

УДК 656.256

О компенсации помехи, возникающей из-за асимметрии в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене

Р. О. Рядчиков, В. С. Кузьмин

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

Для цитирования: Рядчиков Р. О., Кузьмин В. С. О компенсации помехи, возникающей из-за асимметрии в канале индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 160–170. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-160-170

Аннотация

Цель: Сбои в работе поездных устройств автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости на метрополитене приводят к подтормаживаниям и остановкам в тоннелях, вследствие чего нарушается график движения поездов. Наиболее частой причиной возникновения таких сбоев являются помехи, действующие в канале индуктивной связи между напольной аппаратурой и поездными устройствами. В статье сформулировано условие компенсации для разработанного ранее приемного устройства, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации, обусловленную геометрическим положением контактного рельса. **Методы:** На основе сформулированного в ранее опубликованной работе в общем виде условия компенсации помехи в канале индуктивной связи с асимметрией геометрического положения приемных катушек и контактного рельса, на основе закона Био — Савара — Лапласа получено новое выражение, учитывающее включение дополнительных приемных катушек, индуктивно связанных с контактным рельсом. **Результаты:** Предложено математическое обеспечение, включающее в себя расчетное выражение, определяющее условие компенсации помехи. Был получен ряд характерных зависимостей для коэффициента пропорциональности, используемого для настройки параметров работы устройства компенсации помехи, и ЭДС, наведенных в основной и дополнительной приемных катушках системы автоматической локомотивной сигнализации при изменении геометрических параметров их размещения. **Практическая значимость:** Результаты моделирования позволяют определить величину коэффициента пропорциональности, характеризующего различие геометрического положения основных и дополнительных приемных катушек. Значение этого коэффициента для заданного геометрического положения катушек является основой для настройки работы предложенного устройства в условиях депо.

Ключевые слова: Электромагнитная совместимость, асимметрия, метрополитен, устройства безопасности, контактный рельс, индуктивный канал связи, автоматическая локомотивная сигнализация с автоматическим регулированием скорости.

Введение

В основе функционирования систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитенах (далее — АТДП) лежит непрерывная передача информации о допустимой и преду-

редительной скоростях движения от путевых устройств к поездным с использованием индуктивного канала передачи информации системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости. В слу-

чаях неполучения бортовой аппаратурой такой информации в течение установленного интервала времени или получения ею приказа разрешения на движение с меньшей допустимой скоростью движения применяется автоматическое торможение, что в условиях достаточно плотного графика движения поездов и отсутствия резервов по времени может приводить к существенным задержкам и остановкам в тоннелях.

В работе поездных устройств АТДП в последнее время наблюдается резкое увеличение числа сбоев, в том числе случаев срабатывания числовой (по количеству принимаемых частот) защиты [1]. Причиной возникновения сбоев в работе АТДП могут быть как отклонения собственных параметров бортовой аппаратуры (что наблюдается достаточно редко в связи с переходом на микропроцессорные устройства обработки сигналов), так и мешающее действие электромагнитной помехи, присутствующей в канале индуктивной связи. Причем последняя может возникать из-за достаточно обширного перечня причин, например ввиду асимметрии тягового тока в рельсовых нитях [2, 3], действия внешних электромагнитных полей от силового оборудования, в частности от асинхронных тяговых двигателей [4, 5] или же асимметрии, возникающей в канале индуктивной связи из-за геометрического положения контактного рельса [6].

В ранее опубликованных теоретических и экспериментальных работах, связанных с анализом электромагнитной обстановки в условиях метрополитенов, в частности [7–10], вопрос формирования требований к методам и техническим решениям для компенсации помехи, возникающей на входе приемника поездных устройств АТДП из-за асимметрии в канале индуктивной связи и влияния внешних электромагнитных полей, практически не обсуждался. В то же время авторами ранее было предложено техническое решение, обеспечивающее компенсацию помехи, связанной с

асимметрией в канале индуктивной связи метрополитенов за счет применения дополнительной компенсационной катушки автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости [11]. Условие компенсации, сформулированное авторами ранее в [6], требует дополнительной адаптации для решения, описанного в [11]. С учетом этого целью настоящей работы выбрана разработка математического обеспечения для разработанного ранее устройства компенсации электромагнитной помехи в канале индуктивной связи, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи, обусловленную геометрическим положением контактного рельса.

