

# PHÂN TÍCH TRẠNG THÁI MẤT ỔN ĐỊNH NGANG CỦA ĐOÀN XE SƠ MI RƠ MOỐC BẰNG MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC KHÔNG GIAN VỚI MÔ HÌNH LỚP BURCHKHARDT

## LATERAL INSTABILITY ANALYSIS OF TRACTOR SEMITRAILER VEHICLE ADOPTING MULTI-BODY DYNAMIC MODEL WITH THE BURCHKHARDT TIRE MODEL

TẠ TUẤN HÙNG<sup>1\*</sup>, NGUYỄN QUANG ANH<sup>1</sup>, VÕ VĂN HƯỜNG<sup>1</sup>  
 DƯƠNG NGỌC KHÁNH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

<sup>2</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email liên hệ: hungtt@utt.edu.vn

### Tóm tắt

Mất ổn định ngang của đoàn xe sơ mi rơmoóc thường xảy ra khi quay vòng, tăng tốc hoặc phanh,... Mất ổn định ngang của đoàn xe có thể được phân loại theo 2 dạng: mất ổn định hướng và mất ổn định lật ngang. Sự mất ổn định hướng thường xảy ra khi phanh hoặc quay vòng trên đường có hệ số bám thấp. Mất ổn định lật ngang thường xảy ra khi quay vòng trên đường có hệ số bám cao. Một mô hình động lực học đoàn xe được thiết lập theo phương pháp hệ nhiều vật với mô hình lớp Burchkhardt. Mô hình được áp dụng để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện đường đến mất ổn định ngang của đoàn xe khi quay vòng.

**Từ khóa:** Mô hình lớp Burchkhardt, trạng thái đường, mất ổn định ngang, đoàn xe sơ mi rơmoóc, quay vòng.

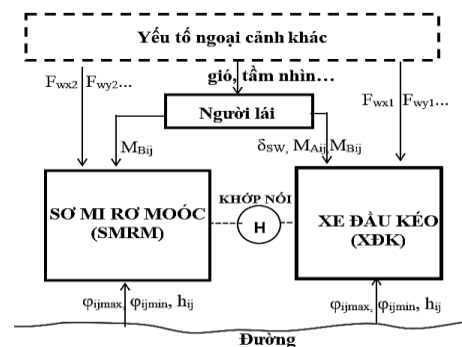
### Abstract

Lateral instability of tractor semitrailer vehicle often occurs in during turning maneuver, accelerating, or braking,... Lateral instability can be classified into two types: yaw instability and rollover. The yaw instability usually occurs on low adhesion surface road. The rollover occurs while turning maneuver on high adhesion surface road. In this paper, a dynamic model of tractor semitrailer vehicle is established based on Multi-body System Method and Burchkhardt tire model. This model is applied to analysis the effect of road condition on lateral stability of the tractor semitrailer vehicle while turning maneuver.

**Keywords:** Burchkhardt tire model, road condition, Lateral instability, tractor semitrailer vehicle, turning maneuver.

### 1. Đặt vấn đề

Khi chuyển động, đoàn xe chịu các tác động từ người lái, đường, ngoại cảnh (Hình 1). Tai nạn giao thông xảy ra đối với đoàn xe do nhiều nguyên nhân, trong đó nguyên nhân chủ yếu là do xe mất ổn định chuyển động trên đường. Sự mất ổn định phụ thuộc cấu trúc đoàn xe như trọng lượng, chiều cao trọng tâm, khớp liên kết giữa các thân xe, đặc tính lốp; hệ số bám đường; độ nghiêng và độ dốc của đường; phản ứng lái xe khi phanh, ga và quay vô lăng. Nếu đường có hệ số bám thấp, dù gia tốc ngang không lớn, nó sẽ trượt ngang và vấp phải vỉa đường, đoàn xe có thể lật. Nếu đường có hệ số bám cao, đoàn xe có thể vận hành với vận tốc lớn, khi quay vòng sẽ có gia tốc ngang lớn và do khả năng bám ngang tốt nên xe có thể bị lật ngang.



