

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Krzysztof Danilecki

**Studium modelowania i optymalizacji
współpracy silnika trakcyjnego
o zapłonie samoczynnym
z turbosprężarkami pracującymi
w układzie doładowania zakresowego**

Szczecin 2012

Recenzenci

OLEH KLYUS

KRZYSZTOF WISŁOCKI

WYDANO ZA ZGODĄ

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO

W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-120-2

WYDAWNICTWO UCZELNIANE ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

70–311 Szczecin, al. Piastów 50, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Druk PPH „Zapol” Dmochowski, Sobczyk Sp.j., 71–062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 91 434 10 21

e-mail: zarzad@zapol.com

Spis treści

Wykaz oznaczeń.....	7
Wykaz skrótów.....	11
1. Wstęp.....	13
2. Rola turbodoładowania w rozwoju współczesnych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym.....	17
2.1. Geneza problemu	17
2.2. Istota przedmiotu analizy	21
2.3. Ograniczenia doładowania w obszarze charakterystyk urządzenia doładowującego przy współpracy z silnikiem trakcyjnym	25
2.4. Kształtowanie warunków współpracy silnika z turbosprężarkami w rozbudowanych układach doładowania.....	27
2.4.1. Doładowanie wielostopniowe	27
2.4.2. Doładowanie zakresowe	29
2.5. Ocena metod kształtowania współpracy silnika z turbosprężarkowym układem doładowania	38
3. Metody oceny współpracy silnika z układem turbodoładowania.....	43
3.1. Istota procesów przepływowych w turbodoładowaniu	43
3.2. Charakterystyka metod.....	46
3.2.1. Ogólna klasyfikacja.....	46
3.2.2. Metody doświadczalne.....	47
3.2.3. Modelowanie warunków współpracy silnika z urządzeniem doładowującym	49
3.2.4. Zastosowanie metod optymalizacyjnych	63
3.3. Ocena metod badawczych.....	65
4. Problem badawczy	69
4.1. Sformułowanie problemu.....	69
4.2. Pytania badawcze	70
4.3. Cel i zakres pracy	71
5. Metodologiczne podstawy oceny warunków współpracy silnika z turbosprężarkami pracującymi w układzie doładowania zakresowego	79
5.1. Kryteria prawidłowej współpracy turbosprężarek z silnikiem.....	79
5.2. Podstawy teoretyczne.....	81
5.3. Wskaźniki porównawcze optymalnej współpracy turbosprężarek w układzie równoległym.....	82
5.3.1. Sprawność zespołu sprężarek.....	82
5.3.2. Sprawność zespołu turbin	84
5.4. Zależności bilansowe dla układu doładowania zakresowego	86

5.5. Ocena uwarunkowań optymalnego podziału obciążenia pomiędzy turbosprężarkami.....	88
5.6. Wnioski ze studiów teoretycznych.....	91
6. Wstępne badania porównawcze warunków współpracy turbosprężarek z silnikiem z doładowaniem zakresowym.....	93
6.1. Cel, zakres i warunki badań	93
6.2. Charakterystyka obiektu badań	94
6.3. Stanowisko badawcze	96
6.4. Wyniki badań i ich dyskusja	98
6.5. Wnioski z badań doświadczalnych	103
7. Modelowanie i symulacja silnika z doładowaniem zakresowym.....	105
7.1. Cel, zakres i warunki symulacji	105
7.2. Ogólne założenia budowy modelu	105
7.3. Model matematyczny silnika	107
7.3.1. Zmienne opisowe modelu	107
7.3.2. Badania identyfikacyjne.....	110
7.3.3. Założenia analizy czynnikowej	113
7.3.4. Analiza wrażliwości zmiennych zależnych	114
7.3.5. Funkcje modelu silnika	120
7.4. Model sprężarki.....	122
7.5. Model turbiny z zasilaniem pulsacyjnym.....	124
7.6. Algorytmizacja modelu	127
7.7. Ocena czułości procedury numerycznej na zmiany warunków obliczeń.....	129
7.8. Weryfikacja modelu	133
7.9. Symulacyjne badania charakterystyk silnika i turbosprężarek współpracujących w układzie doładowania zakresowego.....	135
7.9.1. Zasady analizy współpracy turbosprężarek z silnikiem w warunkach pulsacyjnego przepływu spalin.....	135
7.9.2. Wstępne rozpoznanie warunków doładowania silnika przy współpracy z jedną turbosprężarką oraz z dwiema turbosprężarkami	136
7.9.3. Badania wpływu średnicy wirników i przekrojów wlotowych turbin na przebieg charakterystyki silnika	143
7.9.4. Związek podziału obciążenia pomiędzy turbosprężarką i wybranymi wskaźnikami obiegu silnika.....	154
7.9.5. Uwarunkowania poprawnego kształtowania charakterystyki napędowej silnika	159
7.9.6. Wpływ zmian charakterystyk sprężarek podczas ich doboru do silnika.....	161
7.9.7. Ogólna ocena wyników badań symulacyjnych	164
8. Zastosowanie optymalizacji do kształtowania charakterystyki napędowej silnika z doładowaniem zakresowym.....	167
8.1. Sformułowanie zadania	167
8.2. Kryterium optymalnego doboru	167
8.3. Zmienne decyzyjne i ich ograniczenia	168

