Tính toán mô-men xoắn do chân vịt sinh ra trong bài toán mô phỏng vỏ tàu - chân vịt bằng phương pháp CFD

■ **ThS. PHẠM VĂN NGỌC; GS. TSKH. ĐỖ ĐỨC LƯU**
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

TÓM TẮT: Mô phỏng vỏ tàu - chân vịt (VT-CV) tàu biển bằng phương pháp CFD với sử dụng phần mềm STAR/CCM+ đưa ra mô-men chân vịt (MMCV) theo thời gian thực. Dãy tín hiệu MMCV được lựa chọn hội tụ và được trích lại mẫu theo bước trích mẫu nhỏ nhất dt = 1 ms và được lọc nhiễu theo thuật toán lặp trung bình. Vector mô-men trung bình được trích mẫu lại theo số lượng NFFT=512 mẫu và biến đổi FFT cho dãy tín hiệu có NFFT mẫu. Tàu container Fortuner Navigator (VOSCO) được sử dụng nghiên cứu MMCV. Xử lý tín hiệu được code trên LabView.

TỪ KHÓA: Mô-men chân vịt, trích mẫu lại, FFT.

ABSTRACT: The simulating marine vessel hull-propeller by the CFD (Computation Fluid Dynamics) method and using the STAR/ CCM+ gives the propeller's moment in real time. The moment signal was: an array with the good convergence and resampled with the fix minimal step dt = 1ms and was filtered by the the average repeated algorithm. The average propeller moment vector (for 1 cycle) was resampled with NFFT=512 samples. The last resampled moment vector was processed with FFT. The MV. Fortuner Navigator (VOSCO) was verified for studying the propeller's moment. The software for data processing was coded in LabView.

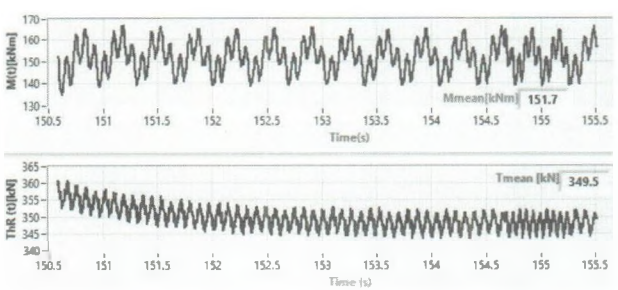
KEYWORDS: Propeller moment, resampling, FFT.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mô-men do chân vịt sinh ra khi làm việc phía sau thân tàu trong môi trường nước là đại lượng biến thiên, biến đổi có chu kỳ, phụ thuộc vào hình dáng tàu, vận tốc quay, tốc độ tàu và số cánh của chân vịt. Giá trị trung bình của MMCV (mô-men cản), cân bằng với mô-men trung bình do động cơ sinh ra (không tính đến cản ma sát trên đường truyền). Thành phần mô-men biến thiên tuần hoàn được biểu diễn theo các hàm điều hòa có bậc điều hòa là bội số của số cánh và vòng quay chân vịt: k = z_p, 2z_p, [1, 2], là vấn đề cần thiết cho tính dao động xoắn hệ trục chính động cơ lai chân vịt, nhất là xét đến các khả năng xảy ra vòng quay cộng hưởng tại chân vịt.

Đăng kiểm Hoa Kỳ (ABS) [1] đưa ra kết quả nghiên cứu mô-men xoắn cho 20 trường hợp tàu thực. Ở đó không chỉ ra cụ thể điều kiện biên và phương pháp nghiên cứu được sử dụng. Kết quả chỉ ra biên độ các mô-men xoắn tại các tần số là bội của số cách chân vịt Zp, (Zp = 4, 5 và 6) được biểu diễn theo các giá trị mô-men trung bình M_0. Trong [2], Yuriy Batrak trích dẫn khuyến cáo của NDV giá trị biên độ của các mô-men xoắn với bậc là Zp và 2Zp, áp dụng cho Zp = 3, 4, 5 và 6, tính theo M_0. Ông cũng chỉ ra rằng, ông chưa có thông tin về cách tính các mô-men xoắn cưỡng bức bằng phương pháp CFD. Điều đó đặt ra vấn đề nghiên cứu xác định mô-men xoắn cưỡng bức tại chân vịt bằng CFD trong bài báo này.