Материалы и методы

Предложенное ранее авторами устройство компенсации помехи в канале индуктивной связи на метрополитене, приведенное в [11], описывается с использованием структурной схемы (рис. 1). Особенность данного технического решения — использование дополнительных приемных катушек 1 и 2 системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости, индуктивно связанных с полем, формируемым тяговым током, протекающим в контактном рельсе.

При возникновении асимметрии ЭДС, наводимых в ходовых приемных катушках 1 и 2 из-за изменения их геометрического положения относительно уровня головок ходовых рельсов и, соответственно, оси контактного рельса, изменяется и характер индуктивной связи той дополнительной приемной катушки 1 или 2, которая находится в данный момент напротив контактного рельса КР. Блок вычисления непрерывно анализирует наводимые в ходовых и дополнительных приемных катушках ЭДС и на основе результатов такого анализа управляет работой сумматора, который, в свою очередь, вычитает с учетом поправочных коэффициентов из смеси сигнала и помехи

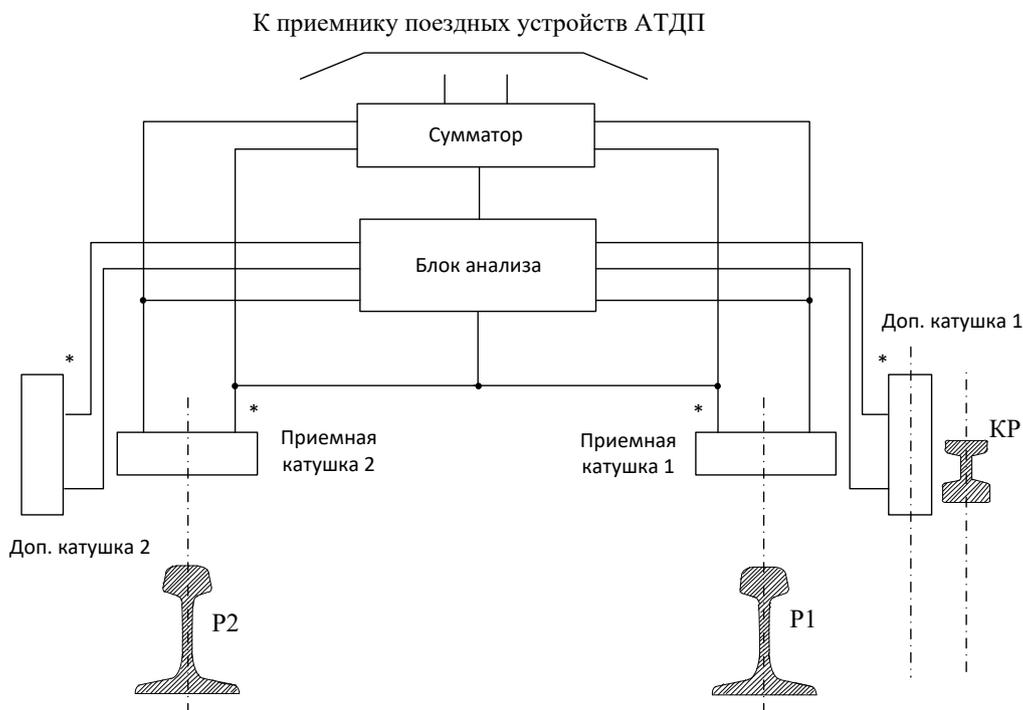


Рис. 1. Структурная схема устройства компенсации помехи от тягового тока на входе приемника поездных устройств АТДП

(суммы сигналов), полученной от основных приемных катушек, сигнал компенсации, сформированный на выходе одной из дополнительных приемных катушек.

