

Xây dựng mô hình khảo sát dao động của xe xích tốc độ cao bằng cách sử dụng các bánh tỳ ảo khi tính ảnh hưởng của dải xích đến dao động của thân xe

📍 **THS. PHẠM HOÀNG MINH¹, GS.TS.VŨ ĐỨC LẬP²
TS. NGUYỄN ANH TUẤN³**

¹*Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự*

²*Đại học Thủy lợi*

³*Đại học Đại Nam*

● NGÀY NHẬN BÀI: 02/3/2023 ● NGÀY CHUYỂN PHẦN BIÊN: 06/3/2023
● NGÀY CHẤP NHẬN PHẦN BIÊN: 25/3/2023 ● NGÀY DUYỆT ĐĂNG: 04/4/2023

Tóm tắt: Khả năng vượt đả cao của xe xích nói chung chủ yếu nhờ hoạt động của các dải xích. Dải xích được cấu tạo từ nhiều mắt xích, liên kết với nhau bằng các chốt và khớp... Điều này dẫn đến những khó khăn trong việc xây dựng mô hình mô tả hoạt động chính xác của dải xích và ảnh hưởng của nó đến động lực học chuyển động cũng như dao động của xe. Trong phạm vi bài viết này, nhóm tác giả đề xuất một cách tiếp cận mới, trong đó dải xích được thay thế bằng một số “bánh tỳ ảo” có liên kết cơ khí với các bánh tỳ thực. Mô hình tương tác phi tuyến giữa các bánh xe với địa hình khi xét đến trượt dọc được dùng để xác định phản lực pháp tuyến và tiếp tuyến. Tác động của các bánh tỳ ảo lên bánh tỳ thực được mô tả qua một liên kết đàn hồi. Hệ phương trình vi phân của cơ hệ có được qua các phương trình liên kết. Các phương trình này được giải bằng phương pháp số với một số giả thiết nhất định. Kết quả tính toán đã được kiểm chứng qua thực nghiệm.

Từ khóa: *Tracked vehicle; Track-pad; Vibration; Track-Ground interaction.*

1. GIỚI THIỆU

Khó khăn lớn nhất trong nghiên cứu động lực học chuyển động của xe xích là mô hình hóa dải xích và tương tác xích-nền đường. Trên thực tế, dải xích gồm nhiều các thành phần (mắt xích) nối với nhau

bằng các liên kết phức tạp. Việc xây dựng một mô hình thay thế dải xích có ý nghĩa rất lớn trong nghiên cứu động lực học xe xích.

Đã có một số tác giả đã đề cập đến vấn đề xây dựng mô hình dải xích và ảnh hưởng

của nó đến động lực học thân xe [1,2,3]. Các nghiên cứu này chủ yếu đề cập đến việc mô hình hóa các liên kết của dải xích bằng liên kết cơ khí và xây dựng các phương trình mô tả chuyển động của nó như một cơ hệ nhiều vật [4,5]. Các mô hình này tập trung phân tích động học của dải xích và ảnh hưởng của nó đến hệ thống treo của xe đồng thời dự báo đáp ứng động lực học của thân xe. Ngoài ra, các tác giả còn tập trung nghiên cứu khả năng bám của dải xích khi xét đến động năng của dải xích trong chế độ chuyển động xác lập [6].

Tất cả các mô hình trên đều tiếp cận với quan điểm coi dải xích là cơ hệ nhiều vật. Các mô hình này có độ chính xác khá cao nhưng rất phức tạp trong việc thiết lập các mô hình toán mô tả chuyển động của các vật rắn thành phần cũng như liên kết giữa chúng. Trong phạm vi nghiên cứu của mình, nhóm tác giả đưa ra một hướng tiếp cận khác để khảo sát ảnh hưởng của dải xích và tương tác xích-nền đường đến động lực học thân xe.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THAY THẾ DẢI XÍCH

2.1 Vai trò của dải xích trên xe xích

Một số vai trò cơ bản, tiêu biểu của dải xích trên xe xích là:

- + Phân bố trọng lượng của thân xe trên một diện tích tiếp xúc rộng hơn (so với xe bánh lốp), giảm thiểu hiện tượng lún, biến dạng của nền đường gây ra do khối lượng thân xe lớn;

- + Với lực kéo lớn, cùng loại địa hình, khả năng bám của xe xích sẽ lớn hơn nhiều so với xe bánh lốp có cùng khối lượng;

- + Tạo ra liên kết với hệ treo của thân xe,

truyền phản lực của nền đường đến thân xe thông qua các bánh tỳ và các phần tử hệ thống treo.

