

مدلسازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

سید احمد میرابوطالبی، کارشناسی ارشد، گروه کنترل و علائم، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
بهمن قربانی واقعی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه کنترل و علائم، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: bahman_gh@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

چکیده

مدارات راه به عنوان اصلی ترین سنسور برای تشخیص حضور قطار در تراک های مختلف است. عملکرد صحیح و خراب-ایمن در این مدارات راه بسیار اهمیت دارد. از این رو، محققان به دنبال روش های مختلف کنترل عملکرد و تشخیص و شناسایی عیوب در این مدارات راه هستند. در این راستا اولین مرحله، درک کامل و جامع از نحوه عملکرد این مدارات است. از این رو، مدلسازی این مدارات راه در رسیدن به این هدف الزامی است. در این مقاله، اجزای مختلف مدارات راه فرکانس صوتی اعم از فرستنده، واحدهای تنظیم سمت فرستنده و گیرنده، ریل و گیرنده به صورت الکتریکی و فانکشنال مدلسازی شده و در نهایت یک مدل سیستمی جامع به همراه پارامترهای آن برای این مدارات ارائه می شود. سیگنال خروجی تمامی این اجزا با داده های اندازه گیری شده در یک خط مترو عملیاتی مطابقت داده شده و مدلسازی از لحاظ صحت اعتبارسنجی می گردد. همچنین، با استفاده از مدل استخراج شده برای مدار راه فرکانس صوتی و با توجه به درخت عیب این مدار راه، ارزیابی قابلیت اطمینان برای هر کدام از اجزا و کل مدار راه انجام می گیرد.

واژه های کلیدی: مدار راه، مدار راه فرکانس صوتی، مدلسازی، قابلیت اطمینان

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

خطوط راه آهن برقی ارجحیت دارد [Efanov, Osadchy, 2019], [Higuch .et al, 2021].

اولین مطالعات در زمینه تأثیرات جریان ناشی بر عملکرد این نوع از مدارات راه توسط هیل (R.J. Hill) در سال ۱۹۸۹ انجام شد که این مقاله مبنای کار بسیاری از محققین که در زمینه مدل‌سازی این نوع از مدارات راه فعالیت داشتند، قرار گرفت [Hill, Carpenter, Taser, 1989]. ریل، قسمت یکسان در مطالعه تمامی مدارات راه می‌باشد و از این رو، در عملکرد کلیه مدارات راه مدل‌سازی شده است. ریلها یکی از اجزای اصلی هر مدار راه هستند و اکثر خرابی‌ها و عیوب در عملکرد مدارات راه فرکانس صوتی نیز در همین قسمت رخ می‌دهد و از این رو دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. هر چه دقت مدل‌سازی ریل و رفتار مداری آن بیشتر باشد، در نتیجه مدل‌سازی کلی برای مدارات راه فرکانسی نیز از دقت بالاتری برخوردار است. در سال ۱۹۹۱، مدل‌های نظری مدار راه فرکانسی برای محاسبه مقادیر اندوکتانس و مقاومت داخلی ریل که شامل مسأله اشباع مواد و هیستریزس بوده است، ارائه گردید. همچنین منحنی‌های تغییرات امپدانس ریل بر حسب تغییرات میزان جریان و فرکانس آن توسط روش‌های تحلیلی محاسبه گشتند که با اندازه‌گیری های تجربی مطابقت داشتند [Hill, Carpenter, 1991]. در ادامه این کار، در سال ۱۹۹۳ مدارات راه و تداخلات مغناطیسی به صورت بلوکی و سیستماتیک مدل‌سازی و اثرات تغییر پارامترهای خط بر مدار راه و عملکرد نرمال گیرنده بررسی شد [Hill, Coles, 1993]. در این فعالیت‌ها، فرستنده تنها به صورت یک مولد سیگنال در یک فرکانس خاص مدل می‌شد و از مدولاسیون و کدگذاری استفاده نمی‌گردید. در سال بعد یعنی در سال ۱۹۹۴، هیل (R.J. Hill) به همراه همکارش یک شبیه‌ساز کامپیوتری برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد مدارات راه فرکانس صوتی ارائه نمود. نتایج این شبیه‌ساز با داده‌های واقعی مورد

در طول سال‌های اخیر، مدار راه به‌عنوان اصلی‌ترین گزینه برای تشخیص حضور قطار در تراک مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این بین، تغییرات بسیاری بر روی ساختار و نحوه عملکرد این مدارات صورت گرفته است و انواع مدار راه از دیدگاه منبع سیگنال استفاده شده است. از این دیدگاه، مدارات راه به چهار دسته مدارات راه DC، مدارات راه AC، مدارات راه فرکانس صوتی و مدارات راه ایمپالسی تقسیم می‌گردند [Havaei, Sandidzadeh, 2022]. اولین و ساده‌ترین نوع مدارات راه، مدارات راه DC هستند که در آن از یک منبع تولید سیگنال DC در سمت فرستنده و یک رله در سمت گیرنده استفاده می‌شود. در برخی از طرح‌های برق‌رسانی راه آهن، از یک یا هر دو ریل برای حمل جریان برگشتی ترکشن استفاده می‌شود. در این حالت، چون جریان برگشتی ترکشن نسبت به جریان DC مدار راه مقدار قابل توجهی است، بر جریان مدار راه غلبه می‌کند. به همین دلیل، از مدارات راه DC نمی‌توان در خطوط برقی استفاده کرد. یکی دیگر از مدارات راه، مدارات راه AC است که نحوه عملکرد آن بسیار شبیه مدارات راه DC است؛ با این تفاوت که جریان مدارات راه در این مدل از مدارات راه از نوع AC است. از این نوع از مدارات راه نیز در خطوط برقی به دلیل تداخلات الکتریکی با هارمونیک‌های برق شهری نمی‌توان استفاده کرد. مدارات راه فرکانس صوتی، از سیگنال با فرکانس‌های بالا که از مضارب فرکانس برق شهری دور هستند، استفاده می‌کند. همچنین، مدارات راه فرکانس صوتی به دلیل عدم استفاده از اتصالات عایقی در مرز تراک‌ها، ایمنی و قابلیت اطمینان بالای آنها به‌طور گسترده در خطوط برقی و مترو استفاده می‌شوند. مدارات راه ایمپالسی، نیز می‌توانند در خطوط برقی مورد استفاده قرار گیرند؛ اما این مدارات به اتصالات عایقی برای جداسازی الکتریکی تراک‌ها نیاز دارند. به همین دلیل، استفاده از مدارات راه فرکانس صوتی، نسبت به تمام مدارات راه در کاربردهای عملی مترو و

مدل‌سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

و اندوکتانس ریل، در فرکانس‌های مختلف در واحد طول محاسبه و ارائه گردید [Mariscotti, Pozzobon, 2004]. استفاده کاربردی از مدل‌سازی مدارات راه فرکانس صوتی، مرحله پس از مدل‌سازی می‌باشد. از این رو، در سال ۲۰۱۰، پس از مدل‌سازی مدار راه فرکانس صوتی از آن برای تنظیم خازن‌های جبران‌ساز ریل استفاده گردید. در ضمن، نتایج شبیه‌سازی در یکی از خطوط پرسرعت راه‌آهن ایتالیا مورد استفاده قرار گرفت و از لحاظ اعتبار سنجی، صحت نتایج و کارایی آن اثبات گردید [Mariscotti, Ruscelli, Vanti, 2010]. یکی دیگر از مواردی که عملکرد و خرابی مدارات راه بر آن اثر می‌گذارد، مدیریت ترافیک بلادرنگ می‌باشد. از این رو برای برنامه‌ریزی ترافیکی خطوط در زمان وقوع یک اتفاق غیر منتظره و کاهش زمان تأخیر در عملکرد سیستم ریلی، نیاز به مدل‌سازی مدارات راه و انتخاب مسیرهای جدید برای قطارها است [Pellegrini, Marliere, Rodriguez, 2012]. در مقاله [Zhang et al, 2019] از مدل‌سازی مدارات راه فرکانس صوتی برای تشخیص و شناسایی عیب در این مدارات استفاده شده است.

نگاه مفصل به نحوه کارکرد مدارات راه فرکانس صوتی صرف نظر از نوع و شرکت سازنده آن، در درک هر چه بهتر عملکرد آن تأثیرگذار است. شناخت اجزای مدارات راه فرکانس صوتی، مزایا و معایب این نوع از مدارات راه و تجزیه و تحلیل امپدانس باندها در این مساله حائز اهمیت است [Vora, Trivedi, Mehendale, 2012]. مدل‌سازی این مدارات برای تشخیص و شناسایی عیب نیز از دیگر نگرش‌های کاربردی است. توصیف کامل این مدارات به صورت سیستماتیک و نحوه تغییر پارامترهای الکتریکی در آن، برای تشخیص سریع و به موقع عیوب لازم و ضروری است. در سال ۲۰۱۳، در مقاله [Sandidzadeh, Dehghani, 2013] پس از مدل‌سازی یک نوع خاص از مدارات راه فرکانس صوتی موسوم به TI21 بر اساس اسناد فنی منتشر شده در

ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که از دقت خوبی برخوردار است [Hill, Berova, 1994].

