

ĐỘNG LỰC HỌC THIẾT BỊ CÔNG TÁC TRÊN CẦU TMM-3M KHI TRIỂN KHAI HẠ CHÂN TRỤ TRUNG GIAN

DYNAMIC OF THE OPERATIONAL EQUIPMENT ON THE TMM-3M BRIDGE DURING THE LOWERING
OF THE INTERMEDIATE SUPPORT LEGS

Chu Văn Đạt¹, Trần Đức Thắng^{1,*},
Lê Văn Dương¹, Đào Mạnh Quyền²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huic5804.2024.377>

TÓM TẮT

Cầu cơ giới hạng nặng TMM-3M là một thiết bị bắc cầu nhanh do Liên Xô sản xuất, được ứng dụng chủ yếu trong lĩnh vực quân sự. Mỗi xe cầu TMM-3M gồm thiết bị công tác và xe cơ sở Kraz255B. Quá trình triển khai bắc cầu TMM-3M có bốn giai đoạn, trong đó giai đoạn hạ chân trụ trung gian là giai đoạn cuối. Giai đoạn này, nhịp cầu rung lắc mạnh khi bắt đầu quá trình hạ chân trụ. Bài báo trình bày mô hình động lực học thiết bị công tác trên cầu cơ giới TMM-3M trong quá trình hạ chân trụ trung gian, xem xét đến biến dạng đàn hồi của dây cáp giữ nhịp cầu, ảnh hưởng của ma sát trong khớp quay đến quá trình hạ chân trụ. Hệ phương trình vi phân mô tả dao động của cơ hệ được thiết lập bằng cách sử dụng phương trình Lagrang loại II, và giải bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab. Kết quả của bài báo đã chỉ ra dao động của chân trụ, nhịp cầu và xác định được lực căng cáp trong quá trình hạ chân trụ, là cơ sở để nghiên cứu tổng thể quá trình hạ chân trụ, hướng đến mục tiêu nâng cao tính năng an toàn của bộ cầu và giảm thời gian triển khai bắc cầu.

Từ khóa: Cầu TMM-3M, động lực học, chân trụ trung gian, cầu quân sự, dây cáp đàn hồi.

ABSTRACT

The TMM-3M Sheavy mechanized bridge is a rapid-deployment bridging device produced by the Soviet Union, primarily used in military applications. Each TMM-3M bridge vehicle consists of operational equipment and the Kraz255B base vehicle. The TMM-3M bridge deployment process has four stages, with the final stage being the lowering of the intermediate support legs. During this stage, the bridge span shakes violently while lowering the support legs. This paper presents a dynamic model of the operational equipment on the TMM-3M mechanized bridge during the lowering of the intermediate support legs, considering the elastic deformation of the cables holding the bridge span and the impact of friction in the rotary joints on the lowering process. The system's differential equations describing the oscillations of the mechanical system are established using Lagrange's equations of the second kind and solved through simulation in Matlab software. The results of the paper indicate the oscillations of the support legs and the bridge span and determine the cable tension during the lowering process, providing a basis for comprehensively studying the lowering process to enhance the safety features of the bridge system and reduce deployment time.

Keywords: TMM-3M bridge, dynamic, intermediate support legs, military bridge, elastic cable.

¹Viện Cơ khí Động lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

*Email: thangdt135@mta.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/8/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 01/10/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2024

1. GIỚI THIỆU

Cầu cơ giới hạng nặng TMM-3M là một thiết bị bắc cầu nhanh, là trang bị điển hình của ngành Công binh trong Quân đội ta. Chức năng của nó là nhanh chóng triển khai

một cây cầu tạm, dạng cầu cứng giúp các lực lượng và phương tiện vượt qua các chướng ngại là các khe cạn hoặc sông suối, hào chống tăng... Kết cấu của cầu TMM-3M gồm xe cơ sở và phần thiết bị công tác. Xe cơ sở là xe

tải Kraz255B ba cầu. Thiết bị công tác gồm khung nâng, nhíp cầu và chân trụ trung gian. Khung nâng được dẫn động nâng hạ bằng xi lanh thủy lực, quá trình nâng và hạ chân trụ cầu được thực hiện bằng cáp, dẫn động bởi tang cuốn nhận mô men từ động cơ thông qua hệ truyền lực. Chân trụ trung gian được liên kết với nhíp cầu bằng khớp bản lề. Ở giai đoạn cuối của quá trình triển khai, chân trụ được hạ khi nhíp cầu đã đạt một góc nhất định so với mặt đất và chiều sâu chướng ngại đủ để hạ chân trụ (hình 1).



