

Tính toán chu trình nhiệt động cơ tuabin khí ở các chế độ vận hành bằng phần mềm GateCyle™

Vũ Đức Mạnh, Hà Huy Thắng, Đào Trọng Thắng, Nguyễn Trung Kiên

Tóm tắt—Động cơ tuabin khí (ĐCTBK) được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực hàng không và trên các tàu chiến hải quân vì kích thước nhỏ gọn, tính cơ động cao. Ở Việt Nam, việc nghiên cứu, tính toán cho loại động cơ này còn ít được quan tâm. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày phương pháp xây dựng mô hình và kết quả tính toán chu trình nhiệt bằng phần mềm của hãng General Electric tên là GateCyle™. Kết quả tính toán có thể sử dụng cho các nghiên cứu chuyên sâu về ĐCTBK hoặc để tham khảo trong quá trình khai thác, vận hành động cơ.

Từ khóa—Áp suất, chu trình nhiệt, động cơ tuabin khí, GateCyle™, nhiệt độ, UGT.

1 GIỚI THIỆU

Động cơ tuabin khí là loại động cơ có nhiều ưu điểm, được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực quân sự và trong công nghiệp. Việc khai thác, bảo dưỡng động cơ tuabin khí (ĐCTBK) đòi hỏi người sử dụng phải có các hiểu biết chuyên sâu. Tuy nhiên, ở Việt Nam, việc nghiên cứu, tính toán chuyên sâu về ĐCTBK còn ít được thực hiện.

Hiện nay có rất nhiều phần mềm tính toán chu trình công tác của ĐCTBK như Uni_MM (Saturn, LB Nga), GSP (NLR- Trung tâm nghiên cứu vũ trụ Hà Lan) và GateCyle™ (GE, Hoa Kỳ)... [1]. Các phần mềm này đều có chung nguyên lý tính toán dựa trên các phương trình trạng thái nhiệt, điểm khác biệt của chúng là lĩnh vực động cơ được tính toán, cách thức xây dựng mô hình, thư viện động cơ. Trong số các phần mềm này thì GateCyle™ là phần mềm chuyên dụng để tính toán cho động cơ

trong nhà máy nhiệt điện, đồng thời nó cũng có khả năng tính toán cho các ĐCTBK tàu thủy [9]. Phần mềm này có thư viện các động cơ phong phú (có hầu hết động cơ của các hãng sản xuất ĐCTBK lớn trên thế giới), cho phép người dùng sử dụng mô hình trong thư viện hoặc dùng các mô đun để thiết lập mô hình mới, ngoài ra còn cho phép thay đổi loại nhiên liệu và thiết lập tính chất cho nhiên liệu mới [2, 9].

Trên tàu thủy tại Việt Nam hiện sử dụng ĐCTBK họ UGT3000R, UGT6000+ và UGT15000R của hãng Zorya-Mashproekt (UGT viết tắt của chữ Ukrainian Gas Turbine). Những động cơ này là những biến thể của các động cơ công nghiệp UGT3000, UGT6000 và UGT15000 [3, 8]. Chúng có cấu tạo tương tự nhau: động cơ 3 trục, máy nén dọc trục gồm máy nén thấp áp và máy nén cao áp, buồng đốt dạng vành ống ngược chiều, tuabin gồm tuabin cao áp 1 tầng, tuabin thấp áp 1 tầng và tuabin chân vịt 3 tầng có đảo chiều [3- 5]. Các thông số kỹ thuật cơ bản của động cơ UGT3000R và động cơ cơ sở của nó UGT3000 được trình bày ở Bảng 1, Hình 4 và Hình 5.

Bài báo này trình bày phương pháp xây dựng mô hình tính toán chu trình công tác của ĐCTBK trong phần mềm GateCyle™ và một số kết quả sử dụng mô hình để đánh giá ảnh hưởng của môi trường, điều kiện vận hành tới thông số của chu trình công tác ĐCTBK tàu thủy dòng UGT, từ đó cung cấp thông tin khoa học cho người khai thác vận hành.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ UGT 3000 và UGT 3000R ở chế độ định mức [4]

Thông số	UGT3000	UGT3000R
Công suất N_e (kW)	3360	3125
Hiệu suất η_e (%)	31,0	28,2
Tỷ số tăng áp (π_{MN})	13,5	13,5
Nhiệt độ khí thải T_4 (°C)	420	428

Bài báo này được gửi vào ngày 25 tháng 06 năm 2017 và được chấp nhận đăng vào ngày 20 tháng 09 năm 2017.