Một số thông số cơ bản cần xét đến gồm: chiều dài xích, chiều dài xích tiếp đất, chiều rộng xích và kích thước mắt xích. Các xe xích có vận tốc thấp thường sử dụng bước xích lớn (xe ủi, máy xúc, xe cầu...), ngược lại, các xe xích vận tốc cao (xe xích, xe thiết giáp...) thường sử dụng dải xích có bước xích nhỏ, tương ứng với điều kiện cơ bản của địa hình hoạt động thường xuyên. Trong nghiên cứu của mình, Wong và cộng sự [6] đã phân tích và đưa ra một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm, xác định áp lực phân bố trên toàn bộ bề mặt tiếp xúc xích-nền đường. Theo đó, có thể thấy áp lực cao hơn ở mặt tiếp xúc xích-nền đường tại vị trí các bánh tỳ và nhỏ hơn ở vị trí giữa các bánh tỳ. Cũng theo đó, dễ dàng thấy áp lực tại vị trí giữa các bánh tỳ phụ thuộc vào lực căng của dải xích.

2.2 Xây dựng mô hình thay thế dải xích

Mô hình thân xe khảo sát là cơ hệ trong mặt phẳng $Ox_G Y_G$, được thể hiện trên hình 1. Cơ hệ gồm 19 vật rắn với 05 bánh tỳ, 05 đòn cân bằng, 04 bánh tỳ ảo, 04 đòn cân bằng ảo và thân xe. Để đơn giản trong tính toán, coi bánh tỳ ảo có kích thước giống với các bánh tỳ thực và bố trí giữa các bánh tỳ thực. Bánh tỳ ảo được giả thiết là có liên kết với bánh tỳ thực bởi một tay đòn ảo không biến dạng; Bánh tỳ ảo dịch chuyển được giả thiết sẽ ảnh hưởng đến dịch chuyển của bánh tỳ thực qua liên kết tại tâm quay trên bánh tỳ thực của tay đòn ảo với hệ lò xo-giảm chấn, trong đó, độ cứng của lò xo và hệ số cản giảm chấn này mô tả sức căng của dải xích. Bánh tỳ thực được nối

với thân xe qua đòn cân bằng với độ cứng lò xo và hệ số cản giảm chấn mô tả kết cấu thực trên xe.

Với cách bố trí các bánh tỳ ảo giữa các bánh tỳ thực để thay thế dải xích như trên, một cách định tính, có thể thấy áp lực trên nền đường do khối lượng của thân xe sẽ gần thực tế hơn so với việc chỉ xét đến các bánh tỳ thực. Để mô phỏng tác dụng của dải xích trong quá trình chuyển động của xe, các bánh tỳ (cả thực và ảo) được coi như các bánh xe chủ động (có tổng mô men trên các bánh bằng tổng mô men trên bánh sao

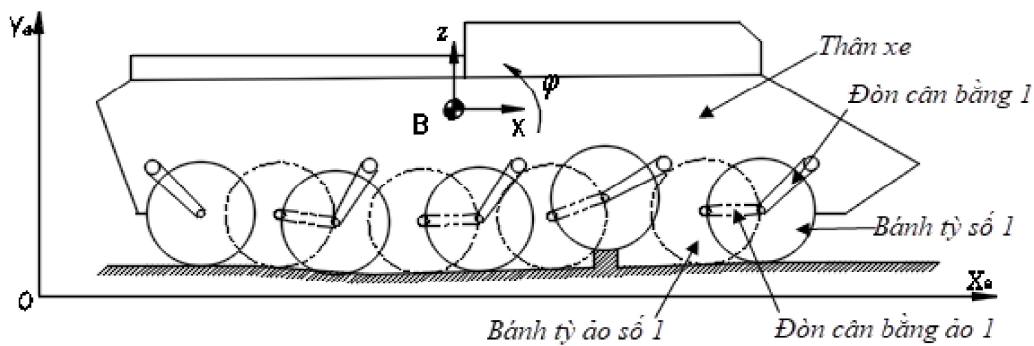
chủ động). Giả thiết phản lực từ nền đường lên thân xe thông qua kết cấu hệ treo là tuyến tính, tổng quát, ta có các lực thành phần như sau:

$$Q_i = k_s (\theta_i - \theta_j - \theta_s) + c_s (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_j) \quad (1)$$