در سال ۱۹۹۹، یک مدل مغناطیسی، برای شناخت ریل و پارامترهای امپدانس سری و ادمیتانس موازی بیان و رفتار پارامترهای یک تراک بر اساس مقدار جریان، فرکانس، مشخصات فیزیکی ریل و رسانایی زمین ارائه شد [Hill, Brillante, Leonard, 1999], [Hill, Brillant, Leonard, 2000]. در مترو و راه آهن از S-bond ها برای مسیر جریان برگشتی ترکشن استفاده می‌شود. براین اساس، تجزیه و تحلیل تأثیر مدارهای S-bond بر امپدانس ریل و محاسبه ولتاژ القایی در پایانه‌های گیرنده در [Addio et al, 1999] انجام شده است. هم چنین، در [Gavrilovic, 2004] یک مدل ریاضی برای بیان تداخلات الکترومغناطیسی جریان برگشتی ترکشن و جریان مدار راه و تأثیرات منفی بر عملکرد ایمن مدار راه ارائه شد. تداخلات الکترومغناطیسی جریان ترکشن و جریان مدار راه مستقیماً بر کیفیت انتقال سیگنال مدار راه و عملکرد آن تأثیرات منفی می‌گذارد. این تداخلات دارای مکانیزم پیچیده‌ای بوده و تحت تأثیر عوامل مختلفی چون مقدار واحدهای ترکشن در یک رام قطار، میزان بار و سرعت حرکت قطار می‌باشد. از این رو، به سختی می‌توان یک مدل تحلیلی دقیق، برای مدل‌سازی اختلالات الکترومغناطیسی جریان ترکشن و مدار راه ایجاد کرد. یکی از راه‌های مقابله با این مسأله، نگاه آماری به این قضیه است. بر این اساس، ویژگی‌های توزیع احتمال تداخلات جریان ترکشن و مدار راه از روی داده‌های عملیاتی یک قطار واقعی در [Zhao, Li, 2012]، جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. با استفاده از روش آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و تقریب حداقل مربعات یک مدل توزیع احتمال برای مسأله تداخلات الکترومغناطیسی جریان ترکشن و مدار راه ارائه شد [Zhao, Li, 2012]. در سال ۲۰۰۴، اندازه‌گیری ولتاژ و جریان یک نمونه ریل فولادی (UNI60) و محاسبه امپدانس و اندوکتانس آن، با یک مدل الکتریکی ارائه شد. در این مدل، مقدار مقاومت

معادلات توصیفی ولتاژ و جریان ریل و استفاده از ماتریس‌ها برای مدل‌سازی ریل نیز یکی از انواع مدل‌سازی ریل است [Aliev, 2021]. تقسیم امپدانس ریل به دو بخش امپدانس داخلی و خارجی و محاسبه هر یک از آن‌ها در [Du, 2015] Zou, Wang, 2015 ارائه شد. یک مرجع قابل اعتماد برای محاسبه نظری امپدانس ریل در مدار راه با توجه به فرکانس جریان و عمق خاک و بستر بالاست در [Zhao, Jia, 2021] Wang, 2021 ارائه شد. در مقاله [Aliev.R, Aliev.M, Tokhirov, 2022] یک رویکرد جدید برای سازگاری مدار راه فرکانس صوتی با سرعت بالای قطارها در راه‌آهن‌های پر سرعت، پیشنهاد شده است.

در این مقاله، علاوه بر مدل‌سازی ریل به صورت تفاضلی به مدل‌سازی سایر اجزای یک مدار راه فرکانس صوتی شامل فرستنده، واحدهای تنظیم و گیرنده ارائه می‌شود که تا کنون بدین شکل و به صورت یکپارچه ارائه نگشته است. از طرفی، استفاده از روش مدل تفاضلی برای مدل‌سازی ریل علاوه بر افزایش دقت نسبت به کارهای صورت گرفته تاکنون، امکان تشخیص عیب و خرابی مانند شکستگی ریل را به صورت دقیق و با دقت بالا در تشخیص ناحیه شکستگی در ریل فراهم می‌کند. همچنین مدل کاملتری نسبت به مراجع با مدل‌سازی تابع مدولاسیون در قسمت فرستنده و مدولاسیون گیرنده مدار راه صوتی بدست می‌آید. در نهایت پس از اعتبار سنجی مدل و مطابقت با داده‌های تجربی خط ۷ متروی تهران، با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته درخت عیب مدار راه استخراج و اندازه‌گیری‌های قابلیت اطمینان هر کدام از قسمت‌های مدار راه فرکانس صوتی، به صورت نظری محاسبه گردید. لازم به ذکر است که نرخ‌های خرابی هر کدام از این قسمت‌ها، از مقاله [Su, Wang, 2013] استخراج گردیده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم اصول و نحوه عملکرد مدارات راه و همچنین مدارات راه فرکانس صوتی ارائه می‌شود. پس از آن، در بخش سوم نحوه مدل‌سازی اجزای مدارات

[Bombardier Transportation, 2011] که در خطوط راه‌آهن ایران مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، تشخیص و شناسایی ۱۱ نوع عیب در این سیستم که اغلب ریشه در کابل-های اتصالی داشتند، ارائه شد. نحوه کارکرد کلی و اصول مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری مدارات راه فرکانس صوتی معمول (بمباردیر، زیمنس، آل استوم و آنسالدو) به- صورت جامع در سال ۲۰۱۴ منتشر شد [Indian Railways, 2014].

تداخلات مغناطیسی یک امر غیرقابل انکار در عملکرد مدارات راه فرکانس صوتی است که موجب خرابی و وقوع اشتباه در عملکرد صحیح این مدارات راه می‌باشد. به دنبال آن، در نظر گرفتن مدل جامعی که این تداخلات را نیز وارد مدل‌سازی کند، بسیار کاربردی است [Boteler, 2021]. یکی از روش‌های معمول برای مقابله با تداخلات الکترومغناطیسی در مدارات راه، استفاده از فیلترهای میان‌گذر است. استفاده از این فیلترها دارای درجاتی از آزادی هستند که باید از نظر عدم قطعیت نیز مورد بررسی قرار گیرند [Mariscotti, 2013]. امروزه از امپدانس باندها برای جلوگیری از تداخلات جریان ترکشن و مدار راه در راه‌آهن‌های پرسرعت استفاده می‌شود. در سال ۲۰۱۵، مدل‌سازی مداری این امپدانس باندها و نحوه رفتار آن‌ها تحت فرکانس‌های مختلف بررسی شد [Yang et al, 2015]. اختلالات ژئومغناطیسی در برخی از کشورها، باعث خرابی در عملکرد صحیح مدارات راه و در نتیجه سیگنال‌ها شده است. مدل‌سازی میدان‌های الکتریکی ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی و چگونگی تأثیر آن‌ها بر عملکرد مدار راه در [Boteler, 2021] ارائه شده است.

در تعریف روابط ولتاژ و جریانی در ریل، بیشتر محققین از یک ضریبی تحت عنوان ضریب انتشار نام برده‌اند. ضریب انتشار، مقدار و چگونگی انتشار ولتاژ و جریان در طول ریل را مشخص می‌کند. این ضریب می‌تواند ماهیتی نمایی، لگاریتمی و یا هذلولوی داشته باشد. استفاده از روابط هذلولوی، در

مدل‌سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

نگهداری آن‌ها مشکل است. از این رو، با اتخاذ روش‌هایی مانند چندفرکانس کردن مدار راه یا موازی کردن آن، دیگر به اتصالات فیزیکی عایق‌بندی نیاز نیست [Department of Communication and Electrical Signals, 2009]. همچنین در مترو از ریل‌ها به‌عنوان مسیر برگشتی جریان ترکشن نیز استفاده می‌شود. از این رو برای جلوگیری از تداخلات الکتریکی و مغناطیسی از مدارات راه فرکانس صوتی استفاده می‌شود.

۲-۱ اصول عملکرد مدار راه فرکانس صوتی

مدار راه فرکانس صوتی یکی از انواع مدارات راه است که در خطوط معمولی و برقی (AC و DC) استفاده می‌شود و نیازی به ایزولاسیون فیزیکی بین تراک‌های مجاور ندارد و عمل جداسازی دو تراک مجاور به‌وسیله مدارات الکتریکی صورت می‌پذیرد. در این صورت، رسانایی ریل برای استفاده قطارهای برقی کاملاً حفظ می‌شود.

دلیل نام‌گذاری این مدارات راه، استفاده آن‌ها از سیگنال‌های الکتریکی با فرکانس‌های ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز که محدوده فرکانس شنیداری انسان است، می‌باشد [Vora, Trivedi, Mehendale, 2012]. فرکانس‌های مورد استفاده توسط این دستگاه، باندهای متفاوتی را در برمی‌گیرند. به‌طور مثال همان‌طور که در جدول (۱) ارائه شده‌است، مدار راه شرکت بمباردیر که به‌طور خاص در متروی تهران مورد بهره‌برداری قرار گرفته است (TI21-M)، از محدوده فرکانسی ۵/۶ تا ۸/۶ کیلوهرتز به‌صورت ۸ فرکانس مجزا به‌نام‌های F_1 تا F_8 استفاده می‌کند.

