor outlet is caused by the increase in the mass flow rate. In the effect the slight improvement of the engine parameters occurs, with the exception of the fuel consumption by comparison with the ideal turbojet engine.

- The change of the power transmission efficiency causes the change of the turbine work. That leads to a little increase in the turbine decompression, and the exhaust fumes heat. The influence of the change of that process quality on the engine work parameters is very small.

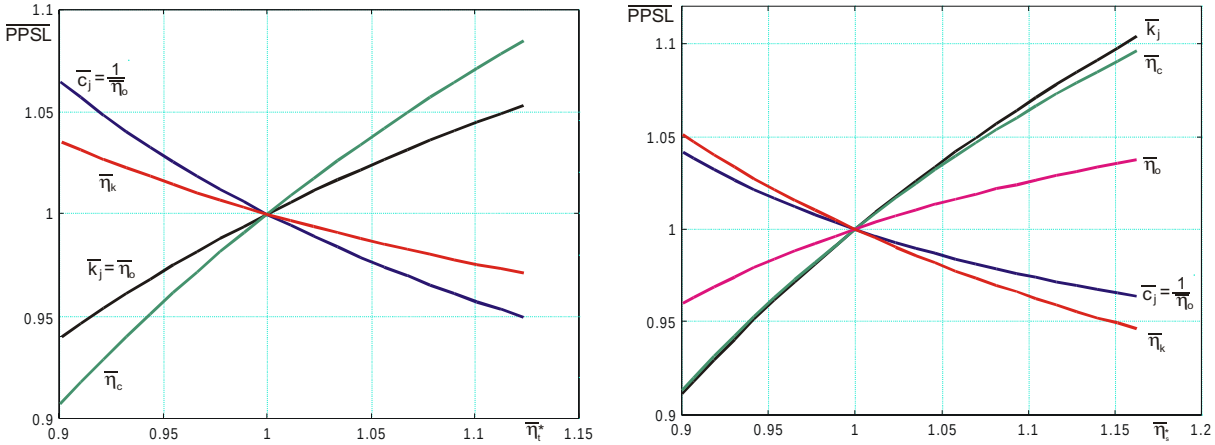
The thermal, propulsive and overall efficiencies of the ideal engine are the upper and lower limits of the specific flow form of the turbojet engine with specified thermodynamic parameters. The comparison of efficiencies of the nonideal engine with the same ideal engine is useful to estimate the advanced construction level and to propose the future development.

4.2. The influence of thermal-flow processes quality in the turbojet engine components on specific work parameters and efficiencies

The influence of the turbine and the compressor efficiency on the turbojet engine work parameters and its efficiencies is presented in fig. 4. If the quality of the process goes to perfection its influence on the engine work parameters decreases. That indicates the economic limit of the engine development exists, because from a certain moment the costs of the development will be greater than achieved advantages.

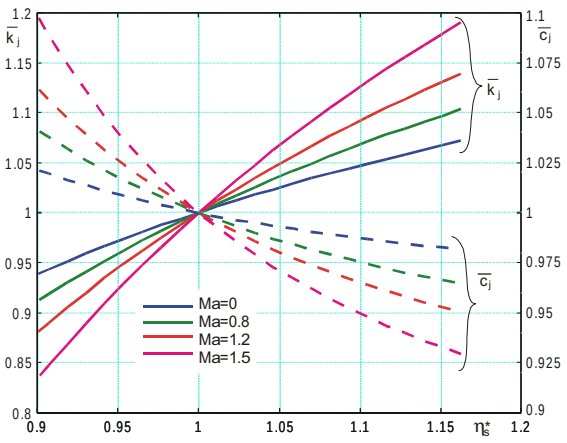
Istnieją związki pomiędzy zależnością ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa a sprawnością ogólną, od wskaźników jakości procesów w zespołach silnika. Jednostkowe zużycia paliwa jest odwrotnością sprawności ogólnej (rys. 4). Z wyłączeniem zależności od sprawności sprężarki i współczynnika wydzielania ciepła, dla pozostałych wskaźników jakości ciąg jednostkowy i sprawność ogólna mają taki sam przebieg. Nie ma zależności pomiędzy pozostałymi sprawnościami silnika i jednostkowymi parametrami pracy. Ze zmianą wskaźników jakości procesów przepływowo-cieplnych miały one często

Dependences of the specific thrust and the specific fuel consumption on the thermal-flow process efficiency are related to the dependence of the overall efficiency (see fig. 4). The relationship between the specific fuel consumption and overall efficiency is an inverse. The relationship between the specific thrust and overall efficiency are the same with the exception of the dependences on the compressor and combustion efficiencies. Between other engine efficiencies and its specific parameters isn't any relationship.



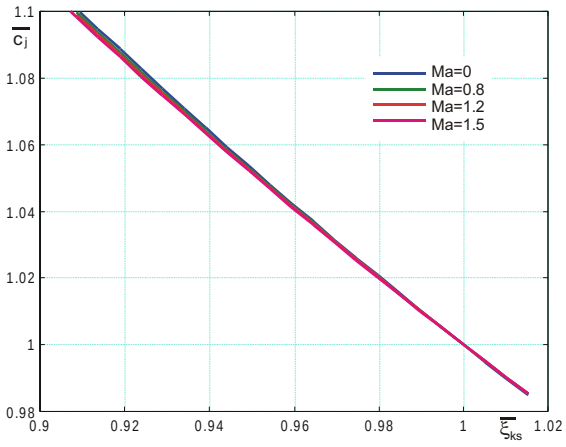
Rys. 4. Zależność parametrów pracy silnika lotniczego (PPSL) od sprawności turbiny i sprężarki przy prędkości odpowiadającej Ma=0,8

Fig. 4. The influence of the turbine and compressor efficiency on the relative work parameters (WP) of turbojet engine for Ma=0,8



Rys. 5. Zależność względnego ciągu jednostkowego i względnego jednostkowego zużycia paliwa od sprawności izentropowej sprężarki dla różnych prędkości lotu

Fig. 5. The influence of the compressor efficiency on the relative specific thrust and the relative specific fuel consumption for various flight speeds



Rys. 6. Zależność względnego jednostkowego zużycia paliwa od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania dla różnych prędkości lotu

Fig. 6. The influence of the combustion efficiency on the relative specific fuel consumption for various flight speeds

odmienny charakter zależności, co szczególnie uwidaczniało się w wynikach badanych silników dwuprzepływowych.

Wpływ prędkości lotu na parametry jednostkowe dla określonych wskaźników jakości procesów przepływowo-cieplnych przedstawiono na rys. 5 i 6. Wzrost prędkości lotu intensyfikuje zależność ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa od wskaźników pracy silnika (rys. 5). Wyjątek stanowi zależność od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania, gdzie ze wzrostem prędkości lotu bardzo nieznacznie maleje intensywność zmian jednostkowego zużycia paliwa od tego wskaźnika (rys. 6). Można to wytłumaczyć tym, że ze wzrostem prędkości lotu, przy zachowaniu stałej wartości sprężu sprężarki, wzrasta temperatura strumienia powietrza przed komorą spalania, przez co mniej ciepła (paliwa) trzeba doprowadzić do silnika dla uzyskania założonej stałej wartości temperatury przed turbiną. Powoduje to, że ze wzrostem prędkości lotu nieznacznie maleje wpływ współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania na jednostkowe zużycie paliwa. Zmiany ciągu jednostkowego od współczynnika wydzielania ciepła są pomijalne.

4.3. Wpływ jakości procesów przepływowo-cieplnych na jednostkowe wskaźniki pracy silnika jednoprzepływowego

W silniku jednoprzepływowym ciąg jednostkowy, bez względu na wartość prędkości lotu, jest najbardziej wrażliwy na zmiany sprawności sprężarki, następnie na zmiany sprawności turbiny (rys. 7). Współczynniki strat ciśnienia mają znacznie mniejszy wpływ na ten parametr, szczególnie przy większych prędkościach lotu, niż jakość procesów w zespołach wirnikowych (w celu lepszej przejrzystości wykresów ograniczono się do pokazania zależności parametrów jednostkowych od współczynnika strat ciśnienia we wlocie, ponieważ zależności od współczynników strat ciśnienia w pozostałych zespołach silnika są zbliżone).

Jednostkowe zużycie paliwa bardzo silnie zależy od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania. Dla małych prędkości lotu wrażliwość tego parametru pracy silnika na zmianę wartości współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania jest największa. Znacząco mniejszy wpływ mają pozostałe wskaźniki jakości procesów przepływowo-cieplnych, wśród których dominuje sprawność turbiny, a po niej, współczynniki strat ciśnienia w zespołach silnika i sprawność sprężarki.

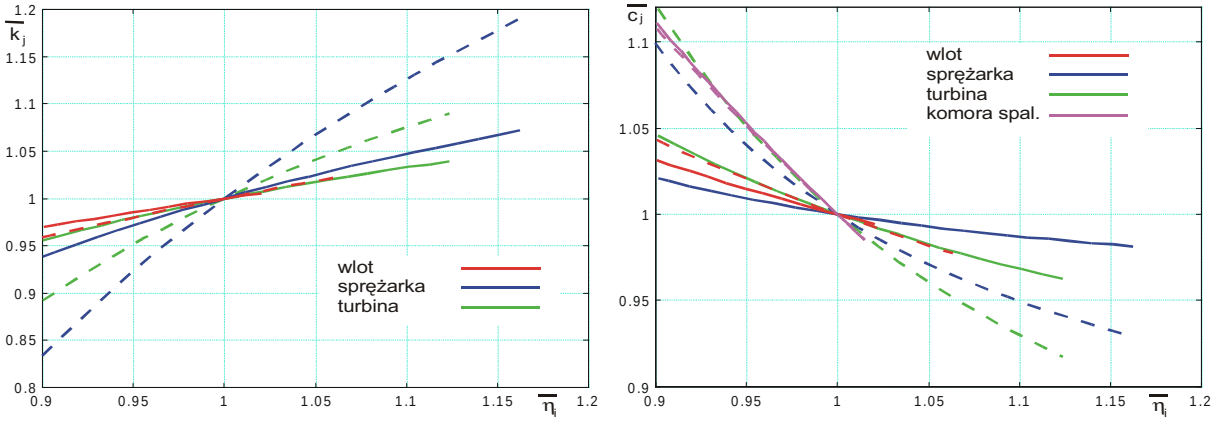
Ze wzrostem prędkości lotu rośnie wpływ sprawności turbiny tak, że zmiany jednostkowego zużycia paliwa od tego wskaźnika stają się równoważne zmia-

The influence of the flight speed on the specific work parameters and on quality coefficients of the chosen processes is shown in fig. 5 and 6. The increase in the flight speed intensifies the dependences of the specific thrust and the specific fuel consumption on the thermal-flow process quality with the exception of the dependences on combustion efficiency. Whereas the flight speed increases, the dependence of the specific fuel consumption on the combustion efficiency slightly decreases (fig. 6). It is because with the increase of the flight speed, the total engine inlet enthalpy increases and the combustion inlet temperature rises when the compression ratio is constant. That's why the amount of the fuel mass delivered into the combustor decreases when the inlet turbine temperature is constant. The changes of the specific thrust with the change of the combustion efficiency are so small and can be omitted.

4.3. The influence of thermal-flow process quality on specific work parameters of turbojet engine

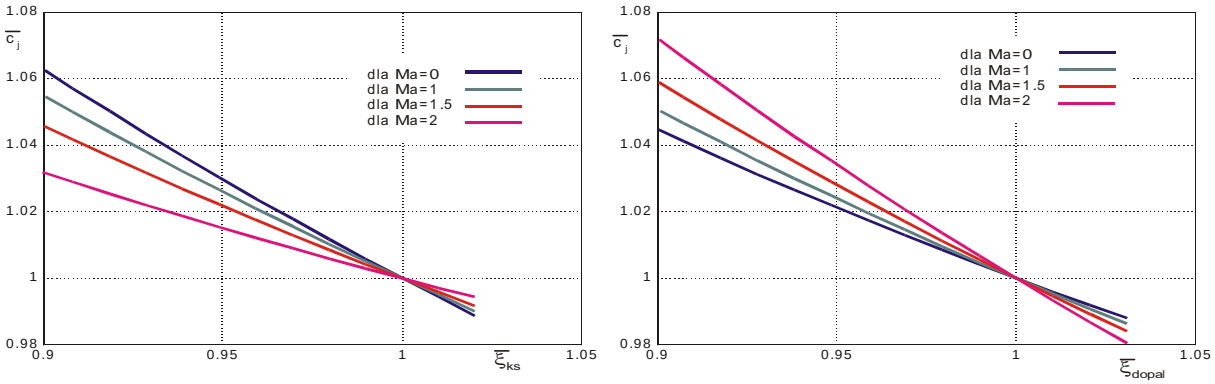
The specific thrust of the turbojet engine is most of all sensitive to the change of the compressor efficiency and is a little less sensitive to the change of the turbine efficiency (see fig. 7). The pressure losses coefficients of the turbojet engine have a lesser influence on that parameter, especially if the flight speed is high. Only the graph for the inlet losses coefficient is shown on the figures, because the dependencies of the specific work parameters on other pressure losses coefficients are similar.

The specific fuel consumption strongly depends on the combustion efficiency. It is especially visible for the low flight speed, when the influence of the other processes quality is much lower (see fig. 7). The growth of the flight speed doesn't change the relationships between the specific fuel consumption and the combustion efficiency, but it strongly changes the relationship between the specific fuel consumption and the other processes quality coefficients. With the increase in the flight speed, the dependences of the specific fuel consumption on the turbine and compressor efficiency grow significantly and above the certain flight speed value, they are stronger than their dependencies on the combustion efficiency. The influence



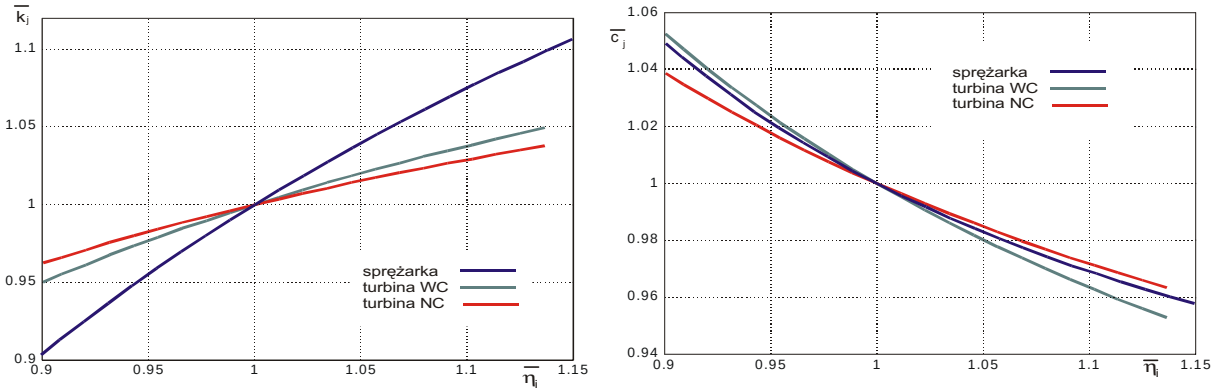
Rys. 7. Zależność względnego ciągu jednostkowego i względnego jednostkowego zużycia paliwa od wskaźników jakości procesów w wybranych zespołach silnika, linia ciągła dla prędkości lotu Ma=0, linia przerywana dla prędkości lotu Ma=1,5

Fig. 7. Dependences of the relative specific thrust and the relative specific fuel consumption on the process quality coefficients of chosen turbojet engine components, continuous line for flight speed Ma=0, dashed line for flight speed Ma=1.5



Rys. 8. Zależność względnego jednostkowego zużycia paliwa od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania i dopalaczu dla różnych warunków lotu

Fig. 8. The dependence of the relative specific fuel consumption on the combustion efficiency in the combustor and afterburner for various flight speeds



Rys. 9. Zależność względnego ciągu jednostkowego i względnego jednostkowego zużycia paliwa od sprawności procesów w zespołach wysokiego i niskiego ciśnienia dwuwirnikowego silnika odrzutowego o takich samych wartościach sprężu sprężarek dla Ma=1.5

Fig. 9. The dependence of the relative specific thrust and the relative specific fuel consumption on the processes quality of the high and low pressure units for the two shaft turbojet engine with the same high and low pressure compression ratio for Ma=1,5

nom od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania. Znacząco również wzrasta wpływ sprawności sprężarki, natomiast wpływ współczynników strat ciśnienia wzrasta nieznacznie.

Analizując pracę silnika z włączonym dopalaczem uwidacznia się różnica zależności jednostkowego zużycia paliwa od współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania w porównaniu z silnikiem bez dopalacza (por. rys. 6, 8). Wzrost prędkości lotu powoduje znaczące zmniejszenie wrażliwości jednostkowego zużycia paliwa na zmianę współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania, podczas gdy w silniku bez dopalacza zmiana wrażliwości była bardzo nieznaczna. W dopalaczu, odwrotnie niż w komorze głównej silnika, większa prędkość lotu powoduje zwiększenie intensywności zmian jednostkowego zużycia paliwa.

W konstrukcji dwuwirnikowej jednoprzepływowego silnika odrzutowego porównanie wpływu jakości procesów w zespołach wirnikowych na parametry użytkowe silnika pokazało, że przy równych wartościach sprężu sprężarki wysokiego i niskiego ciśnienia zmiana ich sprawności w takim samym stopniu wpływa na zmianę parametrów pracy silnika. Natomiast zmiana sprawności turbiny wysokiego ciśnienia powoduje większe zmiany badanych wielkości, niż zmiana sprawności turbiny niskiego ciśnienia (rys. 9).

W silniku dwuwirnikowym o różnych wartościach sprężu sprężarek większy wpływ na parametry użytkowe ma zmiana wskaźnika jakości procesów w sprężarce o wyższej wartości sprężu bez względu na to, czy jest to zespół wysokiego czy niskiego ciśnienia. Zmiana sprężu sprężarek powoduje zmianę wpływu sprawności turbin na parametry użytkowe silnika. W zależności od tego, której sprężarki spręż został powiększony, to wzrasta wpływ sprawności współpracującej z nią turbiny na parametry użytkowe silnika.

4.4. Wpływ jakości procesów przepływowo-cieplnych na jednostkowe wskaźniki pracy silnika dwuprzepływowego

W silniku dwuprzepływowym zależności jednostkowych parametrów pracy od jakości procesów przepływowo-cieplnych zmieniają się wraz z prędkością lotu, stopniem dwuprzepływowości silnika oraz stopniem podziału sprężu między wentylator i sprężarkę.

Na rys. 10 i 11 pokazano zależności parametrów jednostkowych pracy silnika od wskaźników jakości procesów w silniku bez mieszalnika dla różnej wartości stopnia dwuprzepływowości oraz prędkości lotu odpowiadającej Ma=0 i Ma=1,2. Analiza wskazuje, że zwiększenie stopnia dwuprzepływowości intensyfikuje zależność parametrów jednostkowych pracy

of the increase in the flight speed on the dependences of the fuel consumption on the pressure losses coefficients is to a lesser extends.

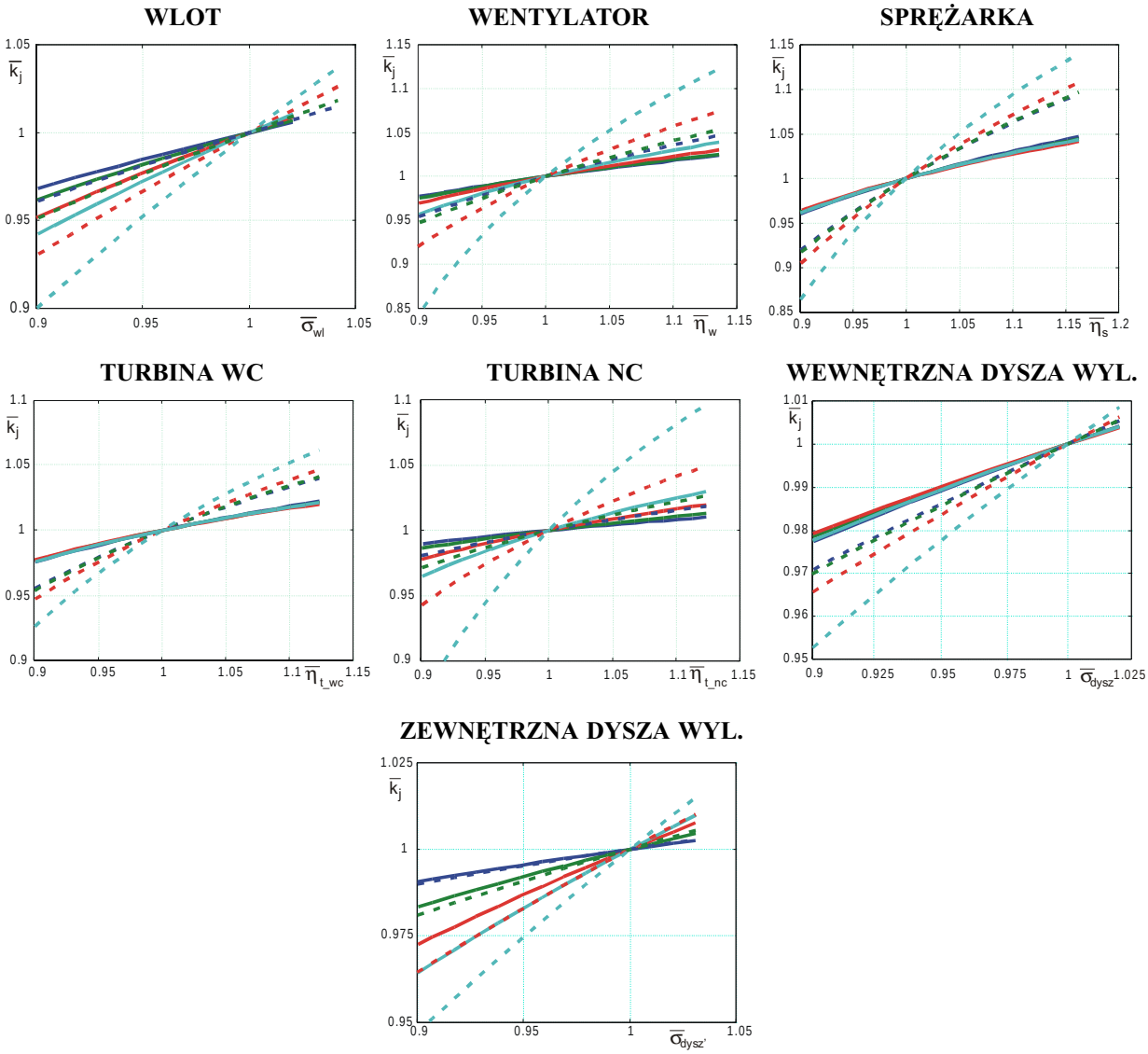
The comparison of the results of the turbojet engine with and without the afterburner indicates the differences in the influence of the combustor efficiency on the specific fuel consumption between these two engine types (compare fig. 6, 8). The growth of the flight speed causes the specific fuel consumption sensitivity of the change of the combustion efficiency significantly decreases in the turbojet engine with the afterburner (in the turbojet engine without the afterburner it is insignificant). The influence of the afterburner efficiency on the specific fuel consumption increases with the flight speed growth.

The influence of the process quality of the compressors and turbines on the specific work parameters for the two-shaft turbojet engine is shown in fig. 9. If the high and low pressure compression ratio is equal, then the change of the influence of their process quality on the specific work parameters is the same, but the high-pressure turbine efficiency has a greater influence on the specific work parameters than the low-pressure turbine. If the high and low-pressure compression ratio isn't equal, then the efficiencies of the higher-pressure compression ratio unit have a greater influence.

4.4. The influence of thermal-flow process quality on specific work parameters of turbofan engine

Dependencies of the turbofan engine specific work parameters on the thermal-flow processes quality change with the change of: the flight speed, the bypass ratio and the pressure compression ratio between the fan and compressor.

The changes of the bypass ratio and the flight speed influence on dependencies of the work parameters on the thermal-flow processes quality are shown in fig. 10 and 11. The increase in the bypass ratio intensifies the dependencies of the work parameters on the processes quality in the outer engine canal (the inlet, the fan, the outer duct and the outer nozzle) and low-

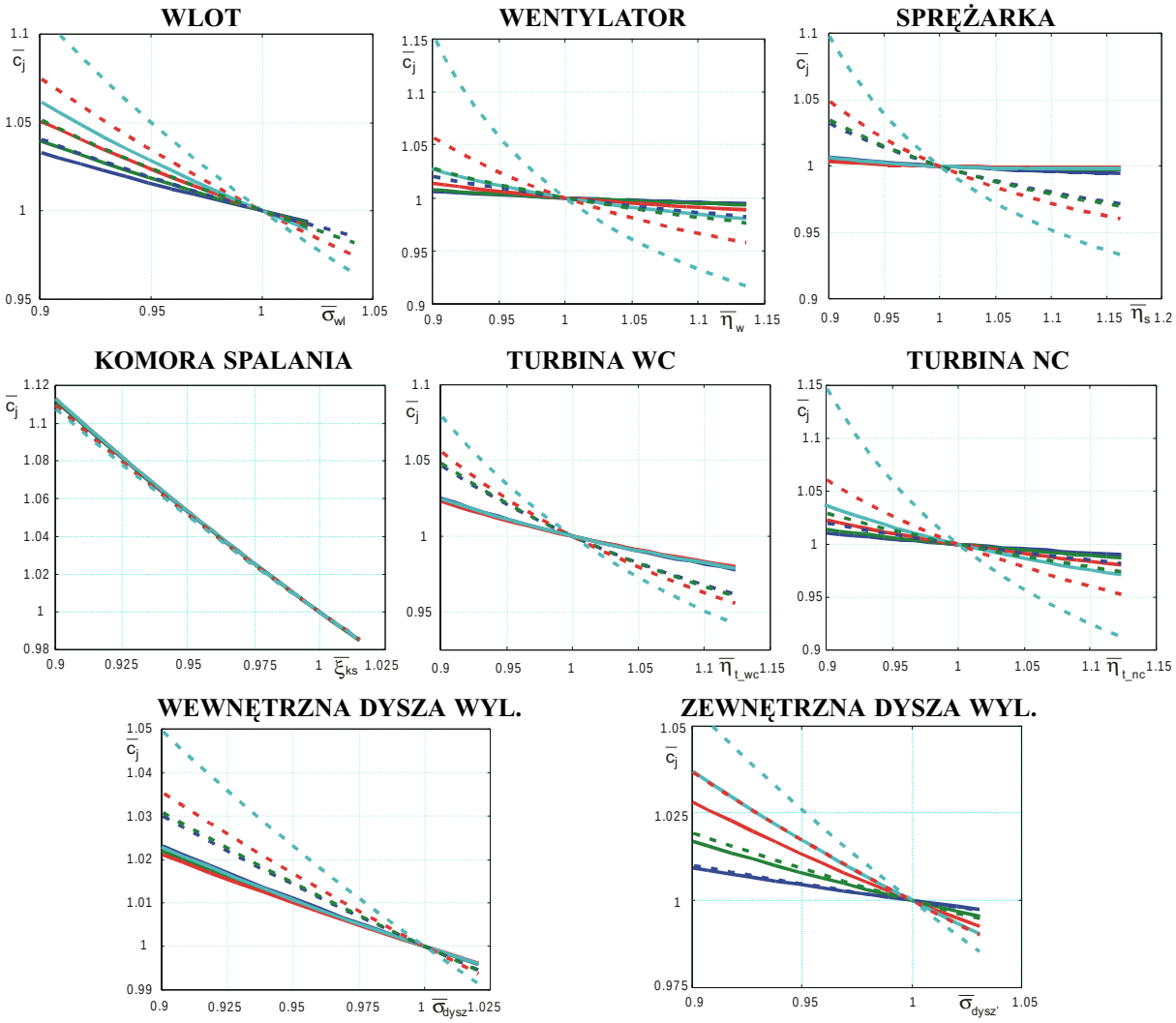


Rys. 10. Zależność względnego ciągu jednostkowego od sprawności procesów w zespołach silnika dwuprzepływowego dla różnych wartości stopnia dwuprzepływowości:
μ=0,5 μ=1 μ=2 μ=3 *linie ciągłe - Ma=0, linie przerywane - Ma=1,2*

Fig. 10. The dependence of the relative specific fuel consumption on the thermal flow process quality coefficient in the components of turbofan engine for various bypass ratios:
μ=0,5 μ=1 μ=2 μ=3 *continuous line - Ma=0, dashed line - Ma=1,2*

silnika od wskaźników jakości procesów w zespołach kanału zewnętrznego (wlot, wentylator, zewnętrzna dysza wylotowa) i współpracującej z nimi turbiny niskiego ciśnienia. Zależności parametrów jednostkowych od jakości procesów w zespołach kanału wewnętrznego dla małej prędkości lotu (wykresy dla Ma=0) prawie nie ulegają zmianie dla różnych wartości stopnia dwuprzepływowości. Zwiększenie prędkości lotu intensyfikuje zależność parametrów jednostkowych od jakości procesów w tych zespołach ze wzrostem stopnia dwuprzepływowości. Wyjątek stanowi zależność jednostkowego zużycia paliwa od

pressure turbine, which co-operates with the fan. The change of the bypass ratio negligibly influences the dependencies of the specific work parameters on the change of the inner canal processes quality for the low flight speed (see graph for Ma=0). When the flight speed grows, the influence of the processes quality of the inner turbofan duct components on their specific work parameters increases. The exception is the dependence of the specific fuel consumption on the combustion efficiency, which slightly changes with the change of the flight speed and with the change of the bypass ratio.