Phần mềm thương mại, chuyên dụng STAR-CCM+ được phát triển bởi SIEMENS, được sử dụng vào nghiên cứu VT-CV làm việc trong nước. Để đảm bảo cho kết quả tính được chính xác kích thước của miền không gian tính toán bao quanh thân tàu (bể thử ảo) được lựa chọn theo hướng dẫn chi tiết của hãng [4] và phương pháp tính thủy động học (CFD) thường dùng là RANSE (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) để đảm bảo kết quả thu được theo thời gian thực [3].



Hình 1.1: Mô-men M(t) và lực đẩy T(t) từ mô phỏng trên STAR-CCM+

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thu thập và xử lý tín hiệu mô-men từ mô phỏng bằng phương pháp CFD cho VT-CV

Mô phỏng VT-CV bằng phương pháp CFD, sử dụng phần mềm STAR-CCM+ cho ta các dãy tín hiệu số trong thời gian thực. Mô phỏng thường rất dài (khoảng 10 -15 ngày/1 chế độ mô phỏng; dùng máy tính chuyên dụng có tốc độ cao vì số lượng điểm chia rất lớn, khoảng vài triệu điểm). Bước thời gian ban đầu được thiết lập khá lớn (dt =

),2 - 0,3s) để tính được nhanh, sau đó dt nhỏ dần (cho các quá trình quá độ) và cuối cùng thiết lập bước thời gian đủ nhỏ để đảm bảo độ chính xác tại các chu kỳ đã đạt sự hội tụ, ổn định. Tại các chu kỳ ổn định cuối cùng được cài đặt dt_{min} (dt = 0,001s). Đoạn dữ liệu từ mô phỏng số cho xử lý phải là ổn định và hội tụ.

Ví dụ, trên *Hình 1.1* biểu diễn mô-men M(t) và lực đẩy ThR(t) chân vịt từ mô phỏng trên STAR-CCM+ cho VT-CV của MV. Fortune Navigator (FN, VOSCO) ở chế độ mô phỏng số 1 *(Bảng 2.3)*. Lực đẩy trong một chu kỳ công tác của chân vịt với số cánh Z_p, với trường hợp MV. FN: Z_p= 4 thường có 4 cực đại và 4 cực tiểu. Tín hiệu thô từ mô phỏng trên CCM+, cần chọn đoạn ổn định, ví dụ từ thời gian 153 - 155,5s. Sau đó, cần trích lại mẫu với cùng bước thời gian $dt = dt_{min}$ (dt khác nhau do phần mềm CCM+ tự động lựa chọn để có được kết quả ổn định nhất).

Với: $dt_0 = dt_{min}$ = 0,001 (s) là bước nhỏ nhất. Xét đoạn tín hiệu ổn định có các bước: $dt (m) = k.dt_{min}$, k = 1, 2... Tại hai thời điểm trích mẫu m và (m+1) giá trị mô-men được ký hiệu M(m) và M(m+1). Đoạn dM = M(m+1)-M(m) được chia đều cho k đoạn nhỏ:

$$M(m+i) = M(m) + i.dM(m); dM(m) = k.dt_0; \quad (1)$$
$$dM(m) = TM(m+1) - M(m); i = 1...k$$

Kết quả thu được từ (1) là một tín hiệu điều hòa ổn định chứa một số chu kỳ của mô-men M(t), có bước thời gian 0,001s. Đối với tín hiệu được mô phỏng cho trường hợp vận tốc quay của trục chân vịt n_p (v/ph) thì một vòng quay sẽ được trích N_{1c} mẫu (tính theo (2), phần nguyên của số được làm tròn) và sẽ trích một đoạn dữ liệu có $N_s = N_c.N_{1c}$ mẫu, với N_c là số chu kỳ được trích mẫu N_c = 3 hoặc N_c = 4.

$$N_{1c} = [60000 / n_p]; N_s = N_c.N_{1c} \ (\text{mẫu}) \quad (2)$$

Một chu kỳ dữ liệu có số mẫu N_{1c} tính theo (2) thường khác $NFFT = 2^k$, ví dụ k = 9. Phép biến đổi Fourie nhanh (FFT) nhằm thu được biên độ và pha của các thành phần điều hòa của mô-men phải được tính theo số mẫu mới NFFT = 2^k. Trích mẫu lại theo phương pháp gần đúng"spline" và sử dụng mô-đun có sẵn trong LabView để xây dựng phần mềm con xử lý tín hiệu.