8.4. Procedura optymalizacyjna	169
8.5. Wyniki badań optymalizacyjnych.....	171
9. Modelowanie i optymalizacja układu sterowania współpracą turbosprężarek z silnikiem	175
9.1. Uwagi ogólne	175
9.2. Koncepcja optymalizacji funkcji sterującej	175
9.3. Model matematyczny układu sterowania.....	177
9.4. Opis konstrukcji układu sterowania numerycznego.....	179
9.5. Doświadczalna weryfikacja modeli oraz algorytmu sterowania	182
9.6. Wnioski z badań optymalizacyjnych.....	185
10. Podsumowanie	187
10.1. Ogólna charakterystyka osiągniętych wyników.....	187
10.2. Ważniejsze wnioski ze studiów i z badań	189
10.3. Proponowane kierunki dalszych prac.....	193
Załączniki.....	195
Załącznik A. Charakterystyka obiektu badań	197
Załącznik B. Szacowanie niepewności pomiarów	199
Załącznik C. Charakterystyka turbosprężarek	205
Załącznik D. Badania identyfikacyjne silnika.....	207
Załącznik E. Estymacja parametrów funkcji regresji dla wirników sprężarek	213
Załącznik F. Opis równań wykorzystanych w modelu	215
Załącznik G. Ocena wrażliwości procedury numerycznej na dobór warunków zakończenia obliczeń iteracyjnych.....	221
Załącznik H. Wyniki weryfikacji modelu	223
Załącznik I. Wyniki badań zależności korelacyjnej pomiędzy sprężem a parametrami pracy turbosprężarek i podziałem ich obciążenia.....	225
Załącznik J. Kształtowanie charakterystyki silnika z optymalnymi turbosprężarkami	227
Piśmiennictwo	231
Summary	245
Zusammenfassung.....	247

Wykaz oznaczeń

A	(kg/s)	– zużycie powietrza przez silnik
A_T	(cm ²)	– pole powierzchni przekroju skrzyni wlotowej turbiny
a_{kr}	(m/s)	– krytyczna prędkość przepływu gazu
B	(kg/h)	– bezwzględne zużycie paliwa
b	(g/(kW h))	– jednostkowe zużycie paliwa
c_0	(m/s)	– prędkość przepływu spalin na wlocie do wirnika turbiny
c_p	(J/(kg K))	– ciepło właściwe w przemianie izobarycznej
c_t	(m/s)	– prędkość przepływu spalin w przekroju wlotowym turbiny
c_1	(m/s)	– prędkość przepływu powietrza w przekroju wlotowym sprężarki
D_{S0}	(m)	– średnica osadzenia łopatek wirnika sprężarki
D_{S1}	(m)	– średnica łopatek po stronie wlotowej wirnika sprężarki
D_T	(m)	– średnica zewnętrzna wirnika turbiny
F_p	(kg · √K)/(Pa · s)	– parametr przepływu
H_t	(J/kg)	– izentropowa praca rozprężania w turbinie
H_s	(J/kg)	– izentropowa praca sprężania w sprężarce
H_{sc}	(J/kg)	– całkowita izentropowa praca sprężania zespołu sprężarek
k	(m ⁻¹)	– współczynnik absorpcji
k_f	(–)	– współczynnik zwiększenia przepustowości turbiny przy pulsacyjnym przepływie spalin
k_N	(–)	– współczynnik zwiększenia mocy turbiny przy pulsacyjnym przepływie spalin
L_t	(kg/kg)	– teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze podczas spalania (14,6 kg/kg paliwa)
$\dot{m}_u$	(kg/s)	– strata masy ładunku przez nieszczelności
$\dot{m}_s$	(kg/s)	– strumień masy powietrza ze sprężarki
$\dot{m}_{rs}$	(kg/s)	– zredukowany strumień masy powietrza ze sprężarki
$\dot{m}_{sc}$	(kg/s)	– całkowity strumień masy powietrza z zespołu sprężarek
$\dot{m}_{tc}$	(kg/s)	– całkowity strumień masy spalin przepływających przez zespół turbin
$\dot{m}_t$	(kg/s)	– masowe natężenie przepływu spalin przez turbinę
$\dot{m}_2$	(kg/s)	– masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę
$\dot{m}_3$	(kg/s)	– masowe natężenie przepływu spalin przed turbiną
n	(obr/min)	– prędkość obrotowa silnika

