■Ngày nhận bài: 25/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/4/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/4/2026

Ứng dụng phần mềm Universal Mechanism (UM) trong mô phỏng động lực học toa xe

Application of Universal Mechanism (UM) software in railcar dynamic simulation

> TÀO VĂN CHIẾN
Trường Đại học Giao thông vận tải; Email: chientv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu và thiết kế phương tiện đường sắt, mô hình hóa và mô phỏng động lực học đầu máy, toa xe đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá độ ổn định, an toàn và chất lượng vận hành. Bài báo nghiên cứu ứng dụng phần mềm Universal Mechanism (UM) để xây dựng mô hình động lực học toa xe hàng trên cơ sở xây dựng mô hình và liên kết các bộ phận như bộ trục bánh xe, thân xe, má giá, hệ thống treo và tác dụng tương hỗ giữa bánh xe - ray. Trên cơ sở mô hình này, nghiên cứu tiến hành đánh giá tính năng động lực học của toa xe khi thông qua đường cong. Kết quả cho thấy phần mềm UM là công cụ hiệu quả và phù hợp cho nghiên cứu động lực học phương tiện đường sắt.

Từ khóa: UM; động lực học; mô hình; bánh xe-ray; mô phỏng.

ABSTRACT

In the research and design of railway vehicles, the modeling and simulation of locomotive and rolling stock dynamics play an important role in evaluating stability, safety, and operational quality. This paper studies the application of the Universal Mechanism (UM) software to develop a dynamic model of a freight wagon. The model is constructed by establishing and linking key components such as the wheelsets, car body, bogie frame, suspension system, and the wheel-rail interaction. This model is then used to investigate the dynamic performance of the wagon when negotiating curves. The results show that the UM software is an effective and suitable tool for studying the dynamics of railway vehicles.

Keywords: Universal Mechanism; dynamics; modeling; wheel-rail interaction; simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tính toán thiết kế hoặc kiểm nghiệm phương tiện đường sắt thì động lực học là một trong những nội dung nghiên cứu then chốt. Cùng với sự phát triển của ngành đường sắt, đặc biệt là đường sắt tốc độ cao và đường sắt đô thị, khi tính toán thiết kế, kiểm nghiệm về động lực học đòi hỏi các phương pháp tính toán phân tích chính xác.

Các phương pháp thử nghiệm thực tế thường gặp nhiều hạn chế về chi phí, thời gian và khả năng khảo sát nhiều điều kiện vận hành khác nhau. Vì vậy, mô phỏng dựa trên mô hình động lực học đa vật thể đã trở thành xu hướng nghiên cứu phổ biến.

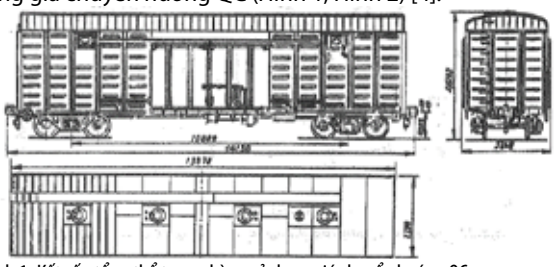
Phần mềm UM được phát triển tại Trường Đại học Kỹ thuật Bryansk (Nga), sau này được phát triển bởi công ty công ty Công ty Universal Mechanism.

UM là phần mềm chuyên dụng cho mô phỏng cơ học và phương tiện đường sắt, cho phép mô hình hóa chi tiết tương tác bánh xe - ray, hệ thống treo và các phần tử lực của phương tiện [1-3]. Bài báo này tập trung trình bày quá trình ứng dụng phần mềm UM để xây dựng mô hình động lực học toa xe hàng, làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về ổn định và dao động.