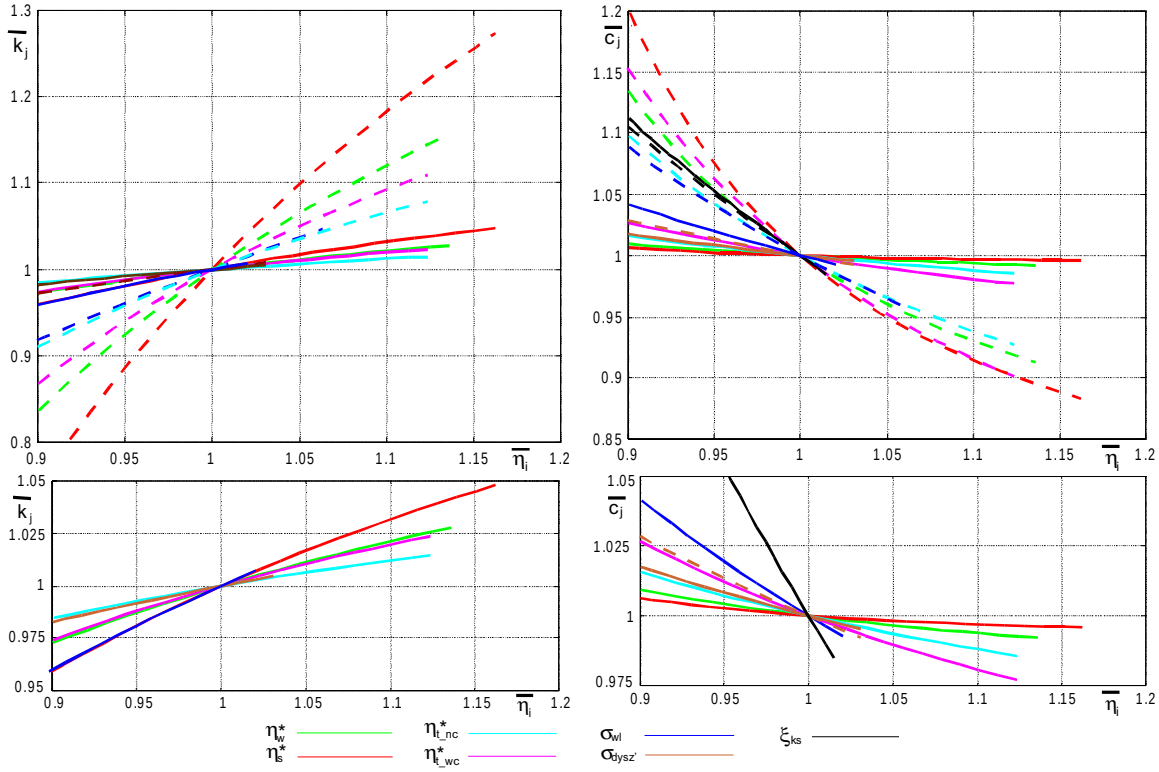
Rys. 11. Zależność względnego jednostkowego zużycia paliwa od sprawności procesów w zespołach silnika dwuprzepływowego dla różnych wartości stopnia dwuprzepływowości:
μ=0,5 μ=1 μ=2 μ=3 *linie ciągłe - Ma=0, linie przerywane - Ma=1,2*

Fig. 11. The dependence of the relative specific fuel consumption on the thermal flow process quality coefficient in the components of turbofan jet engine for various bypass ratios:
μ=0,5 μ=1 μ=2 μ=3 *continuous line - Ma=0, dashed line - Ma=1,2*

współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania, która bardzo mało zmienia się z prędkością lotu i stopniem dwuprzepływowości.

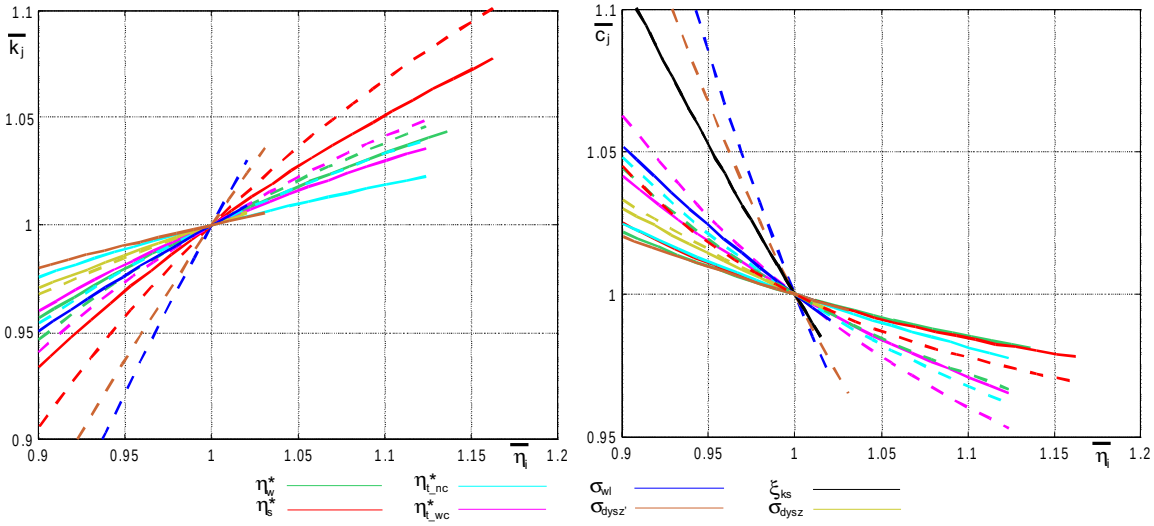
Zestawienie zależności ciągu jednostkowego i jednostkowego zużycia paliwa od jakości procesów w poszczególnych zespołach silnika o stopniu dwuprzepływowości m=1 dla prędkości lotu Ma=0 i Ma=1.8 przedstawiono na rys. 12. Z porównania wynika, że dla prędkości lotu Ma=0 ciąg jednostkowy najsilniej zależy od współczynnik strat ciśnienia we wlocie i sprawności sprężarki, natomiast znacząco mniej od sprawności wentylatora i turbiny wysokiego ciśnienia, a zdecydowanie najsłabiej od sprawności turbiny niskiego ciśnienia.

The comparison of how the thermal-flow processes quality of turbofan engine components influences the specific work parameters of the turbofan engine with m=1 and for Ma=0 and Ma=1,8 is shown in fig. 12. From here it is visible that for Ma=0 the specific thrust strongly depends on the inlet pressure losses coefficients and the compressor efficiency, depends less on the fan and the high pressure turbine coefficients and slightly depends on the low pressure turbine efficiency. For Ma=0 the specific fuel consumption strongly changes with the change of the combustion efficiency. The change of other losses coefficients has a much smaller influence on it.



Rys. 12. Zależność względnego ciągu jednostkowego i względnego jednostkowego zużycia paliwa od wskaźników jakości procesów w wybranych zespołach silnika dwuprzepływowego o stopniu dwuprzepływowości μ=1 dla Ma=0 - linie ciągłe, dla Ma=1,8 - linie przerywane

Fig. 12. The dependences of the relative specific thrust and the relative specific fuel consumption on the thermal-flow processes quality in the turbofan engine components, μ=1, Ma=0 - continuous line, Ma=1,8 - dashed line



Rys. 13. Zależność względnego ciągu jednostkowego i względnego jednostkowego zużycia paliwa od zmiany wskaźników jakości procesów w wybranych zespołach silnika dwuprzepływowego dla Ma=0,8: linie ciągłe - silnik o stopniu dwuprzepływowości μ=1, linie kreskowe - silnik o stopniu dwuprzepływowości μ=6

Fig. 13. The dependences of the relative specific thrust and the relative specific fuel consumption on the thermal-flow processes quality in the turbofan engine components for Ma=0,8, μ=1- continuous line, μ=6 - dashed line

Dla Ma=0 jednostkowe zużycie paliwa silnie zmienia się ze zmianą współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania. W mniejszym stopniu zależy od pozostałych wskaźników jakości, wśród których dominującymi są: współczynniki strat ciśnienia we wlocie i sprawność turbiny wysokiego ciśnienia. Nieznacznie mniejszy wpływ na ten parametr mają: współczynnik strat ciśnienia w zewnętrznej dyszy wylotowej i sprawność turbiny niskiego ciśnienia. Natomiast najsłabiej wpływa na niego sprawności wentylatora i sprężarki.

Porównanie charakterystyk dla silnika o większym stopniu dwuprzepływowości i prędkości lotu Ma=0, zgodnie z tym co przedstawiono na rys. 10 i 11, daje zwiększenie intensywności zmian parametrów jednostkowych pracy silnika od jakości procesów w zespołach kanału zewnętrznego i turbiny niskiego ciśnienia, przy praktycznie niezmienionej zależności od wskaźników jakości procesów w pozostałych zespołach.

Zwiększenie prędkości lotu intensyfikuje wpływ sprawności zespołów wirnikowych na ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycia paliwa. Dla prędkości lotu Ma=1,8 ciąg jednostkowy najsilniej zmienia się ze zmianą sprawności sprężarki, następnie sprawności wentylatora, turbiny wysokiego i niskiego ciśnienia i współczynnika strat ciśnienia we wlocie. Znacząco mniejszy wpływ mają pozostałe wskaźniki jakości. Jednostkowe zużycie paliwa najsilniej zależy od sprawności sprężarki, a następnie w kolejności od: sprawności turbiny wysokiego ciśnienia, wentylatora, współczynnika wydzielania ciepła w komorze spalania, sprawności turbiny niskiego ciśnienia i współczynnika strat ciśnienia we wlocie. Pozostałe wskaźniki jakości procesów przepływowo-cieplnych mają dużo mniejszy wpływ na ten parametr.

Na rys. 13 przedstawiono porównanie zależności parametrów jednostkowych pracy silnika od jakości procesów przepływowo-cieplnych dla silnika o „małym" (m=1) i „dużym" (m=6) stopniu dwuprzepływowości dla prędkości lotu Ma=0,8. Silniki te różnią się stopniem podziału sprężu między kanałami zewnętrznym i wewnętrznym silnika (tab. 1), co ma miejsce w rzeczywistych konstrukcjach.

Analiza wyników wskazuje, że w silniku o dużym stopniu dwuprzepływowości zmiana jakości procesów w zespołach silnika silniej wpływa na jego parametry jednostkowe niż w silniku o małym stopniu dwuprzepływowości. Ponadto w silniku o dużym stopniu dwuprzepływowości bardzo istotny wpływ na parametry jednostkowe ma jakość procesów we wlocie i zewnętrznym kanale wylotowym. Natomiast w mniejszym stopniu, niż można się tego było spodziewać, zmienił się wpływ sprawności zespołów wirnikowych niskiego ciśnienia. Jest to spowodowane tym, że w silniku o dużym stopniu dwuprzepływo-

According to the results shown in fig. 10, 11, the increase in the bypass ratio causes the rise in the influence of the processes quality of the outer canal and the low pressure turbine on the turbofan engine specific work parameters. The influence of the other components processes quality on the turbofan work parameters doesn't change with the increase in the bypass ratio.

The growth of the flight speed causes the intensification of the influence of the turbomachines processes efficiencies on the specific work parameters. The specific thrust strongly depends on the change of the compressor, fan and turbines efficiencies for Ma=1,8. The quality of the other components processes has a slighter influence. The specific fuel consumption strongly changes with the change of the compressor efficiency, then with the change of the high-pressure turbine efficiency, the fan efficiency, the burner efficiency and the inlet pressure losses coefficient. Other losses coefficients have slight influence on it.

The comparison of how the processes quality influences the change of the specific work parameters for the small (m=1) and large (m=6) bypass ratio is shown in fig. 13. The engines have a similar overall pressure ratio, but the fan to compressor pressure ratio of those engines is different (see tab. 1). In real engine constructions, the increase in the bypass ratio causes the decrease in fan pressure ratio.

The changes of the quality of the thermal-flow processes in the large bypass ratio engines influence the specific work parameters more strongly than their change in the small bypass ratio engines. Besides, the processes qualities in the inlet and the outer engine canal of the large bypass engine have a strong influence on its specific thrust and the specific fuel consumption. The influence of the low-pressure turbomachines efficiency on the engine work parameters is less than expected. That is caused by the decrease in the fan compression in the large bypass ratio engine. If the fan to compressor pressure ratio is the same in both engines, the influence of low-pressure turbomachines efficiencies on the specific work parameters will be greater.

wości zmniejszył się spręż wentylatora, a wzrósł spręż sprężarki w kanale wewnętrznym. Gdyby podział sprężu między kanałami nie uległ zmianie, wpływ jakości procesów w zespołach wirnikowych niskiego ciśnienia na parametry jednostkowe silnika o dużym stopniu dwuprzepływowości byłby znacząco większy.

5. Podsumowanie

Bilans energetyczny turbinowych silników odrzutowych zobrazowany wykresem Sanke'ya pozwala na ich badanie w warunkach ustalonej pracy silnika. Daje także możliwość analizowania zmian energetycznych zachodzących w poszczególnych zespołach silnika oraz w całym silniku, w celu określania poszczególnych sprawności oraz parametrów jednostkowych.

Umożliwia to określanie wpływu sprawności procesów zachodzących w poszczególnych zespołach silnika na jego parametry użytkowe. Analiza taka pozwala na wyciągnięcie wniosków natury konstrukcyjnej, gdyż można ocenić, które zespoły i w jakich silnikach należy dopracowywać w celu poprawy jego parametrów użytkowych, oraz natury eksploatacyjnej, pokazujących zmianę parametrów pracy silnika w warunkach eksploatacji odbiegającej od warunków obliczeniowych. Tym samym mogą być dobrymi nośnikami informacji diagnostycznej wskazującymi np. na zużycie silnika.

Badania pokazały, że bardzo znaczący wpływ na parametry użytkowe silnika ma sprawność sprężarek i turbin oraz dodatkowo, w przypadku zużycia paliwa, współczynnik wydzielania ciepła w komorze spalania. W silnikach dwuprzepływowych wzrost stopnia dwuprzepływowości zwiększa wpływ wskaźników jakości zespołów wirnikowych niskiego ciśnienia, kanału zewnętrznego oraz wlotu na parametry jednostkowe silnika.

W zdecydowanej większości przypadków intensywność zmian parametrów użytkowych silnika narasta ze wzrostem prędkości lotu, co wskazuje, że w samolotach naddźwiękowych efekt usprawnienia procesu zachodzącego w zespołach silnika ma większy wpływ na jego parametry pracy niż w przypadku silników przeznaczonych do samolotów latających z małymi prędkościami. Rzutuje to jednak niekorzystnie na parametry silnika w przypadku pogorszenia się zachodzącego procesu, co może mieć miejsce w pozaobliczeniowych stanach jego pracy. W takiej sytuacji w silnikach napędzających samoloty naddźwiękowe parametry użytkowe w większym stopniu ulegają degradacji (szczególnie, że mają one niższe wartości wskaźników jakości, z czym jest związane zwiększenie intensywności zmian parametrów użytkowych silnika).

Wykazane zostały związki pomiędzy parametrami jednostkowymi silnika a sprawnością ogólną wraz ze zmianą wskaźników jakości procesów przepływowo-cieplnych w silniku. Zmiany jednostkowego zużyw

5. Summary

The energy balance of the turbojet engine depicted by Sankey diagram allows us to investigate energy processes for steady state of the engine. That gives a possibility to find the relationship between the quality of the energy conversation in the turbojet engine components and its specific work parameters. That analysis allows us to find the conclusion of the design and the operation of the turbojet engines. We can estimate which engine component should be improved to increase its work characteristics. On the other hand, we can evaluate how the engine work parameters change during its work at conditions other then it was designed. That can be good information about the engine degradation during its operation (the growth of fuel consumption).

The research shows that, the specific work parameters strongly depend on the turbomachines efficiency. Additionally, the combustion efficiency has a great influence on the specific fuel consumption. For the turbofan engine, the growth of bypass ratio causes the increase in the influence of the processes quality of the: inlet, outer canal and low pressure unit on the work parameters.

If the flight speed increases then the influence of the processes quality on the engine work characteristics grows (the exception is the dependence on the combustion efficiency). That indicates the change of the thermal-flow processes quality has a greater influence on the high-speed aircraft engines than the low speed aircraft engines. For that reason, we can achieve good results of the improvement of thermodynamic processes in the turbojet engine for supersonic speed aircraft, but on the other hand, during the engine operation out of the design condition, when the processes quality is lower, its work parameters strongly decrease.

cia paliwa od wskaźników jakości procesów w zespołach silnika są odwrotne do zmian sprawności ogólnej silnika. Z wyłączeniem zależności od współczynnika wydzielania ciepła i sprawności sprężarki zmiany ciągu jednostkowego są równoważne zmianom sprawności ogólnej silnika.

Wykaz oznaczeń

c_5 – *prędkość na wyjściu z dyszy wylotowej silnika*
c_j – *jednostkowe zużycie paliwa*
c_p – *ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu*
e – *energia strumienia*
i_{pal} – *entalpia paliwa*
K – *ciąg silnika*
k_j – *ciąg jednostkowy silnika*
l_t – *praca turbiny*
$\dot{m}$ – *masowe natężenie przepływu*
q_{dop} – *ilość ciepła teoretycznie doprowadzonego do silnika*
q_{dopal} – *ciepło doprowadzone w dopalaczu*
q_{KS} – *ciepło doprowadzone w komorze spalania*
q_{odp} – *ciepło odprowadzone z silnika*
p – *ciśnienie*
T – *temperatura*
V - *prędkość lotu*
W_u – *wartość opałowa paliwa*
ϕ_{dyszy} – *współczynnik strat prędkości w dyszy wylotowej*
η_c – *sprawność cieplna*
η_k – *sprawność napędowa*
η_m – *sprawność mechaniczna*
$\eta_{mieszal}$ - *sprawność mieszalnika*
η_o – *sprawność ogólna*
η_s^*, η_t^* – *sprawność izentropowa sprężarki i turbiny*
μ – *stopień dwuprzepływowości*
π – *sprężenie*
σ – *współczynnik strat ciśnienia w zespołach silnika*
τ_{pal} – *względna ilość paliwa doprowadzonego do silnika*
ξ – *współczynnik wydzielania ciepła*

Indeksy

I – dotyczy parametrów strumienia na wejściu do kanału wewnętrznego
II – dotyczy parametrów na wejściu do kanału zewnętrznego
‘ – dotyczy parametrów strumienia w zewnętrznym kanale silnika dwuprzepływowego
* - oznacza parametry całkowite (spiętrzenia)
wl,1..5,1a,3a – oznacza przekroje silnika (por rys. 1a, 2a)
wc – wirnik wysokiego ciśnienia
nc – wirnik niskiego ciśnienia

Nomenclature

c_5 – *exhaust stream speed*
c_j – *specific fuel consumption*
c_p – *specific heat*
e – *stream energy*
i_f – *fuel enthalpy*
K – *thrust*
k_j – *specific thrust*
l_t – *specific turbine work*
$\dot{m}$ – *mass flow*
q_{in} – *heat delivered to the engine*
q_{AB} – *heat delivered to the afterburner*
q_B – *heat delivered to the combustor*
q_{out} – *heat take out of the engine*
p – *pressure*
T – *temperature*
V – *flight speed*
W_u – *heating value of the fuel*
ϕ_N – *speed loss coefficient in the nozzle*
η_{th} – *thermal efficiency*
η_p – *propulsive efficiency*
η_m – *power transmission efficiency*
η_{MIX} – *mixing efficiency*
η_o – *overall efficiency*
η_s^* – *compressor (turbine) efficiency*
μ – *bypass ratio*
π – *compression pressure ratio*
σ – *pressure loss coefficient*
τ_f – *fuel to air ratio*
ξ – *burner efficiency*

Index

I – concern the stream parameters entering into the inner canal
II – concern the stream parameters entering into the outer canal
‘ – concern the stream parameters passing through the outer canal of bypass engine
* – total parameters
wl,1..5,1a,3a - jet engine station number-ing (see fig. 1a, 2a)
C - compressor
F - fan
HP - high-pressure unit
LP - low-pressure unit

6. References

[1] Dixon S.L.: *Fluid Mechanics Thermodynamics of Turbomachinery,* Pergamon Press, Oxford, 1978.
[2] Dowkont J.: *Teoria silników cieplnych,* WKŁ, Warszawa, 1973.
[3] Dzierżanowski P. i in.: *Turbinowe silniki odrzutowe,* WKŁ, Warszawa, 1983.
[4] Gajeski T. i in.: *Przepływowe silniki odrzutowe,* WNT, Warszawa, 1973.
[5] Górski J.: *Problemy doskonalenia konstrukcji wirnikowych lotniczych napędów turbinowych,* III Sympozjum Naukowe: Problemy techniczno – eksploatacyjne w kształceniu pilotów, Dęblin, 1996.
[6] Jakubowski R., Orkisz M.: *Metodyka oceny sprawności turbinowego silnika odrzutowego dla różnych warunków pracy dyszy wylotowej, Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym,* Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne Komisja w Lublinie, Lublin, 2000.
[7] Jakubowski R., Orkisz M.: *Ocena charakterystyk eksploatacyjnych jednoprzepływowego turbinowego silnika odrzutowego z wykorzystaniem metody bilansu energetycznego,* 27th International Scientific Conference on Combustion Engines, Jastrzębia Góra, 2001.
[8] Muszyński M. Orkisz M.: *Modelowanie turbinowych silników odrzutowych,* Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 1997.
[9] Nieciajew J. i in.: *Awiacionnyje turboreaktiwnyje dwigatieli c izmieniajemym rabocim processom dla mnogoreżimnych samoletow,* Maszunostrojenie, Moskwa, 1988.
[10] Oates G.: *Aerothermodynamics of Aircraft Engine Components*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1985.
[11] Oates G. *Aerothermodynamics of Gas Turbines and Rocket Propulsion*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1988.
[12] Orkisz M.: *Konstrukcyjne metody obniżania emisji składników toksycznych emitowanych przez silniki turbinowe. W: Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowy,* Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne Komisja w Lublinie, Lublin, 2000.
[13] Orkisz M.: *Wybrane zagadnienia z teorii turbinowych silników odrzutowych*, Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji, Radom, 1995.
[14] Szargut J.: *Teoria procesów cieplnych*, PWN, Warszawa, 1973.
[15] Szargut J.: *Termodynamika*, PWN, Warszawa, 2000.
[16] Tomeczek J.: *Termodynamika*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.

#########
Pracę wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr 5 T12D 031 22 finansowanego przez KBN
The research was done as a realisation of KBN project no. ***5 T12D 031 22***
#########

Prof. dr hab inż. Marek Orkisz
Mgr inż. Robert Jakubowski
Katedra Samolotów i Silników Lotniczych
Politechnika Rzeszowska
ul. Powstańców Warszawy 6
35-959 Rzeszów
tel.: (0-17) 8651-450
e-mail: mareko@prz.rzeszow.pl

Leszek PIASECZNY

PROJEKTOWANIE ZMIANY POSADOWIENIA MASZYN NA PODKŁADKI ODLANE Z POLIMERU NA PRZYKŁADZIE MECHANIZMÓW SIŁOWNI OKRĘTOWEJ

DESIGNING OF POWER PLANT RECHOCKING USING A POURABLE POLYMER ON EXAMPLE OF SHIP'S POWER PLANT

Przedstawiono wady posadawiania mechanizmów siłowni okrętowej na fundamentach przez sztywne podkładki stalowe i korzyści posadawiania ich przez odlewane na miejscu podkładki polimerowe. Na przykładzie siłowni okrętu projektu 206 przedstawiono projekt zamiany sztywnych podkładek stalowych na podkładki polimerowe przy posadawianiu mechanizmów na fundamentach.

Słowa kluczowe: posadowienie maszyn, odlewane podkładki polimerowe.

The disadvantages of rigid, steel chocking and the advantages of chocking with on site poured polymer of the marine plant machinery were presented. On example of the 206 ship project power plant the proposal for replacement of the rigid steel on polymer chocks for the machinery foundation were presented.

Key words: machinery seating, cast polymer chocks.

1. Wprowadzenie

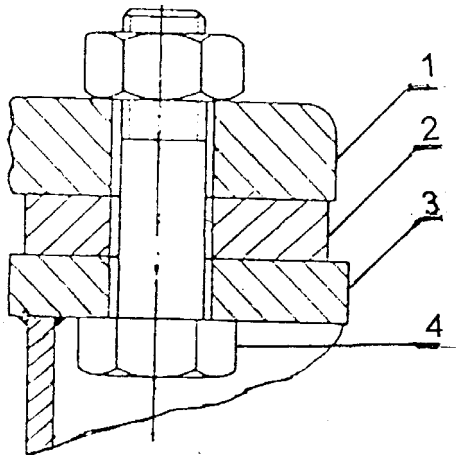
Posadawianie na fundamentach mechanizmów siłowni okrętowych powinno zapewnić osiowanie współpracujących mechanizmów i pewną pracę mechanizmów podczas długotrwałej eksploatacji okrętu. W celu wyeliminowania dopasowywania dużych powierzchni oporowych ramy mechanizmu i jego fundamentu, jak dokładnego osiowania mechanizmów jednego z drugim, np. silnika napędowego okrętu i przekładni lub linii wałów, mechanizmy posadawia się przez sztywne podkładki stalowe (rys. 1).

Dla zapewnienia, poprawnej pracy mechanizmu wymaga się równomiernego rozkładu obciążenia na wszystkie podkładki i równego ciśnienia na całe nominalne powierzchnie oporowe podkładek. Dlatego powierzchnie oporowe podkładek wymagają trudnego, uciążliwego, pracochłonnego, kosztownego, indywidualnego dopasowywania do powierzchni oporowych ramy mechanizmu i fundamentu. Konieczna jest też obróbka powierzchni oporowych fundamentu na okręcie za pomocą specjalnych, przenośnych strugarek lub frezarek i dopasowanie narzędziami ręcznymi. Pomimo to na powierzchniach oporowych podkładek i fundamentu pozostają nierówności powo-

1. Introduction

Seating of ships power plant machinery on a foundation shall assure aligning of co-operating machinery and reliable running of machinery during long-lasting ships exploitation. In order to eliminate matching of the large bearing surfaces of machinery frame and its foundation, as well as to exact aligning of the machinery with other units e.g. ships propulsion engine with gearbox or shafting it is seated by rigid steel chocks (Fig. 1).

Uniform load distribution on all chocks and equal unit pressure on the whole nominal bearing surfaces of the chocks are required to ensure smooth running of the machinery. Therefore the bearing surfaces of the chocks require difficult, burdensome, laborious, expensive and individual adjustment to bearing surfaces of the machinery frame and the foundation. Also necessary is the bearing surfaces of the foundation machining on the ship by special portable planers or millers and matching by hand tools. Nevertheless on the bearing surfaces of the chocks and foundation remain the unevenness cause that they fay only at separate points (tips of the roughness) spaced at random, (Fig. 2a).



Rys. 1. Fundamentowe złącze śrubowe: 1-podstawa mechanizmu, 2-podkładka stalowa, 3-półka fundamentu, 4-śruba fundamentowa

Fig. 1. Foundation bolted joint: 1-machinery frame, 2-steel chock, 3-foundation ledge, 4-foundation bolt

dujące, że te przylegają tylko w oddzielnych punktach (szczytach chropowatości), przypadkowo rozstawionych (rys. 2a).

Badania wykazały [1], że rzeczywista przylegająca metalowa powierzchnia oporowa stanowi mniej niż, 1% nominalnej powierzchni przylegającej i wartość jej zależy od siły naciągu śruby fundamentowej (rys. 1).

Ze względu na dużą sztywność podkładek stalowych, przez naciągnięcie śrub fundamentowych, na najbardziej naciśniętych przednich, lokalnych szczytach chropowatości profili połączonych powierzchni tworzy się, bardzo dużej wartości, powierzchniowe ciśnienie, powodujące znaczne sprężyste i plastyczne odkształcenia. Odkształcenia stykowe są większe niż odkształcenia objętościowe połączonych elementów.

Obok długiego czasu i dużego kosztu montażu oraz dużej sztywności, dalszymi wadami sztywnych podkładek stalowych są niewystarczająca izolacja drgań i hałasu oraz brak odporności na korozję.

Podkładki polimerowe nie mają tych wad, a przede wszystkim eliminują obróbkę podkładek, fundamentu i podstawy mechanizmu. Doświadczanie eksploatacji wykazało, że posadowienie na podkładkach polimerowych jest nie tylko szybsze i tańsze, lecz także lepsze od posadowienia na podkładkach stalowych [2, 3, 4].

Podkładki polimerowe odlane lub odciśnięte na miejscu bezpośrednio pod mechanizmem dokładnie przylegają do powierzchni oporowych mechanizmu i fundamentu. Wypełniają wszystkie wgłębienia profilu powierzchni, z którymi stykają się (rys. 2b). Przez to uzyskuje się korzystny rozkład ciśnienia na przylegających powierzchniach, jak też dużą wartość współczynnika tarcia utwardzonego polimeru na mechanicznie obrobionej powierzchni stali.

The test have shown [1] that the real faying metal bearing surfaces constitutes less than 1% of the nominal faying surface and depends on the value of the tightening force of foundation bolt (Fig. 1).