Hình 1. Quá trình bắc cầu TMM-3M ở giai đoạn hạ chân trụ trung gian

Gần đây đã có một số nghiên cứu về cầu TMM-3M nhằm mục tiêu cải tiến nâng cao hiệu quả sử dụng bộ cầu. Giai đoạn nâng khung khi triển khai bắc cầu được nghiên cứu trong [1]. Khảo sát ảnh hưởng của tốc độ động cơ đến quá trình làm việc của thiết bị công tác trên cầu TMM-3M trong giai đoạn hạ nhíp được các tác giả nghiên cứu trong [2, 3]. Nghiên cứu động lực học thiết bị công tác của cầu TMM-3M trong giai đoạn mở nhíp được các tác giả nghiên cứu trong [4]. Các nghiên cứu về biến dạng đàn hồi của cáp trong quá trình làm việc của cần cầu bánh xích, cần cầu bánh lốp cũng đã được các tác giả quan tâm nghiên cứu trong các tài liệu [5-9]. Sự biến dạng của cáp trên cầu trục, cần trục cũng được nhiều tác giả trong và ngoài nước nghiên cứu [10-15]. Trong các nghiên cứu này, dây cáp giữ cần hoặc dây cáp nâng vật được coi như một khâu đàn hồi có độ cứng và hệ số dập tắt dao động, độ biến dạng của dây cáp nâng cần, nâng vật hoặc treo vật được xác định bao gồm tổng độ biến dạng tĩnh và biến dạng động.

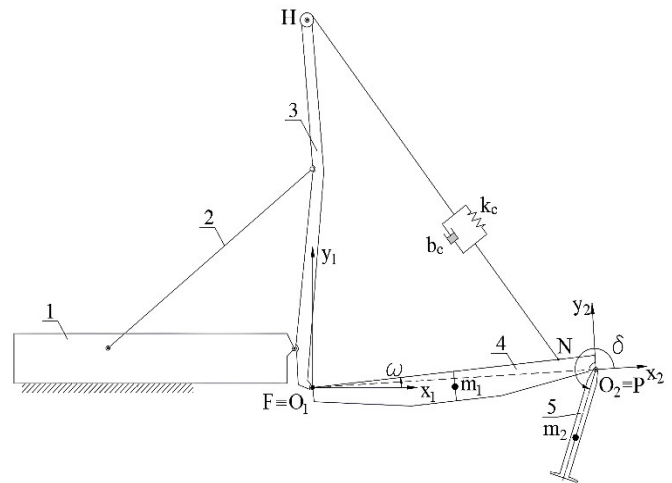
Do tính chất đặc thù quân sự, nghiên cứu về quá trình hạ chân trụ trung gian trên cầu TMM-3M trong quá trình triển khai chưa thấy có công bố. Trong bài báo này, các tác giả tiến hành nghiên cứu động lực học thiết bị công tác cầu cơ giới hạng nặng TMM-3M trong quá trình triển khai ở giai đoạn hạ chân trụ trung gian. Kết quả của bài báo là cơ sở để nghiên cứu tổng thể quá trình hạ chân trụ,

hướng đến mục tiêu nâng cao tính năng an toàn của bộ cầu và giảm thời gian triển khai bắc cầu.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC THIẾT BỊ CÔNG TÁC

