

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA VẬN TỐC VÀ LOẠI ĐƯỜNG ĐẾN ĐỘ ÊM DỊU XE KHÁCH 16 CHỖ SỬ DỤNG HỆ THỐNG TREO CƠ KHÍ

## RESEARCH ON THE EFFECT OF SPEED AND ROAD TYPE ON THE RIDE SMOOTHNESS OF 16-SEAT PASSENGER BUS USING MECHANICAL SUSPENSION SYSTEM

Nguyễn Thanh Đông<sup>1,a</sup>, Cao Hùng Phi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>a</sup>Tác giả liên hệ: dongnt@vlute.edu.vn

Nhận bài (Received): 15/10/2023; Phản biện (Reviewed): 23/10/2024; Chấp nhận (Accepted): 11/11/2024

### TÓM TẮT

Dao động của ô tô nói chung và xe khách 16 chỗ nói riêng bị ảnh hưởng bởi các điều kiện vận hành như vận tốc và loại đường. Trong quá trình chuyển động, mặt đường sẽ tạo ra dao động tác động đến xe và hành khách. Gia tốc bình phương trung bình ( $a_{rms}$ ) được sử dụng làm tiêu chí để đánh giá độ êm dịu khi xét đến ảnh hưởng của dao động đến hành khách. Để có cơ sở đánh giá độ êm dịu và xác định vận tốc giới hạn trên các loại đường, bài báo đã xây dựng và khảo sát mô hình động lực học không gian xe khách 16 chỗ sử dụng hệ thống treo cơ khí. Kết quả nghiên cứu cho thấy, cảm giác thoải mái chỉ đạt được trong điều kiện vận hành trên đường loại B với vận tốc không quá 66km/h hoặc trên đường loại C với vận tốc không quá 16,7km/h; với vận tốc lớn hơn 47,3km/h trên đường loại E sẽ gây ra cảm giác cực kỳ khó chịu; trên đường loại D và những trường hợp còn lại gây ra cảm giác khác nhau từ hơi khó chịu đến rất khó chịu.

**Từ khóa:** xe khách 16 chỗ, độ êm dịu, vận tốc giới hạn, hệ thống treo.

### ABSTRACT

The vibration of cars in general and 16-seat passenger bus in particular is affected by operating conditions such as velocity and road type. During the motion, the road surface will create vibrations that affect the car and passengers. The mean square acceleration ( $a_{rms}$ ) is used as a criterion to evaluate the smoothness when considering the impact of vibrations on passengers. In order to have a basis for evaluating the smoothness and determining the limit velocity on different types of roads, the article has built and surveyed the spatial dynamics model of 16-seat passenger bus using a mechanical suspension system. The research results show that the feeling of comfort is only achieved under operating conditions on type B roads with the velocity of no more than 66km/h or on type C roads with the velocity of no more than 16,7km/h; with the velocity greater than 47,3km/h on type E roads will cause an extremely uncomfortable feeling; on type D roads and the remaining cases cause different feelings from slightly uncomfortable to very uncomfortable.

**Keywords:** 16-seat passenger bus, smoothness, limit velocity, suspension.

### 1. GIỚI THIỆU

Hệ thống treo là phân tử liên kết giữa thân xe và trục xe, có ảnh hưởng trực tiếp đến độ êm dịu và an toàn chuyển động, đặc biệt là khi ô tô di chuyển trên loại đường có chất lượng mặt đường xấu. Với mỗi kích động của mặt đường thông qua hệ thống treo sẽ tác động đến xe và người ngồi trong xe. Mặt khác, tải trọng tĩnh của xe và tải trọng động sinh ra trong quá trình dao động sẽ tác động xuống mặt đường dưới ảnh hưởng của hệ thống treo [1]. Hệ thống treo không tốt sẽ gây ra lực động tác động xuống nền đường gây phá hủy mặt đường, đồng thời phản lực bánh xe từ đường tác động trở lại xe ảnh hưởng đến độ êm dịu, tuổi thọ các chi tiết của xe và gây ra hiện tượng tách bánh. Do đó khi nghiên cứu về hệ thống treo cần phân tích cả hai yếu tố: tác động đến xe – người và tác động đến đường, tức là cần đặt trong mối quan hệ “đường – xe – người” [2].