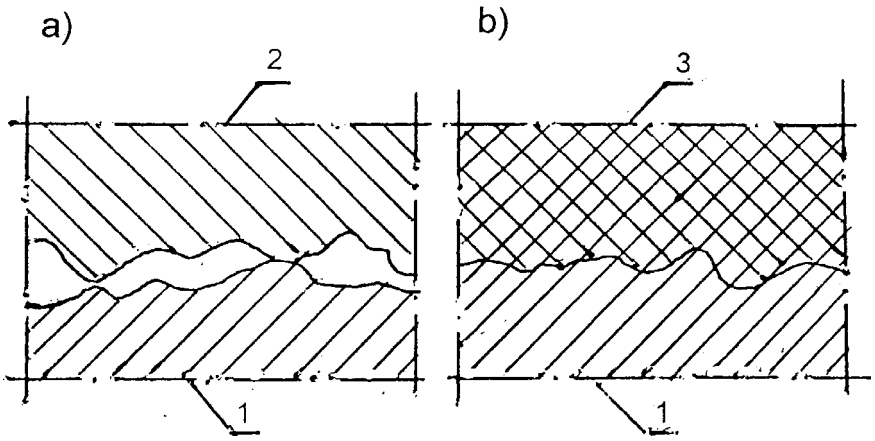
Because of the high rigidity of the steel chocks by tightening of the foundation bolts upon the most pushed forward local peaks of the roughness profile the joined surfaces are developed very high values of superficial pressures causing considerable elastic and plastic strains. The contact strains are greater than the volumetric strains of the joined elements.

Beside long cycle and high cost of assembly and high rigidity, the further defects of the rigid steel chocks are insufficient isolation of vibration and noise and lack of corrosion resistance.

The polymer chocks have not these disadvantages and above all eliminating chocks, foundation and bedplate of machinery machining. Service experience showed that polymer chocking was not only faster and cheaper but also better to steel chocking [2, 3, 4].

The polymer chocks cast or impressing on site directly under the machinery fay to bearing surfaces of the machinery and foundation accurately. They fill all the valley of surfaces profile with which they have contact (Fig. 2b). Thereby on advantageous distribution of the pressures on the faying surfaces as well as a high value of the coefficient of friction of the hardened polymer on the machined steel surfaces are ensured.

Under loads that usually occur during the ships exploitation, in the micro-areas of the steel chocks and foundation faying further plastic strains result above all in the settlement of the rigid steel chocks [1], the



Rys. 2. Schemat przylegania sztywnej podkładki stalowej (a) i podkładki polimerowej (b): 1-fundament, 2-podkładka stalowa, 3-podkładka polimerowa

Fig. 2. Scheme of faying of rigid steel chock /a/ and polymer chock /b/: 1-foundation, 2-steel chock, 3-polymer chock

Przy działaniu obciążeń zwykle występujących w czasie eksploatacji okrętu, w mikroobszarach styku stalowych podkładek i fundamentu, dalsze odkształcenia plastyczne wytwarzają przede wszystkim osiadanie sztywnych podkładek stalowych [1], rozluźnienie złączy śrubowych, relaksację napięcia wstępnego śrub fundamentowych i wybijanie powierzchni oporowych podkładek, półek fundamentu i ramy mechanizmu.

W czasie eksploatacji okrętu następuje też korozyjne zużycie powierzchni oporowych podkładek stalowych [3]. Mikro-obszary naprężone i plastycznie odkształcone na szczytach chropowatości powierzchni przylegania staja się anodami, a wgłębienia chropowatości stają się katodami. Na mikro-obszarach anod występuje zużycie korozyjne. Jeżeli zużycie podkładek stwarza niebezpieczeństwo utraty osiowości mechanizmu, zniszczone podkładki stalowe muszą być usunięte i zastąpione przez nowe podkładki. To jest doskonała okazja do posadawiania mechanizmu okrętowego przez lepsze podkładki polimerowe [3]. Można będzie uprościć i skrócić czas fundamentowania mechanizmu okrętowego. Podkładki polimerowe będą lepiej izolować drgania i hałas i pozwolą na mniejsze napinanie śrub fundamentowych.

Podkładki polimerowe pod mechanizmy siłowni okrętu powinny być obliczane i zaprojektowane. Te obliczenia i projekty często są wykonywane przez producentów mechanizmów lub polimerów. Jeżeli ich nie ma, to mogą być wykonane, jak przedstawiono poniżej, na przykładzie projektów i obliczeń podkładek dla mechanizmów siłowni okrętów projektu 206.

slackness of the bolted joints, relaxation of the initial tightening of the foundation bolts and the beating out of the bearing surfaces of the steel chocks, foundation ledge and machinery frame.

During the ship exploitation may also occur the corrosive wear of the steel chocks bearing surface [3]. The stressed and plastic strained micro-areas upon the faying surface of the roughness peaks make up anodes and valley of the roughness make up cathodes. On micro-areas of anodes occur corrosive wear. If the wear of chocks results in danger of the machinery aligning loss, the destroyed steel chocks have to be removed and replaced by new chocks. This is excellent possibility to the seating of the ship machinery on better polymer chocks [3] The simplifying and shortening the foundations time of ship machinery can be obtained. The polymer chocks shall be better vibration and noise insulation and allowed to much less tightening of the foundation bolts.

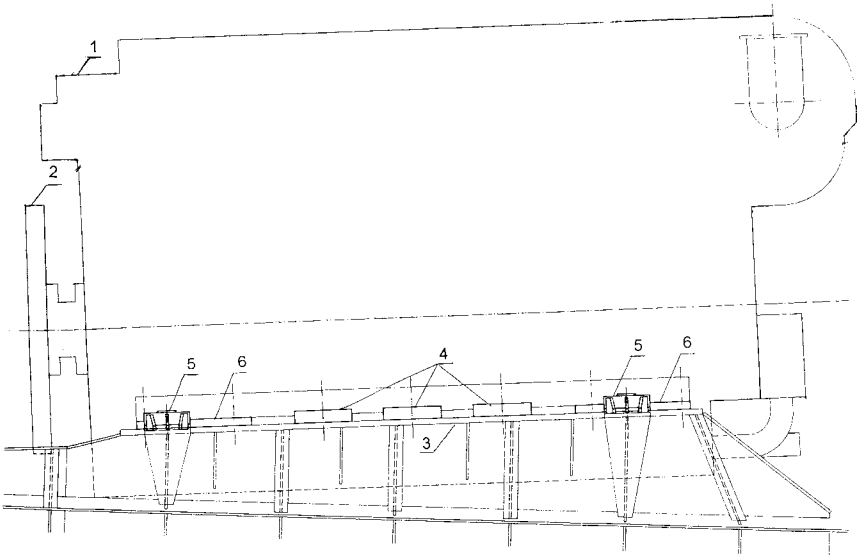
For polymer chocking of ship power plant machinery shall be designed and calculated the polymer chocks for all machinery. Manufacturer of machinery or polymer producer often performed their design and calculations. If not that can be performed as presented below e.g. design and calculations of chocks for the power plant machinery of 206 ships project.

2. Projekt ponownego posadowienia silnika głównego HCP 6ATL25R na podkładkach odlanych z polimeru

W siłowni okrętu projektu 206 są posadowione dwa silniki główne HCP 6ATL25R, lewo- i prawoobrotowy, każdy o masie 11900 kg, mocy 956 kW przy 950 obr/min. Przed posadowieniem na fundamentach silniki są osiowane z przekładniami nawrotno-redukcyjnymi LOHMANN, połączonymi z silnikami przez sprzęgła elastyczne VULCAN (rys.3). Przy osiowaniu silnika z przekładnią dopuszcza się max: przesunięcie osi 0,2 mm i załamanie osi 0,4 mm/m.

2. Design for rechogking of the HCP 6ATL 25R main engine with pourable polymer

In the power plant of the ship design 206 are seating two main engines HCP 6ATL25R, leavo-rotary and dextro-rotary, each had mass of 11900 kg and power of 956 kW by 950 rpm. Before the seating on foundation the engines have been aligning to reversing-reduction gears LOHMANN by VULCAN flexible couplings (Fig.3). During aligning of engine with gear were maximum permissible: axle shift of 0,2 mm and axle breakdown of 0,4 mm/m.



Rys. 3. Posadowienie silnika napędowego HCP 6ATL25R na fundamencie w siłowni okrętu: 1-silnik główny, 2-koło zamachowe silnika połączone przez elastyczne sprzęgło z przekładnią, 3-półka fundamentu, 4-podkładka polimerowa, 5-stoper burtowy, 6-klin stopera

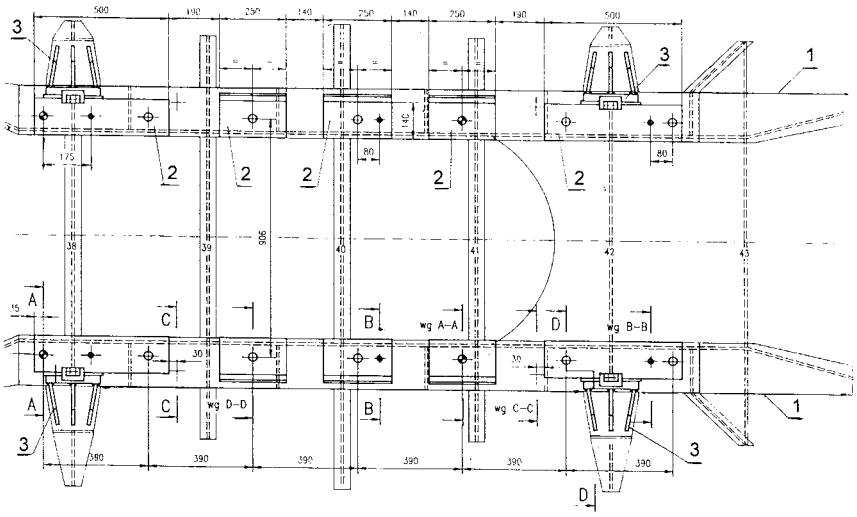
Fig. 3. Seating of propulsion engine HCP 6ATL25S on foundation in ships power plant: 1-main engine, 2-flywhel of engine connected by flexible coupling with gear, 3-foundation ledge, 4-polymer chock, 5-side stopper, 6-vedge

Aktualnie silnik jest posadowiony na fundamencie przez odlane podkładki z polimeru Chockfast Orange, produkowanego przez ITW Philadelphia Resin Corp. PA, USA, dopuszczającego całkowite naprężenie w podkładkach do 4,5 N/mm^2. Nawet podkładki znajdujące się w obszarach stoperów burtowych wykonano z polimeru mimo, iż do niedawna dopuszczano tam tylko podkładki stalowe. Było to możliwe dzięki temu, że kliny stoperów burtowych opierają się bezpośrednio o podstawę silnika, a nie o podkładki.

Przy pierwszym posadowieniu silnika otwory w półkach fundamentu na śruby fundamentowe zostały wykonane według otworów w podstawie silnika. Przy ponownym posadowieniu silnika należy z tych otworów skorzystać (rys. 4).

At present the engine is seated on foundation by cast chocks from polymer Chockfast Orange, produced by ITW Philadelphia Corp. PA, USA. Even a chocks in area of side stopper's are performed as polymer casts thanks to that the wedges of the side stoppers direct put on the engine frame, not on a chocks.

During first seating of engine the holes in foundation ledges for the foundation bolts were drilled according to the holes in engine frame. During reseating of the engine it is necessary to reuse the holes (Fig. 4).



Rys. 4. Fundament silnika głównego. Widok z góry: 1-półka fundamentu, 2-podkładka polimerowa, 3-stoper burtowy
Fig. 4. Foundation of the main engine. Top view: 1-foundation ledge, 2-polymer chock, 3-side stopper, 4-stopper wedge

W aktualnie wykonanych posadowieniach silników zachowano cztery śruby fundamentowe pasowane w metalu ϕ32H7/m6, a można było je wykonać jako pasowane w polimerze. Niżej przedstawiony projekt posadowienie silnika głównego HCL 6ATL25R opracowano dla sprawdzenia możliwości lepszego wykorzystania właściwości podkładek polimerowych.

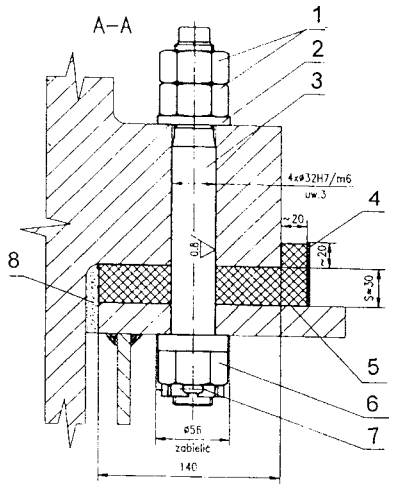
Masa silnika HCL 6ATL25R: W = 11900 kg.

Aktualnie silnik jest posadowiony na fundamencie (rys. 4) przez 4 krańcowe podkładki polimerowe o wymiarach powierzchni oporowej 500x140 mm oraz 6 środkowych podkładek polimerowych o wymiarach powierzchni oporowej 250x140 mm (rys. 5).

At present in the engines foundations were maintained four foundation bolts fitted in metal with diameter of 32H7/m6, but they may be manufactured as fitted in polymer. Presented below design of HCP 6ATL25R main engine foundation were elaborated for verification of the possibility to better use the properties of polymer chocks.

Weight of HCP 6ATL25R engine: W = 11900 kg.

At present the engine is seated on foundation (Fig. 4) by four end polymer chocks with dimensions of bearing surface of 500x140 mm (Fig. 5) and six middle polymer chocks with dimensions of bearing surface of 250x140 mm. Total bearing surface of all

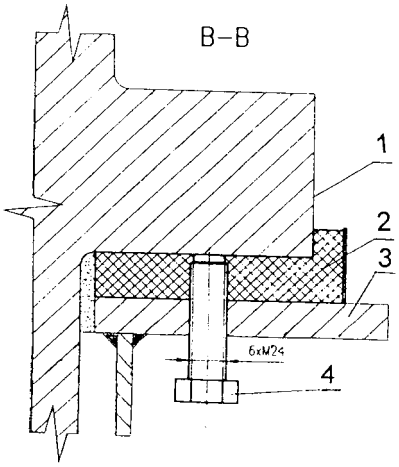


Rys. 5. Pasowana śruba fundamentowa: 1-nakrętka M30, 2-podkładka, 3-śruba pasowana M30, 4-blacha gr. 2 mm, 5-podkładka polimerowa, 6-nakrętka koronowa M30, 7-zawleczka, 8-technologiczne uszczelnienie

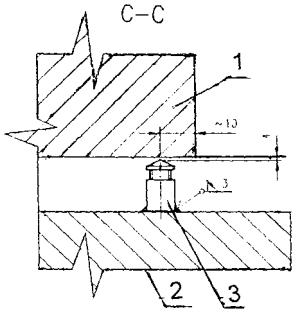
Fig. 5. Foundation fitted bolt: 1-nut M30, 2-washer, 3-fitted bolt M30, 4-plate 2 mm, 5-polymer chock, 6-castellated nut M30, 7-split cotter, 8-technologycal seal

Łączna powierzchnia oporowa wszystkich podkładek jest zmniejszona przez 4 otwory ϕ32 mm na przepuszczenie pasowanych śrub fundamentowych (rys.5), 10 otworów ϕ31,5 mm na przepuszczenie zwykłych śrub fundamentowych (rys. 8) oraz 6 otworów ϕ24 mm na przepuszczenie śrub odciskowych (rys. 6). Cztery kołki pomiarowe (rys. 7) są umieszczone poza podkładkami.

chocks is reduced by four holes with diameter 32 mm for fitted foundation bolts, ten holes with diameter 31,5 mm for trough foundation bolts (Fig. 8) and six holes with diameter 24 mm for jack bolts (Fig. 6). Four measurement pins (Fig. 7) are resided outside of chocks.



Rys. 6. Śruba odciskowa: 1-podstawa silnika, 2-podkładka polimerowa, 3-półka fundamentu, 4-śruba odciskowa M24
Fig. 6. Jack bolt: 1-engine frame, 2-polymer chock, 3-foundation ledge, 4-jack bolt M24



Rys. 7. Kołek pomiarowy: 1-podstawa silnika, 2-półka fundamentu, 3-kołek
Fig. 7. Measurement pin: 1-engine frame, 2-foundation ledge, 3-pin

Łącznie powierzchnia oporowa wszystkich podkładek polimerowych S_{wc}:

The bearing surface of all polymer chocks S_{wc}:

$$S_{wc} = 4(500 \cdot 140) + 6(250 \cdot 40) - 4 \cdot \frac{\pi \cdot 32^2}{4} - 10\frac{\pi \cdot 31{,}5^2}{4} - 6 \cdot \frac{\pi \cdot 24^2}{4} = 476283\ mm^2 \quad (1)$$

Siła nacisku na podkładki od ciężaru silnika F_w:

Pressure force on chocks from engine deadweight F_w:

$$F_w = W \cdot g = 11900 \cdot 9{,}81 = 116739\ N \quad (2)$$

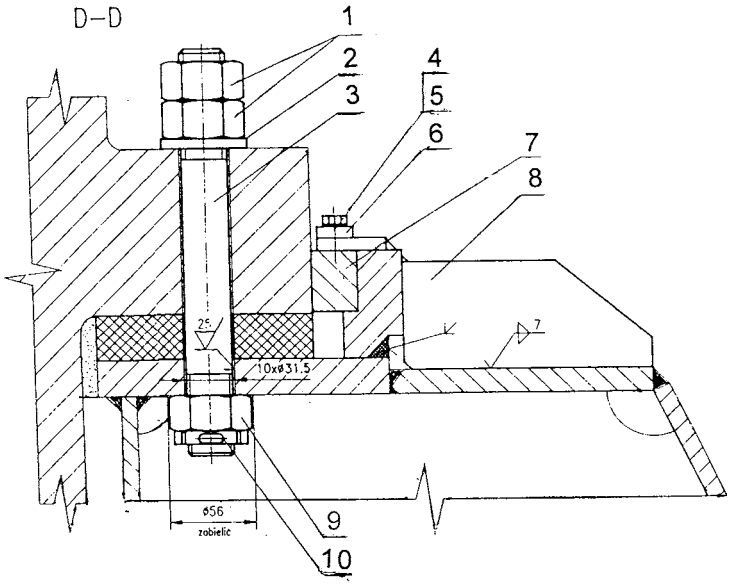
gdzie: W - masa silnika, g – przyśpieszenie ziemskie.

where: W – weight of engine, g – acceleration of gravity.

Naprężenie na podkładki od ciężaru silnika p_{wc}:

Stress on chocks from engine deadweight p_{wc}:

$$p_{wc} = \frac{F_w}{S_{wc}} = \frac{116739}{476283} = 0{,}245\ N/mm^2 \quad (3)$$



Rys.8. Fundamentowe złącze śrubowe w obszarze stopera burtowego: 1-nakrętka M30, 2-podkładka, 3-śruba dwustronna, 4-śruba M10x35, 5-podkładka sprężynowa, 6-podkładka, 7-klin stopera, 8-stoper burtowy, 9-nakrętka koronowa M30, 10-zawleczka

Fig.8. Foundation bolted joint in side stoppers area: 1-nut M30, 2-washer, 3-etud bolt, 4-bolt MM10x35, 5-spring washer, 6-washer, 7-stopper wedge, 8-side stopper, 9-castellated nut M30, 10-split cotter

Przepisy Germanischer Lloyd [5] dopuszczają dla podkładek polimerowych $p_{wc\,gr}$ = 0,7 N/mm^2, a więc łączna powierzchnia oporowa podkładek może być znacznie mniejsza i wynosić:

$$S_{wc} = \frac{F_w}{p_{wc\,gr}} = \frac{116739}{0{,}7} = 166770\ mm^2 \qquad (4)$$

Producent silników MAN B& W [6] stosuje na podkładki polimerowe naprężenie 0,45 N/mm^2 pochodzące od ciężaru okrętowego silnika napędowego. Jest to kolejna zachęta do zmniejszenia wymiarów podkładek polimerowych przy posadawianiu silnika głównego HCP 6ATL25R na fundamencie w siłowni okrętu.

W związku z tym w niniejszym projekcie przyjęto wymiary podkładek krańcowych 460x140 mm oraz podkładek środkowych 100x140 mm. Przy tych wymiarach uzyskuje się łączną powierzchnię oporową wszystkich podkładek S_{wc}=327883 mm^2, i naprężenie na podkładki pochodzące od ciężaru silnika p_{wc}=0,36 N/mm^2.

W aktualnie zrealizowanym posadowieniu silnika HCP 6ATL25R na podkładkach zużycie polimeru Chockfast Orange wyniosło 75 kg. Przy proponowanym w projekcie zmniejszeniu wymiarów podkładek zużycie polimeru powinno się ograniczyć do ok. 55 kg.

Przy zmianie wymiarów podkładek pozostawiono oryginalne zwykłe śruby fundamentowe, natomiast pasowane śruby fundamentowe zastąpiono zwykły-

Rules of the Germanischer Lloyd [5] allow for polymer chocks $p_{wc\,gr}$ = 0.7 N/mm^2, so that the bearing surface of all polymer chocks can be much smaller and carry out:

$$S_{wc} = \frac{F_w}{p_{wc\,gr}} = \frac{116739}{0{,}7} = 166770\ mm^2 \qquad (4)$$

The manufacturer of the MAN B&W engine [6] using 0.45 N/mm^2 stress on polymer chocks from marine propulsion engine deadweight. It is next incitement to reduce the dimensions of polymer chocks during seating HCP 6ATL25R main engine on foundation in ship power plant.

In connection with this, in present design were received the dimensions of end polymer chocks on 460x140 mm and for middle polymer chocks on 100x140 mm. By this dimensions have been obtained the bearing surface of all chocks of S_{wc} = 327883 mm and stress on chocks from engine deadweight of p_{wc}=0.36 N/mm^2.

At present realized seating of HCP 6ATL25R engine on chocks, the consumption of Chockfast Orange polymer was 75 kg. By proposed reduction of chocks dimensions the consumption of polymer shall be limited to about 55 kg.

During change of chocks dimensions the through foundation bolts were remained, but the fitted bolts were replaced by through bolts. Arose in this way the gap in holes for fitted bolts shall be fulfilled with po-

mi śrubami. Powstały w ten sposób luz w otworach na śruby pasowane będzie zapełniany polimerem i uzyska się śruby pasowane w polimerze. Daje to dalszą oszczędność kosztów na obróbkę otworów i trzonów śrub pasowanych. W efekcie silnik będzie mocowany do fundamentu 14 śrubami fundamentowymi M30 o średnicy rdzenia gwintu D_1=25,453 mm i przekroju rdzenia gwintu S_r=508,7 mm^2.

Przy posadowieniu silników okrętowych przez podkładki polimerowe siła napięcia wszystkich śrub fundamentowych F_t powinna mieć wartość $F_t = 2.5F_w$ [3]. W niniejszym projekcie przyjęto:

$$F_t = 5F_w = 5 \cdot 116739 = 583685 \text{ N} \quad (5)$$

Siła napięcia pojedynczej śruby fundamentowej F_{ti}:

$$F_{ti} = \frac{F_t}{n} = \frac{583685}{14} = 41692 \ N \quad (6)$$

Naprężenie p_t w śrubie fundamentowej:

$$p_t = \frac{F_{ti}}{s_r} = \frac{41692}{508,7} = 82 \ N/mm^2 \quad (7)$$

Przy aktualnym posadowieniu silnika HCP 6ATL25R napina się śruby fundamentowe do naprężenia p_t=340 N/mm^2, natomiast w przedstawionym projekcie naprężenie śrub fundamentowych jest znacznie mniejsze. Pozwala to zastosować do zamocowania silnika słabsze śruby, np. śruby M24 z D_1=20,752 mm i S_r=338 mm^2. Przy napinaniu tych śrub wystąpi w nich naprężenie p_t=123 N/mm^2, co zmniejszy możliwość samoodkręcania się nakrętek.

Zgodnie z przepisami Germanischer Lloyd [5] nakrętki śrub fundamentowych powinny być zablokowane, gdy naprężenie z wstępnego napięcia śrub, obliczone dla przekroju rdzenia gwintu, wynosi mniej niż 150 N/mm^2 dla silników szybko- i średnioobrotowych. Tak jest w niniejszym projekcie, stąd oryginalne zablokowania nakrętek śrub przeciwnakrętkami (rys. 8) powinny być utrzymane.

Zgodnie z przepisami Germanischer Lloyd [5] moment obrotowy napinania śrub fundamentowych przy użyciu klucza dynamometrycznego oblicza się z wzoru:

$$T = \frac{F_{ti} \cdot D_0}{5000} = \frac{41692 \cdot 30}{5000} = 250 \ N \cdot m \quad (8)$$

Całkowite naprężenie p_t w podkładkach polimerowych:

$$p_t = p_{we} + \frac{F_t}{S_{wc}} = 0,36 + \frac{583685}{327883} = 2,14 \ N/mm^2 \quad (9)$$

Aktualnie zastosowany polimer Chockfast Orange dopuszcza całkowite naprężenie w podkładkach do 4,5 N/mm^2 [7], co w niniejszym projekcie nie będzie

lymer and the bolts fitted in polymer would be obtained. It results in further saving of cost for machining of holes and bolts shanks. In effect the engine shall be fasted to foundation by fourteen bolts M30 with diameter of D=25.453 mm and stress area of thread of S_r=508,7 mm^2.

At seating of the ships engine by polymer chocks the force of tightening all foundation bolts F_t shall have the value of $F_t = 2.5F_w$ [3]. In present design were accepted that

$$F_t = 5F_w = 5 \cdot 116739 = 583685 \text{ N} \quad (5)$$

Force of individual foundation bolt tightening F_{ti}:

$$F_{ti} = \frac{F_t}{n} = \frac{583685}{14} = 41692 \ N \quad (6)$$

Stress p_t, from tightening of foundation bolt M30:

$$p_t = \frac{F_{ti}}{s_r} = \frac{41692}{508,7} = 82 \ N/mm^2 \quad (7)$$

By actual seating of HCP 6ATL25R engine the foundation bolts were tightened to stress p_t=340 N/mm^2, but in presented design the stress of foundation bolts is much smaller. This allow to use for fasten of engine the weaker bolts, e.g. M24 bolts with D_1=20.752 mm and S_r=338 mm^2. Tightening of this bolts will rise the stress up p_t=123 N/mm^2, what reduce the possibility at undo a nut.

According to the Germanischer Lloyd rules [5] the locking of the nuts are required if the bolted joint prestress, calculated on the thread root cross-sectional area is less than 150 N/mm^2 for high and medium speeds engines. Such solution is in present design, so the original locking of bolts nuts with lock-nuts (Fig. 8) shall be remained.

According to the Germanischer Lloyd rules [5] the tightening torque of foundation bolts if using a torque wrench is calculated from formula:

$$T = \frac{F_{ti} \cdot D_0}{5000} = \frac{41692 \cdot 30}{5000} = 250 \ N \cdot m \quad (8)$$

Total stress p_t, on polymer chocks:

$$p_t = p_{we} + \frac{F_t}{S_{wc}} = 0,36 + \frac{583685}{327883} = 2,14 \ N/mm^2 \quad (9)$$

At present used Chockfast Orange polymer permits total stress on chocks up to 4.5 N/mm^2 [7], which in present design will not be employed. It has been

wykorzystane. Dlatego proponuje się wykonywać podkładki z polimeru EPY, produkcji Marine Service Jaroszewicz, Szczecin, Polska, który dopuszcza całkowite naprężenie w podkładkach do 3,5 N/mm^2 i jest znacznie tańszy od polimeru Chockfast Orange.

3. Projekt ponownego posadowienia zespołu prądotwórczego ZP-125 na podkładkach odlanych z polimeru

Masa zespołu prądotwórczego ZP-125: W=1800 kg.

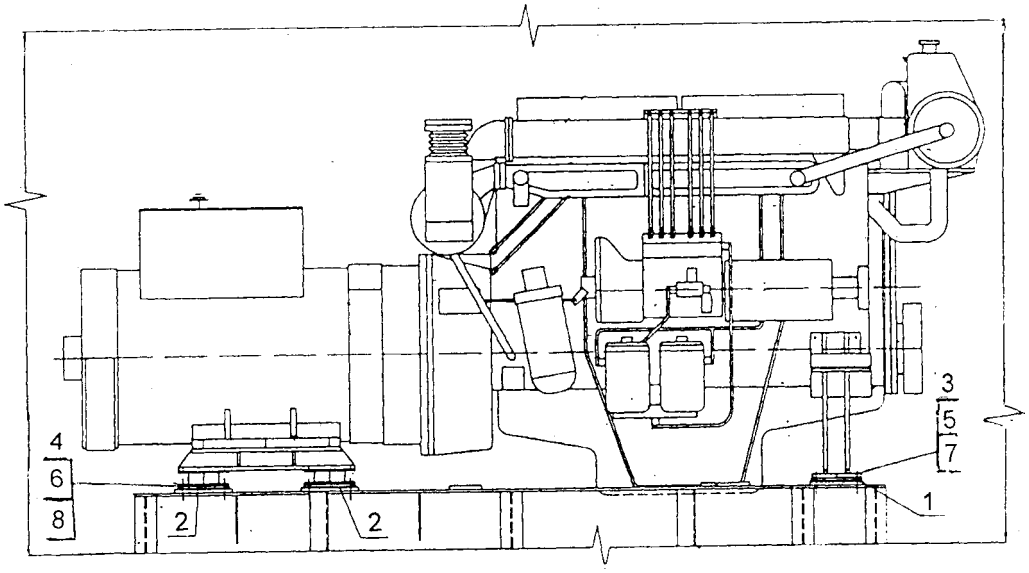
Aktualnie zespół prądotwórczy ZP-125 (rys. 9) jest posadawiany na fundamencie (rys. 10) przez sześć sztywnych podkładek stalowych, w tym dwóch o wymiarach, jak na rys. 11a i czterech o wymiarach, jak na rys. 11b.

proposed to use the chocks manufactured with polymer EPY, produced by Marine Service Jaroszewicz, Szczecin, Poland, which permits total stress in chocks up to 3.5 N/mm^2 and is much cheaper.

3. Design for rechocking of the ZP-125 diesel generator set with pourable polymer

Deadweight of diesel generator set ZP-125: W=1800 kg.

At present diesel generator set ZP-125 (Fig. 9) have been chocked on the foundation (Fig. 10) by six rigid steel chocks, in which two have the dimensions as on Fig. 11a, and four have the dimensions as on Fig. 11b.



