

MÔ PHỎNG CỤM TĂNG ÁP TUA BIN MÁY NÉN TRANG BỊ CHO ĐỘNG CƠ DIESEL D1146TIS

Lê Anh Tuấn

Viện Cơ Khí Động Lực, Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT: Bài báo trình bày kết quả mô phỏng cụm tăng áp tua bin - máy nén trong liên hợp tua bin - máy nén - động cơ đốt trong trên phần mềm mô phỏng một chiều AVL-BOOST. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng cụm tua bin máy nén của Hãng Garrett trang bị cho động cơ D1146TIS hoàn toàn đáp ứng yêu cầu tăng áp cao cho động cơ này. Vùng làm việc của động cơ ở đường đặc tính ngoài đảm bảo không rơi vào vùng bơm của máy nén và luôn nằm ở vùng có hiệu suất cao của máy nén. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu còn cho thấy một cách trực quan việc phối hợp giữa cụm tăng áp tua bin - máy nén với động cơ đốt trong - cơ sở quan trọng để đưa ra chế độ vận hành hiệu quả cao nhất cho động cơ tăng áp. Đây là một phần trong chương trình phối hợp nghiên cứu phát triển động cơ diesel tăng áp cao D1146TIS giữa trường Đại học Bách khoa Hà Nội và Tổng công ty Máy động lực và máy nông nghiệp.

Từ khóa: Tăng áp tua bin - máy nén, van xả, mô phỏng bằng AVL-Boost, chu trình công tác động cơ.

1. MỞ ĐẦU

Nhằm đáp ứng nhu cầu động cơ cho xe tải của Tổng công ty Máy động lực và máy nông nghiệp, động cơ D1146TIS, một động cơ diesel, 6 xilanh, tăng áp cao, phát triển từ động cơ D1146TI (tăng áp trung bình, do Hàn Quốc chế tạo) được nghiên cứu và chế thử [3].

Mục tiêu chính của việc nghiên cứu là nâng công suất động cơ D1146TI từ 131 kW ở 2300 v/ph lên 177 kW ở 2300 v/ph, tương đương với công suất của một động cơ tăng áp đồng gam DE08TIS của Hàn Quốc. Động cơ sau khi tăng công suất được đặt tên là D1146TIS.

Quá trình phát triển mẫu động cơ D1146TIS bao gồm các bước cơ bản sau:

- Nghiên cứu động cơ D1146TI,
- Tính toán lựa chọn bộ tăng áp tua bin khí,
- Mô phỏng động cơ D1146TIS trên các phần mềm AVL-Boost, AVL-Tycon, AVL-Excite,
- Chế tạo một số bộ phận, lắp ráp và thử nghiệm đánh giá động cơ tổng thành.

Trong các bước trên, mô phỏng động cơ ở bước 3 có vai trò hết sức quan trọng. Kết quả của nó là cơ sở để thiết kế các kết cấu phù hợp và cung cấp các thông số vận hành, điều chỉnh tối ưu cho động cơ thực. Trong bài báo này, kết quả mô phỏng liên hợp động cơ đốt trong, tua bin máy nén trên phần mềm AVL-Boost được thể hiện. Trong đó nội dung mô phỏng trên mô hình hoàn chỉnh cụm tăng áp tua bin máy nén và phối hợp giữa cụm tăng này với động cơ được đặc biệt chú trọng.

Đối tượng nghiên cứu chính được trình bày trong bài báo này là cụm tăng áp tua bin máy nén của Hãng Garrett. Tuy nhiên, quá trình mô phỏng được tiến hành trên cơ sở liên hợp động cơ đốt trong và cụm tua bin máy nén vì hai đối tượng này là không thể tách rời và luôn hỗ trợ, ảnh hưởng lẫn nhau. Lượng không khí do máy nén cung cấp cũng như áp suất và nhiệt độ của nó là những thông số cơ sở và quan trọng của các thông số tính năng kỹ thuật, kinh tế của

động cơ, trong khi đó, năng lượng khí xả thể hiện qua áp suất và nhiệt độ khí xả là những thông số quyết định tốc độ quay của cụm tua bin máy nén, tức là quyết định lượng khí do máy nén cung cấp cho động cơ.

Với cụm tăng áp được lựa chọn là cụm tăng áp cao sử dụng tua bin biến áp, van xả của tua bin vì thế là một kết cấu không thể thiếu. Trong phạm vi nghiên cứu này, van xả được đồng thời khảo sát ở các chế độ tốc độ khác nhau trên đường đặc tính ngoài của động cơ.

