



BUILDING MODELS FOR ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF URBAN RAILWAY VEHICLES IN THE EXPLOITATION FOR THE CAT LINH - HA DONG URBAN RAILWAY

Nguyen Duc Toan, Do Duc Tuan*

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 22/05/2023

Revised: 16/09/2023

Accepted: 10/10/2023

Published online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.4>

* *Corresponding author*

Email: ddtuan@utc.edu.vn; Tel: 0913905814

Abstract: Urban railway systems are considered complex systems, composed of sub-systems such as fixed equipment: railways, bridges, tunnels, communications, signals, stations, power supplies, and other equipment; mobile equipment: metro trains. On the other hand, if urban railway vehicles (metro trains) are considered independent complex engineering systems, they are divided into sub-systems such as bodies, running gears, transmissions, brakes, controls, and auxiliary equipment. In the operation, the technical equipment may be damaged, leading to interruption of train operation or break of train working diagram. Additionally, when the mentioned equipment fails, its reliability is degraded and directly affects the operational efficiency of both the railway system in general and of railway vehicles in particular. Currently in Vietnam, there are only three urban railway routes that have been and are being built: Cat Linh - Ha Dong, Nhon - Hanoi Railway Station and Ben Thanh - Suoi Tien. In which, only Cat Linh - Ha Dong route has officially been put into operation since November 2021. Assessing the reliability of urban railway systems in general and of urban railway vehicles in particular in the exploitation is still completely new, and has not been mentioned by any research. To contribute to solving the above problem, the article presents the establishment of reliability assessment models for urban railway vehicles in general and applies to the Cat Linh - Ha Dong route in particular.

Keywords: model building, reliability assessment, urban railway vehicle, exploitation.

@ 2023 University of Transport and Communications



XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CỦA PHƯƠNG TIỆN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ TUYẾN CÁT LINH - HÀ ĐÔNG TRONG QUÁ TRÌNH KHAI THÁC

Nguyễn Đức Toàn, Đỗ Đức Tuấn*

Trường Đại học Giao thông vận tải, số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 22/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 16/09/2023

Ngày chấp nhận đăng: 10/10/2023

Ngày xuất bản Online: 15/10/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.4>

* Tác giả liên hệ

Email: ddtuan@utc.edu.vn; Tel: 0903905814

Tóm tắt: Hệ thống thống đường sắt đô thị được coi là một hệ thống phức hợp, cấu thành từ các phân hệ như trang thiết bị cố định: đường sắt, cầu, hầm, thông tín, tín hiệu, nhà ga, thiết bị cung cấp điện ... và trang thiết bị động: đoàn tàu metro. Mặt khác, nếu coi phương tiện đường sắt đô thị (đoàn tàu metro) là một hệ thống kỹ thuật phức hợp độc lập, thì nó lại được phân chia thành các phân hệ như: thân xe, bộ phận chạy, truyền động, thiết bị hãm, điều khiển, thiết bị phụ v.v. Trong quá trình hoạt động, các thiết bị kỹ thuật nói chung có thể bị hư hỏng, dẫn đến quá trình chạy tàu bị gián đoạn hay nói khác, biểu đồ chạy tàu bị phá vỡ. Mặt khác, khi xảy ra hư hỏng của các thiết bị kỹ thuật đã nêu, chỉ tiêu độ tin cậy của chúng bị suy giảm và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả hoạt động của cả hệ thống đường sắt đô thị nói chung và của phương tiện đường sắt đô thị nói riêng. Hiện nay ở Việt Nam, mới chỉ có ba tuyến đường sắt đô thị đã và đang được xây dựng, đó là các tuyến Cát Linh - Hà Đông, Nhôn - Ga Hà Nội và Bến Thành - Suối Tiên, trong đó duy nhất có tuyến Cát Linh - Hà Đông được đưa vào khai thác chính thức từ tháng 11 năm 2021. Vấn đề đánh giá độ tin cậy của hệ thống đường sắt đô thị nói chung và của phương tiện đường sắt đô thị nói riêng trong quá trình khai thác còn hoàn toàn mới mẻ, chưa có nghiên cứu nào được đề cập. Để góp phần giải quyết vấn đề đã nêu, bài báo này trình bày nội dung xây dựng mô hình đánh giá độ tin cậy của phương tiện đường sắt đô thị nói chung và áp dụng cho tuyến Cát Linh - Hà Đông nói riêng.

Từ khóa: xây dựng mô hình, đánh giá độ tin cậy, phương tiện đường sắt đô thị, quá trình khai thác.

@ 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống vận tải đường sắt nói chung và hệ thống đường sắt đô thị nói riêng được coi là một hệ thống phức hợp, cấu thành từ các trang thiết bị cố định: đường sắt, cầu, hầm, thông tín, tín hiệu, nhà ga, thiết bị cung cấp điện (đối với đường sắt điện khí hóa) ... và các trang thiết bị động: phương tiện đầu máy, toa xe hoặc đoàn tàu metro (đối với đường sắt đô thị). Trong quá trình hoạt động, các thiết bị kỹ thuật có thể bị hư hỏng, dẫn đến quá trình chạy tàu bị gián đoạn hay nói khác, biểu đồ chạy tàu bị phá vỡ. Mặt khác, khi xảy ra hư hỏng của các thiết bị kỹ thuật đã nêu, chỉ tiêu độ tin cậy của chúng bị suy giảm và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả hoạt động của cả hệ thống vận tải đường sắt.

Ở nước ngoài đã có những công trình liên quan đến vấn đề đánh giá ảnh hưởng của độ tin cậy các thiết bị kỹ thuật tới hiệu quả hoạt động của các hệ thống khác nhau nói chung [1-4] và của hệ thống vận tải đường sắt nói riêng [5-7].

Ở Việt Nam, cũng đã có công trình bước đầu đề cập đến vấn đề này trên đường sắt quốc gia [8-9]. Tuy nhiên, đối với đường sắt đô thị, vấn đề này cho đến nay vẫn chưa được đề cập. Vì vậy, cần tiếp tục nghiên cứu nhằm kế thừa và bổ sung về lý thuyết cũng như thực tiễn, để từng bước áp dụng vào thực tế sản xuất của ngành đường sắt Việt Nam nói chung và đường sắt đô thị nói riêng.