Vector mô-men trung bình cho một chu kỳ từ N_c chu kỳ đã được trích mẫu lại (M_{RS}) với số mẫu trích lại (resampling) $N_{RS} = 2^k$, ví dụ N_{RS} = 512 mẫu:

$$X_M(i) = \frac{1}{N_c}\sum_{i=1}^{i12} M_{RS}(i); \quad (3)$$

Xử lý tín hiệu trung bình đã lọc nhiễu trong miền tần số bằng FFT, được lập trình trong LabView với câu lệnh FFT(X_M) rất thuận tiện, nhanh chóng và kết quả được thể hiện trong (4) và (5).

$$FFT(X_M) => \{M_0, AM_1, AM_2,...; \zeta_1, \zeta_2...\} \quad (4)$$

Hay:

$$\mathbf{M(t)} = \mathbf{M_0} + \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{AM}_k \sin(k\,\omega t + \zeta_k) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{M(t)} = \mathbf{M_0} + \mathbf{AM}_1 \sin(\omega t + \zeta_1) + \mathbf{M}_{Zp} \sin(Z_p\,\omega t + \zeta_{Zp}) + \mathbf{AM}_{2Zp} \sin(2\,Z_p\,\omega t + \zeta_{2Zp}) \quad (5.2)$$

Ở đó: ω, Zp - Vận tốc góc, số cánh của chân vịt;
M_0 - Giá trị trung bình của mô-men xoắn;
AM, ζ - Biên độ và pha của các điều hòa.

Trong (5.1) biểu diễn tín hiệu theo tất cả các điều hòa từ 1 đến M_p (số điều hòa được nghiên cứu), còn trong (5.2) - theo các điều hòa có ý nghĩa thực tế trong nghiên cứu: k=1, Z_p, $2Z_p$.

Thuật giải quá trình xử lý tín hiệu số với đầu vào là dãy số mô-men M=[M(1)...M(N)] được mô phỏng trên STAR-CCM+ để thu được đặc tính tín hiệu trong miền tần số (qua FFT) với các bước sau:

- Bước 1. Nhập (đọc) dữ liệu đầu vào từ file dữ liệu đã lưu trữ kết quả mô phỏng lực đẩy bằng CCM+.

- Bước 2. Chọn đoạn dữ liệu ổn định từ dữ liệu đầu vào với độ dài sao cho chứa ít nhất N_c = 3 chu kỳ (vòng quay) làm việc của chân vịt. Trích mẫu lại đoạn dữ liệu ổn định với bước thời gian dt =0,001 (s) theo (1).

- Bước 3. Xác định số mẫu trong một chu kỳ N_{1c} và tổng số mẫu N_s sẽ trích cho N_c chu kỳ (theo (2). Xác định vector mô-men trung bình của chân vịt theo 1 chu kỳ trong thời gian thực.

- Bước 4. Trích mẫu lại tín hiệu mô-men trung bình M từ số mẫu N_{1c} sang số mẫu chuẩn NFFT =2^k.

Xử lý FFT cho tín hiệu mô-men đã được trích mẫu lại theo số mẫu NFFT với 1 chu kỳ quay của chân vịt. Lưu lại kết quả xử lý của tín hiệu trong miền tần số.