n_N	(obr/min)	– prędkość obrotowa silnika znamionowa
n_{II}	(obr/min)	– prędkość obrotowa silnika przy przełączaniu turbosprężarek
n_{rt}	(obr/min)	– zredukowana do warunków odniesienia (ciśnienia p_{ra} i temperatury T_{ra}) prędkość obrotowa turbosprężarki
n_t	(obr/min)	– prędkość obrotowa turbosprężarki
n_s	–	– wykładnik politropy sprężania w sprężarce
N_s	(W)	– moc sprężarki
N_t	(W)	– moc turbiny
P	(kW)	– moc użyteczna silnika
p_1	(MPa)	– ciśnienie powietrza przed sprężarką
p_2	(MPa)	– ciśnienie powietrza za sprężarką
p_3	(MPa)	– ciśnienie spalin przed turbiną
p_4	(MPa)	– ciśnienie spalin za turbiną
p_t	(MPa)	– ciśnienie spalin w przekroju kontrolnym turbiny
p_{ba}	(MPa)	– ciśnienie doładowania przed zaworem dolotowym
p_{g1}	(MPa)	– ciśnienie spalin w kolektorze wylotowym przed turbiną
p_m	(MPa)	– średnie ciśnienie strat mechanicznych silnika
$p_{m,d}$	(MPa)	– średnie ciśnienie strat mechanicznych silnika doładowanego
p_{ra}	(MPa)	– ciśnienie odniesienia (0,1 MPa)
p_{tr}	(MPa)	– ciśnienie tarcia silnika
$p_{tr,d}$	(MPa)	– ciśnienie tarcia silnika doładowanego
p_{wym}	(MPa)	– średnie ciśnienie wymiany ładunku
$p_{wym,d}$	(MPa)	– średnie ciśnienie wymiany ładunku silnika doładowanego
q_o	(mg/cykl)	– dawka paliwa na jeden obieg
R	(J/(kg·K))	– stała gazowa powietrza (287)
R_g	(J/(kg·K))	– stała gazowa spalin (≈ 288)
T_1	(K)	– temperatura powietrza przed sprężarką
T_2	(K)	– temperatura powietrza za sprężarką
T_3	(K)	– temperatura spalin przed turbiną
T_{ra}	(K)	– temperatura odniesienia (288 K)
T_{ba}	(K)	– temperatura doładowania
T_{g1}	(K)	– temperatura spalin w kolektorze wylotowym
T_t	(K)	– temperatura spalin w przekroju kontrolnym turbiny
T_{tq}	(kN m)	– moment obrotowy
u_t	(m/s)	– prędkość obwodowa wirnika turbiny
$u_{t,kr}$	(m/(s·√K))	– kryterialna prędkość obwodowa wirnika turbiny
W_p	(–)	– udział strumienia masy powietrza z dużej sprężarki
W_t	(–)	– udział strumienia masy spalin przepływających przez dużą turbinę
W_d	(kW)	– wskaźnik optymalizacji silnika wg kryterium dynamicznego

$W_{(I)}$	(kW)	– wskaźnik pola podaży momentu obrotowego w I zakresie
W_N	(–)	– wskaźnik poprawności ukształtowania momentu w warunkach korekcji dawkowania paliwa
W_k	(–)	– wskaźnik względnej korekcji dawkowania ze względu na ciśnienie doładowania
V_{ss}	(m ³)	– objętość skokowa silnika
$\dot{V}_1$	(m ³ /s)	– objętościowe natężenie przepływu powietrza przed sprężarką
ΔT	(K)	– przyrost temperatury powietrza na odcinku od sprężarki do zaworu dolotowego
η_v	(–)	– współczynnik napełnienia
η_c	(–)	– sprawność cieplna silnika
η_o	(–)	– sprawność ogólna silnika
η_m	(–)	– sprawność mechaniczna silnika
η_s	(–)	– izentropowa sprawność sprężania w sprężarce
η_{sc}	(–)	– całkowita sprawność zespołu sprężarek
η_t	(–)	– izentropowa sprawność rozprężania w turbinie
η_{tm}	(–)	– sprawność mechaniczna turbiny
η_{to}	(–)	– sprawność całkowita turbiny
η_{tc}	(–)	– całkowita sprawność zespołu turbinowego
φ_a	(–)	– współczynnik przepłukania
κ	(–)	– wykładnik izentropy powietrza
κ_g	(–)	– wykładnik izentropy spalin
λ	(–)	– współczynnik nadmiaru powietrza
Λ_1	(–)	– liczba Laval’a w przekroju wlotowym sprężarki
Λ_t	(–)	– liczba Laval’a w przekroju wlotowym turbiny
π_s	(–)	– spręż sprężarki
π_t	(–)	– stopień rozprężania w turbinie
ψ_t	(–)	– wskaźnik pracy adiabatycznej w turbinie

