

УДК 656.259.12+621.313.333+629.4.054.2

Экспериментальная оценка параметров электромагнитной помехи от асинхронного тягового привода в канале связи автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене

Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин, Н. О. Жухин, А. И. Швойн

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Россия, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Рядчиков Р. О., Кузьмин В. С., Жухин Н. О., Швойн А. И. Экспериментальная оценка параметров электромагнитной помехи от асинхронного тягового привода в канале связи автоматической локомотивной сигнализации на метрополитене // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 572–586. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-572-586

Аннотация

Цель: экспериментально определить характеристики действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости (АЛС-АРС) на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода. На основе полученных результатов показать необходимость учета влияния такой помехи на работу приемников в составе поездных устройств при расследовании случаев сбоев и нарушений в работе автоматики и телемеханики управления движением поездов (АТДП). **Методы:** включают анализ научной и технической литературы, посвященной вопросам определения параметров электромагнитной обстановки, характерной для условий эксплуатации бортовых устройств автоматики и телемеханики и формируемой при работе асинхронного тягового привода электрического подвижного состава. Экспериментальное исследование проводилось в условиях лабораторий кафедр «Электропоезда и локомотивы» и «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» путем задания с использованием преобразователя частоты величин тока и частоты питания в обмотках статора, изменения взаимного расположения приемных катушек КП-АРС относительно асинхронного тягового двигателя и измерения величины электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в приемных катушках, с использованием анализатора спектра ZETLAB ZET 017-U8 и дифференциального пробника PINTEX DP-50. Обработка результатов выполнена с использованием известных методов математической статистики. **Результаты:** построены характерные зависимости действующего значения ЭДС, наводимой в приемных катушках поездных устройств внешним электромагнитным полем при изменении высоты подвеса относительно уровня головки ходового рельса, бокового смещения относительно вертикальной оси ходового рельса и расстояния от оси вращения двигателя. Определен спектральный состав помехи. **Практическая значимость:** полученные результаты уточняют характер электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации АЛС-АРС на метрополитенах, верифицируют ранее полученные результаты компьютерного моделирования и разработанные математические модели и будут использованы в будущем для совершенствования процесса сервисного сопровождения бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, внешнее электромагнитное поле, метрополитен, поездные устройства безопасности, индуктивный канал связи, асинхронный тяговый привод

Введение

Повышение надежности функционирования систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитенах (далее — АТДП), в составе которых для трансляции приказов разрешения/запрета на движение к поездным устройствам используют индуктивный канал передачи информации, представляет собой комплексную задачу. Ее решение связано в том числе и с необходимостью оценки соответствующей электромагнитной обстановки в условиях эксплуатации, установлением характера ее влияния на соотношение «сигнал/помеха» на входе приемника и искажения сигналов автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости (далее — АЛС-АРС) для совершенствования принципов и подходов к реализации сервисного сопровождения бортовой аппаратуры, а также повышения помехоустойчивости ее работы. На основе проводимых в данном направлении исследований наиболее подробно изученным источником помехи в канале индуктивной связи АЛС-АРС является тяговая рельсовая сеть [1, 2]. В рамках проводимых исследований производилась количественная оценка уровня помехи, формируемой при протекании тягового тока в рельсовой линии, на входе путевых и поездных приемников [3–5]. При этом особое внимание уделялось определению параметров, в том числе частотного состава электромагнитных помех, характерных для асинхронных тяговых двигателей. Однако соответствующие работы ограничивались только определением влияния тягового тока на работу устройств АЛС-АРС [6–8].

Следует однако отметить, что мешающее влияние на работу приемной аппаратуры АЛС-АРС оказывает не только тяговый ток, но и внешние электромагнитные поля, харак-

терные для различного силового оборудования электрического подвижного состава, в частности асинхронного тягового двигателя. Анализ исследований в данной области показал значительную разработанность вопроса оценки характеристик таких электромагнитных полей в рамках исследований в области охраны труда локомотивных бригад и построения средств диагностики асинхронных тяговых двигателей [8–10]. При этом оценка влияния таких полей на работу приемных устройств АЛС-АРС в отечественной литературе ранее не приводилась. Имеются отдельные зарубежные исследования, посвященные данному вопросу, в частности [11]. Однако их результаты оказываются неприменимы к отечественным условиям эксплуатации ввиду особенностей размещения асинхронных двигателей относительно приемных катушек. С учетом этого целью настоящей работы является экспериментальное определение характеристик действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода.

Материалы и методы

Для определения характера действующей в канале индуктивной связи АЛС-АРС на метрополитенах электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода, было выполнено экспериментальное исследование в условиях лаборатории. Состав стенда для проведения исследований с указанием наименований средств измерений и типа аппаратуры показан на рис. 1. Исследование выполнено без учета экранирующего влияния

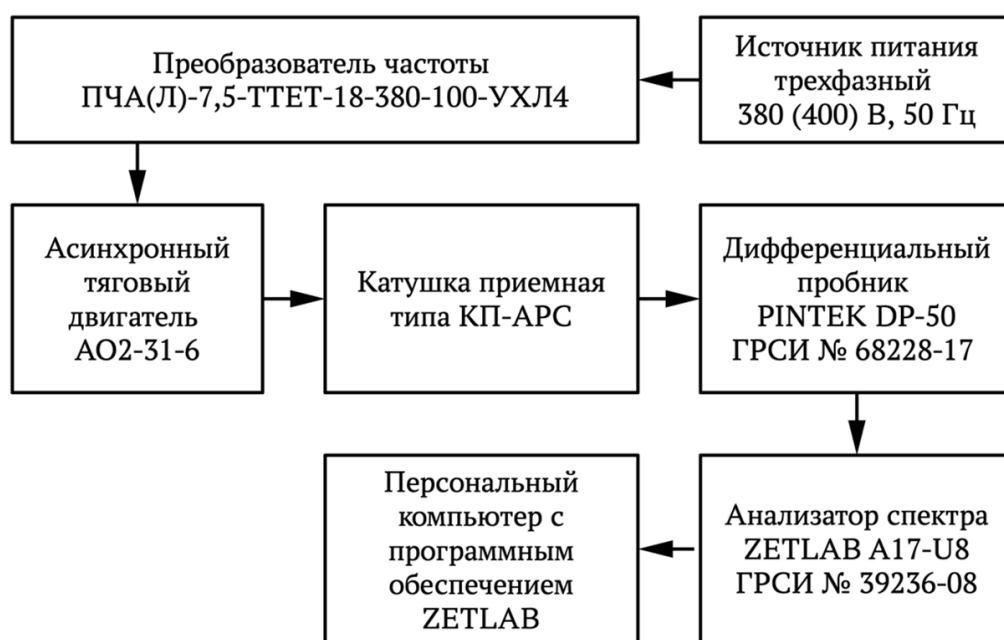


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда для изучения влияния внешних полей

кузова и других элементов подвижного состава, характер которого описан в работе [12]. При этом в условиях лаборатории в непосредственной близости от стенда отсутствовали какие-либо экранирующие элементы и конструкции.