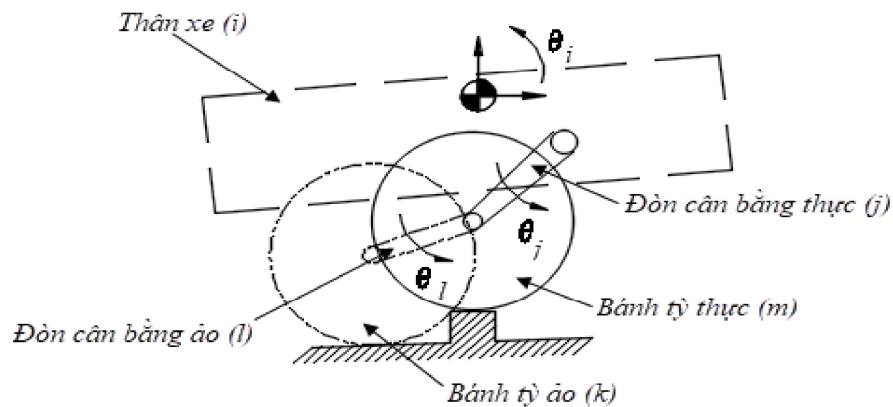
$$Q_l = k_{sl} (\theta_l - \theta_j - \theta_s) + c_{sl} (-\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_j) \quad (2)$$

$$Q_j = (Q_i - Q_l) \quad (3)$$

Trong đó: Q_i , Q_j , Q_l và θ_i , θ_j , θ_l lần lượt là lực và chuyển vị góc trên các vật i , j , l (xem hình 2).



Hình 1. Mô hình khảo sát dao động xe xích với các bánh tỳ ảo Theo [3]



Hình 2. Mô hình liên kết bánh tỳ thực và bánh tỳ ảo với thân xe và quy ước ký hiệu Theo [3]

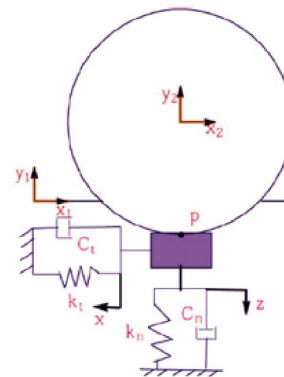
Trong đó, k_s và c_s là độ cứng và hệ số cản giảm chấn hệ treo của bánh tỳ thực, k_{sl} và c_{sl} là độ cứng và hệ số cản giảm chấn hệ treo của bánh tỳ ảo. Để phù hợp với kết cấu thực của dải xích, ta coi độ cứng của bánh tỳ ảo nhỏ hơn không nhiều so với độ cứng của bánh tỳ thực.

3. TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC BÁNH TỶ THỰC, ẢO VÀ NỀN ĐƯỜNG

Với các giả thiết trên - tác dụng của dải xích được thay thế bằng các bánh tỳ ảo và mô men chủ động được coi như chia đều và đặt trên các bánh tỳ - ta thấy: phản lực từ nền đường, đường lên thân xe hoàn toàn thông qua các bánh tỳ thực và ảo và hệ treo. Có thể mô tả tương tác bánh tỳ-đường bằng các phương trình tính nhưng phải bỏ qua hiện tượng tách bánh và trượt của bánh tỳ thực trên dải xích thực trong một số điều kiện nhất định. Coi nền đường là bề mặt vật đàn hồi không có khối lượng với độ cứng và

hệ số cản giảm chấn nhất định (tương ứng với điều kiện mặt đường thực), tương tác với

bánh tỳ theo cả hai phương pháp tuyến và tiếp tuyến. Tại vết tiếp xúc của bánh tỳ (xét cho cả bánh tỳ thực và bánh tỳ ảo) với nền đường, tương ứng với giả thiết, ta sẽ xác định được hai phản lực pháp tuyến và tiếp tuyến với mô hình được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Mô hình tính lực tiếp tuyến và lực pháp tuyến tại vết tiếp xúc bánh tỳ - mặt đường

$$f_n = \begin{cases} k_n z^2 + c_n z^2 \dot{z} & khi \quad z \geq 0 \\ 0 & khi \quad z \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_b = k_t x + c_t \dot{p} \quad (5)$$

$$f_t = \begin{cases} f_b & khi \quad |f_b| \leq \mu |f_n| \\ \mu |f_n| sign[f_b] & khi \quad |f_b| > \mu |f_n| \end{cases} \quad (6)$$