2.1. Mô tả mô hình

Mô hình động lực học thiết bị công tác trên cầu cơ giới khi triển khai ở giai đoạn hạ chân trụ được xây dựng ở dạng mô hình phẳng (hình 2). Giả thiết trong quá trình hạ chân trụ, tang cuốn cáp được bó cứng, khoảng cách từ trọng tâm của chân trụ đến trục quay là không đổi. Toàn bộ nhíp cầu được giữ bởi dây cáp trong quá trình hạ chân trụ. Khung nâng được giữ cố định với thân xe bởi lực đẩy của xi lanh nâng khung và sức căng của thanh giằng, xe cơ sở được coi như vật rắn tuyệt đối và gắn cứng với nền. Nhíp cầu liên kết với khung nâng bằng khớp bản lề F, chân trụ liên kết với nhíp cầu bằng khớp bản lề P. Dây cáp giữ nhíp cầu được coi là đàn hồi với hệ số độ cứng và hệ số giảm chấn lần lượt là k_c, b_c . Khối lượng của nhíp cầu và chân trụ lần lượt là m_1, m_2 ; G_1, G_2 tương ứng là vị trí khối tâm của m_1, m_2 . Toàn bộ cơ hệ được đặt trong hệ trục tọa độ cố định $O_1x_1y_1$ gắn với thân xe cơ sở. Bỏ qua tải trọng gió, ma sát trong khớp liên kết nhíp cầu với khung nâng.



Hình 2. Mô hình động lực học thiết bị công tác trên cầu TMM-3M khi hạ chân trụ

1- Thân xe cơ sở; 2- Thanh giằng; 3- Khung nâng; 4- Nhíp cầu; 5- Chân trụ

Mô men quán tính khối lượng của nhíp cầu và chân trụ đối với các trục quay tương ứng là J_1, J_2 . Các thông số hình học được ký hiệu như sau:

$$\gamma_1 = \angle NFG_1; \gamma_2 = \angle PFN; \gamma_3 = \angle HKT; \gamma_4 = \angle HFX_1$$

$$d_1 = FG_1; d_2 = FP; d_3 = PG_2; d_4 = FH; d_5 = FN$$

Hệ tọa độ suy rộng để khảo sát động lực học thiết bị công tác trên cầu TMM-3M trong quá trình hạ chân trụ gồm hai thành phần là:

ω - góc lắc của nhíp cầu quanh vị trí cân bằng (rad);

δ - góc quay xác định vị trí của chân trụ trong hệ tọa độ tương đối $O_2x_2y_2$ (rad).

2.2. Hệ phương trình vi phân dao động

Động năng của cơ hệ:

Tọa độ trọng tâm của nhịp cầu trong hệ tọa độ cố định $O_1x_1y_1$ được xác định theo biểu thức:

$$\begin{cases} x_{m_1} = d_1 \cos(\omega - \gamma_1) \\ y_{m_1} = d_1 \sin(\omega - \gamma_1) \end{cases} \quad (1)$$

Tọa độ trọng tâm của chân trụ trung gian trong hệ tọa độ cố định $O_1x_1y_1$ được xác định theo biểu thức:

$$\begin{cases} x_{m_2} = d_2 \cos(\omega - \gamma_2) + d_3 \cos(\omega + \delta - \gamma_2) \\ y_{m_2} = d_2 \sin(\omega - \gamma_2) + d_3 \sin(\omega + \delta - \gamma_2) \end{cases} \quad (2)$$

Tổng động năng của cơ hệ được xác định theo biểu thức:

$$T = \frac{1}{2}(m_1d_1^2 + J_1)\dot{\omega}^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\delta}^2 + \frac{1}{2}m_2[d_2^2\dot{\omega}^2 + d_3^2(\dot{\omega} + \dot{\delta})^2 + 2d_2d_3 \cos \delta] \quad (3)$$

Thế năng của cơ hệ:

Độ biến dạng cáp Δl trong quá trình hạ chân trụ gồm độ biến dạng tĩnh Δl_t và độ biến dạng động Δl_d , được xác định theo biểu thức:

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_d \quad (4)$$

Độ lực căng cáp tĩnh \vec{F}_{cs} của dây cáp tại thời điểm ban đầu được xác định bằng cách xét phương trình cân bằng mô men của nhịp cầu đối với điểm F. Gọi ω_0, δ_0 là giá trị ban đầu của các tọa độ suy rộng tương ứng, ta có:

$$F_{cs} = \frac{1}{r_c} \begin{cases} m_1gd_1 \cos(\omega_0 - \gamma_1) \\ +m_2(d_2 \cos(\omega_0 - \gamma_2) + d_3 \cos(\omega_0 + \delta_0 - \gamma_2)) \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó, r_c là khoảng cách từ F đến giá của véc tơ lực căng cáp tĩnh \vec{F}_{cs} tại thời điểm đầu và xác định được lực căng cáp tĩnh theo biểu thức:

$$r_c = \frac{d_4d_5 \sin(\gamma_3 - \omega_0)}{\sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega_0)}} \quad (6)$$