В основе математического обеспечения функционирования предложенного устройства лежит следующее условие компенсации помехи от контактного рельса КР (1):

$$E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}} - E_{\text{ком}_{\text{КР}}} = 0, \quad (1)$$

где $E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}}$ — действующее значение ЭДС, наводимой в приемной катушке ПК1 от тока, протекающего в контактном рельсе КР;

$E_{\text{ком}_{\text{КР}}}$ — действующее значение компенсирующей ЭДС, наведенной в дополнительных приемных катушках от контактного рельса КР.

С учетом взаимного расположения приемных катушек условие компенсации помехи может быть записано в виде (2):

$$E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ПК1}} - E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ДК1}} K_{\text{ПГ}} = 0, \quad (2)$$

где $K_{\text{ПГ}}$ — коэффициент пропорциональности, определяющий различие геометрического положения рассматриваемых приемных катушек; $E_{\text{пом}_{\text{КР}}}^{\text{ДК1}}$ — действующее значение ЭДС, наведенной в дополнительной приемной катушке от тока, протекающего в контактном рельсе КР.

Неизвестным для рассматриваемого в настоящей работе варианта выполнения устройства компенсации электромагнитной помехи в канале индуктивной связи является величина коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ пропорциональности, определяющего различие геометрического положения основной и дополнительной приемных катушек, поэтому далее определим зависимость $K_{\text{ПГ}}$ от геометрических параметров размещения приемных катушек на подвижном составе. Для основной и дополнительной приемных катушек величины,

наводимых в них током, протекающим в контактном рельсе, ЭДС имеют вид (3) и (4) соответственно:

$$E_{\text{помкр}}^{\text{ПК1}} = -\frac{\mu_0 \mu_{\text{ПК1}} S_{\text{ПК1}} N_{\text{В}}^{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}} I_{\text{КР}}}{2\pi l_{\text{ПК1}}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{помкр}}^{\text{ДК1}} = -\frac{\mu_0 \mu_{\text{ДК1}} S_{\text{ДК1}} N_{\text{В}}^{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}} I_{\text{КР}}}{2\pi l_{\text{ДК1}}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{КР}}$ — действующее значение силы тока, протекающего в контактном рельсе КР;

$\mu_{\text{ПК1}}$ и $\mu_{\text{ДК1}}$ — магнитная проницаемость материала сердечников приемной и дополнительной приемных катушек соответственно;

$S_{\text{ПК1}}$ и $S_{\text{ДК1}}$ — площадь поперечного сечения сердечников приемной и дополнительной приемных катушек соответственно;

$N_{\text{А}}^{\text{ПК1}}$ и $N_{\text{В}}^{\text{ДК1}}$ — количество витков основной и дополнительной приемных катушек соответственно;

$\alpha_{\text{ПК1}}$ — угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью приемной катушки ПК1;

$\alpha_{\text{ДК1}}$ — угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью дополнительной катушки ДК1;

$l_{\text{ПК1}}$ и $l_{\text{ДК1}}$ — расстояния от центра силовых магнитных линий, формируемых током, протекающим в контактном рельсе, до центра приемной и дополнительной катушек соответственно.

С учетом (2), (3) и (4) значение коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ имеет вид (5):

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{l_{\text{ДК1}} \mu_{\text{ПК1}} S_{\text{ПК1}} N_{\text{В}}^{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}}}{l_{\text{ПК1}} \mu_{\text{ДК1}} S_{\text{ДК1}} N_{\text{В}}^{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}}}. \quad (5)$$

Значение коэффициента $K_{\text{ПГ}}$ для случая, когда основная и дополнительная приемные катушки имеют одинаковые параметры, имеет вид (6):

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{l_{\text{ДК1}} \cos \alpha_{\text{ПК1}}}{l_{\text{ПК1}} \cos \alpha_{\text{ДК1}}}. \quad (6)$$

Для определения косинусов углов, присутствующих в формулах (5) и (6), далее необходимо описать характер индуктивной связи основной и дополнительной приемных катушек с током, протекающим в контактном рельсе. Для этого рассмотрим схему (рис. 2).