2. NỘI DUNG

2.1. Kết cấu tổng thể giá toa xe hàng QC

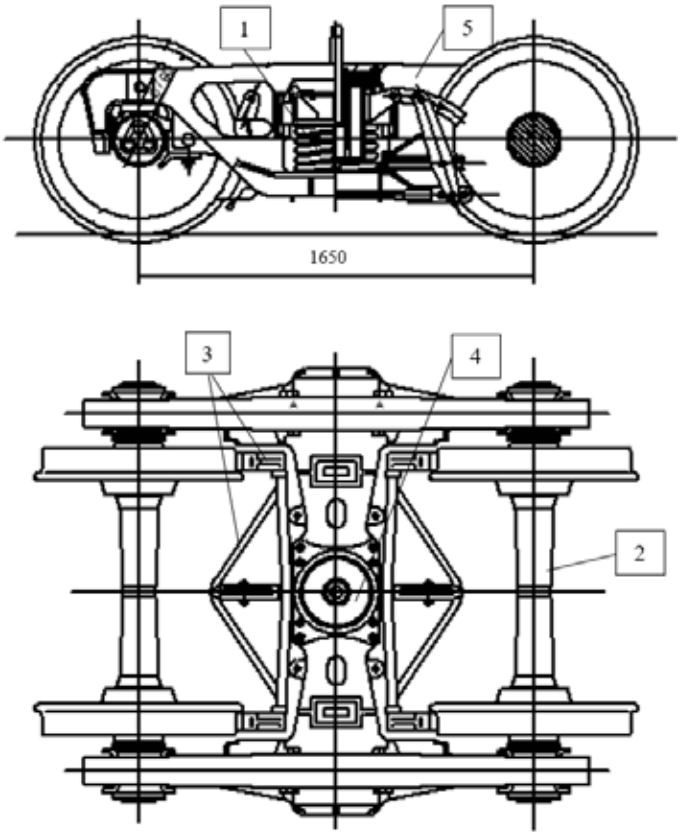
Giá chuyển hướng dùng má giá có kết cấu thép đúc, cối chuyển đúc liền xà nhún, giảm chấn ma sát xà nhún xà hãm đúc liền, kiểu trượt. Giá chuyển hướng sử dụng lò xo trung ương thép tròn, không có hệ thống lò xo bầu dầu. Kết cấu và thông số kỹ thuật toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC (Hình 1, Hình 2) [4]:



Hình 1. Kết cấu tổng thể toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật của toa xe hàng sử dụng giá chuyển hướng QC

STT	Tham số kỹ thuật	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng thân xe	tấn	52,5
2	Tốc độ cấu tạo	km/h	100
3	Cự ly tâm 2 giá chuyển	mm	10000
4	Cự ly trục	mm	1650
5	Bán kính bánh xe	mm	750
6	Tải trọng trục	tấn	14
7	Tự nặng giá chuyển	tấn	4,97
8	Trọng lượng dưới lò xo	tấn	6,716
9	Khoảng cách giữa 2 vòng lăn	mm	1070
10	Bán kính thông qua bé nhất	m	97



1- Lò xo trung ương; 2- Bộ trục bánh xe; 3- Hệ thống hãm; 4- Cối chuyển hướng; 5- Má giá

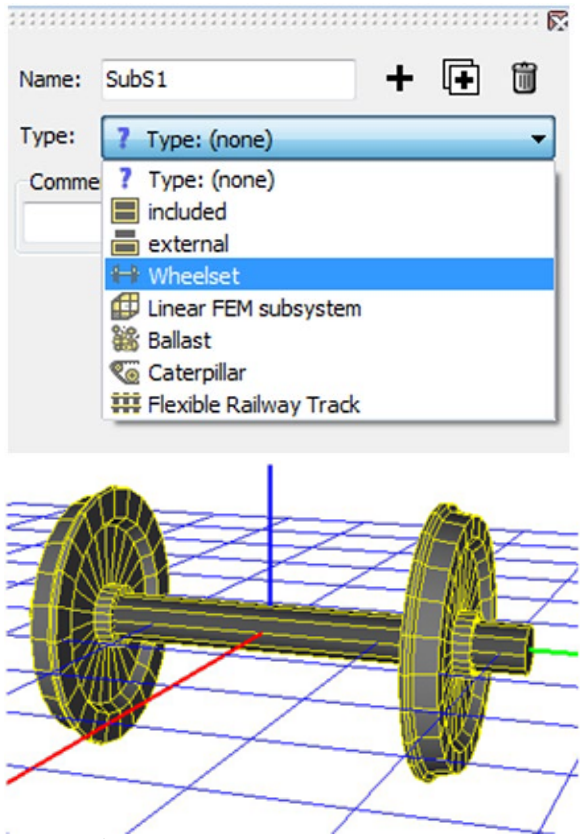
Hình 2. Kết cấu tổng thể giá chuyển hướng QC