Hình 1. Sơ đồ điều khiển động lực học đoàn xe sơ mi rơmoóc

Để nghiên cứu đánh giá ổn định ngang của đoàn xe sơ mi rơmoóc cần thiết phải thiết lập được tương tác lốp đường thông qua mô hình lớp. Khi xác định được tương tác này thì có thể xác định được các lực và mô men liên kết từ đường tác động lên xe. Từ đó mới có thể xác định được các thông số chuyển động của xe. Hiện nay, có nhiều mô hình lớp được sử dụng như Ammon [2], Pacejka [3], HSRI, Burchkhardt [4],... Trong đó, mô hình lớp Burchkhardt có nhiều ưu

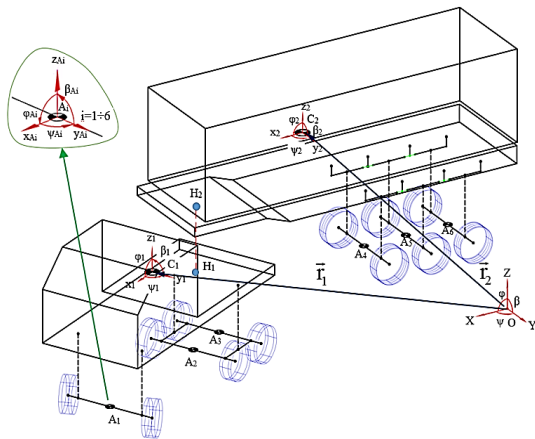
điểm về cách thức mô phỏng và các hệ số thực nghiệm.

Bài báo trình bày nghiên cứu áp dụng mô hình lớp Burchkhardt phân tích đánh giá động lực học chuyển động của đoàn xe somi rơ moóc. Một mô hình động lực học không gian của đoàn xe somi rơ moóc với lực tương tác lớp đường được xác định từ mô hình lớp Burchkhardt được trình bày. Kết quả của nghiên cứu có thể làm cơ sở để nghiên cứu đánh giá động lực học chuyển động đoàn xe. Từ đó, có thể đề xuất các giải pháp điều khiển nhằm tăng tính ổn định chuyển động của đoàn xe.

**2. Mô hình động lực học không gian đoàn xe somi rơ moóc**

**2.1. Phương trình vi phân mô tả chuyển động**

Đoàn xe somi rơ moóc với kết cấu hai thân trong đó có một phần tải trọng của sơ mi rơ moóc đặt lên xe đầu kéo qua khớp nối dạng chốt kéo-mâm xoay. Xe đầu kéo có 3 cầu trong đó cầu trước bị động dẫn hướng, hai cầu sau chủ động với hệ thống treo cân bằng. Sơ mi rơ moóc có 3 cầu dạng treo cân bằng liên tiếp. Để mô tả chuyển động của các phần được treo  $C_k$  ( $k=1$ : phần được treo xe đầu kéo;  $k=2$ : phần được treo SMRM) đối với hệ quy chiếu cố định OXYZ gắn các hệ quy chiếu cục bộ  $C_{kx_k y_k z_k}$  vào trọng tâm của vật rắn  $k$  (xem Hình 2).



Hình 2. Hệ quy chiếu đoàn xe somi rơ moóc 6 cầu

Trong hệ quy chiếu đặt tại  $C_k$  gọi  $v_k = [v_{xk}, v_{yk}, v_{zk}, \omega_{xk}, \omega_{yk}, \omega_{zk}]^T$  là véc tơ vận tốc tức thời của khối lượng được treo đối với các hệ quy chiếu tương ứng. Hệ 6 phương trình Newton-Euler [5, 6] cho các khối lượng được treo thứ  $k$  với

tâm quay đặt tại trọng tâm  $C_k$  được viết như sau:

$$\begin{cases} m_k (\dot{v}_{xk} - v_{yk} \omega_{zk} + v_{zk} \omega_{yk}) = F_{xk} \\ m_k (\dot{v}_{yk} - v_{zk} \omega_{xk} + v_{xk} \omega_{zk}) = F_{yk} \\ m_k (\dot{v}_{zk} - v_{xk} \omega_{yk} + v_{yk} \omega_{xk}) = F_{zk} \\ I_{xk} \dot{\omega}_{xk} + (I_{zk} - I_{yk}) \omega_{zk} \omega_{yk} = M_{xk} \\ I_{yk} \dot{\omega}_{yk} + (I_{xk} - I_{zk}) \omega_{xk} \omega_{zk} = M_{yk} \\ I_{zk} \dot{\omega}_{zk} + (I_{yk} - I_{xk}) \omega_{yk} \omega_{xk} = M_{zk} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:  $I_{xk}, I_{yk}, I_{zk}$  là mô men quán tính của các khối lượng được treo thứ  $k$ ;  $F_{xk}, F_{yk}, F_{zk}, M_{xk}, M_{yk}, M_{zk}$  là tổng các ngoại lực và mô men ngoại lực tác dụng lên khối lượng được treo  $k$ .

Mỗi cầu xe được xác định bởi dao động thẳng đứng ( $v_{zAi}$ ) và lắc dọc cầu xe ( $\omega_{xAi}$ ) được viết như sau:

$$\begin{cases} m_{Ai} (\dot{v}_{zAi} - v_{xAi} \omega_{yAi} + v_{yAi} \omega_{xAi}) = F_{zAi} \\ I_{xAi} \dot{\omega}_{xAi} + (I_{zAi} - I_{yAi}) \omega_{zAi} \omega_{yAi} = M_{xAi} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:  $m_{Ai}$  và  $I_{xAi}, I_{yAi}, I_{zAi}$  là khối lượng và mô men quán tính của cầu thứ  $i$ ;  $F_{zAi}, M_{xAi}$  là tổng các ngoại lực và mô men ngoại lực theo phương  $A_i z_{Ai}$  của cầu thứ  $i$ .

Để giải các hệ phương trình vi phân (1) và (2) cần xác định tất cả các thành phần ngoại lực và mô men ngoại lực của vé phải. Các lực liên kết tại khớp nối được xác định từ điều kiện khớp nối lý tưởng có xét đến ảnh hưởng của góc lắc ngang tương đối [7]. Các lực và mô men của hệ thống treo nhíp và treo cân bằng được tính từ biến dạng thẳng đứng và góc tại các điểm treo tương ứng [4, 8],...

**2.2. Mô hình lớp Burchkhardt**

Nghiên cứu động lực học ô tô cần thiết phải xây dựng được tính chất liên kết giữa lớp và đường bởi các liên kết này là thành phần trực tiếp gây ra chuyển động của ô tô. Liên kết bánh xe - mặt đường là liên kết phức tạp gồm 3 thành phần lực  $F_{xij}, F_{yij}, F_{zij}$  (bỏ qua các thành phần mô men). Đây là các lực thay đổi liên tục theo thời gian, phụ thuộc cấu trúc lớp, độ mập mô té vi của đường và các yếu tố điều khiển của người lái. Mô hình lớp thường được sử dụng để xác định lực liên kết lớp đường khi xây dựng mô hình động lực học ô tô. Một trong những mô hình lớp dễ sử dụng và cho kết quả gần với thực tế là mô hình của Burchkhardt [4, 9]. Theo mô hình này, hệ số bám được xác định theo công thức. Các hệ số  $C_i$  được xác định bằng thực nghiệm cho các loại đường khác nhau theo bên dưới. Khi bánh xe chịu lực tổng hợp, có thể xác định  $F_{xij}, F_{yij}$  như sau:

$$\begin{cases} F_{xij} = \frac{s_{xij}}{\sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}} (C_1 (1 - e^{-C_2 \sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}}) - C_3 \sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}) F_{zij} \\ F_{yij} = \frac{s_{yij}}{\sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}} (C_1 (1 - e^{-C_2 \sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}}) - C_3 \sqrt{s_{xij}^2 + s_{yij}^2}) F_{zij} \end{cases} \quad (3)$$

Đầu vào của mô hình lớp dạng này là các hệ số trượt dọc  $s_{xij}$  và góc trượt ngang  $s_{yij}$  được xác định từ vận tốc dọc  $v_{xij}$ , vận tốc ngang  $v_{yij}$  và góc quay bánh xe dẫn hướng  $\delta_{ij}$ .