Cho đến nay, quy hoạch tổng thể về hệ thống đường sắt đô thị (ĐSĐT) ở Việt Nam đã được phê duyệt. Hệ thống đường sắt đô thị Hà Nội bao gồm 10 tuyến chính, trong đó có hai tuyến đã và đang được xây dựng. Tuyến Cát Linh - Hà Đông đã được đưa vào khai thác chính thức từ tháng 11 năm 2021. Tuyến Nhổn - Ga Hà Nội đã xây dựng xong đoạn trên cao Nhổn - Ga Cầu Giấy, dự kiến đưa vào khai thác vào cuối năm 2023. Đoạn đi ngầm Kim Mã - Ga Hà Nội đang tiếp tục được xây dựng, dự kiến hoàn thành vào năm 2025. Hệ thống đường sắt đô thị TP. Hồ Chí Minh bao gồm 8 tuyến chính, trong đó tuyến Bến Thành - Suối Tiên đã xây dựng xong, dự kiến đưa vào khai thác cuối năm 2023.

Trong [10] đã xây dựng được mô hình tổng quát đánh giá độ tin cậy của hệ thống kỹ thuật phức hợp. Nội dung bài báo này là kế thừa mô hình tổng quát đã nêu, từ đó tiến hành xây dựng mô hình cụ thể cho việc đánh giá độ tin cậy của phương tiện đường sắt đô thị (đoàn tàu metro) nói riêng.

2. PHÂN CHIA HỆ THỐNG THÀNH CÁC PHÂN HỆ

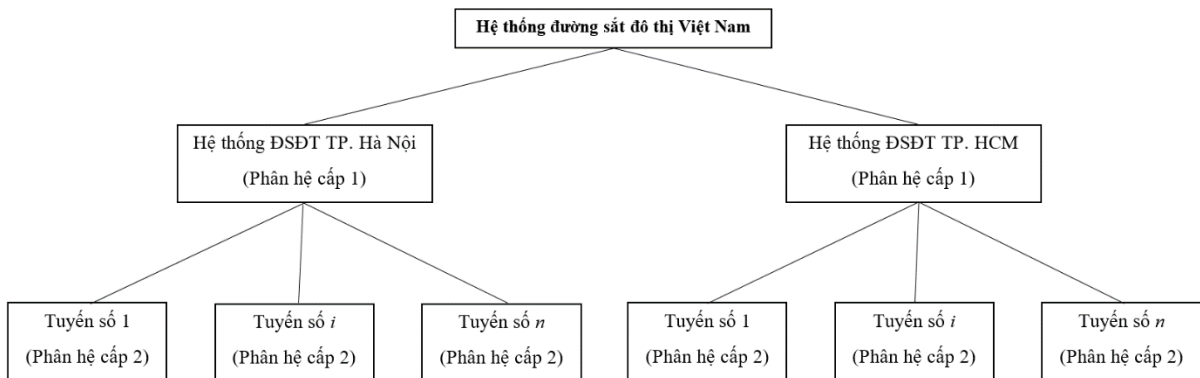
2.1. Phương tiện đường sắt đô thị với tư cách là phân hệ (phần tử) của hệ thống đường sắt đô thị

Nếu coi toàn bộ hệ thống đường sắt đô thị nói chung và ở Việt Nam nói riêng là một hệ thống kỹ thuật phức hợp, thì có thể phân chia nó thành các phân hệ cấp 1, cấp 2, cấp 3 v.v. Sơ đồ phân chia thành các phân hệ cấp 1 và cấp 2 được thể hiện trên hình 1.

Nếu xét riêng một tuyến đường sắt đô thị, nằm giữa hai ga đầu và cuối, thì nó được coi là một hệ thống phức hợp đơn chức năng hoạt động liên tục theo thời gian và rời rạc trong không gian. Khi đó, một cách tương đối, nó có thể được phân chia thành các phân hệ sau đây:

1. Phân hệ cầu, hầm;
2. Phân hệ đường sắt;
3. Phân hệ phương tiện (đoàn tàu metro);
4. Phân hệ cung cấp điện;

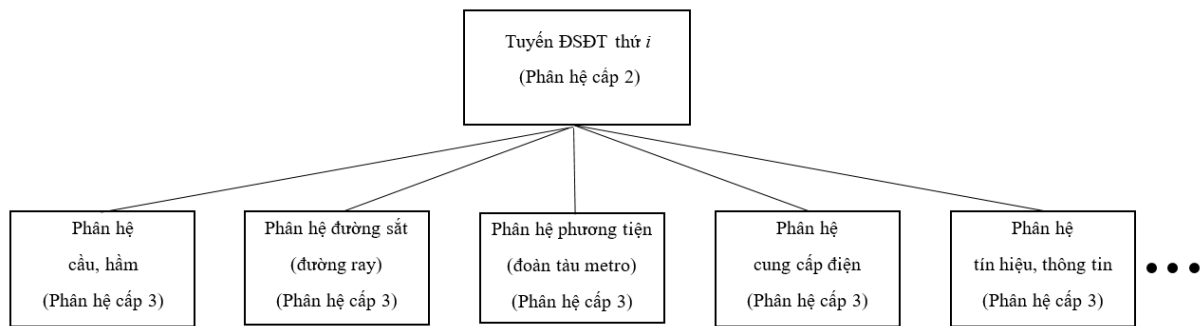
- 5. Phân hệ tín hiệu, thông tin;
- 6. Phân hệ nhà ga, v.v.



Hình 1. Sơ đồ phân chia hệ thống đường sắt đô thị thành các phân hệ cấp 1, cấp 2.

Chức năng của hệ thống này là thực hiện khối lượng vận chuyển cho trước nào đó trong một khoảng thời gian xác định mà không xảy ra gián đoạn chạy tàu. Thông thường, các tuyến đường sắt đô thị hoạt động khoảng thời gian 18 giờ trong một ngày đêm, và được tính từ 5 đến 23 giờ.

Sơ đồ phân chia thành các phân hệ cấp 3 được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Sơ đồ phân chia hệ thống đường sắt đô thị thành các phân hệ cấp 3.

2.2. Phương tiện đường sắt đô thị với tư cách là một hệ thống kỹ thuật độc lập

Nếu coi phương tiện đường sắt đô thị (đoàn tàu metro) là một hệ thống kỹ thuật phức hợp độc lập, thì một cách tương đối, có thể tiếp tục được phân chia nó thành các phân hệ cấp 4. Việc phân một hệ thống thành các các phân hệ hoàn toàn có tính chất tương đối, nó phụ thuộc vào mục đích nghiên cứu cụ thể do bài toán ban đầu đặt ra.

2.2.1. Các hệ thống cơ bản của phương tiện đường sắt đô thị tuyến Cát Linh - Hà Đông

Theo Hồ sơ Dự án đường sắt đô thị Cát Linh - Hà Đông [11-13], đoàn tàu metro có 16 hệ thống cơ bản, được tổng hợp trong bảng 1.