Căn cứ vào kết cấu của toa xe, trong quá trình thành lập mô hình xét đến các liên kết ngang giữa thân xe và giá chuyển hướng, hệ thống treo. Phân tích mô phỏng động lực học phương tiện đường sắt có thể được thực hiện bằng phương pháp mô hình hóa đa vật rắn. Khi xây dựng mô hình, các bộ phận cấu thành đều được coi là vật rắn lý tưởng, do đó ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi được bỏ qua, chỉ khi phân tích tính đàn hồi của kết cấu, hoặc dao động đàn hồi của kết cấu mới khảo sát đến tính đàn hồi giữa các bộ phận với nhau, như giá chuyển hướng, thân phương tiện, bánh xe. Mỗi vật thể có 3 bậc tự do chuyển động và 3 bậc tự do tịnh tiến, tổng cộng là 6 bậc tự do. Nếu lấy trọng tâm của toa xe làm tọa độ, bậc tự do dao động tịnh tiến của toa xe bao gồm: dao động ngang, dao động thẳng đứng và dao động dọc; ba dao động quay bao gồm: dao động lăn ngang, dao động gật đầu, dao động lắc đầu [6], [7].

2.2. Mô phỏng động lực học của bộ trục bánh xe toa xe hàng

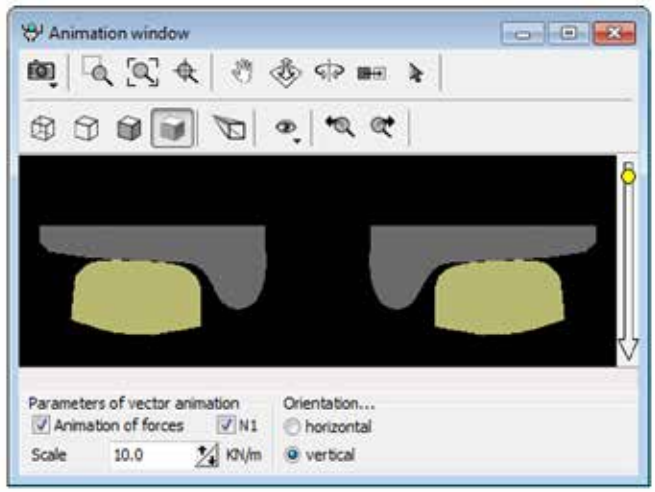
Mô hình bánh xe của toa xe bao gồm 5 bậc tự do: dao động thẳng đứng, dao động nằm ngang, dao động lăn ngang, dao động quay, dao động lắc đầu. Trong quá trình mô phỏng bánh xe có thể chuyển động trong không gian, dẫn đến sự dịch chuyển vị trí theo phương thẳng đứng của bánh xe nên khiến cho bánh xe và ray có thể tách rời tại vị trí điểm tiếp xúc. Mô hình mô phỏng bánh xe toa xe như Hình 3.

Các bộ bánh xe được xây dựng bằng mô đun trục bánh xe có sẵn trong UM, ứng với các tham số chính như khối lượng, mômen quán tính và bán kính vòng lăn. Việc sử dụng mô đun tiêu chuẩn giúp đảm bảo tính chính xác và thuận tiện trong mô phỏng tiếp xúc bánh xe - ray. Các bước xây dựng mô hình bộ trục bánh như hình dưới.



