



## OPTIMIZING THE URBAN TRAIN SPEED TO MINIMIZE THE ENERGY CONSUMPTION AND COMFORT

Tran Van Khoi\*, An Thi Hoai Thu Anh, Dang Viet Phuc

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 17/11/2020

Revised: 20/03/2021

Accepted: 22/03/2021

Published online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.7>

\*Corresponding author

Email: tvkhai.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

**Abstract.** Energy efficiency is a very important factor. Due to limited energy resources, improving energy efficiency has been included in any government policy. Railway systems consume a huge amount of energy, so the optimization of energy efficiency has received a lot of attention from railway operators and researchers. This paper presents a method to determine the optimal train speed at each location along railway between two stations. The goal is to minimize the total energy consumed by the train during the journey, which determined by the distance of two stations and running time. Practical factors such as vertical slope, curve segments, tunnels, and speed limit sections are considered and calculated in the algorithm. The energy-distance model is used with with the state variables including of time and speed according to the distance. The control variable of the acceleration was proposed to actively control the value of the train's traction. Based on the built-in energy optimum control model, the dynamic programming algorithm is applied to find the corresponding optimal speed at each location along the railway. The section between Cat Linh station and La Thanh station in the urban railway No. 2 Cat Linh - Ha Dong (Hanoi, Vietnam) was selected to test the simulation results of the algorithm. The proposed method will optimize the power consumption of the train, contributing to improving energy efficiency in the urban railway system.

**Keywords:** Urban railway transit, optimal train speed curve, energy consumption optimization, dynamic programming, optimization algorithm.

© 2021 University of Transport and Communications



## TỐI ƯU TỐC ĐỘ CHẠY TÀU ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ ĐỂ TỐI THIỂU HÓA ĐIỆN NĂNG TIÊU THỤ VÀ ÊM DỊU CỦA HÀNH KHÁCH

Trần Văn Khôi\*, An Thị Hoài Thu Anh, Đặng Việt Phúc

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: 17/11/2020

Ngày nhận bài sửa: 20/03/2021

Ngày chấp nhận đăng: 22/03/2021

Ngày xuất bản Online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.7>

\*Tác giả liên hệ

Email: tvkhai.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

**Tóm tắt.** Sử dụng năng lượng hiệu quả đang là một vấn đề rất quan trọng. Do các nguồn năng lượng bị hạn chế nên việc nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng đã được đưa vào bất kỳ chính sách nào của chính phủ. Hệ thống đường sắt tiêu tốn một năng lượng rất lớn, do đó việc tối ưu hóa hiệu quả sử dụng năng lượng đã và đang nhận được rất nhiều sự quan tâm của các nhà khai thác đường sắt và các nhà nghiên cứu. Bài báo trình bày phương pháp xác định tốc độ chạy tàu tối ưu tại từng điểm trong khu gian giữa hai nhà ga. Mục tiêu là tối thiểu hóa tổng năng lượng đoàn tàu tiêu thụ trong hành trình của khu gian được quy định bởi khoảng cách khu gian và thời gian chuyển động. Các yếu tố thực tiễn trên tuyến đường như độ dốc trắc dọc, đoạn đường cong, đường hầm, các đoạn giới hạn tốc độ đều được xem xét tính toán trong thuật toán. Mô hình năng lượng theo quãng đường được đề xuất sử dụng với biến trạng thái là thời gian theo quãng đường và tốc độ theo quãng đường. Biến điều khiển được đề xuất sử dụng là gia tốc để điều khiển một cách chủ động giá trị lực kéo đoàn tàu và độ êm dịu chuyển động. Dựa trên mô hình điều khiển tối ưu năng lượng đã xây dựng, thuật toán quy hoạch được áp dụng để tìm ra tốc độ tối ưu tương ứng trên từng vị trí tuyến đường đáp ứng điều kiện làm việc an toàn và tối thiểu hóa năng lượng tiêu thụ. Khu gian giữa ga Cát Linh và ga La Thành trong tuyến đường sắt đô thị số 2 Cát Linh – Hà Đông được lựa chọn để kiểm nghiệm kết quả mô phỏng của thuật toán. Với phương pháp đề xuất sẽ tối ưu hóa được điện năng tiêu thụ của đoàn tàu, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng trong hệ thống đường sắt đô thị.

**Từ khóa:** Tàu điện đô thị, Tối ưu đường cong tốc độ chạy tàu, Tối thiểu hóa điện năng đoàn tàu tiêu thụ, Quy hoạch động, Thuật toán tối ưu.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những thập kỷ gần đây, với sự phát triển kinh tế, gia tăng dân số và đô thị hóa, lĩnh vực giao thông vận tải có ảnh hưởng trực tiếp đến cả lĩnh vực năng lượng và môi trường. Do đó, các biện pháp tiết kiệm năng lượng đã và đang được quan tâm thực hiện nghiêm ngặt hơn. Tàu điện có sức trở hành khách lớn, mang lại hiệu quả cao hơn các phương tiện vận tải khác, do vậy đã được quan tâm nhiều nhất trong những năm gần đây. Các hệ thống tàu điện có mức tiêu thụ năng lượng cao, ngay cả những khoản tiết kiệm nhỏ được thực hiện trong các hệ thống này cũng rất đáng kể vì chúng đóng góp rất nhiều cho môi trường và nền kinh tế.

Có một số phương pháp để giảm tiêu thụ điện năng trong các hệ thống này. Một số trong số này liên quan đến việc điều khiển chế độ năng lượng chạy tàu và một số khác liên quan đến các chức năng tiện nghi khác nhau như sưởi ấm và làm mát, v.v. Các phương pháp dựa trên việc điều khiển chế độ năng lượng chạy tàu có thể được nhóm thành hai nhóm phương pháp riêng biệt. Nhóm đầu tiên được gọi là chiến lược tiết kiệm điện năng và nhằm mục đích giảm mức tiêu thụ điện năng bằng cách tối ưu hóa đường cong tốc độ của các đoàn tàu. Nhóm còn lại được gọi là công nghệ thu hồi năng lượng và nhằm mục đích tái sử dụng động năng sinh ra trong quá trình phanh bằng cách chuyển nó thành năng lượng điện. Năng lượng này, được gọi là năng lượng tái tạo, có thể được lưu trữ trong các hệ thống lưu trữ khác nhau và được sử dụng cho các nhu cầu khác nhau trong đoàn tàu hoặc có thể được chuyển sang các đoàn tàu khác trên tuyến.