** Đặc điểm của lập trình xây dựng mô-đun xử lý tín hiệu trên LabView:*

Lập trình trên LabView có ưu điểm: Triển khai dễ và trực quan khi sử dụng các thư viện đồ họa được xây dựng (có sẵn) trong LabView; xây dựng mô-đun trên giao diện chính (Front Panel, FP) cũng như trong giao diện lập trình (Block Diagram, BD). Trên FP thiết kế các biểu tượng (Icon) để điều khiển quá trình mô phỏng và hiển thị kết quả. Trong BD thiết lập toàn bộ code để thực hiện thuật toán xử lý với dữ liệu đầu vào; đọc dữ liệu đầu vào từ files đã lưu trữ; đọc dữ liệu trực tiếp đo đạc, thu thập được). Kết quả xử lý trong BD được hiển thị trên FP, cũng như lưu lại trong files dữ liệu theo code độc lập (thông thường được định dạng với dạng dữ liệu tương ứng *.tdms, *.lvm, *.csv).

Trong bài toán mô phỏng bằng CCM+, tín hiệu vào khá lớn cho một chế độ (khoảng 5.000 mẫu) và lưu lại trong định dạng *.csv. Do vậy, phải can thiệp vào lập trình code bậc cao để đọc files dữ liệu đã ghi *.csv. Các tác giả để tạo một subVI đọc *.csv từ đường dẫn (trong BD): programming File I/O Read Delimited Spread Sheet.vi.

Kết quả xử lý được hiển thị theo đặc điểm của dữ liệu: số, text, ma trận có thể hiển thị giá trị tương ứng, đặc biệt dưới dạng rất trực quan là bảng và đồ thị. Ưu điểm đặc biệt là lưu trữ dữ liệu trong Excel dưới dạng bảng tính với định dạng *.tdms được các tác giả sử dụng trong nhiệm vụ tương ứng. Một số kết quả được thể hiện trên *Hình 2.1 và 2.2*.

Trong MathScripts một số câu lệnh được sử dụng cho nghiên cứu:

-Xác định số mẫu cho một chu kỳ, công thức (2):

N_{1c} = round(6E4/n);

- Trích mẫu lại cho dãy tín hiệu M chu kỳ có N_{1c} mẫu, để được dãy tín hiệu mới có 512 mẫu, ta tạo hai dãy biến số x_1 và x_2 và theo câu lệnh:

$dx_1=1/N_{1c}$;$dx_2=1/512$;

$x_1=1:N_{1c}$; $x_1=x_1*dx_1$;$x_2=1:512$;$x_2=x_2*dx_2$;

M_2= interpolate1d(x_1,M,x_2,'spline');

- Biến đổi FFT cho vector M_2 đã trích mẫu lại, thu được giá trị biên độ (R) và pha (ph) của các điều hòa số phức (z) bằng lệnh tương ứng:

R=abs(z); ph=angle(z)

2.2. Xử lý tín hiệu mô-men chân vịt MV. FN

MV.FN là tàu container của VOSCO được lựa chọn là đối tượng nghiên cứu của bài báo. Đối tượng được mô phỏng CFD nhờ phần mềm chuyên dụng STAR-CMM+ (SIEMENS).

Thông số cơ bản của hệ động lực chính MV. FN ở chế độ định mức khi tàu đóng mới, xuất xưởng và ở chế độ thử tàu đường dài được thể hiện tại *Bảng 2.1* và *Bảng 2.2* [5] có ý nghĩa trong xử lý MMCV.

Bảng 2.1. Thông tin cơ bản về MV. FN

Máy chính		Chân vịt	
Ký hiệu	B&W 8L35 MC HITACHI ZOSEN	Số chân vịt Số cánh Z_p	1 4
M.C.O -	Vòng quay định mức: 210 (v/ph)	Đường kính Bước (m)	4,05 (m) 2,50
Công suất: 4657 kW tại M.C.O		Tỉ số bước	0,617(-)

Bảng 2.2. Kết quả thử đường dài MV. FN

Tải ME Load Index	MV speed	Vòng quay ME (CV)	Công suất ME, CV
%	knot	v/ph	kW
50	13,33	167,2	2491
75	15,22	191,1	3478
90	16,02	203,3	4196
100	16,39	209,8	4681
Ngày thử: 27 tháng 5 năm 1998 tại Nhật Bản Điều kiện thử tàu Điều kiện tàu: Mớn nước (m): Mũi 3.538 Lái:5.349 TB: 4.444 Điều kiện biển: sóng yên, biển lặng.			