Rys.9. Posadowienie na fundamencie zespołu prądotwórczego ZP-125: 1-stalowa podkładka 10x140x160, 2-stalowa podkładka 10x60x140, 3-śruba fundamentowa M12x65, 4-śruba fundamentowa M10x65, 5-nakrętka M12, 6-nakrętka M10, 7-podkładka sprężynowa 12.2, 8-podkładka sprężynowa 10.2

Fig.9. Seating of diesel generator set ZP-125 on foundation in ships power plant: 1-steel chock 10x140x160, 2-steel chock 10x60x140, 3-foundation bolt M12x65, 4-foundation bolt M10x65, 5-nut M12, 6-nut M10, 7-spring washer 12.2, 8-spring washer 10.2

Powierzchnia oporowa wszystkich podkładek stalowych S_{wcs}:

$$S_{wcs} = 2(140 \cdot 160 - 4\frac{\pi \cdot 13^2}{4}) + 4(60 \cdot 140 - 2\frac{\pi \cdot 11^2}{4}) = 76580\ mm^2 \qquad (10)$$

Siła nacisku na podkładki od ciężaru zespołu prądotwórczego F_w:

$$F_w = W \cdot g = 1800 \cdot 9{,}81 = 17658\ N \qquad (11)$$

Naprężenie na podkładki stalowe od ciężaru zespołu prądotwórczego p_{wcs}:

$$p_{wcs} = \frac{F_w}{S_{wcs}} = \frac{17658}{76580} = 0{,}23\ N/mm^2 \qquad (12)$$

The total bearing surfaces of all steel chocks S_{acs}:

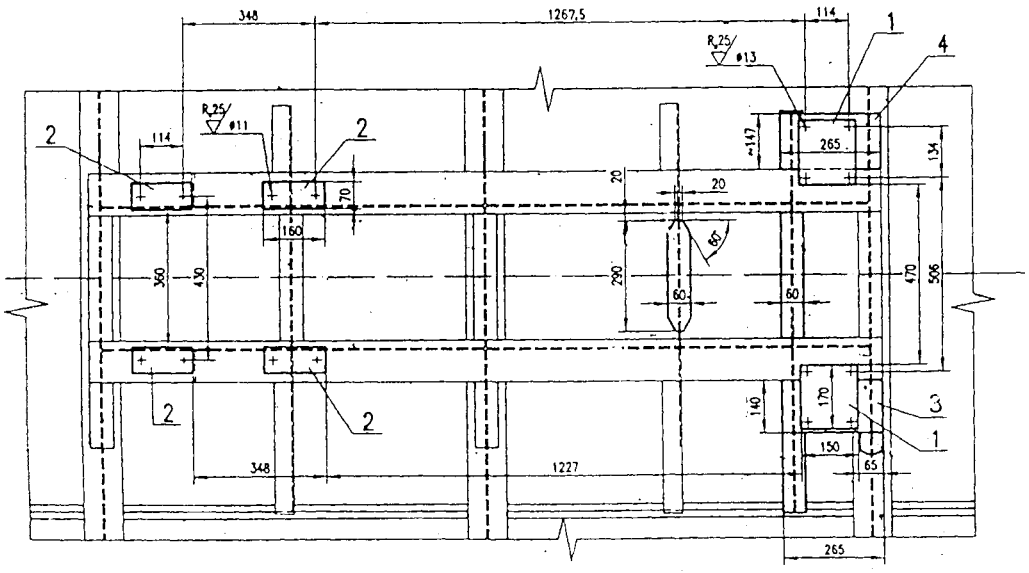
$$S_{wcs} = 2(140 \cdot 160 - 4\frac{\pi \cdot 13^2}{4}) + 4(60 \cdot 140 - 2\frac{\pi \cdot 11^2}{4}) = 76580\ mm^2 \qquad (10)$$

Force of pressure on chocks from diesel generator set deadweight F_w:

$$F_w = W \cdot g = 1800 \cdot 9{,}81 = 17658\ N \qquad (11)$$

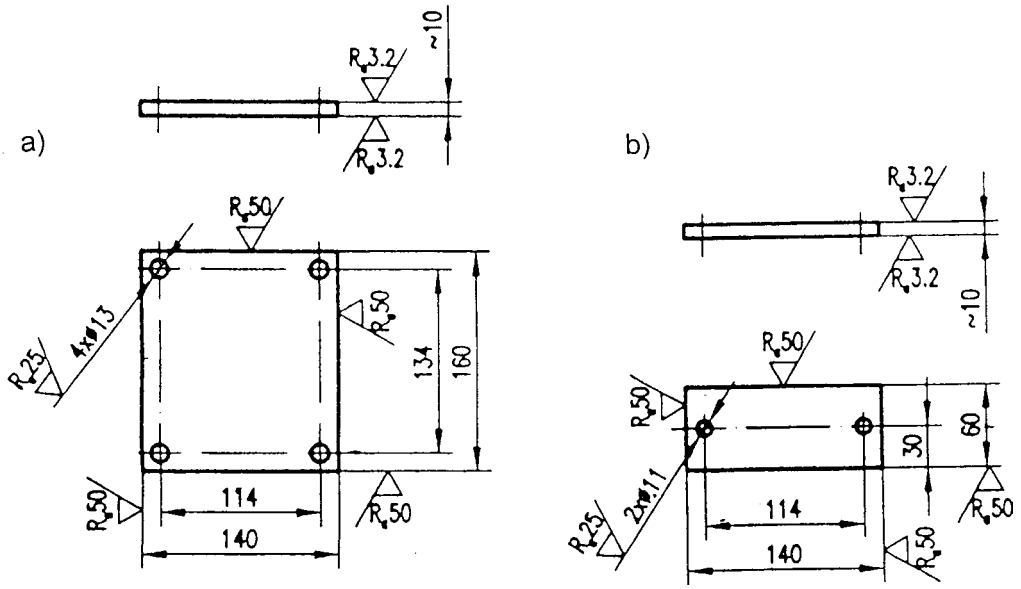
Stress on steel chocks from diesel generator set deadweight p_{wcs}:

$$p_{wcs} = \frac{F_w}{S_{wcs}} = \frac{17658}{76580} = 0{,}23\ N/mm^2 \qquad (12)$$



Rys.10. Fundament zespołu prądotwórczego ZP-125: 1-blacha 12x150x170, 2-blacha 12x70x160, 3-blacha 8x140x265, 4-blacha 8x147x265

Fig.10. Foundation of diesel generator set. Top view: 1-steel sheet 12x150x170, 2-steel sheet 12x70x160, 3-steel sheet 8x140x265, 4-steel sheet 8x147x265



Rys. 11. Stalowe podkładki fundamentowe zespołu prądotwórczego ZP-125: a) podkładka 10x140x160, b) podkładka 10x60x140

Fig. 11. Foundation steel chocks of the ZP-125 diesel generator set: 1-chock 10x140x160, 2-chock 10x60x140

Przepisy Germanischer Lloyd [5] dopuszczają dla podkładek polimerowych p_{wcp}=0,7 N/mm^2, a więc łączna powierzchnia oporowa podkładek polimerowych może być znacznie mniejsza i wynosić:

$$S_{acp} = \frac{F_w}{p_{wc\,gr.}} = \frac{17658}{0{,}7} = 25226\ mm^2 \qquad (13)$$

Rules of the Germanischer Lloyd [5] approve for polymer chocks p_{wcp}=0,7 N/mm^2, so that the bearing surface of all polymer chocks can be much smaller as for steel chocks and carry out:

$$S_{acp} = \frac{F_w}{p_{wc\,gr.}} = \frac{17658}{0{,}7} = 25226\ mm^2 \qquad (13)$$

Ze względu technologicznego przyjęto posadowienie zespołu prądotwórczego ZP-125 na fundamencie przez osiem podkładek polimerowych o wymiarach 10x40x140. W podkładkach przyjęto większą średnicę otworów (20 mm) na przepuszczenie śrub fundamentowych ze względu na zastosowanie opasek ze styropianu chroniących śruby fundamentowe przed zalaniem ich polimerem przy kształtowaniu podkładek.

Powierzchnie oporowe wszystkich podkładek polimerowych S_{acp}:

$$S_{acp} = 8 \cdot (40 \cdot 140 - 2\frac{\pi \cdot 20^2}{4}) = 39776\ mm^2 \quad (14)$$

Naprężenie od ciężaru zespołu, prądotwórczego na podkładki polimerowe p_{wcp}:

$$p_{wcp} = \frac{F_w}{S_{acp}} = \frac{17658}{39776} = 0{,}44\ N/mm^2 \quad (15)$$

Zbliżone naprężenie (0,45 N/mm^2) na podkładki polimerowe od ciężaru okrętowego silnika napędowego diesla stosuje producent silników MAN B&W [6].

Przy zmianie podkładek pozostawiono oryginalne śruby fundamentowe zespołu prądotwórczego ZP-125;

- 8 śrub M12x65, D_{r1}=10,106 mm, S_{r1}=80,173 mm^2,
- 8 śrub M10x65, D_{r2}= 8,376 mm, S_{r2}=55,073 mm^2.

Przyjmuje się, że przy posadawianiu silników okrętowych przez podkładki stalowe siła napięcia wszystkich śrub fundamentowych F_{ts} powinna mieć wartość min 10 razy większą od ciężaru silnika F_{ts}=10F_w, a przy podkładkach polimerowych F_{tp}=2,5F_w [3]. W niniejszym projekcie przyjęto F_{tp} = 5F_w.

Siła napięcia wszystkich śrub fundamentowych przy podkładkach polimerowych F_{tp}:

$$F_{tp} = 5F_w = 5 \cdot 17658 = 88290\ N \quad (16)$$

Siła napięcia pojedynczej śruby fundamentowej przy podkładkach polimerowych F_{tpi}:

$$F_{tpi} = \frac{F_{tp}}{n} = \frac{88290}{16} = 5518\ N \quad (17)$$

Naprężenie p_{b1} w śrubie fundamentowej M12x65:

$$P_{b1} = \frac{F_{tpi}}{S_{r1}} = \frac{5518}{80{,}173} = 69\ N/mm^2 \quad (18)$$

Naprężenie p_{b2} w śrubie fundamentowej M10x65:

$$P_{b2} = \frac{F_{bpi}}{S_{r2}} = \frac{5518}{55{,}073} = 100\ N/mm^2 \quad (19)$$

On account of the technology the seating of diesel generator set on the foundation by eight polymer chocks with dimensions 10x40x140 were accepted. On account of application of foamed polystyrene bands to polymer protection of the foundation bolts in chocks, the greater diameter of hole (20 mm) for foundation bolts were accepted.

The total bearing surface of all polymer chocks S_{acp}:

$$S_{acp} = 8 \cdot (40 \cdot 140 - 2\frac{\pi \cdot 20^2}{4}) = 39776\ mm^2 \quad (14)$$

Stress on polymer chocks from diesel generator set deadweight p_{wcp}:

$$p_{wcp} = \frac{F_w}{S_{acp}} = \frac{17658}{39776} = 0{,}44\ N/mm^2 \quad (15)$$

Similar stress (0,45 N/mm^2) from marine diesel propulsion engine deadweight on polymer chocks was used by engine manufacturer MAN B&W [6].

During exchange of chocks, the original foundation bolts of diesel generator set ZP-125 were remained:

- 8 bolts M12x65, D_{r1}=10.106 mm, S_{r1}=80.173 mm^2,
- 8 bolts M10x65, D_{r2}= 8.376 mm, S_{r2}=55.073 mm^2.

It were accepted that by seating of the marine engine by steel chocks, the tightening force F_{ts} of all foundation bolts should value of min. ten times greater than the deadweight of engine F_{ts}=10F_w, and by polymer chocks only F_{tp}=2.5F_w [3]. In this solution F_{tp} = 5F_w were accepted.

Force of all foundation bolts tightening in case of polymer chocks F_{tp}:

$$F_{tp} = 5F_w = 5 \cdot 17658 = 88290\ N \quad (16)$$

Force of individual bolt tightening in case of polymer chock F_{tpi}:

$$F_{tpi} = \frac{F_{tp}}{n} = \frac{88290}{16} = 5518\ N \quad (17)$$

Stress p_{b1} in foundation bolt M12x65:

$$P_{b1} = \frac{F_{tpi}}{S_{r1}} = \frac{5518}{80{,}173} = 69\ N/mm^2 \quad (18)$$

Stress p_{b2} in foundation bolt M10x65:

$$P_{b2} = \frac{F_{bpi}}{S_{r2}} = \frac{5518}{55{,}073} = 100\ N/mm^2 \quad (19)$$

Zgodnie z przepisami Germanischer Lloyd [5] zablokowania nakrętek wymaga się, jeżeli złącza śrubowe mają wstępnie napięte śruby, obliczone dla przekroju poprzecznego rdzenia gwintu, mniej niż 150 N/mm^2, dla silników szybko- i średnio-obrotowych. Tak jest w niniejszym projekcie ponownego posadowienia zespołu prądotwórczego ZP-125 na podkładkach odlanych z polimeru.

W oryginalnym posadowieniu zespołu prądotwórczego ZP-125 na sztywnych podkładkach stalowych, nakrętki śrub fundamentowych są zabezpieczone przed odkręcaniem się za pomocą podkładek sprężynujących. To zabezpieczenie nakrętek może być utrzymane także przy posadowieniu zespołu prądotwórczego ZP-125 na podkładkach odlanych z polimeru.

Zgodnie z przepisami Germanischer Lloyd [5] moment obrotowy napinania śruby fundamentowej przy użyciu klucza dynamometrycznego oblicza się ze wzoru:

- dla śrub fundamentowych M12x65:

$$T_1 = \frac{F_{tpi} \cdot D_0}{5000} = \frac{5518 \cdot 12}{5000} = 13{,}24\ N \cdot m \qquad (20)$$

- dla śrub fundamentowych M10x65 moment obrotowy napinania wyniesie 11,04 N·m.

Całkowite naprężenie p_{tcp} w podkładkach polimerowych:

$$p_{tcp} = p_{wcp} + \frac{F_{tp}}{S_{scp}} = 0{,}44 + \frac{88290}{39776} = 2{,}66\ N/mm^2 \qquad (21)$$

Przy tym całkowitym naprężeniu na podkładki polimerowe można zastosować polimery: Chockfast Gray produkcji ITW Philadelphia Resin Corp, PA, USA [7], Epocast 36 produkcji H.A. Springer, Kiel, Niemcy [6] lub EPY produkcji Marine Service Jaroszewicz, Szczecin, Polska [8], które dopuszczają całkowite naprężenie podkładek polimerowych do 3.5 N/mm^2.

Zespół prądotwórczy ZP-125 ma utrzymane dokładnie osiowanie silnika i prądnicy, lecz jest ono kontrolowane przez podkładki między każdym składnikiem i fundamentem, rys. 3. Podkładki nie muszą dokładnie utrzymać podniesienia zespołu, ponieważ kompletny zespół prądotwórczy jest korelowany tylko z kablami, przewodami paliwa, wody chłodzącej, powietrza i spalin, które wszystkie są w pewnym stopniu giętkie. Mniej krytyczne osiowanie mechanizmu pozwala na większe obciążenie podkładek, np. podkładki z polimeru Chockfast Gray mogą być obciążane do 5,6 N/mm^2 [3].

According to the Germanischer Lloyd rules [5] locking of nuts is required if prestress bolts in the bolted joints to stress, calculated on the thread root cross-sectional area is less than 150 N/mm^2 for high and medium speed engines. That condition is fulfilled in present solution for re-chocking with pourable polymer of diesel generator set ZP-125.

In original chocking of the ZP-125 diesel generator set with the rigid steel chocks, the foundation bolts nuts were locked with the spring washers. This locking of nuts may be remained also in case of chocking of diesel generator set ZP-125 with pourable polymer.

According to the Germanischer Lloyd rules [5] the tightening torque of foundation bolt if using a torque wrench were calculated from formula:

- for foundation bolts M12x65:

$$T_1 = \frac{F_{tpi} \cdot D_0}{5000} = \frac{5518 \cdot 12}{5000} = 13{,}24\ N \cdot m \qquad (20)$$

- for foundation bolts M10x65 the tightening torque: T_2 = 11.04 N·m

Total stress p_{tcp} on polymer chocks:

$$p_{tcp} = p_{wcp} + \frac{F_{tp}}{S_{scp}} = 0{,}44 + \frac{88290}{39776} = 2{,}66\ N/mm^2 \qquad (21)$$

For this total stress on the polymer chocks, that could be made of following polymer: Chockfast Gray produced by ITW Philadelphia Resin Corp. PA, USA [7], Epocast 36 produced by H.A. Springer, Kiel, Germany [6] or EPY produced by Marine Service Jaroszewicz, Szczecin, Poland [8], which allow total stress value on the polymer chocks up to 3.5 N/mm^2.

The ZP-125 diesel generator set has the alignment between the engine and generator maintained accurately, but this is controlled by the chocking between each component and the foundation, Fig. 3. The chocks does not have to maintain an accurate elevation of set because the complete generator set has to correlate only with cables, fuel, water cooling, air and exhaust lines, all of which have a degree of flexibility. Less-critical alignment of machinery permits higher loading of chocks, e.g. the chocks made of polymer Chockfast Gray may be loaded up to 5.6 N/mm^2 [3].

4. Wnioski

Projektowanie zmiany posadowienia mechanizmów siłowni okrętowej na podkładki polimerowe ujmuje wykorzystanie obciążenia dopuszczalnego dla podkładek polimerowych i zmniejszenie wstępnego naciągu śrub fundamentowych, co zwiększa korzyści z ponownego posadowienia mechanizmów siłowni okrętowej na podkładkach polimerowych.

Projektowanie ponownego posadowienia mechanizmów siłowni okrętowej na podkładkach polimerowych nie jest skomplikowane przy stosowaniu odpowiednich przepisów Germanischer Lloyd [5].

4. Conclusions

The design of polymer rechocking of ships power plant machinery put to a good use loading permitted for polymer chocks and decreases of foundation bolts pre-tensioning what in total increases a profit from polymer rechocking of ships power plant machinery.

The design of polymer rechocking of ships power plant machinery is not complicated with applying of suitable rules the Germanischer Lloyd [5].

5. References

[1] Grudziński K., Jaroszewicz W., Lorkiewicz J.: *Chemohardened plastic chocks in ship machinery foundations*. Budownictwo Okrętowe 1986, nr 11.

[2] Kochan N.M., Drut W.I.: *Primenenie polimernych klejev v sudoremonte*. Transport. Moskva 1988.

[3] Wilson J. M.: *Marine epoxy resin chocks. Marine Technology*, Vol.2l, No 1, January 1984.

[4] *Chocking large engine simplified*. Marine Engineer and Naval Architect, February 1970.

[5] Germanischer Lloyd. *Regulation for the seating of propulsion plant*. Hamburg, April 1995.

[6] MAN B&W. *Foundation rigid seating L+V 32/40 Marine*. Status 03.1996.

[7] ITW Philadelphia Resin Corp. *Chockfast general guidelines for marine designers*. Technical Bulletin No 692A. Montgomeryyille, PA, USA 2000.

[8] Grudziński K., Jaroszewicz W.: *Certyfikat ISO 9002 dla polskiego tworzywa EPY i posadawiania na nim silników okrętowych*. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska. Styczeń 1995.

Kmdr dr hab. inż. Leszek Piaseczny, prof. nadzw. AMW

Akademia Marynarki Wojennej
Ul. J. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia
Tel. (0-58) 626-28-92, Fax (0-58) 626-25-03
e-mail: lpias@amw.gdynia.pl

Mieczysław DZIUBIŃSKI

KONCEPCJA DIAGNOSTYKI WYPOSAŻENIA ELEKTRYCZNEGO SAMOCHODU

CONCEPTION OF CAR ELECTRIC EQUIPMENT DIAGNOSTICS

W artykule przedstawiono koncepcje diagnostyki funkcjonalnej alternatora, wykorzystującej procedury diagnostyczne. Opracowany układ badawczy umożliwia symulacje uszkodzeń i weryfikacje przydatności poszczególnych sygnałów do celów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka funkcjonalna, procedury diagnostyczne,wyposażenie elektryczne.

The conception of alternator functional diagnostics, making use of diagnostic procedures, is presented in the paper. The worked out test unit makes it possible to simulate faults and verify the usability of particular signals in diagnostics.

Keywords: functional diagnostics, diagnostics procedures, electric equipment.

1. Wprowadzenie

Stan techniczny danego obiektu można oceniać dokonując demontażu i pomiarów jego części lub bez demontażu, wnioskując o zużyciu lub uszkodzeniu na podstawie analizy parametrów elektrycznych. Kwalifikację części przez pomiar ich zużycia stosuje się w niektórych procesach naprawczych (alternator, rozrusznik) [1,2] przy weryfikacji części pochodzących z rozebranych już obiektów. W procesie eksploatacji pojazdu z reguły wykorzystuje się metodę wnioskowania na podstawie objawów. Decydują o tym dwa czynniki: po pierwsze demontaż układu elektrycznego i pomiary jego części trwałyby zbyt długo i byłyby bardzo pracochłonne. Po drugie każda rozbiórka i ponowny montaż powodują wydłużenie czasu naprawy danego urządzenia elektrycznego pojazdu.

Badania diagnostyczne są odrębną grupą badań, mającą na celu ocenę stanu technicznego pojazdu i jego zespołów elektrycznych bez ich demontażu lub podczas częściowego demontażu, nie naruszającą przy tym zasadniczego funkcjonowania ocenianego obiektu.

Istota diagnostyki polega na wykorzystaniu dwóch charakterystycznych cech urządzeń technicznych:

- każde urządzenie ma zdeterminowaną strukturę, zależną od jego właściwości użytkowych, którą stanowi zbiór tworzących je elementów konstrukcyjnych, uporządkowanych w taki sposób, by urządzenie to wypełniało określoną funkcje.
- każde urządzenie techniczne podczas funkcjonowania wykonuje określone procesy, nazywane procesami wyjściowymi.

1. Inroduction

The technical condition of a given object can be evaluated by disassembling it and measuring its parts, or by assessing its wear and faults on the basis of electric parameters analysis without any disassembling. The classification of parts on the grounds of their wear assessment is used in some repair processes (alternator, starter) [1, 2] together with the verification of parts coming from objects already taken to pieces. In vehicle operation process, the symptomatic method of evaluation is widely used. Two factors are decisive here: firstly, electric system disassembly and its parts measurement would be time and work consuming. Secondly, disassembling and again assembling make the repair time of vehicle electric apparatus longer.

Diagnostic tests make a separate group of tests whose aim is assess vehicle and its electric units technical condition without any disassembly or without only partial disassembly. Thus, they do not interfere with the object under examination regular functioning.

The diagnostics chief point lies in the use of two characteristic features of technical devices:

- each device has a determined structure, dependent on its usage properties, being a collection of its construction elements sequenced in such a way that the device can perform a particular function,
- each technical device performs particular processes, called output processes, during its functioning.

Struktura wyposażenia elektrycznego pojazdu determinuje więc jego stan techniczny, a parametry struktury są parametrami stanu technicznego.

Procesy wyjściowe zachodzące podczas pracy urządzeń elektrycznych można podzielić na robocze - wynikające bezpośrednio z realizacji funkcji urządzenia oraz towarzyszące, powstające jako wtórny efekt procesów roboczych. Procesy wyjściowe mogą być scharakteryzowane ilościowo zbiorem parametrów wyjściowych.

Parametr wyjściowy może zostać uznany za parametr diagnostyczny, jeżeli spełnia następujące warunki:

- jednoznaczności,
- każdej zmianie wartości parametru struktury odpowiada zdeterminowana zmiana wartości parametru wyjściowego,
- dostatecznej rozpiętości,
- oczekiwanej zmianie parametrów struktury odpowiada możliwie duży zakres zmian parametru wyjściowego,
- dostępności,
- zmiany parametru wyjściowego muszą być łatwo mierzalne.

Identyfikacja stanu technicznego obiektu wymaga podjęcia decyzji czy dane urządzenie elektryczne nadaje się do dalszej eksploatacji czy też wymaga regulacji lub naprawy. W przypadku wykrycia niesprawności identyfikacja powinna umożliwić jej lokalizację, tzn. dokonać stwierdzenia, który z elementów obiektu jest niesprawny.

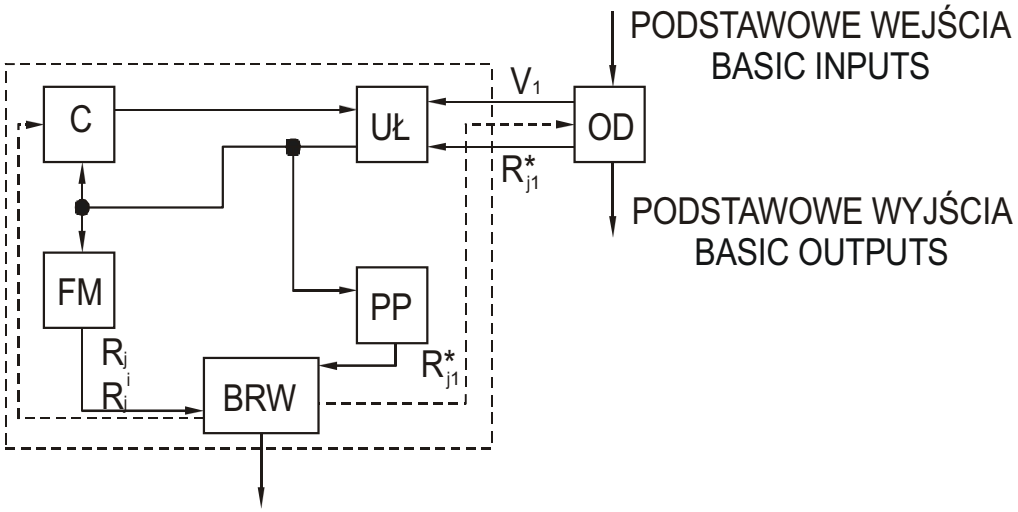
Thus, the structure of vehicle electric equipment determines vehicle technical condition, and structure parameters are technical condition parameters.

Output processes observed in electric apparatus operation can be divided into working processes, coming as a result of apparatus functioning, and concurrent ones, coming as a secondary effect of working processes. Output processes can be quantitatively characterized as a collection of output parameters.

An output parameter can be recognized as a diagnostic parameter if it satisfies the following condition:

- uniqueness,
- each change of structure parameter value corresponds to the determined change of output parameter value,
- sufficient span,
- the expected change of structure parameters corresponds to the possibly wide range of output parameter changes,
- availability,
- output parameters changes should be measured easily.

The object technical condition should be identified and a decision if a given electric apparatus can still be used or needs control or repair should be made. In case of inefficiency, identification should make its location possible, that is it should qualify the object element as inefficient.



Rys. 1. Schemat blokowy funkcjonalnej diagnostyki: C- blok sterowania, OD- obiekt badań diagnostycznych, FM-fizyczny model obiektu badań diagnostycznych, UŁ- urządzenia łączności, BRW- blok rozszyfrowywania wyników, PP- przyrząd pomiarowy, Vi- sygnały sterujące, Rj- sygnały wejściowe, Rj^i- sygnały obiektu niezdatnego

Fig.1 Functional diagnostics block diagram: C- control block, OD-diagnostic tests object, FM-physical model of diagnostic tests object, UŁ-communication devices, BRW-results unscrambling block, PP-measuring instrument, V-control signals, R-input signals, R-unserviceable object signals

Parametry diagnostyczne można podzielić na parametry funkcjonalne i towarzyszące.

Istotnym celem prób i badań przy opracowywaniu metody diagnostyki funkcjonalnej jest wyszukanie w sygnałach diagnostycznych takich parametrów, które z wystarczającą dla praktyki dokładnością pozwolą określić stan sprawności alternatora.

W diagnostyce funkcjonalnej powstające sygnały robocze są wykorzystywane jednocześnie jako sygnały diagnostyczne. Schemat systemu diagnostyki funkcjonalnej przedstawiono na rysunku 1.

2. Zestaw diagnostyki do analizy sygnałów i identyfikacji uszkodzenia

Zestaw diagnostyczny opracowany przez autora [1], nazywany też zestawem komputerowym, jest przeznaczony do analizy sygnałów diagnostycznych otrzymywanych z alternatora oraz identyfikacji rodzaju uszkodzenia po porównaniu odebranych sygnałów z wzorcowymi wartościami tych sygnałów zgromadzonych w pamięci komputera (banku danych). Schemat do badania sygnałów diagnostycznych alternatora przedstawia rysunek 2.

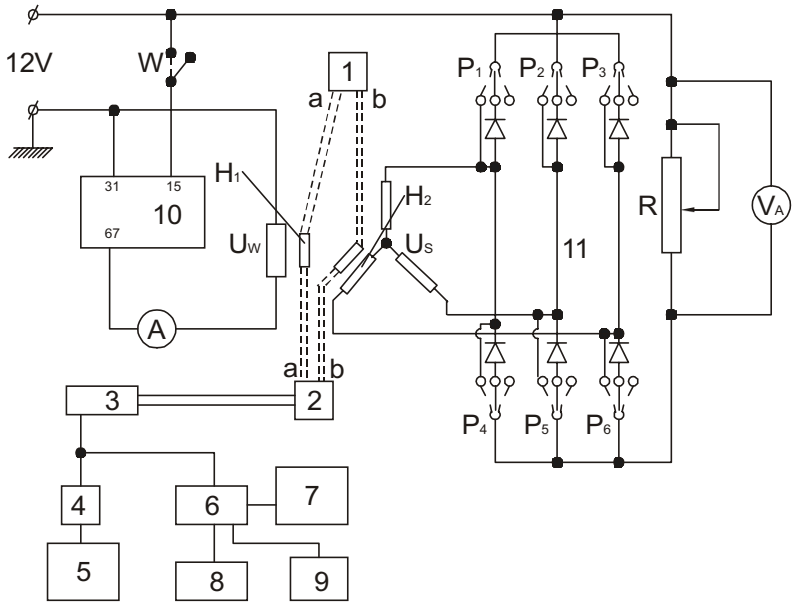
Diagnostic parameters can be divided into functional parameters and concurrent ones.