Trong số những nghiên cứu sử dụng các chiến lược tiết kiệm năng lượng, rất nhiều các mô hình đã được đề xuất và nhiều thuật toán tối ưu đã được áp dụng. Kim và các cộng sự đề xuất một phương pháp tối ưu hóa mới xem xét thời gian hoạt động và tiêu thụ điện năng bằng cách sử dụng thuật toán tiến hóa [1]. Một mô hình tìm kiếm quỹ đạo chạy tàu dựa trên khoảng cách đã được đề xuất bởi Lu và các cộng sự [2]. Để xác định tốc độ tối ưu dựa trên mô hình đã đề xuất, Lu tiến hành áp dụng ba thuật toán tối ưu bao gồm thuật toán tiến hóa, thuật toán di truyền, và thuật toán quy hoạch động. Độ bền vững của kết quả tìm kiếm được xác định là tốt hơn khi có sự kết hợp của các thuật toán. Ghaviha và các cộng sự [3] đã phát triển một mô hình năng lượng có tính đến tổn thất của hệ thống phụ trợ với mục tiêu ứng dụng cho hệ thống tư vấn lái tàu. Bằng cách sử dụng thuật toán quy hoạch động, Ghaviha đã xác định được các giá trị tham số điều khiển tối ưu tại từng thời điểm trên cơ sở xem xét các chế độ phụ tải đoàn tàu, các chế độ điều khiển đoàn tàu. Trong khi đó, Montrone và các cộng sự [4] tập trung đi xác định thời gian chạy tàu giúp tối ưu hóa tiêu thụ điện năng cho định nghĩa thời gian biểu của đường sắt. Cũng ứng dụng thuật toán di truyền, Pu cùng các cộng sự [5] đề xuất phân tách hành trình trong khu gian làm nhiều phân đoạn. Trước tiên đi xác định vị trí điểm vận hành tối ưu của đoàn tàu để thực hiện phân đoạn, sau đó thực hiện quá trình xác định tốc độ tối ưu tại từng điểm trong phân đoạn đó. Chuang và cộng sự ứng dụng mạng nơ ron nhân tạo để tính toán tốc độ chạy tàu tối ưu để giảm thiểu cả mức tiêu thụ điện năng và thời gian chuyển động [6]. Xem xét vấn đề độ chính xác của thời gian hành trình, Cucala và các cộng sự [7] đã thiết kế các lịch trình tiết kiệm điện năng cho tàu cao tốc. Bên cạnh đó, Li và các cộng sự tập trung phát triển một công

cụ tối ưu hóa quỹ đạo cho hệ thống tư vấn lái tàu bằng cách kết hợp kỹ thuật tối ưu hóa offline và trực tuyến với các chiến lược khác nhau [8]. Một mô hình truyền tham số từ số liệu thực được Huang cùng các cộng sự [9] đề xuất kết hợp cùng với thuật toán tìm kiếm heuristic tích hợp để xác định profile tốc độ tối ưu cho đoàn tàu với mong muốn khắc phục được các sai số do độ chính xác của các phương trình thực nghiệm.

Bài báo này cũng tập trung vào mục tiêu tối thiểu hóa mức tiêu thụ điện năng của đoàn tàu bằng cách tối ưu hóa đường cong tốc độ chuyển động của đoàn tàu trong một khu gian. Trong mô hình năng lượng theo thời gian, vị trí đoàn tàu sẽ được tính toán sau khi đã xác định được giá trị tốc độ ở mỗi bước thời gian. Do các điều kiện tuyến đường và điều kiện giới hạn đều liên quan tới vị trí đoàn tàu dọc tuyến đường, nên trong mỗi bước đều cần kiểm tra các điều kiện có liên quan tới vị trí và quá trình tính toán này sẽ được lặp lại cho đến khi tìm được giá trị tốc độ cũng như giá trị điều khiển tối ưu. Trong bài báo này, mô hình năng lượng theo thời gian được chuyển đổi sang mô hình năng lượng theo vị trí, các tham số tuyến đường và các điều kiện giới hạn liên quan tới tuyến đường được nhập trực tiếp một lần, từ đó không chỉ giảm được sai số vị trí trong tính toán mà còn giảm được khối lượng tính toán và thời gian trong quá trình tìm kiếm giá trị tối ưu. Bên cạnh đó, trong bài báo này biến điều khiển được lựa chọn là gia tốc sẽ cho phép điều khiển chủ động lực kéo đoàn tàu tại từng vị trí để phát huy công suất tối ưu trong các chế độ vận hành phù hợp với từng đoạn đường có các đặc điểm và các điều kiện giới hạn cụ thể; hay nói cách khác, chế độ vận hành tối ưu được xác định tùy vào điều kiện quãng đường và các điều kiện giới hạn. Khi đó, chế độ tăng tốc không chỉ ở giai đoạn khởi hành rời ga và giá trị lực kéo không phải lúc nào cũng là cực đại; chế độ hãm không chỉ diễn ra trong giai đoạn đoàn tàu đến ga đích; và tương tự vậy chế độ tốc độ không đổi, chế độ thả trôi cũng có thể diễn ra trên nhiều đoạn trong toàn hành trình khu gian. Ngoài ra, điều khiển gia tốc còn có thể trực tiếp khống chế độ êm dịu chuyển động của đoàn tàu, như vậy ngoài mục tiêu tiết kiệm năng lượng đảm bảo an toàn vận hành còn đảm bảo sự thoải mái cho hành khách.