Bên cạnh đặc tính lưu lượng - áp suất của cụm tua bin máy nén được xem xét tỉ mỉ nhằm định lượng khả năng tăng áp của cụm này, các vấn đề nảy sinh khi phối hợp ở các chế độ làm việc chuyển tiếp (chế độ thay đổi tải trọng, tốc độ) của động cơ cũng được đề cập nhằm định hướng vùng làm việc tối ưu của cụm tăng áp tua bin, máy nén này.

2. MÔ PHỎNG CỤM TUA BIN MÁY NÉN TRÊN AVL-BOOST

2.1. Cơ sở mô phỏng

Ở chế độ làm việc ổn định của động cơ, mô hình động cơ - tuabin - máy nén được tính toán dựa theo phương trình cân bằng năng lượng giữa tuabin và máy nén.

$$P_c = P_T \quad (1)$$

Ở đây công suất tiêu thụ cho máy nén P_c và công suất do tua bin cung cấp P_T được xác định thông qua lưu lượng của dòng môi chất qua máy nén, tua bin và chênh lệch enthalpy ở cửa vào và cửa ra của chúng.

Công suất tiêu thụ cho máy nén:

$$P_c = \dot{m}_c \cdot (h_2 - h_1) \quad (2)$$

\dot{m}_c : Lưu lượng dòng khí qua máy nén

h_1 : Enthalpy tại cửa vào máy nén

h_2 : Enthalpy tại cửa ra máy nén.

Công suất do tuabin cung cấp:

$$P_T = \dot{m}_T \cdot \eta_{m,TC} (h_3 - h_4) \quad (3)$$

\dot{m}_T : Lưu lượng khí xả qua tua bin

h_3 : Enthalpy tại cửa vào tuabin

h_4 : Enthalpy tại cửa ra tuabin

$\eta_{m,TC}$: Hiệu suất cơ giới của cụm tuabin máy nén.

Ở chế độ làm việc chuyển tiếp của động cơ thì động học rôto tuabin máy nén phải được xem xét vì tốc độ tuabin máy nén thay đổi.

$$\frac{d\omega_{TC}}{dt} = \frac{1}{I_{TC}} \cdot \frac{P_T - P_c}{\omega_{TC}} \quad (4)$$

ω_{TC} : Tốc độ tuabin máy nén

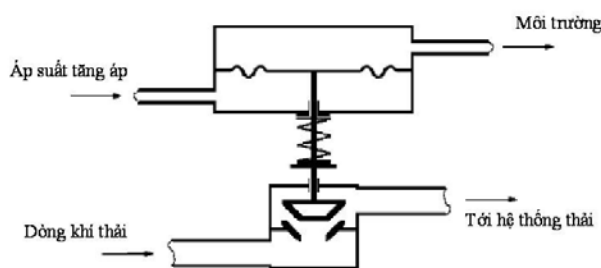
I_{TC} : Mô men quán tính của tuabin máy nén.

Ở chế độ này, dòng khí đi qua tuabin, máy nén cũng không ổn định dẫn tới sự biến đổi liên tục hiệu suất của tuabin máy nén. Để giải quyết vấn đề này phần mềm AVL-Boost sử dụng kỹ

thuật giả định dòng chảy ổn định. Tại thời điểm tức thời, dòng khí được coi như là dòng ổn định, thông qua đó hiệu suất của tuabin máy nén được xác định [1].

Trong cụm TB-MN kiểu xung, đường ống thải được thiết kế với đường kính nhỏ để tận dụng được xung lực khí xả kể cả khi động cơ làm việc ở chế độ tải trọng và tốc độ thấp. Tuy nhiên, khi động cơ làm việc ở chế độ tải trọng lớn và tốc độ cao, để giảm tải cho tua bin, người ta sử dụng van xả (waste gate) để thải bớt khí thải ra ngoài [6].

Van xả hoạt động thông qua một màng đàn hồi dùng áp suất tăng áp làm thông số điều chỉnh (hình 1). Áp suất tăng áp được đưa vào khoang áp suất cao. Phía áp suất thấp được nối với môi trường. Nếu chênh lệch áp suất vượt quá một giá trị nhất định, thể hiện qua lực ép ban đầu của lò xo, thì van sẽ mở và một phần khí xả được thải ra ngoài mà không đi qua tua bin, làm giảm năng lượng cung cấp cho tua bin, tức là giảm xung lực khí xả tác dụng lên cánh tua bin.