Bảng 1. Các hệ thống cơ bản của đoàn tàu metro tuyến Cát Linh - Hà Đông.

1	Thân tàu và trang trí nội thất		
		1.1	Thân tàu
		1.2	Trang trí nội thất

2	Hệ thống điều hòa	2.1	Tổ máy điều hòa toa khách
		2.2	Bộ thông gió buồng lái
		2.3	Quạt gió hướng tâm
		2.4	Thiết bị bảo vệ an toàn
3	Thiết bị đường xuyên suốt		
4	Thiết bị móc tàu và giảm xóc	4.1	Thiết bị móc nối bán tự động
		4.2	Thiết bị móc nối bán vĩnh cửu kèm ống lồng
		4.3	Thiết bị móc nối bán vĩnh cửu kèm bộ giảm xóc
		4.4	Thiết bị móc nối bán tự động trung gian
5	Hệ thống cửa thoát hiểm khẩn cấp	5.1	Cửa thoát hiểm khẩn cấp
		5.2	Thang thoát hiểm
6	Hệ thống cửa hông khoang khách		
7	Hệ thống cửa hông buồng lái		
8	Hệ thống điện buồng lái	8.1	Bàn lái tàu
		8.2	Tủ điều khiển
		8.3	Tủ tổng hợp
		8.4	Màn hình bên trái
		8.5	Màn hình bên phải
		8.6	Đèn chiếu trước
		8.7	Bộ gạt nước
9	Hệ thống điện khoang khách	9.1	Chiếu sáng khoang khách
		9.2	Thiết bị hệ thống phát thanh toa xe
		9.3	Đèn báo phía ngoài toa xe
		9.4	Thiết bị đấu nối điều hòa
		9.5	Tủ điều khiển điện
		9.6	Tủ điều khiển điều hòa
10	Hệ thống điều khiển và giám sát tàu điện	10.1	Kết cấu tô pô
		10.2	Các thiết bị của hệ thống
11	Hệ thống kéo dẫn và phanh điện	11.1	Tủ điện cao áp loại TPQ86L

		11.2	Bộ biến tần kéo dẫn loại TGN53H
		11.3	Hộp điện trở phanh loại TR8074
		11.4	Bộ điện kháng lọc sóng loại LKDG-2×420A-5mH-A
		11.5	Tủ cầu chì thanh cái loại TPK79F
		11.6	Tủ máy cắt nhanh thanh cái TDG3C
		11.7	Bộ điều khiển lái tàu loại S353CC.028
		11.8	Bộ gom dòng
		11.9	Động cơ kéo dẫn không đồng bộ loại YQ-190-21
		11.10	Thiết bị tiếp đất
12	Hệ thống hãm khí và cấp khí		
		12.1	Hệ thống cấp khí
		12.2	Bộ lọc kèm thoát nước 3/4"
		12.3	Bộ phận điều khiển hãm
		12.4	Kết cấu mô đun hãm
		12.5	Van xả gió chống trượt
		12.6	Bộ cảm biến tốc độ
		12.7	Van điều chỉnh độ cao
		12.8	Van chênh lệch áp suất
		12.9	Bộ phận hãm guốc
		12.10	Khóa van thoát khí kiểu tiếp điểm điện
		12.11	Đầu cuối bảo vệ hệ thống hãm
13	Hệ thống nguồn điện phụ trợ		
		13.1	Nguồn điện phụ trợ
		13.2	Tủ cao áp phụ trợ
		13.3	Tủ cấp điện mở rộng
		13.4	Tủ cầu dao tiếp đất
		13.5	Ắc quy
		13.6	Bộ nghịch lưu (bộ biến tần/bộ chuyển dòng) thông gió khăn cấp
14	Hệ thống phát thanh đoàn tàu		
		14.1	Tổ hợp thiết bị hệ thống
		14.2	Đầu nối điện
15	Thiết bị vô tuyến gắn trên tàu		
		15.1	Giới thiệu MDT-300
		15.2	Kết cấu cơ bản
		15.3	Máy chính
		15.4	Hộp điều khiển
		15.5	Ăng ten
16	Giá chuyển hướng		

16.1	Khung giá
16.2	Cặp bánh xe
16.3	Tổ hợp đầu trục
16.4	Hệ lò xo hộp trục
16.5	Hệ lò xo trung ương
16.6	Thiết bị kéo dẫn
16.7	Linh kiện hãm cơ bản
16.8	Hộp bánh răng
16.9	Khớp nối trục
16.10	Ăng ten bộ phát đáp và bộ phận gạt bỏ chướng ngại vật
16.11	Đế lắp đặt bộ lấy điện và phụ kiện

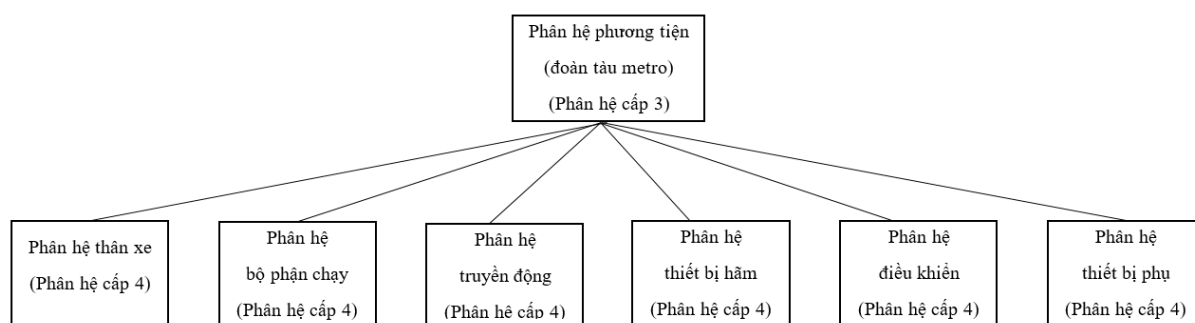
2.2.2. Phân chia các hệ thống cơ bản của phương tiện đường sắt đô thị tuyến Cát Linh - Hà Đông thành các phân hệ

Như trên đã nói, việc phân một hệ thống thành các các phân hệ hoàn toàn có tính chất tương đối, nó phụ thuộc vào mục đích nghiên cứu cụ thể do bài toán ban đầu đặt ra.

Trong trường hợp này, tác giả đề xuất phân chia thành 6 phân hệ như sau.

1. Phân hệ 1: Thân xe
2. Phân hệ 2: Bộ phận chạy
3. Phân hệ 3: Truyền động
4. Phân hệ 4: Thiết bị hãm
5. Phân hệ 5. Điều khiển
6. Phân hệ 6. Thiết bị phụ

Sơ đồ phân chia phương tiện đường sắt đô thị (đoàn tàu metro) thành các phân hệ được thể hiện hình 3.