Hình 3. Mô phỏng bộ trục bánh xe

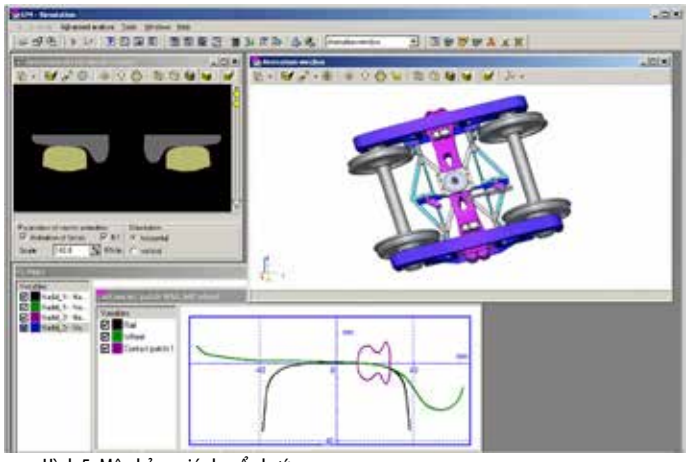
Trong phần mềm UM, tiếp xúc bánh xe - ray được mô phỏng trên cơ sở sử dụng biên dạng bánh xe và ray thực tế, kết hợp với mô hình lực tiếp xúc pháp tuyến và lực trượt tại vùng tiếp xúc. Bên cạnh đó còn mô tả chính xác chuyển động trượt giữa bánh xe và ray, cho phép phân tích chi tiết dao động ngang của bộ bánh xe. Cách tiếp cận này giúp mô phỏng một cách chính xác tương tác bánh xe - ray trong các điều kiện vận hành khác nhau, qua đó nâng cao độ tin cậy của các kết quả phân tích động lực học phương tiện đường sắt.



Hình 4. Mô phỏng tiếp xúc bánh xe - ray

2.3. Mô phỏng giá chuyển hướng toa xe hàng

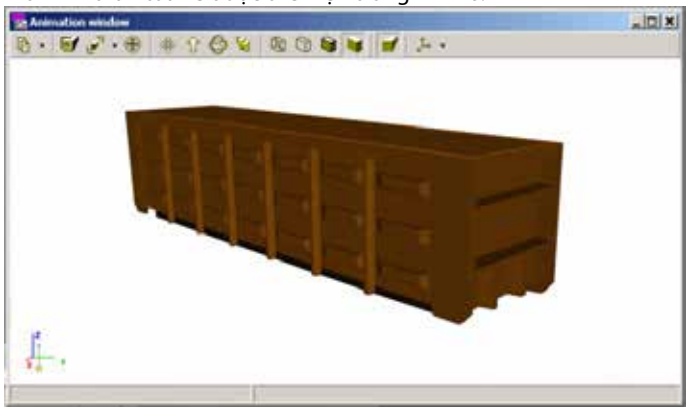
Mô hình giá chuyển hướng gồm hai má giá, xà nhún, hệ lò xo trung ương sử dụng các tổ lò xo thép tròn có độ cứng theo ba phương và hệ thống giảm chấn nêm ma sát. Mô hình mô phỏng giá chuyển hướng được thể hiện trong Hình 5.



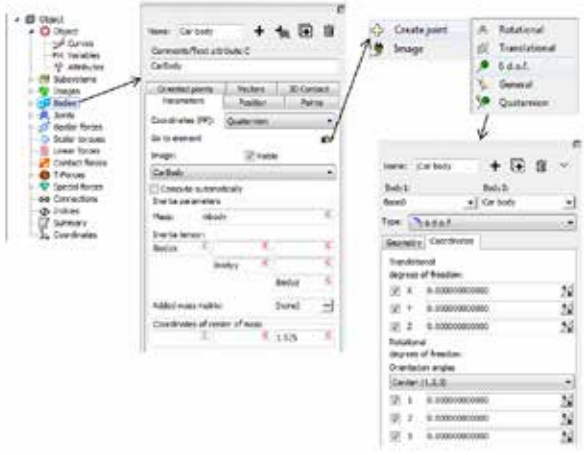
Hình 5. Mô phỏng giá chuyển hướng

2.4. Mô phỏng thân toa xe hàng

Mô hình thân toa xe bao gồm: dao động gật đầu, dao động ngang, dao động lăn ngang, dao động thẳng đứng và dao động lắc đầu. Như vậy mô hình động lực học của toa xe bao gồm 45 độ tự do. Mô hình thân toa xe được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Mô hình thân toa xe