Hình 1. Van xả của tuabin

Trên AVL-Boost, độ nâng tức thời của van xả được tính toán thông qua chuyển động của khối lượng tương đương của giảm chấn lò xo. Ngoài ra, hệ số lưu lượng của dòng khí xả qua van là một trong những thông số do người dùng xác định theo độ nâng của van.

2.2. Xây dựng mô hình trên phần mềm AVL-BOOST

Mô hình mô phỏng cụm tua bin máy nén liên hợp với động cơ D1146TIS trên phần mềm AVL-Boost được thể hiện trên hình 2, trong đó cụm tăng áp tua bin-máy nén được ký hiệu TC1, còn van xả - WG1

Quá trình mô phỏng được tiến hành theo đường đặc tính ngoài của động cơ. Mô hình cháy vibe được lựa chọn để tính toán quá trình cháy. Quá trình truyền nhiệt được thể hiện qua mô hình Woschni1978. Cụm TB-MN được mô phỏng ở dạng đầy đủ (full model) trong đó van xả được tính đến như một chi tiết lắp trước tua bin.

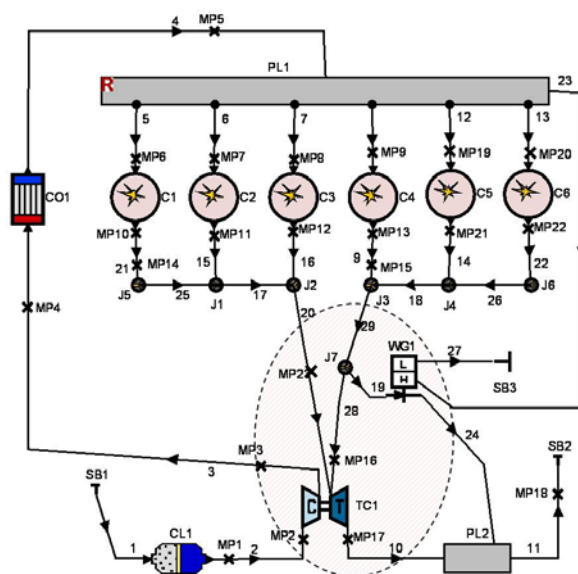
Đối với mô hình mô phỏng cụm tăng áp tua bin - máy nén, tiêu chuẩn hội tụ quan trọng nhất là công suất của máy nén và công suất của tua bin bằng nhau. Ngoài ra, mức độ ổn định của các thông số áp suất chỉ thị và áp suất có ích trung bình ở mỗi chế độ chạy ổn định khi mô phỏng động cơ cũng là những chỉ tiêu hội tụ quan trọng.

Để đạt được yêu cầu hội tụ, số bước lặp cần phải lớn. Thực tế chạy chương trình cho thấy, số chu trình lặp để đạt được kết quả hội tụ là 90 chu trình, ở một số chế độ, số chu trình lặp phải sử dụng lên tới 200 chu trình. Tuy nhiên nếu số chu trình lặp tăng lên thì thời gian tính sẽ lâu hơn.

Thông thường, nếu giá trị điều kiện đầu càng chính xác thì số bước lặp sẽ giảm xuống đáng kể.

2.3. Điều kiện biên và các điều kiện đầu

Các dữ liệu chính nhập cho mô hình động cơ được lựa chọn dựa trên cơ sở các thông số chạy khảo nghiệm động cơ trên băng thử của phòng thí nghiệm Động cơ đốt trong, Viện Cơ khí động lực, Trường ĐHBK Hà Nội bao gồm [5].



Hình 2. Mô hình mô phỏng động cơ D1146TIS

- Dữ liệu của phần điều khiển chung,
- Thông số của các phần tử trong mô hình.

Trong đó, các thông số kết cấu được đo đạc trực tiếp. Hành trình nâng của xupáp nạp và xupáp xả được tính toán thông qua số liệu biên dạng cam được thiết kế trên phần mềm AVL-Tycon [5]. Các thông số khác như nhiệt độ, áp suất của môi chất, của thành ống, tổn thất lưu lượng của dòng khí đi qua xupáp nạp, xupáp xả...được lấy từ số liệu kinh nghiệm.