Hình 3. Sơ đồ phân chia phương tiện đường sắt đô thị thành các phân hệ cấp 4.

Từ 16 hệ thống đã nêu, tiến hành phân chia thành 6 phân hệ, được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Phân chia 16 hệ thống của đoàn tàu metro Cát Linh - Hà Đông thành 6 phân hệ.

1	Phân hệ thân xe
1.1	Thân tàu
1.2	Trang trí nội thất
1.3	Thiết bị đường xuyên suốt

		1.4	Thiết bị móc tàu và giảm xóc
		1.5	Hệ thống cửa thoát hiểm khẩn cấp
		1.6	Hệ thống cửa hông khoang khách
		1.7	Hệ thống cửa hông buồng lái
2	Phân hệ bộ phận chạy		
		2.1	Khung giá
		2.2	Cặp bánh xe
		2.3	Tổ hợp đầu trục
		2.4	Hệ lò xo hộp trục
		2.5	Hệ lò xo trung ương
		2.6	Thiết bị kéo dẫn
		2.7	Linh kiện hãm cơ bản
		2.8	Hộp bánh răng
		2.9	Khớp nối trục
		2.10	Ăng ten bộ phát đáp và bộ phận gạt bỏ chướng ngại vật
		2.11	Đế lắp đặt bộ lấy điện và phụ kiện
3	Phân hệ truyền động (Hệ thống kéo dẫn và phanh điện)		
		3.1	Tủ điện cao áp loại TPQ86L
		3.2	Bộ biến tần kéo dẫn loại TGN53H
		3.3	Hộp điện trở phanh loại TR8074
		3.4	Bộ điện kháng lọc sóng loại LKDG-2×420A-5mH-A
		3.5	Tủ cầu chì thanh cái loại TPK79F
		3.6	Tủ máy cắt nhanh thanh cái TDG3C
		3.7	Bộ điều khiển lái tàu loại S353CC.028
		3.8	Bộ gom dòng
		3.9	Động cơ kéo dẫn không đồng bộ loại YQ-190-21
		3.10	Thiết bị tiếp đất
4	Phân hệ thiết bị hãm (Hệ thống hãm khí và cấp khí)		
		4.1	Hệ thống cấp khí
		4.2	Bộ lọc kèm thoát nước 3/4"
		4.3	Bộ phận điều khiển hãm
		4.4	Kết cấu mô đun hãm
		4.5	Van xả gió chống trượt
		4.6	Bộ cảm biến tốc độ
		4.7	Van điều chỉnh độ cao
		4.8	Van chênh lệch áp suất
		4.9	Bộ phận hãm guốc
		4.10	Khóa van thoát khí kiểu tiếp điểm điện

		4.11	Đầu cuối bảo vệ hệ thống hãm
5	Phân hệ điều khiển (Hệ thống điều khiển và giám sát tàu điện)		
		5.1	Kết cấu tô pô
		5.2	Các thiết bị của hệ thống
6	Phân hệ thiết bị phụ (Hệ thống nguồn điện phụ trợ)		
		6.1	Nguồn điện phụ trợ
		6.2	Tủ cao áp phụ trợ
		6.3	Tủ cấp điện mở rộng
		6.4	Tủ cầu dao tiếp đất
		6.5	Ắc quy
		6.6	Bộ nghịch lưu (bộ biến tần/bộ chuyển
		6.7	Hệ thống điều hòa
		6.8	Hệ thống điện bù công suất
		6.9	Hệ thống điện khoang khách
		6.10	Hệ thống phát thanh đoàn tàu
		6.11	Thiết bị vô tuyến gắn trên tàu

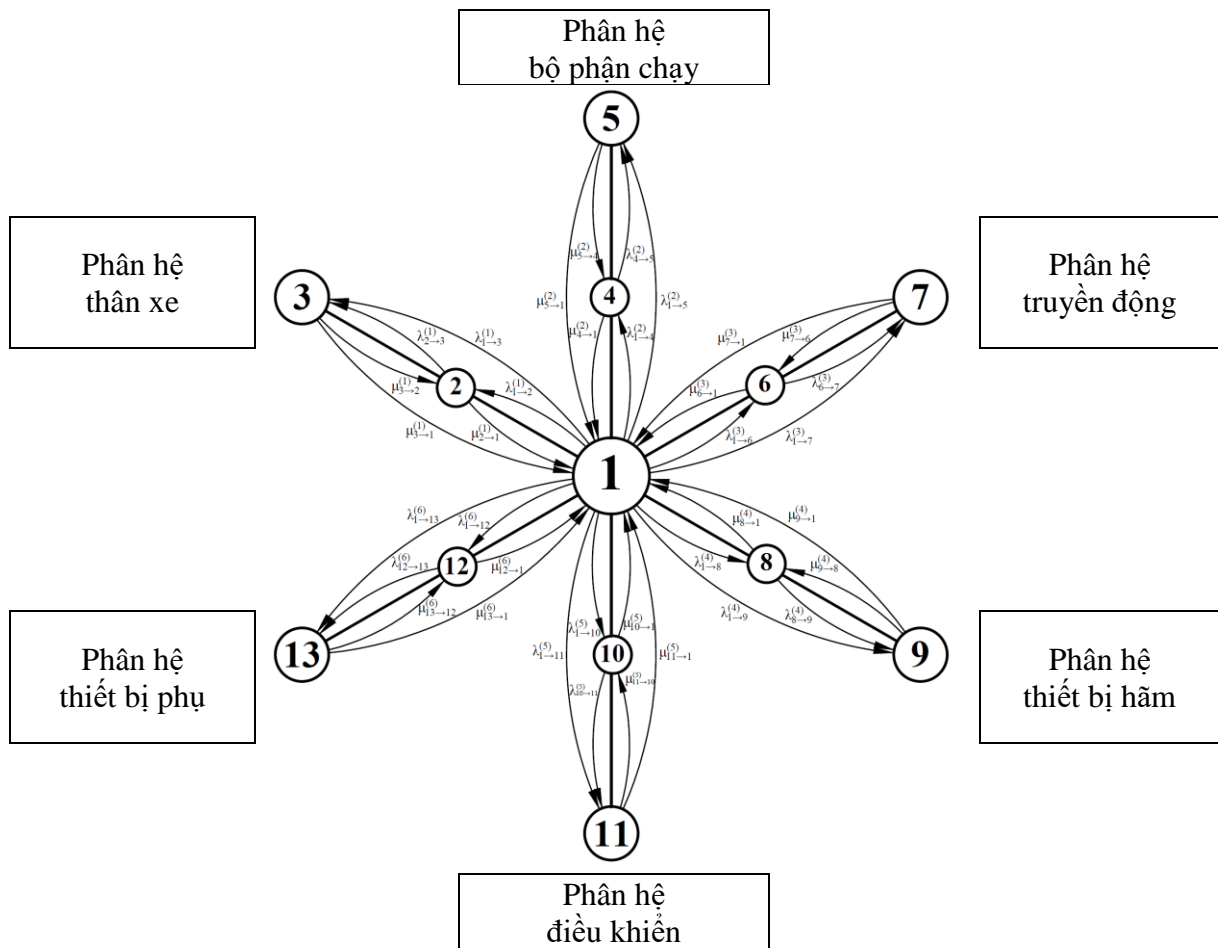
3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CỦA PHƯƠNG TIỆN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ VỚI TƯ CÁCH LÀ HỆ THỐNG KỸ THUẬT ĐỘC LẬP