Hình 7. Thân toa xe và thiết lập các liên kết

2.5. Mô hình động lực học của toa xe hàng

Mô hình toa xe được xây dựng trong phần mềm UM bao gồm nhiều thành phần cơ bản nhằm mô phỏng đầy đủ đặc tính động lực học của hệ thống. Hệ cơ học của mô hình được cấu thành từ các cụm chi tiết được xây dựng như phần trên, bao gồm thân xe, má giá chuyển hướng, xà nhún, hệ thống treo. Thông qua việc thiết lập liên hết giữa các cụm chi tiết để tạo ra mô hình động lực học 3D như Hình 8.

Hình 8. Mô hình 3D tính toán động lực học của toa xe hàng

3. ĐÁNH GIÁ TÍNH NĂNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TOA XE KHI THÔNG QUA ĐƯỜNG CONG

Dùng phần mềm UM để khảo sát toa xe hàng thông qua đường cong bán kính 600 m, bao gồm đoạn đường thẳng, đường cong hòa hoãn, đoạn cong.

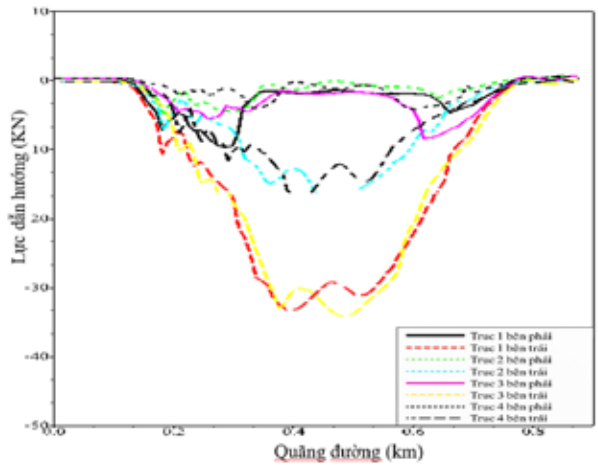
Bảng 2. Thông số đường cong mô phỏng

Bán kính đường cong [m]	Tốc độ [Km/h]	Độ siêu cao [mm]	Chiều dài đường thẳng [m]	Chiều dài đường cong hòa hoãn [m]	Chiều dài đường cong [m]
600	60	90	100	200	200

Bảng 3. Các chỉ tiêu an toàn khi thông qua đường cong [8]

Chỉ tiêu	Lực dẫn hướng [kN]	Lực thẳng đứng [kN]	Hệ số chống trật ray
Trị số cho phép	52	160	1.2

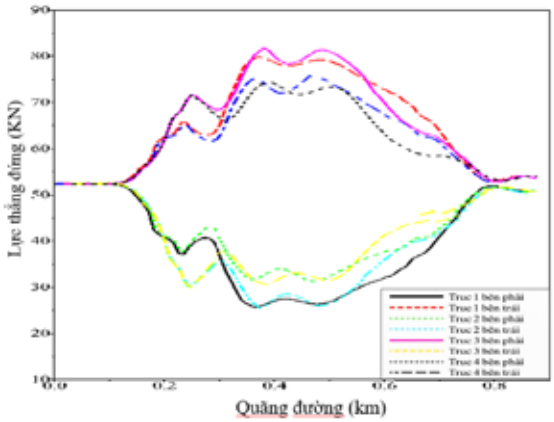
Kết quả lực dẫn hướng, lực thẳng đứng và hệ số trật ray như Hình 9, Hình 10 và Hình 11.