The crucial purpose of tests and research aiming at developing functional diagnostic method is tracing in diagnostic signals such parameters which would determine alternator efficiency condition with sufficient precision. In functional diagnostics, working signals are also used as diagnostic signals. The diagram of functional diagnostic system has been presented in fig.1.

2. Diagnostic set for signal analysis and fault identification

The diagnostic set worked out by the author 1, also called the computer set, is meant for the analysis of diagnostic signals coming from the alternator and the identification of fault type. This is done after the received signals and model values of those signals, stored in the computer memory (data bank), have been compared.

The scheme for testing alternator diagnostic signals is presented in fig.2.

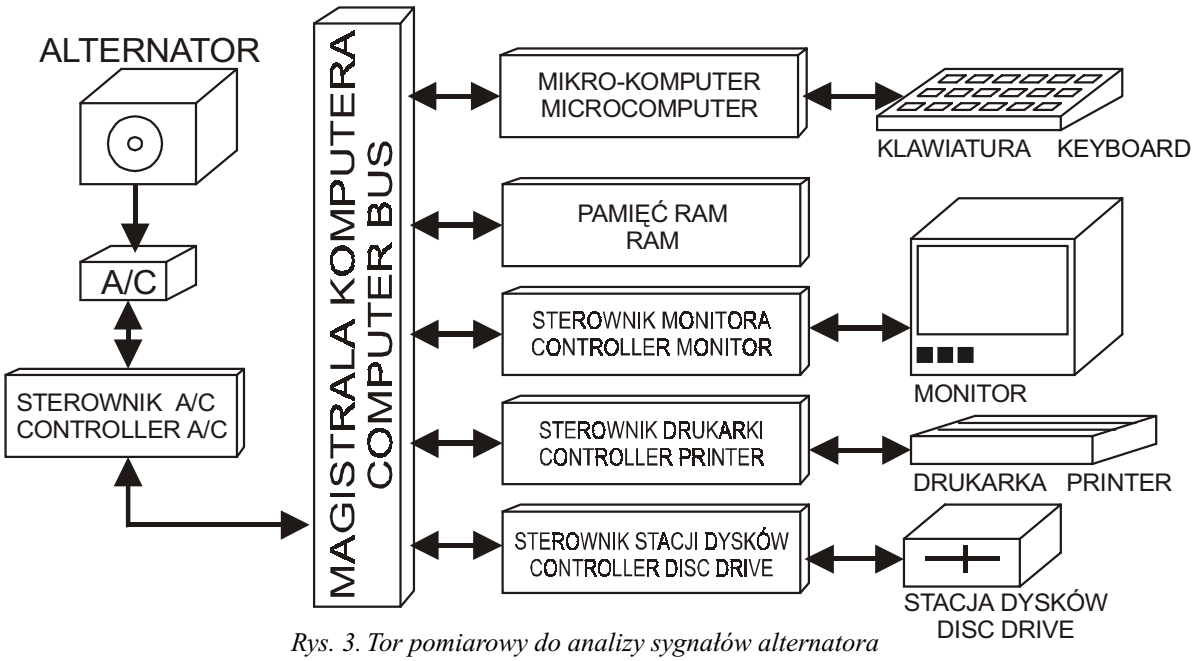


Rys. 2. Schemat blokowy układu do badania sygnałów diagnostycznych pochodzących od pola magnetycznego w szczelinie przytwornikowej prądnicy: 1 - zasilacz z układem do kompensacji napięcia pasożytniczego i temperatury, 2 - wzmacniacz sygnałów, 3 - przetwornik analogowo-cyfrowy, 4 - rejestrator, 5 - oscyloskop, 6 - komputer, 7-monitor, 8 - drukarka, 9 - stacja dysków,10 - regulator napięcia, 11 - układ prostownikowy, H1,H2 -czujnik Halla /H1 - w wirniku, H2 - w stojanie/, Uw - uzwojenie wzbudzenia, Us - uzwojenie stojana, P1-P6 - przełączniki do symulacji uszkodzeń diod prost., R - rezystor do obciążenia prądnicy

Fig.2. Block diagram of the unit for testing diagnostic signals coming from magnetic field in current generator by-armature gap: 1-feeder with the unit for parasitical voltage and temperature compensation, 2-signal- to-analog converter,4-recorder,5-oscilloscope,6-computer,7-monitor, 8-printer ,9-disc driver,10-voltge controller, 11-rectifier unit, H1,H2-Hall device H1-in rotor, H2-in stator, U-excitation winding, U-stator winding, P1-P6-switches for the simulation of rectifying diodes faults, R-resistor for current generator load

Urządzenie diagnostyczne obejmuje czterokanałowy przetwornik analogowo-cyfrowy oraz mikrokomputer. Tor pomiarowy urządzenia przedstawiono na rysunku 3.

The diagnostic device consists of a four-channel digital-to-analog converter and a microcomputer. The device measurement channel is shown in fig. 3.



Rys. 3. Tor pomiarowy do analizy sygnałów alternatora

Fig.3. Measurement channel for alternator signals analysis

Zestaw diagnostyczny realizuje wyznaczone zadania według algorytmu przedstawionego na rysunku 4. Procedura „inicjalizacja" przygotowuje program do działania nadając odpowiednim zmiennym właściwe wartości, organizuje ekran graficzny oraz inicjuje pracę drukarki.

Procedura „rejestracja" odczytuje sygnały z przetwornika analogowo-cyfrowego i umieszcza w pamięci RAM komputera dla dziesięciu kolejnych obrotów wirnika ze stałym krokiem czasowym. Informacja dotycząca umieszczenia danych w pamięci wyświetlana jest na ekranie. Procedura „wykres" umożliwia obserwację wybranego sygnału w funkcji kąta obrotu wirnika dla jednego z pośród dziesięciu przebiegów.

Wynikiem działania procedury – „analiza Fouriera" są wartości sygnału diagnostycznego np. napięcia U prądu I lub napięcia Halla UH harmonicznych wybranego przebiegu.

Procedura ta przedstawia w postaci graficznej wybrany przebieg wykorzystując procedurę „wykres" oraz wartości wybranych harmonicznych tego przebiegu. Analizę harmoniczną Fouriera zmierzonego sygnału przeprowadza się zgodnie z wzorem:

$$C_k(\omega) = \frac{1}{T}\int_0^T f(x)e^{-ik\omega x} \qquad (2.1)$$

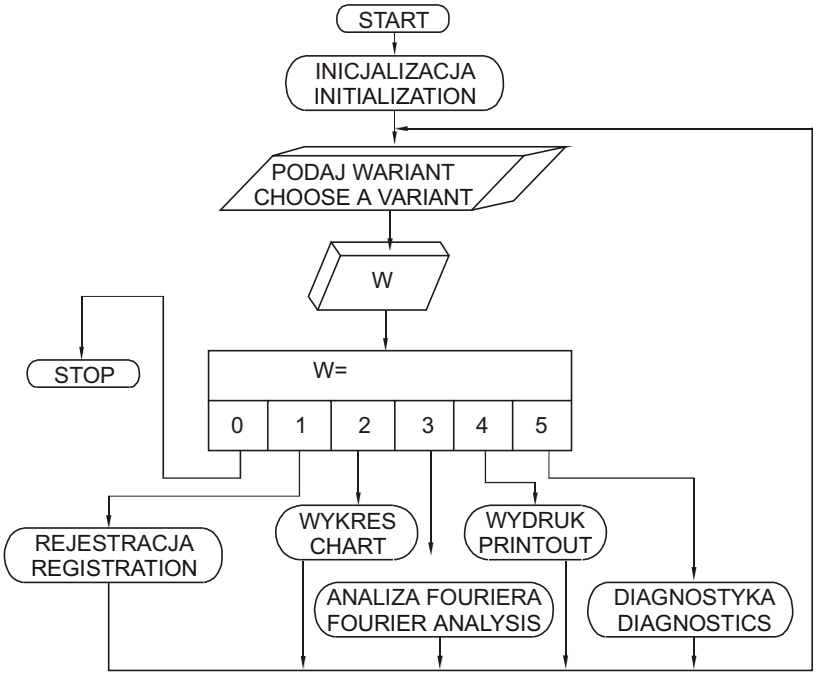
The diagnostic set performs assigned tasks according to the algorithm shown in fig. 4. ''Initialization'' procedure prepares the program for action by giving proper values to particular variables, organizes graphical screen and initiates printer operation.

''Register'' procedure reads signals from digital-to-analog converter and puts them on computer RAM, for ten successive turns, at constant time step. Information concerning putting data on computer memory is shown on the screen. ''Chart'' procedure makes it possible to observe a chosen signal in function of rotor turn angle for one of ten courses.

Values of the diagnostic signal, for example voltage U current I, or Hall voltage UH of selected course harmonics, are the result of ''Fourier analysis'' procedure operation.

The procedure graphically shows a chosen courses and it uses both ''chart'' procedure and values of this courses selected harmonics. Fourier harmonic analysis of a measured signal is carried out according to the following formula

$$C_k(\omega) = \frac{1}{T}\int_0^T f(x)e^{-ik\omega x} \qquad (2.1)$$



Rys. 4. Algorytm działania zestawu diagnostycznego (ZD)
Fig.4. Diagnostic set (ZD) operation algorithm

gdzie: T – okres jednego obrotu wirnika, f(x) – wartość sygnału napięcia w czasie x:

$$x \in < 0,T) \qquad \omega = \frac{2\Pi}{T} \qquad (2.2)$$

k – rząd harmonicznej.

Zadaniem procedury „wydruk" jest przedstawienie informacji związanej z wybranym przebiegiem w postaci graficznej:

a) wykresu przedstawiającego przebieg wybranego sygnału,
b) wykresu przedstawiającego wartość harmonicznych wybranego przebiegu,
c) tabeli zawierającej wartości tych harmonicznych i kąta fazowego.

Procedura „diagnostyka" przedstawiona na rysunku 5. dokonuje porównania wyników „analiza Fouriera" z zawartymi w pamięci komputera wzorcowymi wartościami harmonicznych dla wybranych stanów technicznych alternatora. Wynikiem tego porównania jest określenie stopnia korelacji pomiędzy zmierzonym przebiegiem a przebiegami wzorcowymi zawartymi w pamięci komputera oraz wybór najbardziej prawdopodobnego stanu technicznego. Zarówno wartości harmonicznych sygnału zmierzonego jak i wartości harmonicznych wybranych sygnałów technicznych alternatora poddawane są analizie statystycznej.

where: T-rotor one turn period, fx-voltage signal value in time x:

$$x \in < 0,T) \qquad \omega = \frac{2\Pi}{T} \qquad (2.2)$$

k-harmonic number

The aim of ''printout'' procedure is to present graphically information connected with a chosen course:

a) chart presenting a selected signal course,
b) chart presenting values of a selected course harmonics,
c) table containing values of those harmonics and a phase angle.

''Diagnostics'' procedure, presented in fig.5, draws a comparison between ''Fourier analysis'' results and harmonics model values for selected alternator technical conditions stored in computer memory. The result of such a comparison is determining a degree of correlation between the measured course and model courses stored in computer memory and choosing the most probable technical condition. Both values of measured signal harmonics and those of alternator selected signal harmonics are subject to statistical analysis.

Dla każdej wartości harmonicznej wybranego sygnału obliczana jest wartość średnia:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (2.3)$$

wariancja:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (2.4)$$

wariancja średnia:

$$S_x^2 = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \qquad (2.5)$$

oraz wariancja jednostkowa:

$$Z_x^2 = \frac{Sx^2}{\bar{x}} \qquad (2.6)$$

Wynikiem obliczeń procedury diagnostyka jest zmienna x wyrażająca numer zidentyfikowanego stanu technicznego. Procedura wykorzystuje następujące tablice:

C (p,k) – p = 0,1,... do m; k = 1,..., n – tablica zawierająca wartości harmonicznych dla m stanów technicznych,

C (k) - zawiera harmoniczne zmierzonego sygnału,

CI (p,k) – p=1,...,m, k=1,... n – tablica zawiera wartości harmonicznych maksymalnie różniących się od wartości harmonicznych dla danego stanu technicznego p (C1 = C).

W następnej kolejności obliczany jest stopień korelacji otrzymanej gęstości widmowej z gęstościami widmowymi wszystkich możliwych stanów układu elektrycznego zawartymi w banku wzorców według wzoru 2.7:

$$S_{kp}{}^{o} = 1 - \frac{R_p o}{Rp\max} \qquad (2.7)$$

gdzie: $S_{kp}{}^{o}$ stopień korelacji (0,1), $R_p o$ - różnica między widmem analizowanego sygnału a widmem stanu technicznego (p=1,2...m), m - ilość możliwych stanów technicznych obliczamy według wzoru 2.8:

$$R_p o = \sum_{k=1}^{n}(C_k - C_{kp})^2 \qquad (2.8)$$

gdzie:
n – ilość harmonicznych liczonych w analizie,
C_k – wartość k-tej harmonicznej zmierzonego sygnału,.
C_{kp} – wartość k-tej harmonicznej stanu technicznego.

For each selected signal harmonic value, the mean value is calculated.

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (2.3)$$

variance:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (2.4)$$

mean variance:

$$S_x^2 = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \qquad (2.5)$$

and unitary variance:

$$Z_x^2 = \frac{Sx^2}{\bar{x}} \qquad (2.6)$$

The result of ''diagnostics'' procedure calculations is variable x representing the number of identified technical condition. The procedure makes use of the following tables:

C (p,k) – p = 0,1,... do m; k = 1,..., n-table containing harmonic values for m. Technical conditions,

C(k)-contains measured signal harmonics,

C(p, k)..n-table contains values of harmonics which differ to the highest degree from harmonic values for a given technical condition p(C1=C).

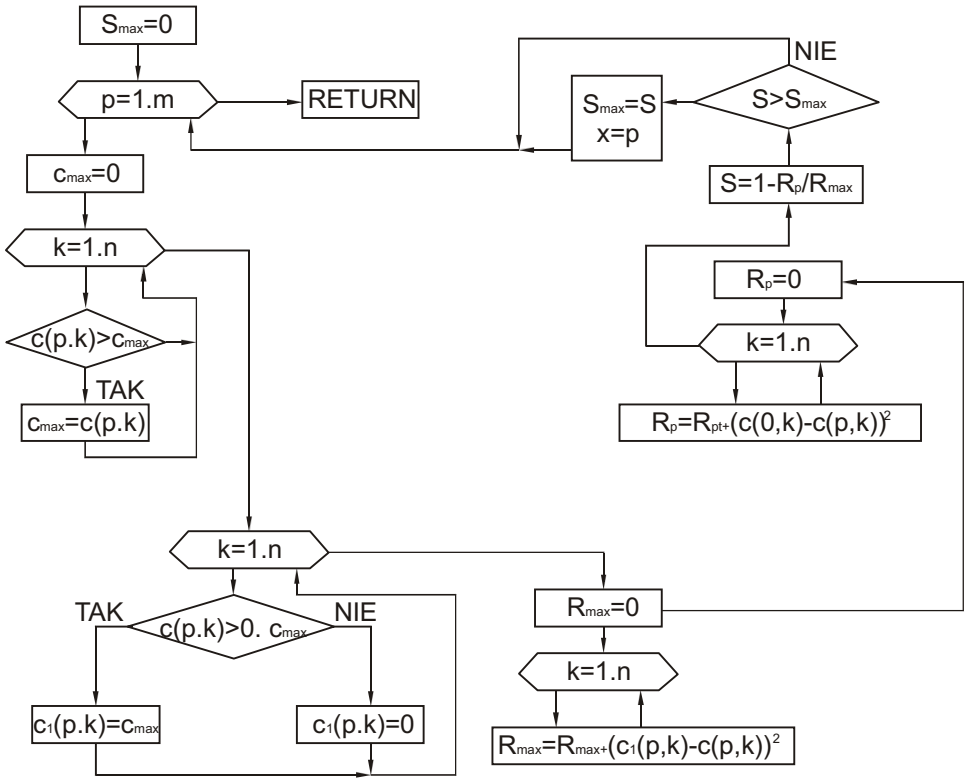
Next the degree of correlation between the received spectral concentration and spectral concentrations of all possible electric unit states stored in the model bank in calculated according to formula 2.7:

$$S_{kp}{}^{o} = 1 - \frac{R_p o}{Rp\max} \qquad (2.7)$$

where: S_{kp}-correlation degree, $R_p o$ - difference between analyzed signal spectrum and technical condition spectrum, m-number of possible technical conditions is calculated according to formula 2.8

$$R_p o = \sum_{k=1}^{n}(C_k - C_{kp})^2 \qquad (2.8)$$

where:
n-number of harmonics counted in the analysis,
C_k-value of measured signal k^{th} harmonics,
C_{kp}-value of technical condition k^{th} harmonics.



Rys. 5. Algorytm obliczeń procedury, diagnostyka"
Fig.5"Diagnostics" procedure calculations algorithm

$$R_{p\max} = \sum_{k=1}^{n} (\hat{C}_{kp} - C_{kp})^2 \qquad (2.9)$$

$$\hat{C}_{kp} = 0 \quad \text{dla} \quad C_{kp} \geq \frac{C_{kp}\ o}{2} \qquad (2.10)$$

$$\hat{C}_{kp} = C^o_{kp\max} \quad \text{dla} \quad C^o_{kp} < \frac{C^o_{kp\max}}{2} \qquad (2.11)$$

$$C^o_{kp\max} = \max(C^o_{kp}; k = 1,2..n) \qquad (2.12)$$

W wyniku obliczeń otrzymuje się wartość

$$S_k = \max(S^o_{kp}; p = 1,2...m) \;\; S_k = \max(S^o_{kp}; p = 1,2...m)$$

identyfikującą stan techniczny alternatora.

Przykład analizy przebiegu napięcia Halla na czujniku umieszczonym w szczelinie przytwornikowej przedstawia rysunku 6. Szczegółowe wyniki badań alternatorów oraz regulatorów multifunkcyjnych zawarte są w pracach [3, 4, 5]

$$R_{p\max} = \sum_{k=1}^{n} (\hat{C}_{kp} - C_{kp})^2 \qquad (2.9)$$

$$\hat{C}_{kp} = 0 \quad \text{dla} \quad C_{kp} \geq \frac{C_{kp}\ o}{2} \qquad (2.10)$$

$$\hat{C}_{kp} = C^o_{kp\max} \quad \text{dla} \quad C^o_{kp} < \frac{C^o_{kp\max}}{2} \qquad (2.11)$$

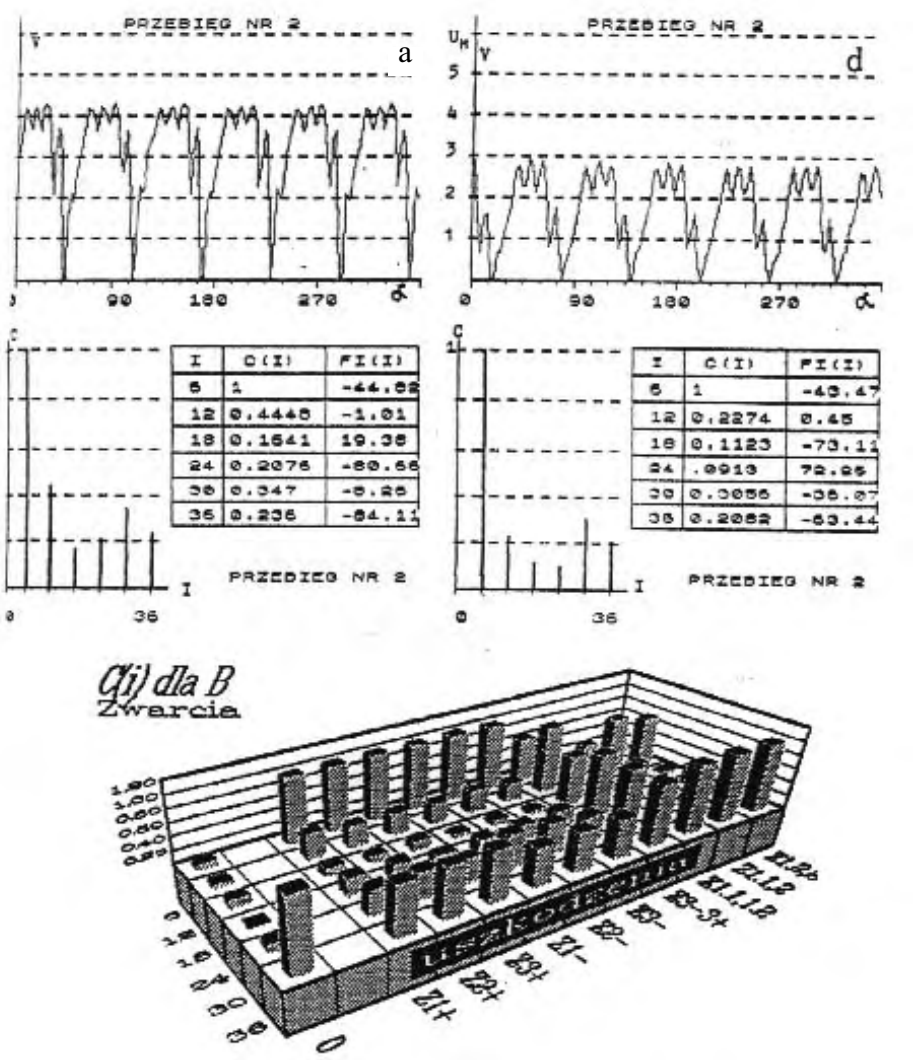
$$C^o_{kp\max} = \max(C^o_{kp}; k = 1,2..n) \qquad (2.12)$$

Value:

$$S_k = \max(S^o_{kp}; p = 1,2...m) \;\; S_k = \max(S^o_{kp}; p = 1,2...m)$$

identifying alternator technical condition comes as a result of calculations.

Example analysis of Hall voltage course on sensor put in by-armature gap is presented in fig. 6. Detailed results of alternator and multifunctional controllers tests are presented in papers[3, 4, 5].



Rys. 6. Przebieg napięcia Halla na czujniku umieszczonym w szczelinie przetwornikowej: α – kąt obrotu wirnika, c – współczynnik harmonicznych, I – rząd harmonicznej, FI – kąt fazowy, a – zwarcie w diodzie dodatniej D1, d – zwarcie w diodzie ujemnej D1, c(i) dla B *– zestawienie analizy widmowej indukcji w szczelinie przytwornikowej*

Fig.6. Course of Hall voltage on sensor put in by-armature gap: a-rotor turn angle, c-harmonic coefficient, I - harmonic number, FI-phase angle, a-shorting on positive diode D1, d - shorting on negative diode D1, c(i) for B - scheme of spectral analysis of induction in by-armature gap.

3. Podsumowanie

1. Przeprowadzone badania doświadczalne dla sygnałów diagnostycznych indukcji w szczelinie przytwornikowej, prądu i napięcia potwierdziły przydatność opracowanego zestawu pomiarowego.
2. Opracowana metoda diagnostyczna na podstawie zmian indukcji w szczelinie przytwornikowej oraz napięcia i prądu wyjściowego umożliwia jednoznacznie identyfikację uszkodzeń w postaci przerw i zwarć w diodach i uzwojeniach stojana alternatora.

3. Summary

1. Experimental investigation concerning diagnostic signals of induction in by-armature gap, current and voltage proved the usability of the worked out measurement set.
2. The developed diagnostic method makes it possible to identify unmistakably faults, such as gaps and shorting in diodes and alternator stator windings, on the group of both induction changes in by-armature gap and output current and voltage.

3. Przeprowadzona symulacja uszkodzeń występujących w trakcie eksploatacji alternatora potwierdziła realizację funkcji opracowanego zestawu diagnostycznego.

3. The carried out simulation of faults occurring during alternator operation proved that the worked out diagnostic set serves its turn.

4. References

[1] Dziubiński M.: *Diagnostyka funkcjonalna samochodowej prądnicy synchronicznej*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska, Poznań 1991 r.

[2] Dziubiński M., Ocioszyński J., Walusiak S.: *Elektrotechnika i elektronika samochodowa*. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1999 r.

[3] Dziubiński M.: *Analiza parametrów wybranych regulatorów wielozadaniowych współpracujących z alternatorem kompaktowym*. Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Kraków 2001 r.; Zeszyt Nr 22, 77-85.

[4] Dziubiński M.,Longwic R.: *Wpływ temperatury elementów alternatora na jego parametry wyjściowe*. Materiały V Międzynarodowej Konferencji Politechniki Lubelskiej, Katedra Pojazdów Samochodowych i PAN Oddział Kraków „Badania symulacyjne w technice samochodowej", Kazimierz Dolny 22-24 maja 1995 r., 79-86.

[5] Walusiak S., Dziubiński M.: *Komputerowa analiza pracy alternatora pracującego przy podwyższonych napięciach*." Zastosowania komputerów w elektrotechnice" Instytut Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000 r.,703-705.

Dr inż. Mieczysław Dziubiński
Katedra Pojazdów Samochodowych
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 26
20-618 Lublin
e-mail: dziubin@archimedes.pol.lublin.pl

Maria KONIECZNA
Marian SZARYCZ
Klaudiusz JAŁOSZYŃSKI

ZMIANY WARUNKÓW SUSZENIA MIKROFALOWO-KONWEKCYJNEGO W PRZYPADKU UTRZYMYWANIA STAŁEJ TEMPERATURY NAGRZANIA NASION DLA RÓŻNYCH POZIOMÓW MOCY MIKROFAL I ICH WPŁYW NA JAKOŚĆ BIOLOGICZNĄ NASION

CHANGES IN CONDITIONS OF MICROWAVE-CONVECTIONAL DRYING AT CONSTANT TEMPERATURE OF HEATING AND AT DIFFERENT MICROWAVE POWER LEVELS AND THEIR EFFECT ON BIOLOGICAL QUALITY OF SEEDS

Przedstawiono rzeczywiste czasy nagrzewania nasion bobiku do założonej temperatury 40±2°C podczas ich suszenia w polu mikrofal. W kolejnych doświadczeniach zastosowano różne poziomy mocy mikrofal (od 72 do 168W na 180 g nasion o wilgotności początkowej 20%). Temperatura powietrza wynosiła każdorazowo 35°C a jego prędkość przepływu 0,1m/s. Wyznacznikiem przydatności metody mikrofalowo-konwekcyjnej suszenia nasion była ocena wyników kiełkowania i rozwoju siewek.

Słowa kluczowe: mikrofale, suszenie, nasiona.

The actual times in which broad bean seeds heat up to a temperature of 40±2°C during their drying in a microwave field are given. Different microwave power levels (in a range of 72-168 W for 180 g of seeds with an initial moisture content of 20%) were used in successive experiments. In each case, the air temperature was 35° and the air flow velocity - 0.1 m/s. The usefulness of the microwave-convectional method of drying seeds was determined by assessing seedling germination and development.

Keywords: microwaves, drying, seeds.

1. Wstęp i cel pracy

Inżynieria systemów bioagrotechnicznych przewiduje budowanie systemów produkcyjnych działających zarówno funkcjonalnie jak i niedestrukcyjnie[5]. W produkcji nasion, w etapie suszenia nasion zauważa się tymczasem, że dotychczasowa metoda suszenia konwekcyjnego powoduje destrukcję zarówno materiału suszonego, w wyniku warunków procesowych jak i destrukcję środowiska, wskutek spalania konwencjonalnych paliw [6]. Poszukuje się w związku z tym nowych metod suszenia, wśród których uwagę zwraca metoda mikrofalowo-konwekcyjna. Wykorzystuje się w niej zjawisko nagrzewania wewnętrznego

1. Introduction and research goal

The engineering of bioagrotechnical systems predicts that production systems operating both efficiently and non-destructively will be built [5]. But in seed production at the stage of seed drying, the method of convectional drying used so far turns out to cause destruction of both the dried material (due to the process conditions) and the environment (due to the combustion of conventional fuels [6]. Therefore new methods of drying are sought. Among the potential methods, the microwave-convectional method features prominently. It exploits the phenomenon of internal heating of a material having dielectric properties

materiału o właściwościach dielektrycznych, znajdującego się w polu elektrycznym o dużej częstotliwości. Uważa się, że zastosowanie tego sposobu nagrzewania nasion, w połączeniu z suszeniem konwekcyjnym, może być szczególnie korzystne.