На рис. 2 использованы следующие обозначения:

$h_{\text{к}}$ — расстояния от уровня головки ходового рельса Р1 до центра силовых линий контактного рельса КР;

Δh — расстояние между центрами основной приемной катушки ПК1 и дополнительной катушки ДК1 по вертикали;

$\Delta h_{\text{к}}$ — расстояние от линии, параллельной уровню головки ходового рельса Р1 и проходящей через центр силовых магнитных линий контактного рельса КР, до центра приемной катушки ПК1 по вертикали;

$l_{\text{р}}$ — расстояние от оси ходового рельса Р1 до оси контактного рельса КР по горизонтали;

Δl — расстояние между центрами основной приемной катушки ПК1 и дополнительной катушки ДК1 по горизонтали;

$\Delta l_{\text{к}}$ — смещение приемной катушки ПК1 от оси ходового рельса Р1 по горизонтали;

$\vec{B}_{\text{КР}}^{\text{ПК1}}$ — вектор индукции магнитного поля, формируемой током, протекающим в контактном рельсе КР, для основной приемной катушки П;

$\vec{B}_{\text{КР}}^{\text{ДК1}}$ — вектор индукции магнитного поля, формируемой током, протекающим в контактном рельсе КР, для дополнительной приемной катушки ДК1.

С учетом особенностей, показанных на рис. 2, косинусы углов $\alpha_{\text{ПК1}}$ и $\alpha_{\text{ДК1}}$ могут быть получены с использованием выражений (7) и (8) соответственно:

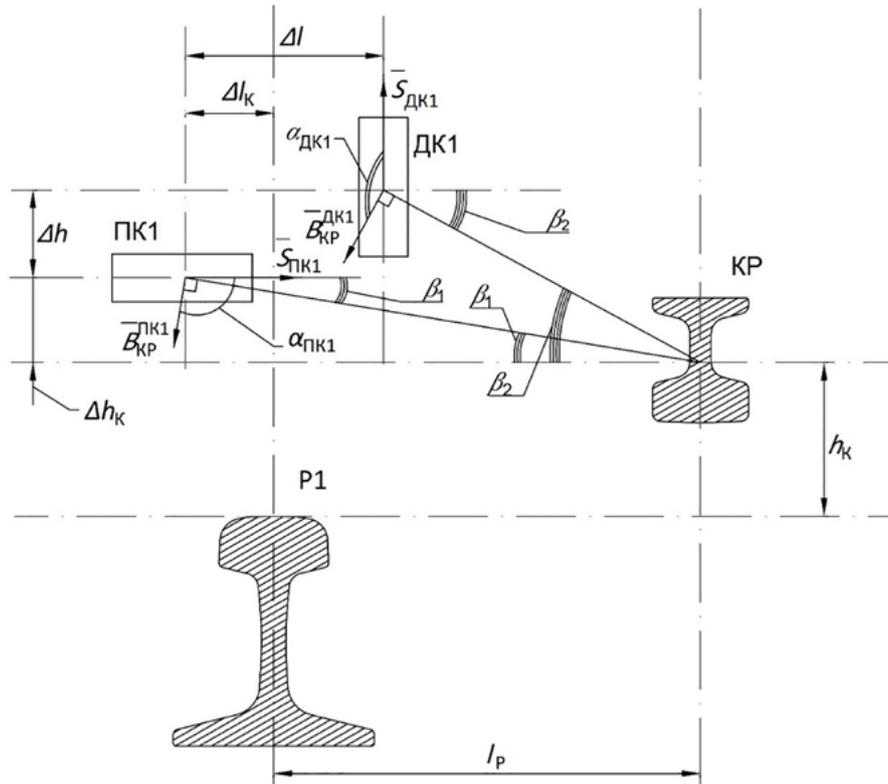


Рис. 2. Взаимное расположение контактного рельса, ближайшего к нему ходового рельса, основной и дополнительной приемных катушек