Khi biết vận tốc dọc và vận tốc góc của các bánh xe có thể xác định được các hệ số trượt dọc  $s_{ij}$  như sau:

$$s_{ij} = \begin{cases} -\frac{v_{xij} - r_{dij} \omega_{Bij}}{v_{xij}} & \text{khi } -1 \leq s_{ij} \leq 0 \\ \frac{r_{dij} \omega_{Bij} - v_{xij}}{r_{dij} \omega_{Bij}} & \text{khi } 0 < s_{ij} < 1 \end{cases} \quad (4)$$

Các góc lệch bên các bánh xe dẫn hướng (cầu 1) được viết như sau:

$$\alpha_{1j} = \delta_{1j} - \text{atan} \left( \frac{v_{y1j}}{v_{x1j}} \right) \quad (5)$$

Các góc lệch bên của các bánh xe ở các cầu 2 đến cầu 6 được viết như sau:

$$\alpha_{ij} = -\text{atan} \left( \frac{v_{yij}}{v_{xij}} \right) \quad (6)$$

Trong đó: Các vận tốc dọc  $v_{ij}$  được tính từ các hệ phương trình (2) với vận tốc ban đầu  $v_{ij0}$  cho trước. Các vận tốc góc quay bánh xe  $\omega_{Bij}$  được xác định từ mô hình bánh xe đàn hồi. Đối với các góc quay bánh xe dẫn hướng bên trái  $\delta_{11}$  được tính gián tiếp từ góc quay vô lăng thông qua tỷ số truyền của hệ thống lái  $i_s$ .

$$\delta_{11} = \frac{\delta_{sw}}{i_s} \quad (7)$$

Đối với đoàn xe somi rơ moóc nghiên cứu,  $i_s=25$ . Quy luật góc quay bánh xe dẫn hướng bên phải ( $\delta_{12}$ ) được tính từ quan hệ Ackermann [10] với khoảng cách hai trụ lái là  $w=2,05$  (m) và chiều dài cơ sở xe đầu kéo đến tâm cầu cân bằng là  $L=3,91$ m [11, 12] theo công thức sau:

$$\cot \delta_{12} - \cot \delta_{11} = \frac{w}{L} \quad (8)$$

### 2.3. Một số chỉ tiêu đánh giá

Hệ số phân bố tải trọng LTR (Load Transfer Ratio) [11, 12] cho đoàn xe somi rơ moóc 6 cầu xe được viết như sau:

$$LTR = \frac{\left| \sum_{i=1}^6 (F_{zi2} - F_{zi1}) \right|}{\sum_{i=1}^6 (F_{zi2} + F_{zi1})} \quad (9)$$

Trong đó  $F_{zij}$  ( $i=1 \div 6$ ;  $j=1$ : bên trái,  $j=2$ : bên phải) là tải trọng tại từng bánh xe, bằng 0 khi tách bánh xe.

Góc lắc ngang  $\beta_k$  khối lượng được treo thứ  $k$  [5]:

$$\beta_k = \int \frac{1}{\cos \varphi_k} (\omega_{xk} \cos \varphi_k + \omega_{yk} \sin \varphi_k \sin \varphi_k + \omega_{zk} \sin \varphi_k \cos \varphi_k) dt \quad (10)$$

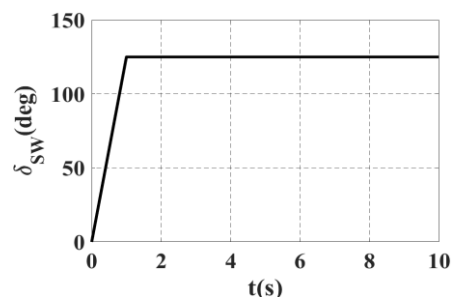
### 3. Kết quả khảo sát và đánh giá

Mô phỏng hệ phương trình vi phân (1), (2),... và các phương trình xác định lực, mô men liên kết của hệ thống treo và các thành phần lực tương tác lớp đường và các ngoại lực tác dụng khác bằng phần mềm máy tính với các thông số của đoàn xe somi rơ moóc 6 cầu [12].