Các thông số điều kiện biên quan trọng nhất tương ứng với các chế độ làm việc khác nhau trên đường đặc tính ngoài của động cơ bao gồm [5]:

- Tốc độ quay của động cơ,
- Các thông số thời điểm cháy, thời gian cháy, lượng nhiên liệu cung cấp, tỷ số tăng áp và tổn hao áp suất qua kết làm mát khí tăng áp...

Đặc tính của máy nén và tua bin do hãng Garrett cung cấp được nhập vào phần mềm tính toán ở dạng bảng số tương ứng với các chế độ tốc độ khác nhau của cụm này [2].

Một số thông số của van xả wastegate được thể hiện trên bảng 1.

Bảng 1. Một số thông số của van xả wastegate

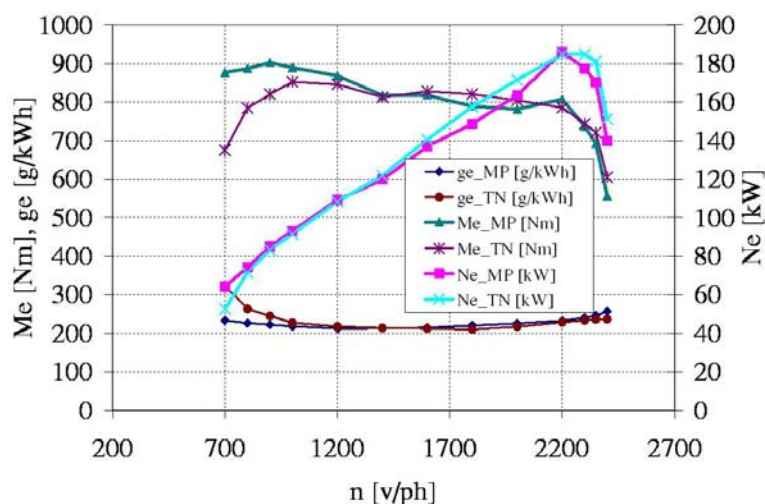
TT	Thông số	Giá trị	Đơn vị	
1	Diện tích màng phía áp suất cao	380	mm ²	
2	Diện tích màng phía áp suất thấp	616	mm ²	
3	Diện tích mặt cắt ngang van phía áp suất cao	đóng van	1200	mm ²
		mở van	1257	mm ²
4	Diện tích mặt cắt ngang van phía áp suất thấp	1257	mm ²	

5	Lực ban đầu của lò xo	127	N
6	Tỷ lệ biến dạng lò xo	5,5	N/mm
7	Độ nâng van cực đại	5	mm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

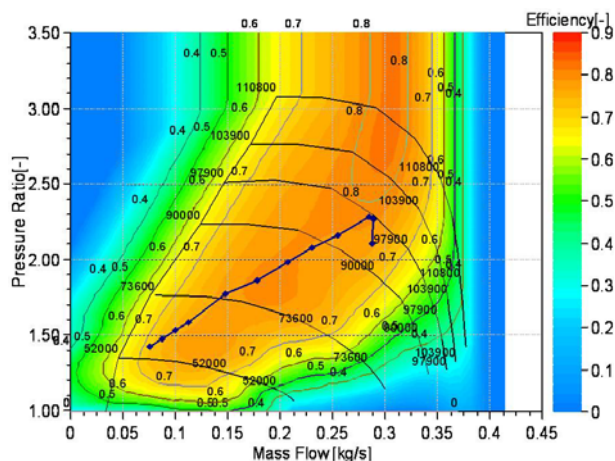
Độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua các thông số so sánh giữa mô phỏng (MP) và thực nghiệm (TN) của công suất, mô men, suất tiêu hao nhiên liệu thay đổi theo tốc độ động cơ ở chế độ toàn tải (hình 3).

Nhìn chung, kết quả mô phỏng phù hợp với thực nghiệm, tuy nhiên ở số vòng quay thấp của động cơ, do quá trình mô phỏng dựa trên cơ sở quá trình hòa trộn giữa nhiên liệu và không khí là hoàn hảo nên suất tiêu hao nhiên liệu thể hiện trên đồ thị (đường ge_MP) thấp hơn so với kết quả thực nghiệm (đường ge_TN). Trên thực tế quá trình hòa trộn này là không đều, đặc biệt ở tốc độ thấp, một lượng lớn nhiên liệu không tham gia vào quá trình cháy sinh công nên suất tiêu hao nhiên liệu cao mà công suất và mô men thấp hơn so với kết quả mô phỏng. Còn ở tốc độ lớn hơn 2200 v/ph, do điều tốc làm việc, lượng nhiên liệu cung cấp cho động cơ giảm làm cho công suất động cơ giảm nhanh chóng. Đặc tính mô phỏng trong vùng này cũng cho kết quả tương ứng.