Trên cơ sở mô hình năng lượng theo vị trí, biến trạng thái được đặt là tốc độ theo vị trí và thời gian chạy tàu theo vị trí. Giá trị tốc độ tối ưu tại từng vị trí chuyển động của đoàn tàu trong khu gian được xác định dựa trên nguyên lý truy hồi của phương pháp quy hoạch động. Khu gian Cát Linh – La Thành trong tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông được lựa chọn để kiểm nghiệm và hiệu chỉnh cho phương pháp đề xuất.

## 2. NĂNG LƯỢNG ĐIỆN KÉO

### 2.1. Phương trình động học đoàn tàu

Chuyển động của đoàn tàu có thể được mô tả bằng phương trình động học cơ bản như sau:

$$m^* a = F_k - F_v - F_\alpha - F_R - F_q - F_s \quad (1)$$

trong đó:

$m$  – khối lượng đoàn tàu (kg)

$a$  – gia tốc đoàn tàu ( $m/s^2$ )

$F_k$  – lực kéo (hãm) của đầu máy (N)

$F_v$  – lực cản cơ bản của đoàn tàu (N) gây ra bởi ma sát và động học khí quyển, được ước lượng theo công thức thực nghiệm của Davis.

$$F_v = (A + B * v + C * v^2) * m * g * 10^{-3} \quad (2)$$

trong đó:

$v$  - vận tốc đoàn tàu (km/h),

$A, B, C$  – các hệ số thực nghiệm

$g$  – gia tốc trọng trường (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$F_\alpha$  – lực cản gây ra do độ dốc yếu tố trắc dọc (N), áp dụng tính theo công thức (4) trong tiêu chuẩn TB/T 1407.1-2018 [10].

$$F_\alpha = \alpha * m * g * 10^{-3} \quad (3)$$

trong đó:

$\alpha$  – độ dốc của đường (‰)

$m$  – khối lượng đoàn tàu (kg)

$F_R$  – lực cản gây ra do đường cong, áp dụng tính theo công thức (5) trong tiêu chuẩn TB/T 1407.1-2018 [10].

$$F_R = \frac{600}{R} * m * g * 10^{-3} \quad (4)$$

trong đó  $R$  là bán kính cong của đường (m)

$F_q$  – lực cản khi khởi động (N), áp dụng tính theo tiêu chuẩn TB/T 1407.1-2018 [10].

$F_q = 5 * m * g * 10^{-3}$ , tính cho ổ bi trượt.

$F_q = 3,5 * m * g * 10^{-3}$ , tính cho ổ bi lăn.

$F_s$  – lực cản khi chuyển động trong đường hầm (N), áp dụng tính theo công thức (7) trong tiêu chuẩn TB/T 1407.1-2018 [10].

$$F_s = w_s * m * g * 10^{-3} \quad (5)$$

Trong đó  $w_s$  là độ dốc đường hầm tính theo phần nghìn.

## 2.2. Năng lượng điện kéo

Năng lượng đoàn tàu tiêu thụ (sản sinh) trong hành trình khu gian bằng tích công suất đoàn tàu và thời gian chuyển động hết hành trình khu gian. Công suất được tính toán theo lực kéo và vận tốc của đoàn tàu, khi đó năng lượng đoàn tàu tiêu thụ được xác định theo công thức (6).

$$E = \int_{ts}^{tf} F_k * v dt = \int_{ts}^{tf} (m * a + F_v + F_\alpha + F_R + F_q + F_s) * v dt \quad (6)$$

trong đó:

$ts$  – thời gian bắt đầu đoàn tàu chuyển động từ ga xuất phát của khu gian (giây)

$tf$  – thời gian đoàn tàu tới ga đích của khu gian (giây)

$v$  – vận tốc đoàn tàu (m/s)

### 3. TỐI ƯU TỐC ĐỘ CHẠY TÀU ĐỂ CỰC TIỂU HÓA NĂNG LƯỢNG ĐIỆN KÉO

#### 3.1. Mô hình tối thiểu hóa năng lượng điện kéo

Vấn đề tối ưu tốc độ chạy tàu trong khu gian để đảm bảo đúng thời gian chạy tàu quy định được xác định là vấn đề điều khiển chế độ vận hành đầu máy hiệu quả để khi đoàn tàu chuyển động theo đường cong tốc độ yêu cầu sẽ đạt được hiệu quả năng lượng cao nhất. Khi đó hàm mục tiêu sẽ là tối thiểu hóa tổng năng lượng đoàn tàu tiêu thụ khi chuyển động hết hành trình khu gian.

Trong công thức (6), năng lượng được tính theo lực kéo và tốc độ của đoàn tàu tại mỗi thời điểm chuyển động trên đoạn đường khu gian. Thay thế  $dt = dx/v$ , khi đó năng lượng đoàn tàu sẽ được tính theo mỗi vị trí dọc tuyến đường như mô tả bởi công thức (7).

$$E = \int_{ts}^{tf} F_k * v dt = \int_{xs}^{xf} F_k dx = \int_{xs}^{xf} (m * a + F_v + F_\alpha + F_R + F_q + F_s) dx \quad (7)$$

trong đó:

$xs$  – tọa độ vị trí tại ga xuất phát của khu gian

$xf$  – tọa độ vị trí tại ga đích của khu gian

$dx$  – sai phân vị trí

Từ công thức (7), mô hình tối ưu tốc độ chạy tàu để cực tiểu hóa năng lượng đoàn tàu tiêu thụ khi chuyển động trong hành trình khu gian được xây dựng với hàm mục tiêu, phương trình trạng thái và các điều kiện ràng buộc như mô tả ở công thức (8). Trong mô hình đề xuất, biến điều khiển được lựa chọn là gia tốc đoàn tàu; thời gian và vận tốc là các biến trạng thái; biến độc lập sẽ là quãng đường dịch chuyển.

