



DESIGN AND SAFETY VERIFICATION OF COMPUTER INTERLOCKING SYSTEM IN RAILWAYS

Nguyen Duy Viet

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 25/10/2024

Revised: 23/02/2025

Accepted: 10/04/2025

Published online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.4>

* *Corresponding author*

Email: ndviet@utc.edu.vn; Tel: +84918928379

Abstract. When designing a new or upgrading signal control system in a station and putting it into train control operations, verifying the correctness and safety of the computer based interlocking system, the core component system of the signal control system in the station, is an urgent issue, especially when deploying it in railway types in Vietnam. Analyzing train operations in the station will set out technological processes with the participation of factors that create safety processes. Analyzing the operation of the signal control system in the station will group out the factors and equipment related to the correctness and safety of train operations in the station. Building an algorithm diagram to perform train control operations at the station will be the basis for designing and building a computer based interlocking system. Putting the factors and equipment according to the groups formed during the analysis into the algorithm will ensure their necessary, sufficient and reasonable participation for the train operations to operate correctly and safely. The checking, verification of correctness and safety will be performed, done automatically on the basis of these algorithms.

Keywords: railway station, signal control, computer-based interlocking, correctness verification, safety verification, group of factors.

@ 2025 University of Transport and Communications



THIẾT KẾ VÀ XÁC MINH AN TOÀN CHO HỆ THỐNG LIÊN KHÓA MÁY TÍNH TRONG ĐƯỜNG SẮT

Nguyễn Duy Việt

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: 25/10/2024

Ngày nhận bài sửa: 23/02/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/04/2025

Ngày xuất bản Online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.4>

* Tác giả liên hệ

Email: ndviet@utc.edu.vn; Tel: +84918928379

Tóm tắt. Khi thiết kế mới, nâng cấp một hệ thống điều khiển tín hiệu trong ga, đưa nó vào hoạt động điều khiển chạy tàu, việc xác minh tính đúng, tính an toàn của hệ thống liên khóa máy tính, hệ thống thành phần cốt lõi của hệ thống điều khiển tín hiệu trong ga là vấn đề cấp thiết, đặc biệt khi triển khai chúng ở các loại hình đường sắt ở Việt Nam. Phân tích các hoạt động chạy tàu trong ga sẽ đặt ra những quy trình công nghệ với sự tham gia của các yếu tố tạo nên những quy trình an toàn. Phân tích hoạt động của hệ thống điều khiển tín hiệu trong ga sẽ nhóm ra được các yếu tố, thiết bị liên quan tới tính đúng và tính an toàn của các tác nghiệp chạy tàu trong ga. Xây dựng sơ đồ thuật toán thực hiện tác nghiệp điều khiển chạy tàu của ga sẽ là cơ sở cho việc thiết kế, xây dựng hệ thống liên khóa máy tính. Đưa các yếu tố, thiết bị theo các nhóm đã được hình thành khi phân tích vào thuật toán sẽ đảm bảo sự tham gia cần thiết, đủ và hợp lý của chúng cho tác nghiệp chạy tàu hoạt động đúng và an toàn. Việc kiểm tra, xác minh tính đúng, tính an toàn sẽ được thực hiện, thực hiện tự động trên cơ sở các thuật toán này.

Từ khóa: ga đường sắt, điều khiển tín hiệu, liên khóa máy tính, xác minh tính đúng, xác minh an toàn, nhóm yếu tố.

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống liên khóa là hệ thống thành phần của hệ thống điều khiển tín hiệu trong ga (ĐTĐG). Hệ thống liên khóa là thành phần cốt lõi để điều khiển đúng, đủ các chức năng và an toàn cho các hoạt động chạy tàu trong ga.

Khi làm mới hoặc nâng cấp một hệ thống liên khóa trong hệ thống ĐTG để phục vụ các tác nghiệp chạy tàu chúng cần được xác minh tính đúng, đủ điều kiện đảm bảo an toàn cho hoạt động.

Từ bước khảo sát, thiết kế, thực hiện xây dựng hệ thống liên khóa, lắp đặt, đưa vào khai thác, vận hành là một quá trình nghiêm ngặt tuân thủ các quy định [1], đặc biệt ở khâu thiết kế và đánh giá an toàn. Các yếu tố cần xác minh, phương pháp xác minh, quy trình xác minh hoạt động của hệ thống liên khóa cho đúng, cho an toàn là những vấn đề cần có cơ sở nhất quán để đảm bảo khi đưa hệ thống vào hoạt động sẽ đảm bảo an toàn cho các tác nghiệp chạy tàu trong ga.

Hệ thống liên khóa trên cơ sở rơle điện từ đã được biết đến từ lâu và được sử dụng ở Việt Nam nhiều năm trở lại đây. Khả năng liên khóa đảm bảo an toàn và năng lực tác nghiệp cho một ga sẽ được thực hiện bằng sơ đồ mạch điện liên kết các rơle đó lại với nhau. Chúng tường minh, dễ chẩn đoán các hư hỏng, với trình độ chuyên môn của các công nhân cơ điện chuyên trách về tín hiệu cũng sẽ dễ dàng phát hiện và thay thế khắc phục. Ngoài ra độ tin cậy và khả năng làm việc của chúng đã được khẳng định qua thời gian dài khai thác.

Với các hệ thống đường sắt hiện đại tốc độ cao, mật độ chạy tàu lớn đòi hỏi hệ thống liên khóa cần hoạt động tin cậy và an toàn, có khả năng điều khiển, giám sát với nhiều đối tượng, nhiều tác nghiệp cùng nhiều các tham số chi tiết, hoạt động nhanh theo thời gian thực, khoảng cách điều khiển, giám sát lớn. Ngoài ra cũng cần giảm các chi phí về mặt bằng, cấp điện cũng như về các vật liệu quý thì các hệ thống trên cơ sở các phần tử rơle sẽ khó giải quyết được những vấn đề này [2].

Ở Việt Nam hệ thống đường sắt truyền thống hầu hết sử dụng hệ thống liên khóa trên cơ sở rơle điện từ và hiện vẫn đang vận hành do các ga không lớn, số tác nghiệp không nhiều, tốc độ, mật độ chạy tàu thấp. Về tương lai các hệ thống này cũng cần phải được thay thế bởi các hệ thống tín hiệu điều khiển trên cơ sở máy tính. Đường sắt đô thị, đường sắt tốc độ cao và ngay cả đường sắt truyền thống hiện nay đã và đang được phát triển việc ứng dụng công nghệ mới để hiệu quả hơn, an toàn hơn, tin cậy hơn và dễ dàng triển khai hơn. Đó là các hệ thống liên khóa trên cơ sở máy tính (LMT), hay còn gọi là hệ thống liên khóa máy tính với các thành phần là các thiết bị, phần cứng, phần mềm [3].