$$\dot{x} = -\frac{k_t x + f_b}{c_t} \quad (7)$$

Trong đó, z là chiều sâu vùng biến dạng tại vết tiếp xúc bánh tỳ-nền đường, \dot{z} là vận tốc biến dạng của nền đường, được tính toán bằng các tham số trạng thái của bánh tỳ trong vùng tiếp xúc; k_n và c_n là độ cứng và hệ số cản theo phương pháp

tuyến của mặt đường tại khu vực tiếp xúc với bánh tỳ; k_t và c_t là độ cứng và hệ số cản theo phương tiếp tuyến của mặt đường tại khu vực tiếp xúc với bánh tỳ; x là biến dạng của nền đường theo phương tiếp tuyến tại khu vực tiếp xúc; \dot{p} là vận tốc của điểm

tiếp xúc (điểm tâm của vết tiếp xúc).

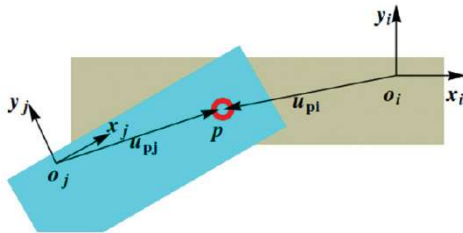
Lực tiếp tuyến được tính toán và so sánh với giá trị giới hạn trượt, đưa vào hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động của xe. Bên cạnh các phương trình vi phân thông thường, các phương trình vi phân phát sinh từ mô hình tiếp xúc bánh tỳ-nền đường cũng được giải quyết một cách đồng thời. Đối với địa hình không bằng phẳng, các phản lực vuông góc và tiếp tuyến được sử dụng để tính toán các lực phát sinh tại vùng tiếp xúc bánh tỳ-nền đường.

4. MÔ HÌNH TOÁN

Bằng cách sử dụng hệ tọa độ địa phương – gắn với vật rắn trong cơ hệ - ta hoàn toàn có thể xác định vị trí, hướng của một vật trong cơ hệ hay trong hệ tọa độ cố định của cơ hệ. Với mô hình cơ hệ trong mặt phẳng OXY, nếu tách tất cả các vật và bổ sung các phản lực tác dụng (mô men, lực), mỗi vật có 03 bậc tự do vậy cơ hệ tự do gồm 19 vật rắn có tất cả $19 \times 3 = 57$ bậc tự do. Véc tơ xác định vị trí của cơ hệ được thể hiện như sau:

$$q = \{R_{x1} R_{y1} \theta_1 R_{x2} R_{y2} \theta_2 R_{x3} R_{y3} \theta_3 \dots R_{x19} R_{y19} \theta_{19}\}^T \quad (8)$$

Mô hình khảo sát liên kết lực được mô tả trên hình 4.



Hình 4. Minh họa liên kết giữa các khâu

Phương trình liên kết động học của khớp quay giữa hai vật thứ i và vật thứ j được biểu diễn dưới dạng véc-tơ như sau

$$\vec{r}_{pi} - \vec{r}_{pj} = \vec{0} \quad (9)$$

Tường minh hơn, ta có biểu thức dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{Bmatrix} R_{xi} \\ R_{yi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{pxi} \\ u_{pyi} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} R_{xj} \\ R_{yj} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{pxj} \\ u_{pyj} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Phương trình động học của liên kết với quỹ đạo xác định có thể được biểu diễn ở dạng véc-tơ liên kết là:

$$C(q, t) \quad (11)$$

Phương trình mô tả chuyển động của cơ hệ với dải xích được thay thế bằng các bánh tỳ ảo được xây dựng bằng cách sử dụng nguyên lý Lagrangian như sau:

$$M \ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_c \quad (12)$$

Trong đó, M là ma trận khối lượng của cơ hệ, C_q là ma trận Jacobi của các liên kết động học, λ là nhân tử La-grăng, Q_c là véc-tơ ngoại lực.

Với mô hình liên kết như trên, ta có thể lập các phương trình liên kết, khi biết các liên kết đều là khớp holonomic, xét trong hệ tọa độ của các vật liên kết. Có thể thấy, nhân tử La-grăng có dạng đại số khi các tọa độ có dạng vi phân bậc hai. Các phương trình (11), (12) tạo nên một hệ phương trình vi phân phải giải đồng thời. Vì vế phải của (12) có dạng rời rạc, không thể giải bằng phương pháp giải tích truyền thống.