$$\begin{aligned} \min E &= \min \int_{xs}^{xf} (m * u + F_v + F_\alpha + F_R + F_q + F_s) dx \\ dt &= \frac{1}{v} dx \\ dv &= u dt = \frac{u}{v} dx \\ t(xs) &= ts; t(xf) = tf; v(xs) = v_0; v(xf) = v_n \\ v_{\min} &\leq v \leq v_{\lim} \\ u_{\min} &\leq u \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó:

$u$  – là gia tốc được lựa chọn làm biến điều khiển

$t, v$  – là thời gian và vận tốc được lựa chọn làm biến trạng thái

$v_{\lim}$  – tốc độ giới hạn tại từng vị trí dọc quãng đường

$v_{\min}$  – tốc độ tối thiểu tại từng vị trí dọc quãng đường

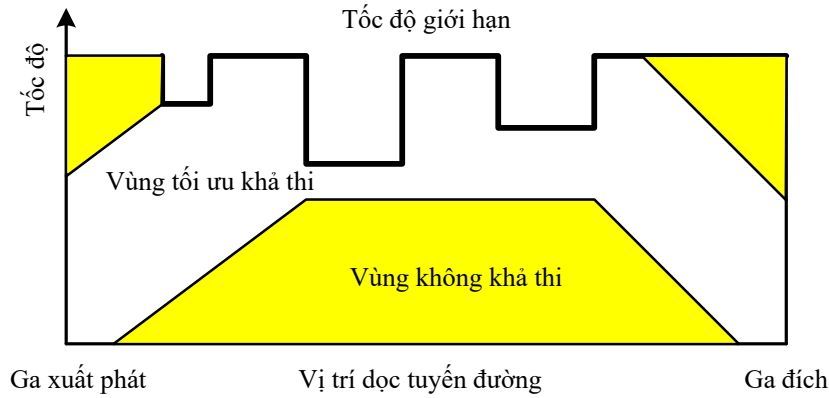
$u_{\min}$  – gia tốc tối thiểu cho phép vận hành tại từng vị trí dọc quãng đường

$u_{\max}$  – gia tốc tối đa cho phép vận hành tại từng vị trí dọc quãng đường

$v_0$  – tốc độ tính cho bước đầu tiên, được tính theo khoảng cách bước đầu tiên và gia tốc khởi động cực đại.

$v_n$  – tốc độ tính cho bước cuối cùng, được tính theo khoảng cách bước cuối cùng và gia tốc hãm cực đại.

Trong mô hình năng lượng theo vị trí, với tốc độ giới hạn tại từng điểm dọc quãng đường đã biết thì rất dễ xác định được phạm vi khả thi của tốc độ cũng như của gia tốc, từ đó sẽ giảm thiểu được không gian biến trạng thái và không gian biến điều khiển, giúp tăng tốc độ thuật toán tìm kiếm được phương án tối ưu.



Hình 1. Phạm vi giới hạn vùng tối ưu khả thi.

### 3.2. Thuật toán tối thiểu năng lượng theo nguyên lý truy hồi

Vấn đề tìm một giá trị khả thi của biến điều khiển trong một hệ thống để trạng thái hệ thống bám theo một quỹ đạo mong muốn trong một khoảng giá trị với mục tiêu giảm thiểu hàm chi phí có thể được giải quyết hiệu quả bằng các nguyên lý tối ưu cũng như các thuật toán tối ưu. Phổ biến được áp dụng như nguyên lý Pontryagin, thuật toán tìm kiếm Heuristic (nguyên lý vét cạn thông minh, nguyên lý tham lam, nguyên lý thử tự), thuật toán quy hoạch động, thuật toán nơron. Trong bài báo này nhóm tác giả áp dụng thuật toán quy hoạch động để xác định đường cong tốc độ tối ưu. Trình tự quy hoạch động theo phương pháp truy hồi được thực hiện như sau:

Giả sử đặt  $\pi = \{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}\}$  là tập giá trị biến điều khiển. Hàm giá trị khi sử dụng  $\pi$  ứng với trạng thái đầu tiên  $v(0) = v_0$  sẽ là:

$$J_{\pi}(v_0) = g_N(v_N) + \sum_{k=0}^{N-1} (h_k(v_k, u_k)) \quad (9)$$

trong đó:

$g_N(v_N)$  là giá trị hàm mục tiêu tại điểm cuối

$h_k(v_k, u_k)$  là giá trị hàm mục tiêu khi áp dụng điều khiển  $u_k(v_k)$  tại  $v_k$

Giá trị biến điều khiển tối ưu  $\pi^0$  sẽ là giá trị mà hàm mục tiêu  $J_{\pi}$  đạt giá trị nhỏ nhất.

$$J^0(v_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_{\pi}(v_0) \quad (10)$$

trong đó  $\Pi$  là tập các giá trị khả thi.

Dựa trên nguyên tắc tối ưu hóa, thuật toán quy hoạch động thực hiện ước lượng giá trị tối ưu của hàm mục tiêu  $J_k(v^i)$  tại tất cả các điểm trong không gian trạng thái bởi thủ tục truy hồi:

(1) Bước tính hàm giá trị tại điểm cuối:

$$J_N(v^i) = g_N(v^i) \quad (11)$$

(2) Bước tính hàm giá trị cho  $k=N-1$  về 0:

$$J_k(v^i) = \min_{u_k \in \pi} \{h_k(v^i, u_k) + J_{k+1}(F_k(v^i, u_k))\} \quad (12)$$

Khi xác định được  $J_k(v^i)$  tương ứng sẽ tìm được giá trị biến điều khiển tối ưu  $u_k$  và giá trị vận tốc tối ưu  $v$  tại điểm  $k$ .