3.1. Mô hình trạng thái đầy đủ

Tuyến đường sắt đô thị (hệ thống) có thể nằm ở trạng thái làm việc và đảm bảo thực hiện 100% biểu đồ chạy tàu, có thể ở trạng thái làm việc với hiệu quả giảm thấp do một trong các phần tử hoặc phân hệ bị hư hỏng một phần, và cuối cùng là nằm ở trạng thái không làm việc do một trong các phần tử hoặc phân hệ bị hư hỏng hoàn toàn, hoặc khi cần tiến hành bảo dưỡng kỹ thuật và sửa chữa định kỳ cho các thiết bị cố định, và khi đó khả năng thực hiện biểu đồ chạy tàu là 0%. Ở đây không xét các trạng thái mà ở đó tiến hành sửa chữa định kỳ cho các thiết bị cố định và chỉ xem xét các trạng thái hư hỏng của chúng.

Theo quan điểm của lý thuyết độ tin cậy [1-8, 14,15], tất cả các phần tử hay phân hệ trong hệ thống này được coi là liên kết nối tiếp với nhau, có nghĩa là sự hư hỏng hoàn toàn của một trong số các phần tử hay phân hệ nào đó sẽ làm cho toàn bộ hệ thống bị hư hỏng (ngừng hoạt động). Thời gian làm việc giữa các lần hư hỏng của các phần tử hay phân hệ của hệ thống và thời gian phục hồi khả năng làm việc của chúng là các đại lượng ngẫu nhiên.

Từ mô hình tổng quát với n phân hệ và N trạng thái đã trình bày trong [10], tiến hành xây dựng mô hình trạng thái đầy đủ của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ và 13 trạng thái, thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Mô hình trạng thái đầy đủ của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ.

Trong quá trình hoạt động, các phân hệ có các chuyển tiếp trạng thái tương ứng với cường độ hỏng và cường độ phục hồi sau đây.

1. Đối với phân hệ 1 (thân xe):

$\lambda_{1 \rightarrow 2}^{PH1} = \lambda_{1 \rightarrow 2}^{(1)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 2 (H_{mp});

$\lambda_{2 \rightarrow 3}^{PH1} = \lambda_{2 \rightarrow 3}^{(1)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 2 (H_{mp}) sang trạng thái 3 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 3}^{PH1} = \lambda_{1 \rightarrow 3}^{(1)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 3 (H_{ht});

$\mu_{2 \rightarrow 1}^{PH1} = \mu_{2 \rightarrow 1}^{(1)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 2 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{3 \rightarrow 2}^{PH1} = \mu_{3 \rightarrow 2}^{(1)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 3 (H_{ht}) sang trạng thái 2 (H_{mp});

$\mu_{3 \rightarrow 1}^{PH1} = \mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 1 (thân xe) chuyển tiếp từ trạng thái 3 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV).

2. Đối với phân hệ 2 (bộ phận chạy):

$\lambda_{1 \rightarrow 4}^{PH2} = \lambda_{1 \rightarrow 4}^{(2)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 4 (H_{mp});

$\lambda_{4 \rightarrow 5}^{PH2} = \lambda_{4 \rightarrow 5}^{(2)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 4 (H_{mp}) sang trạng thái 5 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 5}^{PH2} = \lambda_{1 \rightarrow 5}^{(2)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 5 (H_{ht});

$\mu_{4 \rightarrow 1}^{PH2} = \mu_{4 \rightarrow 1}^{(2)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 4 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{5 \rightarrow 4}^{PH2} = \mu_{5 \rightarrow 4}^{(2)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 5 (H_{ht}) sang trạng thái 4 (H_{mp});

$\mu_{5 \rightarrow 1}^{PH2} = \mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 2 (bộ phận chạy) chuyển tiếp từ trạng thái 5 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV).

3. Đối với phân hệ 3 (truyền động):

$\lambda_{1 \rightarrow 6}^{PH3} = \lambda_{1 \rightarrow 6}^{(3)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 6 (H_{mp});

$\lambda_{6 \rightarrow 7}^{PH3} = \lambda_{6 \rightarrow 7}^{(3)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 6 (H_{mp}) sang trạng thái 7 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 7}^{PH3} = \lambda_{1 \rightarrow 7}^{(3)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 7 (H_{ht});

$\mu_{6 \rightarrow 1}^{PH3} = \mu_{6 \rightarrow 1}^{(3)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 6 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{7 \rightarrow 6}^{PH3} = \mu_{7 \rightarrow 6}^{(3)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 7 (H_{ht}) sang trạng thái 6 (H_{mp});

$\mu_{7 \rightarrow 1}^{PH3} = \mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 3 (truyền động) chuyển tiếp từ trạng thái 7 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV).

4. Đối với phân hệ 4 (thiết bị hãm):

$\lambda_{1 \rightarrow 8}^{PH4} = \lambda_{1 \rightarrow 8}^{(4)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 8 (H_{mp});

$\lambda_{8 \rightarrow 9}^{PH4} = \lambda_{8 \rightarrow 9}^{(4)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 8 (H_{mp}) sang trạng thái 9 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 9}^{PH4} = \lambda_{1 \rightarrow 9}^{(4)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 9 (H_{ht});

$\mu_{8 \rightarrow 1}^{PH4} = \mu_{8 \rightarrow 1}^{(4)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 8 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{9 \rightarrow 8}^{PH4} = \mu_{9 \rightarrow 8}^{(4)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 9 (H_{ht}) sang trạng thái 8 (H_{mp});

$\mu_{9 \rightarrow 1}^{PH4} = \mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 4 (thiết bị hãm) chuyển tiếp từ trạng thái 9 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV);

5. Đối với phân hệ 5 (điều khiển):