Взаимное расположение между приемной катушкой КП-АРС и асинхронным тяговым двигателем выбиралось с учетом особенностей эксплуатации данного оборудования¹ (рис. 2).

Результаты и обсуждения

В ходе выполнения эксперимента определялись значение ЭДС и частотный состав помехи в диапазоне работы АЛС-АРС, наводимой в приемной катушке от рассматриваемого источника помехи. Величина тока пи-

тания в обмотках статора, если не оговорено иное, при частоте 50 Гц равна 3,75 А. Спектр сигнала, наводимого в приемной катушке КП-АРС в условиях выключенного силового оборудования, характеризующий фоновую электромагнитную обстановку в условиях лаборатории и учитываемый в дальнейшем при интерпретации полученных результатов, показан на рис. 3.

На первоначальном этапе была произведена оценка влияния внешнего электромагнитного поля при изменении частоты питающего тока от 0 до 50 Гц. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС на характерных частотах питающего тока рассматриваемого асинхронного двигателя показаны на рис. 4.

Была произведена оценка влияния изменения расстояния между приемной катушкой и асинхронным двигателем в диапазоне l_y от 0,35 до 1,25 м на величину ЭДС, наводимую

¹ Состав из вагонов метрополитена моделей 81-765, 81-766, 81-767. Руководство по эксплуатации. Часть 1. 7650.30.00.001 РЭ.

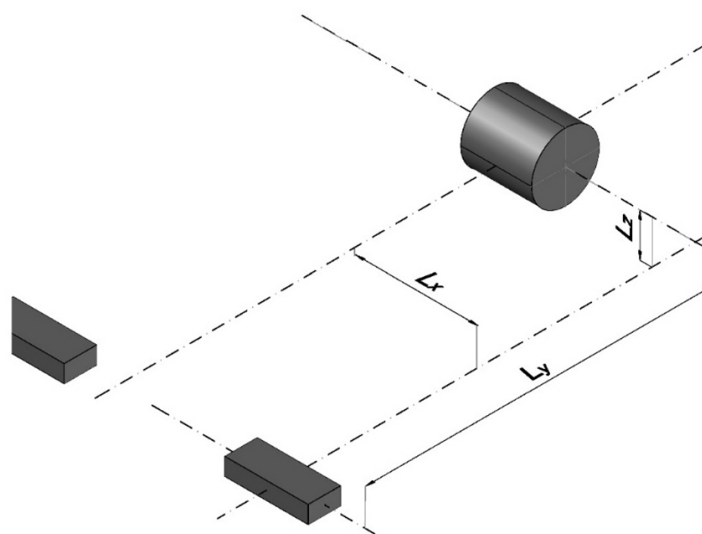


Рис. 2. Схема взаимного расположения приемной катушки и двигателя: l_z — высота подвеса приемных катушек относительно оси вращения ротора электродвигателя, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_z = 0,213$ м, что соответствует высоте подвеса относительно уровня головки рельса $h_{\text{УГР}} = 0,210$ м); l_x — смещение приемной катушки относительно оси пути, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_x = 0,2$ м); l_y — расстояние от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути, м (в рамках проведения исследования, если не оговорено иное, $l_y = 0,75$ м).

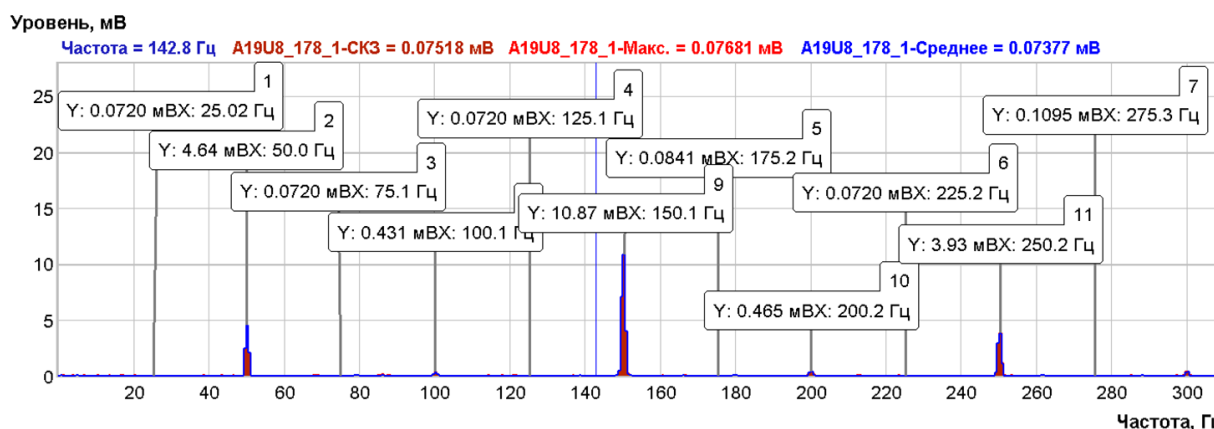


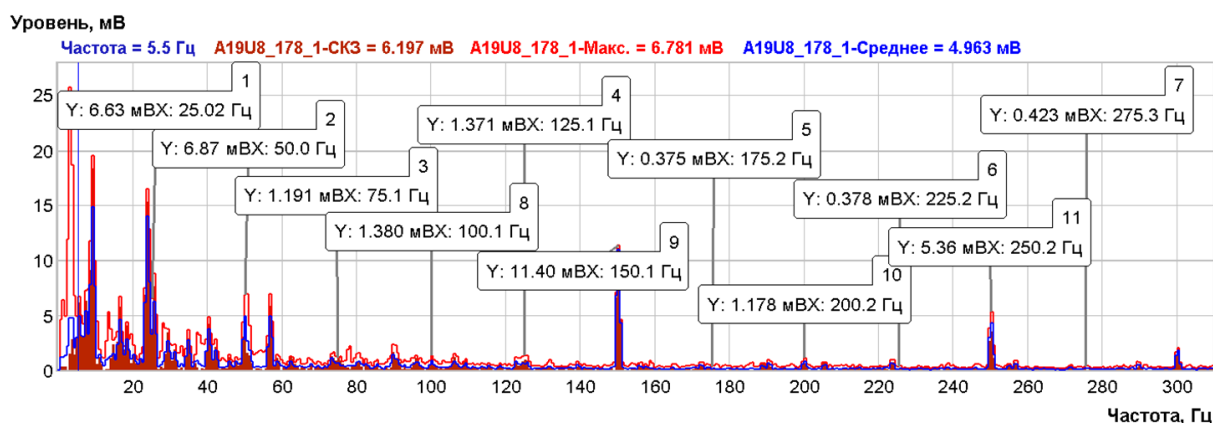
Рис. 3. Спектр сигнала на выходе приемной катушки КП-АРС при отключенном электродвигателе

внешним электромагнитным полем. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 5.