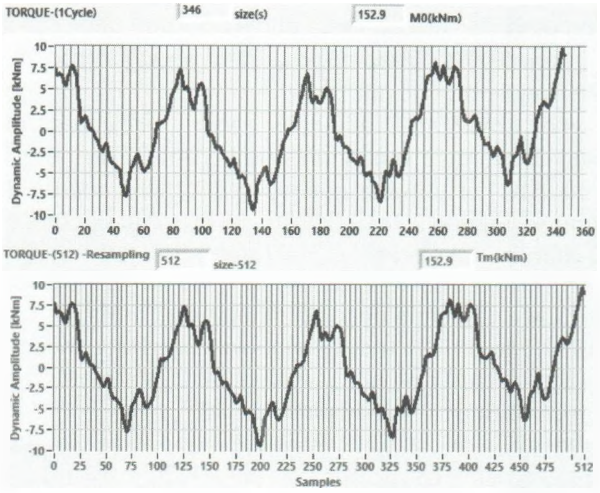
Nghiên cứu số liệu khai thác thực tế hệ động lực chính của MV.FN, các tác giả nhận thấy: Tàu thường hoạt động với vòng quay động cơ (chân vịt) khoảng 173,5 (v/ph), hay: n_t% = 82,5 (M.C.O), tải LI% = 56,4 khi tải hàng (Load Cargo Index) LCI% =100, tương ứng mớn nước trung bình: D_m = 7,0 - 8,0 (m). Chế độ tàu chạy không hàng, (ballast) hoặc ít hàng tại mớn nước trung bình D_m = (4,0 - 5,7) m.

Do vậy, chúng tôi mô phỏng ở các chế độ tải khai thác đầy, tuy nhiên độ chúi khác nhau, vòng quay khai thác 173,3 v/ph.

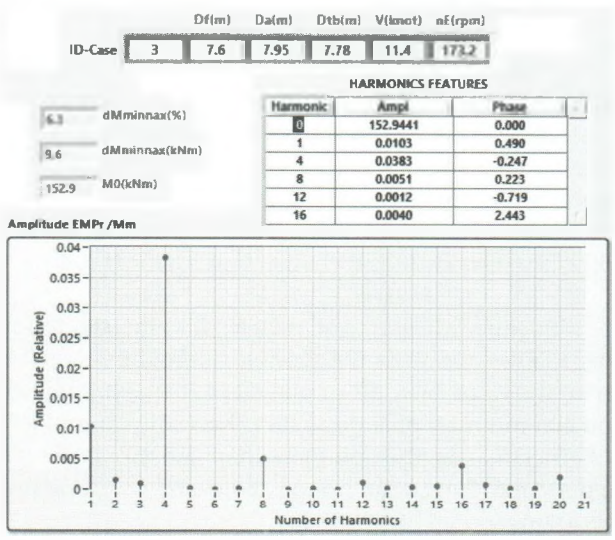
Bảng 2.3. Đầu vào cho mô phỏng khi n = 173,2 v/ph

Nº	D_{mui}(m)	D_{lai}(m)	D_m(m)	V(knot)	n(v/p)
1	7,16	8,00	7,58	11,4	173,20
2	7,52	8,52	8,02	10,8	173,20
3	7,60	7,95	7,78	11,4	173,20
4	6,48	7,10	6,79	11,2	173,20
5	7,45	7,75	7,60	11,5	173,20

Hình 2.1 giới thiệu kết quả: Trích mẫu lại tín hiệu theo số mẫu N_{1c} cho một chu kỳ (vòng quay) chân vịt và trích mẫu theo NFFT =512 và trên *Hình 2.2* - kết quả của biến đổi FFT cho tín hiệu trong miền tần số, trường hợp thí nghiệm số 3 *(Bảng 2.3)*.