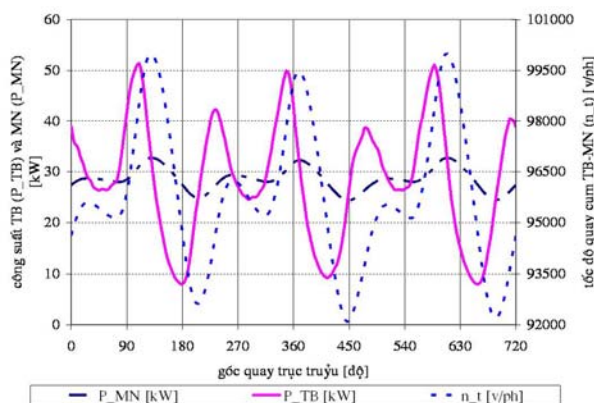
Hình 3. Đường đặc tính toàn tải mô phỏng và thực nghiệm của động cơ

Đặc tính của máy nén được phần mềm AVL-Boost ngoại suy và xây dựng thành đặc tính đầy đủ (hình 4). Trên hình này, hiệu suất của máy nén được biểu diễn theo mức độ đậm nhạt của màu nền.



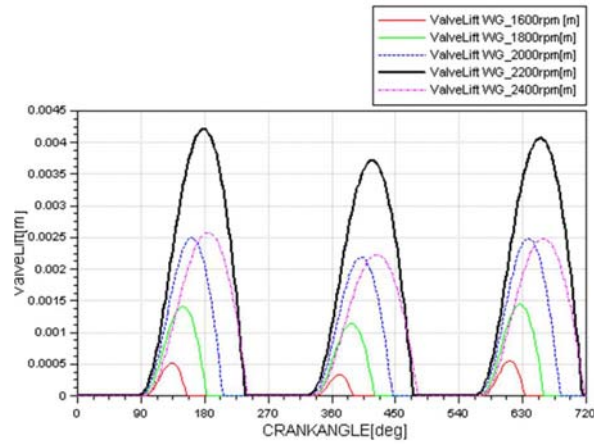
Hình 4. Đặc tính ngoài của động cơ trong đặc tính mô phỏng của máy nén

Hình 4 còn thể hiện vùng làm việc tương ứng với đường đặc tính ngoài của động cơ (đường đậm, gãy khúc). Từ đây dễ dàng thấy rằng, động cơ luôn làm việc ngoài vùng bơm của máy nén. Ở chế độ toàn tải, hiệu suất máy nén khá cao, đạt từ 0,7 đến 0,8. Tốc độ động cơ tăng, máy nén càng có xu hướng tiến về phía có hiệu suất cao. Từ tốc độ 2200 v/ph của động cơ, do điều tốc làm việc và do van xả mở lớn nên hiệu suất của máy nén giảm lớn, tỷ số tăng áp cũng giảm mạnh. Tốc độ của cụm tua bin máy nén thì thay đổi trong khoảng từ 52.000 v/ph tới gần 97.900 v/ph ở đường đặc tính ngoài.



Hình 5. Khảo sát biến thiên của công suất tua bin, máy nén và tốc độ quay cụm này trong một chu trình công tác của động cơ

Hình 5 chỉ rõ trong một chu trình công tác của động cơ, công suất của tuabin và máy nén biến thiên theo diễn biến các quá trình công tác (giá trị công suất của TB lớn khi tương ứng với hành trình xả của một xilanh nào đó, công suất của máy nén vì thế cũng thay đổi theo nhưng chậm pha hơn do thời gian thích ứng). Tốc độ của cụm tua bin, máy nén vì thế cũng biến đổi theo, tương ứng với đặc tính công suất của máy nén (P_{MN}).