Độ biến dạng tĩnh được xác định theo biểu thức:

$$\Delta l_t = \frac{F_{cs}}{k_c} \quad (7)$$

Độ biến dạng động của dây cáp trong quá trình hạ chân trụ được xác định theo biểu thức:

$$\Delta l_d = \sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)} - \sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega_0)} \quad (8)$$

Đặt $a = \Delta l_t - \sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega_0)}$, độ biến dạng tổng cộng của dây cáp là:

$$\Delta l = a + \sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)} \quad (9)$$

Ta có biểu thức xác định thế năng tổng cộng của cơ hệ là:

$$\Pi = m_1gd_1 \sin(\omega - \gamma_1) + m_2g \left(\begin{matrix} d_2 \sin(\omega - \gamma_2) \\ +d_3 \sin(\omega + \delta - \gamma_2) \end{matrix} \right) + \frac{1}{2}k_c \Delta l^2 \quad (10)$$

Hàm hao tán của cơ hệ:

Tổng năng lượng hao tán của cơ hệ được xác định theo biểu thức sau:

$$\Phi = \frac{1}{2}b_c(\dot{\Delta l}_d)^2 = \frac{1}{2}b_c \left(\frac{-d_4d_5 \sin(\gamma_3 - \omega)\dot{\omega}}{\sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)}} \right)^2 \quad (11)$$

Lực suy rộng:

Trong quá trình hạ chân trụ, dao động của chân trụ tắt dần do ma sát lớn trong khớp quay. Mô men ma sát trong khớp quay được xác định gần đúng theo biểu thức:

$$M_{ms} = fr m_2g \sin(\omega + \delta - \gamma_2) \quad (12)$$

Trong đó, f là hệ số ma sát trong khớp quay P , r là bán kính của khớp quay P . Mô men ma sát M_{ms} có chiều thay đổi, luôn ngược với xu hướng quay để cản trở dao động lắc của chân trụ. Lực suy rộng tương ứng với các tọa độ được xác định như sau:

$$Q_\omega = 0; Q_\delta = -M_{ms} \times \text{sgn}(\dot{\delta}) \quad (13)$$

Áp dụng phương trình Lagrange loại II để viết hệ phương trình vi phân mô tả dao động của cơ hệ, ta có hệ phương trình vi phân mô tả dao động của cơ hệ gồm hai phương trình sau:

$$\begin{aligned} &(m_1d_1^2 + J_1 + m_2d_2^2 + m_2d_3^2)\ddot{\omega} + m_2d_3^2\ddot{\delta} \\ &+ m_1gd_1 \cos(\omega - \gamma_1) + m_2g \left(\begin{matrix} d_2 \cos(\omega - \gamma_2) \\ +d_3 \cos(\omega + \delta - \gamma_2) \end{matrix} \right) \\ &+ k_c \Delta l \frac{-d_4d_5 \sin(\gamma_3 - \omega)}{\sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)}} \\ &+ b_c \dot{\Delta l}_d \frac{-d_4d_5 \sin(\gamma_3 - \omega)}{\sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)}} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &m_2d_3^2\ddot{\omega} + (J_2 + m_2d_3^2)\ddot{\delta} + m_2d_2d_3 \sin \delta \\ &+ m_2gd_3 \cos(\omega + \delta - \gamma_2) = -M_{ms} \times \text{sgn}(\dot{\delta}) \end{aligned} \quad (15)$$

Thông số đầu vào để giải hệ phương trình vi phân (14, 15) được cho trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào để giải hệ phương trình vi phân dao động