Vũ Đức Mạnh, Khoa Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự (e-mail: ducmanhvu@mta.edu.vn)

Hà Huy Thắng, Đại học Điện lực

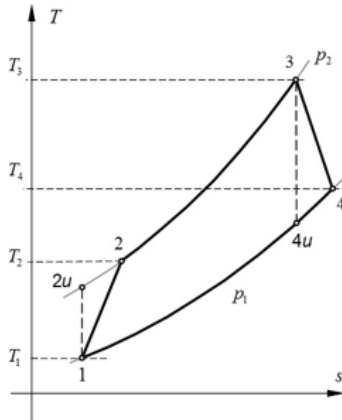
Đào Trọng Thắng, Khoa Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Nguyễn Trung Kiên, Phòng Hợp tác Quốc tế và Quản lý lưu học sinh, Học viện Kỹ thuật Quân sự

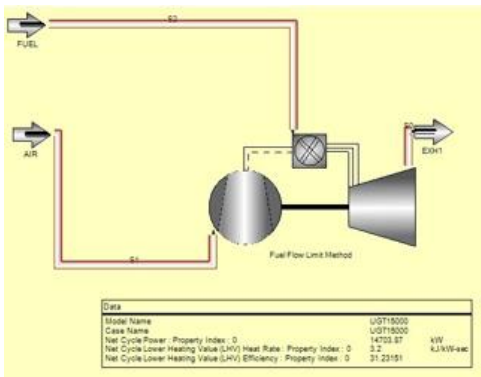
2 CHU TRÌNH NHIỆT CỦA ĐCTBK

Khi nghiên cứu chu trình nhiệt của ĐCTBK, các thông số thường được quan tâm là tỷ số tăng áp $\pi_{MN}=p_2/p_1$, tỷ số tăng nhiệt độ $\zeta=T_3/T_1$ [6], [7]. Trên Hình 1 trình bày sơ đồ chu trình thực của ĐCTBK trong hệ tọa độ T-s, trong đó 1-2 là quá trình nén trong máy nén, 2-3 là quá trình cháy trong buồng đốt; 3-4 là quá trình giãn nở trong tuabin; 4-1 là quá trình làm lạnh ngoài môi trường.

Thông số của các điểm trong chu trình công tác thực được tính theo các phương trình dưới đây [6], [7].



Hình 1. Biểu đồ chu trình thực của ĐCTBK [7]



Hình 2. Mô hình ĐCTBK trong thư viện GateCycle™

Áp suất và nhiệt độ đầu vào máy nén:

$$p_1 = p_0 \cdot \sigma_{DV} \tag{1}$$

$$T_1 \approx T_0 \tag{2}$$

Áp suất, nhiệt độ sau máy nén:

$$p_2 = p_1 \cdot \pi_{MN} \tag{3}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left[1 + \frac{\pi_{MN}^m - 1}{\eta_{MN}} \right] \tag{4}$$

Áp suất, nhiệt độ sau buồng đốt:

$$p_3 = p_2 \cdot \sigma_{BC} \tag{5}$$

$$T_3 = \frac{G_{kk} C_{p_kk} T_2 + G_{nl} C_{p_nl} T_{nl} + G_{nl} H_u \eta_{BC}}{(G_{kk} + G_{nl}) C_{p_kc}} \tag{6}$$

Áp suất, nhiệt độ sau tuabin:

$$p_4 = p_0 \cdot \sigma_{KT} \tag{7}$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{m_{kc}} - 1}{\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{m_{kc}} \cdot \eta_{TB}} \right] \tag{8}$$

Công suất của chu trình thực được tính bằng công thức:

$$N_n = N_{TB} - N_{MN} = G_{kk} \left[C_{p_kc} T_3 \frac{\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^m - 1}{\left(\frac{p_3}{p_4} \right)^m} \eta_{TB} - C_{p_kk} \frac{\pi_{MN}^m}{\eta_{MN}} \right] \tag{9}$$

Hiệu suất của chu trình bằng tỷ lệ công có ích chia cho lượng nhiệt của nhiên liệu cấp vào buồng đốt, tức là

$$\eta_n = \frac{N_n}{G_{nl} H_u} \tag{10}$$

Khi coi $p_4=p_1$ và $p_3=p_2$ thì hiệu suất của chu trình được tính bằng công thức:

$$\eta_n = \frac{(\pi_{MN}^m - 1)(\zeta \eta_{TB} \eta_{MN} - \pi_{MN}^m)}{\pi_{MN}^m [(\zeta - 1) \eta_{MN} - (\pi_{MN}^m - 1)]} \tag{11}$$