Loại hình hệ thống LMT đã có mặt ở nước ta ở dự án cho đường sắt truyền thống, đường sắt đô thị. Trong nước cũng đã có những nghiên cứu, thử nghiệm loại hình này [4], tuy nhiên nó vẫn là loại hình liên khóa mới, việc xác minh tính đúng và tính an toàn của hệ thống liên khóa mới dừng ở mức suy luận, hoặc ở mức độ đặt niềm tin vào các số liệu và cách thức của các tổ chức, chuyên gia nước ngoài. Xu thế số hóa với việc sử dụng máy tính cho hệ thống điều khiển nói chung và hệ thống liên khóa nói riêng có tính tất yếu. Vấn đề quan trọng trong việc áp dụng loại hình hệ thống LMT là làm sao để tin tưởng việc chúng được thiết kế, lắp đặt, vận hành có đầy đủ chức năng, hoạt động đúng và đảm bảo tin cậy, an toàn khi đưa vào hoạt động [3], [5].

Để làm được điều đó, LMT cần được thiết kế, kiểm tra, xác minh tính đúng, đánh giá an toàn. Các nội dung này được thực hiện theo các tiêu chuẩn quy định của từng quốc gia nhưng về cơ bản để đảm bảo sự đúng đắn và an toàn, hiện nay chúng được một số hãng lớn trên thế giới thiết kế, triển khai lắp đặt, đánh giá tính đúng và an toàn nội bộ. Trước khi đưa vào khai thác tại một dự án cụ thể cần được đánh giá độc lập. Khi vận hành, duy tu bảo dưỡng được tiếp tục được theo dõi đánh giá liên tục theo vòng đời [5], [6].

Thiết kế đúng, ngoài các quy trình thử nghiệm, LMT cần được đánh giá độc lập từ giai đoạn thiết kế đến khi áp dụng tại một địa điểm khai thác [5]. Nước ta đã có Luật đường sắt, về cơ bản mức độ an toàn, về sự đúng đắn của LMT cũng sẽ được thực hiện như ở các quốc gia khác [1].

Cho đến nay trong nước còn ít có những nghiên cứu về đánh giá, xác minh tính đúng đắn và an toàn của các hệ thống liên khóa, LMT. Đánh giá, xác minh cho hệ thống liên khóa hay thậm chí nắm được quy trình và nội dung cụ thể công việc này vẫn còn chưa có được sự nhất quán.

Trên thế giới đã có những nghiên cứu được công bố như [7] đề cập đến một cách tiếp cận dựa trên mô hình để thiết kế, xác minh và triển khai hệ thống LMT. Thực tế công bố này giới thiệu mô hình trong khoa học máy tính để thực hiện thiết kế, xác minh và triển khai hệ thống LMT mà chưa đề cập cụ thể đến những dữ liệu, đặc điểm của hệ thống LMT. Hay nói đúng hơn là chỉ đề cập đến công cụ thực hiện cho bài toán liên khóa. Tại [8] đề cập đến việc kiểm chứng phần mềm thực hiện liên khóa đã được thử nghiệm tại Vương quốc Anh. Giới thiệu khả năng của phần mềm SafeCap kiểm tra, xác minh về dữ liệu của hệ thống tín hiệu. Để sử dụng hiệu quả phần mềm này cũng cần hiểu biết về bài toán liên khóa ga đường sắt và đưa các dữ liệu vào phần mềm để kiểm tra, xác minh.

Khi số hóa các hệ thống điều khiển chạy tàu, việc tạo ra sản phẩm mô phỏng hay còn gọi là bản sao số sẽ giúp cho công việc thiết kế, xác minh an toàn hệ thống LMT thuận lợi và hiệu quả hơn. [9] đã xây dựng phương pháp để thiết kế một hệ thống mô phỏng liên khóa tín hiệu đường sắt. Để mô phỏng logic liên khóa của hệ thống tín hiệu đường sắt, bài báo đã phân tích các thiết bị như: tín hiệu, mạch điện đường ray, ghi và tuyến đường. Sau đó thiết kế các lớp như lớp tín hiệu, lớp mạch điện đường ray, lớp ghi và lớp tuyến đường dựa trên ngôn ngữ lập trình hướng đối tượng. Bằng cách xác định các thuộc tính của từng lớp và xem xét đầy đủ các loại và số lượng role tín hiệu, tác giả đã phát triển hệ thống mô phỏng logic liên khóa bằng ngôn ngữ C#. Hệ thống mô phỏng được áp dụng trên sơ đồ ga thực tế và chứng minh tính khả thi của nó. Tuy nó thể hiện một chức năng cụ thể là mô phỏng được các hoạt động của liên khóa trên cơ sở role nhưng sự đầy đủ và logic các yếu tố tham gia liên khóa cho các tác nghiệp vẫn cần làm rõ để từ đó có thể mô phỏng liên khóa khi sử dụng những thiết bị, công cụ khác.

Trong bài báo mới về đánh giá an toàn hệ thống tín hiệu [10], một mô hình “Phân tích cây lỗi” (FTA) về chuyển động tàu không an toàn được xác định cho cả hệ thống đóng đường đi động (MB) và kết nối ảo (VC), mô hình này có các tương tác chức năng và mối quan hệ nhân quả giữa các thành phần tín hiệu khác nhau. FTA được sử dụng làm cơ sở để phân bổ tỷ lệ hỏng hóc của thành phần tín hiệu cần thiết để cung cấp cho mô hình “Mạng hoạt động ngẫu nhiên” (SAN). Đây là công cụ hữu hiệu trong mô phỏng để xác định lỗi của các thành phần của hệ thống tín hiệu hiện đại (được số hóa) nhưng cũng chưa cụ thể cho hệ thống liên khóa, một hệ thống thành phần nhưng ảnh hưởng đến năng lực và an toàn, việc đánh giá hệ thống liên khóa cần phải cụ thể và chi tiết phù hợp với các loại hình tổ chức tác nghiệp đoàn tàu trong ga.

Xác thực tự động các hệ thống tín hiệu, đo lường mức độ an toàn của các hệ thống tín hiệu đường sắt hiện đại, [11] đã mô tả một giải pháp tiên tiến cho các nhiệm vụ xác minh và xác thực tự động, cùng một giải pháp mà họ đã áp dụng cho các hệ thống tín hiệu trên toàn cầu. Nền tảng cho giải pháp này là có các thông số kỹ thuật yêu cầu nắm bắt các quy tắc tín hiệu, cho phép xử lý tự động bằng các chương trình máy tính. Nó đã đưa sự phức tạp của việc

xác minh thành một nhiệm vụ đơn giản. Việc xác thực tự động gồm ba cấu phần: xác định các thông số kỹ thuật yêu cầu chung cho một hệ thống liên khóa đường sắt cụ thể; chỉ định cấu hình và tạo tự động dữ liệu liên khóa, bao gồm mô phỏng và xác minh; xác minh theo mức độ SIL 4, chỉ ra dấu hiệu an toàn cho vị trí, sử dụng bằng chứng tự động. Đây cũng là thông tin của hãng về khả năng thực hiện, kiểm chứng những việc đã làm và tính tin cậy của việc xác minh cần có những thông tin thêm vì về cơ bản hãng không công bố phương pháp và dữ liệu cần có để thực hiện.