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
m_1 (kg)	4400	d_5 (m)	9,5
m_2 (kg)	600	γ_1	7°
J_1 (kgm ²)	40425	γ_2	3°
J_2 (kgm ²)	392	γ_3	100°
d_1 (m)	5,25	k_c (N/m)	2300000
d_2 (m)	10,6	b_c (Nm/s ²)	500
d_3 (m)	1,4	f	0,57
d_4 (m)	6,8	r (m)	0,08

Điều kiện ban đầu để giải bài toán động lực học như sau:

$$[\omega_0 \quad \delta_0]^T = \left[\frac{\pi}{6} \quad \frac{11\pi}{9} \right]^T; [\dot{\omega}_0 \quad \dot{\delta}_0]^T = [0 \quad 0]^T$$

2.3. Lực căng cáp trong quá trình hạ chân trụ

Quá trình hạ chân trụ ở trạng thái nhíp cầu được giữ ở trạng thái treo bởi dây cáp, lực căng trên dây cáp được xác định theo biểu thức sau:

$$F_c = k_c \Delta l + b_c \dot{\Delta l} \tag{16}$$

Từ (9), (11) và (16) ta có:

$$F_c = k_c \left(a + \sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)} \right) + b_c \left(\frac{-d_4d_5 \sin(\gamma_3 - \omega) \dot{\omega}}{\sqrt{d_4^2 + d_5^2 - 2d_4d_5 \cos(\gamma_3 - \omega)}} \right) \tag{17}$$

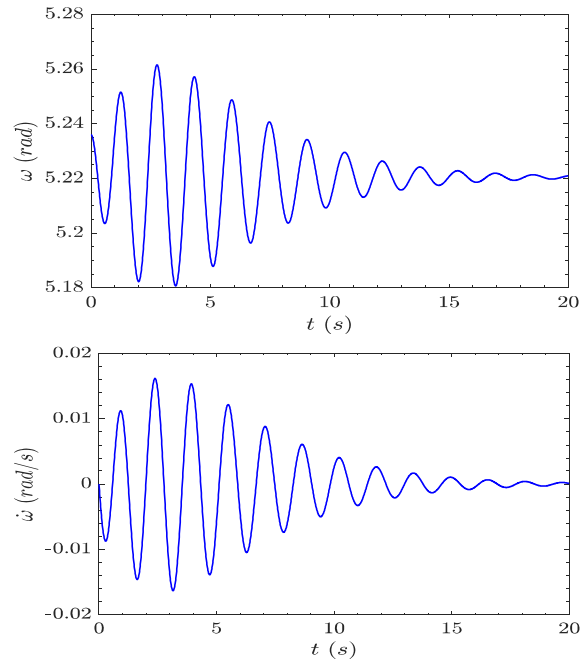
Để đảm bảo điều kiện an toàn, theo thông số từ nhà sản xuất, lực căng cáp động sinh ra trong quá trình triển khai bắc cầu không được vượt quá giá trị cho phép là 16200N. Như vậy điều kiện an toàn được xác định theo biểu thức:

$$F_c \leq 16200 \tag{18}$$

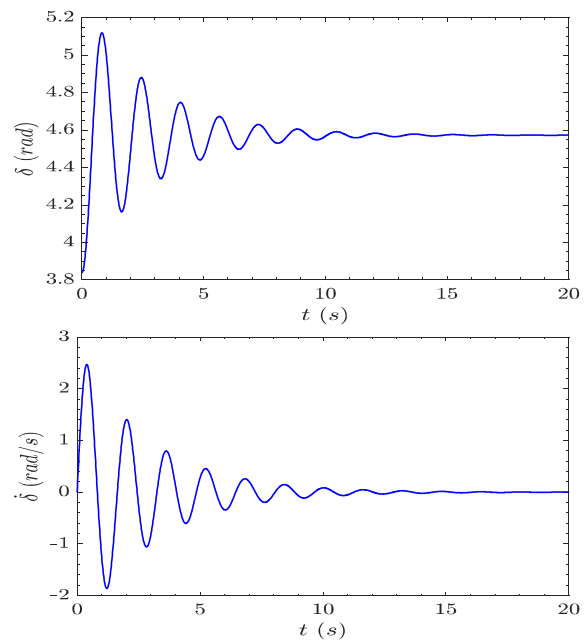
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hệ phương trình vi phân phi tuyến (14, 15) được giải bằng phương pháp mô phỏng trên phần mềm Matlab. Xét trường hợp khi góc quay xác định vị trí nhíp cầu so với phương ngang là 30° và tiến hành rút chốt tời tay để hạ chân trụ, nhận được kết quả thể hiện ở các hình 3, 4.