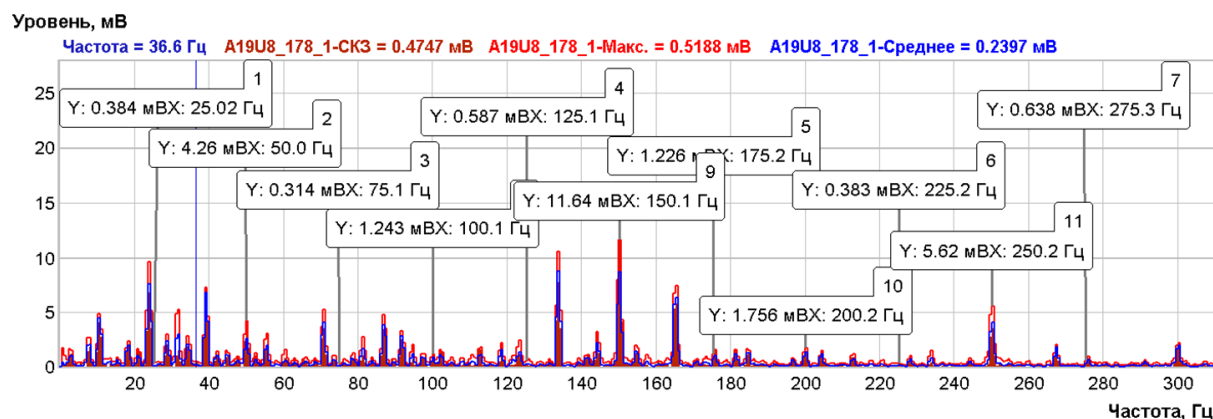
Полученный в результате обработки экспериментальных данных график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной

в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 6.

а



б



в

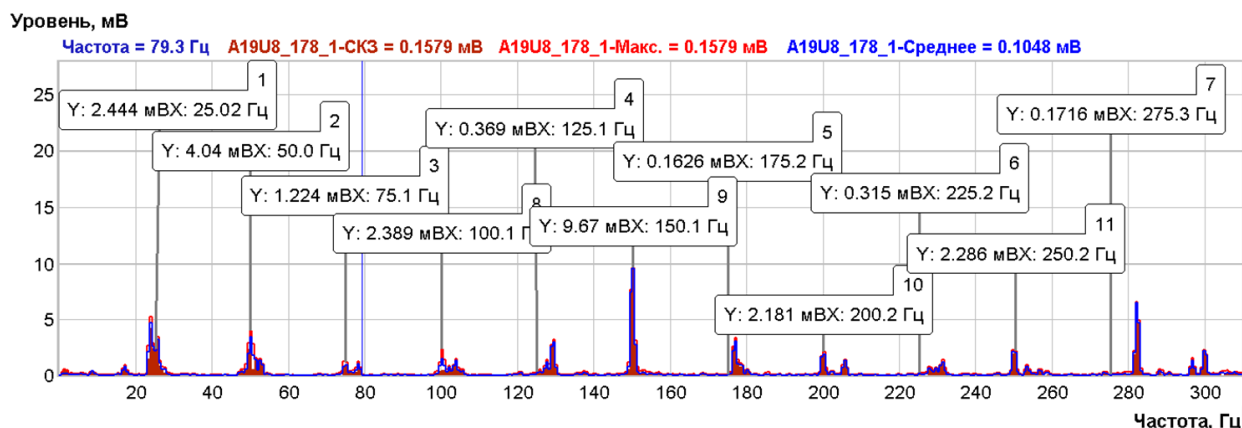
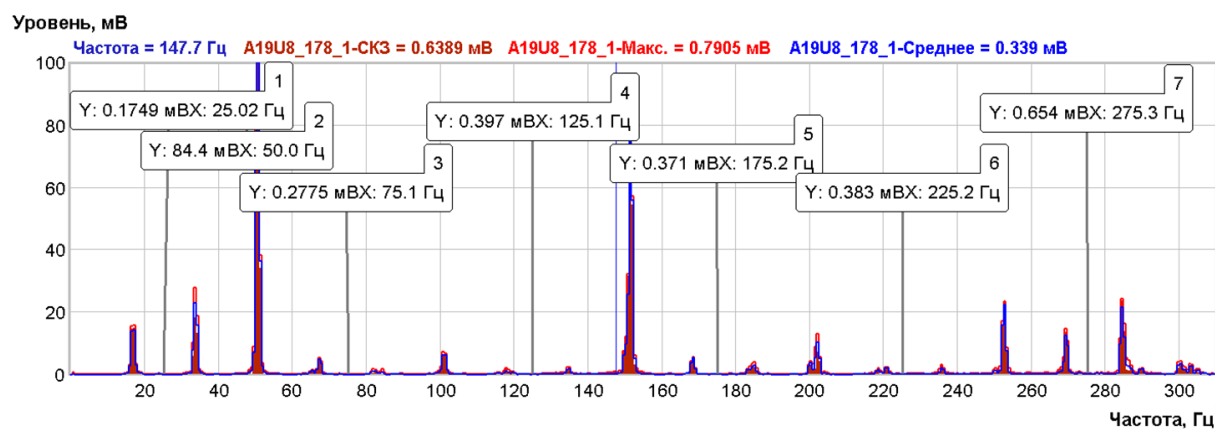
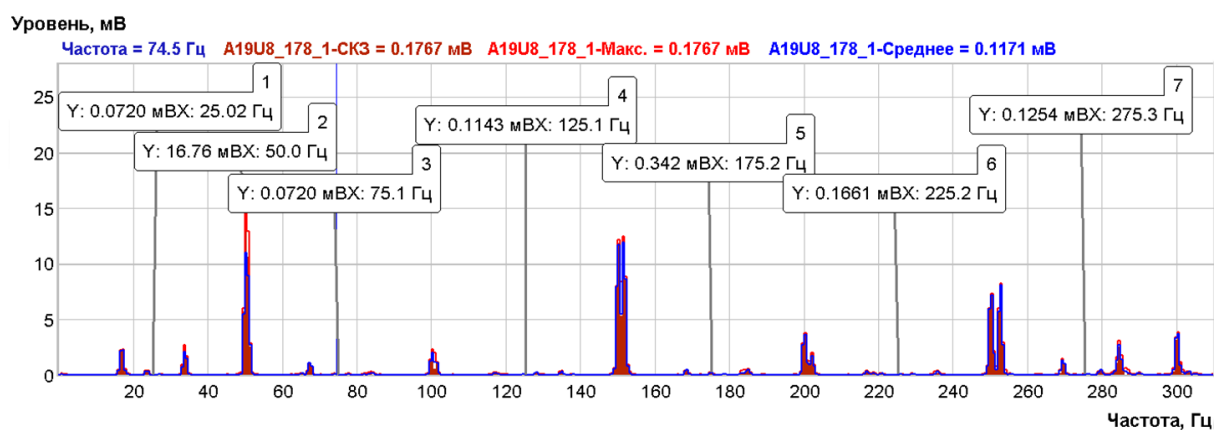


