

Reliability of railway traffic control systems

Βιβλιογραφική Εργασία στο Μάθημα «Αξιοπιστία Συστημάτων» 2024-2025

Ιωάννης Δεϊρμεντζόγλου
Φοιτητής HMMY 10015
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
deirmentz@ece.auth.gr

Ηλιάννα Καμπουρίδου
Φοιτήτρια HMMY 10169
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
iliakamp@ece.auth.gr

Abstract— Η αξιοπιστία στα σιδηροδρομικά συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας είναι ένα πολύ καίριο και κρίσιμο ζήτημα. Σε αυτήν την εργασία, θα αναλύσουμε την λειτουργία του ελέγχου του σιδηροδρομικού συστήματος και την εξέλιξή του. Έπειτα θα παρουσιάσουμε ιδέες από την σύγχρονη βιβλιογραφία που εστιάζουν σε διαφορετικά σημεία του θέματος.

Keywords— σιδηροδρομικά συστήματα, ασφάλεια, αξιολόγηση κινδύνων, παράλληλος έλεγχος, λειτουργίες φραγμού

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αξιοπιστία των σιδηροδρομικών συστημάτων αναφέρεται στην ικανότητα του συνολικού δικτύου να εκτελεί την προοριζόμενη λειτουργία του χωρίς αποτυχίες. Περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία, όπως οι γραμμές, τα συστήματα σηματοδότησης, τα τρένα και την παροχή ενέργειας που τα υποστηρίζει. Οποιαδήποτε αποτυχία σε αυτά τα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις, ατυχήματα ή πλήρη διακοπή λειτουργίας. Στον πυρήνα αυτής της αξιοπιστίας βρίσκεται η σύνθετη αλληλεπίδραση τεχνολογίας, υποδομών και ανθρώπινης εξειδίκευσης.

Η έλλειψη αξιοπιστίας στις σιδηροδρομικές μεταφορές αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο ατυχημάτων, καθώς συχνά συνδέεται με ανεπαρκή συντήρηση υποδομών, καθυστερήσεις στην αντιμετώπιση βλαβών και αστοχίες στον προγραμματισμό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις τρένων, εκτροχιασμούς ή δυσλειτουργίες συστημάτων ασφαλείας, θέτοντας σε κίνδυνο τη ζωή των επιβατών και του προσωπικού.

Ο έλεγχος της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας διαφέρει θεμελιωδώς από όλους τους άλλους τρόπους μεταφοράς. Το κύριο μηχανικό πλεονέκτημα του σιδηροδρόμου είναι η χαμηλή τριβή μεταξύ των τροχών και των ραγών. Δυστυχώς, αυτό προκαλεί το κύριο πρόβλημα ελέγχου, τα πολύ μεγάλα διαστήματα ακινητοποίησης.

Οι πρώτες άμαξες σε ράγες παρουσίαζαν ελάχιστα προβλήματα ελέγχου. Ωστόσο, η ανάπτυξη ταχύτερων ατμοκίνητων τρένων στις αρχές του 19ου αιώνα οδήγησε σε αύξηση του κινδύνου συγκρούσεων. Ο έλεγχος από τις πλευρές των γραμμών εξελίχθηκε σταδιακά. Γίνεται φανερό ότι το πρόβλημα του ελέγχου της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας και της αξιοπιστίας του δεν είναι κάτι καινούργιο.

Στην σημερινή εποχή, η πρόοδος στην τεχνολογία συμβάλλει και στη νέα γενιά συστημάτων αυτόματου ελέγχου τρένων. Αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν τεχνολογίες που αυτοματοποιούν τη διαδικασία ελέγχου των τρένων, μειώνοντας τον ανθρώπινο παράγοντα και βελτιώνοντας την ασφάλεια. Χρησιμοποιούν αισθητήρες και τεχνολογίες επικοινωνίας για να παρακολουθούν την κατάσταση του συνολικού σιδηροδρομικού συστήματος. Στόχος τους είναι να

Risk factor	Sub-indicator	Explanation	Examples
H	μ_{11}	physical discomfort and poor working environment of the staffs	e.g., sudden illness or discomfort
	μ_{12}	inaccurate work attitude and operation of the staffs	e.g., prone and unpleasant psychology during the work
	μ_{13}	staffs are lack of technical and knowledge during all aspects of transportation processes	e.g., mishandling of loading and unloading operations
	μ_{14}	the staffs of dangerous goods manufacturer illegally overload or entrain the goods	e.g., illegal entrainment of goods that are not allowed
	μ_{15}	non-railway personnel's illegal dangerous goods stealing	e.g., residents alone the railway lines illegally stealing coal
M ₁	μ_{21}	failure of transportation equipment	e.g., failure of vehicle's monitoring system
	μ_{22}	failure of dangerous goods storage equipment	e.g., goods loading tank defects, parts aging and loose of the tanks
	μ_{23}	failure of loading and unloading equipment in the handling stations	e.g., failure of technical performance of loading and unloading equipment
M ₂	μ_{31}	the dangerous nature of the loaded and transported goods	e.g., flammable, explosive, corrosive, toxic, infectious and radioactive
	μ_{32}	the packaging of dangerous goods	e.g., mismatched packaging materials for the dangerous goods
	μ_{33}	the volume of the dangerous goods	the more volume of the dangerous goods, the greater risk of the transportation system
E	μ_{41}	the extreme weather condition	e.g., gale, thunder, extreme temperatures, heavy rain
	μ_{42}	the railway lines condition	e.g., electric spark between the power grid and railway vehicle pantograph
	μ_{43}	the sudden natural disaster	e.g., the debris flow, avalanche, landslide, earthquake etc. along the railway lines
M ₃	μ_{51}	failure of transportation laws and safety management	e.g., relevant laws, regulations and regulations are lacking or have omissions
	μ_{52}	failure of safety education management	e.g., defects in staff safety education management system
	μ_{53}	failure of Corporate Qualification Management	e.g., defects in illegal transportation management, defects in scheduling orders

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ RDNGTS

διασφαλίσουν την ασφάλεια, την ακρίβεια και την αποδοτικότητα των σιδηροδρομικών μεταφορών.

Στις ενότητες II, III, IV και V παρουσιάζονται 4 ιδέες από την σύγχρονη βιβλιογραφία.

II. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στην Κίνα η μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο και υλικά ραδιενεργά, εύφλεκτα ή εκρηκτικά, γίνεται σε μεγάλο βαθμό με το σιδηροδρομικό δίκτυο. Το σύστημα αυτό ονομάζεται RDNGTS και εμφανίζει συχνά ατυχήματα που προκαλούν υλικές ζημιές, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τραυματισμούς ή απώλειες ανθρώπινων ζωών. Για την αποτελεσματική διαχείριση αυτών των ατυχημάτων χρησιμοποιούνται 3 διαδικασίες, αναγνώριση, εκτίμηση και έλεγχος κινδύνου.

Η εκτίμηση κινδύνου εστιάζει στην αναγνώριση και αξιολόγηση των γεγονότων κινδύνου, των παραγόντων που τα προκαλούν και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα ταξινόμησης με την εφαρμογή της θεωρίας σχεδιασμού θολής αξιωματικής (FAD) και για να ληφθούν σωστές και ρεαλιστικές αποφάσεις υπό συνθήκες αβεβαιότητας, ο κίνδυνος ενσωματώνεται απευθείας στην εκτίμηση (RFAD Risk-Based Fuzzy Axiomatic Design).

A. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Στόχος του άρθρου είναι η αξιολόγηση-κατάταξη των παραγόντων κινδύνου του RDNGTS. Η κατάταξη σοβαρότητας προκύπτει βάσει των τιμών του περιεχομένου πληροφορίας.