Hệ thống treo thông thường sẽ bao gồm phần tử đàn hồi (lò xo, nhíp, khí nén, thanh xoắn), phần tử giảm chấn (giảm chấn thủy lực) và phần tử dẫn hướng [3, 4]. Nhiệm vụ của hệ thống treo là dập tắt dao động khi xe gặp kích động từ mặt đường (tạo ra dao động tắt dần), làm êm dịu chuyển động. Đồng thời dao động của ô tô cũng sẽ sinh ra tải trọng động tác động đến đường, là nguyên nhân gây ra hư hỏng đường [5].

Trên các xe khách hiện đại thường sử dụng hệ thống treo có phần tử đàn hồi thay đổi được độ cứng (sử dụng phần tử đàn hồi khí nén). Đối với xe khách 16 chỗ, phần tử đàn hồi được sử dụng vẫn là phần tử kim loại với tính êm dịu chưa cao, thường xuyên gây cảm giác mệt mỏi cho hành khách và tài xế. Cảm giác thoải mái hay khó chịu của người ngồi trong xe được đánh giá bởi các thông số đặc trưng của dao động như gia tốc dao động, thời gian tác động. Xe khách là phương tiện có yêu cầu cao về an toàn và phải đảm bảo tính tiện nghi, trong đó độ êm dịu là yếu tố quan trọng [6]. Độ êm dịu bị ảnh hưởng bởi yếu tố kết cấu của hệ thống treo, lớp xe; yếu tố cấu trúc xe (khoảng cách trục, vị trí trọng tâm xe,...) và điều kiện vận hành như: vận tốc xe, loại đường [7].

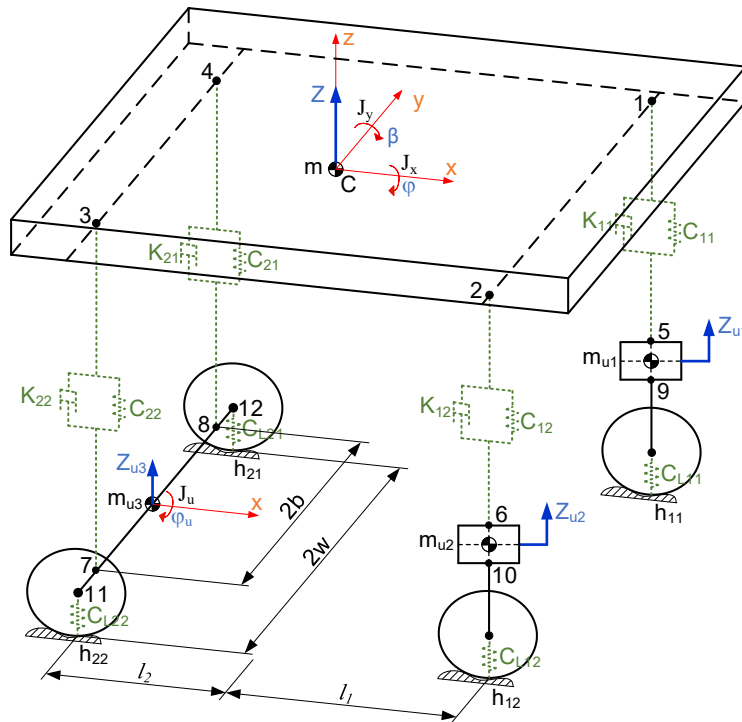
Có nhiều tiêu chí để đánh giá độ êm dịu có thể kể đến như: Tần số dao động riêng, gia tốc dao động, hệ số êm dịu, lượng dao động tới hạn,... Tần số dao động riêng chỉ phụ thuộc vào các thông số kết cấu; các tiêu chí còn lại ngoài phụ thuộc kết cấu còn phụ thuộc điều kiện vận hành như vận tốc xe, loại đường. Hiện nay, độ êm dịu là tiêu chí được quy định trong các tiêu chuẩn quốc tế như ISO 2631-1 [8], BS 6841 [9].

Để có cơ sở xác định vận tốc giới hạn theo tiêu chí độ êm dịu, mô hình không gian 7 bậc tự do được xây dựng để khảo sát, với kích động mặt đường dạng ngẫu nhiên theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016 [10]. Trong nghiên cứu này, mô hình được mô phỏng bằng công cụ Simulink của Matlab.

## 2. NỘI DUNG

### 2.1. Mô hình động lực học xe khách 16 chỗ

Mô hình động lực học không gian của xe khách 16 chỗ dùng để khảo sát độ êm dịu chuyển động có cấu trúc như Hình 1.