Рис. 4. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях частоты тока питания двигателя: а — 5,5 Гц; б — 10,5 Гц; в — 25,5 Гц

а



б



в

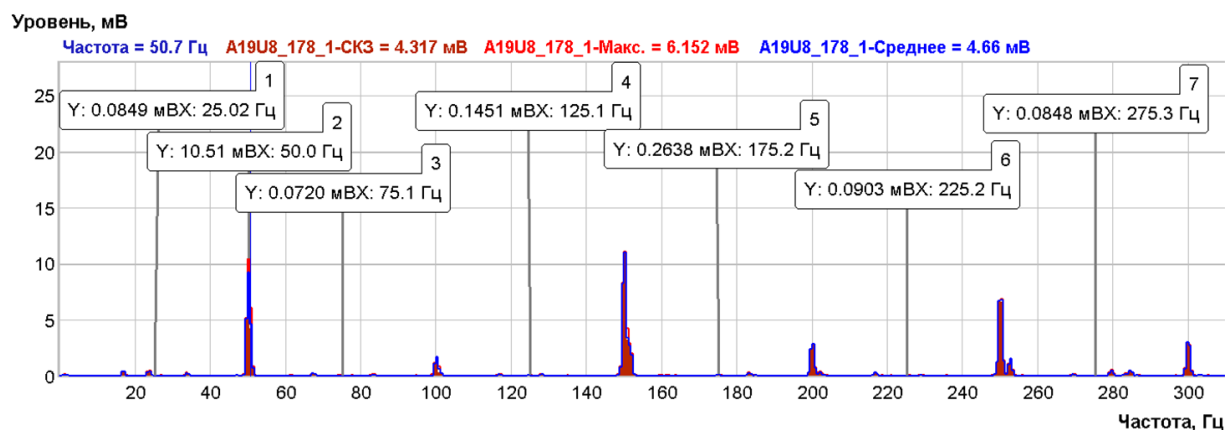


Рис. 5. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $l_y = 0,35$ м; б — $l_y = 0,75$ м; в — $l_y = 1,2$ м

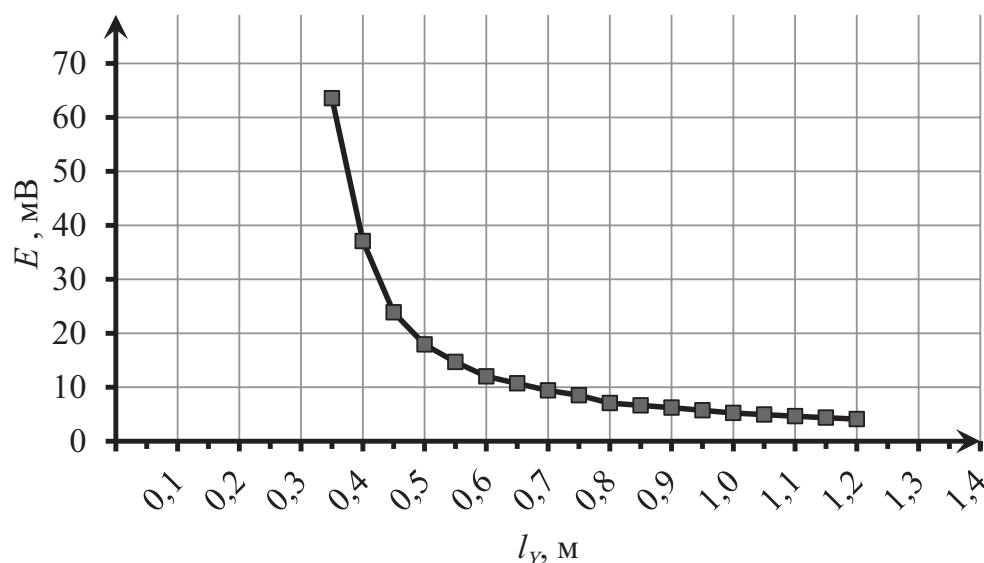


Рис. 6. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути

Далее была произведена оценка влияния смещения l_x приемной катушки относительно оси пути в диапазоне от 0 до 0,55 м на величину ЭДС, наводимую внешним электромагнитным полем. Примеры полученных спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 7.

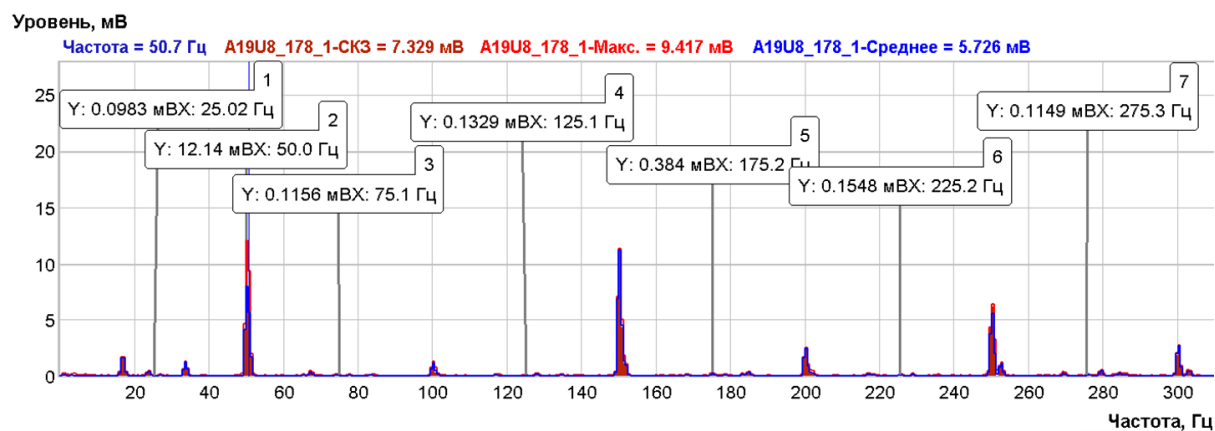
Полученный в результате обработки данных график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от смещения l_x относительно оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 8.

В заключение была произведена оценка влияния высоты $h_{\text{угр}}$ подвеса приемной катушки от уровня головки рельса в диапазоне от 105 до 195 мм на величину ЭДС, наводимую внешним электромагнитным полем. Примеры соответствующих спектров помехи на выходе приемной катушки КП-АРС показаны на рис. 9.