Biểu thị các phương trình liên kết theo lý thuyết không gian trạng thái như sau:

$$C_q \dot{q} + C_t = 0 \quad (13)$$

$$C_q \ddot{q} + (C_q \dot{q}) \dot{q} + 2C_{qt} \dot{q} + C_{tt} = 0 \quad (14)$$

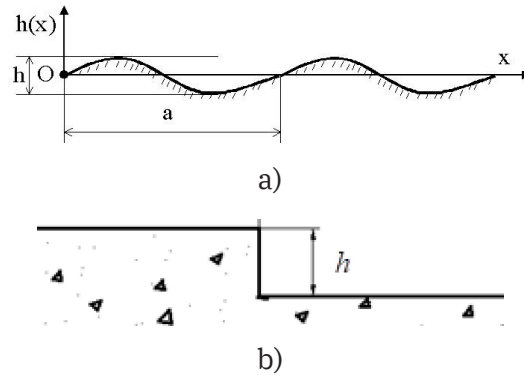
$$\begin{Bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & M & C_q^T \\ 0 & C_q & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \dot{v} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v \\ Q \\ -((C_q \dot{q}) \dot{q} + 2C_{qt} \dot{q} + C_{tt}) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Lực đàn hồi và lực tương tác bánh xe-đất được tính trước và đưa vào hệ phương trình vi phân mô tả chuyển động như các ngoại lực. Sử dụng phần mềm Matlab-Simulink để xây dựng chương trình giải hệ phương trình (15), ta được kết quả là gia tốc, vận tốc, chuyển dịch của các vật theo các bậc tự do đã xác định.

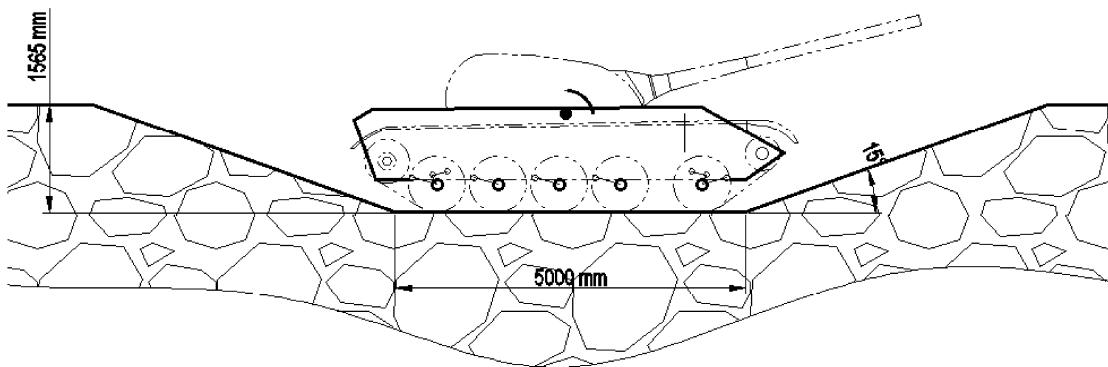
5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Tại Việt Nam, xe xích tốc độ cao chủ yếu là các xe chiến đấu hiện biên chế trong Quân đội. Nhóm tác giả đã sử dụng bộ số liệu của xe tăng T54B. Sử dụng mô hình đã xây dựng, nhóm tác giả đã mô phỏng, đánh giá sai khác khi có xét đến ảnh hưởng của dải xích và không xét đến ảnh hưởng của dải xích. Khảo sát dao động của thân xe tại vị trí trọng tâm (hoặc lái xe) khi xe chuyển

động đều qua một số điều kiện đường đặc trưng cho loại mặt đường bình thường: mặt đường tương đối phẳng, mấp mô dạng sóng sin có biên độ $h/2$ và bước sóng a (hình 5a) hoặc loại đường khắc nghiệt: đường dạng bậc có chiều cao h (hình 5b), đường lên xuống hào (hình 6).