Có thể thấy điểm mấu chốt trong thiết kế, đánh giá một hệ thống LMT sao cho đúng, đảm bảo an toàn là sự xác định đầy đủ các thiết bị, yếu tố tham gia vào các quy trình tác nghiệp của hệ thống liên khóa, không những thế cần cả việc xác định được đúng mối quan hệ tương quan của chúng liên quan tới tác nghiệp an toàn tất cả các hoạt động chạy tàu trong ga. Đã có nhiều nghiên cứu và đã đưa ra được công cụ để xác minh hệ thống LMT, mỗi công cụ đều có những ưu điểm và nhược điểm riêng. Trong các công trình khoa học công bố, các tác giả đều đã nỗ lực để giảm “vấn đề bùng nổ không gian trạng thái” khi phân tích, đánh giá, xác minh bằng cách sử dụng các kỹ thuật khác nhau như cấu trúc dữ liệu hiệu quả, trừu tượng hóa, kiểm tra mô hình bị giới hạn, v.v [12-16]. Sự bùng nổ trạng thái theo cấp số nhân khi xác minh cho hệ thống liên khóa ở các ga lớn, có nhiều tác nghiệp sẽ vẫn là khó khăn cho các phương pháp được áp dụng.

Làm chủ trong công tác thiết kế, lắp đặt, duy tu, bảo dưỡng, phát triển, đánh giá an toàn và đánh giá sự đúng đắn của các hệ thống này là điều cần thiết và cần có sự chủ động của các cá nhân, tổ chức ở trong nước, đáp ứng với quy định của Việt Nam, theo các tiêu chuẩn chung trên thế giới, đặc biệt trong bối cảnh của sự phát triển công nghệ, các dự án về đường sắt đô thị, đường sắt tốc độ cao, đường sắt truyền thống đã và đang được triển khai.

Bài báo đề cập đến bốn nội dung chính, ngoài yêu cầu cấp thiết chung về việc xác minh tính đúng, tính an toàn sẽ xem xét đến hệ thống LMT trong hệ thống ĐKG với những chức năng và nguyên tắc an toàn trong hoạt động; xác định đầy đủ các yếu tố cần kiểm tra liên quan đến an toàn của hệ thống cho công tác chạy tàu, nhóm các yếu tố này để thuận lợi trong quá trình thiết kế và xác minh hệ thống; cuối cùng là một thuật toán cụ thể cho chức năng xác lập hành trình là một phần cơ sở hoạt động của hệ thống LMT để làm rõ tính đúng, đủ của việc thiết kế tính năng, kiểm tra các yếu tố đảm bảo an toàn.

2. ĐẢM BẢO AN TOÀN CHẠY TÀU TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TÍN HIỆU TRONG GA

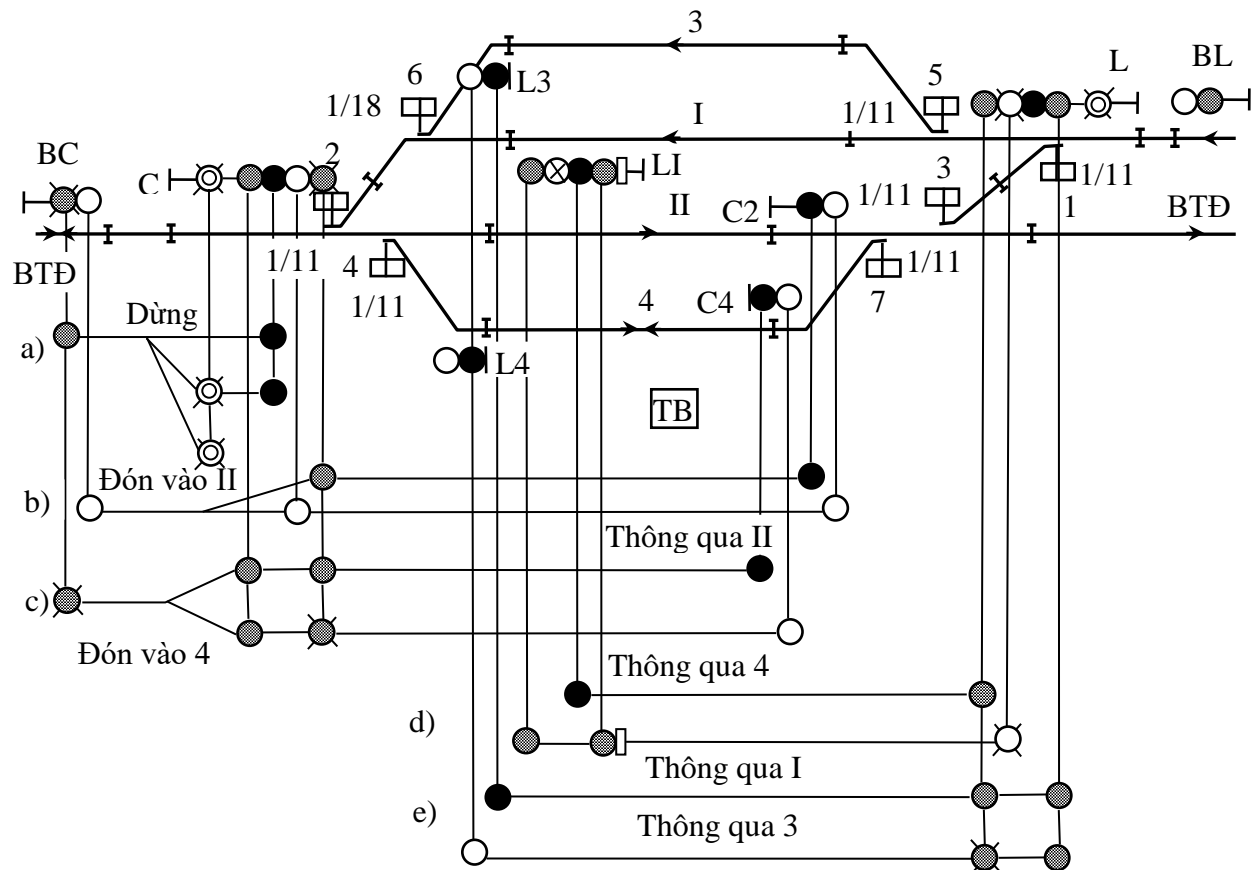
Hệ thống tín hiệu điều khiển hoạt động của các đoàn tàu trong một ga còn được gọi là hệ thống điều khiển tín hiệu ga (ĐTGH). Các thiết bị trong hệ thống ĐTGH cần phải liên khóa giữa ghi, đường chạy và tín hiệu để đảm bảo an toàn trong hoạt động. Cụ thể, hoạt động trong ga có các hoạt động cơ bản là các hành trình đón tàu, hành trình gửi tàu, hành trình dồn tàu, chuyên tàu v.v. [13]. Để các hoạt động này diễn ra an toàn, không để các đoàn tàu bị va chạm, đâm nhau, trật bánh thì khi chuẩn bị một hành trình cần kiểm tra trạng thái đường (các đường) liên quan đến hành trình, nếu thanh thoát và không liên quan đến các hành trình khác đã được xác lập thì sẽ cho phép quay các ghi liên quan về vị trí xác lập cho hành trình đang lựa chọn, khóa lại rồi mở cột hiệu cho phép đoàn tàu hoạt động trên hành trình này. Yêu cầu là ghi quay về vị trí cần thiết, được ép chặt, được kiểm tra khe hở mũi ghi và được khóa lại. Cột hiệu chỉ mở khi đường chạy thanh thoát, ghi được quay về đúng vị trí cho hành trình và khóa lại. Tất cả các thiết bị liên quan đến ghi, đường chạy, tín hiệu đều được điều khiển tập trung (tại

phòng trực ban). Tác nghiệp dồn tàu thực hiện bằng các tín hiệu dồn chuyên dụng, khi cần thiết có thể điều khiển ghi tại chỗ (hình 1).