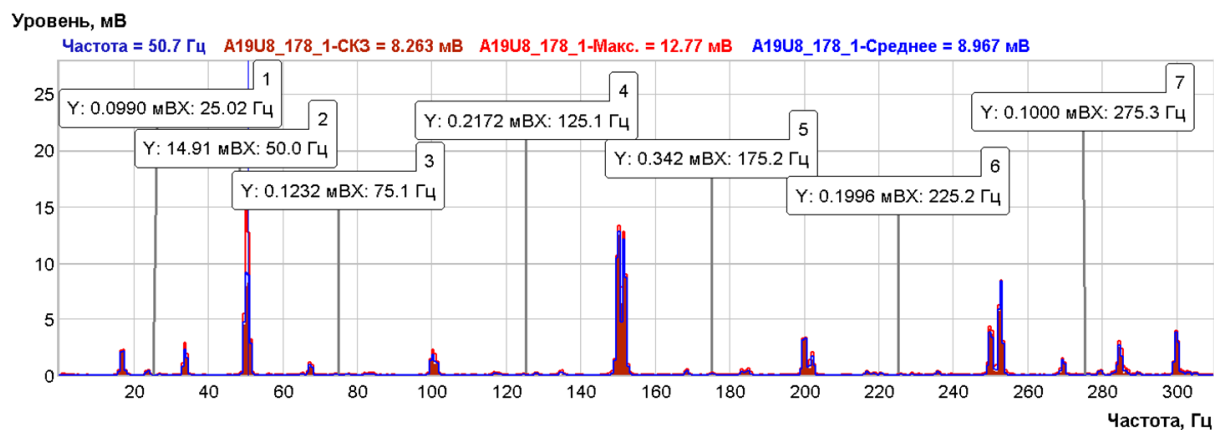
Полученный в результате график зависимости действующего значения ЭДС, наведенной в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от высоты $h_{\text{угр}}$ подвеса относительно уровня головки рельса и расстояния l_y от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути для частоты 50 Гц показан на рис. 10.

На основе полученных результатов экспериментального исследования установлено, что уровень действующего значения ЭДС помехи на частоте 50 Гц находится в диапазоне от 4,82 до 63,64 мВ. Частотный состав помехи при работе асинхронного тягового двигателя совпадает с частотой тока электродвигателя, что указывает на аддитивный характер помехи в диапазоне частот источника до 300 Гц. Учет нелинейности амплитудно-частотной характеристики приемной катушки в области частот до 5 кГц для катушки типа КП-АРС может быть выполнен аналогично исследованию [13].

а



б



в

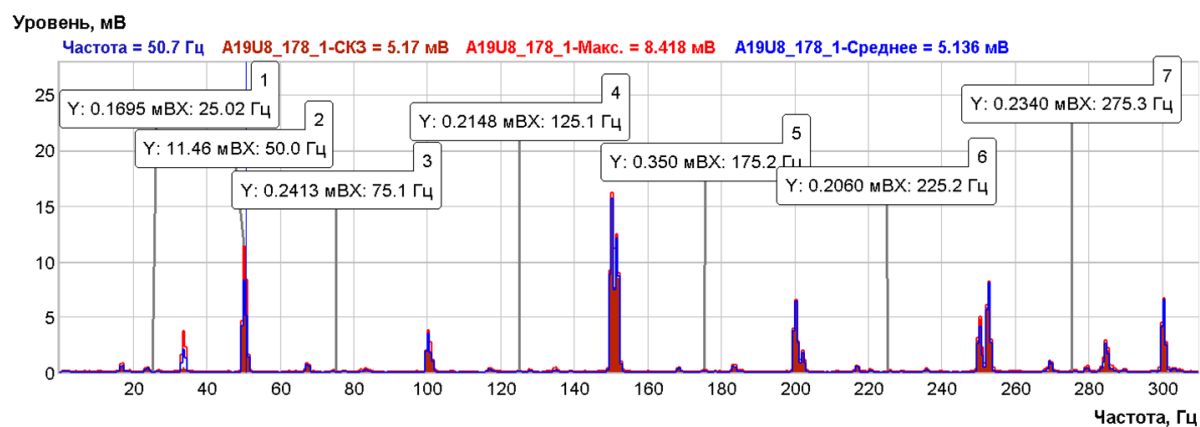


Рис. 7. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $l_x = 0$ м; б — $l_x = 0,25$ м; в — $l_x = 0,55$ м

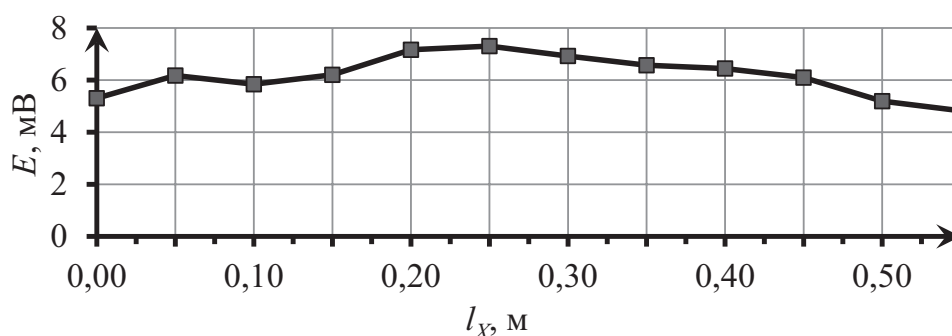


Рис. 8. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от смещения l_x относительно оси пути

Полученные значения для различных частот помехи, соответствующих частотам несущего сигнала АЛС-АРС, сопоставимы с номинальным уровнем полезного сигнала.

Взаимное положение приемной катушки и асинхронного тягового двигателя существенно влияет на уровень помехи на входе приемника поездных устройств безопасности. При удалении приемной катушки от оси вращения асинхронного тягового двигателя наблюдается снижение уровня помехи на входе локомотивного приемника.

При низких частотах питающего тока в приемной катушке наводится значительная по уровню помеха во всем частотном спектре. Такой режим работы электродвигателя характерен при трогании с места и при подъезде к запрещающему сигналу светофора (точке прицельного торможения в конце маршрута/блок-участка для бессветофорных систем интервального регулирования) на малых скоростях.

Полученные экспериментальные данные соответствуют опубликованным ранее результатам исследований в данной области [14].

Заключение

В результате выполнения исследования экспериментально определены характери-

ки действующей в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитенах аддитивной электромагнитной помехи от внешних полей, формируемых при работе асинхронного тягового привода.