Hình 2.1: Mô-men chân vịt theo thời gian thực tại chế độ vòng quay 173,2 v/p, trích: 346 và 512 mẫu, với mớn nước D_{tb} = 7,78 m; D_{lai} = 7,95 m;V=11,4 knot chế độ thí nghiệm số 3 (Bảng 2.3)



Hình 2.2: Kết quả biến đổi FFT cho mô-men theo thời gian thực (tương ứng trên Hình 2.1) - STT 3, Bảng 2.3

Bảng 2.4. Kết quả đánh giá sai số từ mô phỏng số và thử nghiệm đường dài cho MV.FN

LI%	CCM+			Sea-Trials	Sai số CS
	M	ω	CS_{SI}	CS_{ST}	δ%(SI,ST)
50	124,7	17,51	2184	2491	12,38
75	156,7	20,01	3137	3478	9,81
90	179,8	21,29	3829	4196	8,75
100	195,5	21,97	4295	4681	8,25
M[kNm]; w[rad/s]; CS[kW]=Mω; δ%=100.(CS_{SI}-CS_{ST})/CS_{SI}					

Trên cơ sở đó, chúng tôi đã mô phỏng trên CCM+ cho nhiều chế độ khác nhau, với mớn nước trung bình D_m từ ballast đến toàn tải hàng (LCI =100%).

Trong bài báo này, các tác giả xin trình bày về một số kết quả mô phỏng theo chế độ thử đường dài và bổ sung thêm các chế độ khác tại n = 173,2 v/ph.

Tại *Bảng 2.4* chỉ ra kết quả tính CFD (CCM+) với mớn nước (m) [D_{mui} D_{lai} D_{tb}] = [3,35 3,54 4,44] sai lệch về công

suất: δ<12,38% so với kết quả Sea-Trials khi thử tàu đường dài ở tất cả các chế độ.

Trên *Bảng 2.5* là kết quả tính các thông số cơ bản: mô-men trung bình M_0(kN); biên độ tương đối MAH (tỉ số của biên độ tuyệt đối và mô-men trung bình) của điều hòa thứ k, k = 1 và k = 4, 8 của 5 thí nghiệm *(Bảng 2.3)*. Số liệu tại *Bảng 2.5* đánh giá độ lệch công suất chân vịt giữa mô phỏng CCM+ và đo thực tế khi thử nghiệm đường dài MV.FN năm 1998.

Bảng 2.5. Kết quả FFT cho mô-men xoắn tại 5 chế độ (bảng số 3, n = 173,2 v/ph, ω = 18,1s^{-1}) và mớn nước khác nhau

	M_0	MAH_1	MAH_4	MAH_8	$Pw_{(SI)}$	dMmm
	kNm	% M_0	% M_0	% M_0	kW	%
	151,6	1,97	1,87	0,14	2748	4,5
2	158,8	1,38	3,31	0,25	2879	4,8
3	152,9	1,03	3,83	0,5	2772	6,3
4	142,6	1,18	4,33	0,27	2585	5,5
5	153,2	0,99	3,36	0,025	2777	4,5

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phương pháp CFD trên cơ sở sử dụng phần mềm chuyên dụng CCM+ (SIEMENS cung cấp) đã được thế giới sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu, cũng như tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam. Một số nhà khoa học đã sử dụng và có các công bố khoa học, ví dụ [3], do vậy đó là phương pháp tốt, hiện đại.

Độ tin cậy của mô hình lưới phần tử hữu hạn xây dựng cho MV.FN được các tác giả kiểm chứng qua việc so sánh giữa số liệu mô phỏng với số liệu thử nghiệm đường dài. Tại *Bảng 2.4* chỉ ra độ lệch δ% < 12,4 giữa kết quả tính công suất theo CFD (CCM+) và kết quả theo Sea-Trials trong điều kiện thử tàu đường dài ở tất cả các chế độ. Độ sai lệch trên phù hợp (sai số do thực tế có dòng chảy với các điều kiện thử tàu khác biệt so với lý thuyết tính trong mô phỏng), từ đó cho phép triển khai mô phỏng với mô hình được xây dựng tại các chế độ khác nhau.