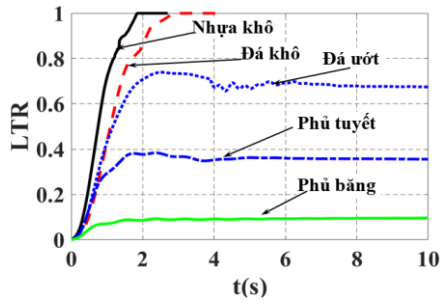
Bảng 1. Hệ số thực nghiệm của mô hình Burchkhardt

TT	Loại đường	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
1	Đường nhựa khô	1,281	23,99	0,52
2	Đường đá khô	1,3713	6,4565	0,6691
3	Đường đá ướt	0,4004	33,7080	0,1204
4	Đường phủ tuyết	0,1946	94,129	0,0646
5	Đường phủ băng	0,05	306,39	0

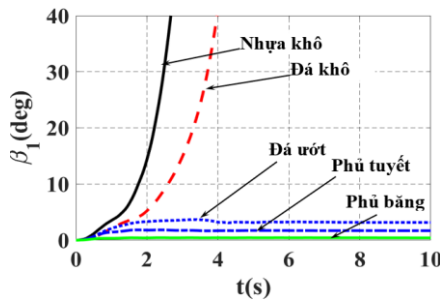
Khảo sát với một quy luật góc quay vô lăng như Hình 3 với mức vận tốc 60km/h trên 5 loại đường mô phỏng bằng mô hình lớp Burchkhardt [9] với các hệ số thực nghiệm theo Bảng 1. Một số kết quả cho thấy sự ảnh hưởng rõ nét của điều kiện đường đến khả năng mất ổn định ngang của đoàn xe somi rơ moóc. Khi xe chuyển động trên đường tốt (có hệ số bám cao như đường Nhựa khô, Đá khô) thì xe bị lật ngang. Sự lật ngang xảy ra nhanh. Điều đó thể hiện qua đồ thị hệ số phân bố tải trọng LTR.