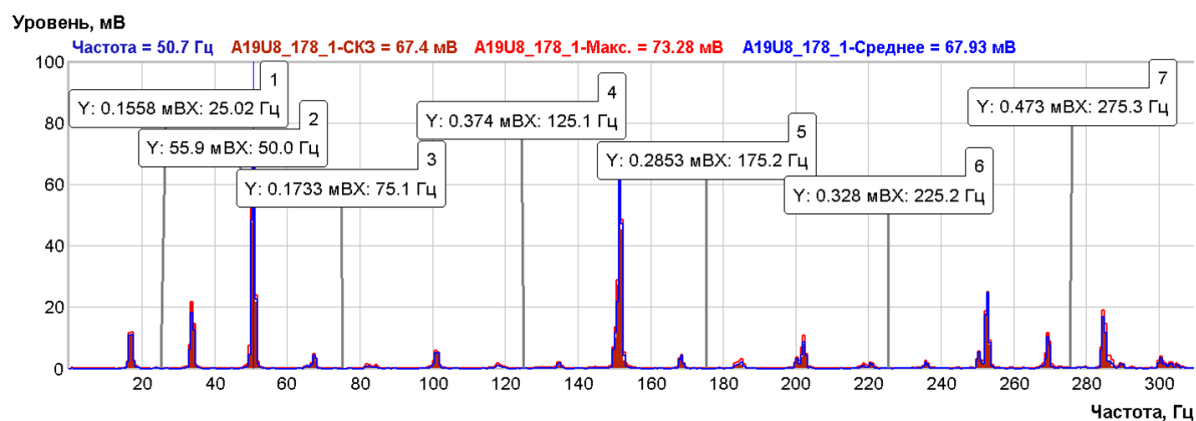
Получены следующие основные результаты:

1. На основе анализа научных исследований в области оценки влияния электромагнитной обстановки на работу поездных устройств АЛС-АРС была установлена необходимость оценки влияния внешнего электромагнитного поля асинхронного тягового двигателя на работу бортового оборудования АТДП.

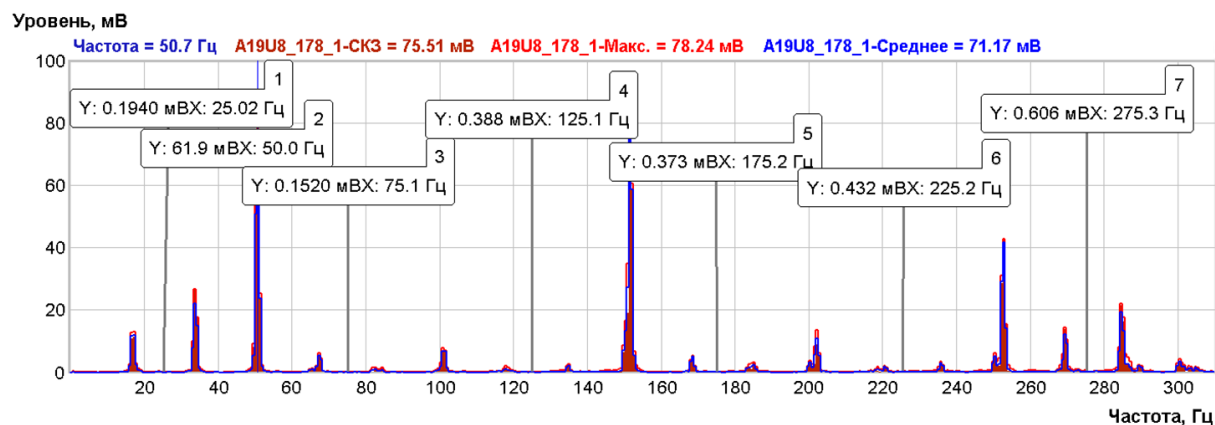
2. В результате проведенного экспериментального исследования было установлено, что действующие значения ЭДС-помехи для различных частот, соответствующих частотам несущего сигнала АЛС-АРС, оказываются сопоставимы с уровнем полезного сигнала.

3. Работа асинхронного тягового двигателя в режимах движения при трогании с места и при подъезде к точке прицельного торможения может являться причиной сбоя в работе поездных устройств АТДП ввиду формирования значительной по уровню помехи во всем частотном спектре.

а



б



в

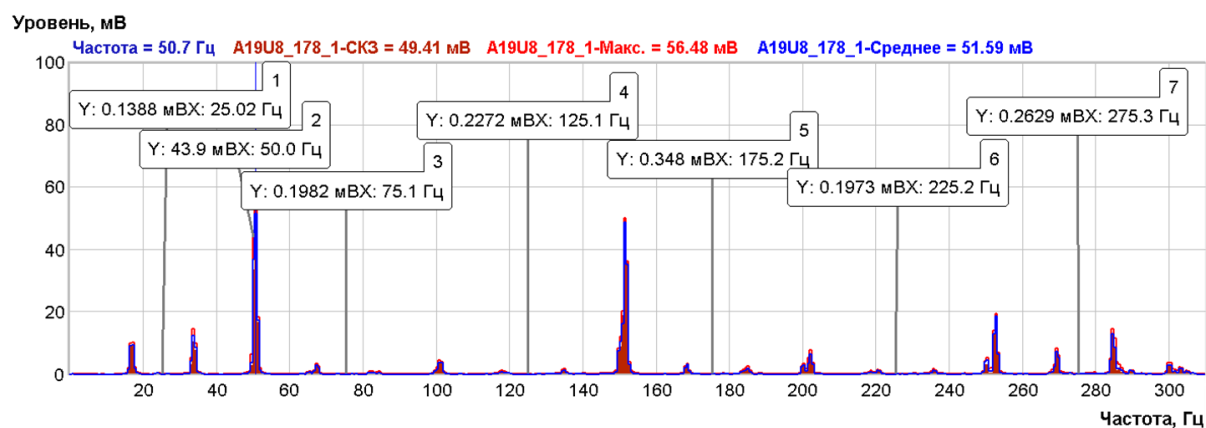


Рис. 9. Примеры спектров сигналов, получаемых на выходе приемной катушки КП-АРС при значениях: а — $h_{\text{УГР}} = 105$ мм; б — $h_{\text{УГР}} = 125$ мм; в — $h_{\text{УГР}} = 185$ мм