Hình 5. Biên dạng mấp mô đường dạng sóng sin (a) và đường dạng bậc (b)

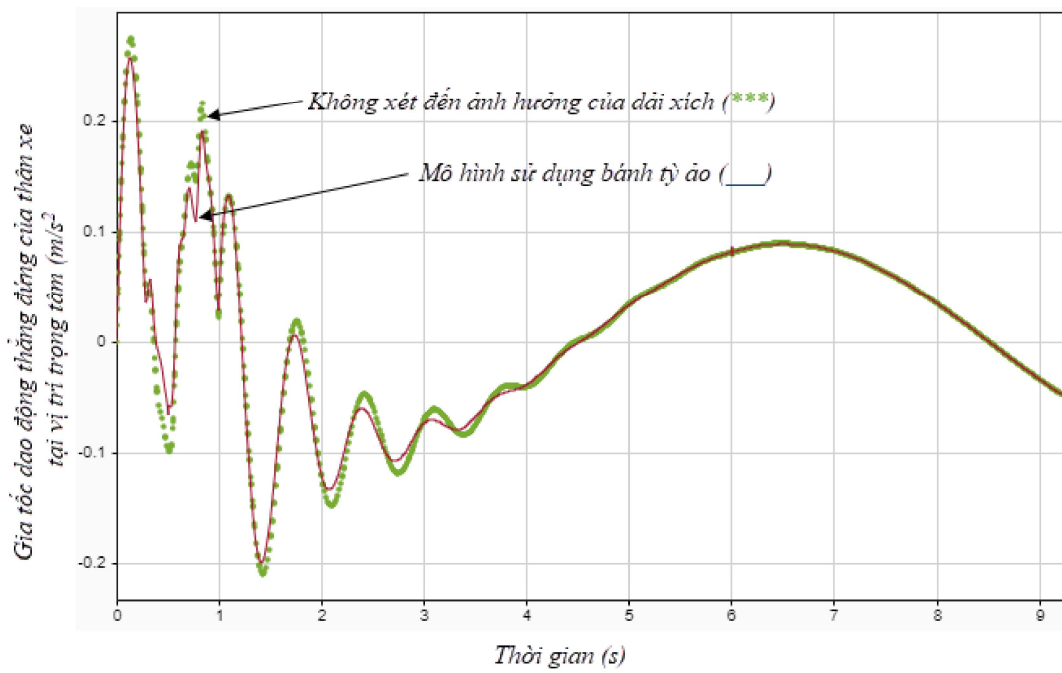


Hình 6. Quy cách đường qua hào chống tăng

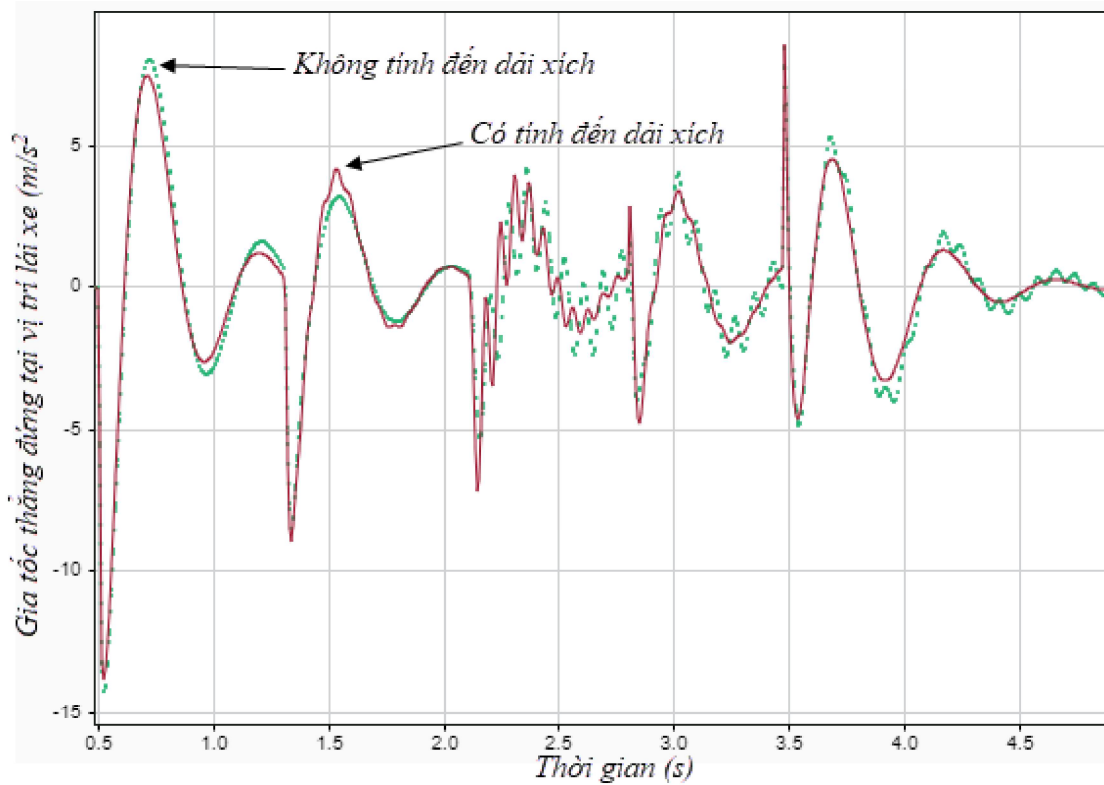
Nguồn: Bộ Tư lệnh Tăng Thiết giáp, 2019

Trong phạm vi bài viết này, nhóm tác giả chỉ khảo sát với đường sin và đường dạng bậc. Kết quả khảo sát, so sánh kết quả tính toán gia tốc dao động thẳng đứng của thân xe tại vị trí trọng tâm khi sử dụng mô