راه فرکانس صوتی ارائه خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم آمده است و این نتایج با داده‌های واقعی که از خط ۷ متروی تهران جمع‌آوری شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش پنجم، نتایج این کار ارائه می‌شود.

۲. تجزیه و تحلیل مدارات راه فرکانس صوتی

مدار راه یک قطعه الکتریکی ساده برای تشخیص حضور یا عدم حضور قطار در قسمتی از ریل (تراک) است. پس از تعیین حضور یا عدم حضور قطار در تراک توسط مدار راه، از سیگنال خروجی آن برای کنترل مستقیم و غیرمستقیم سیستم‌های ایمنی مثل سیستم‌های سیگنالینگ، سیستم‌های تعویض سوزن و ... استفاده می‌شود.

ریل به قسمت‌هایی به‌طول معین موسوم به تراک تقسیم می‌شود که هر کدام از این قسمت‌ها به یک مدار راه اختصاص داده می‌شود. لازم به ذکر است که هر کدام از این قسمت‌ها از نظر الکتریکی نسبت به هم عایق‌بندی شده‌اند. اصول کار در تمامی مدارات راه به این صورت است که یک سیگنال الکتریکی در یک سمت تراک تولید می‌شود؛ این سیگنال الکتریکی از طریق ریل به سمت دیگر تراک هدایت می‌شود و در آن سمت توسط گیرنده‌ای (رله) دریافت خواهد شد. حال اگر هیچ قطاری در مدار راه حضور نداشته باشد، رله با اخذ جریان کافی از منبع تغذیه جذب شده و تراک آزاد اعلام می‌شود. اما اگر مدار راه به‌وسیله قطار یا واگن اشغال شود، مدار الکتریکی توسط مقاومت کم چرخ و محورهای همان قطار اتصال کوتاه شده و سپس رله دفع و تراک اشغال اعلام می‌شود [Department of Communication and Electrical signals, 2009].

در مرزهای مدار راه، اتصالات عایق‌بندی‌شده برای جداسازی مدارات راه مجاور در ریل وجود دارد. این سیستم عایق‌بندی نقطه‌ضعف اصلی در مدارات راه بوده و هزینه تعمیر و

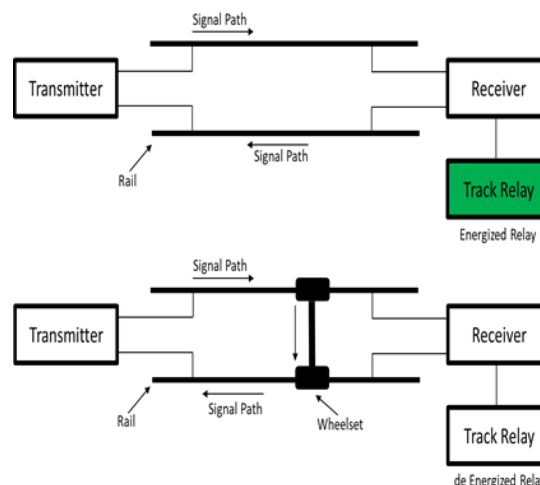
در این سیستم، هر قطعه تراک برای خود به طور منحصر دارای یک کد خاص و فرکانسی مشخص می‌باشد که با روش FSK مدوله شده‌است. این سیگنال از طریق واحد فرستنده به تراک مورد نظر اعمال می‌شود. مدار گیرنده در انتهای خط، ولتاژ و کد دریافتی را آنالیز می‌نماید و در صورت تطابق کد دریافتی و فرکانس مربوطه با کد و فرکانسی که به طور خاص برای تراک در نظر گرفته شده‌است و همچنین مطلوب بودن سطح انرژی سیگنال دریافتی، رله جذب شده و آزادی تراک اعلام می‌گردد. ورود قطار به محدوده تراک سبب اتصال کوتاه دو ریل شده و در نتیجه عدم دریافت سیگنال با سطح انرژی مناسب از پیش تعیین شده (حد آستانه) توسط گیرنده، باعث اعلام اشغال تراک می‌شود. تغییر دادن فرکانس و کد مورد نظر با عوض کردن وضعیت تعدادی سویچ واقع در پانل دستگاه انجام می‌گردد. بدین ترتیب تراک‌های مجاور همواره دارای کد و فرکانسی متفاوت می‌باشند.

استفاده از میکروپروسورها به صورت دوتایی در گیرنده باعث افزایش دقت و قابلیت اطمینان سیستم (رزرو گرم) گردیده- است؛ بدین صورت که خروجی جهت اعلام آزادی تراک تنها زمانی ارسال می‌گردد که هر دو پروسور موافق آن باشند. از دیگر مشخصات این سیستم، قابلیت کنترل و تغذیه از راه دور می‌باشد؛ بدین معنی که کلیه قسمت‌های الکترونیکی و فعال در اتاق تجهیزات علائم قرار می‌گیرند و تنها مدارات تطبیق خط که غیرفعال می‌باشند در محوطه و کنار خط قرار دارند.

مدارات راه فرکانس صوتی از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که در ذیل آمده‌اند [Havaei, Sandidzadeh, 2022]:

- واحد فرستنده که کد مربوطه و فرکانس حامل را تولید می‌کند. سپس با استفاده از روش FSK، عمل مدولاسیون را انجام داده و سیگنال ارسالی را در مرحله آخر تقویت می‌نماید.

- واحد گیرنده که انجام دمدولاسیون و پردازش سیگنال دریافتی از وظایف این واحد می‌باشد.

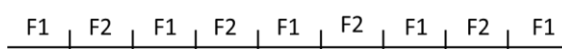


شکل ۱. نحوه عملکرد یک مدار راه ساده

جدول ۱. هشت باند فرکانسی مورد استفاده در مدارات راه

TI21-M			
شماره	فرکانس	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
فرکانس	نامی	مجاز	مجاز
F ₁	۶۱۰۰ هرتز	۶۰۰۰ هرتز	۶۲۰۰ هرتز
F ₂	۷۷۰۰ هرتز	۷۶۰۰ هرتز	۷۸۰۰ هرتز
F ₃	۶۹۰۰ هرتز	۶۸۰۰ هرتز	۷۰۰۰ هرتز
F ₄	۸۵۰۰ هرتز	۸۴۰۰ هرتز	۸۶۰۰ هرتز
F ₅	۵۷۰۰ هرتز	۵۶۰۰ هرتز	۵۸۰۰ هرتز
F ₆	۷۳۰۰ هرتز	۷۲۰۰ هرتز	۷۴۰۰ هرتز
F ₇	۶۵۰۰ هرتز	۶۴۰۰ هرتز	۶۶۰۰ هرتز
F ₈	۸۱۰۰ هرتز	۸۰۰۰ هرتز	۸۲۰۰ هرتز

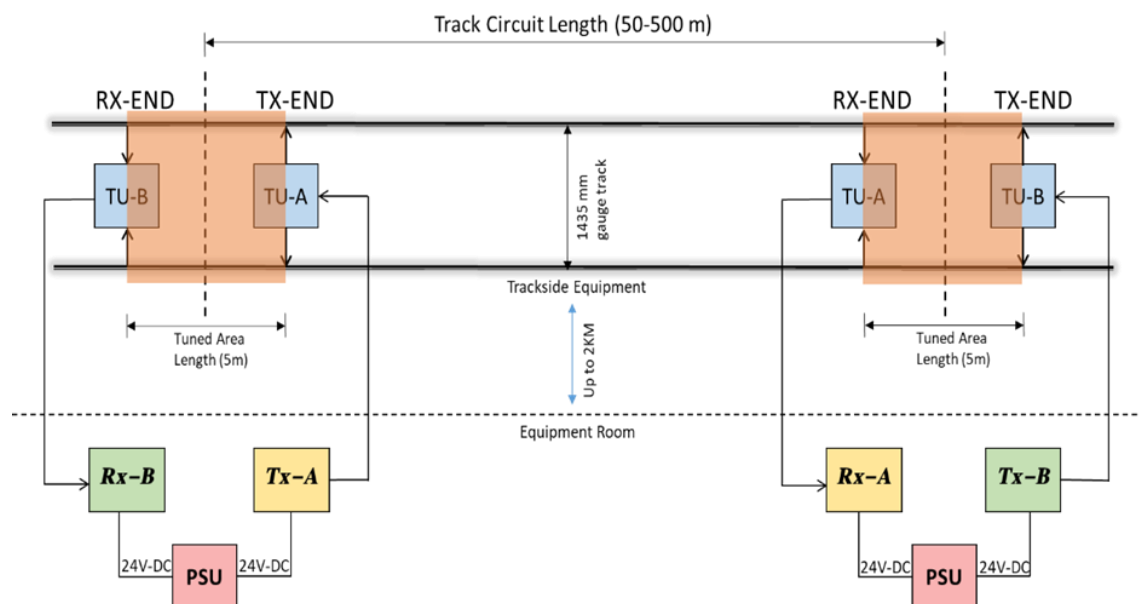
این فرکانس‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که پس از مدولاسیون از فرکانس ۵۰ هرتز و کلیه مضارب آن دور باشند؛ بنابراین، هیچ‌گونه تداخلی در خطوط برقی با هارمونیک‌های برق شهر به وجود نخواهد آمد. هر دو فرکانس به صورت جفت در یک خط به صورت یکی در میان در بلاک‌ها استفاده می‌شوند [Bombardier Transportation, 2014]. نحوه ترتیب مدارات راه با یک جفت فرکانس (F₁/F₂) در شکل (۲) ارائه شده است:



شکل ۲. نحوه آرایش فرکانسی در مدارات راه مجاور در یک خط

مدل سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

- واحد تطبیق که برای ایجاد تطابق بین ریل و واحدهای فرستنده و گیرنده و همچنین ایجاد ایزولاسیون الکتریکی مدارات راه مجاور مورد استفاده قرار می گیرد.
- واحد تغذیه که امکان تغذیه سیستم را به صورت ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز (+/-۱۰٪، -/۲۰٪) فراهم می آورد.