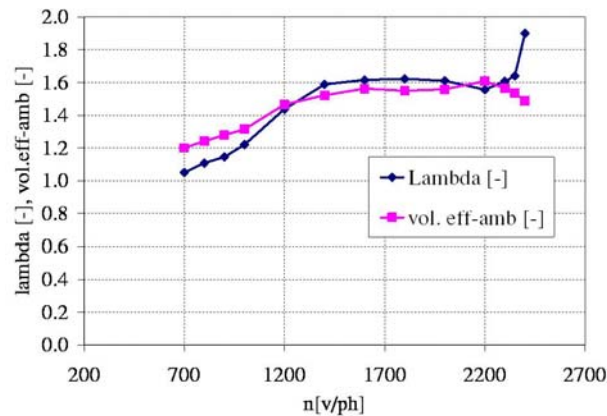


Hình 6. Độ nâng của van xả cụm tuabin máy nén tăng áp xung theo góc quay trục khuỷu của động cơ

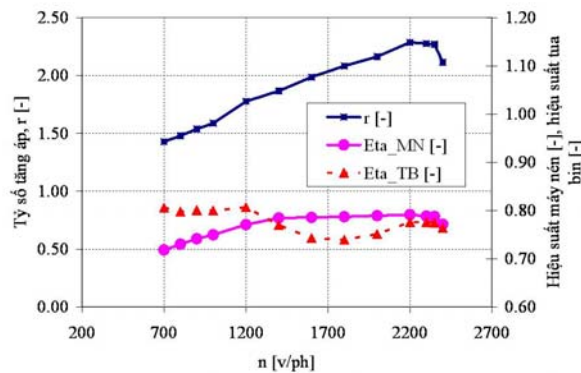
Độ nâng của van xả (wastegate) theo góc quay trục khuỷu ở các tốc độ quay khác nhau của động cơ được thể hiện trên hình 6.

Do van xả của tuabin được nối vào đường ống xả chung của các xilanh 4, 5 và 6 (như thể hiện trên hình 2) nên độ nâng van sẽ đạt cực đại 3 lần trong một chu kỳ làm việc của động cơ, tương ứng với quá trình xả của các xilanh này.

Trên hình 6 còn thể hiện rõ nét van xả bắt đầu hoạt động ở tốc độ 1600 v/ph. Độ nâng của van đạt giá trị lớn ở tốc độ 2000 v/ph và đạt cực đại ở tốc độ 2200 v/ph của động cơ.



Hình 7. Đường đặc tính hệ số dư lượng không khí (lambda) và hệ số nạp tính theo điều kiện môi trường (vol. eff-amb.)



Hình 8. Biến thiên tỷ số tăng áp (r), hiệu suất máy nén (η_{MN}), hiệu suất tua bin (η_{TB}) theo tốc độ quay động cơ

Kết quả mô phỏng còn cho thấy hệ số dư lượng không khí (λ) và hệ số nạp của động cơ (vol. ef-amb) tăng dần khi tăng tốc độ quay động cơ, tuy nhiên từ tốc độ 1600 v/ph do van xả của tua bin mở, mức độ tăng không khí nạp vào xanh giảm nên hệ số nạp và hệ số dư lượng không khí vì thế cũng bắt đầu giảm nhẹ. Từ tốc độ quay 2200 v/ph của động cơ, do bộ điều tốc làm việc nên lượng nhiên liệu giảm nhanh dẫn tới sự tăng vọt λ (hình 7).

Ngoài ra, tỷ số tăng áp của động cơ tăng dần từ số vòng quay thấp đến 2200 v/ph và đạt giá trị cực đại là 2,29. Sau số vòng quay này, do van xả (waste gate) mở lớn mà tỷ số tăng áp giảm xuống đáng kể, đáp ứng yêu cầu giảm tải trọng cho tuabin của tăng áp xung.

Hiệu suất của máy nén biến thiên theo tốc độ động cơ gần với quy luật biến thiên của tỷ số tăng áp; nhưng hiệu suất của tua bin thì biến đổi không theo quy luật, đạt giá trị cực đại 0,81 ở tốc độ 1200 v/ph của động cơ, sau đó có xu hướng giảm dần khi tăng tốc độ do tăng mức biến thiên xung lực khí xả. Từ tốc độ 1800 v/ph trở đi, do van xả của tua bin mở đủ lớn nên hiệu suất của tua bin dần tăng lên rõ rệt (hình 8).

Hiệu suất của máy nén thể hiện trên hình 8 cũng phù hợp với hiệu suất được thể hiện trên hình 4.

4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Mô hình mô phỏng liên hợp động cơ D1146TIS và cụm tăng áp tua bin, máy nén có tính hội tụ cao thể hiện rõ nét ở các kết quả so sánh giữa mô phỏng với thực nghiệm.