Wykaz skrótów

CDI	– system bezpośredniego wtrysku zasilany ze wspólnej szyny akumulacyjnej (ang. <i>Common Rail Direct (Diesel) Injection</i>)
CDTI	– system bezpośredniego wtrysku turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym zasilany ze wspólnej szyny akumulacyjnej (ang. <i>Common Rail Diesel Turbo (Direct) Injection</i>)
GMP	– górne martwe położenie tłoka
HDI	– wysokociśnieniowy system zasilania silnika wysokopiętnego z wtryskiem bezpośrednim (ang. <i>High pressure Direct Injection</i>)
OWK	– obroty wału korbowego
PM	– cząstki stałe (ang. <i>Particulate Matter</i>)
S _{NC}	– sprężarka niskiego ciśnienia
S _{WC}	– sprężarka wysokiego ciśnienia
S _(I)	– duża sprężarka
S _(II)	– mała sprężarka włączana do obiegu w II zakresie
T _{NC}	– turbina niskiego ciśnienia
T _{WC}	– turbina wysokiego ciśnienia
T _(I)	– duża turbina
T _(II)	– mała turbina włączana do obiegu w II zakresie
VFT	– turbosprężarka o zmiennym przepływie ze zmianą przekroju przepływowego w dyfuzorze z łopatkami o stałej geometrii (ang. <i>Variable Flow Turbine</i>)
VTG	– turbosprężarka o zmiennym kącie nachylenia łopatek kierownicy turbiny (ang. <i>Variable Turbine Geometry</i>)
VTT	– regulowane doładowanie dwiema turbosprężarkami (ang. <i>Variable Twin-Turbo</i>)
ZI	– silnik o zapłonie iskrowym
ZS	– silnik o zapłonie samoczynnym

Summary

Study for modeling and optimization of the traction diesel engine cooperation with turbochargers working in the sequential turbocharging system

This paper is a synthesis of the problems concerning shaping of the characteristics of supercharging of traction diesel engines using the methods of turbocharging, where two turbochargers are used at different ranges of the engine operation. Their essential role has been shown in improving engines constructed in accordance with the concept of downsizing, the possibilities to meet the stricter and stricter requirements in the scope of the economy related thereto, the ecology and the energetics of the means transport, and problems in obtaining a favourable matching of turbochargers to the engine in terms of the energy balance of such a system in the possibly wide scope of changes in the operating conditions. The need for a detailed investigation of these problems has been also highlighted, which in case of such methods of turbocharging get intensified due to the necessity to match two different turbocharging devices, and – additionally – to ensure adequate conditions for cooperation between them.

The paper presents a study of the phenomena accompanying the turbocharging, taking into account the relations between the course of the flow processes and their thermodynamic effects in the engine cycle. The physical bases of studies on these phenomena have been discussed, and a review of methods of their mathematical description has been carried out. The comparative assessment of the research methods in terms of the scope of applicability, suitability for the achievement of the objectives of the paper and the possibility of interpretation of the results has allowed for the selection of a simulation method of computed calculations based on the application of analytical-empirical models. Methodological bases of the analysis of the supercharging system with two turbochargers of different sizes have been presented, and comparative indicators of the quality of their matching to the engine have been defined on the basis of thermodynamic parameters of the medium, determined with taking into account the changes in the efficiencies and loads of each of the supercharging devices.

For predicting the effects of application of a specific design of supercharging devices and the quantitative interpretation of the obtained curves, own numerical program has been used based on a model of the engine limited to medium parameters of the cycle. An assessment of the suitability of empirical models developed in the simulation tests has been carried out as well as of the inaccuracies of the applied procedure of numerical computation.

The paper discusses the results of simulation comparative research concerning formation of the conditions of cooperation of the engine and turbochargers at the change of their parameters. An assessment of the impact of these changes on the curve of the engine charac-

teristics and the possibilities of its improvement has been carried out. Correlation dependencies have been determined between the loads on turbochargers and the total efficiency of the supercharging system and the curve of the characteristics of the engine. Requirements concerning the most beneficial division of work of the compression in turbochargers have been formulated at the selection of their design parameters in order to obtain the desired shape of the curve of the maximum torque on the external characteristics of the engine. The procedure of selection of passage cross-sections in the turbines using the optimization methods have been presented. For the selected set of completion of turbochargers, operating ranges for each of the supercharging devices required to obtain the best values in the overall efficiency in the conditions of load characteristics have been determined. On the basis of the characteristics obtained in this way, the algorithm and the controlling models for the designed numerical system to control the switching of turbochargers have been developed. Verification of the operation of the control system on the working test engine during the engine bench testing has been carried out.