Mechanizm nagrzewania nasion w polu mikrofalowym jest jednak złożony i mało poznany. Dotychczas interesowano się przede wszystkim mocą pola, która w.g. Beke i innych [1] wymusza ruch wewnętrznej wilgoci, pełniąc w usuwaniu wody tę samą rolę, jaką pełni temperatura powietrza w suszeniu konwekcyjnym. Mało uwagi poświęcono natomiast temperaturze nasion. Działanie mikrofal powoduje wzrost temperatury, a przecież w biologicznie czynnym materiale jakim są nasiona nie może ona przekroczyć określonego pułapu, bez ryzyka obniżenia właściwości biologicznych nasion. Bour i inni [2] w badaniach nagrzewania się złoża mineralnego w polu mikrofal stwierdzili, że w trakcie suszenia nawet powierzchniowa warstwa złoża ma temperaturę 100°C. Uważa się, że wilgotne ciało w procesie suszenia dielektrycznego osiąga temperaturę wrzenia już w okresie wstępnego nagrzania. Badania Beke i innych [2] dotyczące rozkładu wilgotności w ziarnie kukurydzy wykazały jednak, że ziarno kukurydzy charakteryzuje się małą przewodnością cieplną. Temperatura, którą w czasie nagrzewania osiąga po 10 minutach w warunkach mocy pola 3,56W/g wody i temperatury powietrza suszącego 20°C wynosi 68-73°C a po 55 minutach nie przekracza 78°C. Temperatury mierzone w obwodowej części ziarna były zawsze najniższe. Z punktu widzenia właściwości biologicznych nasion temperatury te nie można jednak uznać za bezpieczne. Raghavan i inni [5] stwierdzają, że moc pola ma wpływ na kiełkowanie nasion i że ta zależność jest odwrotnie proporcjonalna. Z badań Koniecznej i Szarycza [3, 4] nie wynika jednak, że moc sama w sobie oddziałuje negatywnie na jakość nasion. W zebranych ręcznie nasionach bobiku, o naturalnej wilgotności 18,8% suszonych mikrofalowo-konwekcyjnie, wraz ze wzrostem mocy stwierdzono zmniejszenie się ilości makrouszkodzeń oraz wzrost jakości biologicznej nasion. Można więc sądzić, że mocy pola przypisuje się niesłusznie aż tak negatywną rolę w suszeniu nasion. Chodzi tu raczej o temperaturę nagrzania nasion, która w czasie oddziaływania mikrofal może być wysoka. Raghavan i inni [5] wydają się zauważać ten problem bo proponują obniżenie temperatury nasion przez zwiększenie prędkości przepływu powietrza, co da większy efekt chłodzenia. Problem temperatury nasion, jak widać, przewija się w wielu badaniach. Należy wobec tego postawić pytanie: jak różne poziomy mocy wpływają na wzrost temperatury nasion a także jak powinno się prowadzić suszenie aby temand placed in a high-frequency electric field. This method of heating seeds, combined with convectional drying, promises to be highly advantageous.

However, the mechanism of heating seeds in a microwave field is complex and little understood. Until now research has focused mainly on the power of the field, which according to Beke et al. [1] induces the motion of internal moisture, playing the same role in water removal as air temperature in convectional drying. Relatively little attention has been devoted to the temperature of the seeds. Under the action of microwaves this temperature increases, but in a biologically active material such as seeds, the temperature cannot exceed a certain threshold, otherwise the biological properties of the seeds may deteriorate. Bour et al. [2] while investigating the heating of a mineral deposit in a microwave field found that during drying even the surface layer of the deposit has a temperature of 100°C. It is believed that a moist body subjected to dielectric drying reaches the boiling point already at the initial stage of heating. Research into the distribution of moisture content in the corn grain carried out by Beke et al. [2] showed that the corn grain is characterized by low thermal conductivity. After 10 minutes of heating at a field power of 3.56 W/g water and a drying air temperature of 20°C it reaches a temperature of 68-73°C which after 55 minutes does not exceed 78°C. The temperatures measured in the circumferential part of the grain were always the lowest. However, they cannot be regarded as safe for the biological properties of the seeds. Raghavan et al. [5] have found that the power of the field affects the germination of seeds and that this correlation is inversely proportional. But the experimental results obtained by Konieczna and Szarycz [3, 4] do not show that the power alone adversely affects the quality of seeds. It was found that in manually harvested broad bean seeds with a natural moisture content of 18.8%, dried by the microwave-convectional method, the amount of macrodamage decreases and the seeds' biological quality increases as the power is increased. Therefore, one can deduce that the power of the field is wrongly thought to have so adverse effect on seeds during their drying. One should rather blame the quite high temperature to which seeds heat up under the action of microwaves. Raghavan et al. [5] seem to notice this problem because they propose to lower the temperature of seeds by increasing the air flow velocity, which results in better cooling. The problem of the temperature of seeds crops up in numerous studies. Therefore one should pose the question: how do different power levels affect the increase in the temperature of seeds and how drying should be conducted so that the temperature to

peratura nagrzania nasion nie przekraczała przyjętych norm. Poszukując odpowiedzi podjęto badania, których celem jest:

1. Określenie rzeczywistego czasu nagrzewania się nasion w warunkach różnych mocy pola mikrofalowego i przy zachowaniu stałej temperatury nagrzania nasion oraz temperatury powietrza i jego prędkości przepływu,
2. Ocena wpływu przyjętych warunków na jakość biologiczną nasion na przykładzie nasion bobiku.

2. Warunki i metody badań

Badania przeprowadzono na nasionach bobiku odmiany Jasny pochodzących z Centrali Nasiennej. Przed suszeniem nasiona nawilżono do wilgotności 20% Jednorazowo suszono próbki o wadze 180 g. Suszenie przeprowadzono w Instytucie Inżynierii Rolniczej Akademii Rolniczej we Wrocławiu na specjalistycznym stanowisku SM-200 firmy Plazmatronika [Rys.1], pozwalającym na programowanie warunków suszenia. W badaniach przyjęto moc mikrofal: 72, 96, 120, 144 i 168 W, temperaturę nagrzania nasion 40±2°C, temperaturę powietrza 35°C, prędkość powietrza 0,1 m/s. Nasiona suszono do wilgotności około 12,5%. Włączenie i wyłączenie magnetronów odbywało się manualnie.

Mierzono czas emisji mikrofal (czas nagrzewania) i czas przerwy (czas wyłączenia magnetronów) w całym zakresie suszenia każdej próby.

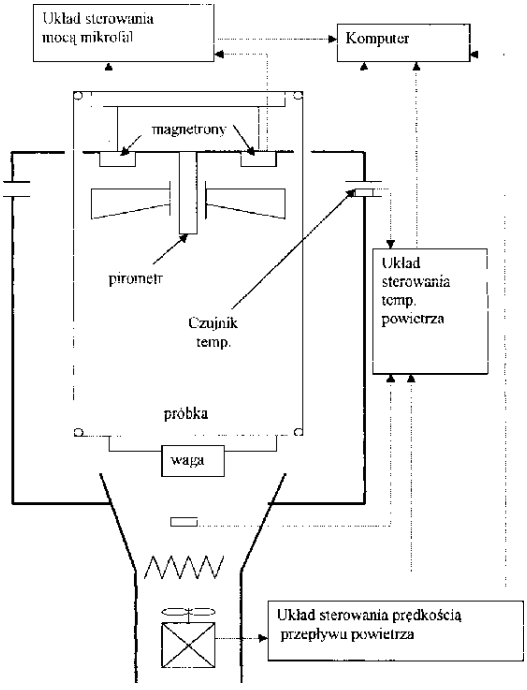
which seeds heat up does not exceed the relevant standards. To find answers to these questions, research aimed at:

1. Determining the actual time in which seeds heat up at different microwave field powers while the temperature of heating the seeds, the air temperature and the air flow velocity remain constant,
2. Assessing the effect of the different conditions on the biological quality of seeds, using as an example broad bean seeds; was undertaken.

2. Experimental conditions and methods

Tests on broad bean (of the Light variety) seeds obtained from Centrala Nasienna were carried out. Prior to drying the seeds had been moisturized to a moisture content of 20%. Each sample weighed 180 g. The samples were dried on a Plazmatronica SM-200 stand (with programmable drying conditions) [fig. 1] in the Institute of Agricultural Engineering at the Wrocław Academy of Agriculture. The test conditions were as follows: a microwave power of 72, 96, 120, 144 and 168 W, a seeds heating temperature of 40±2°C, an air temperature of 35°C, an air flow velocity of 0.1 m/s. The seeds were dried until a moisture content of about 12.5% was reached. The magnetrons were turned on and off manually.

The microwave emission time (heating time) and the break time (during which the magnetrons remained turned off) were measured in the whole range of drying for each sample.



Rys. 1. Schemat stanowiska suszarniczego
Fig. 1. Diagram of drying stand

Oceny jakości biologicznej nasion wysuszonych sztucznie jak również z próby kontrolnej wysuszonej w warunkach konwekcji naturalnej, dokonano na podstawie wyników badań kiełkowania i rozwoju siewek. Badania te wykonano stosując dwie metody: kiełkowania na bibule w płytkach Petriego oraz kiełkowania w rulonach bibuły w.g. Germa. Zastosowano warunki opisane w Polskich Normach.

3. Wyniki badań ich i omówienie

Analiza wyników pomiaru czasów emisji mikrofal i przerw w pracy magnetronów wykazała, że dla poprawienia jasności obrazu przebiegu suszenia poszczególnych prób należy wyróżnić dla nasion bobiku 4 etapy charakteryzujące się podobnymi czasami emisji i przerw. Wyróżniono:

- etap I - nagrzewanie wstępne, w którym wilgotność pozostawała stała (20%);
- etap II w którym wilgotność nasion zmieniała się w zakresie 20-17%;
- etap III dla nasion o wilgotności w zakresie 17-15%;
- etap IV dla nasion o wilgotności poniżej 15% (do około 12,5%).

Podział ten można uznać za logiczny także z tego względu, że w fizjologii nasion wilgotności 17 i 15% są "progowe", wyznaczające etapy intensywności procesów życiowych.

Czasy emisji mikrofal potrzebne do utrzymania założonej temperatury 40±2°C przedstawiono na rys.2.

Z danych wynika, że czasy emisji były różne. Wskazuje to, że w praktyce, czasy emisji podczas suszenia nie mogą być utrzymywane na stałym poziomie i dowolnie długie. Muszą być dostosowane za-

The biological quality of the artificially dried seeds and of the control sample seeds dried in conditions of natural convection was assessed on the basis of seedling germination and growth test results. The tests were performed using two methods: germination on filter paper in Petri dishes and germination in rolls of filter paper acc. to Germ. The conditions specified by the relevant Polish Standards were used.

Microwave power control system, Computer, magnetrons, pyrometer, temperature sensor, air temperature control system, sample, balance, air flow velocity control

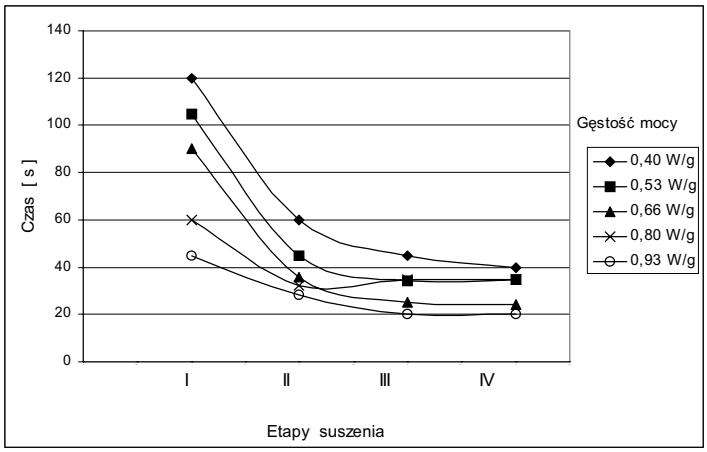
3. Experimental results and their discussion

An analysis of the microwave emission time and magnetron idle time measurements showed that to improve the clarity of the course of drying, the following 4 stages (characterized by similar emission and break times) should be distinguished:

- stage I - preheating, during which the moisture content remained constant (20%);
- stage II during which the seeds' moisture content changed in a range of 20-17%;
- stage III for seeds with a moisture content of 17-15%;
- stage IV for seeds with a moisture content of below 15% (down to about 12.5%).

The above division can be regarded as logical also for this reason that in seed physiology, moisture contents of 17% and 15% are considered to be the threshold contents demarcating the stages in the intensity of life-processes.

The microwave emission times needed to maintain the assumed temperature of 40±2°C are presented in fig. 2.



Rys. 2. Czas jednej emisji mikrofal potrzebny do utrzymania temperatury nasion w zakresie 40±2°C w etapach suszenia I - IV

Fig. 2. Time of one microwave emission, needed to maintain assumed temperature of 40±2°C in drying stages I–IV

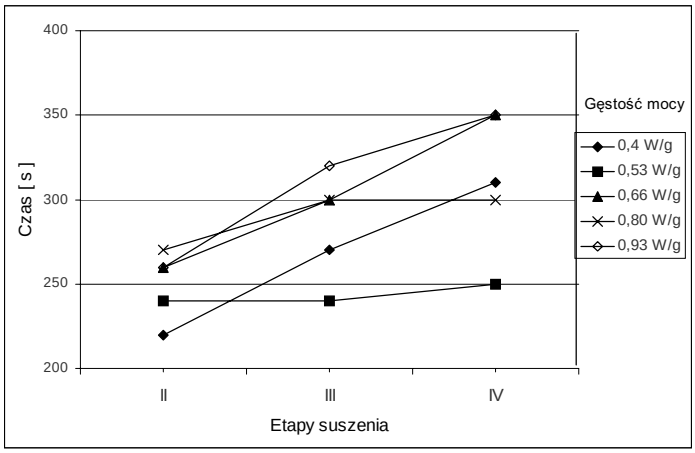
równo do mocy mikrofal jak i do wilgotności nasion. W IV etapie suszenia nasion czasy emisji stabilizowały się na poziomie zależnym od mocy mikrofal.

Czasy przerw w pracy magnetronu charakteryzują dane przedstawione na rys.3.

Przerwy w emisji mikrofal były stosunkowo długie, co wynika z niskiej przewodności cieplnej nasion bobiku. W trakcie suszenia, w miarę zmniejsza-

The data show that the emission times were different. This means that emission times during drying cannot be kept at a constant level and arbitrarily long. They must be adjusted to both the microwave power and the seed's moisture content. In stage IV of drying, the emission times stabilized at a level dependent on the microwave power.

The magnetron idle times are illustrated in fig. 3.



Rys. 3. Czas jednej przerwy pomiędzy emisjami mikrofal w etapach suszenia

Fig. 3. Time of one break between microwave emissions in drying stages

nia się wilgotności nasion, przerwy wydłużały się. Należy się jednak spodziewać, że w zakresie wilgotności poniżej badanej 12,5% czasy przerw w emisji będą rosły już nieznacznie ponieważ oddawanie wody w "przesuszonych" nasionach jest fizjologicznie spowolnione.

Przedstawione przykładowo wyniki zmierzonych czasów nagrzewania nasion bobiku wskazują, że dogrzewanie mikrofalami nasion suszonych konwekcyjnie daje bardzo duże możliwości automatycznego sterowania procesem suszenia. Szczególne ułatwienia można osiągnąć w przypadkach wymagających stosowania zmiennych temperatur suszenia.

W badaniach jakości biologicznej stwierdzono, że niskie moce mikrofal, a w związku z tym długie czasy emisji , opóźniają rozwój kiełków Wskazują na to wyniki kiełkowania w I terminie (rys.4). Zanotowano ponadto zjawisko obumierania kiełków, co w efekcie obniżyło także wynik zdolności kiełkowania.

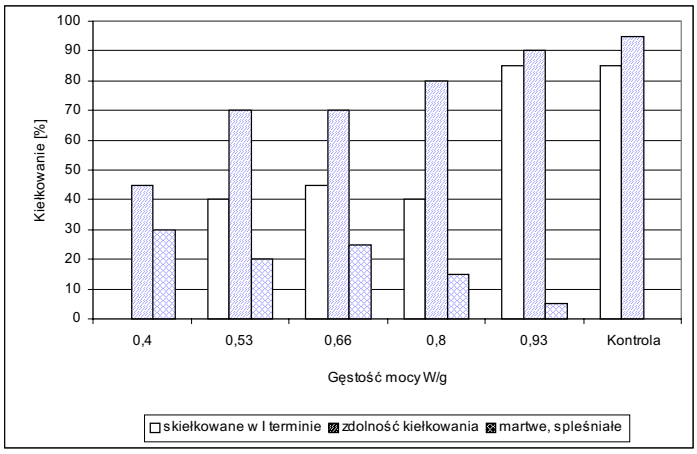
Uzyskane w tych warunkach siewki (rys.5 i 6) były w próbach nagrzewanych mikrofalami o niskiej mocy (np. gęstość mocy 0,40W/g) słabiej rozwinięte niż w próbach nagrzewanych mikrofalami o wysokiej mocy (np. gęstość mocy 0,93W/g), jak również w próbach kontrolnych nie poddawanych działaniu mikrofal. W przypadku działania na nasiona mikrofal o wysokiej mocy, czyli równocześnie stosowania krótkich czasów emisji, uzyskano podobne jak w próbie kontrolnej kiełkowanie (rys.4) i bardzo dobry rozwój sie-

The breaks in microwave emission were quite long due to the low thermal conductivity of broad bean seeds. During drying as the seeds' moisture content decreased, the breaks lengthened. However, one can expect that for a moisture content below 12.5%, the length of breaks in emission will increase only slightly since the giving up of water in partly dried seeds is sluggish because of physiological reasons.

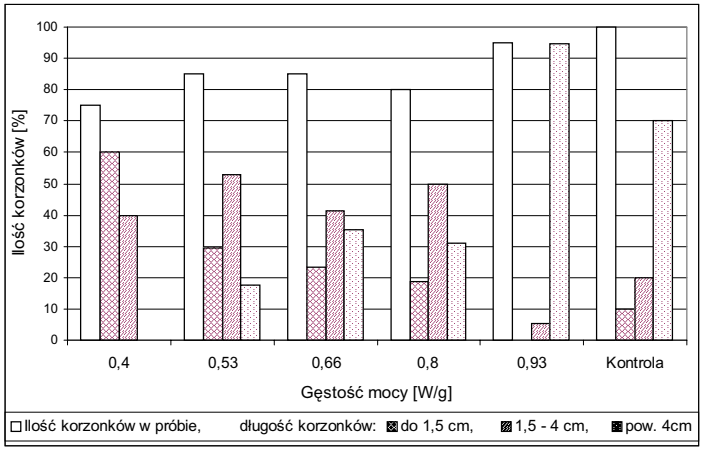
The exemplary measured heating times for broad bean seeds indicate that the additional microwave heating of seeds dried convectionally allows one to automatically control (to a large extent) the drying process, particularly in cases in which variable drying temperatures are required.

The biological quality test results showed that low microwave powers, and thus long emission times, retard the development of the seedlings – as evidenced by the germination results for date I (fig. 4). Moreover, seedling atrophy was observed. As a result, also the germination capacity was lower.

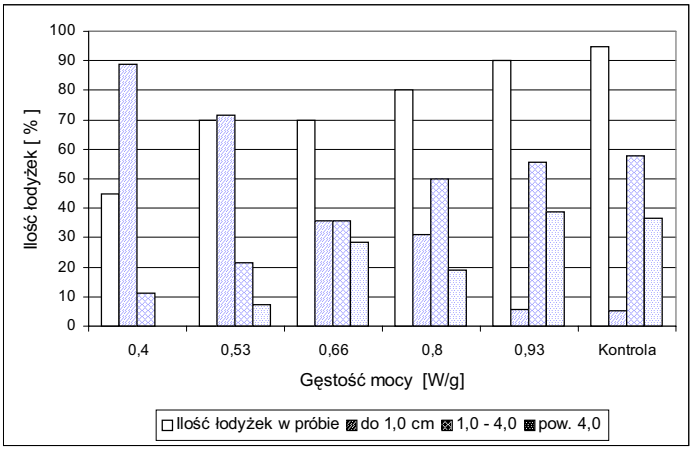
The seedlings obtained in the above conditions (figs 5 and 6) in the samples heated with low-power (e.g. power density of 0.40 W/g) microwaves were found to be less developed than the ones in the samples heated with high-power (e.g. power density of 0.93 W/g) microwaves and the ones in the control samples not subjected to microwaves. In the case of high-power microwaves acting on the seeds and short emission times, germination was similar as in the control



Rys. 4. Kiełkowanie nasion bobiku suszonych mikrofalowo-konwekcyjnie
Fig. 4. Germination of broad bean seeds dried by microwave-convectional method



Rys. 5. Stan rozwoju korzonków w I liczeniu
Fig. 5. State of development of rootlets in count I



Rys. 6. Stan rozwoju łodyżek w II liczeniu
Fig. 6. State of development of stems in count II

wek oceniany ilością i długością korzonków oraz długością łodyżek siewek (rys.5 i 6). Wyniki te wskazują, że nie sama moc pola mikrofalowego jako taka, ale czas emisji mikrofal ma istotne znaczenie dla jakości biologicznej nasion.

4. Wnioski

1. Utrzymanie stałej temperatury nagrzania nasion bobiku w warunkach stałej mocy mikrofal jest możliwe przy cyklicznej pracy magnetronów.
2. Czas emisji potrzebny do uzyskania założonej temperatury w cyklu zależy od mocy mikrofal i jest coraz krótszy wraz ze wzrostem mocy.
3. W suszeniu nasion bobiku niezależnie od stosowanej mocy występują 4 etapy różniące się czasami emisji i przerw pomiędzy emisjami.
4. Jakość biologiczna nasion bobiku zależy od czasu nagrzewania nasion, a od mocy pola mikrofalowego tylko pośrednio.
5. Zastosowanie dogrzewania mikrofalami nasion suszonych konwekcyjnie poszerza możliwości automatycznego sterowania procesem suszenia.

sample (fig. 4) and the seedlings were very well developed (as assessed by the amount and length of rootlets and the length of seedling stems) (figs 5 and 6). The results show that not only microwave field power, but also microwave emission time has a bearing on the biological quality of seeds.

4. Conclusions

1. Constant temperature of heating broad bean seeds in conditions of constant microwave power can be maintained if the magnetrons operate in a cyclical manner.
2. The emission time needed to reach an assumed temperature in a cycle depends on the microwave power and it becomes increasingly shorter as the power increases.
3. In the drying of broad bean seeds, regardless of the applied power, one can distinguish 4 stages differing in their emission times and breaks between emissions.

5. Literatura

[1] Beke J., Mujumdar A.S., Giroux M.: *Some features of microwave drying of corn and potato samples.* Proc. of the 10th, IDS (IDS'96) vol.B, 888-896, 1996 Kraków, Poland.

[2] Bour S., Gevaudan A., Moyne C.: *Towards a better understanding of electrical and transport phenomena mechanisms during high frequency drying*. Proc. of the 11th IDS (IDS'98), vol.C, 2156-2163, Halkidiki, Greece, 1998.

[3] Konieczna M., Szarycz M.: *Makrouszkodzenia nasion bobiku suszonych konwekcyjnie i mikrofalowo-konwekcyjnie*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 454,545-552, 1998.

[4] Konieczna M. Szarycz M.: *Uszkodzenia biologiczne nasion bobiku spowodowane suszeniem mikrofalowo-konwekcyjnym*. Zesz. Nauk Roln. Z. 454 , 553-560, 1998.

[5] Powierża L.: *Zarys inżynierii systemów bioagrotechnicznych*. Wydawnictwo ITE. Radom-Płock, 1997.

[6] Raghavan G.S.V., Alvo P., Shivhare V. S.: *Microwave drying of grain: advantages and limitations*. Postharvest News and Information, vol. 4, no.3 79N-83N, 1993.

Doc. dr hab. Maria Konieczna
Dr inż. Marian Szarycz
Mgr inż. Klaudiusz Jałoszyński

Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław
tel. 32-05-712
e-mail: konieczna@imr.ar.wroc.pl
e-mail: szarycz@imr.ar.wroc.pl
e-mail: jałoszyński@imr.ar.wroc.pl

Jacek CZARNIGOWSKI
Paweł DROŹDZIEL
Paweł KORDOS

CHARAKTERYSTYCZNE ZAKRESY PRĘDKOŚCI OBROTOWYCH WAŁU KORBOWEGO PODCZAS PRACY SILNIKA SPALINOWEGO W WARUNKACH EKSPLOATACJI SAMOCHODU

CHARACTERISTIC ROTATIONAL SPEED RANGES OF A CRANKSHAFT DURING COMBUSTION ENGINE OPERATION AT CAR MAINTENANCE

Badania empiryczne silników spalinowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów umożliwiają uzyskanie wielu informacji o ich pracy. Analiza posiadanych wyników pozwala na określenie skali obciążeń mechanicznych i cieplnych silnika w warunkach eksploatacji samochodu. Jest to szczególnie istotne przy ocenie trwałości i niezawodności silnika. Wyniki badań eksploatacyjnych są także pomocne przy konstruowaniu nowych i udoskonalaniu istniejących konstrukcji silników spalinowych oraz stosowanych systemów sterowania procesami zasilania, spalania i wydechu. Niniejszy artykuł prezentuje przeprowadzone badania samochodów LUBLIN oraz STAR. Przedstawiono w nim także analizę porównawczą uzyskanych wyników prędkości obrotowych wału korbowego trzech różnych silników: C22NED, 359M oraz 4CT90.

Słowa kluczowe: samochód, silnik, badania eksploatacyjne.

The combustion engines' studies run at actual vehicle maintenance provide significant information on some parameters of their operation. The analysis of results makes it possible to determine the scale of mechanical and thermal load at car maintenance. The results of maintenance studies are regarded as very helpful in designing new and improving existing engine structures as well as systems presently used to control admission, combustion and exhaust processes. The paper presents the studies carried out on two truck types: LUBLIN and STAR. Rotational speeds of the crankshaft for three different engine types: C22NED, 359M and 4CT90 were also compared.

Keywords: car, engine, maintenance research.

1. Wstęp

Badania empiryczne silników spalinowych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów umożliwiają uzyskanie wielu cennych informacji o parametrach ich pracy. Przykładowa analiza posiadanych wyników pozwala na określenie skali obciążeń mechanicznych i cieplnych silnika w warunkach eksploatacji samochodu. Jest to szczególnie istotne przy ocenie trwałości i niezawodności silnika, co pozwala na optymalizację danego systemu transportu pod kątem zwiększenia jego ekonomicznej efektywności [3, 4, 5].

Wyniki badań eksploatacyjnych są pomocne przy konstruowaniu nowych i udoskonalaniu istniejących konstrukcji silników spalinowych oraz stosowanych

1. Introduction

The combustion engines' studies run at actual vehicle maintenance provide significant information on some parameters of their operation. The analysis of results makes it possible to determine the scale of mechanical and thermal load at car maintenance, what seems particularly important to evaluate engine durability and reliability, and allows to optimise a given system of transport and increase its economical effectiveness [3, 4, 5].

The results of maintenance studies are regarded as very helpful in designing new and improving existing engine structures as well as systems presently used to control admission, combustion and exhaust

systemów sterowania procesami zasilania, spalania i wylotu spalin. Pozwala to na zmniejszenie zużycia paliwa, ograniczenia hałasu oraz obniżenie emisji związków toksycznych. Szerokie wykorzystanie wyników badań eksploatacyjnych trakcyjnych silników spalinowych pomimo ich pracochłonności powoduje, że są one coraz częściej przeprowadzane [6].

Niniejszy artykuł prezentuje przeprowadzone badania samochodów LUBLIN oraz STAR. Przedstawiono w nim także analizę porównawczą uzyskanych wyników prędkości obrotowych wału korbowego trzech różnych silników: C22NED, 4CT90 (LUBLIN) oraz 359M.

2. Obiekty i metodyka badań

Badaniami eksploatacyjnymi objęto trzy różne silniki. Jednym z nich był silnik C22NED o zapłonie iskrowym produkcji australijskiej firmy HOLDEN. Pozostałe to polskie silniki o zapłonie samoczynnym: 359M produkcji ZS „STAR" S.A. w Starachowicach oraz 4CT90 produkowany przez WSW „ANDORIA" S.A. w Andrychowie. Wybrane parametry techniczne badanych silników przedstawiono w tabeli 1.

processes. Such a knowledge may be applied to decrease fuel consumption, reduce noise, and prevent emission of toxic compounds generated during engine operation. Although the maintenance studies on traction combustion engines are labour consuming, they are performed more and more often [6] as their results tend to be thoroughly applied.

The paper presents the studies carried out on two truck types: LUBLIN and STAR. Rotational speeds of the crankshaft for three different engine types: C22NED, 359M and 4CT90 were also compared.

2. Objects and methods

The maintenance studies were run on three different engine types: C22NED spark ignition engine produced by an Australian company HOLDEN and two Polish automatic engines: 359M made by ZS „STAR" S.A. in Starachowice and 4CT90 - by WSW „ANDORIA" S.A. in Andrychow. Some technical parameters of investigated engines are presented in Table 1.