Trong thuật toán xây dựng dựa trên nguyên lý truy hồi theo phương pháp quy hoạch động, để tăng tốc độ tính toán, không gian biến trạng thái và không gian biến điều khiển được giới hạn theo từng bước tính, cụ thể:

$$\begin{aligned} v_k^i &= [v_k^{\min}, \dots, v_k^{\max}] \\ t_k^i &= [t_k^{\min}, \dots, t_k^{\max}] \\ u_k^i &= [u_k^{\min}, \dots, u_k^{\max}] \end{aligned} \quad (13)$$

### 3.3. Kết quả mô phỏng

Phương pháp đề xuất được xây dựng dựa trên chương trình mô phỏng Matlab thực hiện theo thuật toán quy hoạch động đường cong tốc độ trên khu gian từ Ga Cát Linh tới Ga La Thành theo cả hai hướng. Thông số đoàn tàu, khoảng cách khu gian, thời gian hành trình, và các thông số giới hạn được mô tả trên Bảng 1. Profile tuyến đường khu gian Cát Linh – La Thành được minh họa tương ứng trên Hình 2.

Trong mô hình mô phỏng lựa chọn phương tiện đoàn tàu do Trung Quốc sản xuất, các hằng số thực nghiệm trong công thức (2) được tra cứu trong tài liệu tiêu chuẩn TB/T 1407.1-2018 [10], tương ứng với các giá trị cụ thể:  $A=1,75$ ;  $B=0,0234$ ;  $C=0,000184$ .

Tốc độ giới hạn do bán kính cong của đoạn đường được tính bởi công thức (14):

$$V_{\lim} = \sqrt{6,333 * R} \quad (14)$$

trong đó  $R$  là bán kính của đoạn đường cong (m), và  $V_{\lim}$  là tốc độ giới hạn (km/h).

Bảng 1. Thông số cơ bản của đoàn tàu và tuyến đường.

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Khối lượng toa xe động cơ và hành khách	tấn	2x37,02
Khối lượng toa xe không động cơ và hành khách	tấn	2x34,16
Khoảng cách Cát Linh – La Thành	m	931
Thời gian hành trình Cát Linh – La Thành	giây	78
Thời gian hành trình La Thành – Cát Linh	giây	83
Tốc độ vận hành lớn nhất	m/s	22
Gia tốc lớn nhất	m/s <sup>2</sup>	1,1
Gia tốc hãm dừng lớn nhất	m/s <sup>2</sup>	-1,4



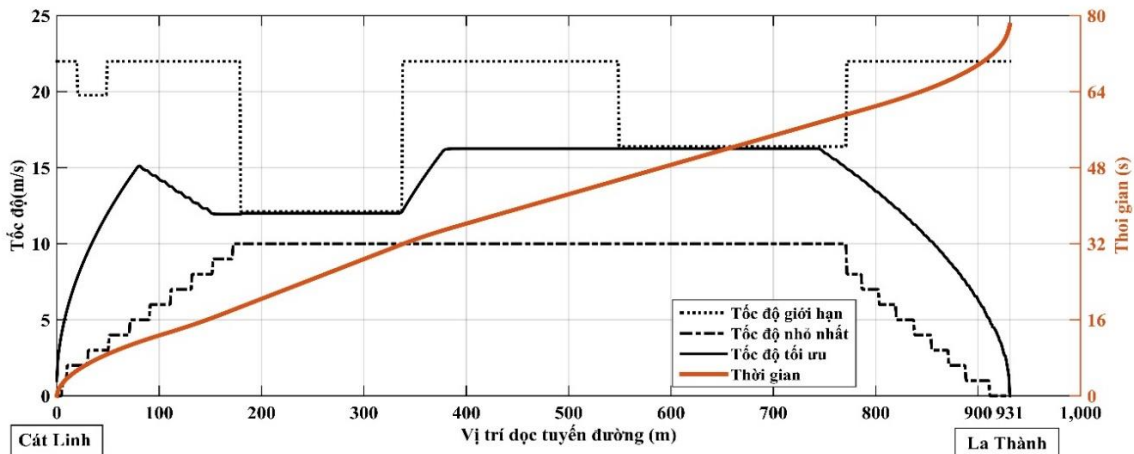
GA CÁT LINH						GA LA THÀNH	
0.0	5.0	11.0	3.0	17.0	0.0		
150.0	150.0	200.0	220.0	200.0	170.0		
L-0,0 R-800 Ls-71	L-60,60 R-300 Ls-158	L-20,20 R-2500 Ls-73	L-70,70 R-550 Ls-172	RAY TRÁI			
L-20,20 R-2000 Ls-62	L-60,60 R-300 Ls-158	L-19,19 R-2490 Ls-73	L-70,70 R-553 Ls-173	RAY PHẢI			
K0	1	2	3	4	5	6	7 8 9

Hình 2. Profile tuyến đường đoạn Ga Cát Linh – Ga La Thành.