$\lambda_{1 \rightarrow 10}^{PH5} = \lambda_{1 \rightarrow 10}^{(5)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 10 (H_{mp});

$\lambda_{10 \rightarrow 11}^{PH5} = \lambda_{10 \rightarrow 11}^{(5)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 10 (H_{mp}) sang trạng thái 11 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 11}^{PH5} = \lambda_{1 \rightarrow 11}^{(5)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 11 (H_{ht});

$\mu_{10 \rightarrow 1}^{PH5} = \mu_{10 \rightarrow 1}^{(5)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 10 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{10 \rightarrow 11}^{PH5} = \mu_{10 \rightarrow 11}^{(5)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 11 (H_{ht}) sang trạng thái 10 (H_{mp});

$\mu_{11 \rightarrow 1}^{PH5} = \mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 5 (điều khiển) chuyển tiếp từ trạng thái 11 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV);

5. Đối với phân hệ 6 (thiết bị phụ):

$\lambda_{1 \rightarrow 12}^{PH6} = \lambda_{1 \rightarrow 12}^{(6)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 12 (H_{mp});

$\lambda_{12 \rightarrow 13}^{PH6} = \lambda_{12 \rightarrow 13}^{(12)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 12 (H_{mp}) sang trạng thái 13 (H_{ht});

$\lambda_{1 \rightarrow 13}^{PH6} = \lambda_{1 \rightarrow 13}^{(6)}$ - cường độ hỏng của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 1 (LV) sang trạng thái 13 (H_{ht});

$\mu_{12 \rightarrow 1}^{PH6} = \mu_{12 \rightarrow 1}^{(6)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 12 (H_{mp}) sang trạng thái 1 (LV);

$\mu_{13 \rightarrow 12}^{PH6} = \mu_{13 \rightarrow 12}^{(6)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 13 (H_{ht}) sang trạng thái 12 (H_{mp});

$\mu_{13 \rightarrow 1}^{PH6} = \mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)}$ - cường độ phục hồi của phân hệ 6 (thiết bị phụ) chuyển tiếp từ trạng thái 13 (H_{ht}) sang trạng thái 1 (LV).

Ma trận trạng thái đầy đủ của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3. Ma trận trạng thái đầy đủ của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ.

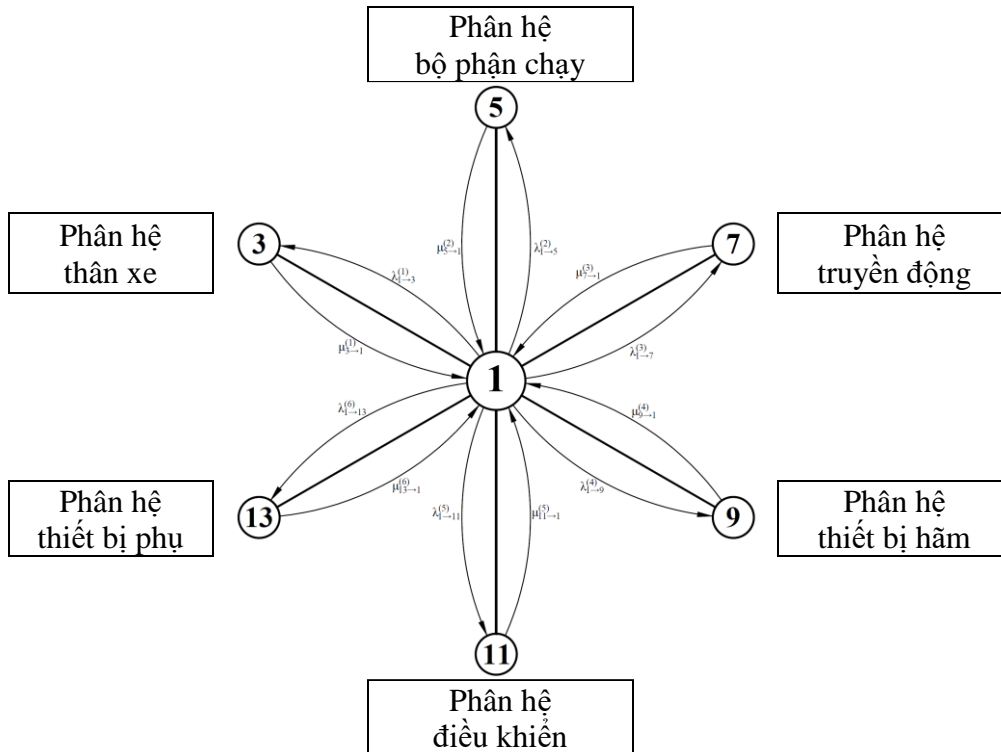
$\sum_{\substack{1 \leq i \leq 13 \\ 2 \leq j \leq 13}} \lambda_{i \rightarrow j}$	$\lambda_{1 \rightarrow 2}^{(1)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 3}^{(1)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 4}^{(2)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 5}^{(2)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 6}^{(3)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 7}^{(3)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 8}^{(4)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 9}^{(4)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 10}^{(5)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 11}^{(5)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 12}^{(6)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 13}^{(6)}$
$\mu_{2 \rightarrow 1}^{(1)}$	$-(\mu_{2 \rightarrow 1}^{(1)} + \lambda_{2 \rightarrow 3}^{(1)})$	$\lambda_{2 \rightarrow 3}^{(1)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)}$	0	$-(\mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)} + \mu_{3 \rightarrow 2}^{(1)})$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu_{4 \rightarrow 1}^{(2)}$	0	0	$-(\mu_{4 \rightarrow 1}^{(2)} + \lambda_{4 \rightarrow 5}^{(2)})$	$\lambda_{4 \rightarrow 5}^{(2)}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)}$	0	0	0	$-(\mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)} + \mu_{5 \rightarrow 4}^{(2)})$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu_{6 \rightarrow 1}^{(3)}$	0	0	0	0	$-(\mu_{6 \rightarrow 1}^{(3)} + \lambda_{6 \rightarrow 7}^{(3)})$	$\lambda_{6 \rightarrow 7}^{(3)}$	0	0	0	0	0	0
$\mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)}$	0	0	0	0	0	$-(\mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)} + \mu_{7 \rightarrow 6}^{(3)})$	0	0	0	0	0	0
$\mu_{8 \rightarrow 1}^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{8 \rightarrow 1}^{(4)} + \lambda_{8 \rightarrow 9}^{(4)})$	$\lambda_{8 \rightarrow 9}^{(4)}$	0	0	0	0
$\mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)}$	0	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)} + \mu_{9 \rightarrow 8}^{(4)})$	0	0	0	0
$\mu_{10 \rightarrow 1}^{(5)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{10 \rightarrow 1}^{(5)} + \lambda_{10 \rightarrow 11}^{(5)})$	$\lambda_{10 \rightarrow 11}^{(5)}$	0	0
$\mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)} + \mu_{11 \rightarrow 10}^{(5)})$	0	0
$\mu_{12 \rightarrow 1}^{(6)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{12 \rightarrow 1}^{(6)} + \lambda_{12 \rightarrow 13}^{(6)})$	$\lambda_{12 \rightarrow 13}^{(6)}$
$\mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-(\mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)} + \mu_{13 \rightarrow 12}^{(6)})$