Khái niệm cơ bản của hệ thống ĐTG là hành trình, đó là tập hợp các đường chạy với các ghi liên quan và được phòng vệ bởi cột hiệu để thực hiện tác nghiệp đón tàu, gửi tàu, dồn tàu, cho tàu thông qua v.v., với ba trạng thái cơ bản: xác lập hành trình; khóa hành trình; giải khóa hành trình.

Như vậy, hành trình là những phần đường ở trong ga được chuẩn bị sẵn sàng và để cho đoàn tàu đi qua (với các thành phần đoàn tàu) từ điểm đầu cho tới điểm cuối của hành trình. Điểm đầu của hành trình là biểu thị cho phép của những cột hiệu tương ứng như cột hiệu vào ga, cột hiệu ra ga, cột hiệu dồn (hoặc cột hiệu hành trình). Điểm cuối là các phần tử của đường trong ga hoặc khu gian phụ thuộc vào loại hành trình. Trong sự phân chia loại hành trình thì có những hành trình đoàn tàu và hành trình dồn, trong hành trình của đoàn tàu chia thành hành trình đón, hành trình gửi và hành trình thông qua.

Quá trình chuẩn bị các đường của ga cho sự đi qua của đoàn tàu hoặc các thành phần được dồn dịch được gọi là xác lập hành trình. Nhiệm vụ xác lập hành trình là việc chuyển các cái ghi về vị trí yêu cầu kết nối các đường chạy liên quan đến hành trình và khóa chúng lại, kiểm tra các điều kiện an toàn chạy tàu ở tất cả các phần tử liên quan tới hành trình, bật biểu thị cho ở phép cột hiệu tương ứng.



Hình 1. Một hệ thống tín hiệu trong ga với các biểu thị tín hiệu tương ứng với hành trình có các đường chạy, ghi liên quan.

Khi xác lập hành trình (tuyến đường) cho đến khi mở cột hiệu cho phép đoàn tàu theo hành trình đã đặt ra, các hệ thống ĐTG cần phải loại bỏ khả năng dịch chuyển của tất cả các ghi có trong hành trình, tức là khóa các ghi và loại bỏ khả năng lập hành trình khác đối nghịch với hành trình đã có này, tức là thực hiện khóa hành trình. Tiếp theo sẽ nối mạch biểu thị tín hiệu cho phép của cột hiệu với việc kiểm tra sự hoàn thành các yếu tố yêu cầu cho việc khóa hành trình. Thuật toán như thế của chức năng hoạt động trong hệ thống ĐTG sẽ đảm bảo an toàn cho chuyển động của đoàn tàu theo trình tự: lúc đầu sẽ khóa ghi và loại bỏ các hành trình đối nghịch sau đó sẽ mới đến việc mở cột hiệu (nối mạch để biểu thị cho phép sáng).

Ngược lại với quá trình khóa hành trình là giải khóa hành trình.

Phân biệt hai loại khóa hành trình là khóa trước và khóa sau. Ở trường hợp đầu, khóa trước là việc khi nối mạch biểu thị cho phép (mở cột hiệu), ở khu đoạn tới gần phía trước cột hiệu không có các thành phần chuyển động. Ở các hệ thống ĐTG việc thay đổi hành trình đã được khóa trước (khi trực ban muốn làm tác nghiệp khác) thì trạng thái khóa của hành trình trước đó có thể thay đổi. Sau tác nghiệp đổi (giải khóa của trực ban), hành trình sẽ được giải khóa sau khoảng thời gian (thường là 6 giây). Điều này cần thiết để tính đến khoảng thời gian lớn nhất khi đoàn tàu có thể đã có mặt trong khu tới gần nhưng mất đoạn mạch nên hệ thống nhầm tưởng là chưa có tàu ở khu tới gần này. Thay vì không thể giải khóa thì lại cho phép giải khóa hành trình dẫn tới nguy hiểm cho đoàn tàu.

Khi có sự chiếm dụng của đoàn tàu vào khu đoạn tới gần được gọi là khóa sau. Khi có chuyển động của đầu máy, toa xe qua hành trình đã được xác lập, hệ thống ĐTG đảm bảo tự động mở khóa hành trình.

Có trường hợp khi có sự đoản mạch rồi lại mất đoạn mạch ở mạch điện đường ray, cũng như khi có sự chuyển nguồn cấp, hệ thống ĐTG hiểu nhầm đoàn tàu chiếm dụng rồi giải phóng đoạn đường đó nên tự động mở khóa. Để bảo vệ việc mở khóa sớm, sự kiện đoàn tàu đi qua cần được xác lập bằng việc kiểm tra sự trình tự nối tiếp sự kiện chiếm dụng và sự kiện giải phóng khu ghi có trong hành trình. Trong những mạch điện mở khóa hành trình sử dụng mạch điện với việc tác động chậm thời gian là 6 giây, như vậy cùng với thời gian chống xác định nhầm đoạn mạch là 6 giây sẽ có hai lần lớn hơn cái thời gian mất đoạn mạch lớn nhất.

Hệ thống ĐTG cũng cần có chế độ mở khóa nhân công thay đổi hành trình khi đã bị khóa sau. Do sự cố nào đó, khu tới gần báo bị chiếm dụng, nhưng không có đoàn tàu, hay đoàn tàu ở đó không thể đi qua hành trình đã xác lập và như vậy hành trình này không thể mở khóa tự động được (không toàn vẹn mạch điện đường ray hoặc mất sự kiểm tra vị trí của ghi). Ở chế độ khóa sau, hành trình của đoàn tàu sẽ được mở khóa với việc trễ thời gian trễ (3 phút 15 giây, còn khóa sau đối với tác nghiệp dồn sẽ trễ thời gian trễ là 1 phút 15 giây). Các thời gian trễ đó tính đến để đảm bảo an toàn trong trường hợp, nếu có sự nhầm lẫn, đoàn tàu vẫn đi vào hành trình đã xác lập đó với tốc độ cho phép thì đoàn tàu vẫn đi đến cuối hành trình và dừng lại trong trạng thái hành trình vẫn được khóa.

Khi giải khóa hành trình, giải phóng việc khóa các ghi và các hành trình đối địch sẽ diễn ra trong quá trình sử dụng toàn bộ tuyến đường, tức là chiếm dụng và giải phóng tất cả các khu ghi có trong hành trình. Mở khóa khu ghi sẽ được thực hiện dần dần (theo phương pháp giải phóng bằng sự đi qua của chính đoàn tàu) sẽ giải khóa ghi và các hành trình đối địch.