Hình 1. Mô hình động lực học xe khách 16 chỗ

Trong Hình 1,  $m$  - Khối lượng được treo (kg);  $m_{u1}, m_{u2}, m_{u3}$  - Khối lượng không được treo cầu trước trái, trước phải, cầu sau (kg);  $Z$  - Chuyển vị của khối lượng được treo theo phương  $z$  (m);  $Z_{u1}, Z_{u2}, Z_{u3}$  - Chuyển vị của khối lượng không được treo cầu trước trái, trước phải, cầu sau theo phương  $z$  (m);  $J_x, J_y$  - Mômen quán tính của khối lượng được treo quanh trục  $x$ , trục  $y$  ( $\text{kg.m}^2$ );  $J_u$  - Mômen quán tính của khối lượng không được treo cầu sau quanh trục  $x$  ( $\text{kg.m}^2$ );  $\varphi, \beta$  - Góc quay của khối lượng được treo quanh trục  $x$ , trục  $y$  (rad);  $\varphi_u$  - Góc quay của khối lượng không được treo cầu sau quanh trục  $x$  (rad);  $C_{ij}$  - Độ cứng phần tử đàn hồi của hệ thống treo (N/m);  $K_{ij}$  - Hệ số cản giảm chấn của hệ thống treo (Ns/m);  $C_{Lij}$  - Độ cứng phần tử đàn hồi hướng kính lốp xe (N/m);  $w$  - Khoảng cách từ tâm xe đến bánh xe trái hoặc phải (m);  $b$  - Khoảng cách từ tâm xe đến điểm liên kết hệ thống treo trái hoặc phải (m);  $l_1, l_2$  - Khoảng cách từ tâm xe đến tâm cầu trước, cầu sau (m);  $h_{ij}$  - Chiều cao mâm mô mặt đường (m);  $1, 2, 3, 4$  - Điểm liên kết của khối lượng được treo với hệ thống treo;  $5, 6, 7, 8$  - Điểm liên kết của khối lượng không được treo với hệ thống treo;  $9, 10, 11, 12$  - Điểm liên kết của khối lượng không được treo với lốp xe;  $i = 1$  cầu trước,  $i = 2$  cầu sau;  $j = 1$  bên trái,  $j = 2$  bên phải.

Mô hình được xây dựng dựa trên phương pháp tách cấu trúc hệ nhiều vật và sử dụng phương trình Newton-Euler để mô tả động lực học ô tô [2]. Với giả thiết khi xây dựng mô hình là trên xe chở đầy khách, coi mâm mô mặt đường là nguồn kích thích dao động duy nhất; bỏ qua hệ số cản giảm chấn của lốp. Mô hình gồm 7 bậc tự do:

- Ba bậc tự do mô tả chuyển động của khối lượng được treo ( $Z, \varphi, \beta$ ).
- Hai bậc tự do mô tả khối lượng không được treo cầu trước ( $Z_{u1}, Z_{u2}$ ).
- Hai bậc tự do mô tả khối lượng không được treo cầu sau ( $Z_{u3}, \varphi_u$ ).

Hệ phương trình động lực học của xe khách 16 chỗ như sau:

$$m \cdot \ddot{Z} = F_{K11} + F_{K12} + F_{K21} + F_{K22} + F_{C11} + F_{C12} + F_{C21} + F_{C22} \quad (1)$$

$$J_x \cdot \ddot{\varphi} = (F_{K11} + F_{C11} - F_{K12} - F_{C12}) \cdot w + (F_{K21} + F_{C21} - F_{K22} - F_{C22}) \cdot b \quad (2)$$

$$J_y \cdot \ddot{\beta} = -(F_{K11} + F_{C11} + F_{K12} + F_{C12}) \cdot l_1 + (F_{K21} + F_{C21} + F_{K22} + F_{C22}) \cdot l_2 \quad (3)$$

$$m_{u1} \cdot \ddot{Z}_{u1} = -F_{K11} - F_{C11} + F_{CL11} \quad (4)$$

$$m_{u2} \cdot \ddot{Z}_{u2} = -F_{K12} - F_{C12} + F_{CL12} \quad (5)$$

$$m_{u3} \cdot \ddot{Z}_{u3} = -F_{K21} - F_{C21} - F_{K22} - F_{C22} + F_{CL21} + F_{CL22} \quad (6)$$

$$J_u \cdot \ddot{\varphi}_u = (-F_{K21} - F_{C21} + F_{K22} + F_{C22}) \cdot b + (F_{CL21} - F_{CL22}) \cdot w \quad (7)$$

Trong đó:  $F_{Cij}$  - Lực đàn hồi hệ thống treo (N);  $F_{Kij}$  - Lực cản giảm chấn hệ thống treo (N);  $F_{CLij}$  - Lực đàn hồi hướng kính lốp xe (N).