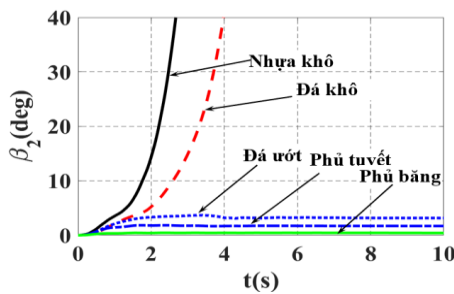
Hình 3. Đồ thị góc quay vô lăng



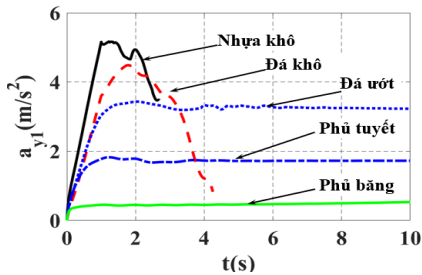
Hình 4. Đồ thị LTR



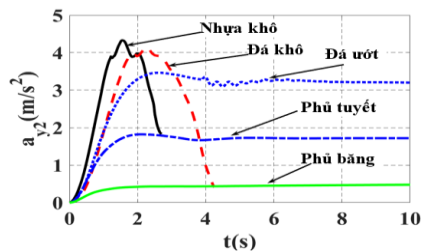
Hình 5. Đồ thị góc lắc ngang  $\beta_1$



Hình 6. Đồ thị góc lắc ngang  $\beta_2$



Hình 7. Đồ thị gia tốc ngang  $a_{y1}$



Hình 8. Đồ thị gia tốc ngang  $a_{y2}$

Hai trường hợp khảo sát này cho thấy LTR tiến đến 1 rất nhanh. Trong đó đường nhựa khô có hệ số bám cao hơn nên LTR tiến đến 1 nhanh hơn (Hình 4). Tương ứng là sự gia tăng nhanh của góc lắc ngang của các khối lượng được treo. Từ khi bắt đầu đánh lái đến khi góc lắc ngang khối lượng được treo xe đầu kéo đạt 40 deg ở đường Nhựa khô và đá khô lần lượt là 2,6s và 4s (Hình 5). Đối với các loại đường có hệ số bám thấp như phù tuyết và phù băng, xe không bị lật ngang, nhưng ta nhận thấy các giá trị đánh giá ổn định của xe điều ở mức thấp. Ví dụ, gia tốc ngang của khối lượng được treo  $a_{y1}$  chỉ đạt dưới  $2m/s^2$  và  $0,5m/s^2$  đối với đường phù tuyết và phù băng. Trong khi với điều kiện đường tốt thì giá trị này cao hơn rất nhiều. Điều đó cho thấy khả năng đoàn xe không đáp ứng được khả năng quay vòng theo mong muốn của người lái. Điều đó có thể dẫn đến sự mất ổn định hướng như trượt ngang, mất ổn định quỹ đạo chuyển động, gập thân xe. Vấn đề này sẽ được nghiên cứu chuyên sâu trong các nghiên cứu tiếp theo.

**4. Kết luận**

Sự mất ổn định ngang của đoàn xe sơm rơ moóc có hai dạng là mất ổn định hướng và mất ổn định lật ngang. Bài báo đã trình bày mô hình động lực học của đoàn xe sơm rơ moóc trong đó các lực tương tác lớp đường được xác định bằng mô hình lớp Burchkhardt. Bài báo đã phân tích đánh giá trạng thái mất ổn định lật ngang của đoàn xe sơm rơ moóc ở khi quay vòng ở mức vận tốc 60km/h trên 5 loại đường khác nhau. Các kết quả cho thấy, với các loại đường nhựa khô và đá khô thì xe bị lật ngang. Với các loại đường có hệ số bám thấp xe không bị lật ngang nhưng dễ bị mất ổn định hướng. Với phương pháp nghiên cứu này có thể nghiên cứu đánh giá xác định các trạng thái mất ổn định hướng trên các loại đường có hệ số bám thấp. Từ đó có các đề xuất về hệ thống điều khiển ổn định đoàn xe.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] Dahlberg. E and Stensson. A, *The dynamic rollover threshold a heavy truck sensitivity study*, Int. J. Vehicle Design, Vol. 40, Nos. 1/2/3, 2006.  
 [2] Ammon. D, *Modellbildung und Systementwicklung in der Fahrzeugtechnik*, BG Teubner, 1997.  
 [3] Pacejka. H. B, *Tyre and Vehicle Dynamics Third editon*, Butterworth-Heinemann Publisher, 2005  
 [4] Võ Văn Hường, Nguyễn Tiến Dũng, Dương Ngọc Khánh, Đàm Hoàng Phúc, *Động lực học ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, Hà Nội, 2014.

- [5] Dieter Schramm, Manfred Hiller, Roberto Bardini, *Vehicle Dynamics Modeling and Simulation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2014.
- [6] Blundell. M and Harty. D, *Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*, Elsevier's Science and Technology Right Department, Oxford, UK, 2004.
- [7] Liu. P, *Analysis, Detection and Early Warning Control of Dynamic Rollover of Heavy Freight Vehicles*, Concordia University, Canada, 1999.
- [8] Vũ Đức Lập, *Dao động ô tô*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 1994.
- [9] Nguyễn Trọng Hoan, Nguyễn Khắc Tuấn, *Hệ thống truyền lực ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, Hà Nội, 2018.
- [10] Jazar R. N. (2005) *Vehicle Dynamics Theory and Application*, Springer New York, USA.
- [11] Dương Ngọc Khánh, Tạ Tuấn Hưng và Võ Văn Hùng, *Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều cao trọng tâm đến trạng thái mất ổn định lật ngang của đoàn xe sơ mi rơ moóc khi quay vòng*, Tuyển tập Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Hà Nội, 8-9/12/2017, Hà Nội, 2017.
- [12] TA Tuan Hung, DUONG Ngoc Khanh, VO Van Huong, *A study on lateral instability of tractor semitrailer turning maneuvers on roads with high adhesion coefficient*, The First International Conference on Fluid Machinery and Automation Systems ICFMAS2018, 2018.

Ngày nhận bài:	30/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	06/8/2021
Ngày duyệt đăng:	16/8/2021