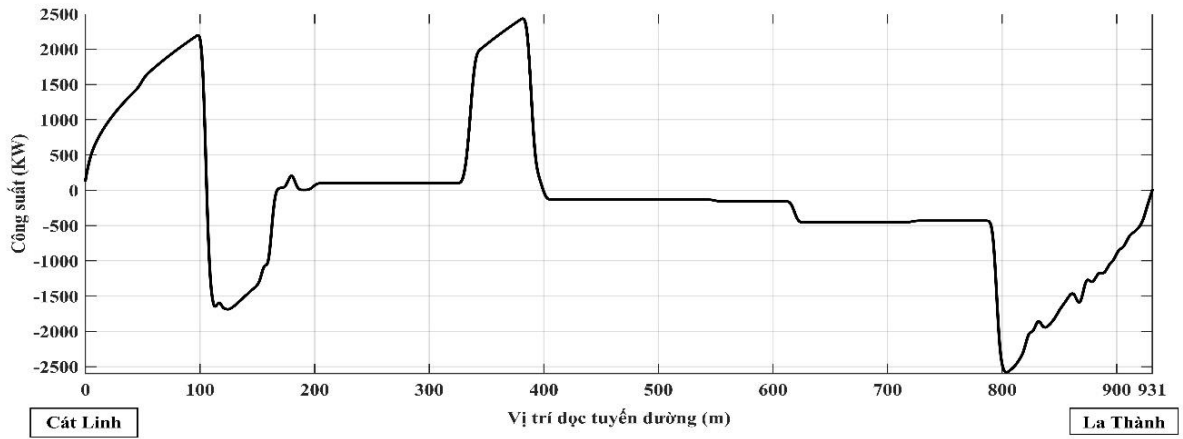
Dựa trên các thông số đoàn tàu, khoảng cách khu gian, thời gian hành trình, cũng như các thông số về trở lực do độ cong và độ dốc của đoạn đường, thuật toán quy hoạch động được thực hiện. Kết quả xác định được đường cong tốc độ tối ưu của đoàn tàu khi chuyển động trên hành trình từ Ga Cát Linh tới Ga La Thành như minh họa trên Hình 3. Trong khoảng cách hành trình khu gian với tổng độ dài 931 (m) có hai đoạn bị giới hạn tốc độ tương ứng từ vị trí 180 (m) tới 338 (m) với tốc độ tối đa cho phép là 12,11 (m/s), và từ vị trí 550 (m) tới 772 (m) tốc độ giới hạn sẽ là 16,39 (m/s). Kết quả quy hoạch động tốc độ chuyển động minh họa trên Hình 3 luôn đảm bảo được mức tốc độ trong phạm vi giới hạn. Trong Hình 3 cũng đồng thời mô tả thời gian mà đoàn tàu chuyển động dọc hành trình khu gian. Kết thúc hành trình ở vị trí 931 (m) tại Ga La Thành, thời gian hành trình theo quy hoạch động đạt giá trị 78,14 (giây).

Để đạt được mục tiêu tối thiểu hóa năng lượng trong toàn hành trình chuyển động của khu gian, biến điều khiển được điều chỉnh để khống chế công suất phù hợp tại từng đoạn trên toàn khu gian. Chi tiết về giá trị và sự biến đổi của công suất đoàn tàu dọc hành trình từ ga Cát Linh tới ga La Thành được minh họa trên Hình 4 với tổng năng lượng tiêu hao là 341,677 (KJ). Hình 5 mô tả các thành phần lực cản và lực kéo cần thiết đoàn tàu cần phát huy tại mỗi vị trí dọc tuyến đường.

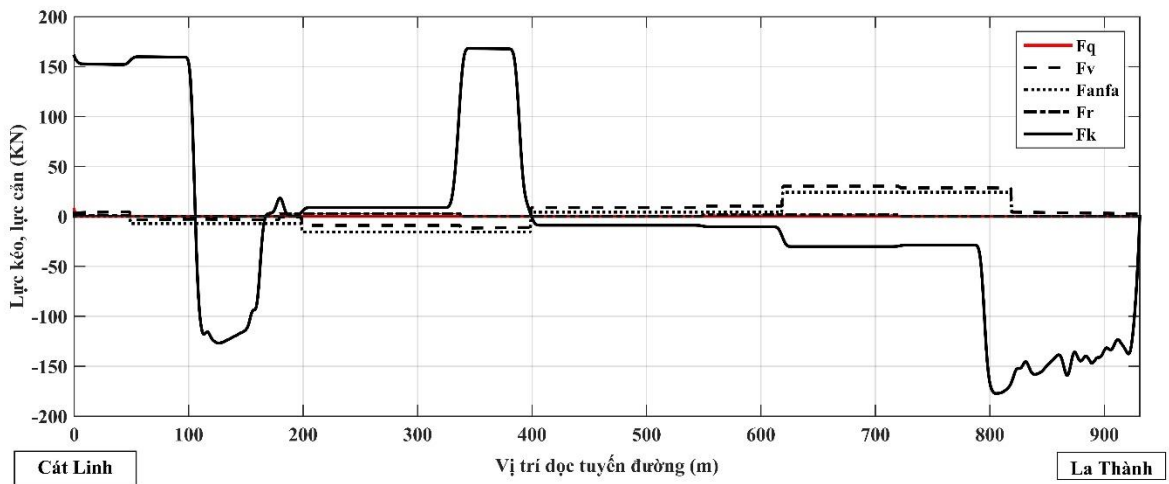
Một cách tương tự, trong hành trình ngược lại đi từ Ga La Thành về Ga Cát Linh với các thông số tuyến đường như minh họa trên Hình 2. Các vị trí đường cong tương tự hướng hành trình từ ga Cát Linh tới ga La Thành nhưng bán kính cong có sự khác biệt tuy là không nhiều, trong khi thời gian hành trình yêu cầu hoàn thành ở mức 83 (giây). Chi tiết về đường cong tốc độ tối ưu, thời gian tại từng vị trí chuyển động trong hành trình khu gian, và công suất tại từng vị trí dọc tuyến đường được minh họa trên Hình 6 và Hình 7.



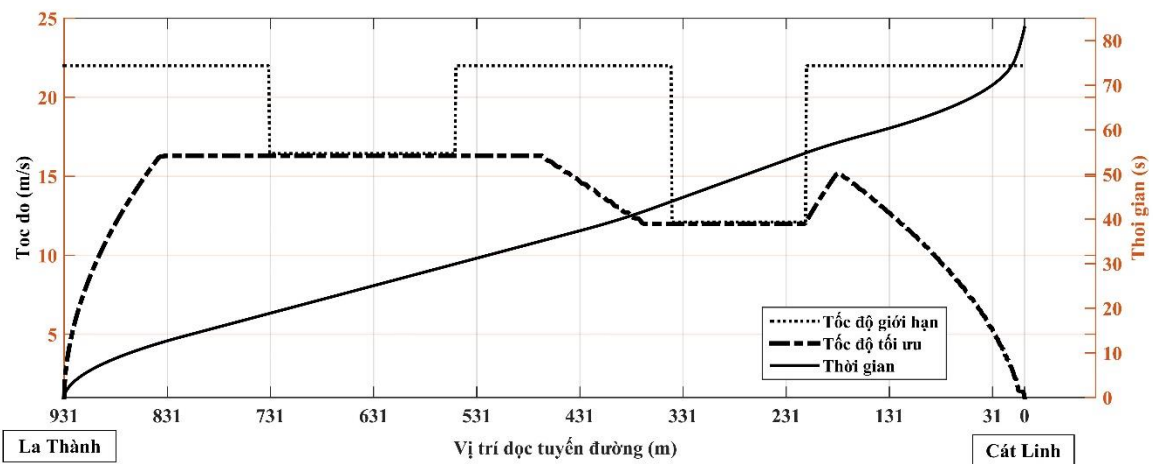
Hình 3. Đồ thị tốc độ, thời gian chạy tàu từ ga Cát Linh tới ga La Thành.