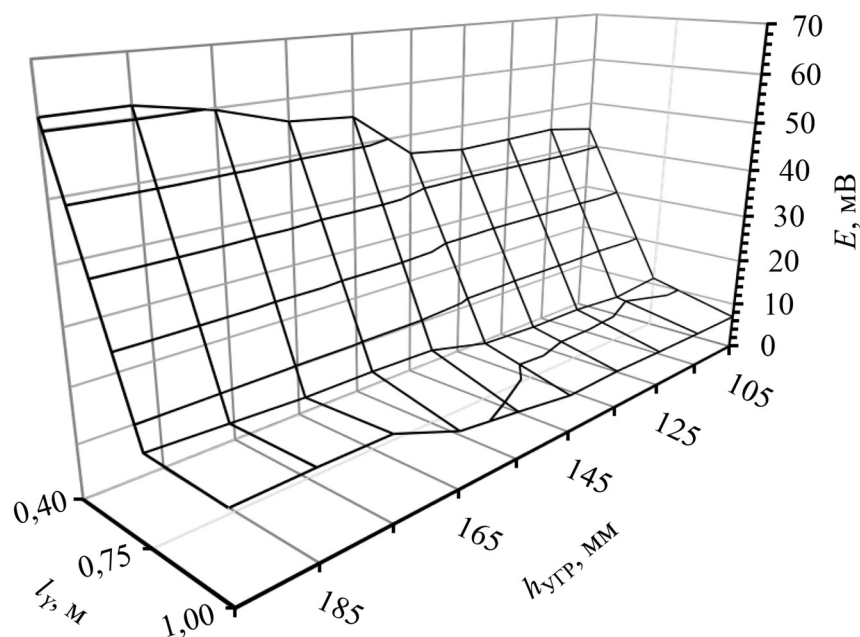


Рис. 10. График зависимости действующего значения ЭДС, наведенного в приемной катушке внешним электромагнитным полем асинхронного электродвигателя на частоте 50 Гц, от высоты $h_{угр}$ подвеса относительно уровня головки рельса и расстояния l_{γ} от оси вращения ротора электродвигателя до центра приемной катушки вдоль оси пути

Полученные результаты уточняют описание характерной для условий эксплуатации АЛС-АРС электромагнитной обстановки на метрополитенах и будут использованы авторами в дальнейшем для совершенствования процесса сервисного сопровождения аппаратуры АТДП.

Список источников

1. Шевлюгин М. В., Данг В. Ф. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена // Мир транспорта. 2015. Т. 13, № 6 (61). С. 88–101. EDN VONOSP
2. Кабецкий А. Г. Алгоритмы цифровой обработки сигналов при оценке влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств ЖАТ на метрополитене // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию факультета «Информационные технологии управления» и 50-летию кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» (Ростов-на-Дону, 16 декабря 2022 года). Ростов н/Д.: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 301–309. DOI: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_301. EDN EIBVAI
3. Бестемьянов П. Ф., Горлин И. Г. Статистические модели амплитуды и длительности импульсных электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики метрополитена // Электротехника. 2016. № 9. С. 3–7. EDN WXCUEH
4. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков [и др.] // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 1. С. 28–39. EDN UHFZST

5. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12-пульсовых преобразовательных агрегатов / М. П. Бадер [и др.] // Практическая силовая электроника. 2016. № 2 (62). С. 38–43. EDN WEFHMJ
6. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров / Л. А. Баранов [и др.] // Наука и техника транспорта. 2016. № 2. С. 8–13. EDN WADHFN
7. Кабецкий А. Г. Метод оценки влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на метрополитене // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей международной научно-теоретической конференции (Санкт-Петербург, Петергоф, 18 мая 2021 года). СПб.: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений). 2021. С. 30–35. EDN WGXUHN
8. Оценка энергии внешних электромагнитных помех частотно-регулируемых асинхронных двигателей / Ю. Б. Казаков [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 4. С. 37–43. EDN ZDOQQZ
9. Кабецкий А. Г. Обеспечение электромагнитной совместимости систем интервального регулирования движения поездов и подвижного состава с асинхронным тяговым двигателем на линиях Петербургского метрополитена // Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения: сборник статей VII Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, Петергоф, 21 мая 2024 года). СПб.: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений). 2024. С. 191–203. EDN JDQIKZ
10. Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux-Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices / V. Gurusamy [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 58, iss. 4. Pp. 4668–4684, July–Aug. 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3174804
11. Research on Radiated Interference from Diesel Locomotive Traction Motor to Cab Signalling / C. Liu [et al.] // IET Electrical Systems in Transportation. 2022. Vol. 12, iss. 3. Pp. 181–196. DOI: 10.1109/MAPE.2017.8250849
12. Шаманов В. И. Индуктивная связь локомотивных катушек АЛСН с рельсовыми линиями // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 11. С. 2–5. EDN OKLIKV
13. Бестемьянов П. Ф., Захаров Д. П. К исследованию тракта передачи сигналов с пути на локомотив // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 5. С. 5–10. EDN RNLZHB
14. Кузьмин В. С., Рядчиков Р. О. О влиянии внешних электромагнитных полей силового оборудования на работу локомотивных устройств безопасности // Наука и техника транспорта. 2025. № 1. С. 79–83. EDN UPJXAJ
- Дата поступления: 13.04.2026
Решение о публикации: 22.06.2026
- Контактная информация:**
РЯДЧИКОВ Руслан Олегович — аспирант; ryadchikov.ro@yandex.ru
КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент; vs.kuzmin@bk.ru
ЖУХИН Никита Олегович — кандидат техн. наук, доцент, зав. лабораторией; Rzd1997@mail.ru
ШВОЙН Андрей Иванович — аспирант; shvoyn@mail.ru

Experimental Assessment of the Parameters of Electromagnetic Interference from an Asynchronous Traction Drive in the Communication Channel of Automatic Cab Signaling in the Metro System

R. O. Ryadchikov, V. S. Kuz'min, N. O. Zhuxin, A. I. Shvojn

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), 9 bldg., 9 Obraztsova str., GSP-4, Moscow, 127994, Russia

For citation: Ryadchikov R. O., Kuz'min V. S., Zhuxin N. O., Shvojn A. I. Experimental Assessment of the Parameters of Electromagnetic Interference from an Asynchronous Traction Drive in the Communication Channel of Automatic Cab Signaling in the Metro System // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 572–586. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-572-586 (In Russian)

Abstract

Objective: to experimentally determine the characteristics of the electromagnetic interference from external fields generated during the operation of an asynchronous traction drive acting in the inductive coupling channel of automatic cab signaling with automatic speed regulation on subways. Based on the obtained results, demonstrate the necessity of considering the influence of such interference on the operation of receivers as part of trainborne equipment when investigating cases of failures and malfunctions in the operation of train motion control automation and remote control systems. **Methods:** include analysis of scientific and technical literature dedicated to determining the parameters of the electromagnetic environment characteristic of the operating conditions of onboard automation and remote control equipment and generated during the operation of the asynchronous traction drive of electric rolling stock. The experimental study was conducted in the laboratories of the departments “Electric Trains and Locomotives” and “Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport” by setting current and supply frequency values in the stator windings using a frequency converter, changing the mutual arrangement of receiving coils relative to the asynchronous traction motor, and measuring the magnitude of the electromotive force (EMF) induced in the receiving coils using the ZETLAB ZET 017-U8 spectrum analyzer and the PINTEX DP-50 differential probe. Results processing was performed using known methods of mathematical statistics. **Results:** characteristic dependencies of the effective EMF value induced in the receiving coils of onboard safety equipment by the external electromagnetic field were constructed with changes in suspension height relative to the running rail head level, lateral displacements relative to the vertical axis of the running rail, and distance from the motor rotation axis. The spectral composition of the interference was determined. **Practical importance:** the obtained results refine the nature of the electromagnetic environment under operating conditions of automatic cab signaling with automatic speed regulation on subways, verify previously obtained results of computer modeling and developed mathematical models, and will be used in the future to improve service support for onboard equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, external electromagnetic field, metro system, onboard safety equipment, inductive communication channel, asynchronous traction drive