hình do nhóm tác giả đề xuất và mô hình không có các bánh tỳ ảo (không xét đến ảnh hưởng của dải xích) được thể hiện trên hình 7.



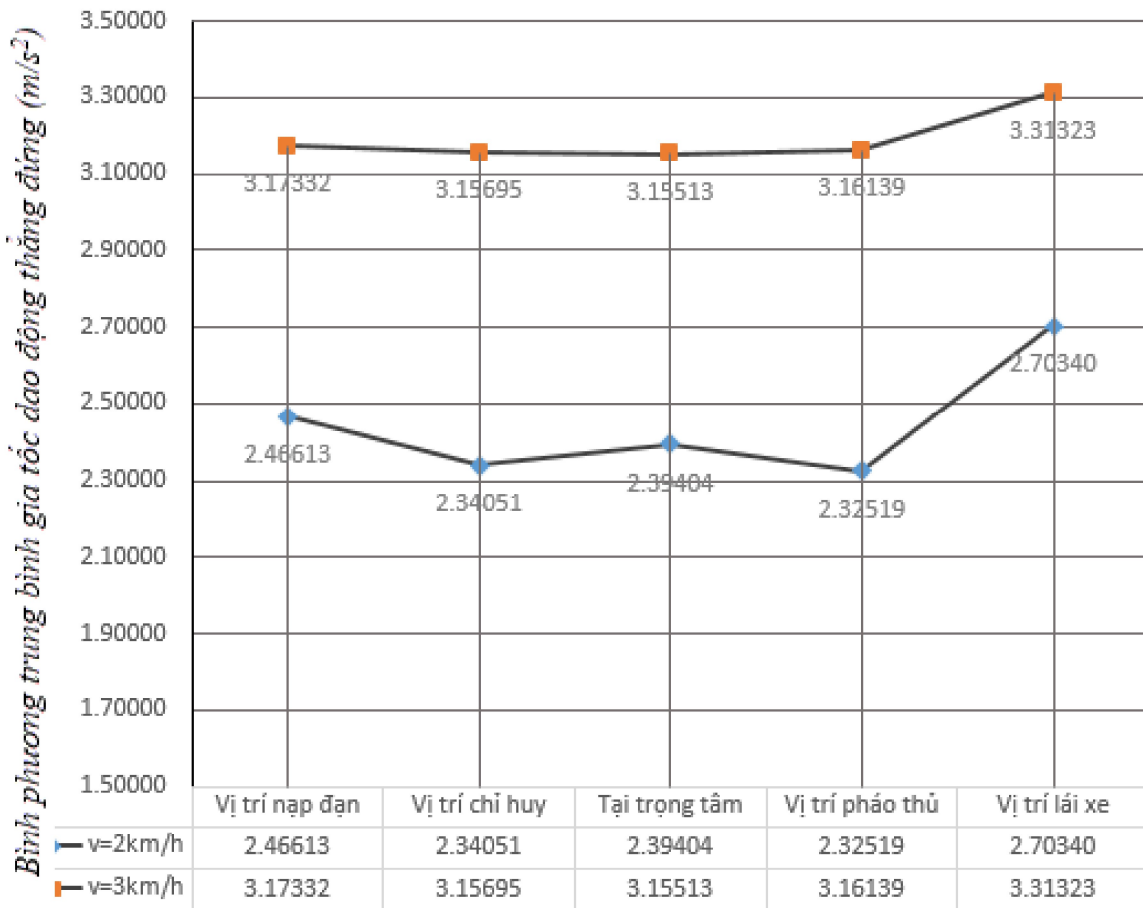
Hình 7. So sánh kết quả tính gia tốc dao động tại trọng tâm khi xe chuyển động đều trên mặt đường dạng sin có biên độ $h/2=0,15m$ bước sóng $a=8m$ với tốc độ $15 km/h$