Year	U ₁₁	U ₁₂	U ₁₃	U ₁₄	U ₁₅	U ₂₁	U ₂₂	U ₂₃	U ₂₄	U ₂₅	U ₃₁	U ₃₂	U ₃₃	U ₃₄	U ₃₅	U ₄₁	U ₄₂	U ₄₃	U ₄₄	U ₄₅
1985	6	2	4	5	2	3	1	2	3	2	3	4	3	4	2	2	2	2	2	2
1986	5	8	13	10	7	4	8	8	6	4	4	4	1	1	2	2	3			
1987	7	9	21	11	9	13	4	9	5	5	9	2	1	4	1	3	4			
1988	4	9	24	15	12	6	9	3	5	6	9	3	0	3	3	1	4			
1989	2	6	15	9	6	6	2	2	3	4	7	2	0	4	3	4	6			
1990	6	6	18	16	11	7	6	5	9	6	4	4	2	5	3	3	3			
1991	1	3	6	5	3	8	6	4	10	6	2	3	1	1	4	4	5			
1992	8	8	16	12	8	6	8	8	4	1	1	3	2	5	6	0	3			
1993	2	11	28	9	12	9	5	9	7	3	3	2	4	1	5	0	3			
1994	5	7	16	14	8	7	6	2	4	5	9	1	3	6	2	3	9			
1995	6	8	26	12	12	5	4	1	8	4	4	3	3	3	6	2	7			
1996	11	7	13	9	6	7	4	5	3	5	9	3	3	2	5	7	5			
1997	3	1	2	2	5	6	2	2	5	7	2	4	4	2	4	2	4			
1998	6	8	11	10	7	3	2	7	5	1	4	2	6	5	1	4	3			
1999	9	4	8	9	9	6	10	2	5	3	1	5	6	4	9	9	2			
2000	5	4	9	7	6	3	7	5	9	1	9	2	4	2	1	0	5			
2001	9	11	20	10	11	4	4	9	9	3	9	1	7	3	3	2	3			
2002	2	5	13	5	6	7	5	2	8	7	5	1	4	4	3	1	4			
2003	5	7	12	7	9	6	7	10	12	4	8	4	8	1	4	3	9			
2005	7	5	13	9	15	10	3	3	9	1	3	2	4	3	4	2	9			
2006	9	11	20	11	11	12	2	9	7	5	2	1	4	3	4	1	2			
2007	5	7	15	8	6	3	5	5	5	3	8	3	3	1	1	2	9			
2008	7	10	19	12	10	10	7	7	3	1	2	1	7	2	2	1	5			
2009	9	7	15	9	7	4	6	2	3	3	2	2	3	2	1	1	9			
2010	6	3	5	7	8	1	4	4	7	7	2	2	2	2	1	2	9			
2011	4	2	3	6	2	6	3	3	4	5	4	2	4	1	0	3	9			
2012	4	8	3	4	5	3	3	2	4	3	2	3	3	2	0	0	4			
2012	6	2	5	7	2	2	3	5	6	4	3	2	4	1	0	1	2			
2013	5	3	4	6	3	6	1	0	7	1	6	1	2	3	1	2	1			
2014	6	2	4	5	2	2	1	2	5	3	2	3	1	1	0	0	2			
2015	3	3	2	4	2	6	1	3	1	1	1	0	0	1	0	1	3			
2016	1	2	1	2	1	5	0	2	1	1	2	0	0	1	1	2	1			
2017	1	1	1	2	0	3	1	4	0	0	3	0	1	0	2	1	2			
U ₀	0.38	0.08	0.12	0.23	0.19	0.70	0.20	0.10	0.86	0.06	0.08	0.14	0.56	0.30	0.17	0.27	0.56			

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ. ΔΕΔΟΜΕΝΑ RDNGTS 1986-2017

Οι παράγοντες κινδύνου που επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του RDNGTS μπορούν να ταξινομηθούν θεματικά σε πέντε κατηγορίες: ανθρώπινοι παράγοντες (H), μηχανικοί (M1), υλικών (M2), περιβαλλοντικοί (E) και παράγοντες διαχείρισης (M3). Στον πίνακα 1 φαίνονται αναλυτικά οι παράγοντες με τον δείκτη και την κατηγοριοποίηση τους. Καθώς υπάρχουν δυναμικές και μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των παραγόντων κινδύνου, θα πρέπει να συνυπολογιστούν και να εφαρμοστεί μια συστημική προσέγγιση, όπως είναι η FMEA.

Η διαδικασία FMEA (Ανάλυση Κατάστασης Αποτυχίας και Επιπτώσεων) αναγνωρίζει πιθανές αποτυχίες και τις ταξινομεί σε μοντέλα αποτυχίας χρησιμοποιώντας τον Αριθμό Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN). Ωστόσο παρουσιάζει τρεις κύριους περιορισμούς: 1. Αβεβαιότητα στην αξιολόγηση των μοντέλων αποτυχίας, 2. συνδυασμοί τιμών μπορεί να καταλήγουν στον ίδιο RPN, χωρίς να αντιπροσωπεύουν πλήρως τους διαφορετικούς κινδύνους, 3. Δεν λαμβάνει υπόψη τα βάρη των παραγόντων κινδύνου, παραλείποντας την πραγματική σημασία τους στο σύστημα.

B. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ

Σε αυτό το άρθρο, προτείνεται ένα απαισιόδοξο και αισιόδοξο μοντέλο σχεδιασμού θολής πληροφορίας (POFIA) λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που μπορεί να προκαλέσουν απόκλιση των εκτιμώμενων τιμών από τις πραγματικές. Έχουμε μια συνδυαστική προσέγγιση της FMEA με την POFIA.

Μια περαιτέρω βελτίωση του POFIA είναι η ενσωμάτωση ενός αποδεκτού συντελεστή κινδύνου (ARC). Ο ARC είναι ο παράγοντας που αντιπροσωπεύει τη στάση του αξιολογητή απέναντι στον κίνδυνο (αν είναι πιο συντηρητικός ή τολμηρός).

Ο RFAD διατυπώνεται χρησιμοποιώντας δύο μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο POFIA μετασχηματίζει το πρόβλημα από αξιολογούμενη τιμή κινδύνου σε τυπικό πρόβλημα λήψης απόφασης, με πολλαπλά κριτήρια και ασαφή δεδομένα. Ενώ το δεύτερο μοντέλο POFIA-ARC, προσθέτει τον παράγοντα ως βαρύτητα στις αισιόδοξες και απαισιόδοξες εκτιμήσεις, προσφέροντας μια πιο προσαρμοσμένη ανάλυση κινδύνου και δημιουργώντας ένα ακριβέστερο μοντέλο.

	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{51}	u_{52}	u_{53}
N	175	190	386	269	223	192	137	146	181	117	149	75	100	83	86	71	151
FR ₁	5	4	1	3	2	1	3	2	1	3	2	3	1	2	2	3	1
FR ₂	5	4	1	2	3	1	3	2	1	3	2	3	1	2	2	3	1
FR	5	4	1	2=3	2=3	1	3	2	1	3	2	3	1	2	3	1	2
FT	2	3	5	4	1	2	1	3	2	1	3	3	2	1	2	3	1
	(H)					(M ₁)			(M ₂)			(E)			(M ₃)		
TN	1243					475			447			258			308		
FR ₁	1					3			2			5			4		
FR ₂	1					2			3			5			4		
FR	1					4			2			5			3		
FT	1					2			4			5			3		

Note: N represents the statistical accident number for each subindicator of RDNGTS in China from 1985 to 2017 (in Table IX); TN is the total statistical accident number for each risk factor; FR₁ is the rank results of FMEA-POFIA; FR₂ shows the rank results of FMEA-POFIA-ARC; FR shows the rank of FMEA. FT shows the rank of approach which combines FMEA and TFNs.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η διαδικασία μας λειτουργεί με 3 μεθόδους που στοχεύουν στην υπέρβαση των περιορισμών του FMEA:

1. Τριγωνικοί θολοί αριθμοί (TFNs) χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της σοβαρότητας των αστοχιών (S), της πιθανότητας εμφάνισης (O) και της δυνατότητας ανίχνευσης (D) για κάθε δείκτη κινδύνου. Ένας τέτοιος αριθμός αναπαρίσταται από ένα τριγωνικό σχήμα τριών σημείων. Στην κορυφή βρίσκεται η πιθανότερη τιμή και στα 2 κάτω άκρα η ελάχιστη και η μέγιστη πιθανή τιμή. Αντικαθιστώντας τους πραγματικούς αριθμούς 1-10 του FMEA, οι TFNs επιτρέπουν μια πιο ευέλικτη και ακριβή απόδοση τιμών.