Các nội lực hệ thống treo  $F_{Cij}, F_{Kij}$  là lực gây chuyển động thẳng đứng, lắc dọc và lắc ngang thân xe. Trong nghiên cứu này, các lực đó là tuyến tính trong miền làm việc, được mô tả theo các hàm sau:

$$\text{- Lực đàn hồi của hệ thống treo: } F_{Cij} = C_{ij} (Z_{uij} - Z_{sij}) \quad (8)$$

$$\text{- Lực cản giảm chấn của hệ thống treo: } F_{Kij} = K_{ij} (\dot{Z}_{uij} - \dot{Z}_{sij}) \quad (9)$$

$$\text{- Lực đàn hồi hướng kính lốp xe: } F_{CLij} = C_{Lij} (h_{ij} - Z_{uij}) \quad (10)$$

Trong đó:  $Z_{sij}$  - Chuyển vị của khối lượng được treo (m),  $Z_{uij}$  - Chuyển vị của khối lượng không được treo (m).

Ứng với các điểm liên kết trên Hình 1, ta có các chuyển vị của các điểm này theo phương  $z$  như sau:

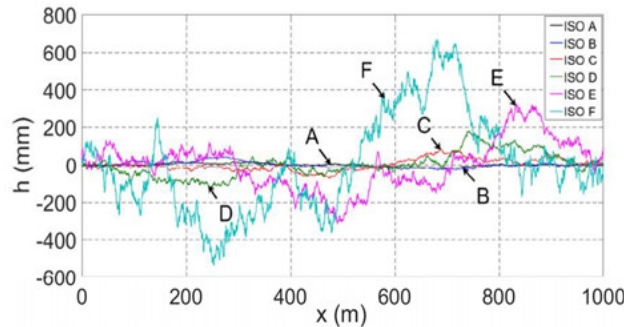
$$- \text{ Các điểm phía trên hệ thống treo: } \begin{cases} Z_1 = Z + \varphi.w - \beta.l_1 \\ Z_2 = Z - \varphi.w - \beta.l_1 \\ Z_3 = Z - \varphi.b + \beta.l_2 \\ Z_4 = Z + \varphi.b + \beta.l_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$- \text{ Các điểm phía dưới hệ thống treo: } \begin{cases} Z_7 = Z_{u3} - \varphi_u.b \\ Z_8 = Z_{u3} + \varphi_u.b \\ Z_{11} = Z_{u3} - \varphi_u.w \\ Z_{12} = Z_{u3} + \varphi_u.w \end{cases} \quad (12)$$

## 2.2. Hàm kích động

Kích động ngẫu nhiên của mặt đường được xây dựng theo tiêu chuẩn ISO 8608:2016 [10] và được mô tả như Hình 2 với các loại đường từ A đến F; chiều cao  $h(x)$  được xác định theo công thức sau:

$$h(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2.G_d(n_i).\Delta n} \cdot \cos(2\pi.i.\Delta n.x + \varphi_i) \quad (13)$$



Hình 2. Biên dạng đường ngẫu nhiên theo ISO 8608:2016

## 2.3. Các phương án khảo sát

Nghiên cứu này khảo sát với biên dạng đường ngẫu nhiên loại B, C, D, E; xe chuyển động đều với vận tốc thay đổi từ 10km/h đến 80km/h (ký hiệu là v10 đến v80) với bước nhảy 5km/h.

## 2.4. Tiêu chí đánh giá

Độ êm dịu chuyển động của xe phụ thuộc vào cấu trúc xe, hệ thống treo, lốp xe, mặt đường và kỹ thuật lái xe. Các tiêu chí đánh giá độ êm dịu chuyển động của xe gồm: tần số dao động, gia tốc dao động, gia tốc bình phương trung bình và hệ số êm dịu [11].