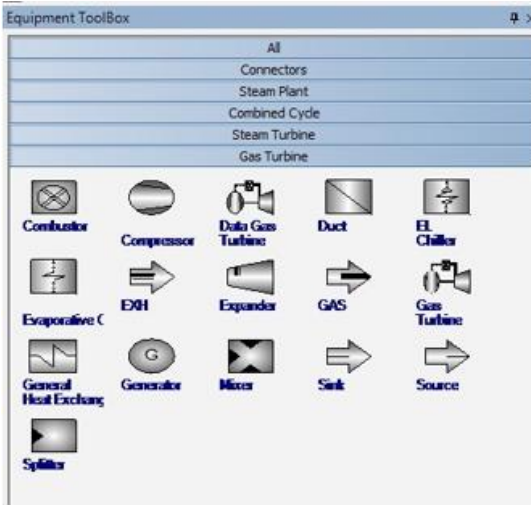
Nhiệt độ môi trường (T_0), áp suất đường nạp p_1 , đường thải p_4 , chế độ tải là một số thông số thay đổi trong quá trình vận hành. Từ các phương trình trên ta thấy rằng các thông số đó sẽ có ảnh hưởng tới công suất, hiệu suất và các thông số của chu trình nhiệt ĐCTBK, trong phần 4 sẽ đánh giá định lượng những biến đổi này.

3 XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN CHU TRÌNH NHIỆT ĐCTBK TRONG GATECYCLE™

Khi tính toán trong GateCycle™ có hai phương pháp xây dựng mô hình tính toán:

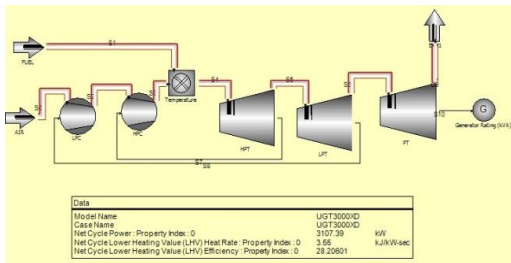
1) Sử dụng mô hình sẵn có trong thư viện theo đó thì động cơ được quy về dạng động cơ 1 máy nén, 1 buồng đốt và 1 tuabin như trên Hình 2 hoặc tự xây dựng từ các mô đun của phần mềm [2].

2) Xây dựng mô hình tính toán từ thư viện các mô đun của phần mềm (Hình 3). Khi sử dụng mô hình này chúng ta có thể thu được kết quả ở các vị trí trung gian và điều chỉnh số lượng cũng như thông số kỹ thuật của các thành phần của động cơ.



Hình 3. Các mô đun xây dựng mô hình

Trên Hình 4 biểu diễn mô hình của động cơ dòng UGT do nhóm tác giả xây dựng. Trong mô hình này điều kiện đầu vào được lựa chọn trong mục thông số đầu vào của buồng đốt, ngoài ra còn cần thêm một số thông số đầu vào của các bộ phận khác như trong Bảng 2. Trong các mô hình tính toán này đều sử dụng nhiên liệu diesel.



Hình 4. Mô hình dòng động cơ UGT do nhóm tác giả xây dựng

Bảng 2. Các thông số vào cơ bản của từng bộ phận trong mô hình động cơ

Bộ phận	Các thông số cần khai báo
Đường nạp	Áp suất, nhiệt độ, lưu lượng không khí
Máy nén	Mức tăng áp, hiệu suất, tỷ lệ trích khí làm mát,...
Buồng đốt	Nhiệt độ đầu ra buồng đốt/ lưu lượng nhiên liệu/ độ tăng nhiệt độ trong buồng đốt/ lượng nhiệt sinh ra trong buồng đốt, hệ số tổn thất áp suất, hệ số cháy kiệt, ...
Tuabin	Hệ số giảm áp/lai dẫn máy nén nào/ áp suất sau tuabin, hiệu suất, ...
Đường thải	Áp suất khí thải

4 MỘT SỐ KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

4.1 Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến thông số chu trình nhiệt của ĐCTBK