Tab. 1. Wybrane parametry techniczne obiektów badań
Tab. 1. Some technical parameters of different engine types

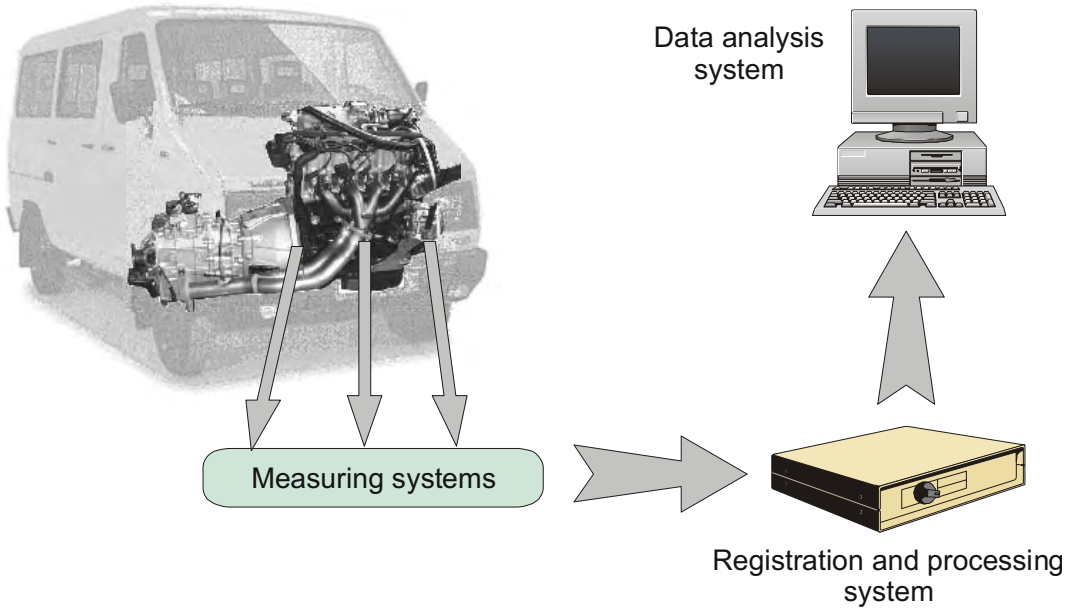
Specification	Engine parameter value		
	359M	4CT90	C22NED
Engine weight (without clutch, water and oil) [kg]	610	240	no data
Ignition type	compression	compression	spark
Cylinder system	in-line, vertical	in-line, vertical	in-line, vertical
Number of cylinders	6	4	4
Cylinder diameter [mm]	110	90	86
Piston course [mm]	120	95	94,6
Engine cubic capacity [dm^3]	6,842	2,417	2,198
Compression ratio	17	20,6	9,2
Firing sequence	1-5-3-6-2-4	1-3-4-2	1-3-2-4
Rated power [kW]	110	63,5	86
Maximum torque [Nm]	440	195	190
Engine speed at max. torque [RPM]	1800-2100	2500	2700
Idle speed [RPM]	500-600	800±20	no data
Maximum engine speed [RPM]	3100	4100	5400
Compression pressure [MPa]	2,4	3,0	no data
Injection pressure [MPa]	22+1	15±1	no data
Oil pressure in lubrication system [MPa]	0,2–0,6	0,38-0,50	no data
Liquid temperature in cooling system [°C]	79–90	80-96	no data
Fuel	diesel oil	diesel oil	petrol
Minimum fuel consumption per unit [g/kWh]	224	295	260

Silniki C22NED oraz 4CT90 stanowią jednostki napędowe samochodów dostawczych z serii LUBLIN, o ładowności ponad 1 ton, produkowanych przez DMP w Lublinie. Silnik 359M montowany był do samochodów ciężarowych STAR 1142 o ładowności do 6,5 tony produkowanych w ZS „STAR" S.A. w Starachowicach. Obydwie marki pojazdów, ze względu na wiele zalet (cena, prosta i łatwa obsługa, duża liczba stacji serwisowych w Polsce itd.) stanowiły w ostatnim okresie popularne środki transportu na średniej długości trasach przewozu.

W celu rejestracji wybranych parametrów pracy badanych silników spalinowych wykorzystano czujniki i systemy pomiarowe standardowo montowane w pojazdach (w szczególności dotyczy to silnika C22NED) lub zainstalowano dodatkowe układy pomiarowe [1, 7]. Sygnały z urządzeń pomiarowych były następnie zapisywane w specjalnie zbudowanych układach przetwarzająco-rejestrujących. Tak uzyskane informacje, związane z pracą silników, przetwarzane były w trybie off-line przy pomocy komputera klasy PC. Schemat blokowy stosowanych systemów rejestracji i przetwarzania danych przedstawiono na rys. 1.

Two of the engines under study: C22NED and 4CT90 are used as driving units in delivery trucks of LUBLIN series (produced by DMP factory in Lublin), while 359M engine is fitted to STAR 1142 trucks (produced by ZS „STAR" S.A. in Starachowice). Due to numerous advantages (price, simple and easy operation, great number of service stations in Poland, etc.) of both LUBLIN and STAR, they are regarded as very popular means of transport on medium-long routes.

Some indicators and measuring systems to determine the maintenance parameters of combustion engines were already mounted in vehicles (it particularly refers to C22NED engine), while the others had to be additionally installed [1, 7]. The indications given by such measuring equipment were recorded in specially constructed processing-registration systems, and then off-line processed by PC computer. Block scheme of applied registration and processing systems is shown on fig. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy stosowanych systemów rejestracji i przetwarzania danych

Fig. 1. Block scheme of applied data registration and processing systems

Pojazdy w których zamontowano obserwowane silniki były badane w trzech różnych warunkach eksploatacji [2]:

1. warunki „normalne"– silnik 359M samochodu STAR 1142,
2. warunki „nadzorowane" – silnik 4CT90 samochodu Lublin III,

The vehicles with various engine types were observed under the following conditions of maintenance [2]:

1. „normal" conditions – 359M engine of STAR 1142,
2. „controlled" conditions – 4CT90 engine of Lublin III,

3. warunki „wymuszone" – silnik C22NED samochodu Lublin II.

Przez warunki „normalne" autorzy rozumieli taką eksploatację pojazdu, przy której badający jest biernym obserwatorem nie mającym wpływu na rodzaj charakter i sposób jego użytkowania. W warunkach „nadzorowanych" badacz ma możliwość częściowego zaplanowania warunków i tras przejazdów samochodów. W warunkach „wymuszonej" eksploatacji pojazdu prowadzone badania charakteryzują się tym, że świadomie wpływa się na warunki oraz trasy przejazdu. Wydaje się, że te trzy opisane rodzaje warunków eksploatacji pojazdów powinny umożliwić uzyskanie różnych rozkładów dla mierzonych parametrów pracy silników.

3. Analiza uzyskanych wyników badań

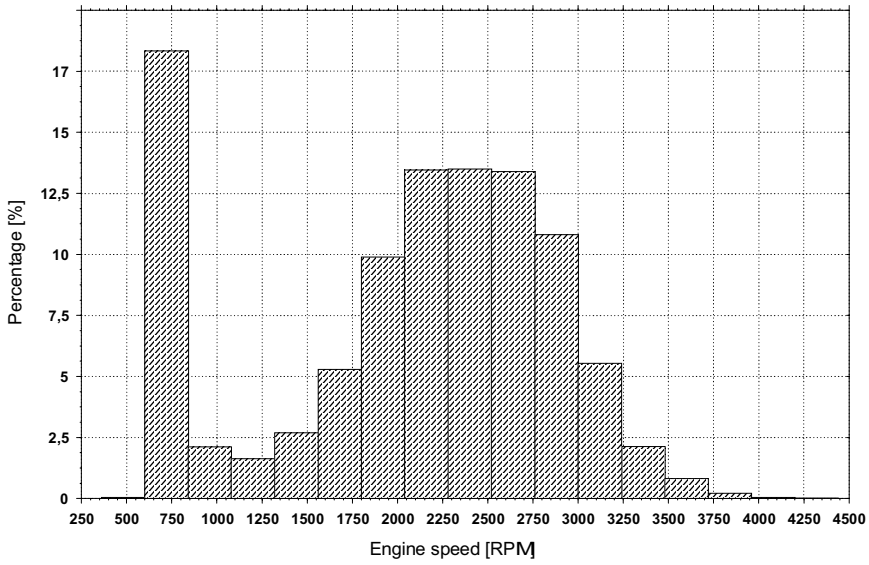
Pierwszym badanym silnikiem był silnik 359M, przy czym brak pomiaru obciążenia tego silnika spowodował, że możliwa była analiza porównawcza tylko jednego parametru pracy. Parametrem tym była prędkość obrotowa wału korbowego silnika. Na rysunkach 2, 4 oraz 6 przedstawiono uzyskane rozkłady wyników tego parametru z uwzględnieniem pracy badanych silników na biegu jałowym. Zaś na rysunkach 3, 5 i 7 przedstawiono rozkłady prędkości obrotowej wału korbowego silnika z wyłączeniem przypadków pracy na biegu jałowym. W celach poglądowych na tych rysunkach przedstawiono także przebieg charakterystyki zewnętrznej momentu obrotowego silników. Wyniki z wykresu na rysunku 5 aproksymowano rozkładem Weibulla, zaś na rysunkach 3 oraz 7 rozkładem normalnym.

3. „forced" conditions – C22NED engine of Lublin II.

Under „normal" conditions the investigator can only play the role of a passive observer, who does not have any impact on the kind, character and way of vehicle operation, while „controlled" conditions partially allow to determine circumstances and routes for vehicles. The carefully planned conditions of vehicle maintenance that may be affected by the observer are considered „forced" conditions. It appears that distribution types of engine maintenance parameters should differ for all three cases described above.

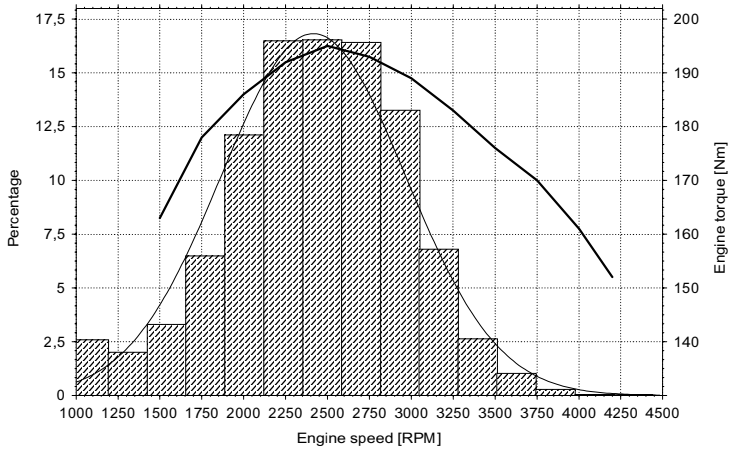
3. Analysis of results

When analysing 359M engine, it was only possible to compare one maintenance parameter, i.e. rotational speed of the engine crankshaft, as its load had not been measured. Distribution of the speed with taking into account the cases of idle running was shown on figures 2, 4 and 6, while figures 3, 5 and 7 indicate distribution of rotational speed of the crankshaft with no idle running-cases. The figures present also the course of external characterization of engine turning moment. The results from fig.3 have been approximated with Weibull distribution, whereas from fig.5 and 7 – with normal distribution.



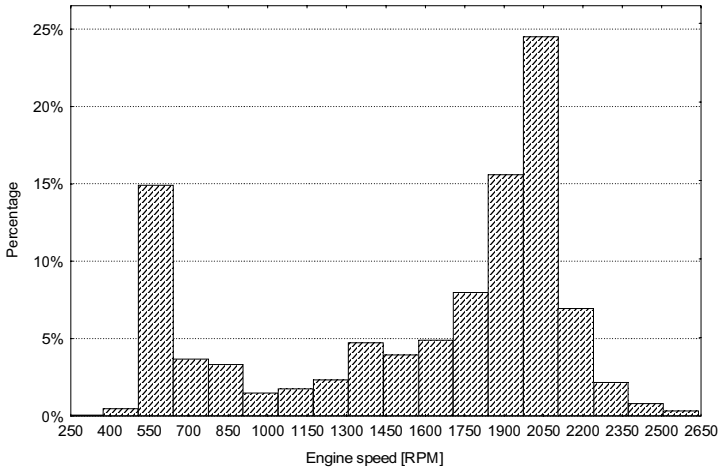
Rys. 2. Rozkład prędkości obrotowej wału korbowego silnika 4CT90 samochodu Lublin

Fig. 2. Distribution of rotational speed of 4CT90 engine crankshaft for Lublin truck



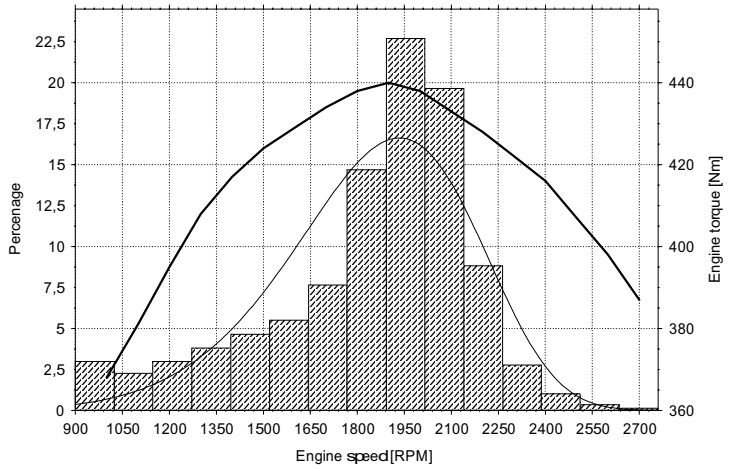
Rys. 3. Rozkład prędkości obrotowej wału korbowego silnika 4CT90 samochodu Lublin z pominięciem przypadków pracy na biegu jałowym

Fig. 3. Distribution of rotational speed of 4CT90 engine crankshaft for Lublin truck with no cases of idle running



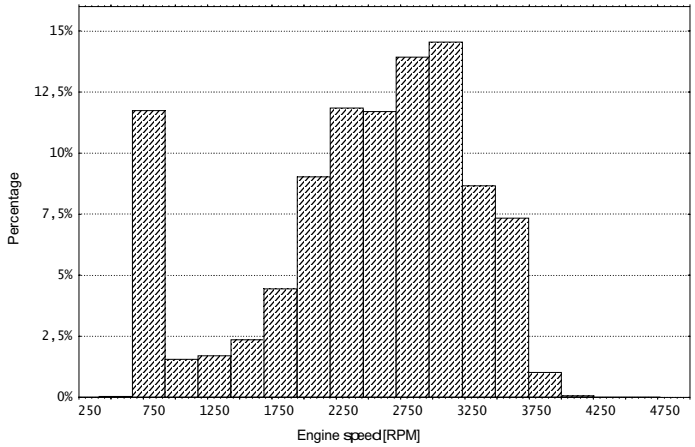
Rys. 4. Rozkład prędkości obrotowej wału korbowego silnika 359M

Fig. 4. Distribution of rotational speed of 359M engine crankshaft



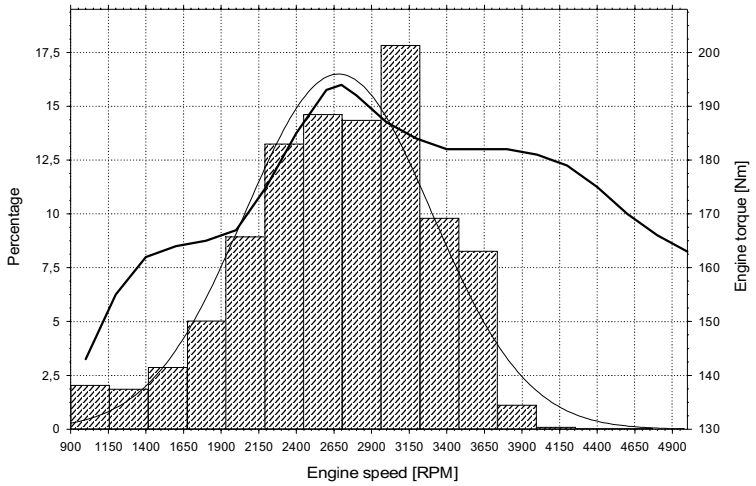
Rys. 5. Rozkład prędkości obrotowej wału korbowego silnika 359M z pominięciem przypadków pracy na biegu jałowym

Fig. 5. Distribution of rotational speed of 359M engine crankshaft with no cases of idle running



Rys. 6. Rozkład prędkości obrotowej wału korbowego silnika C22NED samochodu Lublin

Fig. 6. Distribution of rotational speed of C22NED engine crankshaft for Lublin truck



Rys. 7. Rozkład statystyczny prędkości obrotowej wału korbowego silnika C22NED bez uwzględnienia przypadków pracy na biegu jałowym

Fig. 7. Statistical distribution of rotational speed of C22NED engine crankshaft with no cases of idle running

Analizy statystycznej dokonano przy pomocy programu komputerowego STATYSTYKA PL. Wybrane parametry pracy silnika oraz rozkładów prędkości obrotowej wału korbowego, z wyłączeniem przypadków pracy na biegu jałowym, przedstawiono w tabeli 2. Wartość średnią oraz odchylenie standardowe prędkości obrotowej wału korbowego silnika 359M określono na podstawie rozkładu Weibulla [8] o następujących parametrach: kształtu – 3,14, skali – 1014,87 oraz progu – 42,773. Dla poszczególnych rozkładów prędkości obrotowej przy zastosowaniu statystycznego testu nieparametrycznego Pearsona, zweryfikowano hipotezę H_0 dotyczącą, że dany rozkład empiryczny nie różni się w istotny sposób od przyjętych rozkładów.

The analyse was taken in software STATYSYTKA PL. There are some parameters of engine operation and distribution of rotational speed of the crankshaft, with no cases of idle running shown in table 2. Determination of the average value and standard deviation for 359M engine crankshaft was based on Weibull distribution [8], witch parameter: shape –3,14, scale – 1014,87 and threshold – 42,773. For aware engine speed distribution using statistic Pearson's test verifying H_0 hypothesis that each empirical distribution is not essential different to used distribution.

Tab. 2. Wybrane parametry statystyczne pracy i prędkości obrotowej wału korbowego badanych silników
Tab. 2. Some statistical parameters of operational and rotational speed of engine crankshafts under study

Engine type	Total operation time [hours]	Idle running [%]	Average [turns/min]	Standard deviation [turns/min]
4CT90	80	18,3	2415	550
359M	411	17,6	1760	443
C22NED	10	12,4	2680	624

Analiza porównawcza uzyskanych wyników badań dla trzech różnych silników wykazała, że bez względu na warunki użytkowania pojazdu, występuje duży (ponad 12%) udział pracy silnika na biegu jałowym w całkowitym zarejestrowanym czasie jego działania. Pominięcie w analizie statystycznej przypadków pracy silnika na biegu jałowym pozwala na stwierdzenie faktu, że obserwowana wartość średnia prędkości obrotowej wału korbowego jest bardzo zbliżona do wartości prędkości obrotowej momentu maksymalnego. I tak, dla silnika 4CT90 przy nominalnej prędkości obrotowego momentu maksymalnego równej 2500 obr/min, wynosi ona 2415 obr/min. Dla silnika 359M, którego moment maksymalny występuje przy prędkości obrotowej 1900 obr/min, zaobserwowana wartość oczekiwana wynosi 1760 obr/min. Zaś dla silnika C22NED wartość średnia prędkości obrotowej wału korbowego z badań wynosi 2680 obr/min przy nominalnej prędkości momentu maksymalnego 2700 obr/min.

The comparison of results for three different engine types proved that the contribution of idle running to total registered worktime of the engine is high (exceeds 12%), and is not affected by vehicle maintenance conditions. If the idle running-cases are omitted in statistical analysis, the observed average rotational speed of the crankshaft take nearly the same value as rotational speed of a maximum moment. For 4CT90 engine it amounts to 2415 turns/min (nominal speed of maximum turning moment is equal to 2500 turns/min, for 359M engine – its expected value reaches 1760 turns/min (a maximum moment occurs at rotational speed 1900 turns/min), and for C22NED engine - 2680 turns/min (at nominal speed of maximum moment 2700 turns/min).

4. Wnioski

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań empirycznych w warunkach eksploatacji trzech różnych samochodowych silników spalinowych 359M, 4CT90 oraz C22NED opracowano następujące wnioski:

1) Bez względu na rodzaj warunków eksploatacji badanych pojazdów obserwuje się znaczący udział biegu jałowego w ogólnym czasie pracy silników. Należy zatem zwrócić szczególną uwagę na ten stan działania silnika w badaniach eksploatacyjnych, a w szczególności w eksperymentach stanowiskowych oraz homologacyjnych.
2) W przypadku analizy pracy silnika z wyłączeniem biegu jałowego można stwierdzić, że obserwowana wartość średnia prędkości obrotowej wału korbowego jest bardzo zbliżona (dla każdego z silników) do wartości prędkości obrotowej momentu maksymalnego. Wynika to z podświadomego dążenia operatora (kierowcy) do pracy silnika przy największej jego elastyczno-

4. Conclusions

The analysis of the studies aimed to compare maintenance of three different car combustion engines: 359M, 4CT90 and C22NED results in drawing the following conclusions:

1) It is observed that idle running considerably contributes to total engine worktime with no regard to maintenance conditions of studied vehicles. Special attention should be then paid to that state of engine activity in maintenance studies, in particular in stand and official certification experiments.
2) The analysis of engine operation with no cases of idle running resulted in the remark that the average value of rotational speed of the crankshaft is very close to the value of rotational speed of maximum moment (it applies to all engine types). Such a situation is the effect of an unaware driver tendency to operate engine at its hi-

ści, co powoduje bardziej płynną jazdę pojazdu. Co interesujące, odbywa się to bez względu na warunki i rodzaj eksploatacji samochodu.

3) Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań empirycznych potwierdzają celowość wykonywania takich badań, pomimo dużej ich pracochłonności i znaczących kosztów.

ghest response, what leads to more fluent work of a vehicle, and takes place with no regard to conditions and kind of vehicle maintenance.

3) The results certify the aim to carry out maintenance studies, in spite of great labour and considerable costs they consume.

5. Literatura

[1] Droździel P.: *Metoda oceny eksploatacyjnej trwałości tłokowego silnika samochodowego z uwzględnieniem przebiegu rozruchów*. Rozprawa doktorska. Politechnika Lubelska. Lublin, 1998.

[2] Droździel P., Ignaciuk P., Wośko W.: *Badania wybranych parametrów pracy silnika 4CT90 w warunkach eksploatacji samochodu Lublin III*. Journal of KONES, Internal Combustion Engines, vol. 7, no. 1-2. Permanent Committee of KONES. Warszawa-Lublin, 2000.

[3] Liscak S., Las P.: *Actual Situation of Bus Fleet Renovation in Conditions of the Slovak Republic.* Journal of KONES, Internal Combustion Engines, vol. 8, no. 1-2. Permanent Committee of KONES. Warszawa-Gdynia, 2001.

[4] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa, 1998.

[5] Smalko Z.: *Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 1998.

[6] Wendeker M.: *Badania algorytmów sterujących samochodowym silnikiem benzynowym*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2000

[7] Wendeker M., Czarnigowski J., Hawryluk B.: *Statystyczna ocena warunków pracy samochodowego silnika benzynowego*. Materiały Konferencyjne 25th International Scientific Conference on Combustion Engines. KONES'99.

[8] Poradnik niezawodności. *Podstawy matematyczne*. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA". Warszawa, 1982.

Mgr inż. Jacek Czarnigowski

Dr inż. Paweł Droździel

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika Lubelska
Ul. Nadbystrzycka 36
20-639 Lublin
tel. 0-83 53-81-499
e-mail: jac_cza@archimedes.pol.lublin.pl
e-mail: drozda@archimedes.pol.lublin.pl

Mgr inż. Paweł Kordos

Katedra Silników Spalinowych
Politechnika Lubelska
Ul. Nadbystrzycka 36
20-639 Lublin
tel. 0-83 53-81-499
e-mail: kordos@archimedes.pol.lublin.pl

Jan BANASIAK
Jarzy BIENIEK
Jerzy DETYNA

AKTUALNE PROBLEMY UŻYTKOWANIA MASZYN ROLNICZYCH

CURRENT ISSUES RELATING TO THE USE OF AGRICULTURAL MACHINERY

W publikacji przedstawiono zagadnienia związane z ogólnie pojętym użytkowaniem maszyn w rolnictwie. Wskazano na ścisłe powiązania pomiędzy projektowaniem, konstruowaniem i eksploatacją obiektów. Pokrótce wspomniano o istotnej roli systemów satelitarnej nawigacji (GPS), a także o rozwijającej się elektronice i automatyce.

Słowa kluczowe: eksploatacja maszyn, system produkcji, system eksploatacji, maszyna, technologie.

Issues connected with the use, in broad sense, of machines in agriculture are discussed. It is shown that there are close links between the design, construction and operation of machinery. The significant role of satellite navigation (GPS) and the advances in electronics and automation are touched upon.

Keywords: machine operation, production system, operation system, machine, technologies.

1. Wprowadzenie

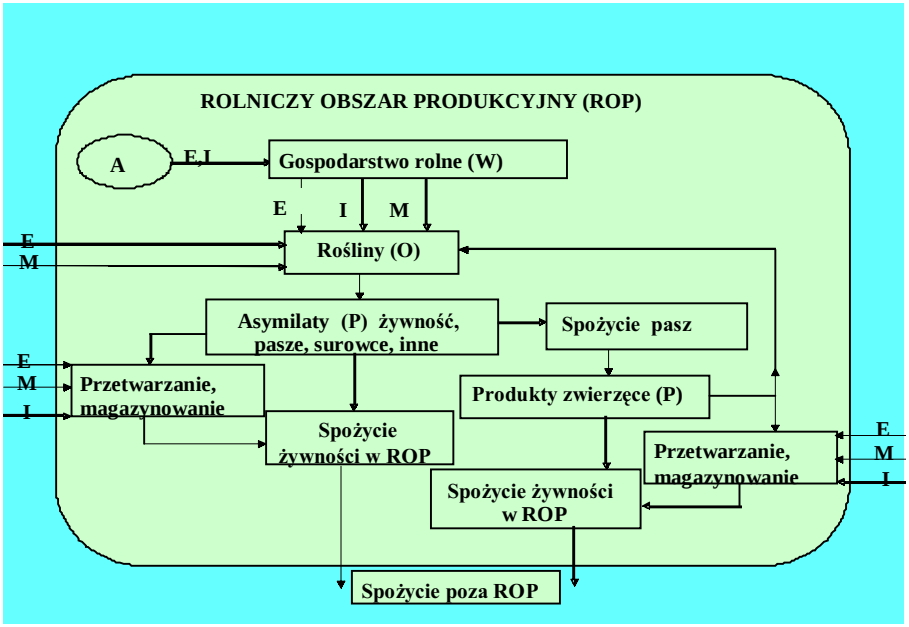
Rolnictwo w swej strukturze i uwarunkowaniach społeczno-przyrodniczych stanowi układ mało stabilny. O tempie i kierunkach przyszłych przeobrażeń decydować będą czynniki ekonomiczne. Wdrożenie nowych technologii i nowych konstrukcji będzie następowało wtedy, gdy efektywność nakładów po ich wdrożeniu będzie wyższa lub równa efektywności nakładów wcześniej ponoszonych. Techniczne środki produkcji stanowią główną część strumieni zasilających rolniczy obszar produkcyjny (ROP) (rys. 1).

Do niedawna postęp techniczny w rolnictwie można było utożsamiać z pojawieniem się w gospodarstwach rolnych nowych doskonalszych maszyn. Obecnie mamy najczęściej do czynienia ze zjawiskami rozwoju technologicznego, który musimy bezwzględnie nazywać postępem naukowo-technicznym. Postęp to więc efekt złożony: pracy genetyków, hodowców, uczonych innych dziedzin i konstruktorów maszyn. Przykładem może być uzyskanie jednokiełkowości nasion buraków, które umożliwiło korzystne zmiany w technologii produkcji, uproszczenie konstrukcji niektórych maszyn rolniczych i uczynienie ich tańszymi.

1. Introduction

Agriculture, because of its peculiar structure and social-natural conditions, is a rather unstable system. Economic factors will determine the rate and directions of its future transformations. New technologies and designs will gain acceptance if the investment efficiency after their implementation is higher or equal to the prior investment efficiency. Technical means of production constitute the bulk of the streams supplying the agricultural production area (APA) (fig. 1).

Until recently the technological progress in agriculture was tantamount to the appearance of new and better machines on farms. Now the phenomena of technological development, which clearly should be referred to as scientific-technical progress, are much in evidence. Thus progress is the resultant of the work of geneticists, breeders, scientists in other fields and designers of machines. An example here is the attainment of beet seed monogerminability, resulting in beneficial changes in production technology and in simplified and cheaper designs of some farm machines.



Rys. 1. Schemat funkcjonowania rolniczego obszaru produkcyjnego: A,W,O – autor, wytwórca, obiekt, EMI – strumienie zasilania (energie, materia, informacje)

Fig. 1. Functional diagram of agricultural production area: D, P, O – designer, producer, object; EMI – energy, matter, information supply streams

O wykorzystaniu efektów postępu naukowo-technicznego może jednak decydować istnienie lub brak określonej infrastruktury wsi.

Aktualny stan infrastruktury wsi krajów pretendujących do członkostwa w Unii Europejskiej, za wyjątkiem Czech, jest zły.

W odniesieniu do użytkowania maszyn rolniczych infrastruktura powinna spełniać dwa postulaty:

- tworzenia optymalnych warunków użytkowania maszyn,
- zapewnienie ochrony środowiska przyrodniczego.

Rozbudowa wielu elementów infrastruktury w trzech przedstawionych grupach (rys. 2) musi więc tworzyć regionalną bądź indywidualną infrastrukturę wsi sprzyjającą wykorzystaniu efektów postępu naukowo-technicznego.

Za strategiczne zadania dla nauki i gospodarki związane z użytkowaniem maszyn rolniczych uznaje się w pierwszej kolejności:

- budowę infrastruktury technicznej wsi w oparciu o którą możliwe będzie wprowadzanie nowoczesnych systemów użytkowania maszyn, a następnie:
- tworzenie globalnych i krajowych systemów informatycznego wspomagania użytkowania maszyn rolniczych,

To take advantage of the effects of scientific-technical progress, an adequate rural infrastructure is needed.

The current state of the rural infrastructure in the countries aspiring to the membership of the EU, with the exception of the Czech Republic, is bad.

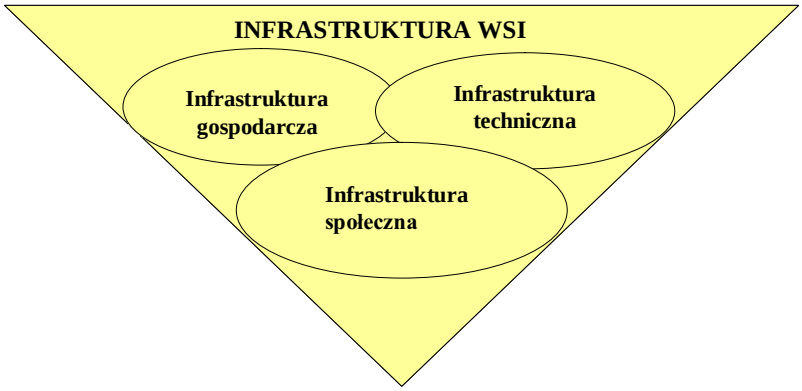
As regards agricultural machinery, the infrastructure should:

- enable the creation of optimum conditions for the use of the machinery,
- ensure the protection of the natural environment.