Tần số dao động riêng chỉ phụ thuộc vào thông số kết cấu hệ thống dao động; các tiêu chí còn lại ngoài phụ thuộc kết cấu còn phụ thuộc điều kiện vận hành như vận tốc xe, loại đường. Trong phạm vi nghiên cứu, bài báo chọn gia tốc bình phương trung bình ( $a_{rms}$ ) làm tiêu chí đánh giá độ êm dịu. Gia tốc bình phương trung bình ( $a_{rms}$ ) xác định theo công thức sau [8]:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (14)$$

Trong đó:  $a_w(t)$  - gia tốc thẳng đứng theo thời gian ( $m/s^2$ );  $T$  - thời gian khảo sát (s).

Các mức độ êm dịu sử dụng để đánh giá được cho trong Bảng 1 [8]:

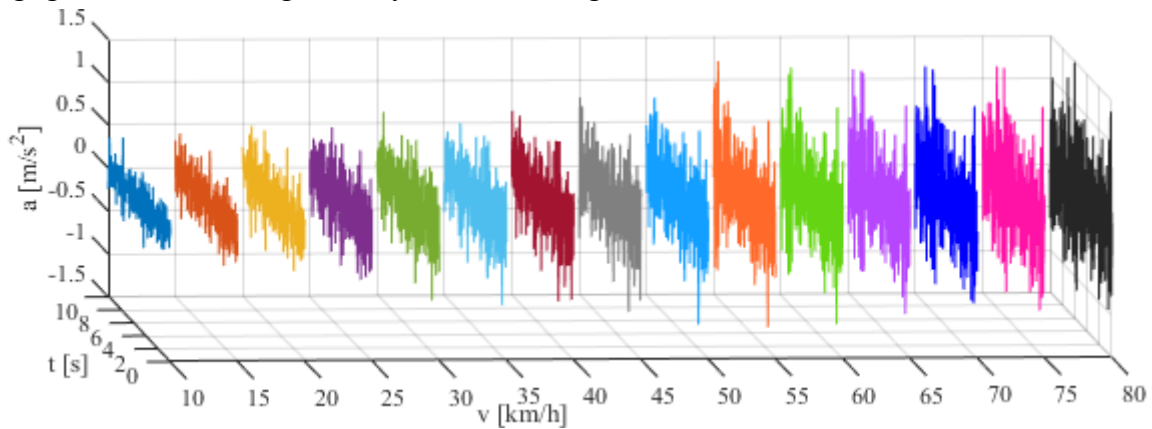
Bảng 1. Bảng đánh giá độ êm dịu

Giá trị $a_{rms}$ ( $m/s^2$ )	Mức độ êm dịu
< 0,315	Không khó chịu

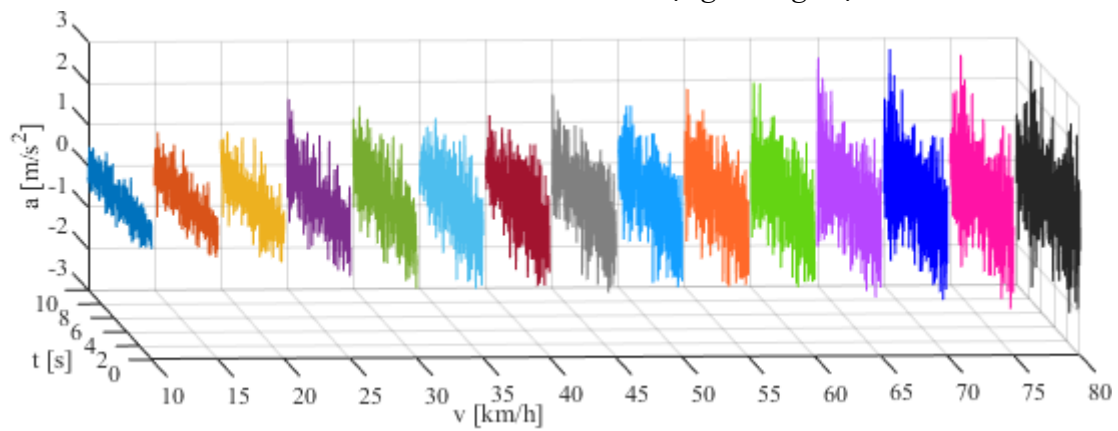
0,315 ÷ 0,63	Hơi khó chịu
0,5 ÷ 1,0	Khá khó chịu
0,8 ÷ 1,6	Khó chịu
1,25 ÷ 2,5	Rất khó chịu
> 2	Cực kỳ khó chịu