Hệ phương trình trạng thái đầy đủ của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ thể hiện trong công thức (1):

$$\left. \begin{aligned}
 & - \left(\sum_{\substack{1 \leq i \leq 13 \\ 2 \leq j \leq 13}} \lambda_{i \rightarrow j} \right) P_1 + \mu_{2 \rightarrow 1} P_2^{(1)} + \mu_{3 \rightarrow 1} P_3^{(1)} + \mu_{4 \rightarrow 1} P_4^{(2)} + \mu_{5 \rightarrow 1} P_5^{(2)} + \mu_{6 \rightarrow 1} P_6^{(3)} + \\
 & + \mu_{7 \rightarrow 1} P_7^{(3)} + \mu_{8 \rightarrow 1} P_8^{(4)} + \mu_{9 \rightarrow 1} P_9^{(4)} + \mu_{10 \rightarrow 1} P_{10}^{(5)} + \mu_{11 \rightarrow 1} P_{11}^{(5)} + \mu_{12 \rightarrow 1} P_{12}^{(6)} + \mu_{13 \rightarrow 1} P_{13}^{(6)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 2}^{(1)} P_1 - (\mu_{2 \rightarrow 1}^{(1)} + \lambda_{2 \rightarrow 3}^{(1)}) P_2^{(1)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 3}^{(1)} P_1 + \lambda_{2 \rightarrow 3}^{(1)} P_2^{(1)} - (\mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)} + \mu_{3 \rightarrow 2}^{(1)}) P_3^{(1)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 4}^{(2)} P_1 - (\mu_{4 \rightarrow 1}^{(2)} + \lambda_{4 \rightarrow 5}^{(2)}) P_4^{(2)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 5}^{(2)} P_1 + \lambda_{4 \rightarrow 5}^{(2)} P_4^{(2)} - (\mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)} + \mu_{5 \rightarrow 4}^{(2)}) P_5^{(2)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 6}^{(3)} P_1 - (\mu_{6 \rightarrow 1}^{(3)} + \lambda_{6 \rightarrow 7}^{(3)}) P_6^{(3)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 7}^{(3)} P_1 + \lambda_{6 \rightarrow 7}^{(3)} P_6^{(3)} - (\mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)} + \mu_{7 \rightarrow 6}^{(3)}) P_7^{(3)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 8}^{(4)} P_1 - (\mu_{8 \rightarrow 1}^{(4)} + \lambda_{8 \rightarrow 9}^{(4)}) P_8^{(4)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 9}^{(4)} P_1 + \lambda_{8 \rightarrow 9}^{(4)} P_8^{(4)} - (\mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)} + \mu_{9 \rightarrow 8}^{(4)}) P_9^{(4)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 10}^{(5)} P_1 - (\mu_{10 \rightarrow 1}^{(5)} + \lambda_{10 \rightarrow 11}^{(5)}) P_{10}^{(5)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 11}^{(5)} P_1 + \lambda_{10 \rightarrow 11}^{(5)} P_{10}^{(5)} - (\mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)} + \mu_{11 \rightarrow 10}^{(5)}) P_{11}^{(5)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 12}^{(6)} P_1 - (\mu_{12 \rightarrow 1}^{(6)} + \lambda_{12 \rightarrow 13}^{(6)}) P_{12}^{(6)} = 0 \\
 & \lambda_{1 \rightarrow 13}^{(6)} P_1 + \lambda_{12 \rightarrow 13}^{(6)} P_{12}^{(6)} - (\mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)} + \mu_{13 \rightarrow 12}^{(6)}) P_{13}^{(6)} = 0
 \end{aligned} \right\} (1)$$

3.2. Mô hình trạng thái giới hạn

Nếu không xét đến trạng thái thứ 2, 4, 6, 8, 10, 12, tức là trạng thái hỏng một phần H_{mp} , thì mô hình này được gọi là mô hình trạng thái giới hạn (hình 5).



Hình 5. Mô hình trạng thái giới hạn của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ.

Ma trận trạng thái giới hạn của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Ma trận trạng thái giới hạn của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ.

$-\sum_{j=3,5,\dots,13} \lambda_{1 \rightarrow j}$	$\lambda_{1 \rightarrow 3}^{(1)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 5}^{(2)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 7}^{(3)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 9}^{(4)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 11}^{(5)}$	$\lambda_{1 \rightarrow 13}^{(6)}$
$\mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)}$	$-\mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)}$	0	0	0	0	0
$\mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)}$	0	$-\mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)}$	0	0	0	0
$\mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)}$	0	0	$-\mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)}$	0	0	0
$\mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)}$	0	0	0	$-\mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)}$	0	0
$\mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)}$	0	0	0	0	$-\mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)}$	0
$\mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)}$	0	0	0	0	0	$-\mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)}$

Hệ phương trình trạng thái giới hạn của phương tiện đường sắt đô thị với 6 phân hệ thể hiện trong công thức (2):

$$\left. \begin{aligned} & -\left(\sum_{j=3,5,\dots,13} \lambda_{1 \rightarrow j}\right) P_1 + \mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)} P_3^{(1)} + \mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)} P_5^{(2)} + \mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)} P_7^{(3)} + \mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)} P_9^{(4)} + \mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)} P_{11}^{(5)} + \mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)} P_{13}^{(6)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 3}^{(1)} P_1 - \mu_{3 \rightarrow 1}^{(1)} P_3^{(1)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 5}^{(2)} P_1 - \mu_{5 \rightarrow 1}^{(2)} P_5^{(2)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 7}^{(3)} P_1 - \mu_{7 \rightarrow 1}^{(3)} P_7^{(3)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 9}^{(4)} P_1 - \mu_{9 \rightarrow 1}^{(4)} P_9^{(4)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 11}^{(5)} P_1 - \mu_{11 \rightarrow 1}^{(5)} P_{11}^{(5)} = 0 \\ & \lambda_{1 \rightarrow 13}^{(6)} P_1 - \mu_{13 \rightarrow 1}^{(6)} P_{13}^{(6)} = 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

trong đó:

P_1 - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 1, trạng thái làm việc (độ tin cậy của toàn hệ thống - phương tiện);

$P_3^{(1)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 3, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 1- thân xe;

$P_5^{(2)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 5, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 2 - bộ phận chạy;

$P_7^{(3)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 7, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 3 - truyền động;

$P_9^{(4)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 9, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 4 - thiết bị hãm;

$P_{11}^{(5)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 11, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 5 - điều khiển.