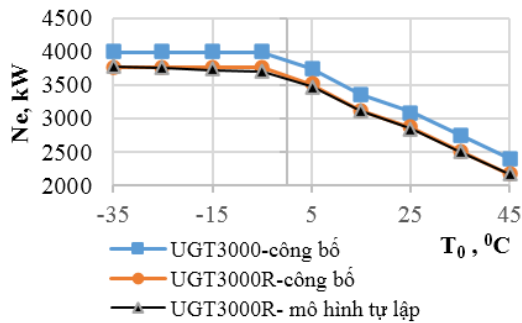
Để minh họa việc sử dụng phần mềm, trong mục này nhóm tác giả tính toán chu trình nhiệt của ĐCTBK kiểu UGT3000 và UGT3000R ở chế độ định mức với T_0 khác nhau bằng cách sử dụng mô hình có sẵn trong thư viện và mô hình tự thiết lập. Ở đây lựa chọn công suất của động cơ theo [4] là thông số đầu vào (Hình 5), phần mềm sẽ tính hiệu suất, G_{nl} cần cung cấp, nhiệt độ và áp suất sau máy nén, buồng đốt và tuabin. Kết quả tính toán hiệu suất của cả động cơ cho sai lệch không quá 3% so với kết quả do nhà sản xuất công bố trên Hình 6 [4]. Bảng 3 cho thấy sai số giữa T_3 , T_4 , π_{MN} tính toán ở $T_0=15^\circ\text{C}$ so với [4] đều nhỏ. Điều này khẳng định có thể sử dụng cả hai mô hình để tính toán chu trình nhiệt cho động cơ.

Khi T_0 tăng từ -5°C thì động cơ phải giảm G_{nl} và đồng thời là công suất (hình 5 và hình 7). Trong trường hợp duy trì G_{nl} hoặc N_e thì sẽ làm nhiệt độ dòng khí sau buồng đốt T_3 và nhiệt độ khí thải T_4 tăng cao và ảnh hưởng tới độ bền nhiệt của cánh tuabin (Hình 10, 11).

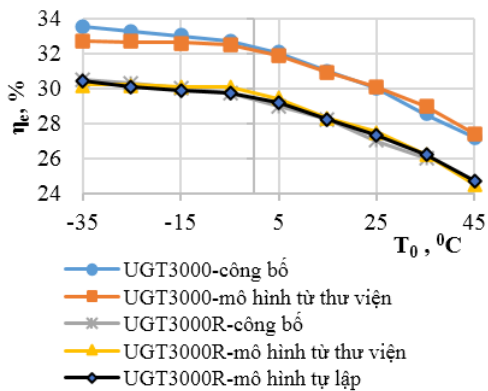
Đối với động cơ UGT3000 và UGT3000R nhiệt độ T_3 đạt cực đại khi T_0 nằm trong khoảng từ $-5 \div 5^\circ\text{C}$, càng xa vùng này thì T_3 giảm tuyến tính (hình 7). T_0 nằm trong khoảng $-35 \div 5^\circ\text{C}$ thì khi giảm T_0 (đồng nghĩa với giảm T_1) trong khi G_{kk} tăng, G_{nl} không đổi (xem Hình 7), theo phương trình (2) và (4) dẫn tới T_3 sẽ giảm. T_0 nằm trong khoảng $5 \div 45^\circ\text{C}$ thì tốc độ giảm nhiệt lượng cấp cho buồng đốt (G_{nl}, H_u) nhanh hơn tốc độ giảm G_{kk} và tốc độ tăng T_2 nên T_3 giảm.

Bảng 3. So sánh áp suất và nhiệt độ của chu trình nhiệt động cơ UGT3000R TẠI $T_0 = 15^\circ\text{C}$

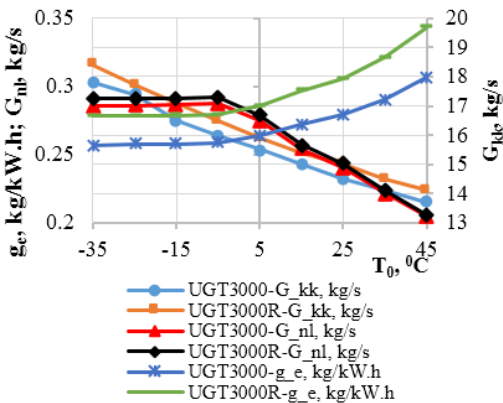
	Theo [4]	Mô thư viện	Sai số mô hình thư viện (%)	Mô hình tự lập	Sai số mô hình tự lập (%)
$T_1(\text{K})$	288	288		288	
$T_2(\text{K})$	-	643		667	
$T_3(\text{K})$	1293	1324	2,4	1248	3,5
$T_4(\text{K})$	701	737	5,1	750	7
$p_1(\text{kPa})$	100	100		100	
$p_2(\text{kPa})$	1350	1390	2,9	1360	0,7
$p_3(\text{kPa})$	-	1340		1340	
$p_4(\text{kPa})$	102	102		102	