### 2.5. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

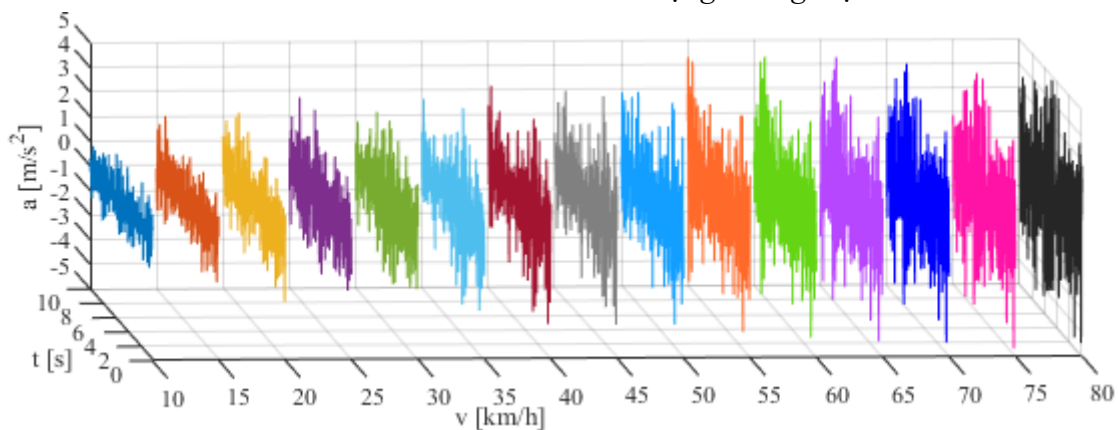
Hình 3 – Hình 6 biểu diễn gia tốc thân xe tại vị trí trọng tâm xe theo vận tốc lần lượt trên loại đường ngẫu nhiên từ B đến E. Kết quả khảo sát cho thấy, gia tốc thân xe tăng khi vận tốc tăng; gia tốc thân xe tăng khi thay đổi loại đường từ B đến E.



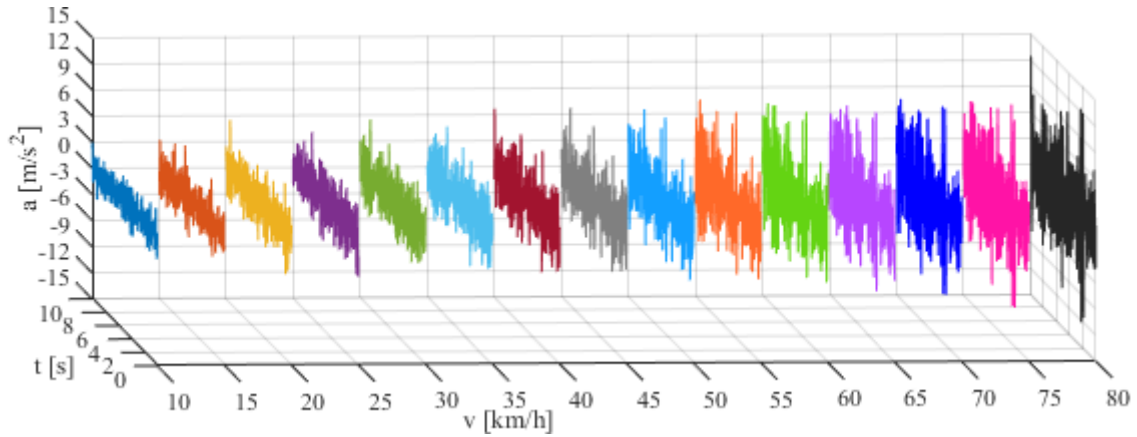
Hình 3. Gia tốc thân xe trên biên dạng đường loại B