Như vậy, các thiết bị của hệ thống ĐTG cần không được phép mở tín hiệu khi hành trình được xác lập ở những đường bị chiếm dụng; không chuyển ghi khi đang có các thành phần chuyển động; không nối mạch biểu thị cho phép (mở cột hiệu) tương ứng với các hành trình này nếu

các ghi không ở vị trí cần có của hành trình; không chuyển các ghi có trong hành trình đã xác lập hoặc mở tín hiệu cho hành trình đối địch [14], [15], [16].

3. CÁC YẾU TỐ, THIẾT BỊ CỦA HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN TÍN HIỆU TRONG GA ĐẢM BẢO AN TOÀN

Từ những phân tích trên, liên quan đến quy trình công nghệ cho các tác nghiệp của một ga, hệ thống ĐTG với các thiết bị ghi, đường chạy, tín hiệu nằm ở các vị trí khác nhau, cần được kết nối, liên khóa để đảm bảo tính đúng đắn, an toàn cho các tác nghiệp vận hành đoàn tàu. Các thiết bị, trạng thái của hệ thống ĐTG cần kiểm tra, kiểm soát để điều khiển an toàn thông qua hệ thống liên khóa gồm:

Liên quan đến các ghi

- 1 - Kiểm tra vị trí đầu mũi chuyển động của ghi;
- 2 - Kiểm soát vị trí đúng của ghi được bảo vệ;
- 3 - Kiểm tra không có việc chuyển ghi bằng điều khiển tại chỗ;
- 4 - Kiểm tra ghi không bị khóa ở các hành trình khác.

Liên quan đến phân đoạn đường:

- 5 - Kiểm tra sự thanh thoát của phân đoạn đường chuyển động;
- 6 - Kiểm tra phân quá khô;
- 7 - Kiểm tra việc không có sự thay đổi hành trình;
- 8 - Kiểm tra việc không có mở khóa nhân công;
- 9 - Kiểm tra việc khóa thực tế của phân đoạn đường ở hành trình đặt ra;
- 10 - Kiểm tra việc mở khóa các phân đoạn đường khi thay đổi hành trình theo thuật toán đặt ra;
- 11 - Kiểm tra việc mở khóa các phân đoạn đường khi mở khóa nhân công theo thuật toán đặt ra;
- 12 - Bảo vệ các phân đoạn đường được khóa từ việc khóa trước tương ứng khi có và hết đoàn mạch tại mạch điện đường ray;
- 13 - Bảo vệ các phân đoạn đường được khóa từ việc khóa trước tương ứng khi có việc chuyển nguồn cấp;
- 14 - Bảo vệ các phân đoạn đường được khóa từ việc khóa trước tương ứng khi có mất đoàn mạch ở thời gian cho trước.

Liên quan đến đường chạy tàu:

- 15 - Kiểm tra sự thanh thoát của đường đón gửi;
- 16 - Kiểm tra sự không có việc thiết lập các hành trình đối nghịch ở yết hầu đối nghịch của ga đến việc thiết lập hành trình ở đường đón gửi này;
- 17 - Kiểm tra việc không có tác nghiệp chuyển đường đón gửi sang điều khiển tại chỗ;
- 18 - Kiểm tra việc không có sự nối mạch bảo vệ đường đón gửi;

19 - Kiểm tra sự loại bỏ thực tế các hành trình bất kỳ ở đường đón gửi này sau khi xác lập hành trình.

Liên quan đến khu đoạn tới gần và rời xa:

20 - Kiểm tra sự thanh thoát của khu đoạn rời xa đầu tiên trong đóng đường tự động;

21 - Kiểm tra sự có mặt của khóa thẻ đường ở thiết bị điều khiển;

22 - Kiểm tra hướng xác lập đúng của chuyển động trong đóng đường tự động hai chiều;

23 - Kiểm tra việc khóa thực tế của sơ đồ đổi hướng trong đóng đường tự động hai chiều;

24 - Kiểm tra sự thanh thoát của khu gian trong đóng đường bán tự động.

Liên quan đến các cột hiệu:

25 - Kiểm tra sự tương ứng của biểu thị tín hiệu trên cột hiệu;

26 - Kiểm tra việc không có sự nối mạch biểu thị tín hiệu đón ở cột hiệu;

27 - Kiểm tra trạng thái đóng các biểu thị của cột hiệu đối địch.

Để xác định điều kiện hoạt động an toàn của hệ thống ĐTG một cách đầy đủ thì có thể sử dụng các công thức, kí hiệu danh sách hoặc bảng liệt kê xác định một tập hợp bằng cách liệt kê các phần tử của nó, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, ở đây là tập hợp hữu hạn các phần tử trong sơ đồ ga.

Tập hợp $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ là tập hợp hữu hạn các phần tử của sơ đồ ga, trong đó có các tập con (hữu hạn) là: về cột hiệu S_{ch} , ghi S_{gh} , phân đoạn đường $S_{pđ}$, đường đón gửi $S_{đg}$, các khu đoạn tới gần và rời xa S_{gx} v.v.. Ta có:

$$A = S_{ch} \cup S_{gh} \cup S_{pđ} \cup S_{đg} \cup S_{gx}; \quad (1)$$

Để xác định sự tham gia (và không tham gia) của các phần tử trong sơ đồ ga với một chức năng, ta cần xem xét chúng thông qua các tác nghiệp của ga mà hệ thống ĐTG (hệ thống liên khóa) đảm nhận. Tập hợp $A = \{a_i\}$ của các phần tử trong sơ đồ ga có tập của hành trình H , chúng được tập hợp của các tập thành phần như hành trình đoàn tàu H_t và hành trình đôn H_d : $H = H_t \cup H_d$. Tập thành phần của hành trình đoàn tàu là tập hợp của các tập thành phần hành trình đón tàu H_d và hành trình gửi tàu H_g : $H_t = H_d \cup H_g$, (hành trình thông qua là kết hợp của hành trình đón tàu và gửi tàu theo cùng hướng).

Mỗi hành trình đoàn tàu hoặc hành trình đôn $H_j \in H$ có thể đặt trong sự tương ứng với tập thành phần $A_j \subset A$ của các phần tử trong sơ đồ ga.

$$(\forall H_j \in H) \rightarrow (A_j \subset A) \quad (2)$$

Các hành trình cần được đảm bảo hoạt động an toàn trong hệ thống ĐTG khi thiết lập, thực hiện, thay đổi và mở khóa nhân công chúng. Như vậy đối với mỗi phần tử $A_k \in A_j$ đáp ứng những điều kiện sau của an toàn chạy tàu:

$$S_{gh} = \{1, 2, 3, 4\}; \quad (3)$$

$$S_{pđ} = \{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}; \quad (4)$$

$$S_{đg} = \{15, 16, 17, 18, 19\}; \quad (5)$$

$$S_{gx} = \{20, 21, 22, 23, 24\}; \quad (6)$$

$$S_{ch} = \{25, 26, 27\}; \quad (7)$$

Như đã nói ở trên, việc điều khiển tín hiệu an toàn cho hoạt động chạy tàu trong ga liên quan đến các phần tử nhưng không phải tất cả. Sự liên quan của phần tử (những phần tử) sẽ phụ thuộc vào một tác nghiệp cụ thể chạy tàu trong ga. Xem xét sự mô tả của hành trình đón tàu. Hành trình đón tàu được gọi là một phần hoạt động của ga, việc cần phải làm là chuẩn bị đường để đón một đoàn tàu từ khu gian vào đường có chức năng đón - gửi đang thanh thoát ở trong ga. Điểm đầu của hành trình đón là cột hiệu vào ga, điểm cuối chính là ở đường đón - gửi được giới hạn bởi cột hiệu ra ga ở phía tiếp theo. Như vậy hành trình đón có sự tham gia của cột hiệu vào ga S_{chvg} , n các phân đoạn đường có ghi và phân đoạn đường không có ghi $S_{npđ}$, m ghi liên quan S_{mgh} và đường đón gửi $S_{đg}$ tức là:

$$H_d = \{S_{chvg}, \{S_{npđ}\}, \{S_{mgh}\}, S_{đg}\}. \quad (8)$$

Hành trình gửi tàu $H_g \subset H_t$ gọi là phần của các đường trong ga được chuẩn bị để gửi một đoàn tàu từ đường đón - gửi vào khu gian thanh thoát (khu đoạn rời xa). Điểm bắt đầu của hành trình gửi là cột tín hiệu ra ga S_{chrg} , còn điểm cuối là khu gian thanh thoát hoặc khu đoạn rời xa S_{gx} .

Như thế:

$$H_g = \{S_{chrg}, \{S_{nd}\}, \{S_{mgh}\}, S_{gx}\}. \quad (9)$$

Tổ chức những công việc dồn dịch, tức là đặt ra các hành trình dồn sẽ phụ thuộc vào mỗi ga cụ thể, từ quy trình công nghệ các công việc dồn và được xác định bởi các tác nghiệp kỹ thuật và hành chính của ga. Xem xét tất cả những dạng có thể của các hành trình dồn được phân biệt với nhau bởi cái phần tử các đường của ga mà ở đó hành trình được kết thúc. Như thế điểm bắt đầu của hành trình dồn là cột hiệu cho phép chuyển động dồn, còn điểm kết thúc có thể là những đối tượng như sau: cột hiệu dồn đi qua được bố trí ở ranh giới phân đoạn đường có ghi; khu đoạn đường ở yết hầu của ga (đối với phân đoạn không ghi) được phòng vệ từ hai phía của các cột hiệu dồn; vùng không có ĐTG của ga (đường cụt, đường dẫn, depo, bãi hàng v.v); khu đoạn rời xa đầu tiên của khu gian tiếp giáp với ga; ranh giới của ga với phân khu một đường cũng như phân khu hai đường nếu như theo quy định hoạt động cấm sự đi ra khu đoạn rời xa; đường đón gửi trong ga.

Trong năm trường hợp đầu công thức của các hành trình dồn là như nhau:

$$H_d = \{S_{chđ}, \{S_{nd}\}, \{S_{mgh}\}\}. \quad (10)$$

Trong trường hợp cuối cùng của công thức thành phần bổ sung thêm sẽ tương ứng với đường đón - gửi, điều đó là cần thiết để giải quyết đúng các hành trình đối dịch, tức là:

$$H_{dđg} = \{S_{chđ}, \{S_{nd}\}, \{S_{mgh}\}, S_{đg}\}. \quad (11)$$

Hai hành trình được gọi là đối dịch nếu như sự thực hiện hai hành trình này trong cùng thời điểm sẽ làm phá hủy tính an toàn chạy tàu.

Một cặp hành trình chạy tàu bất kỳ $(H_{ti}, H_{tj}) \in H_t, i \neq j$ ở một hoặc những yết hầu khác nhau của ga là không đối địch chỉ ở trong trường hợp nếu như việc giao cắt tập thành phần tương ứng của chúng A_i và A_j của tập A bằng tập rỗng.

$$(H_{ti}, H_{tj}) \in H_t (A_i \cap A_j = \emptyset). \quad (12)$$

Điều kiện không đối địch của một cặp bất kỳ hành trình đoàn tàu và hành trình dồn:

$$(H_{ti}, H_{dj}) \in H (A_i \cap A_j = \emptyset). \quad (13)$$

Hai hành trình dồn ở cùng một yết hầu ga không là đối địch nhau nếu như tương ứng các tập thành phần của chúng A_i và A_j không có các thành phần chung. Tuy nhiên sự khác biệt ở công thức cho tác nghiệp đoàn tàu và công thức cho tác nghiệp dồn là ở chỗ việc hai hành trình dồn trên cùng một đường đón - gửi sẽ không là đối địch cho dù chúng có phần tử chung. Ký hiệu tập hợp các hành trình dồn có trên đường đón - gửi của ga như $H_{dđg} \subset H_d$, thì đối với mỗi đường đón-gửi thứ k , nhận định sau là đúng:

$$(\exists (H_{dđgi}^k, H_{dđgj}^k) \in H_{dđg}) (A_i^k \cap A_j^k = P_k). \quad (14)$$

Sự vắng mặt đối địch cho các cặp còn lại bất kỳ của các hành trình dồn được xác định theo công thức

$$(\forall (H_{di}, H_{dj}) \in H_d \setminus H_{dđg}) \rightarrow (A_i \cap A_j = \emptyset) \quad (15)$$

Để sử dụng các công thức được đưa ra của các hành trình, sơ đồ khối của thuật toán hoạt động liên khóa ĐTG sẽ được tạo ra, cho phép thực hiện chúng bằng chương trình máy tính, tức là liên khóa trên cơ sở máy tính. Khi đó các điều kiện an toàn chạy tàu được đưa ra ở các công thức từ (3) – (7) được nhóm theo các tập hợp $F1$ - $F7$ sẽ tính toán các bước công nghệ xác lập, thực hiện, thay đổi và mở khóa nhân công các hành trình:

$F1$ - Tập các điều kiện để kiểm tra khi quay ghi (có dữ liệu của ghi được chuyển không?):

$$F1 = \{4, 5, 6\}; \quad (16)$$

$F2$ - Tập điều kiện để kiểm tra khi xác lập hành trình không mở tín hiệu (các dữ liệu của hành trình có thể xác lập được không?):

$$F2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27\} \quad (17)$$

$F3$ - Tập điều kiện để kiểm tra khi xác lập hành trình với việc mở tín hiệu (các dữ liệu để mở tín hiệu có được không?):

$$F3 = F2 \cup \{9, 19, 23\}; \quad (18)$$

$F4$ - Tập điều kiện để kiểm tra khi hành trình đã được xác lập, khi tín hiệu mở (các điều kiện về an toàn chạy tàu có đáp ứng được không khi tín hiệu đã mở?):

$$F4 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 26, 27\} \quad (19)$$

$F5$ - Tập các điều kiện kiểm tra việc mở khóa hành trình đúng khi có chuyển động của các thành phần đoàn tàu (đáp ứng hay không thuật toán thực hiện mở khóa đối với thuật toán áp dụng ở hệ thống ĐTG này?):

$$F5 = \{1, 2, 12, 13, 14\}; \quad (20)$$

$F6$ - Tập các điều kiện để kiểm tra việc mở khóa đúng hành trình khi có sự thay đổi của nó (thuật toán thực hiện thay đổi có đáp ứng hay không đối với thuật toán sử dụng ở hệ thống ĐTG này?):

$$F6 = \{1, 2, 5, 6, 10\}; \quad (21)$$

$F7$ - Tập các điều kiện kiểm tra việc mở khóa hành trình đúng khi mở khóa nhân công (thuật toán thực hiện mở khóa nhân công có đáp ứng hay không đối với thuật toán sử dụng ở hệ thống ĐTG này?):

$$F7 = \{11\}. \quad (22)$$

Các công thức (16) – (22) sử dụng phù hợp và cần thiết trong các thuật toán tương ứng với các tác nghiệp của hệ thống ĐTG.