2. Μοντέλα POFIA και POFIA-ARC για υπολογισμό πληροφοριακού περιεχομένου των S, O, και D για κάθε δείκτη κινδύνου. Το γινόμενο αυτών αντικαθιστά το παραδοσιακό RPN. Τα μοντέλα χρησιμοποιούν τους TFNs για να λάβουν τις απαισιόδοξες και αισιόδοξες προβλέψεις.

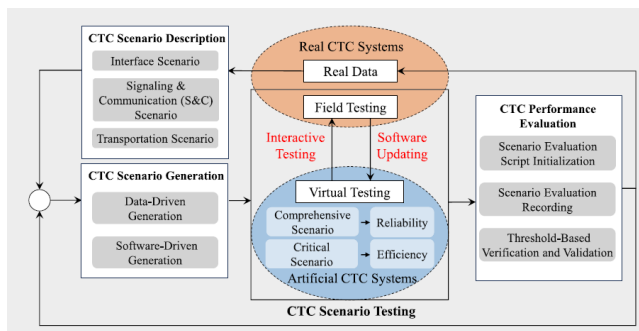
3. Μέθοδος Βαρύτητας Εντροπίας (EWM) για υπολογισμό του βάρους κάθε δείκτη κινδύνου, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι σχετικές συνεισφορές των δεικτών στην συνολική ανάλυση. Αποδίδει βάρη στα κριτήρια χωρίς υποκειμενικότητα, χρησιμοποιώντας μόνο τις πληροφορίες που παρέχονται από τα δεδομένα.

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια πιο αξιόπιστη ιεράρχηση των κινδύνων και παρέχει ένα πλαίσιο που μειώνει την υποκειμενικότητα και βελτιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

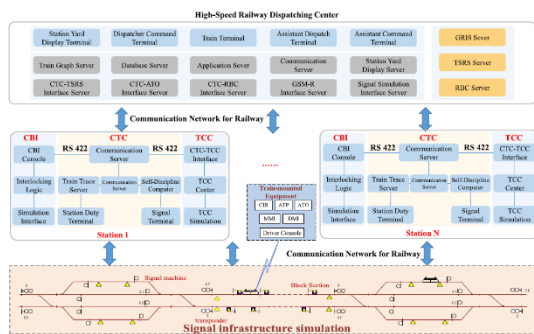
C. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Πραγματοποιείται ανάλυση και σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων FMEA-POFIA-ARC, FMEA-POFIA, FMEA και FMEA με TFNs. Για το case study παίρνουμε ιστορικό δεδομένων ατυχημάτων του κινεζικού RDNGTS από το 1986 έως το 2017 για κάθε δείκτη, τα βάρη για τα συγκεκριμένα δεδομένα φαίνονται στον πίνακα 2. Για κάθε μέθοδο υλοποιήθηκε όλη η διεργασία και τα τελικά αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα 3.

Οι δύο προτεινόμενοι μέθοδοι FMEA-POFIA και FMEA-POFIA-ARC δίνουν σχεδόν ίδια κατάταξη με μια μικρή διαφοροποίηση στον ανθρώπινο παράγοντα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι πιο επικίνδυνοι υποδείκτες κινδύνου είναι η έλλειψη γνώσεων των εργαζομένων, η αποτυχία του συστήματος μεταφοράς, η επικίνδυνη φύση του υλικού, η κατάσταση των γραμμών και η αποτυχία διαχείρισης ποιοτικών πιστοποιήσεων.



ΣΧΗΜΑ 1. Παράλληλος Έλεγχος για CTC Systems



ΣΧΗΜΑ 2. Τεχνητά CTC Συστήματα

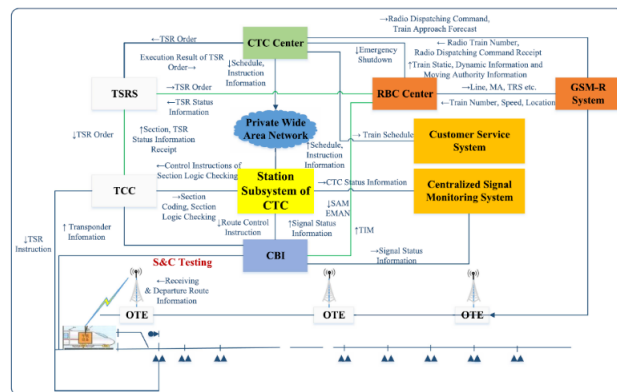
D. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά κάθε μέθοδος έδωσε διαφορετική κατάταξη για την σοβαρότητα κάθε κατηγορίας κινδύνου όπως φαίνεται και στο σχήμα. Όλες όμως έβγαλαν πρώτο σε κρίσιμότητα τον ανθρώπινο κίνδυνο, που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Τέλος αναφέρεται ότι σε σύγκριση με τα αποτελέσματα ανάλυσης του αριθμού στατιστικών ατυχημάτων, τα αποτελέσματα των προτεινόμενων προσεγγίσεων είναι πιο αξιόπιστα από τα αποτελέσματα των προσεγγίσεων FMEA και FMEA με TFNs.

III. ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΓΙΑ ΚΕΝΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (CTC) ΕΥΦΥΩΝ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΩΝ

Το σύστημα CTC (Centralized Traffic Control) είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή διαχείριση και διακίνηση σιδηροδρομικών συστημάτων υψηλής ταχύτητας (HSR). Μέχρι τώρα, το επίπεδο ευφυΐας των υπάρχοντων συστημάτων δοκιμής είναι περιορισμένο. Τα συστήματα δοκιμών CTC περιλαμβάνουν κυρίως προσομοιωτικές δοκιμές (virtual testing), που κατασκευάζουν εικονικά περιβάλλοντα για την επαλήθευση, απαιτώντας υψηλό κόστος σε χειρωνακτική εργασία, και δοκιμές πεδίου (field testing), που προσπαθούν να επαληθεύσουν την απόδοση πραγματικές συνθήκες αλλά λόγω πολυπλοκότητας οδηγούν σε υψηλό κόστος χρόνου.

Το άρθρο προτείνει μια μέθοδο δοκιμής που βασίζεται σε σενάρια για τον παράλληλο έλεγχο των συστημάτων CTC, συνδυάζοντας δοκιμές σε εικονικό περιβάλλον και πραγματικές συνθήκες, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τη διασφάλιση πλήρους κάλυψης και αξιοπιστίας των δοκιμών. Ο παράλληλος έλεγχος περιλαμβάνει δοκιμές εικονικού και πραγματικού κόσμου με βάση εκτέλεση



ΣΧΗΜΑ 3. Λειτουργία CTC

σεναρίων και έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε αυτόνομα οχήματα, επιταχύνοντας την αξιολόγηση και την ανάπτυξη της ευφυΐας οχημάτων.

A. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CTC

Ο όρος "Centralized Traffic Control (CTC)" εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1927, με σκοπό να περιγράψει την κεντρική διαχείριση μέσω σηματοδότησης στο σιδηροδρομικό σύστημα. Σταδιακά το σύστημα CTC εξελίχθηκε σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και προγραμματισμού τρένων, προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις κάθε χώρας.

Οι πρώτες δοκιμές για τα συστήματα CTC γίνονταν χειροκίνητα, συνεπώς απαιτούσαν πολλούς πόρους και είχαν περιορισμένη αξιοπιστία. Οι εικονικές δοκιμές αναπτύχθηκαν ως μια ημιαυτόματη μέθοδος, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά προγράμματα για να προσομοιώνουν δυναμικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι έχουν περιορισμούς, όπως η αδυναμία πλήρους αυτοματοποίησης ή προσομοίωσης ακραίων συνθηκών.

B. ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CTC

Ο στόχος του παράλληλου ελέγχου για τα συστήματα CTC είναι να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη δοκιμή, τόσο σε ανεξάρτητα όσο και σε συνδυασμένα σενάρια, ενώ ταυτόχρονα να μειωθεί στο ελάχιστο η ανθρώπινη παρέμβαση. Η διαδικασία του παράλληλου ελέγχου περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: Περιγραφή Σεναρίων, Δημιουργία Σεναρίων CTC, Δοκιμή μέσω Εικονικής-Πραγματικής Αλληλεπίδρασης, Αξιολόγηση Απόδοσης CTC. Η μέθοδος αυτή δημιουργεί παράλληλο σύστημα ελέγχου με κλειστό βρόχο. Παρέχει μια ολοκληρωμένη και αποτελεσματική αξιολόγηση των συστημάτων CTC. Στο σχήμα 1 βλέπουμε την σχηματική αναπαράσταση του παράλληλου ελέγχου στα συστήματα αυτά.

Τα Τεχνητά Συστήματα CTC (Artificial CTC Systems) βασίζονται σε μια κατανομημένη δομή δικτύου που χρησιμοποιεί πράκτορες και προσομοιώνει πλήρως τις λειτουργίες του πραγματικού συστήματος CTC. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 2. Το σύστημα περιλαμβάνει τέσσερα κύρια υποσυστήματα:

1. Υποσύστημα Κέντρου Διαχείρισης (Dispatching Center Subsystem): Είναι υπεύθυνο για την προετοιμασία και την προσαρμογή του σχεδίου λειτουργίας των τρένων και την αποστολή του σχεδίου στους σταθμούς.

2. Υποσύστημα Σταθμών (Railway Station Subsystem): Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και τον έλεγχο των δραστηριοτήτων μεταφοράς στους σταθμούς, εξασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία των τρένων. Αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: τους αυτόνομους υπολογιστές που προσομοιώνουν τη λειτουργία της αυτόνομης διαχείρισης σταθμών, το σύστημα αλληλεξάρτησης (Interlocking System) που ανταποκρίνεται στις εντολές ελέγχου για την αλλαγή της κατάστασης εξοπλισμού σηματοδότησης και το σύστημα ελέγχου τρένων (Train Control Centers- TCC) που προσομοιώνει την κατάσταση της κυκλοφορίας και επικοινωνεί με το CTC.

3. Υποσύστημα Δικτύου Επικοινωνίας (Artificial Communication Network): Αποτελείται από συσκευές επικοινωνίας και κανάλια μετάδοσης. Προσομοιώνει το δίκτυο GSM-R για τη μετάδοση δεδομένων. Το σύστημα επιτρέπει τη μετάδοση εντολών και προβλέψεων, ενώ επικοινωνεί και με το σύστημα RBC για τη μετάδοση πληροφοριών σχετικών με την ταχύτητα και τη γραμμή.

4. Προσομοίωση Υποδομής Σήμανσης: Μοντελοποιεί τη δυναμική λειτουργία των τρένων και βασίζεται σε δεδομένα από την πραγματική σιδηροδρομική γραμμή. Δημιουργεί ένα εικονικό περιβάλλον που περιλαμβάνει σταθμούς, γέφυρες και την τοπογραφία της γραμμής.

C. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ CTC

Το Σχήμα 3 απεικονίζει πώς λειτουργεί το Σύστημα Ελέγχου Κυκλοφορίας (CTC) σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο μέσω της συνεργασίας διαφορετικών υποσυστημάτων. Το κεντρικό CTC Center είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την αποστολή εντολών. Συνδέεται με άλλα υποσυστήματα, όπως το RBC Center, που λαμβάνει και στέλνει δεδομένα για την κίνηση των τρένων. Το Station Subsystem of CTC αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ του κεντρικού CTC και των τοπικών συστημάτων, όπως το CBI και διαχειρίζεται τη σηματοδότηση, τις εντολές διαδρομών και τη μεταφορά δεδομένων ασφαλείας για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας. Το CBI λαμβάνει αυτές τις εντολές και φροντίζει για την ρύθμιση των σηματοδοτικών συστημάτων και την εκτέλεση των διαδρομών.

Παράλληλα, το TSRS ρυθμίζει και διαχειρίζεται περιορισμούς ταχύτητας, ενώ το TCC ασχολείται με την αποστολή δεδομένων για την ασφαλή λειτουργία της γραμμής, όπως την κωδικοποίηση και τον έλεγχο λογικών τμημάτων. Το Private Wide Area Network εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ όλων των υποσυστημάτων. Το RBC Center συνεργάζεται με το GSM-R για τη συλλογή δεδομένων από τα τρένα, όπως η τοποθεσία, η ταχύτητα και ο αριθμός τους, και επιστρέφει οδηγίες στο CTC Center για τη διαχείριση της κυκλοφορίας. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης εξωτερικό εξοπλισμό, όπως το ΟΤΕ, που συλλέγει δεδομένα που βοηθούν στην παρακολούθηση της κατάστασης των τρένων.

D. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ CTC

Η περιγραφή των σεναρίων στοχεύει στην αποσύνθεση όλων των περιεχομένων δοκιμής και των λειτουργικών στοιχείων του συστήματος CTC σε ανεξάρτητες ενότητες. Αυτές οι ενότητες παραμετροποιούνται με σκοπό την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης αναπαράστασης σεναρίων. Οι ενότητες σεναρίων δοκιμών διακρίνονται σε:

1) *Διεπαφής (Interface Scenarios)*: για την επαλήθευση της συνοχής των δεδομένων και της ακρίβειας στην επικοινωνία μεταξύ συστημάτων, όπως το CBI (Computer-Based Interlocking), όπου ελέγχεται η συνέπεια δεδομένων παρουσίασης, εντολών και ρυθμίσεων διαδρομής, και TCC, TSRS, και RBC, που ελέγχουν την ακρίβεια δεδομένων που ανταλλάσσονται.

2) *Σενάρια Σήμανσης και Επικοινωνίας (S&C Scenarios)*: για την διασφάλιση ότι όλες οι χειροκίνητες ενέργειες του CTC είναι ακριβείς και σύμφωνα με τους κανόνες ασφαλείας. Περιλαμβάνει το Railway Terminal S&C Testing, όπου εξετάζεται η συνέπεια των δεδομένων λειτουργίας μεταξύ του τερματικού μηχανήματος και των μέτρων ασφαλείας και το Dispatching Console S&C Testing, όπου ελέγχεται η ορθότητα των σχεδίων μεταξύ του σταθμού εργασίας και του συστήματος αλληλεξάρτησης.

3) *Σενάρια Μεταφοράς (Transportation Scenarios)*: για να διασφαλιστεί η πλήρης λειτουργικότητα και η σταθερότητα του CTC. Περιλαμβάνουν το Virtual Testing, όπου προσομοιώνεται το σύστημα CTC και το περιβάλλον λειτουργίας και ελέγχονται λειτουργίες όπως αυτόματη χάραξη διαδρομών και εναλλαγή λειτουργιών, και το Field Testing, όπου διεξάγονται δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες για την επαλήθευση της ασφαλείας και της αξιοπιστίας του συστήματος.

Μετά την ανεξάρτητη δοκιμή των τριών σεναρίων, τα δεδομένα συνδυάζονται χρονικά και χωρικά, σχηματίζοντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον συνολικό έλεγχο του συστήματος CTC.

E. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ CTC

Η δημιουργία δοκιμαστικών σεναρίων βασίζεται στην περιγραφή των σεναρίων που αναλύθηκαν προηγουμένως και πραγματοποιείται μέσω αυτόματων σχεδιασμών δοκιμών. Ανάλογα με το αντικείμενο των δοκιμών, η δημιουργία σεναρίων χωρίζεται σε: Σενάρια βάσει δεδομένων (Data Driven-Generation), Σενάρια βάσει λογισμικού (Software Driven-Generation).

Δημιουργία Σεναρίων για Δοκιμές Δεδομένων : χρησιμοποιείται η τεχνική αυτόματης έγχυσης δεδομένων. Το σύστημα δοκιμάζει την ακρίβεια εντολών από τον αυτόνομο υπολογιστή του CTC, τις απαντήσεις από το σύστημα αλληλεξάρτησης, και την τελική αναπαράσταση των σημάτων.