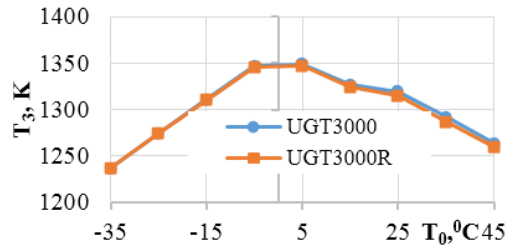
Hình 5. Công suất động cơ UGT3000 và UGT3000R ở T₀ khác nhau [4]



Hình 6. Hiệu suất chu trình nhiệt theo T₀ do nhà sản xuất công bố [4] và từ mô hình tính toán

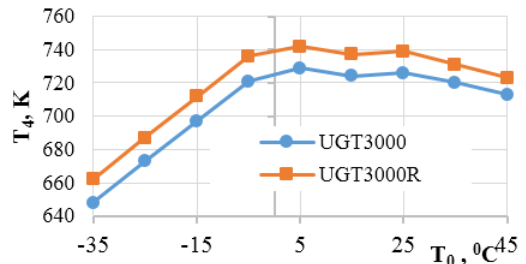


Hình 7. Biến thiên của g_e, G_{nl}, G_{kk} khi duy trì công suất theo [4] ở các T₀ khác nhau

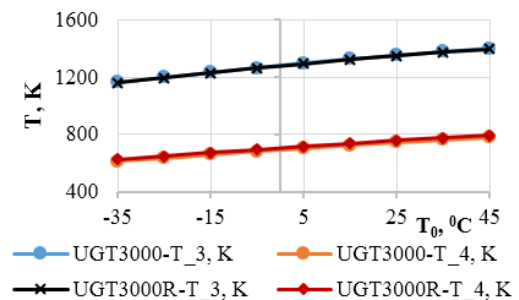


Hình 8. Nhiệt độ T₃ khi duy trì công suất theo [4] ở các T₀ khác nhau

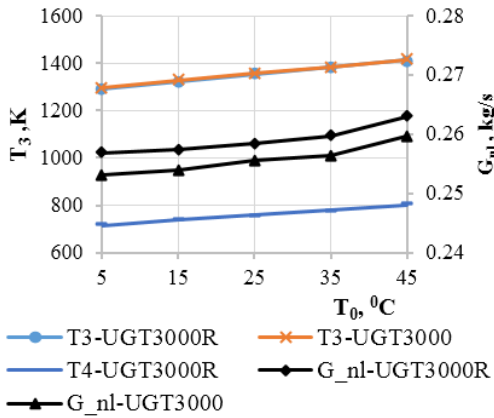
Khi không lựa chọn mô hình có sẵn, có thể xây dựng mô hình từ các mô đun trong phần mềm, lựa chọn thông số đầu vào là lượng nhiên liệu cấp cho động cơ, từ đó tính toán ra được công suất có ích của chu trình và hiệu suất động cơ. Các kết quả công suất và hiệu suất khá chính xác khi so sánh với công bố của nhà sản xuất và kết quả tính toán từ mô hình của thư viện (Xem hình 4 và hình 5). Bảng 4 cũng cho ta thấy kết quả các thông số chu trình nhiệt của mô hình tự lập sai lệch không đáng kể với mô hình có sẵn trong thư viện.