$P_{13}^{(6)}$ - xác suất phương tiện nằm ở trạng thái 13, trạng thái không làm việc do hư hỏng của phân hệ 6 – thiết bị phụ.

Giải hệ phương trình tuyến tính (2) với các ẩn số P_i , $i = 1,3,5,7,9,11,13$ với điều kiện $\sum_{i=1}^{13} P_i = 1$ sau khi thay vào vị trí $\lambda_{i \rightarrow j}^{(k)}$ và $\mu_{j \rightarrow i}^{(k)}$ các giá trị của chúng, sẽ được các xác suất giới hạn hay độ tin cậy của hệ thống.

4. KẾT LUẬN

Mô hình đã xây dựng bao gồm các mô hình trạng thái đầy đủ và trạng thái giới hạn, với các ma trận chuyển tiếp trạng thái và các hệ phương trình xác suất chuyển tiếp trạng thái tương ứng. Mô hình trạng thái giới hạn với 6 phân hệ và 13 trạng thái là cơ sở cho việc xây dựng phần mềm đánh giá độ tin cậy của phương tiện (đoàn tàu metro) trên tuyến đường sắt đô thị Cát Linh - Hà Đông. Việc xây dựng phần mềm cho việc ứng dụng và giải quyết các bài toán cụ thể nêu trên sẽ được tiếp tục trình bày trong các nghiên cứu tiếp theo.

Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng không thể áp dụng trực tiếp phần mềm sẽ xây dựng này cho các tuyến đường sắt đô thị khác ở Việt Nam, chẳng hạn như tuyến Nhổn - Ga Hà Nội hay Bến Thành - Suối Tiên. Lý do đơn giản là, phương tiện hay đoàn tàu metro trên các tuyến đó có cấu hình hoàn toàn khác so với cấu hình đoàn tàu metro Cát Linh - Hà Đông. Để đánh giá độ tin cậy cho phương tiện trên các tuyến khác, cần phải xây dựng các phần mềm riêng biệt phù hợp với đối tượng (đoàn tàu) cụ thể. Việc xây dựng các phần mềm như vậy vẫn cần căn cứ vào cơ sở lý thuyết như đã nêu ở trên, đồng thời có thể tham khảo hoặc kế thừa những nội dung nào đó trong phần mềm xây dựng cho phương tiện trên tuyến Cát Linh – Hà Đông.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Р.Биллнтон, Р. Аллан, Оценка надёжности электро-энергетических систем, Москва, Энергоатомиздат, 1988.
- [2] Дедоборщ В.Г., Суторихин Н.Б., Надёжность АМТС, Москва, Радио и связь, 1989.
- [3] Ионин А.А., Надёжность систем тепловых сетей, Москва, Стройиздат, 1989.
- [4] Червоный А. А., Лукьященко В. И., Котин Л. В., Надёжность сложных систем, “Машиностроение”, Москва, 1976.
- [5] Пузанков А.Д., Надёжность конструкций локомотивов, МИИТ, Москва, 1999.
- [6] Пузанков А.Д., Надёжность локомотивов, МИИТ, Москва, 2006.
- [7] Шишков А.Д, Народнохозяйственная эффективность повышения надёжности технических средств железнодорожного транспорта, Москва, "Транспорт", 1986.
- [8] Đỗ Đức Tuấn, Đánh giá các chỉ tiêu vận dụng đầu máy, toa xe trong quá trình khai thác, Bài giảng cao học ngành Kỹ thuật có khí động lực, chuyên sâu Kỹ thuật đầu máy, toa xe, Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, 2016.
- [9] Đỗ Đức Tuấn, Vũ Văn Hiệp, Thân Đức Nam, Đánh giá ảnh hưởng độ tin cậy của các thiết bị kỹ thuật tới hiệu quả hoạt động của hệ thống vận tải đường sắt, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71 (2020) 956-972. <https://doi.org/10.47869/tcsj.71.8.7>
- [10] Nguyễn Đức Toàn, Đỗ Đức Tuấn, Xây dựng mô hình tổng quát đánh giá độ tin cậy của hệ thống kỹ thuật phức hợp, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 74 (2023) 329-345. <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.3.8>

[11]. Công ty TNHH Thiết bị đoàn tàu đường sắt Bắc Kinh, Hướng dẫn sử dụng và bảo trì tàu điện Dự án đường sắt đô thị tuyến Cát Linh - Hà Đông, Quyển 1 (Chương 1: Tổng quan về tàu; Chương 2: Thân tàu và nội thất; Chương 3: Hệ thống điều hòa; Chương 4: Thiết bị đường xuyên suốt; Chương 5: Thiết bị móc tàu và giảm sóc; Chương 6: Hệ thống cửa thoát hiểm khẩn cấp; Chương 7: Hệ thống cửa hông khoang khách; Chương 8: Hệ thống cửa hông buồng lái), 2018.

[12]. Công ty TNHH Thiết bị đoàn tàu đường sắt Bắc Kinh, Hướng dẫn sử dụng và bảo trì tàu điện Dự án đường sắt đô thị tuyến Cát Linh - Hà Đông, Quyển 2 (Chương 9: Bố trí điện buồng lái; Chương 10: Bố trí điện khoang khách; Chương 11: Bố trí điện bên dưới toa xe; Chương 12: Hệ thống điều khiển và giám sát đoàn tàu; Chương 13: Hệ thống kéo dẫn và phanh hãm điện), 2018.

[13]. Công ty TNHH Thiết bị đoàn tàu đường sắt Bắc Kinh, Hướng dẫn sử dụng và bảo trì tàu điện Dự án đường sắt đô thị tuyến Cát Linh - Hà Đông, Quyển 3 (Chương 14: Hệ thống hãm khí và cấp khí; Chương 15: Hệ thống nguồn điện phụ trợ; Chương 16: Hệ thống phát thanh đoàn tàu; Chương 17: Thiết bị vô tuyến gắn trên tàu; Chương 18: Giá chuyển hướng), 2018.

[14]. Phan Văn Khôi, Cơ sở đánh giá độ tin cậy, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2001.

[15]. Đỗ Đức Tuấn, Độ tin cậy và tuổi bền máy, NXB Giao thông vận tải, Hà Nội, 2013.