4. KIỂM TRA TÍNH ĐÚNG, AN TOÀN Ở SƠ ĐỒ THUẬT TOÁN XÁC LẬP HÀNH TRÌNH

Để làm rõ việc xác định các yếu tố, thiết bị tham gia vào một tác nghiệp của quy trình công nghệ điều khiển tàu trong ga, có thể xem xét chức năng xác lập hành trình với việc xây dựng sơ đồ thuật toán thực hiện tác nghiệp này trong hệ thống ĐTG qua hệ thống liên khóa [15].

Tất cả các tác nghiệp trong ga đều có một điểm chung là cần chuẩn bị hành trình để thực hiện. Việc chuẩn bị này liên quan đến đường chạy (các đường chạy), các ghi, các cột hiệu, các hành trình liên quan. Việc xác lập một hành trình là việc chuẩn bị và kiểm tra các yếu tố liên quan để đoàn tàu có thể đi vào hành trình an toàn. Nó cần được thiết lập theo trình tự và kiểm tra tất cả các yếu tố liên quan [16], [17]. Thuật toán xác lập hành trình sẽ được xây dựng như sau.

Trong các hệ thống ĐTG hiện đại sử dụng nguyên tắc 4 bước hình thành sơ đồ xác lập hành trình.

Trong nguyên tắc xác lập hành trình (hình 2), bốn bước này được phản ánh bởi các toán tử: Nhớ hoàn thành $F2$; Khóa hành trình; Nhớ hoàn thành $U3$; Mở cột hiệu.

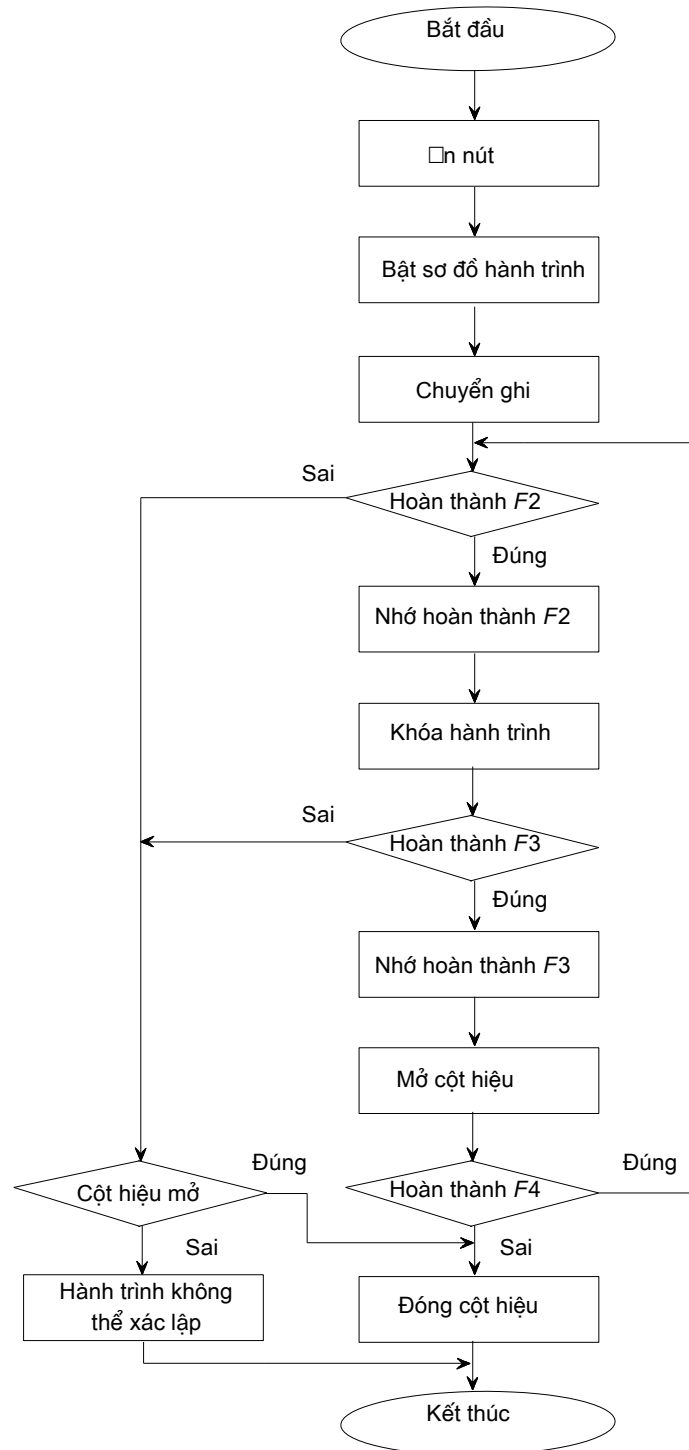
Ở bước đầu tiên, nhờ toán tử logic “Hoàn thành $F2$ ” kiểm tra việc hoàn thành các điều kiện $F2$ tương ứng với công thức (17), tức là kiểm tra khả năng xác lập hành trình này. Nếu điều kiện $F2$ được hoàn thành thì mạch điện sẽ chuyển đến trạng thái nhớ việc hoàn thành các điều kiện $F2$ với toán tử “Nhớ hoàn thành $F2$ ” chuẩn bị cho việc mở tín hiệu. Ở bước 2, tương ứng với toán tử “Khóa hành trình”, lúc này các ghi sẽ được khóa lại, tức là loại bỏ khả năng chuyển ghi theo tuyến đường của hành trình được đặt ra và xác lập các hành trình đối địch.

Ở bước 3 toán tử “Hoàn thành $F3$ ” kiểm tra sự hoàn thành điều kiện $F3$ tương ứng với công thức (18) để đưa đến trạng thái đã hoàn thành các điều kiện $F3$, đủ điều kiện để mở cột hiệu.

Ở bước 4 trên cột hiệu sẽ nổi mạch biểu thị tín hiệu cho phép. Lúc này cần kiểm tra sự tương ứng biểu thị tín hiệu của cột hiệu theo chỉ dẫn được quy định các điều kiện $F4$ tương ứng công thức (19), nếu thỏa mãn, vòng lặp được lặp lại, nếu không thì sẽ đóng cột hiệu.

Sự vi phạm điều kiện $F2$ hoặc $F3$ khi cột hiệu đang đóng thì hành trình không thể xác lập. Nếu điều kiện $F2$, $F3$ hoặc $F4$ vi phạm khi cột hiệu mở ở hành trình xác lập thì cột hiệu

tự động đóng lại. Điều này đạt được bằng một vòng lặp, hình thành các toán tử từ “Hoàn thành $F2$ ” đến toán tử “Hoàn thành $U4$ ”.