Hình 9. Nhiệt độ T₄ khi duy trì công suất theo [4] ở các T₀ khác nhau



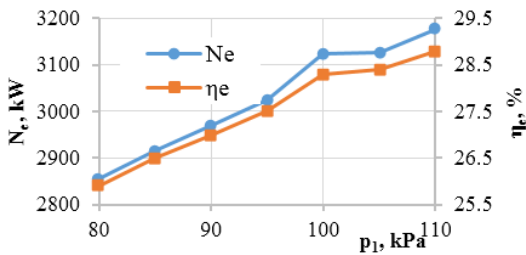
Hình 10. Ảnh hưởng của T₀ đến T₃ và T₄ khi duy trì G_{nl} định mức cấp vào động cơ



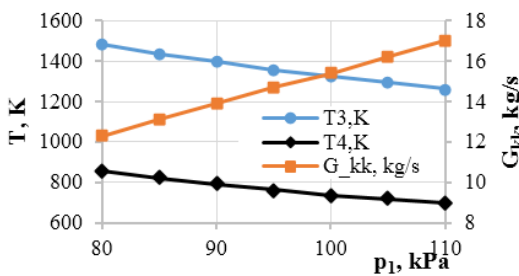
Hình 11. Sự phụ thuộc của G_{nl} và T_3, T_4 theo T_0 khi duy trì công suất động cơ UGT3000 và UGT3000R tương ứng với 3.360 kW và 3.125 kW.

4.2 Ảnh hưởng của áp suất đường nạp, thải tới chu trình công tác

Khi thay đổi áp suất trên đường nạp p_1 của động cơ UGT 3000R với G_{nl} , áp suất trên đường thải p_4 không đổi ta thu được các kết quả trình bày trên Hình 12 và Hình 13. Ở đây, khi p_1 giảm thì công suất, hiệu suất, G_{kk} giảm gần như tuyến tính, T_3 và T_4 tăng lên (p_1 giảm 1% thì N_e và η_e giảm tương ứng 0,4% và 0,42%; còn T_3, T_4 tăng 0,6%, 0,7%).



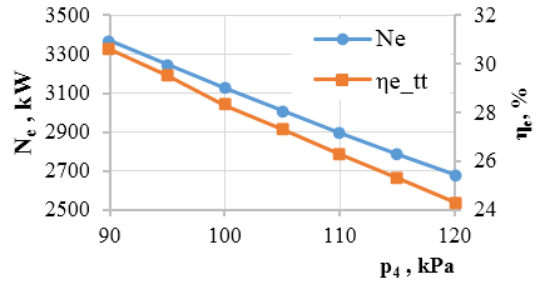
Hình 12. Ảnh hưởng của p_1 tới N_e



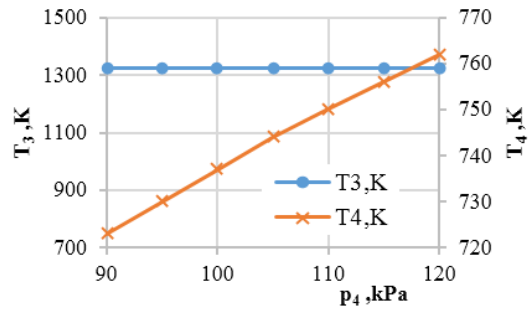
Hình 13. Ảnh hưởng của p_1 tới T_3, T_4 và G_{kk}

Trong tính toán cho động cơ UGT3000R khi thay đổi p_4 , đã giữ nguyên G_{nl} , p_1 nên G_{kk} không đổi, từ đó dẫn tới p_3, T_3 không đổi. Tuy vậy do p_4 tăng sẽ làm giảm hệ số giảm áp của tuabin, theo phương trình (8)-(11) thì công suất, hiệu suất giảm còn T_4 tăng. Kết quả trên Hình 14 và Hình 15 cho

thấy khi p_4 tăng 1% thì N_e và η_e đều giảm 0,7%, còn T_4 tăng 0,16%.



Hình 14. Ảnh hưởng của p_4 tới N_e và η_e



Hình 15. Ảnh hưởng của p_4 tới T_3, T_4

Từ đây ta thấy rằng, xét về công suất và hiệu suất thì sức cản ở đường thải ảnh hưởng nhiều hơn so với sức cản ở đường nạp, còn xét về nhiệt độ T_3 thì chỉ sức cản ở đường nạp có ảnh hưởng lớn hơn.

5 KẾT LUẬN

Các ứng dụng tính toán trên mới chỉ là kết quả bước đầu, tuy nhiên có thể rút ra một số kết luận như sau:

Phần mềm GateCycle™ là phần mềm chuyên dụng dùng để tính toán chu trình nhiệt của ĐCTBK, gồm thư viện phong phú các động cơ dùng trong công nghiệp và tàu thủy và có mức độ tùy biến cao khi xây dựng mô hình từ các mô đun có sẵn của phần mềm.