References

1. Shevlyugin M. V., Dang V. F. *Garmonicheskie pomekhi tyagovogo toka v sisteme elektrosnabzheniya metropolitena* [Harmonic Interference of Traction Current in the Metro Power Supply System], *Mir transporta* [World of Transport], 2015, vol. 13, no. 6 (61), pp. 88–101. EDN VONOCF (In Russian)
2. Kabetskiy A. G. *Algoritmy tsifrovoy obrabotki signalov pri otsenke vliyaniya garmonik tyagovogo toka podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym*

privodom na rabotu ustroystv ZHAT na metropolitene [Algorithms for Digital Signal Processing in Assessing the Impact of Traction Current Harmonics from Rolling Stock with Asynchronous Traction Drive on the Operation of Railway Automation and Remote Control Devices in the Metro], *Tsifrovye infokommunikatsionnye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennaya 40-letiyu fakulteta "Informatsionnye tekhnologii upravleniya" i 50-letiyu kafedry "Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte"*, Rostov-na-Donu, 16 dekabrya 2022 goda [Digital Infocommunication Technologies: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 40th Anniversary of the Faculty of Information Technologies in Management and the 50th Anniversary of the Department of Automation and Telemechanics in Railway Transport, Rostov-on-Don, December 16, 2022], Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2022, pp. 301–309. DOI: 10.46973/978-5-907295-76-6_2022_301. EDN EIBVAI (In Russian)

3. Bestemyanov P. F., Gorlin I. G. Statisticheskie modeli amplitudy i dlitelnosti impulsnykh elektromagnitnykh pomekh v kanalakh avtomatiki i telemekhaniki metropolitena [Statistical Models of Amplitude and Duration of Pulse Electromagnetic Interference in Metro Automation and Telemechanics Channels], *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, 2016, no. 9, pp. 3–7. EDN WXCUEI (In Russian)

4. Manakov A. D., et al. Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Standards for Hazardous and Interfering Effects of Interference on ALS-ARS Devices of the BARS System of the St. Petersburg Metro], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 28–39. EDN UHFZST (In Russian)

5. Bader M. P., et al. Povyshenie kachestva elektricheskoy energii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya metropolitena s ispolzovaniem

12-pulsovykh preobrazovatelnykh agregatov [Improving the Quality of Electrical Energy in the Metro Traction Power Supply System Using 12-Pulse Converter Units], *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2016, no. 2 (62), pp. 38–43. EDN WEFHMI (In Russian)

6. Baranov L. A., et al. Otsenka garmonicheskikh sostavlyayushchikh tyagovogo toka v Moskovskom metropolitene na osnove eksperimentalnykh zamerov [Assessment of Harmonic Components of Traction Current in the Moscow Metro Based on Experimental Measurements], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2016, no. 2, pp. 8–13. EDN WADHFH (In Russian)

7. Kabetskiy A. G. Metod otsenki vliyaniya garmonik tyagovogo toka podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom na rabotu ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na metropolitene [Method for Assessing the Impact of Traction Current Harmonics from Rolling Stock with Asynchronous Traction Drive on the Operation of Railway Automation and Telemechanics Devices in the Metro], *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, Peterhof, 18 maya 2021 goda [Innovative Railway. Latest and Prospective Train Control Systems. Problems and Solutions: Proceedings of the International Scientific and Theoretical Conference, St. Petersburg, Peterhof, May 18, 2021]*, St. Petersburg, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), 2021, pp. 30–35. EDN WGXUIH (In Russian)

8. Kazakov Yu. B., et al. Otsenka energii vneshnikh elektromagnitnykh pomekh chastotno-reguliruemyykh asinkhronnykh dvigateley [Assessment of the Energy of External Electromagnetic Interference in Frequency-Controlled Asynchronous Motors], *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of Ivanovo State Power*

University], 2017, no. 4, pp. 37–43. EDN ZDOQQZ (In Russian)

9. Kabetskiy A. G. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti sistem intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov i podvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym dvigatelem na liniyakh Peterburgskogo metropolitena [Ensuring Electromagnetic Compatibility of Train Interval Control Systems and Rolling Stock with Asynchronous Traction Motors on the Lines of the St. Petersburg Metro], *Innovatsionnaya zheleznaya doroga. Noveyshie i perspektivnye sistemy obespecheniya dvizheniya poezdov. Problemy i resheniya: sbornik statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, Petergof, 21 maya 2024 goda [Innovative Railway]*, St. Petersburg, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), 2024, pp. 191–203. EDN JDQIKZ (In Russian)

10. Gurusamy V., et al. Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux-Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, iss. 4, pp. 4668–4684, July–August, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3174804.

11. Liu C., et al. Research on Radiated Interference from Diesel Locomotive Traction Motor to Cab Signalling, 2022, vol. 12, iss. 3, pp. 181–196. DOI: 10.1109/MAPE.2017.8250849.

12. Shamanov V. I. Induktivnaya svyaz' lokomotivnykh katushek ALSN s rel'sovymi liniyami [Inductive Coupling of Locomotive ALSN Coils with Track Circuits], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation,*

Communication, Informatics], 2011, no. 11, pp. 2–5. EDN OKLIK. (In Russian)

13. Bestemyanov P. F., Zakharov D. P. K issledovaniyu trakta peredachi signalov s puti na lokomotiv [On the Study of the Signal Transmission Path from Track to Locomotive], *Elektronika i elektrooborudovanie transporta [Electronics and Electrical Equipment of Transport]*, 2013, no. 5, pp. 5–10. EDN RNLZHB (In Russian)

14. Kuzmin V. S., Ryadchikov R. O. O vliyani vneshnikh elektromagnitnykh poley silovogo oborudovaniya na rabotu lokomotivnykh ustroystv bezopasnosti [On the Influence of External Electromagnetic Fields from Power Equipment on the Operation of Locomotive Safety Devices], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2025, no. 1, pp. 79–83. EDN UPJXAJ (In Russian)

Received: April 13, 2026

Accepted: June 22, 2026

Author's information:

Ruslan O. RYADCHIKOV — Postgraduate Student; ryadchikov.ro@yandex.ru

Vladislav S. KUZ'MIN — PhD in Engineering, Associate Professor; vs.kuzmin@bk.ru

Nikita O. ZHUXIN — PhD in Engineering, Assistant, Head of Laboratory; rzd1997@mail.ru

Andrej I. SHVOJN — Postgraduate Student; shvoyn@mail.ru