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{ПК1} &= \cos(90^\circ + \beta_1) = \\ &= -\sin \beta_1 = -\frac{\Delta h_K}{\sqrt{\Delta h_K^2 + (l_P + \Delta l_K)^2}}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{ДК1} &= \cos(180^\circ - \beta_2) = -\cos \beta_2 = \\ &= -\frac{l_P + \Delta l_K - \Delta l}{\sqrt{(\Delta h_K + \Delta h)^2 + (l_P + \Delta l_K - \Delta l)^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (6), (7) и (8) расчетное выражение для определения характера зависимости величины коэффициента $K_{ПГ}$ от геометрических параметров размещения основной и дополнительной катушек на подвижном составе имеет вид (9):

$$\begin{aligned} K_{ПГ} &= \frac{\Delta h_K}{l_P + \Delta l_K - \Delta l} \times \\ &\times \frac{(\Delta h_K + \Delta h)^2 + (l_P + \Delta l_K - \Delta l)^2}{\Delta h_K^2 + (l_P + \Delta l_K)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Результаты и обсуждение

Рассмотрим случай, когда основная ПК1 и дополнительная ДК1 приемные катушки перемещаются в пространстве на одинаковые расстояния по вертикали Δh_K и по горизонтали Δl_K . Для данного случая графики зависимости величины коэффициента $K_{ПГ}$ при различных величинах расстояний между центрами приемных катушек ПК1 и ДК1 по вертикали Δh и по горизонтали Δl будут иметь следующий вид (рис. 3).

Представленные на рис. 3 значения $K_{ПГ}$ следует использовать для предварительной настройки сумматора предложенного устройства (рис. 1). Отметим, что значение коэффициента передачи $K_{ПГ}$ остается неизменным и равным нулю при любых боковых смещениях в системе катушек.

Для выбора оптимального расположения катушки ДК1 относительно основной катушки ПК1 рассмотрим графики изменения ЭДС $E_{помКР}^{ПК1}$