Hình 4. Gia tốc thân xe trên biên dạng đường loại C

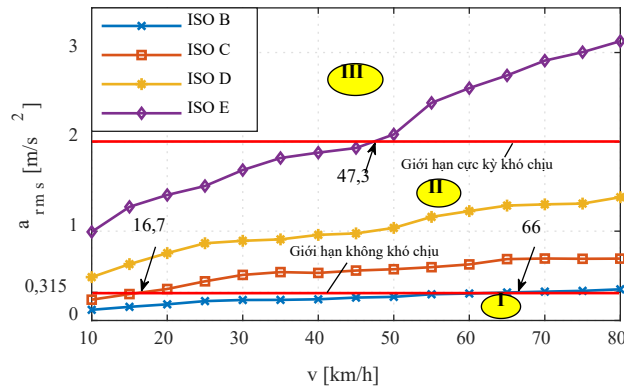


Hình 5. Gia tốc thân xe trên biên dạng đường loại D



Hình 6. Gia tốc thân xe trên biên dạng đường loại E

Hình 7 biểu diễn gia tốc  $a_{rms}$  tại vị trí trọng tâm xe theo vận tốc trên các loại đường ngẫu nhiên từ B đến E. Kết quả khảo sát cho thấy, gia tốc  $a_{rms}$  tăng khi vận tốc tăng; gia tốc  $a_{rms}$  tăng khi thay đổi loại đường từ B đến E. Dựa trên các giới hạn tại Bảng 1, có thể phân chia  $a_{rms}$  thành 3 vùng: Vùng I “Không khó chịu”, vùng III “Cực kỳ khó chịu”, vùng II có nhiều mức độ êm dịu từ “Hơi khó chịu” đến “Rất khó chịu”. Các vận tốc giới hạn của xe trên từng loại đường được xác định từ các đường giới hạn  $a_{rms,gh} = 0,315\text{m/s}^2$  và  $a_{rms,gh} = 2\text{m/s}^2$ . Cảm giác thoải mái (mức không khó chịu) chỉ đạt được trong điều kiện vận hành trên đường loại B với vận tốc không quá 66km/h hoặc trên đường loại C với vận tốc không quá 16,7km/h; với vận tốc lớn hơn 47,3km/h trên đường loại E sẽ gây ra cảm giác cực kỳ khó chịu; trên đường loại D và những trường hợp còn lại gây ra cảm giác khác nhau từ hơi khó chịu đến rất khó chịu.



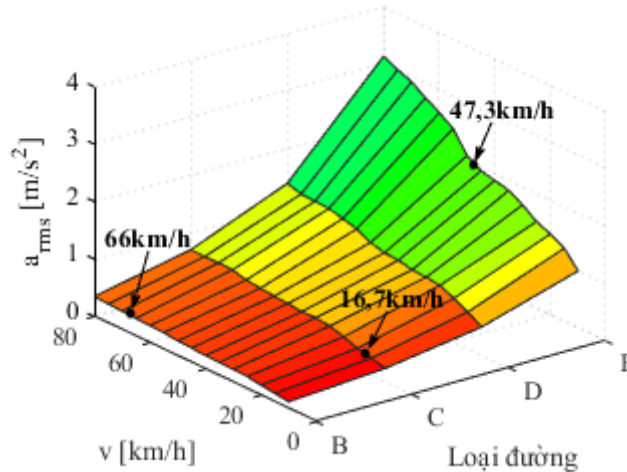
Hình 7. Gia tốc  $a_{rms}$  theo vận tốc xe

Hình 8 và Bảng 2 là giá trị gia tốc  $a_{rms}$  theo vận tốc xe từ 10km/h đến 80km/h và loại đường ngẫu nhiên từ B đến E.

Bảng 2. Giá trị  $a_{rms}$  theo vận tốc xe và loại đường

	B	C	D	E
v10	0,120	0,233	0,485	0,992
v15	0,153	0,296	0,631	1,272
v20	0,181	0,352	0,754	1,405
v25	0,217	0,439	0,865	1,505
v30	0,229	0,510	0,892	1,684
v35	0,231	0,542	0,908	1,819
v40	0,237	0,532	0,958	1,879
v45	0,256	0,559	0,975	1,931

v50	0,264	0,574	1,036	2,083
v55	0,294	0,597	1,160	2,437
v60	0,302	0,628	1,225	2,602
v65	0,313	0,687	1,286	2,744
v70	0,323	0,694	1,300	2,909
v75	0,332	0,691	1,309	3,004
v80	0,349	0,693	1,380	3,127



Hình 8. Gia tốc  $a_{rms}$  theo vận tốc xe và loại đường

Dựa trên các giới hạn tại Bảng 1 sẽ xác định các vùng giới hạn theo Bảng 3 [6].