شکل ۳. ساختار مدار راه فرکانس صوتی و نحوه عملکرد آن

به سویچ بین گیرنده و فرستنده می باشد؛ که این عمل را یک رله سوئیچینگ در اینترلاکینگ انجام می دهد.

این مدارات راه در راه آهن هایی که فواصل بین ریل در آنها ۱۰۰۰، ۱۴۳۵ و ۱۶۷۴ میلی متر بوده، استفاده می شوند. با توجه به این که فاصله بین ریل ها چقدر است، به واحدهای تطبیق خاص و طول های مختلف ناحیه تنظیم نیاز است. به عنوان مثال، طول ناحیه تنظیم در ریل های با فاصله ۱۴۳۵ میلی متر در مترو، ۵ متر است. لازم به ذکر است که یک کابل مسی با سطح مقطع ۱۰۰ میلی متر مربع برای تعویض پلاریته بین دو مدار راه مجاور در ناحیه تنظیم وجود دارد که یک سر آن به ریل بالایی در انتهای ناحیه تنظیم و سر دیگر آن به ریل پایینی و در ابتدای ناحیه تنظیم متصل می شود. این نوع مدارات راه، به تغذیه نامی ۲۴ ولت DC نیاز دارند. ساختار کلی مدار راه فرکانس صوتی در شکل (۳) ارائه شده است.

۲-۲ تجزیه و تحلیل مدار راه فرکانس صوتی

TI ۲۱-M

این مدار راه یکی از انواع مدارات فرکانس صوتی و کدشده است که ساخته شرکت بمباردیر می باشد. این نوع مدار راه در متروی تهران به طور گسترده مورد بهره برداری قرار گرفته است و از این حیث، بررسی آن، حائز اهمیت زیادی می باشد. طول هر مدار راه این شرکت از ۵۰ تا ۵۰۰ متر بوده و فاصله فرستنده و گیرنده که درون اتاق تجهیزات قرار دارند، تا ریل حداکثر می تواند ۲ کیلومتر باشد. علاوه بر تشخیص حضور قطار، این مدارات راه هم چنین می توانند برای ارسال کدها و فرامین ATP به قطار نیز در هنگام اشغال تراک استفاده شوند. این داده ها از طریق ارتباط سریال از کنترل کننده های میدان به فرستنده داده می شوند. برای درست کار کردن این سیستم، قطار همیشه باید از سمت گیرنده وارد مدار راه شود. از آنجایی که جهت حرکت قطار در هر دو جهت صورت می گیرد، پس نیاز

۳. مدلسازی مداری مدار راه فرکانس

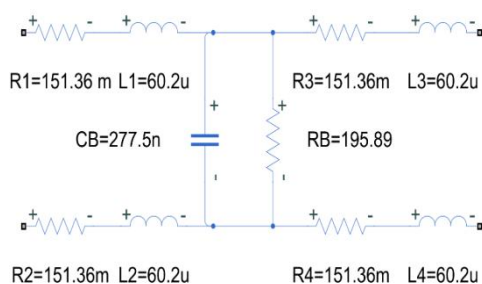
صوتی TI21-M

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ارائه شد، در حالت کلی مدارات راه فرکانس صوتی شامل اجزای مختلفی مانند فرستنده، گیرنده، واحدهای تنظیم (تطبیق) و ... می‌باشند. در این بخش، هر کدام از این اجزا به صورت جداگانه بررسی و مدلسازی می‌شود. دیاگرام کلی مدارات راه فرکانس صوتی در شکل (۴) آمده است.

بدون اینکه به دقت مدلسازی خللی وارد شود، قابل صرف نظر کردن است. طبق پدیده اشباع در ریل فولادی و اثر پوستی، مقاومت و اندوکتانس خط توابعی از مقدار و فرکانس جریانی هستند که در ریل شارش می‌یابد. مدل‌های گوناگونی برای توصیف رفتار الکتریکی ریل در مقالات مختلف مانند مدل T، مدل دو سیم، مدل سه سیم، مدل چهار سیم و مدل جعبه کوپل شده ارائه شده‌اند [Hill, Coles, 1993]. شکل (۵) مدل الکتریکی ریل را در حالت تفاضلی نشان می‌دهد [Sandidzadeh, Dehghani, 2013].

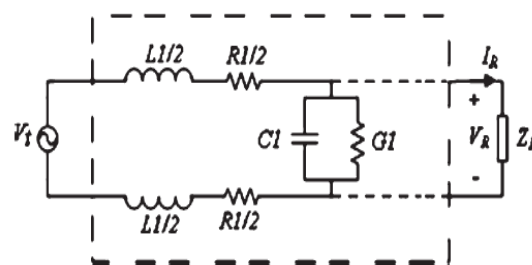


شکل ۵. دیاگرام بلوکی مدارات راه فرکانس صوتی



شکل ۶. مشخصات مدار تونن ریل مدل شده

R_1 ، L_1 به ترتیب میزان مقاومت و اندوکتانس داخلی ریل و C_1 و G_1 نیز به ترتیب ظرفیت خازنی و رسانایی بین دو ریل می‌باشند که عموماً بر حسب مقدارشان در کیلومتر (یا متر) بیان می‌گردند. مقدار مقاومت و اندوکتانس داخلی یک نوع ریل خاص در هر متر و در فرکانس‌های مختلف مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند [Mariscotti, Pozzobon, 2004].



شکل ۴. مدل ریل در حالت تفاضلی

۳-۱ مدلسازی ریل

موقعیت جغرافیایی، میزان نفوذپذیری و کنداکتانس ریل و هم-چنین نفوذپذیری و کنداکتانس زمین و شرایط بالاست، مهم-ترین عوامل تعیین‌کننده پارامترهای الکتریکی خط هستند. کنداکتانس و نفوذپذیری ریل بر مقاومت و اندوکتانس خط تأثیرگذار بوده و شکل ریل و شرایط بالاست نیز مهم‌ترین عامل تعیین ظرفیت خازنی بین ریل و زمین و ریل دیگر است. در حالت کلی، رسانایی الکتریکی و نفوذپذیری زمین توابعی از عمق و فرکانس هستند و به شدت به شرایط خاک بستگی دارند. جریان در ریل به صورت تفاضلی شارش می‌یابد. از آنجاییکه فاصله بین ریل‌ها در مقایسه با طول آن‌ها بسیار ناچیز است، هر نشتی جریان در مدار راه از ریل به زمین از سطح آن عبور کرده و به ریل دیگر می‌رسد و به عمق زمین راه نمی‌یابد. از این رو، در نظر گرفتن رسانایی خط به عنوان تابعی از عمق در مدلسازی ضروری نمی‌باشد. بنابراین، نشتی جریان به عمق

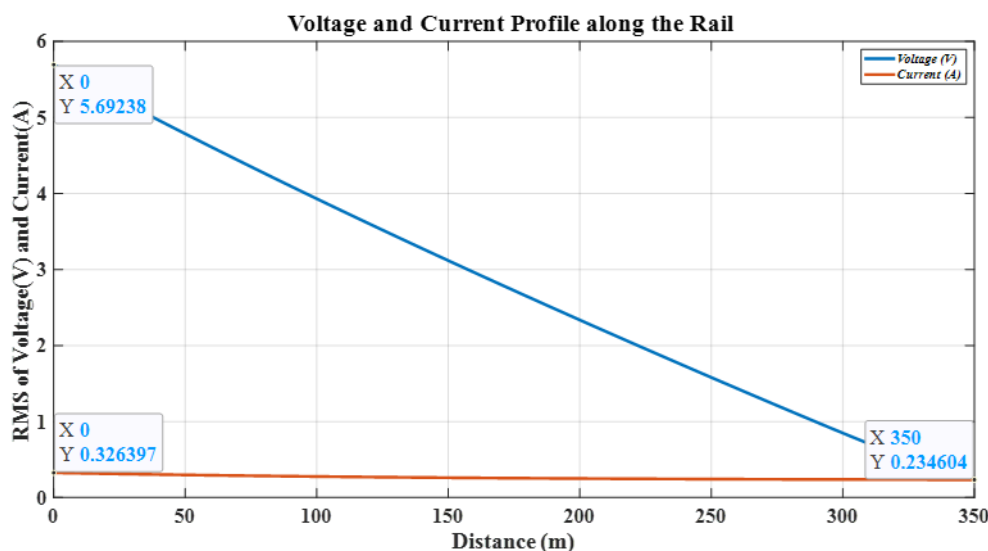
مدلسازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

برای ۷۰ متر از خط مدلسازی شده است. این شیوه مدلسازی منجر به افزایش دقت مدلسازی در قسمت ریل شده است. مقدار ولتاژ و جریان در طول ریل توسط روابط (۱) و (۲) بیان می‌شود [Boteler, 2021], [Hill, Carpenter, Taser, 1989].