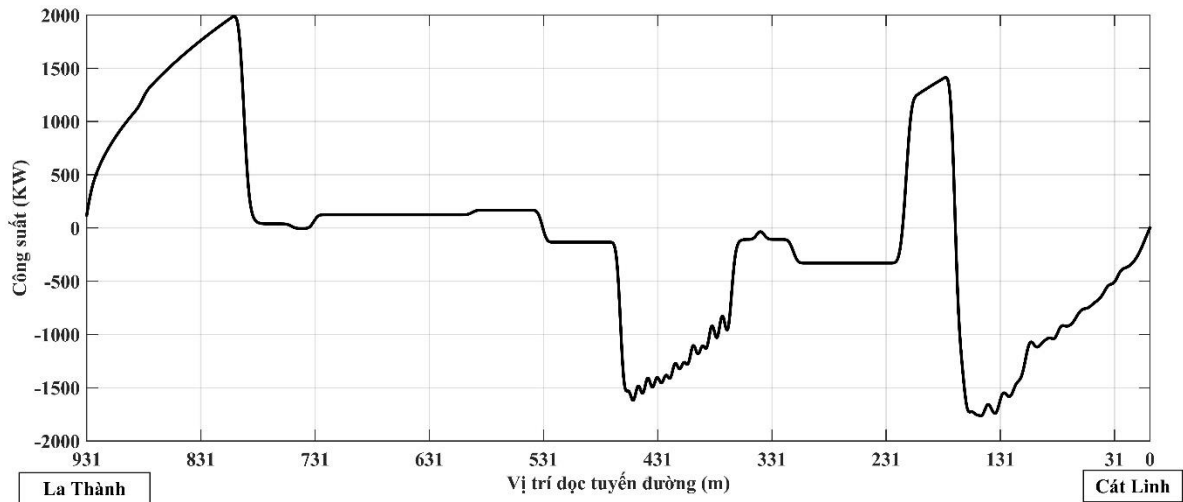
Hình 4. Công suất dọc hành trình từ ga Cát Linh tới ga La Thành.



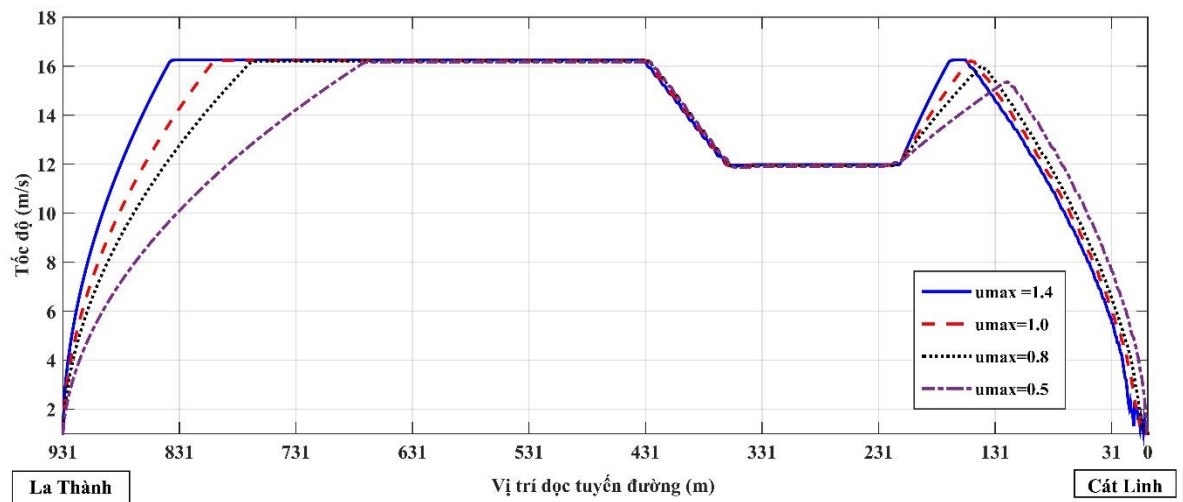
Hình 5. Đồ thị các thành phần lực theo vị trí hành trình từ ga Cát Linh tới ga La Thành.



Hình 6. Đồ thị tốc độ, thời gian chạy tàu từ ga La Thành về ga Cát Linh.



Hình 7. Công suất dọc hành trình từ ga La Thành về ga Cát Linh.



Hình 8. Tốc độ tối ưu theo giới hạn gia tốc.

Trong bài báo này, biến điều khiển lựa chọn là gia tốc để kiểm soát sự êm dịu vận hành trên toàn hành trình. Trong phạm vi độ êm dịu cho phép, phạm vi giá trị của biến điều khiển có ý nghĩa quan trọng quyết định tính khả thi, giá trị tối ưu và thời gian thực hiện thuật toán. Hình 8 mô tả bốn giải pháp tốc độ tối ưu tương ứng với bốn phạm vi giới hạn của gia tốc. Bằng việc có thể kiểm soát chủ động độ êm dịu vận hành sẽ có thể kiểm soát mục tiêu cân bằng giữa tiết kiệm năng lượng và độ thoải mái của hành khách.