Hình 9. Lực dẫn hướng

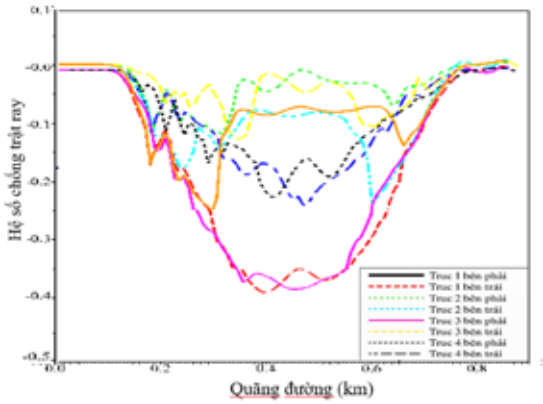
Trên Hình 9 có thể thấy, lực dẫn hướng của trục 1 và trục 3 là có giá trị lớn nhất bởi vì nó là các trục dẫn của toa xe và cụ thể nó là lực dẫn hướng phía bên trái của trục bánh xe 1 và trục bánh xe 3. Trị số lớn nhất của nó như tính toán là 33.51 kN, khi đó vẫn chưa lớn hơn trị số cho phép do đó vẫn thỏa mãn chỉ tiêu an toàn. Thông qua đồ thị thì vấn đề khi vào đường cong hòa hoãn thì xảy ra biến động về trị số lực dẫn hướng là lớn nhất, trị số lớn nhất là điểm cuối của

đường cong hòa hoãn bắt đầu vào đoạn cong đã được chứng minh. Và thực tế khi đoàn tàu đi vào đường cong hòa hoãn cũng dễ xảy ra trật ray nhất.



Hình 10. Lực thẳng đứng

Trên Hình 10 có thể thấy qui luật biến thiên lực thẳng đứng giữa bánh xe bên trái là ngược nhau. Tương tự như lực dẫn hướng thì trục 1 và trục 3 là có giá trị lớn nhất bởi vì nó là các trục dẫn của toa xe và cụ thể nó là lực thẳng đứng phía bên trái của trục bánh xe 1 và trục bánh xe 3. Trị số lớn nhất của nó như tính toán là 82.76 kN, khi đó vẫn chưa lớn hơn trị số cho phép do đó vẫn thỏa mãn chỉ tiêu an toàn.



Hình 11. Hệ số chống trật ray

Trên Hình 11 có thể thấy thấy qui luật biến đổi của hệ số chống trật ray giống như qui luật biến thiên của lực dẫn hướng. Do đó hệ số chống trật ray có giá trị lớn nhất ở phía bên trái trục 1 và trục 3. Giá trị lớn nhất là 0.396, phù hợp với chỉ tiêu an toàn.

4. KẾT LUẬN

Nội dung bào báo đã nghiên cứu ứng dụng phần mềm mô phỏng động lực học UM để mô phỏng mô hình tính toán động động lực học của toa xe hàng. Ứng dụng mô hình này để đánh giá tính năng động lực thông qua đường cong của toa xe. Qua kết quả tính toán thấy rằng các chỉ tiêu an toàn thông qua đường cong đều đạt tiêu chuẩn của đường sắt.

Phần mềm UM có thể được ứng dụng trong quá trình tính toán thiết kế phương tiện đường sắt, tính toán kiểm nghiệm để nâng cao tính năng động lực học của phương tiện đường sắt cho kết quả có độ tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] 李国芳、姚永明、丁旺才. 基于 UM 的车辆-轨道耦合动力学建模及仿真分析, 兰州交通大学学报, 第 5 期.131-139, 2016.

[2] 王树宏、高锋、高定刚, 基于 UM 仿真软件的高速磁浮列车轨道不平顺的动力学响应研究, 城市轨道交通研究，第 3 期.117-125, 2022.

[3]. 刘瑞家, 基于 UM 的地铁车辆轮轨磨耗预测及其动力学性能分析, 兰州交通大学,硕士论文, 2021.

[4] Nguyễn Quang Hưởng, Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng một số tham số của đường cong đến hao mòn mặt lăn và gờ bánh xe toa xe hàng vận sdụng trên đường sắt Việt Nam, Luận văn Thạc sỹ khoa học kỹ thuật, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2023.

[5] Nguyễn Hữu Dũng, Động lực học đoàn tàu, Nhà xuất bản giao thông vận tải, 2004.

[6] 王天福, 车辆系统动力学, 北京，中国铁道出版社, 1995.

[7]黄志辉, 轮对自由横动量对机车曲线通过性能的影响, 铁道机车与车辆, 第 3 期: 22-23, 1995.

[8] Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 08:2018 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khai thác đường sắt, Bộ Giao thông vận tải, 2018.