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} e^{-\gamma x} \quad (1)$$

$$I = \frac{\frac{V_R}{Z_C} + I_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{\frac{V_R}{Z_C} - I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (2)$$

لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای الکتریکی ریل با توجه به پروفایل آن پارامترها در فرکانس های مختلف که در [Hill, Carpenter, 1991] آمده است، در مدلسازی لحاظ گردیده اند. در شکل (۶) مدار معادل تونن یک تراک ۲۵۰ متری به همراه پارامترهای آن ارائه شده است. در این مدلسازی، به دلیل محدودیت در سرعت و قدرت پردازشی شبیه سازی، مقادیر بر-واحد (per-unit) پارامترهای الکتریکی خط در هر ۳۵ متر از خط به صورت خطی در نظر گرفته شده است. این در حالی است که در کارهای صورت گرفته تاکنون در بهترین حالت



شکل ۷. پروفایل ولتاژ و جریان در طول ریل در یک تراک ۳۵۰ متری

V_R ، I_R و پارامترهای خط، مقدار مؤثر و فاز ولتاژ و جریان را در هر فاصله‌ای از انتهای تراک خواهیم داشت. مقدار مؤثر ولتاژ و جریان براساس مطالب فوق در شکل (۷) برای یک تراک ۳۵۰ متری آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید، مقدار مؤثر ولتاژ در ابتدای تراک ۵/۶۹ ولت بوده و در طول مسیر به دلیل امپدانس و اندوکتانس خط کاهش یافته و به مقدار ۰/۲۳۴ ولت می‌رسد. به همین صورت مقدار مؤثر جریان در ابتدای تراک ۳۲۶ میلی‌آمپر بوده و در طول خط به دلیل نشتی جریان در بالاست کاهش جزئی داشته و به مقدار ۲۳۵ میلی‌آمپر در انتهای تراک رسیده است. لازم به ذکر است که این مقادیر با مقادیر

که پارامترهای آن به صورت روابط (۳) الی (۶) می‌باشند:

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = 15.59 + 9.23j \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = 0.0027 + 0.0021j \quad (4)$$

$$Z = R + j\omega L = 0.0227 + 0.0581j \quad (5)$$

$$Y = G + j\omega C = 1.882 * 10^{-4} + 2.4374 * 10^{-5}j \quad (6)$$

شایان ذکر است که Z_C مشخصه امپدانس، γ ثابت انتشار، امپدانس سری و Y ادmittانس موازی خط در واحد طول می‌باشند که توسط منحنی های ارائه شده در [Hill, Carpenter, 1991] استخراج گردیده اند. اکنون با دانستن

اندازه‌گیری شده در خط ۷ متروی تهران همخوانی داشته و دارای اعتبار است.

۲-۳ مدل‌سازی فرستنده

فرستنده در مدارات راه فرکانس صوتی، ابتدا یک موج مربعی را با فرکانس ۲۰ هرتز و یک کد خاص به صورت ۸ بیت تولید کرده و سپس توسط مدولاسیون FSK حول فرکانس حامل که یکی از فرکانس‌های ۸ گانه مورد استفاده در این نوع مدارات راه است و در جدول (۱) آمده است، عمل مدولاسیون را انجام می‌دهد. مدولاسیون بدین صورت است که معادل بیت ۱ منطقی فرکانس $f+20$ و معادل صفر منطقی فرکانس $f-20$ تولید می‌شود. در نهایت سیگنال مدوله شده تقویت گردیده و برای ایزولاسیون از بقیه قسمت‌های سیستم به ترانس خروجی فرستنده داده می‌شود [Bombardier Transportation, 2014]. بلوک دیاگرام مدل‌سازی شده فرستنده در سیمولینک در شکل (۸) آورده شده است. لازم به ذکر است که سیگنال خروجی فرستنده به صورت تفاضلی بین ریل بالا و پایین می‌باشد که امکان تشخیص خرابی در هر ریل را به صورت جداگانه فراهم می‌سازد. مشخصات المانهای به کار رفته در فرستنده، در شکل (۸) آورده شده است.

۳-۳ مدل‌سازی گیرنده

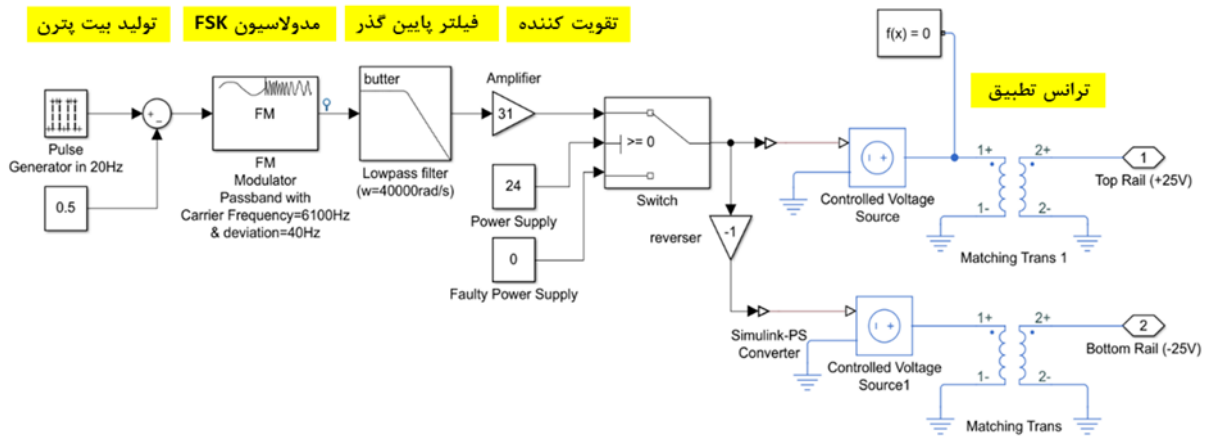
همانطور که در شکل (۹) آمده است در قسمت گیرنده دو شاخه بالایی و پایینی وجود دارد. ابتدا سیگنال ورودی برای تطبیق وارد یک ترانس با نسبت $0/3$ می‌شود. پس از آن، عمل دمدولاسیون بر روی سیگنال انجام می‌گیرد. به صورتی که شاخه بالایی، فرکانس $f+20$ و شاخه پایینی فرکانس $f-20$ را دمدوله می‌نماید تا بیت پترن خاص تراک استخراج شود. اگر این بیت پترن با کد خاص تراک مورد نظر مطابقت داشت، سیگنال‌ها با هم جمع شده و یک ولتاژ DC را برای جذب رله و آزادی تراک تولید می‌نمایند. در صورت عدم تغییر این

سیگنال به مدت ۲ ثانیه، رله خروجی مدار راه جذب می‌شود. برای دمدولاسیون فرکانس $f+20$ هرتز که معادل سطح یک منطقی است، ابتدا سیگنال توسط یک فیلتر بالاگذر که دارای فرکانس قطع ۶۱۰۰ هرتز می‌باشد، فیلتر می‌شود. پس از آن برای افزایش وضوح بین داده‌ها، سیگنال تقویت می‌گردد و توسط یک فیلتر میان‌گذر که دارای لبه‌های فرکانسی ۶۱۱۵ و ۶۱۲۵ هرتز است، فیلتر می‌شود. در نهایت، بار دیگر سیگنال برای تضعیف سایر فرکانس‌ها، از یک فیلتر بالاگذر با فرکانس قطع ۶۱۱۵ هرتز عبور می‌کند. به دلیل عدم ایده‌آل بودن فیلترها و ثابت زمانی آن‌ها، عمل فیلترینگ با تأخیر همراه است. این تأخیر باعث، تأخیر اندکی در آشکار سازی کد تراک نیز خواهد شد که به وضوح در شکل (۱۳) مشهود است. در انتها از یک مقایسه‌گر منطقی برای تولید بیت یک به‌ازای فرکانس‌های دارای دامنه بیشتر از $1/4$ ولت استفاده شده است. شاخه پایینی، مشابه آنچه ارائه شد، فرکانس $f-20$ هرتز را آشکار می‌کند.