Hình 8. So sánh kết quả tính gia tốc dao động tại vị trí lái xe khi xe chuyển động đều trên mặt dạng bậc có chiều cao $h=0,2m$ với tốc độ $5 km/h$

Với kết quả tính toán giá trị gia tốc theo thời gian thực, ta cũng có thể tính toán được các đại lượng dẫn xuất như giá trị bình phương trung bình gia tốc theo thời gian, vận tốc theo thời gian và chuyển vị theo thời gian... Hình 9 thể hiện kết quả

tính toán bằng mô hình có tính đến ảnh hưởng của dải xích (sử dụng bánh tỷ ảo) và so sánh giá trị bình phương trung bình gia tốc dao động thẳng đứng tại một số vị trí trên xe khi xe đi trên đường dạng bậc với vận tốc 2 km/h và 3 km/h.



Hình 9. So sánh giá trị bình phương trung bình gia tốc tại một số vị trí trên xe

* Nhận xét:

- Hình dáng đồ thị các giá trị tính toán khá tương đồng với hệ số tương quan lên đến 0,8787. Tuy nhiên, ta có thể thấy rõ sự sai khác giữa kết quả tính toán các tham số dao động theo mô hình truyền thống (không tính đến dải xích) và mô hình có tính đến dải xích (khi sử dụng bánh tỷ ảo): sai lệch về giá trị tại một thời điểm có thể

lên đến khoảng 19% (hình 8).

- Giá trị gia tốc thẳng đứng tại các vị trí trên xe cho thấy đúng quy luật: gia tốc thẳng đứng tại vị trí trọng tâm và xung quanh trọng tâm luôn là nhỏ nhất, lớn hơn khi ở vị trí xa trọng tâm (vị trí lái xe).

6. KẾT LUẬN

Qua kiểm chứng bằng thực nghiệm, mô

hình sử dụng bánh tỳ ảo cho kết quả tính toán đáp ứng động lực học (dao động) của thân xe với đầu vào xác định khá sát với số liệu đo thực tế (sai số phụ thuộc vào các yếu tố đầu vào: vận tốc, chiều cao bậc, bước sóng biên dạng đường sin... khoảng 5%-10% nhưng không vượt quá 19%). Với khối lượng tính toán là nhỏ hơn đáng kể so với các mô hình phức tạp. Mô hình do nhóm tác giả đề xuất có thể sử dụng để khảo sát nhanh dao động của xe xích tốc độ cao, xe xích... để tìm giải pháp cách ly dao động, giảm thiểu ảnh hưởng của dao động, đặc biệt là các xung, va đập trong quá trình chuyển động qua địa hình khắc nghiệt...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Văn Luận, Lê Trung Dũng, Nguyễn Văn Tần (1990), "Lý thuyết xe xích", Sách dịch, Học viện Kỹ thuật quân sự.
2. Võ Văn Trung (2004), "Hướng dẫn đồ án môn học Kết cấu và tính toán xe tăng. Tập IV. Hệ thống treo", Giáo trình, HVKTQS, tr26-27.
3. Ilango M., Chandramouli P. (2017), *Planar Multi-body Dynamics of a Tracked Vehicle using Imaginary Wheel Model for Tracks*, *Defence Science Journal*, Vol. 67, No. 4.
4. Choi, J.H; Lee, H.C & Shabana, A.A. *Spatial dynamics of multibody tracked vehicles part I: Spatial equations of motion*. *Vehicle System Dynamics*, 1998
5. Rubinstein, D. & Hitron, R. *A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles*. *Journal Terramechanics*, 2004.
6. Nakanishi, T. & Shabana, A.A. *On the numerical solution of tracked vehicle dynamic equations*. *Nonlinear Dynamics*, 1994.
7. Wong, J.Y.; Gaber, M, & Preston-Thomas, J. *Theoretical prediction and experimental substantiation of the ground pressure distribution and tractive performance of tracked vehicles*. *Proceedings Institution Mechanical Engineers, Pt D: J. Automobile Eng.*, 1984.
8. Baumgarte, J. *Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems*. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1972.