Từ hình 3 cho thấy, đồ thị chuyển vị và vận tốc góc của nhíp cầu có dạng dao động tắt dần. thời gian dập tắt dao động vào khoảng 12 giây. Ở giai đoạn bắt đầu hạ chân trụ, góc quay ω của nhíp cầu biến thiên mạnh, biên độ đạt giá trị lớn nhất xấp xỉ 0,04 rad tương ứng với $2,3^\circ$ nhưng sự biến thiên mạnh chỉ xảy ra trong khoảng thời gian 4 giây đầu tiên. Tương ứng với chuyển vị, vận tốc góc của nhíp cầu cũng có quy luật biến thiên tương tự và phù hợp với chuyển vị góc của nhíp cầu. Trong 5 giây đầu tiên, do tải trọng thay đổi đột ngột nên nhíp cầu rung lắc mạnh nhất.



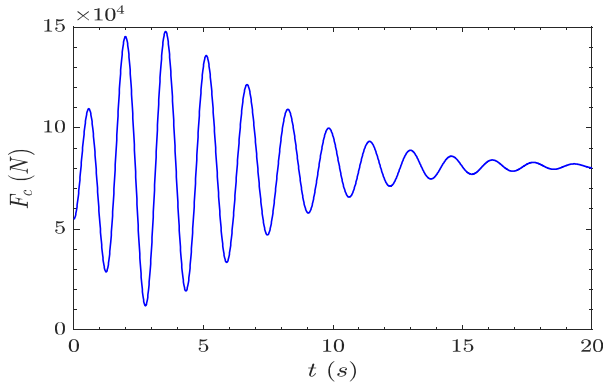
Hình 3. Chuyển vị và vận tốc góc của nhíp cầu



Hình 4. Chuyển vị và vận tốc góc của chân trụ trung gian

Hình 4 thể hiện dao động của chân trụ trung gian có dạng tắt dần vì mất năng lượng do ma sát lớn trong khớp quay. Dao động của góc quay δ có dạng tắt dần và phù hợp với cách chọn hệ trục tọa độ trong mô hình khảo sát hình 2. Thời gian dập tắt dao động vào khoảng 8 giây. Trong 2 giây đầu tiên kể từ khi rút chốt tời, góc quay δ nhanh chóng tăng dần và đạt giá trị cực đại khoảng 5,1 rad. Trong thời gian này cũng là lúc nhíp cầu rung lắc mạnh nhất, quy luật của δ và ω là hoàn toàn phù hợp. Sự rung lắc mạnh của nhíp cầu tạo ra sự biến thiên mạnh về lực căng động trên dây cáp, đặc biệt là ở giai đoạn đầu.

Để kiểm tra điều kiện an toàn khi hạ chân trụ trung gian, ta khảo sát lực căng cáp động xuất hiện trên dây cáp. Đồ thị lực căng cáp động xuất hiện trên dây cáp giữ vật được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Lực căng trên dây cáp giữ nhịp cầu