Trong mô hình năng lượng theo thời gian, sai số thời gian hành trình sẽ là 0, còn đối với mô hình năng lượng được chuyển đổi theo vị trí như trong bài báo này thì sai số vị trí hành trình sẽ là 0. Thuật toán đã được kiểm nghiệm cho khu gian Cát Linh – La Thành theo cả hai hướng, sai số kết quả được liệt kê trên Bảng 2. Trong đó, sai số lớn nhất của thời gian hành trình là 0,14 (giây), sai số lớn nhất tốc độ tại điểm cuối hành trình là 0,0807 (m/s) đều thuộc hành trình hướng từ Cát Linh tới La Thành.

Bảng 2. Kết quả các thông số thực hiện thuật toán.

	Sai số vị trí (m)	Sai số thời gian (s)	Sai số vận tốc tại điểm cuối (m/s)	Thời gian thực hiện thuật toán (s)
<b>Quy hoạch động hướng Cát Linh – La Thành</b>	0,0	0,14	0,0807	8,1715
<b>Quy hoạch động hướng La Thành – Cát Linh</b>	0,0	0,12	0,0212	8,5531

Với mô hình năng lượng theo vị trí hành trình, không những kiểm soát chính xác các yếu tố thực tiễn như trở lực gây ra do độ dốc, độ cong của đường cũng như điều kiện giới hạn về tốc độ chuyển động tại từng vị trí, mà còn giảm được khối lượng tính toán và thời gian tính toán giá trị vị trí tại từng thời điểm như trong mô hình năng lượng theo thời gian; qua đó có thể giảm bớt thời gian tìm kiếm và xác định được giá trị biến điều khiển tối ưu cũng như giá trị tối ưu của các biến trạng thái. Thời gian thực hiện thuật toán áp dụng trên khu gian Cát Linh – La Thành tương ứng là 8,1715 (giây) cho hướng từ Cát Linh tới La Thành và 8,5531 (giây) cho hướng ngược lại từ La Thành về Cát Linh. Đây là thời gian khả thi, phù hợp áp dụng cho các ứng dụng trong thực tiễn. Ngoài ra, biến điều khiển lựa chọn là gia tốc sẽ cho phép kiểm soát độ êm dịu trong chuyển động, từ đó vừa đảm bảo được vận chuyển an toàn vừa có thể lựa chọn được sự cân bằng trong mục tiêu tiết kiệm năng lượng và đảm bảo sự thoải mái của hành khách.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày vấn đề áp dụng quy hoạch động cho mô hình năng lượng theo quãng đường để xác định tối ưu tốc độ chạy tàu trong hành trình khu gian với mục tiêu tối thiểu hóa tổng năng lượng mà đoàn tàu tiêu thụ của toàn hành trình chuyển động trong khu gian. Các yếu tố thực tiễn bao gồm độ dốc yếu tố trắc dọc, đoạn đường cong và giới hạn tốc độ chuyển động tại từng điểm dọc tuyến đường đều đã được xem xét tính toán trong thuật toán. Kết quả mô phỏng trên khu gian từ ga Cát Linh tới ga La Thành đã minh chứng cho tính khả thi và tính hiệu quả của thuật toán với sai số vị trí luôn là 0, và sai số thời gian lớn nhất là 0,14 (giây). Thời gian thực hiện thuật toán cũng được tối ưu ở mức 8,5531 (giây) với sai phân quãng đường là 0,931 (m). Năng lượng tiêu hao cho hành trình từ ga Cát Linh đến ga La Thành là 341,677 (KJ), và mức tiêu hao 445,018 (KJ) cho hành trình ngược lại từ La Thành về Cát Linh. Kết quả mô phỏng có thể minh chứng được đây là một công cụ có khả năng áp dụng hiệu quả cho các ứng dụng thực tiễn.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. G. Kim, C. S. Jeon, S. W. Kim, T. W. Park, Operating speed pattern optimization of railway vehicles with differential evolution algorithm, *International Journal of Automotive Technology*, 14 (2013) 903-911. <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0099-7>
- [2]. S. Lu, S. Hillmansen, T. K. Ho, C. Roberts, Single train trajectory optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14 (2013) 743-750. <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2234118>
- [3]. N. Ghaviha, M. Bohlin, F. Wallin, E. Dahlquist, Optimal Control of an EMU Using Dynamic Programming, *Energy Procedia*, 75 (2015) 1913-1919. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.184>

- [4]. T. Montrone, P. Pellegrini, P. Nobili, G. Longo, Energy consumption minimization in railway planning, in IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016, IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555534>
- [5]. W. Pu, D. Sheng, X. Gao, G. Hui, Optimization of train energy saving based on golden ratio genetic algorithm, in The 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2018, IEEE. <https://doi.org/10.1109/YAC.2018.8406493>
- [6]. C. Hui Jen, C. Chao-Shun, L. Chia-Hung, H. Ching-Ho, Design of Optimal Coasting Speed for MRT Systems Using ANN Models, in 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008, IEEE. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.144>
- [7]. A. P. Cucala, A. Fernandez, C. Sicre, M. Dominguez, Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25 (2012) 1548-1557. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.02.006>
- [8]. Zh. Li, Ch. Lei, C. Roberts, Zh. Ning, Dynamic trajectory optimization design for railway driver advisory system, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 10 (2018) 121-132. <https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2776134>
- [9]. K. Huang, W. Jianjun, Y. Xin, G. Ziyou, L. Feng, Zh. Yuting, Discrete Train Speed Profile Optimization for Urban Rail Transit: A Data-Driven Model and Integrated Algorithms Based on Machine Learning, Journal of Advanced Transportation, (2019) 1-17. <https://doi.org/10.1155/2019/7258986>
- [10]. TB/T 1407.1-2018 Train Traction Calculation Part 1: Locomotive Traction Train, China Railway Press, 2018. <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/TBT1407.1-2018>