Cụm tua bin máy nén trang bị cho động cơ D1146TIS hoàn toàn đáp ứng yêu cầu tăng áp cao cho động cơ này. Vùng làm việc của động cơ ở đường đặc tính ngoài đảm bảo không rơi vào vùng bơm của máy nén và luôn nằm ở vùng có hiệu suất cao của máy nén.

Công suất của tua bin, máy nén và số vòng quay của cụm này biến thiên theo góc quay trục khuỷu trong mỗi chu trình làm việc của động cơ. Đường đặc tính công suất máy nén và tốc độ quay của cụm này chậm pha hơn so với đặc tính công suất của tua bin.

Tỷ số tăng áp của của máy nén đạt giá trị cực đại 2,29 ở tốc độ 2200 v/ph của động cơ. Quy luật biến thiên của hiệu suất máy nén theo tốc độ quay động cơ tương tự như quy luật biến thiên của tỷ số tăng áp, nhưng hiệu suất tua bin thì thay đổi không có quy luật và đạt giá trị cực đại ở số vòng quay 1200 v/ph.

Hiệu suất của máy nén thay đổi tương ứng với mức độ tăng áp nhưng hiệu suất tua bin có xu hướng giảm khi tăng tốc độ quay của động cơ. Sau khi van xả mở, hiệu suất của tua bin tăng lên rõ rệt theo độ mở của van xả.

Van xả khí thực sự hoạt động từ tốc độ động cơ 2000 v/ph ở chế độ toàn tải đã có tác dụng rất lớn trong việc giảm xung lực khí xả tác dụng vào cánh tua bin, đáp ứng tính năng làm việc của động cơ và cụm tuabin - máy nén.

Đề tài cần được phát triển theo hướng nghiên cứu tối ưu phương pháp bố trí, kích thước đường nạp, đường thải của động cơ tăng áp cũng như kết hợp với các phần mềm mô phỏng khác nhằm tiếp tục tối ưu hóa kết cấu của động cơ.

SIMULATION OF A TURBOCHARGING SYSTEM EQUIPPED FOR A DIESEL ENGINE D1146TIS

Le Anh Tuan

Institute of Transportation Engineering, Ha Noi University of Technology

ABSTRACT: *The paper presents simulated results of a turbocharging system in a combination of turbine - compressor - IC. engine on one dimensional simulation software AVL-BOOST. Findings of the research depict clearly that the turbocharger equipped for the engine has met all requirements to have high boost pressure for this engine. The full load curve of the engine is located out of the surge area and in the area of high efficiency of the compressor's map. Besides, findings of the research also virtually show the matching of the turbocharger and the engine – an important basis for operating the turbocharged engine with highest efficiency. It is a part of the collaborative research activities on developing a new type of high tuborcharged IC. diesel engine between Hanoi University of Technology (HUT) and Vietnam Engine and Agricultural Machinery Corporation (VEAM).*

Keywords: *Turbocharger, waste gate, AVL-Boost simulation, engine cycle.*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. AVL-List GmbH: *Boost Users guide*, Version 5.0, Hans-List-Platz 1, A-8020, Graz, Austria, Oct. 2006.
- [2]. Garrett - Engine Boosting systems: *Turbochargers, AlliedSignal Turbocharging Systems*: Torrance, California U.S.A.
- [3]. Hoang Minh Duc, Pham Minh Tuan, Khong Vu Quang, Tran Dang Quoc: *Calculation to increase power and to improve the performance of six cylinder turbocharged diesel engine using AVL Boost and AVL Tycon softwares*. ICAT 2005.
- [4]. Lê Anh Tuấn, 2006: *Mô phỏng chuyển động của khí xả trong đường ống xả của ô tô và hệ thống lấy mẫu khí xả CVS*; Hội nghị khoa học lần thứ 20, ĐHBK Hà Nội, Phân ban Động cơ đốt trong, Hà Nội 10/2006.
- [5]. Lê Anh Tuấn, Hoàng Minh Đức, 2006: *Ứng dụng phần mềm Boost để tính toán và mô phỏng động cơ D1146TIS*; Báo cáo đề tài phối hợp nghiên cứu giữa Bộ môn Động cơ đốt trong và Tổng công ty máy động lực và máy nông nghiệp, 2006.
- [6]. Võ Nghĩa, Lê Anh Tuấn, 2005: *Tăng áp động cơ đốt trong*; Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật, 2005.