Phương pháp nghiên cứu, tính FFT cho lực đẩy thu được dưới dạng thời gian thực được trích mẫu lại (resampling) hai lần: đúng theo vận tốc quay của chân vịt (lần 1) và theo số mẫu NFFT = 2^k cho độ chính xác tuyệt đối (nếu bỏ qua sai số làm tròn số trong tính toán). Kết quả tính FFT phù hợp trong thực tế xử lý nhiễu bằng thuật toán xử lý nhiễu ngẫu nhiên: Lấy trung bình của N_c chu kỳ (dãy tín hiệu) và bản thân phép toán FFT chỉ chọn lấy những tần số bậc thấp.

Trong bài toán tính dao động xoắn cưỡng bức, ngoại lực sinh ra dao động xoắn cần quan tâm là các điều hòa đầu tiên và một số m điều hòa đầu tiên là bội số của số cánh chân vịt Z_p, m = 1, 2, tuy nhiên nên quan tâm nhất khi m = 1, vì biên độ mô-men xoắn thường lớn nhất *(Bảng 2.5)*.

So sánh kết quả nghiên cứu mô-men xoắn chân vịt cho 20 tàu được nghiên cứu [1, ABS đưa ra khoảng biến thiên ΔM = [6.2-2.5, 6.2-2.5]M_0% = [3.7, 8.7] M_0%) với kết quả mô phỏng (cột cuối, *Bảng 2.5*) là hoàn toàn phù hợp đối với chân vịt có số cánh Z_p = 4.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp, thuật toán và một số lưu ý khi xử lý tín hiệu mô-men xoắn chân vịt thu được từ mô phỏng bằng phương pháp CFD được trình bày: tính mô-men xoắn trung bình và các thành phần điều hòa của nó ở các chế độ mớn nước khác nhau, phục vụ cho bài toán động lực học và dao động xoắn hệ động lực chính, lựa chọn chế độ khai thác của hệ động lực lai chân vịt.

Trích mẫu lại tín hiệu ổn định trong thời gian thực hai lần theo vòng quay chân vịt và theo NFFT để đảm bảo độ chính xác của phép tính FFT. Thuật toán được triển khai thuận tiện trên LabView cùng với ứng dụng của MathScripts.

Tại chế độ khai thác với vòng quay chân vịt n = 173,2 v/ph, (ω =18,1 rad/s) kết quả mô phỏng trên MV. FN với mức mớn nước D_m = 6,8 - 8,02 (m) cho ta biên độ dao động của điều hòa bậc 1 theo số cánh chân vịt (k = 4ω) là lớn nhất, nằm trong dải (1,9 - 4,3)% mô-men xoắn trung bình chân vịt tại các chế độ hoạt động của tàu trong điều kiện tàu khai thác bình thường (sóng yên biển lặng, tàu chạy biển...).

Kết quả từ mô phỏng và xử lý tín hiệu mô-men xoắn cho ta thấy được tính chất thủy động học tương tác giữa vỏ tàu, chân vịt phụ thuộc vào mớn nước trung bình và độ chúi (TRIM) của tàu. Một số nghiên cứu sâu hơn về mô hình hồi quy trong xử lý kết quả mô phỏng lực đẩy và mô-men chân vịt sẽ được trình bày trong công trình nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT21-22.109.

Tài liệu tham khảo

[1]. ABS (2018), *Guidance Notes on Ship Vibration.*

[2]. Yuriy Batrak, *Tortional vibration calculation issues with propulsion system*, *http://www.shaftdesigner.com*, truy cập 15/3/2022.

[3]. Luu, D.D., et al. (2020), *Numerical Study on the Influence of Longitudinal Position of Centre of Buoyancy on Ship Resistance Using RANSE Method*, Naval Engineers Journal, vol.132 (4): pp.151-160.

[4]. Siemens (2020), *STAR-CCM+ User Guide*.

[5]. VOSCO, *Hồ sơ kỹ thuật MV*, Fortuner Navigator.

Ngày nhận bài: 10/4/2022
Ngày chấp nhận đăng: 10/5/2022
Người phản biện: PGS. TS. Trần Ngọc Tú
TS. Phạm Văn Triệu