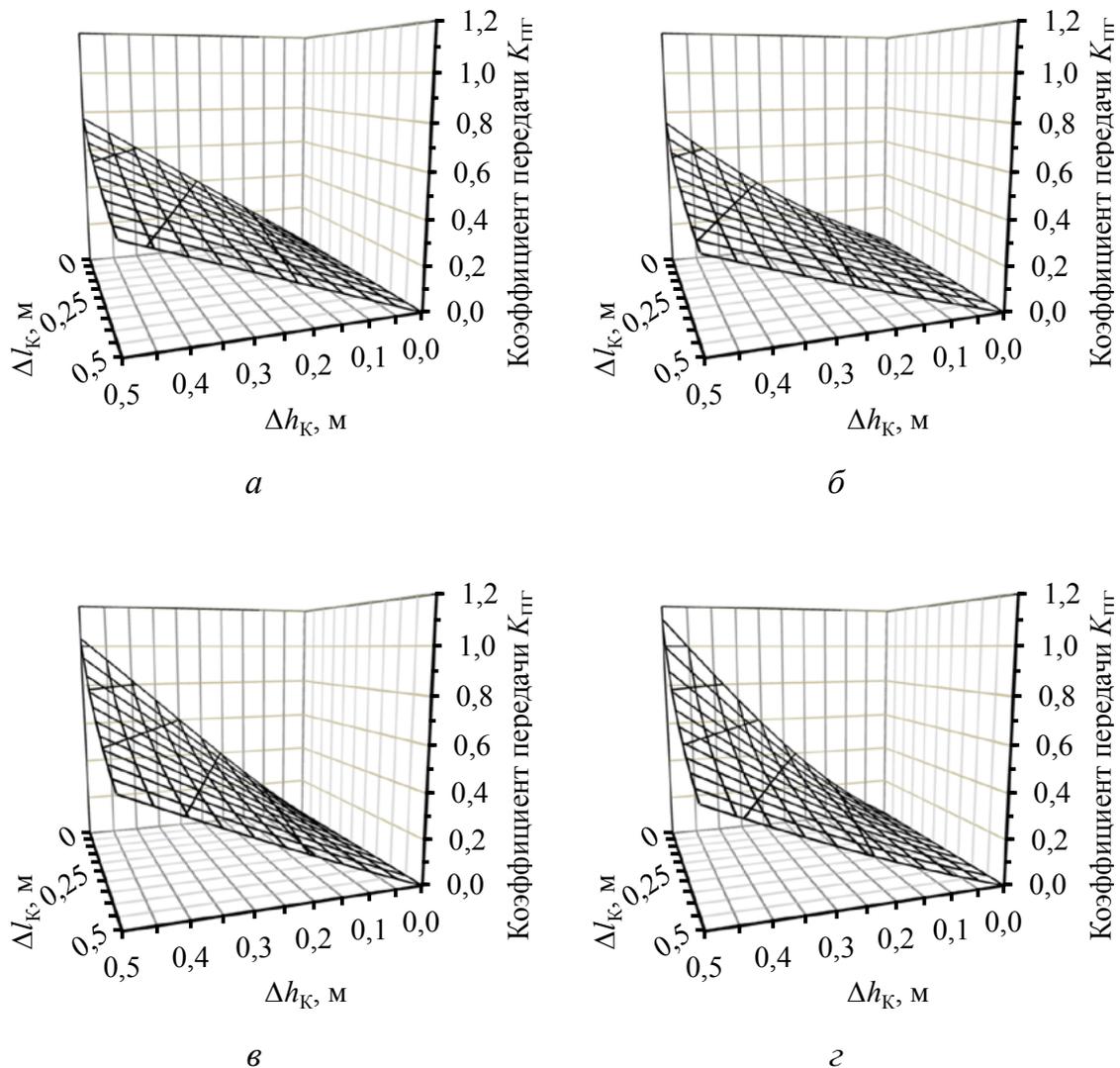


Рис. 3. Графики изменения коэффициента передачи $K_{пг}$ от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:

a — $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м; *б* — $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м;

в — $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м; *г* — $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м

и $E_{помкр}^{ДК1}$ при различных величинах расстояний между центрами приемных катушек П и ДК1 по вертикали Δh и по горизонтали Δl (рис. 4, 5).

При незначительных колебаниях высоты подвеса основной катушки действующее значение величины $E_{помкр}^{ПК1}$ может увеличиваться в 5 раз и более. Наибольшее действующее значение величины $E_{помкр}^{ДК1}$ достигается при размещении катушки ДК1 таким образом, что ее центр оказы-

вается смещенным от центра основной катушки ПК1 на некоторое значение Δl в горизонтальной плоскости (пример на рис. 5, б).

С учетом этого дополнительные приемные катушки ДК1 и ДК2 рекомендуется размещать таким образом, чтобы величина Δl была как можно больше, при этом корпус приемной катушки не выходил за пределы габарита подвижного состава. Это позволит обеспечить большой диа-