Thus the infrastructure (in which three components can be distinguished as shown in fig. 2) should be developed to form a regional or individual rural infrastructure which will make it possible take advantage of scientific-technical progress.

The strategic tasks relating to the use of agricultural machinery, which confront science and the economy, are (in order of priority):

- the development of a rural infrastructure which will make it possible to introduce modern systems of machinery use,
- the creation of global and national information systems aiding agricultural machinery use,
- forecasting trends in the development of agricultural machinery,



Rys. 2. Podstawowe składniki infrastruktury wsi
Fig. 2. Basic components of rural infrastructure

- prognozowanie kierunków rozwoju konstrukcji maszyn rolniczych,
- opracowanie form i zasad prawno-organizacyjnych zespołowego użytkowania maszyn w rolnictwie,
- ochronę środowiska i przestrzeni rolniczej.

2. Praktyka i kierunki badań nad użytkowaniem maszyn w rolnictwie

Przedstawiając użytkowanie maszyn rolniczych jako zadanie systemu eksploatacji maszyn należy podkreślić potrzebę uporządkowanego wydzielenia funkcji:

- rozpoznania i opisu mikrośrodowiska,
- zastosowania agregatów maszynowych,
- oceny spełnienia wymagań.

W dobie wszechobecnej informatyki nowoczesność w użytkowaniu maszyn rolniczych to głównie stworzenie i wykorzystanie bazy informatycznej. Jak widać z przedstawionego schematu (rys. 3) użytkowanie maszyn funkcjonuje jako pewien zamknięty cykl na styku inżynierii rolniczej i nauk technicznych. W trakcie użytkowania maszyn zostają wykreowane nowe wymagania techniczno-eksploatacyjne tych urządzeń, pojawiają się nowe rozwiązania technologiczne. Powiązania te w rolnictwie mają szczególne znaczenie ze względu na konieczność stałego odnoszenia się do środowiska przyrodniczego. W efekcie tego postęp techniczny rozumiany jako projektowanie, konstruowanie i użytkowanie maszyn w rolnictwie zostaje właściwie ukierunkowany.

Użytkowanie maszyn rolniczych w oparciu o satelitarne systemy lokalizacyjne: GPS, DGPS przechodzi z fazy opracowań teoretycznych do realizacji w praktyce. Poza realizacją konkretnego zabiegu rolniczego, niezwykle ważnymi stają się po raz kolejny fazy: rozpoznanie mikrośrodowiska (pola) i ocena spełnienia wymagań.

- the development of legal-organizational forms and principles of the collective use of machinery in agriculture,
- the protection of the agricultural environment and space.

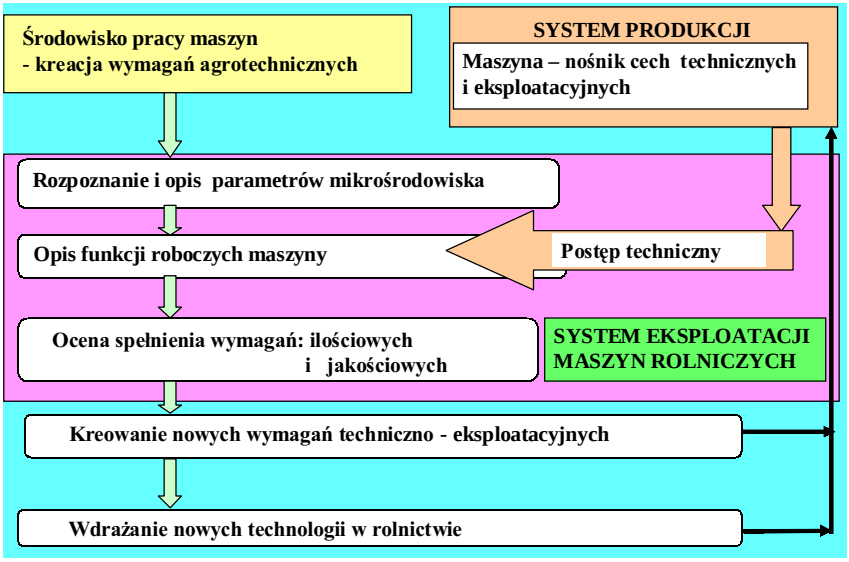
2. Practice and direction of research into use of machines in agriculture

The use of agricultural machinery as a task for a system of machinery utilization requires the specification of the following functions:

- the identification and description of the microenvironment,
- the application of machine sets,
- the assessment of the degree of adaptation to requirements.

In the information age, an information base must be created and used to properly utilize agricultural machinery. According to the diagram shown below (fig. 3), the use of machines functions as a closed cycle at the junction of agricultural engineering and technical sciences. As machines are used, new technical-operating requirements are created for them and new technological solutions appear. These interrelationships are particularly important in agriculture since there is a need for constant referring to the natural environment. As a result, technical progress (understood as the design, construction and use of machines) in agriculture is given a proper direction.

The use of agricultural machinery based on GPS and DGPS satellite positioning systems is becoming a reality. Beside the realization of a particular agricultural operation, microenvironment (field) identification and assessment of adaptation to requirements are highly important here.



Rys. 3. Schemat relacji między systemem eksploatacji maszyn rolniczych a jego otoczeniem

Fig. 3. Diagram of interrelations between agricultural machinery utilization system and its environment

Udostępnienie satelitarnych systemów lokalizacyjnych, globalnych np. GPS lub tworzenie systemów krajowych pozwoli na automatyczne sterowanie funkcjonowaniem maszyn i urządzeń na terenie bardzo rozległych gospodarstw rolnych lub obszarów leśnych w oparciu o przygotowane i korygowane programy komputerowe (rys. 4).

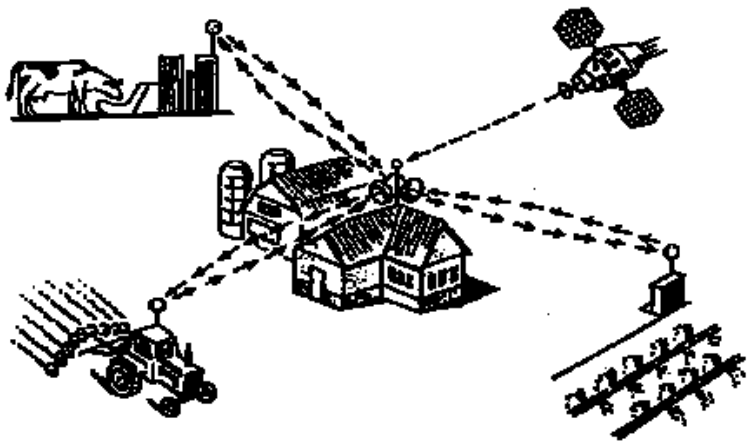
Satelitarne systemy lokalizacyjne, programy komputerowe, wyposażenie elektroniczne maszyn staje się podstawą podejmowania zarówno decyzji eksploatacyjnych jak i produkcyjnych a przede wszystkim umożliwią realizację zadań tzw. rolnictwa precyzyjnego (rys. 5).

Wykorzystanie tych systemów umożliwia precyzyjne zbieranie i rejestrowanie całego szeregu parametrów opisujących poszczególne „punkty" pola (wycinki rzędu kilku metrów kwadratowych). Tworzy to perspektywy precyzyjnego aplikowania środków, nie w dawkach

Once access to global positioning systems, e.g. GPS, becomes available and national positioning systems are built, it will be possible to automatically control machinery and equipment working on very large farms or in forest areas. For this purpose special, constantly updated, computer programs will be used (fig. 4).

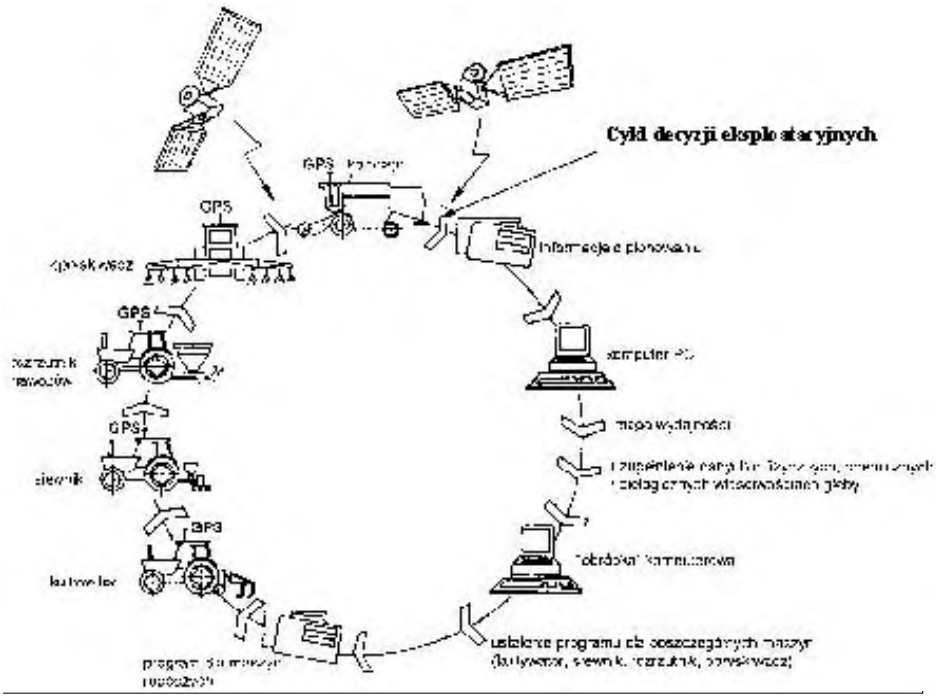
Satellite positioning systems, computer software, electronic equipment is becoming the basis for taking operational and production decisions. First and foremost, it enables the performance of *precision farming* tasks (fig. 5).

The systems enable the acquisition and storing of a range of parameters which describe individual "points" of the field (sectors in the order of a few square meters). Owing to this, the precision appli-



Rys. 4. Schemat działania satelitarnego systemu sterowania pracą urządzeń technicznych w rolnictwie

Fig. 4. Functional diagram of satellite system for controlling technical devices in agriculture



Rys. 5. Wykorzystanie systemów GPS i DGPS w cyklu decyzji eksploatacyjnych „rolnictwa precyzyjnego"
Fig. 5. Use of GPS and DGPS systems in precision farming operational decision cycle

średnich dla całego pola a w dawkach zróżnicowanych dla poszczególnych „punktów". W efekcie dotychczas stosowanych „aplikacji uśrednionych", poza miejscami pola (punktami), w których dobór dawki np. nawozu odpowiadał rzeczywistemu zapotrzebowaniu, były miejsca z niedoborem składników pokarmowych i miejsca przenawożone. Przenawożenie trzeba uznać za szczególnie niekorzystne. Występują wtedy skutki marnotrawstwa środków z równoczesnym szkodliwym oddziaływaniem na środowisko. Natomiast przy występujących niedoborach następuje zmniejszenie plonowania.

Rolnictwo precyzyjne może się więc przyczynić do:

- uzyskania wyższych wydajności z jednostki powierzchni pola przy oszczędnym stosowaniu środków,
- rozwiązania problemów ekologicznych przez racjonalne dozowania środków ochrony roślin,
- dostosowania rodzaju i ilości zabiegów do miejscowych potrzeb pola,
- optymalizacji norm wysiewu roślin w relacji do urodzajności gleby,
- osiągania z powyższego, wymiernych korzyści ekonomicznych.

Aktualną problematykę badawczą związaną z użytkowaniem maszyn rolniczych obecnie stosowanych, jak i tych nowej generacji, stanowić będą:

- intensywność użytkowania maszyn w powiązaniu z efektywnością,

cation of agents – not in average doses for the whole field, but in different doses at the particular "points" – becomes possible. The "averaged application" used so far results in places (points) with doses corresponding to the actual demand, places deficient in nutrients and overfertilized places. Overfertilization is particularly disadvantageous since not only chemical agents are wasted, but also the environment is harmed. Fertilizer deficiency results in reduced crop yield.

Thus precision farming can contribute to:

- the attainment of higher yields per unit of area at economical use of resources,
- the solution of environmental problems through the rational dosing of crop protection chemicals,
- the fitting of the kind and number of measures to the local needs of the field,
- the optimization of seeding standards in relation to soil fertility,
- the gaining of tangible economic benefits from the above.

The current research problems relating to the use of the existing and new-generation agricultural machinery comprise:

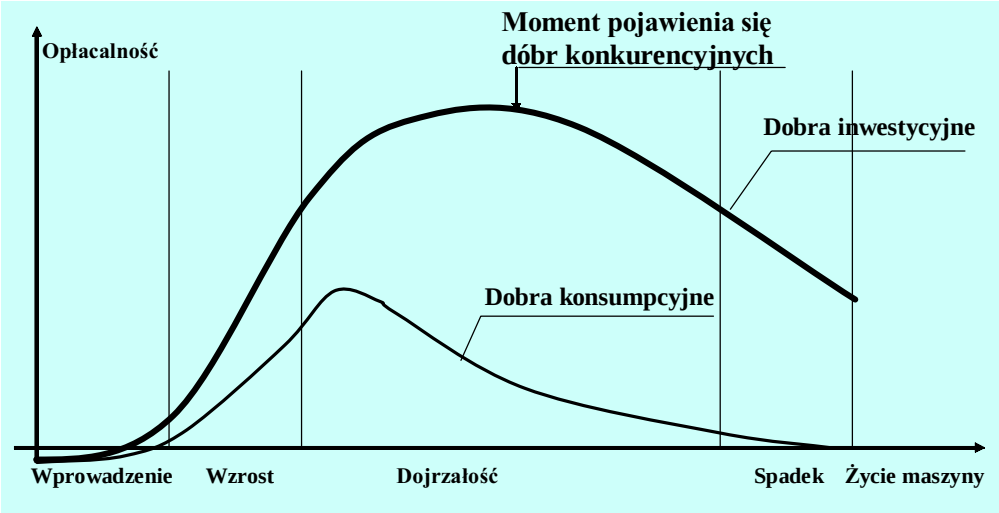
- the intensity of use of machines in relation to efficiency,

- tworzenie i wykorzystanie komputerowych systemów pomiarowych,
- profilaktyka w użytkowaniu maszyn rolniczych (doradztwo techniczno-rolnicze, szkolenie rolników w użytkowaniu maszyn),
- technologia i intensywność obsługi technicznej,
- wykorzystanie systemów komputerowych do diagnozowania maszyn,
- określenie procedur obsługowych i auditingu obsług.

Jeżeli spojrzymy na zmieniającą się opłacalność stosowania maszyn (rys. 6) w okresie jej użytkowania – to wyraźnie widoczna jest strefa spadku. Rosną koszty odnowy technicznej i niedostosowania do poziomu jakości, równocześnie na rynku pojawiają się konkurenci.

- the creation and utilization of computer measuring systems,
- prevention in the use of agricultural machinery (technical-agricultural consulting, training of farmers in the use of machines),
- the establishment of service and service auditing procedures.

If one looks at machine use profitability (fig. 6), which changes during the machine's working life, one can clearly distinguish a zone of decline: the costs of retrofitting and staying below the required quality level increase and at the same time competitors appear on the market.



Rys. 6. Krzywe cyklu życia produktów według Vallmutha

Fig. 6. Product life cycle curves according to Vallmuth

W świetle przedstawionej krzywej życia produktów pojawiają się pytania szczególnie ważne w rolnictwie, na które odpowiedzi jednoznacznych brak:

- Jak długo użytkować maszyny rolnicze?
- Czy wydłużać okres życia maszyn rolniczych przy niskim ich wykorzystaniu sezonowym?
- Czy nadać konstrukcjom trwałość maksymalną, czy tylko na miarę potrzeb życia maszyny?
- Jak połączyć ograniczoną trwałość konstrukcji z jej dużą niezawodnością?

Pytanie: Jak długo użytkować maszynę a za tym jak intensywnie? – pozostaje nadal bez precyzyjnej odpowiedzi. Obrazując życie maszyny krzywą cyklu życia podobną do cyklu życia ludzkiego powstaje pytanie: Czy wydłużać czas użytkowania maszyn rozkładając jej amortyzację na wiele lat, czy użytkować krótko tylko do momentu pojawienia się spadku opłacalności. Zagadnienie to pozostaje w ścisłym związ-

In the light of the above, questions particularly important for agriculture arise (as yet there are no definite answers to them):

- How long should farm machines be in use?
- Should the life of farm machines be prolonged if their seasonal use is low?
- Should machine constructions be endowed with maximum durability or should their durability be adequate to their life?
- How to reconcile the limited life of a construction with its high reliability?

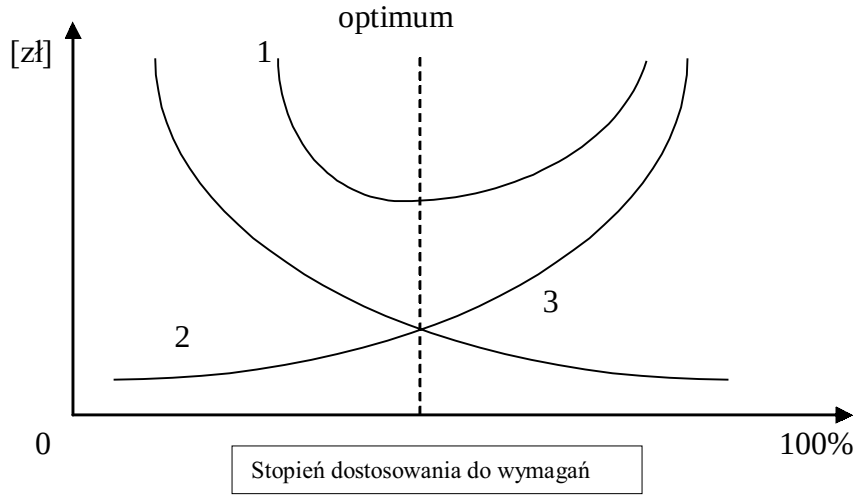
The question: How long (how intensively) should a machine be used? – still remains unanswered. If one represents a machine's life by a life cycle (similar to the human life cycle) curve, a question arises: Should the machine's life cycle be prolonged by spreading its depreciation over many years or should the machine be used until a decline in profitability begins? This

ku z trzecim członem procesu eksploatacji maszyn (rys. 3) a mianowicie z oceną stopnia spełnienia wymagań ilościowych i jakościowych.

Kosztuje zarówno dostosowanie się do wymagań jakościowych co umożliwiają nowe konstrukcje maszyn jak i niedostosowanie towarzyszące często użytkowaniu maszyn starych (rys. 7). Koszty materiałowe utrzymania maszyn roboczych w ruchu oraz utrzymania określonego poziomu jakości pracy w końcowej fazie życia maszyn niekiedy wielokrotnie przekraczają koszty ich produkcji. Stąd rosnące znaczenie diagnostyki w użytkowaniu maszyn – metod doświadczalnych i rozwoju środków technicznych pozwalających na ciągłą ocenę stosunku nakładów do efektów. Pozwoliło by to ująć w jeden system zagadnienia techniczne i ekonomiczne.

problem is closely bound with the third element of the machine utilization process (fig. 3), i.e. the assessment of the degree of adaptation to quantitative and qualitative requirements.

It costs to adapt to qualitative requirements through new machine designs, but it also costs not to adapt to them by using old machines (fig. 7). The costs of maintaining earthwork machines in operation at a specified work quality level in the final stage of their life often exceed several times their manufacturing costs. Hence diagnostics (experimental methods and technical means enabling the continuous estimation of the cost-effectiveness ratio) will play an increasingly more significant role in the use of machines. Thus the relevant technical and economic aspects will be handled by one system.



Rys. 7. Model kosztów jakości według Jurana: 1 – całkowity koszt jakości, 2 – koszty dostosowania, 3 – koszty niedostosowania

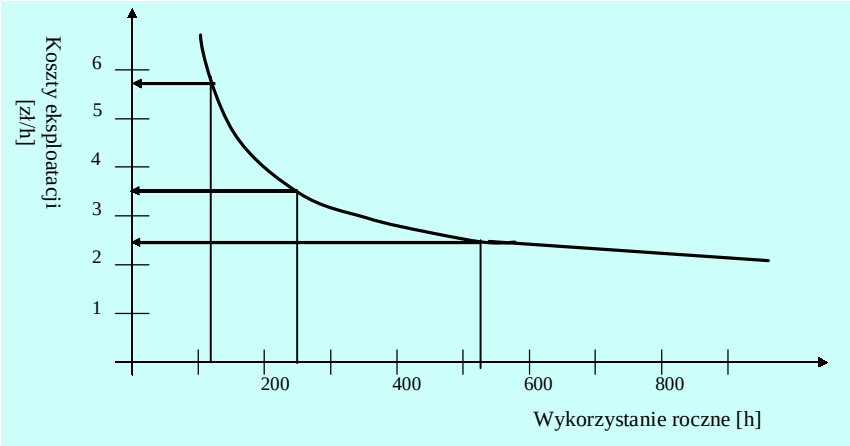
Fig. 7. Quality cost model according to Juran: 1 – total cost of quality, 2 – adaptation costs, 3 – costs of not adapting.

Koncepcja zespołowego użytkowania przyjmuje w założeniu możliwość rozłożenia kosztów utrzymania maszyn na większą masę produktu. Koszt jednostkowy przenoszony na jednostkę produktu maleje ze wzrostem wykorzystania rocznego maszyny (rys. 8).

Możliwości uzyskania wysokiego wykorzystania sezonowego maszyn o dużej wydajności jednostkowej mają zapewnić organizacje rolnicze zespołowego użytkowania maszyn. Organizacje te silnie wspierane przez ośrodki doradztwa i lokalne ośrodki akademickie (naukowe), obecnie nazywane „kółkami maszynowymi" mają umożliwić rolnikom gospodarstw o małym potencjale ekonomicznym, korzystanie ze środków wysoko zaawansowanej techniki.

The concept of collective use assumes the possibility of spreading machinery maintenance costs over a larger volume of a product. The unit cost per unit of product decreases as the annual use of the machine increases (fig. 8).

The attainment of high seasonal utilization of machines with a high unit capacity is to be ensured by agricultural organizations responsible for collective use of machinery. The organizations (called *machine circles*), receiving strong support from consulting centres and local academic (scientific) centres, will allow small farmers to use state-of-the-art technical means.



Rys. 8. Model zmienności jednostkowego kosztu eksploatacji maszyn w relacji do ich wykorzystania rocznego
Fig. 8. Costs of operating machines versus their annual use

W strukturze „kółek maszynowych" (rys. 9) funkcjonowały by:

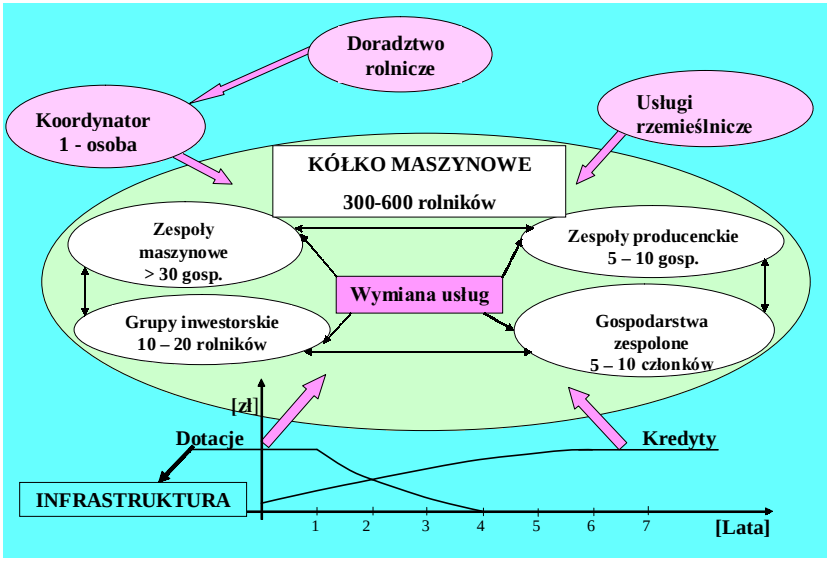
- zespoły maszynowe, które cechowały by się wspólnym użytkowaniem kompletnego zestawu maszyn lub jego części,
- zespoły producenckie - zespołowo użytkujące maszyny specjalistyczne np. kombajn do zbioru chmielu,
- grupy inwestorskie jednoczące środki finansowe dla realizacji specjalnych zadań inwestycyjnych,
- gospodarstwa zespolone łączące udziały ziemskie pod zarządem jednego gospodarza.

Istotą współdziałania tych jednostek jest wymiana usług rozliczonych bezpieniężnie - miernikami naturalnymi lub przelicznikami.

The *machine circles* will incorporate (fig. 9):

- machine units characterized by the collective use of a full or partial set of machines;
- producer teams – collectively using specialized machines, e.g. a hop harvester;
- investor groups pooling financial resources for carrying out special investment projects;
- consolidated farmsteads with their land shares brought under the management of one farmer.

The cooperation between these units consists in the exchange of services with nonpecuniary settlement of accounts – using farm produce measures or conversion rates.



Rys. 9. Model współdziałania organizacji zespołowego użytkowania maszyn w rolnictwie
Fig. 9. Model of cooperation between organizations for collective use of machinery in agriculture

Dotacje stopniowo malejące kierowane byłyby w głównej mierze na przebudowę lub rozbudowę infrastruktury.

3. Podsumowanie

Podsumowując można stwierdzić, że postęp w użytkowaniu maszyn rolniczych w obecnej dobie, to spełnienie następujących postulatów:

- strategia działania w rozwiązywaniu problemów technicznych w procesach tworzenia maszyn dla rolnictwa musi wynikać z dokładnego rozpoznania warunków i potrzeb ich użytkowania w określonym środowisku;
- wykorzystania informatyki dla tworzenia baz danych o warunkach i skutkach użytkowania maszyn w rolnictwie;
- tworzenia form organizacyjnych sprzyjających wykorzystaniu wysoko wydajnych maszyn wyposażonych w techniczne środki rejestracji i transmisji danych.

Wynikać z tego będą także nowe wymagania dotyczące konstrukcji maszyn rolniczych.

Są to:

- poprawa bezpieczeństwa pracy obsługi;
- wprowadzenie elementów automatyki, robotyki dla zastąpienia uciążliwych i niebezpiecznych czynności manualnych;
- budowa maszyn o rozszerzonym zakresie ich zastosowania, uwzględniające wymogi stateczności dynamicznej ważnej w warunkach terenów górzystych;
- skuteczniejsze zabezpieczenie antykorozyjne maszyn;
- stosowanie nowych materiałów, np. kompozytów;
- poszukiwanie oszczędności energetycznych, np. przez zastosowanie w rolnictwie nowych paliw takich jak gaz propan-butan, paliwo wodorowe, oleje roślinne;
- zastosowanie komputerów pokładowych i urządzeń współpracych z satelitarnymi systemami lokalizacyjnymi.

Gradually reduced subsidies will be allocated mainly for the rebuilding or development of the infrastructure.

3. Conclusion

In conclusion, one can say that progress in the use of agricultural machinery in this age depends on meeting the following requirements:

- the strategy of solving technical problems in the creation of machines for agriculture must be based on the accurate identification of the conditions and needs of the use of the machines in a given environment;
- the application of information science to the creation of databases for storing information on the conditions and effects of the use of machines in agriculture;
- the creation of organizational forms conducive to the use of highly efficient machines equipped with data recording and transmission devices.

Also new requirements for agricultural machine designs will have to be met, i.e.

- the improvement of the safety of service;
- the introduction of elements of automation and robotics to replace arduous and hazardous manual operations;
- the machines' range of application should be wide – they should have appropriate dynamic stability to work in mountainous terrain;
- more effective anticorrosion protection of machines;
- the use of new materials, e.g. composites;
- the search for energy savings, e.g. through the use of new fuels such as propane-butane gas, hydrogen fuel and plant oils in agriculture;
- the application of on-board computers and devices hooked up to satellite positioning systems.

4. References

[1] Banasiak J. i in.: *Agrotechnologia*, PWN 1998.
[2] Michałek R.: *Kierunki badań naukowych w zakresie inżynierii rolniczej*. Zbiór referatów IBMER Warszawa 1996.
[3] Mielec K., Kobylarz J.: *Rolnictwo precyzyjne najnowszą techniką mechanizacji polowej produkcji roślinnej*. Prace Przemysłowego Instytutu Maszyn Rolniczych 3/1998.

[4] Oziemski St.: *Ewolucje rentowności wytworu technicznego*. Materiały IV Konferencji Naukowej pt.: "Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn". Wrocław - Szklarska Poręba 1999.
[5] Pawlak J., Wójcicki Z.: *Stan i kierunki rozwoju techniki rolniczej w Polsce*. ZEE - IBMER Warszawa 1996.
[6] Piasecki St.: *Struktura problemowa nauk o eksploatacji obiektów technicznych*. Eksploatacja i Niezawodność. PNTTE 3/1999.
[7] Wierzbicki K.: *Prace badawcze IBMER z zakresu infrastruktury technicznej obszarów wiejskich*. Kierunki prac naukowych w inżynierii rolniczej u progu XXI wieku. IBMER Warszawa 1998.

Dr hab. inż. Jan Banasiak prof. nadzw. AR
Dr inż. Jerzy Bieniek
Instytut Inżynierii Rolniczej
Zakład Eksploatacji Maszyn Rolniczych
Akademia Rolnicza we Wrocławiu
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław
e-mail: banasiak@imr.ar.wroc.pl
e-mail: bieniek@imr.ar.wroc.pl

Dr inż. Jerzy Detyna
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,
Politechnika Wrocławska
ul. I. Łukasiewicza 7/9
50-371 Wrocław
e-mail: jurek_pwr@wp.pl