Δημιουργία Σεναρίων για Δοκιμές Λογισμικού: η δημιουργία σεναρίων βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα. Χρησιμοποιούνται καταγεγραμμένα δεδομένα λειτουργίας του CTC για την αυτόματη εξαγωγή χαρακτηριστικών που χρησιμεύουν ως βάση για επαναλαμβανόμενες δοκιμές. Αυτή η μέθοδος αξιολογεί την ακρίβεια των λειτουργιών του λογισμικού μέσω σύγκρισης αποτελεσμάτων με αναμενόμενα δεδομένα.

F. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ-ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

Ο παράλληλος έλεγχος συνδυάζει δοκιμές στον εικονικό και τον πραγματικό κόσμο για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του συστήματος CTC. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνει ολοκληρωμένη επαλήθευση μέσω ενός κλειστού

No.	Testing Item	Testing Content	Manual Testing Time	Parallel Testing Time	Saved
1	Environment Setup	Interlocking environment and CTC environment setup	≈ 1 h	≈ 24 min	60%
2	Switch Verification	Switch operation and consistency	≈ 250 min	≈ 125 min	50%
3	Deraill Verification	Deraill state operation and consistency	≈ 270 min	≈ 135 min	50%
4	Signal Verification	Consistency between CTC and CBI signals	≈ 415 min	≈ 208 min	50%
5	Route Button Verification	Button operation and consistency	≈ 75 min	≈ 37.5 min	50%
6	Section Verification	Section state operation and delay display	≈ 335 min	≈ 167.5 min	50%
7	Route Verification	Consistency between route instructions and display	≈ 2000 min	≈ 1000 min	50%

TABLE V. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΔΙΕΠΑΦΗΣ

βρόχου που περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια: τις εικονικές δοκιμές και τις παράλληλες δοκιμές εικονικών και πραγματικών σεναρίων.

Εικονικές Δοκιμές: Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιούνται εικονικές δοκιμές όπου ανεξάρτητα και συνδυασμένα σενάρια δοκιμάζονται σε μεγάλη κλίμακα για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των επιμέρους ενότητων και υποσυστημάτων. Αυτά τα σενάρια μπορούν να προσαρμοστούν για να γίνουν πιο ακραία μέσω της ρύθμισης εξωτερικών παραγόντων με σκοπό το σύστημα να δοκιμαστεί και να φανεί η αξιοπιστία του σε ακραίες συνθήκες.

Πραγματικές Δοκιμές και Παράλληλη Αλληλεπίδραση: επικεντρώνονται στην αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος CTC υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Παράλληλα, οι εικονικές δοκιμές χρησιμοποιούν δεδομένα από τις πραγματικές δοκιμές για να δημιουργήσουν πρόσθετα σενάρια που υποστηρίζουν τον τεχνητό έλεγχο. Κάθε πραγματική δοκιμή αντιστοιχεί σε πολλαπλές εικονικές δοκιμές, δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο αλληλεπίδρασης που βελτιώνει την αποτελεσματικότητα των δοκιμών και ενισχύει την απόδοση του συστήματος.

G. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ CTC

Το ποσοστό επιτυχίας των σεναρίων λειτουργεί ως βασικός δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης υπολογίζεται με αυτόματες μεθόδους διακριτοποίησης. Η μέθοδος αυτή αρχικά δημιουργεί μια βιβλιοθήκη εμπειριών με ιστορικά δεδομένα. Χρησιμοποιεί μεθόδους αυτόματης σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών με τις αναμενόμενες τιμές και καθορίζει κριτήρια επιτυχίας βάσει διαφορών στα δεδομένα. Η διαδικασία αξιολόγησης βοηθά στον εντοπισμό κρίσιμων σεναρίων και στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

H. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Το σύστημα παράλληλου ελέγχου CTC εφαρμόστηκε στην γραμμή υψηλής ταχύτητας Πεκίνο-Τιαντζίν μήκους 166 χιλιομέτρων, σχεδιασμένη για ταχύτητες έως 350 χλμ/ώρα. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί η λειτουργικότητα. Η διαδικασία υλοποίησης χωρίστηκε σε τρία στάδια:

1) **Δημιουργία Τεχνητού Συστήματος:** Δημιουργήθηκε ένα τεχνητό σύστημα υψηλής ταχύτητας που προσομοιώνει τη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου.

2) **Περιγραφή και Δημιουργία Σεναρίων:** Καθορίστηκαν τα 3 βασικά σενάρια δοκιμών. Τα σενάρια εξετάζουν την αλληλεπίδραση του CTC με φυσικά και τεχνητά συστήματα, καθώς και με εξωτερικούς παράγοντες όπως το περιβάλλον και η τοπογραφία.

3) **Σύνδεση Εικονικού και Πραγματικού Κόσμου:** Το σύστημα συνδύασε την προσομοίωση με δεδομένα πραγματικών συνθηκών λειτουργίας.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα λειτουργίας για τα τρία βασικά σενάρια:

No.	Testing Item	Testing Content	Manual Testing Time	Parallel Testing Time	Saved
1	Schedule Drawing	Draw testing train operation schedule	≈ 50 min	≈ 25 min	50%
2	Route Instruction Verification	Check route instructions via train operation schedule	≈ 300 min	≈ 150 min	50%
3	Station Detail Condition Check	Check the conditions in the SODR	≈ 300 min	≈ 150 min	50%
4	Train Tracking Simulation	Simulate train operation and light band changes	≈ 1300 min	≈ 650 min	50%

TABLE VI. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

1) **Σενάρια Διεπαφής (Interface Scenario Testing):** Επαληθεύτηκε η συνοχή δεδομένων μεταξύ του CTC και συστημάτων σηματοδότησης. Η παράλληλη δοκιμή βελτίωσε την αποδοτικότητα κατά 50%, μειώνοντας τον χρόνο δοκιμής και το ανθρώπινο λάθος. Ο πίνακας VI παρουσιάζει τα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ των παράλληλων δοκιμών και των χειροκίνητων δοκιμών για τα σενάρια διεπαφής (Interface Scenario Testing).

2) **Σενάρια Σήμανσης και Επικοινωνίας (S&C):** Ελέγχθηκε η ακρίβεια και αξιοπιστία χειροκίνητων και αυτόνομων λειτουργιών. Οι παράλληλες δοκιμές βελτίωσαν την αποδοτικότητα κατά 30% σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους.

3) **Σενάρια Μεταφοράς (Transportation Scenarios):** Αξιολογήθηκαν όλες οι λειτουργίες CTC σε δυναμικές συνθήκες, όπως η αυτόματη χάραξη διαδρομών. Η αποδοτικότητα βελτιώθηκε κατά 50% σε σχέση με τις χειροκίνητες δοκιμές. Ο πίνακας VII συγκρίνει τη χειροκίνητη και την παράλληλη δοκιμή σε σενάρια μεταφοράς.

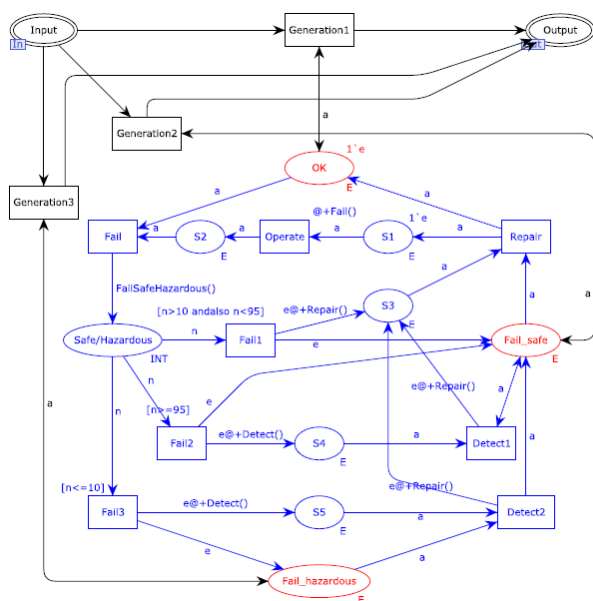
I. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της μηχανικής σεναρίων και της αλληλεπίδρασης εικονικών και πραγματικών δοκιμών, η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει την βελτίωση της αποτελεσματικότητας, με την κάλυψη όλων των απαραίτητων δοκιμών, την μείωση κόστους και φόρτου εργασίας και την αύξηση της σταθερότητας και αξιοπιστίας, κατά 50% σε σχέση με τις χειροκίνητες μεθόδους σύμφωνα με την μελέτη περίπτωσης.