Bảng 3. Vùng giới hạn  $a_{rms}$  theo tiêu chí độ êm dịu

	B	C	D	E
v10	Không khó chịu ( $\leq 0,315$ )	Hơi khó chịu ( $0,315-0,63$ )	Khó chịu ( $0,8-1,6$ )	Cực kỳ khó chịu ( $\geq 2$ )
v15				
v20				
v25				
v30				
v35		Khá khó chịu ( $0,5-1$ )	Rất khó chịu ( $1,25-2,5$ )	
v40				
v45				
v50				
v55				
v60	Cực kỳ khó chịu ( $\geq 2$ )			
v65				
v70				
v75	Cực kỳ khó chịu ( $\geq 2$ )			
v80				

Bảng 3a biểu diễn vùng giới hạn  $a_{rms}$  với các mức độ êm dịu gồm:

- Không khó chịu:  $a_{rms} < 0,315 \text{ m/s}^2$ ;
- Hơi khó chịu:  $a_{rms} = 0,315 \div 0,63 \text{ m/s}^2$ ;
- Khó chịu:  $a_{rms} = 0,8 \div 1,6 \text{ m/s}^2$ ;
- Cực kỳ khó chịu:  $a_{rms} > 2 \text{ m/s}^2$ .

Bảng 3b biểu diễn vùng giới hạn  $a_{rms}$  với các mức độ êm dịu gồm:

- Khá khó chịu:  $a_{rms} = 0,5 \div 1,0 \text{ m/s}^2$ ;
- Rất khó chịu:  $a_{rms} = 1,25 \div 2,5 \text{ m/s}^2$ .



Dựa vào kết quả nghiên cứu có thể khuyến cáo cho tài xế điều chỉnh vận tốc xe phù hợp với từng loại đường để có cảm giác êm dịu; hoặc làm cơ sở ban hành các quy định về giới hạn tốc độ cho xe khách 16 chỗ ứng với các loại đường khác nhau.

### 3. KẾT LUẬN

Kích động từ mặt đường sẽ sinh ra dao động của ô tô và dao động này ảnh hưởng đến đường, độ bền chi tiết của xe, đồng thời ảnh hưởng đến người ngồi trên xe, gây ra các cảm giác mệt mỏi. Đối với ô tô khách, việc xác định vận tốc giới hạn theo loại đường là cần thiết nhằm đảm bảo độ êm dịu.

Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng cảm giác thoải mái (mức không khó chịu) chỉ đạt được trong điều kiện vận hành với vận tốc không quá 66km/h trên đường loại B hoặc vận tốc không quá 16,7km/h trên đường loại C; với vận tốc lớn hơn 47,3km/h trên đường loại E sẽ gây ra cảm giác cực kỳ khó chịu; trên đường loại D và những trường hợp còn lại gây ra cảm giác khác nhau từ hơi khó chịu đến rất khó chịu.

Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở khoa học cho việc ban hành quy định về giới hạn tốc độ cho xe khách 16 chỗ với các loại đường khác nhau.

Các kết quả khảo sát này làm cơ sở hoàn thiện đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến độ êm dịu, bên cạnh yếu tố kết cấu còn có điều kiện vận hành.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đặng Việt Hà (2021), *Nghiên cứu đánh giá hệ thống treo thân thiện với đường*, Tạp chí Khoa học Công nghệ, số 04, tr.112-115.
- [2]. Võ Văn Hoàng (2014), *Động lực học ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, tr.19, tr.74-78.
- [3]. Nguyễn Khắc Trai (2020), *Kết cấu ô tô*, NXB Bách khoa Hà Nội, tr.260-284.
- [4]. Lưu Văn Tuấn (2019), *Lý thuyết ô tô*, NXB Giáo dục Việt Nam, tr.166.
- [5]. Muluka V. G., Rakehja S., Haseganu E. M (1996), *Reduction of Dynamic Pavement Loads of Heavy Vehicles Through Optimal Suspension Damping and Axle Vibration Absorber*, SAE, p.962148.
- [6]. Đặng Việt Hà (2021), *Nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc và loại đường tới độ êm dịu của ô tô khách trang bị hệ thống treo khí nén*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, số đặc biệt tháng 10, tr.347-351.
- [7]. Le Xuan Long, Le Van Quynh, Bui Van Cuong (2018), *Study on the influence of bus suspension parameters on ride comfort*, Journal of Vibroengineering (JVE), <https://doi.org/10.21595/vp.2018.20271>.
- [8]. ISO 2631-1 (1997), *Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part I: General requirements*.
- [9]. BS 6841:1987 (2001), *Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*.
- [10]. ISO 8608:2016 (2016), *Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*.
- [11]. Nguyen Thanh Tung, Luong Van Van (2023), *A study on the vibration of a bus with air suspension system moving on random road surface profiles with different speeds*, Engineering solid mechanics, <https://doi.org/10.5267/j.esm.2023.1.004>.