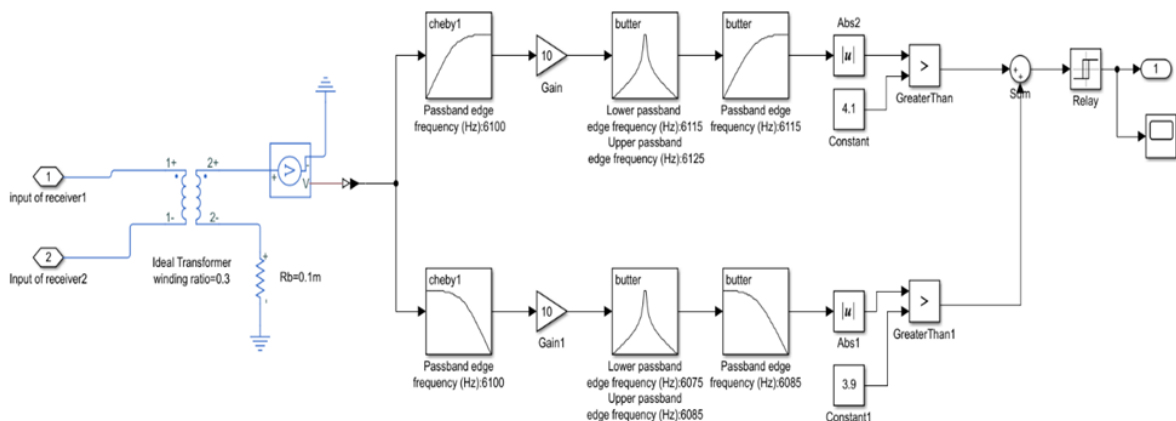
۴-۳ مدل‌سازی واحد تنظیم

شکل (۱۰) اجزای مدار تنظیم و ایزولاسیون الکتریکی را نشان می‌دهد. این واحد در حقیقت یک مدار تشدید سری LC است که فرکانس تشدید آن همان فرکانس مدار راه مجاور می‌باشد. بدین صورت این مدار، در برابر فرکانس مدار راه مجاور مانند اتصال کوتاه عمل کرده و از ورود سیگنال مدار راه مجاور به مدار راه فعلی و اختلاط فرکانسی که سبب اشتباه در عملکرد مدار راه می‌شود، جلوگیری می‌کند. در مقابل، در برابر فرکانس مدار راه مورد نظر از خود امپدانس بالایی را نشان داده و مانند یک مدار باز عمل می‌کند. هر ناحیه تنظیم از ۲ واحد تنظیم تشکیل یافته و طول آن در این نوع مدارات راه ۵ متر است که یکی از واحدهای تنظیم در ابتدای ناحیه و دیگری در انتهای آن بین دو ریل قرار می‌گیرند. این دو واحد توسط کابلی موسوم به کابل S به صورت مخالف به هم متصل می‌شوند.

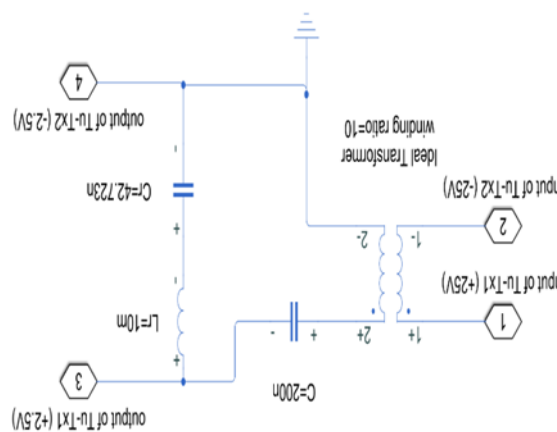
مدل سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن



شکل ۸. بلوک دیاگرام مدل سازی شده برای فرستنده مدار راه فرکانس صوتی در سیمولینک



شکل ۹. بلوک دیاگرام مدل سازی شده برای گیرنده مدار راه فرکانس صوتی در سیمولینک



شکل ۱۰. مدار معادل واحدهای تنظیم در سیمولینک

اتصال کوتاه شود. به همین ترتیب پارامترهای الکتریکی واحد تنظیم به صورتی محاسبه گردیده اند تا فرکانس مدار راه مجاور را (۷۷۰۰ هرتز) از خود عبور دهند.

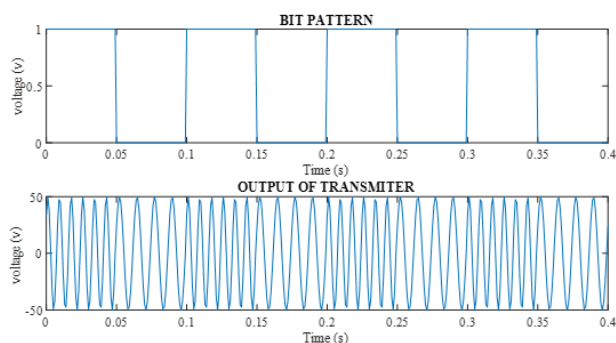
پهنای باند مدار تشدید سری باید بسیار کم بوده و تنها فرکانس مدار راه مجاور را به خوبی از خود عبور دهد. در طراحی این مسأله، عدم تداخل هارمونیک‌های ترکشن قطار نیز بسیار حائز اهمیت بوده و این مدار نباید در برابر هارمونیک‌های ترکشن

۴. شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل نتایج

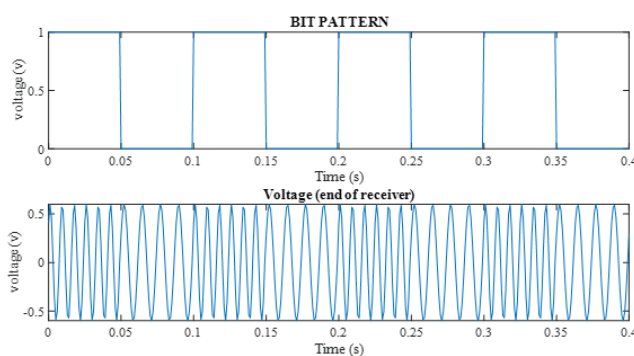
این سیگنال ۵۰ ولت AC مدوله شده توسط یک ترانس کاهنده، به ولتاژ تقریبی ۵ ولت رسیده و به ابتدای ریل و واحد تنظیم فرستنده اعمال می‌شود. در طول ریل این ولتاژ، به دلیل امپدانس خط کاهش یافته و به مقداری در حدود ۶۰۰ میلی-ولت می‌رسد؛ اما در این مسیر جریان کاهش محسوسی نداشته است. ولتاژ انتهای مدار راه بر روی ریل در شکل (۱۲) ارائه شده است.

گیرنده پس از دمولاسیون هر کدام از فرکانس‌ها، تقویت و هم-چنین تطبیق کد بیت پترن خاص مدار راه، رله خروجی را جذب می‌کند. کد استخراج‌شده در طول این شبیه‌سازی همان کد ۱۰۱۰۱۰۱۰ است که در شکل (۱۳) به‌وضوح دیده می‌شود. لازم به ذکر است که تأخیر به‌وجود آمده در کد استخراجی به دلیل عدم ایده‌آل بودن فیلترهای مورد استفاده در بخش گیرنده می‌باشد. بنابراین، در این حالت رله خروجی جذب شده و تراک آزاد اعلام می‌گردد.

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی مدار راه فرکانس صوتی TI21-M و نحوه عملکرد آن، ارائه شده‌است. همان‌گونه که در شکل (۸) ارائه شد، در قسمت فرستنده، یک کد ۸ بیتی خاص تولید می‌گردد. در این شبیه‌سازی، کد ۱۰۱۰۱۰۱۰ در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است که این کد در تمامی مدارات راه فرکانس صوتی TI21-M که در متروی تهران مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، ثابت و یکسان بوده است. زیرا این نوع از مدارات راه، کد نشده می‌باشند. بعد از انجام مدولاسیون FSK حول فرکانس حامل که ۶/۱ کیلوهرتز است، عملیات تقویت توان صورت گرفته و سیگنالی با دامنه ۵۰ ولت، به عنوان سیگنال مدار راه تولید شده‌است. سیگنال تولیدی فرستنده مدار راه فرکانس صوتی TI21-M با دامنه ۵۰ ولت که دارای فرکانس ۶۱۲۰ هرتز به ازای یک منطقی و فرکانس ۶۰۸۰ هرتز به ازای صفر منطقی است، در شکل (۱۱) ارائه شده‌است.

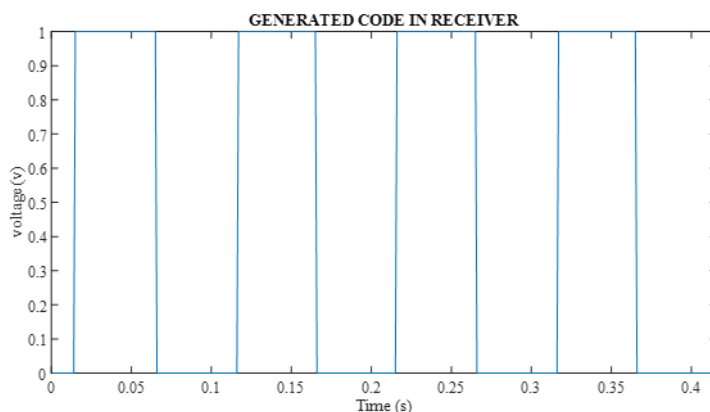


شکل ۱۱. سیگنال تولیدی و مدوله شده توسط فرستنده مدار راه فرکانس صوتی

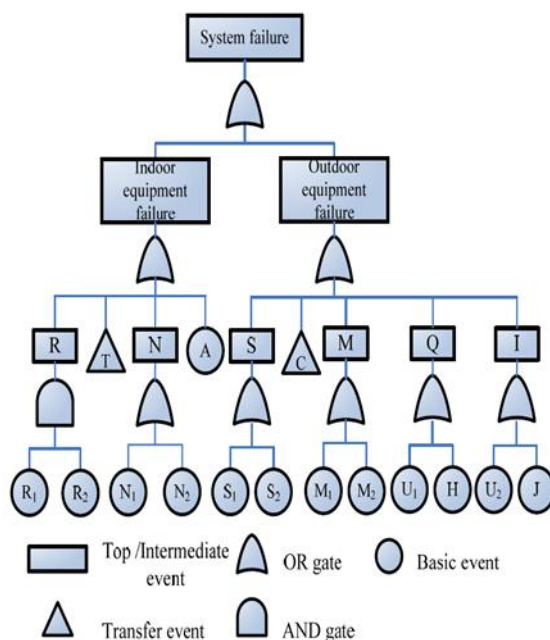


شکل ۱۲. ولتاژ ریل در سمت گیرنده

مدل سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن



شکل ۱۳. کد استخراج شده در قسمت گیرنده که با بیت پترن مورد نظر مطابقت دارد.