Hình 2. Sơ đồ thuật toán xác lập hành trình.

Như vậy tác nghiệp xác lập hành trình trong chức năng của hệ thống ĐTG, thông qua hệ thống thành phần là hệ thống kiên khóa sẽ được thực hiện trên cơ sở sơ đồ thuật toán như hình 2 với việc kiểm tra các điều kiện để đảm bảo an toàn là các toán tử $F2$, $F3$ và $F4$ ở những vị trí tương ứng trên sơ đồ thuật toán.

5. KẾT LUẬN

Hoạt động đúng và an toàn của hệ thống ĐTG có thể có được thông qua việc thiết kế và xác minh hệ thống LMT. Hoạt động của hệ thống ĐTG với “bộ não” là hệ thống LMT sẽ được xây dựng trên cơ sở các sơ đồ thuật toán chức năng và sự có mặt cần thiết của các nhóm yếu tố, thiết bị ở ga đường sắt trong sơ đồ thuật toán.

Từ việc phân tích các hoạt động chạy tàu trong ga, liệt kê đầy đủ và nhóm được các yếu tố, thiết bị tham gia vào quá trình điều khiển, phân tích các tác nghiệp trong quy trình công nghệ điều khiển chạy tàu trong ga, sử dụng các phép toán tập hợp để phân định sự tham gia (không tham gia) của các phần tử (các yếu tố, thiết bị) cho từng tác nghiệp; xây dựng sơ đồ thuật toán của một tác nghiệp (xác lập hành trình) khi có sự tham gia của các yếu tố, thiết bị trong sơ đồ thuật toán sẽ cho chúng ta cơ sở để hệ thống LMT được thực hiện từ sơ đồ thuật toán như thế sẽ đảm bảo hoạt động đúng chức năng và kiểm soát được các yếu tố để đảm bảo an toàn.

Với các nhóm yếu tố, thiết bị liên quan đến hệ thống ĐTG đã được nhóm ra, việc xác định sự tham gia của chúng vào các sơ đồ thuật toán sẽ làm cơ sở cho việc xây dựng các sơ đồ thuật toán của các tác nghiệp khác thông qua phân tích quy trình công nghệ thực hiện tác nghiệp. Chúng dễ dàng được liệt kê đầy đủ và có mặt đúng theo trình tự của quy trình giúp chúng ta kiểm soát được hệ thống LMT về sự hoạt động đúng chức năng và an toàn.

Hệ thống LMT được xây dựng trên cơ sở các thuật toán chức năng có chứa các nhóm yếu tố, thiết bị sẽ đưa ra sự nhất quán trong việc thiết kế, xác minh tính đúng, tính đủ, tính an toàn của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Luật Đường sắt số 06/2017/QH14 ngày 16 tháng 6 năm 2017 của Quốc hội, có hiệu lực kể từ ngày 01 tháng 7 năm 2018, (được sửa đổi, bổ sung bởi: Luật số 35/2018/QH14 ngày 20 tháng 11 năm 2018 của Quốc hội sửa đổi, bổ sung một số điều của 37 luật có liên quan đến quy hoạch, có hiệu lực kể từ ngày 01 tháng 01 năm 2019).
- [2]. Dalay Almeida, David Déharbe, Matthieu Perin, Philippe Bon, B-Specification of Relay-Based Railway Interlocking Systems Based on the Propositional Logic of the System State Evolution. January 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18744-6_16.
- [3]. Nguyễn Duy Việt, Trịnh Thị Hương, Trịnh Văn Mỹ, Vũ Trọng Thuật, Xác định các chỉ số đánh giá an toàn hệ thống tín hiệu điều khiển chạy tàu hiện đại, Tạp chí Khoa học GTVT, 74(8) (2023). <https://doi.org/10.47869/tcsj.74.8.5>
- [4]. Đặng Quang Thạch, Tên nhiệm vụ: Nghiên cứu, chế tạo, thử nghiệm hệ thống điều khiển chạy tàu ga điện khí tập trung ứng dụng công nghệ vi điều khiển, Mã số: ĐĐLCN.12/17, Nghiệm thu 2022.
- [5]. EN50126-2; Railway Applications—Reliability, Availability, Maintainability and Safety Specifications and Demonstrations (RAMS) Part 2: A systems approach to safety. Center for European Standards Management (CEN-CENELEC): Brussels, Belgium, 2017.

- [6] CENELEC (2011): EN50128 - Railway applications - Communication, Signalling and Processing Systems - Software for Railway Control and Protection Systems.
- [7]. Alessandro Cimatti, A Model-Based Approach to the Design, Verification and Implementation of Railway Interlocking Systems. Publisher: IsoLA, 2020.
- [8]. Iliasov, Alexei, Taylor, Dominic Laibinis, Linas, Romanovsky, Alexander. Practical Verification of Railway Signalling Programs. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, (2022). <https://doi.org/10.1109/TDSC.2022.3141555>
- [9]. Zhang, Li-Dong, Railway Signal Interlocking Logic Simulation System. ICCCV 2019: Proceedings of the 2nd International Conference on Control and Computer Vision. 3-7. (2019). <https://doi.org/10.1145/3341016.3341017>
- [10]. Joelle Aoun, Rob M.P. Goverde, Roberto Nardone, Egidio Quaglietta, Valeria Vittorini, Analysis of safe and effective next-generation rail signalling systems, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 162 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104573>
- [11]. Prover, Automated Verification and Validation of Signaling Systems in PTC and CBTC Environments. <https://www.prover.com/expertise/#white-papers>, accessed on May 10, 2021.
- [12]. Lokanna Kadakolmath, Umesh D. Ramu, A Survey on Formal Specification and Verification of Smart Mass Transit Railway Interlocking System, International Journal of Safety and Security Engineering, 11 (2021) 671-682. <https://doi.org/10.18280/ijssse.110607>
- [13]. Hernando, Antonio, Aguilera, Gabriel, Galán García, José, Nazary, Sheida, An interlocking system determining the configuration of rail traffic control elements to ensure safety, AIMS Mathematics, (2024). <https://doi.org/10.3934/math.20241043>
- [14]. Kiều Xuân Đường, Vũ Trọng Thuật, Trần Công Thuyét. Hệ thống tín hiệu ga F1, F2. Nhà xuất bản GTVT, 2006, 2010.
- [15]. Simon Busard, Quentin Cappart, Christophe Limbrée, Charles Pecheur, Pierre Schaus, Verification of railway interlocking systems. 4th International Workshop on Engineering Safety and Security Systems 2015 (ESSS'15) EPTCS 184 (2015) 19–31. <https://doi.org/10.4204/EPTCS.184.2>
- [16]. Cappart, Q., Schaus, P., A Dedicated Algorithm for Verification of Interlocking Systems. In: Skavhaug, A., Guiochet, J., Bitsch, F. (eds) Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2016. Lecture Notes in Computer Science, 9922 (2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-45477-1_7
- [17]. Amendola, A. et al. (2020). A Model-Based Approach to the Design, Verification and Deployment of Railway Interlocking System. In: Margaria, T., Steffen, B. (eds) Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation: Applications. ISoLA 2020. Lecture Notes in Computer Science, 12478 (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-61467-6_16