Đồ thị lực căng cáp F_c có quy luật tắt dần tương tự như góc lắc của nhịp cầu và chân trụ trung gian. Giá trị lực căng cáp xuất hiện đạt giá trị cực đại khoảng 14900N ở thời gian đầu của quá trình hạ chân trụ. Theo đó điều kiện an toàn (17) được bảo đảm. Trên thực tế, điều kiện an toàn khi hạ chân trụ không chỉ có việc xem xét đến lực căng cáp mà còn các yếu tố khác như điều kiện chống lật, điều kiện an toàn của mô men phanh khẩn cấp trên nhịp cầu. Các điều kiện này sẽ được trình bày ở nghiên cứu tiếp theo về tổng thể thiết bị bắc cầu TMM-3M trong quá trình hạ chân trụ trung gian.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày mô hình động lực học và thiết lập hệ phương trình vi phân mô tả dao động của thiết bị công tác trên bộ cầu cơ giới hạng nặng TMM-3M trong quá trình triển khai ở giai đoạn hạ chân trụ trung gian. Mô hình đã xem xét đến độ đàn hồi của dây cáp và ảnh hưởng của ma sát trong khớp quay liên kết giữa chân trụ với nhịp cầu. Kết quả bài báo đã chỉ ra quy luật dao động của nhịp cầu, chân trụ trung gian và quy luật biến thiên của lực căng cáp xuất hiện trên nhánh cáp giữ nhịp cầu khi tiến hành hạ chân trụ, kiểm tra điều kiện an toàn đối với dây cáp giữ nhịp. Nghiên cứu này là cơ sở để tiến hành các bước khảo sát dao động tổng thể của thiết bị bắc cầu TMM-3M trong quá trình hạ chân trụ trung gian.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Thang T.D, Le D.V, Chu D.V, "Research on the dynamics of a heavy mechanized bridge in the deployment phase of the lifting frame," *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 116-126, 2024.

[2]. Tran Duc Thang, Le Van Duong, Chu Van Dat, Nguyen Thi Hai Van, "Study on the optimal working regime of cable mechanism on the TMM-3M heavy mechanized bridge during the span - lowering stage," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, 22(4), 80-84, 2024.

[3]. L. H. Quang, *Research to determine the dynamic parameters of the folding mechanism of the TMM-3M brigde*. Master Thesis, Military Technical Academy, Hanoi, 2017.

[4]. Tran Duc Thang, Le Van Duong, Chu Van Dat, "Research on the dynamics of the working equipment on the heavy mechanized bridge during the deployment phase in the opening stage," *HauI Journal of Science and Technology*, 60(4), 85-90, 2024.

[5]. L. V. Duong, L. A. Tuan, "Modeling and observer-based robust controllers for telescopic truck cranes," *Mechanism and Machine Theory*, 173: 104869, 2022.

[6]. Radomir Mijailović, "Modelling the dynamic behaviour of the truck-crane," *Transport*, 26(4), 410-417, 2011.

[7]. Cekus D., Kwiaton P, "Effect of the rope system deformation on the working cycle of the mobile crane during interaction of wind pressure," *Mechanism and Machine Theory*, 153: 104011, 2020.

[8]. L. A. Tuan, L. Soon-Geul, "Modeling and advanced sliding mode controls of crawler cranes considering wire rope elasticity and complicated operations," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 103, 250-263, 2017.

[9]. L. A. Tuan, "Fractional-order fast terminal back-stepping sliding mode control of crawler cranes," *Mech. Mach. Theory*, 137, 297-314, 2019.

[10]. N. Q. Hieu, K. S. Hong, "Adaptive sliding mode control of container cranes," *IET Control Theory Appl*, 6(5), 662-668, 2012.

[11]. Le Anh Tuan, Soon-Geul Lee, Luong Cong Nho, Hoang Manh Cuong, "Robust controls for ship-mounted container cranes with viscoelastic foundation and flexible hoisting cable," *Proc IMechE Part I: J Systems and Control Engineering*, 229(7), 662-674, 2015.

[12]. Sung Wua, Mansour Karkouba, Wen-Shyong Yub, Chien-Ting Chena, Ming-Guo Herc, Kuan-Wei Wu, "Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using arobust adaptive fuzzy control," *Fuzzy Sets and Systems*, 290, 118-137, 2016.

[13]. He Chen, Yongchun Fang, Ning Sun, "An adaptive tracking control method with swing suppression for 4-DOF tower crane systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 123, 426-442, 2019.

[14]. Joshua Vaughan, Dooroo Kim, William Singhose, "Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6), 1345-1358, 2010.

[15]. SM Fasih, Z Mohamed, AR Husain, L Ramli, AM Abdullahi, Wanjum, "Payload swing control of a tower crane using a neural network-based input shaper," *Measurement and Control*, 53(7-8), 1171-1182, 2020.

AUTHORS INFORMATION

Chu Van Dat¹, Tran Duc Thang¹, Le Van Duong¹, Dao Manh Quyen²

¹Institute of Vehicle and Energy Engineering, Military Technical Academy, Vietnam

²University of Transport Technology, Vietnam