شکل ۱۴. درخت عیب مربوط به مدار راه فرکانس صوتی

شد، مطابقت داده شده است. نتایج حاصله حاکی از درستی مدل ارائه شده برای مدار راه فرکانس صوتی است. مقادیر ولتاژ و جریان در بخش های مختلف یک مدار راه فرکانس صوتی که از خط ۷ مترو تهران استخراج گردیده است، در جدول (۲) ارائه شده است.

۵. اعتبار سنجی مدل با نتایج خط ۷

متروی تهران

به منظور صحت مدل سازی و اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، مقادیر ولتاژ و جریان در هر یک از بخش های مدار راه فرکانس صوتی با مقادیر تجربی که از خط ۷ متروی تهران جمع آوری

جدول ۲. محدوده ولتاژ و جریان در بخش های مختلف مدار راه فرکانس صوتی در حالت عدم حضور قطار

تجهیزات	خروجی ولتاژ	خروجی جریان
فرستنده	در حدود ۳۵ تا ۵۰ ولت	۳ تا ۱۰ آمپر DC

تجهیزات	خروجی ولتاژ	خروجی جریان
واحد تطبیق فرستنده	در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ ولت	-
واحد تنظیم فرستنده	در حدود ۵ تا ۸ ولت	۴۰۰ تا ۷۰۰ میلی آمپر AC
ریل	حداقل ۱۰۰ میلی ولت	
واحد تنظیم گیرنده	حداقل ۱ ولت	
واحد تطبیق گیرنده	حداقل ۱ ولت	
گیرنده	حداقل ۰,۱ ولت	حداقل ۱۰۰ میلی آمپر AC

H: سیم پیچ توخالی^۵

۶. ارزیابی قابلیت اطمینان در مدار راه

فرکانس صوتی

یکی از مهم ترین پارامترها در بحث ارزیابی قابلیت اطمینان، نرخ خرابی است. نرخ خرابی، تعداد وقایع خرابی در هر واحد زمان از کارکرد سیستم را نشان می دهد. مدار راه فرکانس صوتی، تحت خرابی های گوناگونی قرار دارد. انواع خرابی های مدار راه فرکانس صوتی به همراه مقدار نرخ خرابی آن ها در جدول (۳) آورده شده است:

طبق درخت عیب ارائه شده در شکل (۱۴) و همچنین مقادیر نرخ خرابی موجود در جدول (۳)، محاسبه قابلیت اطمینان در کل مدار راه محاسبه گردید. لازم به ذکر است که برای محاسبه قابلیت اطمینان از روی نرخ خرابی، از قانون خرابی نمایی ($R = e^{-\lambda t}$) استفاده شده است. برای محاسبه قابلیت اطمینان عناصر سری موجود در سیستم مدار راه فرکانس صوتی، از قاعده ضرب قابلیت اطمینان ها استفاده شده است. همچنین، برای محاسبه قابلیت اطمینان عناصر موازی موجود در سیستم مدار راه فرکانس صوتی، از قاعده ضرب عدم قابلیت اطمینان استفاده شده است. احتمال وقوع خرابی مدار راه فرکانس صوتی در طول زمان در شکل (۱۵) ارائه شده است.

همانطور که از شکل ۱۵ واضح است احتمال خرابی در کمتر از ۳ سال حدود ۵۰ درصد خواهد شد. این بدین معنی است که این قطعه باید پس از حدود سه سال تعویض گردد. باید در نظر داشت که محاسبات مربوط به قابلیت اطمینان در این نمونه، تخمینی می باشد و در شرایط عملیاتی با ثبت خرابی واقعی باید بروزرسانی شود. زیرا در نظر گرفتن شرایط واقعی

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره چهارم (۶۵) / تابستان ۱۴۰۴

طبق مدل ارائه شده در این مقاله برای مدار راه فرکانس صوتی، درخت عیب مربوط به این مدارات راه استخراج شد. این درخت، رابطه بین خرابی هر کدام از اجزا و تأثیر آن ها در خرابی کل مدار راه را نشان می دهد. گیت های AND نشان دهنده این است که برای خرابی بخش مورد نظر، تمامی حالات ورودی گیت نیز باید خراب شوند. گیت OR نشان دهنده این است که برای خرابی یک بخش، خرابی حداقل یکی از حالات ورودی کافی است. درخت عیب مربوطه بر اساس مدل مدار راه فرکانس صوتی ارائه شده در این مقاله، در شکل (۱۴) آورده شده است.

علائم اختصاری مربوط به شکل (۱۴) در ادامه ارائه شده است:

تجهیزات درون اتاق کنترل:

T: فرستنده

R: گیرنده

N: کابل های CAN^۱

A: تضعیف کننده^۲

تجهیزات کنار خط:

S: کابل های SPT^۳

C: خازنهای جبران ساز^۴

M: ترانس تطبیق

Q: ناحیه تنظیم

I: اتصالات عایق بندی

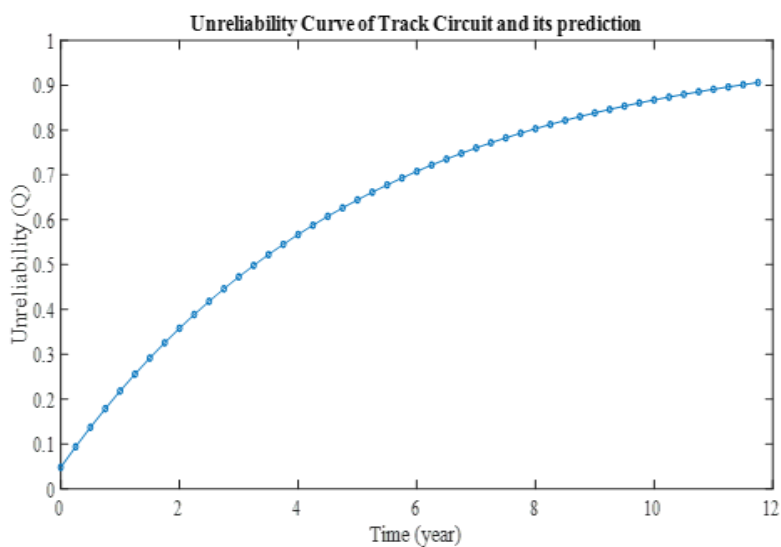
مدل‌سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

برای این مساله باعث شیب بیشتر یا کمتر در منحنی شکل

(۱۵) شده و احتمال وقوع خرابی در طول زمان زودتر یا دیرتر

جدول ۳. انواع خرابی در مدار راه فرکانس صوتی و نرخ خرابی مربوطه

ردیف	محل خرابی	نوع خرابی	نرخ خرابی
۱	فرستنده	عدم توانایی در تولید سیگنال مدوله شده	$2.003 \times 10^{-6} / h$
		افزایش فرکانس سیگنال مدوله شده بیش از حد بالا	$0.501 \times 10^{-6} / h$
		کاهش فرکانس سیگنال مدوله شده بیش از حد پایین	$0.501 \times 10^{-6} / h$
		کاهش جدی در توان سیگنال تولیدی توسط فرستنده	$1.502 \times 10^{-6} / h$
		کاهش آرام و کم در توان سیگنال تولیدی توسط فرستنده	$2.003 \times 10^{-6} / h$
۲	واحدهای تنظیم	خرابی در جداسازی الکتریکی	$1.801 \times 10^{-6} / h$
		عدم توانایی در تطبیق و اتصال	$1.801 \times 10^{-6} / h$
۳	ریل	تضعیف بالاست و افزایش جریان نشتی	در دسترس نمی‌باشد.
		شکستگی و فرسودگی سطح ریل	در دسترس نمی‌باشد.
۴	گیرنده	عدم توانایی در دریافت سیگنال فرکانس صوتی در ناحیه اصلی	$1.354 \times 10^{-6} / h$
		خطا در دمدولاسیون فرکانس بالایی	$0.338 \times 10^{-6} / h$
		خطا در دمدولاسیون فرکانس پایینی	$1.354 \times 10^{-6} / h$
		عدم توانایی در دریافت سیگنال فرکانس صوتی در ناحیه تنظیم	$1.354 \times 10^{-6} / h$
		خطا در دمدولاسیون فرکانس در ناحیه تنظیم	$1.354 \times 10^{-6} / h$
۵	کابل‌های اتصال	خطا در تغییر وضعیت رله	$0.338 \times 10^{-6} / h$
		خرابی رله خروجی	$0.338 \times 10^{-6} / h$
		فرسودگی و خرابی در کابل‌ها	$0.247 \times 10^{-6} / h$



شکل ۱۵. احتمال خرابی در مدار راه فرکانس صوتی در طول زمان

3. Shielded Twisted Pair
4. Compensation Capacitors
5. Hollow Coil

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، مدل سازی مدارات راه فرکانس صوتی ارائه شد و برای هدف شبیه سازی و کارایی روش مورد نظر نوع خاصی از این مدارات راه به نام TI21-M شبیه سازی گردید. عمل شبیه سازی برای هر کدام از اجزای این مدار راه انجام شده و خروجی هر کدام ارائه شد. برخلاف اکثر مطالعات گذشته، در این مقاله، مدلسازی این نوع از مدارات راه به صورت یکپارچه و جامع انجام شده است. تمامی مقادیر حاصل از شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده توسط اپراتور در مدارات راه خط ۷ مترو تهران مطابقت داشته است. پس، مدل سازی صورت گرفته مورد ارزیابی قرار گرفته و از لحاظ صحت و دقت از اعتبار بالایی برخوردار است. پس از آن با استفاده از ارزیابی قابلیت اطمینان به صورت کلاسیک و روابط آن، میزان احتمال وقوع خرابی مدار راه فرکانس صوتی در طول زمان محاسبه و ارائه گردید.