Khi tính toán, mô phỏng ĐCTBK có thể sử dụng mô hình có sẵn trong thư viện và hoặc xây dựng mô hình từ các mô đun của phần mềm. Độ tin cậy của mô hình phụ thuộc vào sự đầy đủ của dữ liệu đầu vào và chế độ tính toán của động cơ.

Kết quả tính toán đã nêu trong bài báo đã khẳng định sự tin cậy của mô hình được xây dựng từ các mô đun có sẵn của phần mềm. Từ đây có thể tính toán các thông số chu trình công tác, khảo sát ảnh hưởng của các thông số, điều kiện làm việc khác nhau đến các chỉ tiêu công tác của động cơ... Những nội dung này sẽ được trình bày trong các nghiên cứu khác của nhóm tác giả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Горюнов И.М, Болдырев О.И “*Направления развития современных математических моделей рабочих процессов газотурбинных двигателей*” Современные проблемы науки и образования.– № 6 Уфа: УДК 621.452.32, 2011.
- [2] *GateCycle™ Installation Quick Start Guide*. General Electric, 2010.
- [3] *Морские газотурбинные двигатели и установки*, Зоря Машпроект, Украина, 2003.
- [4] *UGT 3000 для морского и промышленного применения*, Зоря Машпроект, Украина, 2003.
- [5] *UGT 6000 для привода нагнетателей, электрогенераторов и судовых движителей*, Зоря Машпроект, Украина, 2003.
- [6] Рабенко В.С. *Термодинамические циклы газотурбинных установок*. Учеб. Пособие, ИГЭУ – Иваново, 2008.
- [7] Đào Trọng Thắng, Nguyễn Trung Kiên. *Cơ sở tính toán, thiết kế động cơ tuabin khí tàu thủy*, Nhà xuất bản Quân đội nhân dân, 2014.
- [8] Zorya-Mashproekt Gas Turbine Research and Development Complex brochures. Source: <https://zmturbines.com/en/serial-production>
- [9] http://site.geenergy.com/prod_serv/products/oc/ja/downloads/gatecycle.pdf



Vũ Đức Mạnh tốt nghiệp Kỹ sư (2012) tại Đại học Hàng không Moscow (Liên bang Nga), hiện là giảng viên bộ môn Động cơ - Khoa Động lực - Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Các hướng nghiên cứu chính hiện nay là: chu trình động cơ tuabin khí, truyền nhiệt và khí động trong động cơ tuabin khí, quy trình khai thác và bảo dưỡng động cơ tuabin khí.



Hà Huy Thắng tốt nghiệp Kỹ sư chuyên ngành Động cơ nhiệt tại Đại học Điện lực (2012), hiện là giảng viên Khoa Công nghệ năng lượng.

Các hướng nghiên cứu chính là động cơ tuabin khí.



Đào Trọng Thắng tốt nghiệp Tiến sỹ (1992) tại khoa Hệ động lực tàu thủy, Đại học tổng hợp kỹ thuật Saint-Petersburg (Liên bang Nga), hiện là Giáo sư bộ môn Động cơ - Khoa Động lực - Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Các hướng nghiên cứu chính là động lực và độ bền động cơ đốt trong và động cơ tuabin khí, thiết kế, chế tạo các phụ tùng thay thế cho động cơ đốt trong, phát thải và nhiên liệu thay thế.



Nguyễn Trung Kiên tốt nghiệp Tiến sỹ (2007) tại Đại học Kỹ thuật Hàng hải Saint-Petersburg (Liên bang Nga), hiện là Phó Giáo sư công tác tại Phòng Hợp tác Quốc tế và Quản lý lưu học sinh, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Các hướng nghiên cứu chính là chu trình nhiệt động cơ tuabin khí, quy trình vận hành và bảo dưỡng động cơ tuabin khí.

Calculating gas turbine thermodynamic cycle using GateCycleTM software

Vu Duc Manh, Ha Huy Thang, Dao Trong Thang, Nguyen Trung Kien

Abstract—Gas turbine engines are widely used in aviation and naval ships for their compactness and high mobility. In Vietnam, the researches and investigations for this type of engine are less interested. In this paper, the authors present methods of modeling and calculating gas turbine thermodynamic cycle by

using the General Electric software – GateCycleTM. The results can be used for the study of gas turbine engines and for engine operation.

Keywords—Gas turbine, thermodynamic cycle, UGT, GateCycleTM, temperature, pressure.