IV. ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΜΑΞΟΣΤΟΙΧΙΑΣ (CTCS) ΜΕ STOCHASTIC COLORED PETRI NETS

Επί του παρόντος, η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ασφάλειας των σιδηροδρομικών συστημάτων πραγματοποιείται κυρίως μέσω της Ανάλυσης Δέντρου Σφαλμάτων (FTA) και της Ανάλυσης Δέντρου Γεγονότων (ETA). Η FTA (Fault Tree Analysis) χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αιτιών που οδηγούν σε μια ανεπιθύμητη κατάσταση (αποτυχία ή δυσλειτουργία). Ενώ η ETA (Event Tree Analysis) εξετάζει την αλληλουχία πιθανών αποτελεσμάτων από ένα αρχικό γεγονός (σφάλμα ή αποτυχία). Παρά τις επεκτάσεις και τις παραλλαγές τους, οι μέθοδοι αυτοί εξακολουθούν να έχουν περιορισμούς, ως προς την ενσωμάτωση μη γραμμικών σχέσεων, την ακρίβεια της ποσοτικής ανάλυσης και την δυνατότητα επισκευής εξαρτημάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα ζητήματα, προτείνεται μια νέα προσέγγιση για την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση ασφάλειας του CTCS-3, με τη χρήση Stochastic Colored Petri Nets (CPNs). Το ιεραρχικό αυτό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα σενάρια λειτουργίας, την κίνηση των τρένων και την αποτυχία/επισκευή των εξαρτημάτων. Τα **Petri Nets** είναι ένα



ΣΧΗΜΑ 4. Εισαγωγή Αποτυχίας σε Εξάρτημα Συστήματος

μαθηματικό και γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση, την ανάλυση και την προσομοίωση συστημάτων με ταυτόχρονη ή παράλληλη εκτέλεση διεργασιών.

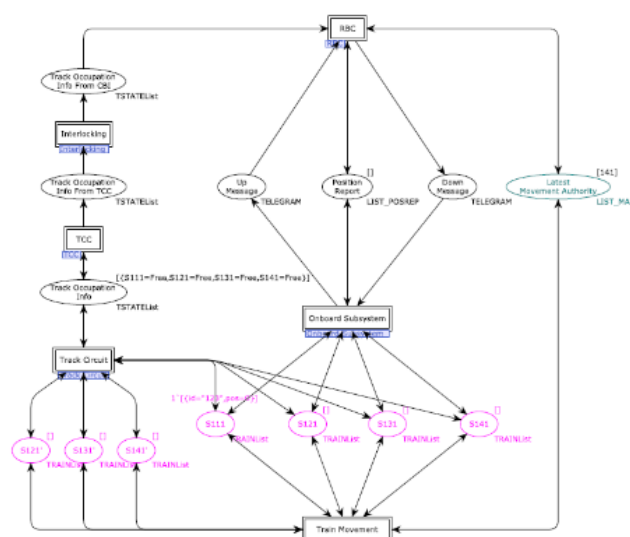
A. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ CPN_s

Η επέκταση των CPNs, εισάγει τις έννοιες του color set (σύνολο χρωμάτων) και των token colors. Τα CPNs παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης δεδομένων μέσω των τόκενς, που περιέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του συστήματος. Η ιεραρχική δομή των CPNs διευκολύνει τη μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων, καθώς επιτρέπει τη διάσπαση του συστήματος σε υπομοντέλα, καθένα από τα οποία εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες.

Τα δίκτυα αυτά συνήθως αναπαρίστανται ως directed graphs. Οι θέσεις (places) αναπαριστούν καταστάσεις του συστήματος και οι μεταβάσεις (transitions) αντιστοιχούν σε ενέργειες ή γεγονότα. Τα tokens φέρουν δεδομένα και αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα κατάσταση (π.χ. την κατάσταση ενός τρένου «εν κινήσει» ή «σταματημένο»). Κάθε token έχει ένα συγκεκριμένο χρώμα, που αντιπροσωπεύει την τιμή ή τον τύπο των δεδομένων που κουβαλάει. Μετακινούνται μέσω των transitions, οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος.

Για την αξιολόγηση της ασφάλειας, το μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει την πιθανότητα αποτυχιών. Κάθε εξάρτημα μπορεί να βρίσκεται σε κανονική λειτουργία (OK) ή σε κατάσταση αποτυχίας (Failed), η οποία διακρίνεται σε ασφαλή (fail-safe) ή επικίνδυνη (fail-hazardous). Οι αποτυχίες εισάγονται στοχαστικά, ενώ λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες ανίχνευσης και επισκευής.

Στο σχήμα 4 απεικονίζεται η διαδικασία εισαγωγής αποτυχιών στο σύστημα, προκειμένου να αξιολογηθούν οι συνέπειες και οι δυνατότητες ανάκαμψης. Η μετάβαση Fail αναπαριστά την εμφάνιση μιας αποτυχίας στο σύστημα. Η μετάβαση Detect αναφέρεται στη διαδικασία ανίχνευσης της αποτυχίας. Η μετάβαση Repair αναπαριστά τη διαδικασία επισκευής του συστήματος. Το input για κάθε μετάβαση είναι



ΣΧΗΜΑ 5. Ανώτερο επίπεδο CPN μοντέλου για CTCS-3 σύστημα

το token που βρίσκεται στην θέση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη φάση του συστήματος (π.χ. κανονική λειτουργία ή αποτυχία), ενώ το output είναι η νέα θέση στην οποία μετακινείται το token μετά την εκτέλεση της μετάβασης.

B. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CTCS-3

Το CTCS-3 είναι ένα προηγμένο σύστημα ελέγχου τρένων που εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές υψηλής ταχύτητας. Αποτελείται από δύο βασικά υποσυστήματα:

- 1) Το επίγειο υποσύστημα, με συστήματα όπως τα Radio Block Centers (RBC) και τις μονάδες επικοινωνίας GSM-R για ασύρματη επικοινωνία, και τα κυκλώματα τροχιάς. Το RBC λαμβάνει δεδομένα σχετικά με την κατάσταση της γραμμής και αποστέλλει εξουσιοδοτήσεις κίνησης στο τρένο.
- 2) Το ενσωματωμένο υποσύστημα με μονάδες όπως το Vital Computer (VC), το Driver Machine Interface (DMI), και τον υπολογιστή ελέγχου ταχύτητας και απόστασης. Αυτό το υποσύστημα παρακολουθεί τις παραμέτρους της λειτουργίας του τρένου, διασφαλίζοντας ότι τηρούνται οι κανόνες ασφαλείας.

Δύο βασικά σενάρια χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση, το πρώτο κατά την εκκίνηση όπου το τρένο ξεκινά τη διαδικασία αποστολής του αναγνωριστικού του στο RBC (Registration and Startup), ενώ μετά την επικοινωνία λαμβάνει εξουσιοδότηση κίνησης, το δεύτερο σενάριο, όπου το τρένο στέλνει περιοδικές αναφορές θέσης στο RBC. Με βάση την κατάσταση της γραμμής, το RBC εκδίδει νέες εξουσιοδοτήσεις για τη συνεχιζόμενη ασφαλή κίνηση του τρένου.

Στο ανώτερο επίπεδο, το σύστημα μοντελοποιείται μέσω υποσυστημάτων που συνδέονται μεταξύ τους. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 5 για το σύστημα CTCS-3. Στο σύστημα αυτό, το RBC (Radio Block Center) είναι το κεντρικό σύστημα ελέγχου που διαχειρίζεται την μετάδοση των πληροφοριών σχετικά με την τοποθεσία.