یکی دیگر از محاسن استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، قابلیت تعمیم پذیری آن بر روی سایر انواع مدارات راه می باشد. برای این کار تنها کفایت مشخصات مدار راه مورد نظر بروز گردد. به عنوان مثال، برای مدلسازی مدارات راه DC با این روش با صفر در نظر گرفتن فرکانس سیگنال ورودی، تمامی عناصر ذخیره کننده انرژی (مثلاً سلف ها و خازن های واحد تنظیم) اثر خود را در مدلسازی از دست داده و مدل دقیقاً شبیه مدارات راه DC عمل خواهد کرد.

اکنون، با داشتن مدل الکتریکی این نوع مدارات راه می توان توصیف کاملی از نحوه رفتار آن ها در طول زمان داشت و هم چنین از این مدل برای کنترل عملکرد مدار راه، تشخیص و شناسایی عیب و حتی پیش بینی خرابی در انواع مدارات راه بهره جست.

۸. پی نوشت ها

1. Controller Area Network
2. Attenuator

۹. مراجع

- Havaei, P., Sandidzadeh, M., A., (2022) “A New Design for Audio Frequency Track Circuits using Rail Resistance in Oscillator,” *Int. J. Railw. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 47–60.
- Efanov, D. V., Osadchy, G.V., Khóroshev, V.V., Shestovitskiy, D.A, (2019), “Diagnostics of audio-frequency track circuits in continuous monitoring systems for remote control devices: Some aspects,” in 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), pp. 1–9.
- Higuchi, R., Mochizuki, H., Nakamura, H., Ishikawa, R., Sano, M., Nishida, S., (2021), “Application of OFDM transmission method for railway signalling system via track circuit,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1780, no. 1, p. 12037.
- R. J. Hill, D. C. Carpenter, and T. Tasar, “Railway track admittance, earth-leakage effects and track circuit operation,” in *Proceedings., Technical Papers Presented at the IEEE/ASME Joint Railroad Conference, 1989*, pp. 55–62. doi: 10.1109/rrcon.1989.77281.
- Hill, R. J., Carpenter, D. C., (1991), “Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation,” in *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 138, no. 6, pp. 311–321.
- Hill, R. J., Coles, P. C., (1993), “User-friendly simulator for modelling audio frequency track circuit operation,” in *Technical Papers - IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, pp. 77–86. doi: 10.1109/rrcon.1993.292960.

- (2010), "Modeling of audiofrequency track circuits for validation, tuning, and conducted interference prediction," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp.52–60, doi: 10.1109/TITS.2009.2029393.
- Pellegrini, P., Marlière, G., Rodriguez, J., (2012), "Real time railway traffic management modeling track-circuits," in *ATOMOS 2012, 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, p. 12p.
- Zhang, W., Zhang, B., Xu, L., Wang, D., Chang, G., (2019), "Modelling and fault diagnosis of railroad jointless track circuit," *Electrotech. Electron. Autom.*, vol. 67, no. 1, pp. 76–82.
- VORA, J., TRIVEDI, D., MEHENDELE, N., (2012), "Audio Frequency Track Circuit," *TechnoFocus*.
- Sandidzadeh, M. A., Dehghani, M., (2013), "Intelligent condition monitoring of railway signaling in train detection subsystems," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 859–869, doi: 10.3233/IFS-2012-0604.
- Transportation, B., (2011), "EBI Track 200 TI21 Audio Frequency Track Circuit," *Tech. Man.*, no. 4.
- Indian Railways, (2014), "Maintenance handbook on Audio Frequency Track Circuit ver2," *Cent. Adv. Maint. Technol.*.
- Boteler, D. H., (2021), "Modeling Geomagnetic Interference on Railway Signaling Track Circuits," *Sp. Weather*, vol. 19, no. 1, p. e2020SW002609, doi: 10.1029/2020SW002609.
- Mariscotti, A., (2013), "Variability and uncertainty of Track Circuit band-pass
- Hill, R. J., Berova, M. L., (1994) "Computer modelling and simulation of jointless audio-frequency track circuits, 515-522," in *Fourth International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and other Advanced Mass Transit Systems COMPRAIL 1994*.
- Hill, R. J., Brillante, S., Leonard, P. J., (1999) "Railway track transmission line parameters from finite element field modelling: Series impedance," *IEEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 146, no. 6, pp. 647–660.
- Hill, R. J., Brillante, S., Leonard, P. J., (2000), "Railway-track transmission-line parameters from finite-element field modelling: Shunt admittance," *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 147, no. 3, pp. 227–238.
- Addio, J. D., Ferrari, P., Mariscotti, A., Pozzobon, P., (1999), "Integrated modelling of audiofrequency track circuits,"
- Gavrilovic, B. S., (2004), "Modeling of electro-magnetic compatibility traction current and track circuit applied to signaling devices of railways electro-tractive systems," *J. Light Vis. Environ.*, vol. 28, no. 1, pp. 65–69.
- Zhao, L., Li, M., (2012), "Probability distribution modeling of the interference of the traction current in track circuits," *J. Theor. Appl. Inform. Technol.*, vol. 46, no. 1, pp. 125–131.
- Mariscotti, A., Pozzobon, P., (2004), "Measurement of the internal impedance of traction rails at audiofrequency," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, no. 3, pp. 792–797, doi: 10.1109/TIM.2004.827321.
- Mariscotti, A., Ruscelli, M., Vanti, M.,

modeling for interference evaluation,” Acta IMEKO, vol. 2, no. 1, pp. 32–39.

– Yang, S., Cui, Y., Liu, J., Li, Y., (2015), “Research on the modeling of the impedance match bond at station track circuit in Chinese high-speed railway,” Adv. Mech. Eng., vol. 7, no. 11, p. 1687814015616085.

– Aliev, R., (2021), “A Rail line model with distributed parameters of track circuit,” in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1152, no. 1, p. 12018.

– Du, X., Zou, J., Wang, Z., (2015), “Calculation of the impedance of a rail track with earth return for the high-speed railway signal circuit using finite-element method,” IEEE Trans. Magn., vol. 51, no. 3, pp. 1–4.

– Zhao, B., Jia, Z., Wang, D., (2021), “Calculation of Rail Impedance of Track Circuit Considering Earth Stratification,”

– Aliev, R., Aliev, M., Tokhirov, E., (2022), “Analysis, development of a model and an algorithm in the concept of the growth of tone jointless rail circuits,” Transp. Res. Procedia, vol. 63, pp. 178–186, doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.003.

– Su, H., Wang, W., (2013), “Analysis on reliability and security of ZPW-2000A track circuit system based on FMEDA and FTA,” Sensors & Transducers, vol. 25, p. 161.

– Department of Communication and electric signaling, Basics of electrical Railway Signaling, 2008.

– Bombardier Transportation, (2014), “EBI Track 300 Audio Frequency Track Circuit Style TI21-M,” Tech. Man.

مدل سازی الکتریکی یک مدار راه فرکانس صوتی، ارزیابی اعتبارسنجی و قابلیت اطمینان آن

سید احمد میرابوطالبی، درجه کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق-کنترل در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه صنعتی سهند تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته کنترل و علائم مهندسی راه آهن را در سال ۱۴۰۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان شناسایی سیستم ها، کنترل غیرخطی، کنترل مرتبه کسری، روش های هوشمند یادگیری ماشین، شبکه های عصبی و سیستم های فازی، سیستم های پنوماتیک و اتوماسیون صنعتی و کنترل و سیگنالینگ راه آهن می باشد. ایشان در حال حاضر دانش آموخته کارشناسی ارشد کنترل و علائم مهندسی راه آهن می باشد.



بهمن قربانی واقعی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق-الکترونیک را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-کنترل را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برق-کنترل از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان سیستم کنترل، کنترل نظارتی و سیستم های رویداد گسسته، کنترل و سیگنالینگ قطار، تعیین و کنترل وضعیت و مدار ماهراره و مهندسی سیستم ماهراره بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.