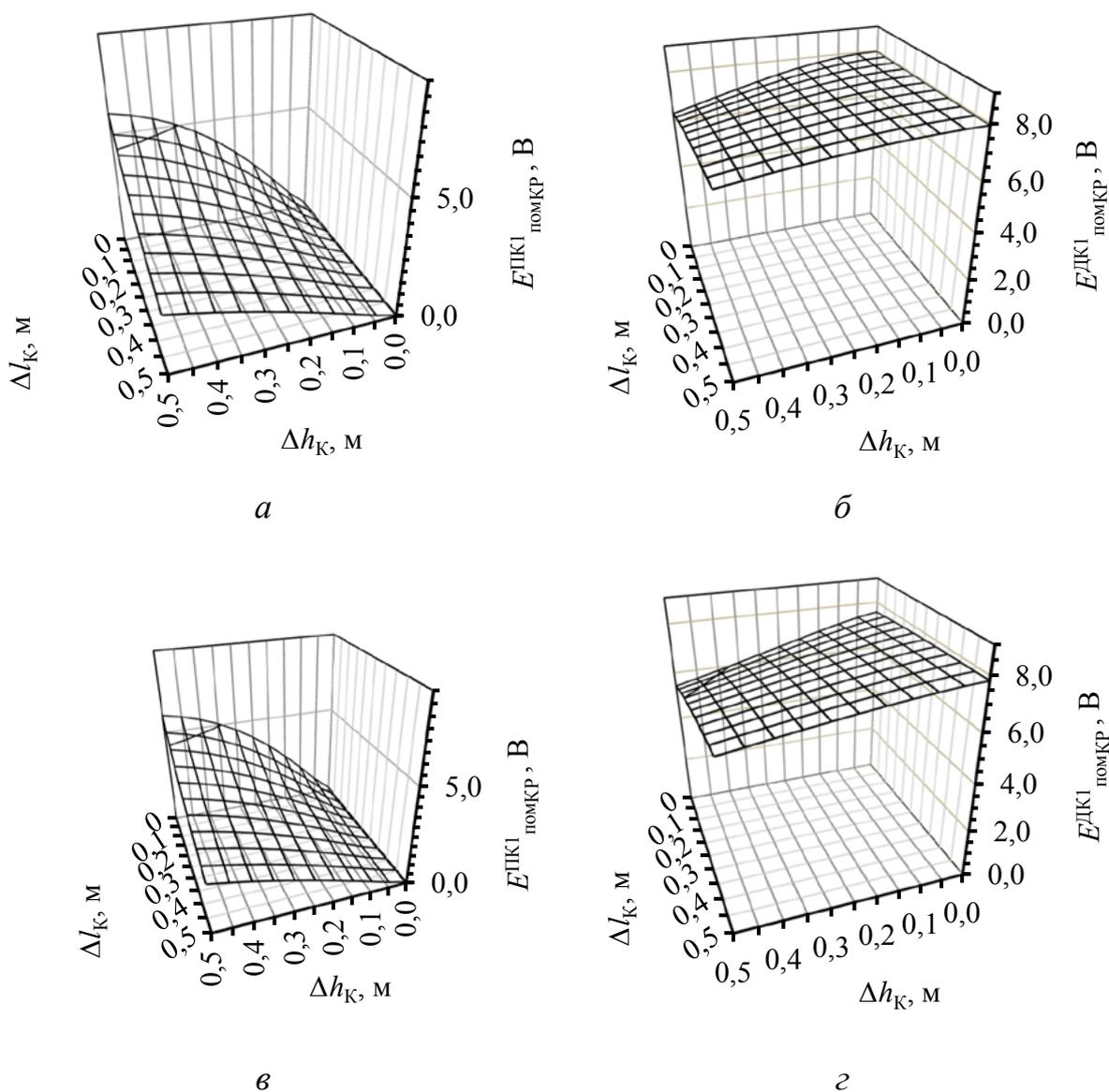


Рис. 4. Графики зависимости ЭДС в основной и дополнительной приемных катушках от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:
a — ПК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м; *б* — ДК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0$ м;
в — ПК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м; *г* — ДК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0$ м

пазон амплитуд компенсируемых помех. Величину Δh рекомендуется принимать равной нулю, чтобы исключить необходимость корректировки значения коэффициента КПП в процессе движения поезда (в пределах интервала времени между проведением технического обслуживания в объеме ТО-2).

Заключение

1. На основе рассмотрения научных исследований и разработок в области анализа влияния электромагнитной обстановки на работу бортового оборудования систем АТДП была установлена необходимость разработки спосо-