Το υποσύστημα πάνω στο τρένο επικοινωνεί με το RBC για να στείλει την αναφορά θέσης και να λάβει εντολές για την κίνηση του τρένου. Το TCC (Train Control Center) παρέχει στο υποσύστημα του τρένου και στο RBC τις

STATISTICS FROM SIMULATION PERFORMANCE REPORT ACCORDING TO DIFFERENT FAILURE RATES OF TCC

TCC failure rate (MTTF)	Average of occurrences of Two Trains in S121 (n_1)	Average of occurrences of Two Trains in S131 (n_2)	Average of occurrences of Two Trains in S141 (n_3)	Average of occurrences of hazardous events ($n_1 + n_2 + n_3$)
0.000333 (50min)	0.600000	0.400000	0.600000	1.600000
0.000417 (40min)	0.800000	0.800000	1.200000	2.800000
0.000556 (30min)	1.200000	1.400000	1.400000	4.000000
0.000833 (20min)	1.400000	1.600000	1.200000	4.200000
0.00111 (15min)	1.000000	1.800000	1.600000	4.400000
0.00167 (10min)	1.800000	2.400000	2.200000	6.400000
0.00333 (5min)	2.600000	2.800000	3.400000	8.800000
0.00556 (3min)	5.200000	5.200000	5.200000	15.600000

¹ Note that the show-up rate of the Train-xxx is set to be 0.00167, i.e., the mean time to show up for the Train-xxx is 10 minutes.

TABLE VI. ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΑΠΟΤΥΧΙΑΣ ΤΟΥ TCC

STATISTICS FROM SIMULATION PERFORMANCE REPORT ACCORDING TO DIFFERENT SHOW-UP RATES OF TRAIN-XXX

Show-up rate of Train-xxx (mean time to show up)	Average of occurrences of Two Trains in S121 (n_1)	Average of occurrences of Two Trains in S131 (n_2)	Average of occurrences of Two Trains in S141 (n_3)	Average of occurrences of hazardous events ($n_1 + n_2 + n_3$)
0.000333 (50min)	1.000000	0.800000	1.000000	2.800000
0.000417 (40min)	0.600000	1.000000	0.800000	2.400000
0.000556 (30min)	1.400000	1.200000	0.800000	3.400000
0.000833 (20min)	0.800000	0.600000	0.600000	2.000000
0.00111 (15min)	0.400000	0.400000	0.600000	1.400000
0.00167 (10min)	1.800000	1.400000	2.000000	5.200000
0.00333 (5min)	1.000000	1.000000	0.800000	2.800000
0.00556 (3min)	0.600000	0.800000	1.200000	2.600000

¹ Note that the failure rate of the TCC is set to be 0.000556, i.e., the mean time to failure of the TCC is 30 minutes.

TABLE VII. ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΡΥΘΜΟΥΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΟΥ TRAIN-XXX

πληροφορίες για την κατάληψη γραμμών. Η μονάδα του Interlocking λειτουργεί για να παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των γραμμών σε όλες τις υπόλοιπες μονάδες του συστήματος.

Από την πλευρά του, το Track Circuit παρακολουθεί την κατάσταση της κατάληψης των γραμμών, ελέγχοντας τμήματα της γραμμής (ροζ ετικέτες στο διάγραμμα). Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την αποτροπή συγκρούσεων μεταξύ τρένων. Το RBC λαμβάνει τις πληροφορίες κατάληψης και τοποθεσίας και υπολογίζει την ασφαλέστερη πορεία κίνησης για το τρένο.

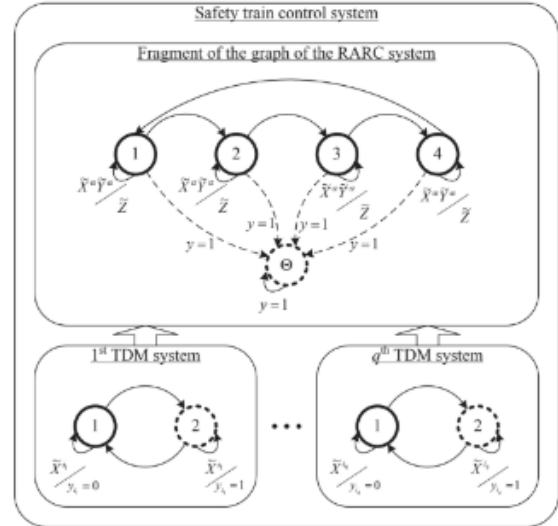
C. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ CTCS-3

Η ποιοτική ανάλυση χρησιμοποιεί τον χώρο καταστάσεων για να αξιολογήσει την ορθότητα του μοντέλου. Ο χώρος καταστάσεων απεικονίζει όλες τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος και τις μεταβάσεις μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνουν ότι το μοντέλο είναι πλήρως λειτουργικό και ότι όλες οι βασικές λειτουργίες μπορούν να ενεργοποιηθούν ξανά, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και τη σταθερότητα του συστήματος.

Η ποσοτική ανάλυση εστιάζει στη μέτρηση και στον υπολογισμό δεικτών αξιοπιστίας και ασφάλειας. Υπολογίζονται δύο βασικοί δείκτες: Μέσος Χρόνος μέχρι την Αποτυχία (MTTF) και Μέσος Χρόνος Επισκευής (MTTR). Ενώ επιπλέον γίνονται και μετρήσεις για Μέσο Χρόνο Εμφάνισης Επικίνδυνου Γεγονότος (MTTHE) και Πλήθους Επικίνδυνων Καταστάσεων.

Η αξιολόγηση του συστήματος γίνεται μέσω προσομοιώσεων του μοντέλου με διάφορες παραμέτρους, όπως ο Ρυθμός αποτυχίας του TCC (Train Control Center) και ο Ρυθμός εμφάνισης δεύτερου τρένου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση του ρυθμού αποτυχίας του TCC αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των επικίνδυνων καταστάσεων ενώ ο ρυθμός εμφάνισης του δεύτερου τρένου έχει μικρότερη επίδραση στην ασφάλεια του συστήματος. Οι μετρήσεις αυτές αποδεικνύουν την ικανότητα του προτεινόμενου μοντέλου να αναγνωρίζει επικίνδυνες καταστάσεις και να αξιολογεί την πιθανότητα εμφάνισής τους υπό διαφορετικά σενάρια.

Ο Πίνακας VI παρουσιάζει τους μέσους όρους εμφάνισης επικίνδυνων γεγονότων για διαφορετικούς ρυθμούς αποτυχίας του TCC (Train Control Center) δηλαδή του Mean Time to Failure, βάσει 5 προσομοιώσεων. Στο σενάριο αυτό,



ΣΧΗΜΑ 6. Σύστημα Ασφαλούς Ελέγχου Τρένων υπό τη Μορφή FSM

θεωρείται ότι ο χρόνος επισκευής του TCC είναι μια τυχαία διακριτή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 λεπτών. Η ταχύτητα του Train-123 είναι σταθερή στα 300 km/h, ενώ η ταχύτητα του Train-xxx είναι 200 km/h.

Ο Πίνακας VII παρουσιάζει τους μέσους όρους εμφάνισης επικίνδυνων γεγονότων για διαφορετικούς ρυθμούς εμφάνισης του Train-xxx, βάσει 5 προσομοιώσεων. Από τα δεδομένα φαίνεται ότι ο αριθμός των επικίνδυνων γεγονότων αυξάνεται καθώς ο ρυθμός αποτυχίας του TCC αυξάνεται. Αντίθετα, η μεταβολή του ρυθμού εμφάνισης του Train-xxx δεν έχει σημαντική επίδραση στον μέσο αριθμό επικίνδυνων γεγονότων.

D. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

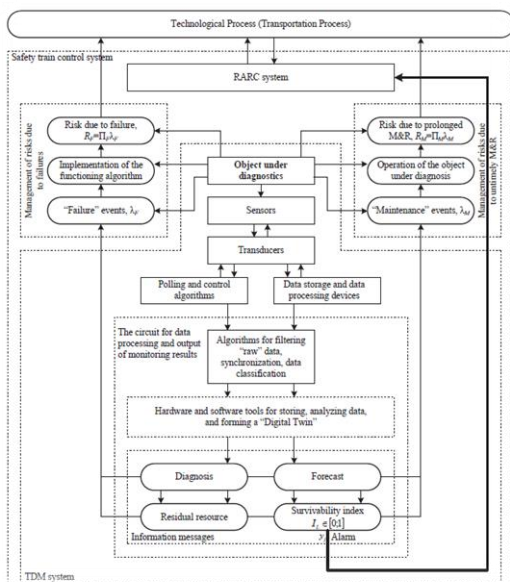
Η παραπάνω ανάλυση καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο μοντέλο Colored Petri Net (CPN) είναι ικανό να αξιολογήσει με ακρίβεια την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος CTCS-3. Το μοντέλο προσφέρει μια πιο ρεαλιστική και ευέλικτη προσέγγιση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης. Οι δυνατότητες των CPNs συμβάλλουν στην πρόβλεψη και αντιμετώπιση επικίνδυνων καταστάσεων.

V. ΑΣΦΑΛΗΣ ΚΙΝΗΣΗ ΜΕ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΥΛΙΚΟΥ

Στη σύγχρονη υλοποίηση τους τα συστήματα ελέγχου τρένων, είναι ασφαλή όσον αφορά τον χωρικό διαχωρισμό των τρένων, αλλά όχι ασφαλή σε συνάρτηση με την κατάσταση της σιδηροδρομικής υποδομής, με την οποία δεν αλληλεπιδρούν άμεσα. Συνεπώς δεν οδηγούμαστε σε ουσιαστική βελτίωση της ασφάλειας κυκλοφορίας.

A. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΩΝ

Τα συστήματα παρακολούθησης και διάγνωσης (TDM) επιτρέπουν τη διαχείριση κινδύνων που προκύπτουν από αποτυχίες και προσφέρουν τη δυνατότητα έγκαιρης διάγνωσης προβλημάτων. Η σύνδεσή τους με τα συστήματα



ΣΧΗΜΑ 7. Δομή Ασφαλούς Συστήματος Ελέγχου Τρένων

αυτοματισμού και τηλεχειρισμού σιδηροδρόμων (RARC) είναι αναγκαία και πρέπει να αποτελέσει το τελικό στάδιο στη δομή των συσκευών που εξασφαλίζουν την ασφάλεια των σιδηροδρομικών μεταφορών.

Τα RARC συστήματα εξασφαλίζουν την ασφαλή κυκλοφορία των τρένων και περιγράφονται ως μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων, FSM. Τα τρέχοντα συστήματα διασφαλίζουν την εσωτερική ασφάλεια, αλλά για να αντιμετωπιστούν οι εξωτερικοί κίνδυνοι υποδομών, πρέπει να εξελιχθούν.

B. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται συμβατικά ένα σύστημα ασφαλούς ελέγχου τρένων υπό τη μορφή FSM. Ως ιδέα, προτείνεται να εγκατασταθούν **q** συστήματα TDM, καθένα από τα οποία παράγει ένα σήμα συναγερμού. Αυτά μπορούν να διαγνώσουν προβλήματα σε αντικείμενα όπως η δομή της σιδηροδρομικής τροχιάς, οι αναρτήσεις των γραμμών ρεύματος, οι γέφυρες κλπ. Έπειτα τα σήματα συναγερμού στέλνονται από τα συστήματα παρακολούθησης στο σύστημα ελέγχου διαχείρισης των συσκευών RARC.

Οι εγκαταστάσεις RARC, ως τελικά στοιχεία, πρέπει να υλοποιούν μία «λειτουργία φραγής», δηλαδή μείωση ταχύτητας ως και φρενάρισμα του τρένου, όταν εντοπίζουν αποτυχίες σε αντικείμενα υποδομής. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την ασφάλεια των σιδηροδρομικών μεταφορών και μειώνει τον κίνδυνο αποτυχιών.

C. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Το σύστημα αυτό αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου δικτύου ασφαλείας. Στο σχήμα 7 φαίνεται μια ενδεικτική υλοποίηση αυτού του δικτύου. Μέσω της έγκαιρης διάγνωσης και της διαχείρισης κινδύνων, ενισχύεται η δυνατότητα ανίχνευσης επικίνδυνων καταστάσεων και προσαρμογής της κυκλοφορίας. Αυτό μειώνει σημαντικά τα ατυχήματα και αυξάνει την αποδοτικότητα συντήρησης,

συμβάλλοντας στην συνολική βελτίωση της ασφάλειας του σιδηροδρομικού συστήματος.

Η ενσωμάτωση αυτή είναι τεχνικά απαιτητική, για αυτό ως πρώτο στάδιο προτείνεται η έμμεση ενσωμάτωση με τα συστήματα RARC. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται να μεταφέρεται το σήμα συναγερμού ως τα RARC και στην συνέχεια αυτή η πληροφορία να γίνεται αντιληπτή από τον αρμόδιο, κάτι που θα επιτρέψει, αν και όχι αυτόματα, την ταχύτερη παρέμβαση σε περίπτωση κινδύνου.

Οπότε έχουμε με ημιαυτόματο (και στη συνέχεια πλήρως αυτόματο) τρόπο, την εφαρμογή λειτουργιών φραγμού για τον περιορισμό της ταχύτητας των τρένων ως και πλήρη διακοπή της κυκλοφορίας σε περίπτωση επικίνδυνης κατάστασης.

VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι παραπάνω προσεγγίσεις υπογραμμίζουν τη σημασία της συνδυαστικής χρήσης τεχνολογικών, αναλυτικών και οργανωτικών εργαλείων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας στα σιδηροδρομικά συστήματα. Η αξιολόγηση και κατάταξη κινδύνων παρέχει ένα στρατηγικό πλαίσιο για την αναγνώριση και την αντιμετώπιση των μεγαλύτερων απειλών που ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία των σιδηροδρόμων. Ο παράλληλος έλεγχος στα Κεντρικά Συστήματα Ελέγχου Κυκλοφορίας ενισχύει τη δυνατότητα διαχείρισης και τον έλεγχο πολλαπλών σεναρίων και κρίσιμων καταστάσεων. Η ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση των συστημάτων ελέγχου αμαξοστοιχιών μέσω της χρήσης Colored Petri Nets αποδεικνύεται ένα ισχυρό εργαλείο για τη μοντελοποίηση και τον υπολογισμό πιθανοτήτων αποτυχίας. Ενώ η εφαρμογή λειτουργιών φραγμού συμβάλει στην πρόληψη των ατυχημάτων σε επικίνδυνες καταστάσεις.

Η ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας αποτελεί βασικό στόχο για τη διατήρηση της εμπιστοσύνης του κοινού και την περαιτέρω ανάπτυξη των σιδηροδρομικών μεταφορών, διασφαλίζοντας όχι μόνο την λειτουργία αλλά και την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

REFERENCES

- [1] W. Huang, Y. Zhangu (February 2020) "Railway Dangerous Goods Transportation System Risk Assessment: An Approach Combining FMEA With Pessimistic-Optimistic Fuzzy Information Axiom Considering Acceptable Risk Coefficient". *IEEE Journal of Transactions On Reliability*, vol. 70, issue 1, pages: 371 - 388. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9016146> doi: 10.1109/TR.2020.2973431
- [2] W. Xu, X. Dai (August, 2023) "Parallel Testing for Centralized Traffic Control Systems of Intelligent Railways". *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 8, issue 9, pages: 4249 - 4262. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10219055> doi: 10.1109/TIV.2023.3305543
- [3] D. Wu, D. Lu (August, 2022) "Qualitative and Quantitative Safety Evaluation of Train Control Systems (CTCS) With Stochastic Colored Petri Nets". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 23, Issue 8, pages: 10223 - 10238. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9463878> doi: 10.1109/TITS.2021.3088136
- [4] D. Efanov, G. Osadchy (September 2021) "Fundamentals of Implementation of Safety Movement of Trains under Integration of Control Systems with Hardware for Railway Infrastructure Facilities Monitoring". *IEEE 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9660985> doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660985

- [5] <https://www.britannica.com/technology/traffic-control/Rail-traffic-control> (November,2024)
- [6] <https://www.swartzengineering.com/blog/heart-railway-system-reliability> (November,2024)