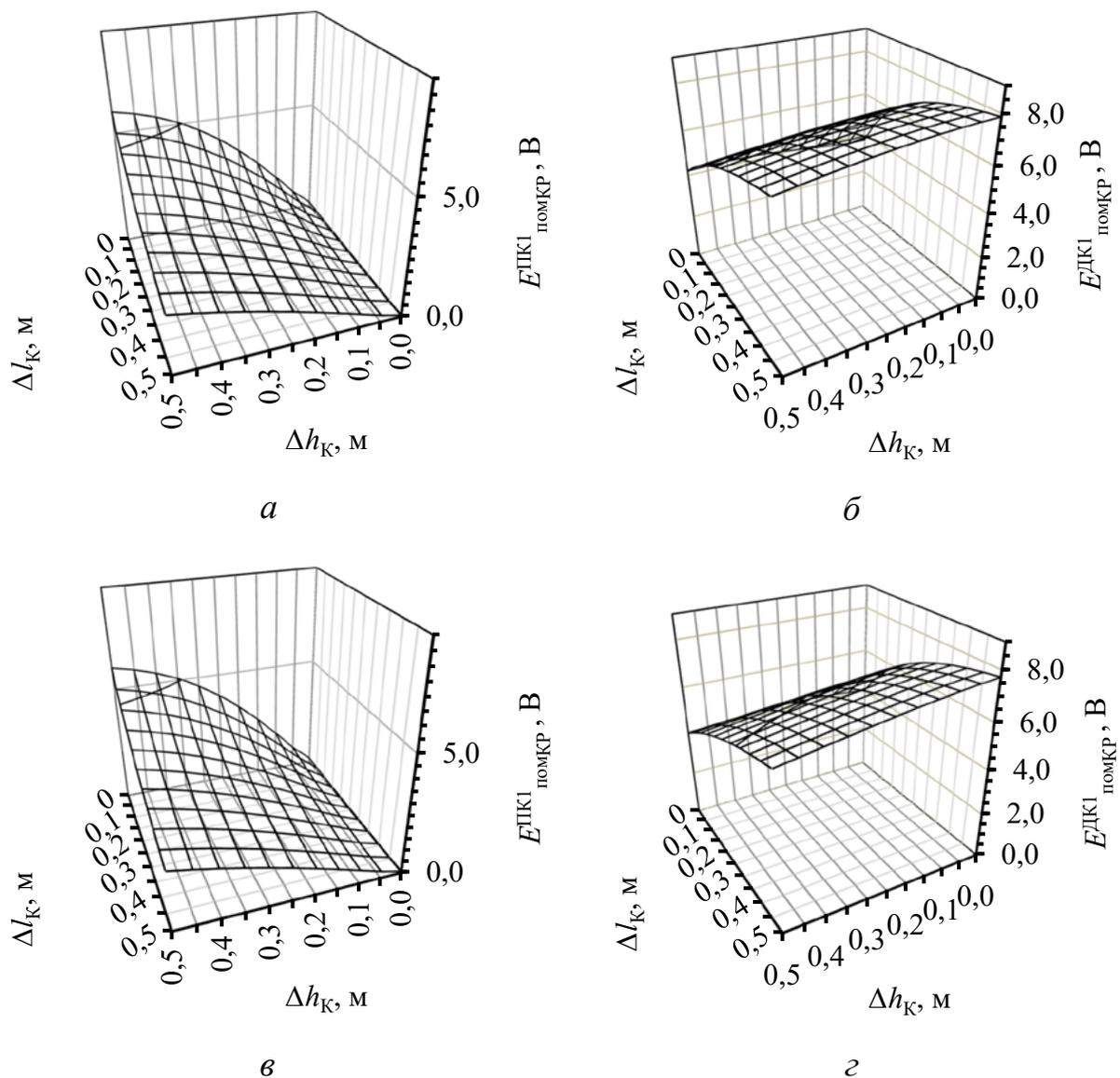


Рис. 5. Графики зависимости ЭДС в основной и дополнительной приемных катушках от изменения высоты подвеса и бокового смещения основной катушки при заданных параметрах взаимного расположения основной и дополнительной катушек:

а — ПК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м; б — ДК1 при $\Delta h = 0$ м, $\Delta l = 0,2$ м;
 в — ПК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м; г — ДК1 при $\Delta h = 0,2$ м, $\Delta l = 0,2$ м

бов снижения влияния помех в канале индуктивной связи системы автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости, вызванных асимметрией геометрического положения контактного рельса.

2. Разработано математическое обеспечение для разработанного ранее устройства компенсации электромагнитной помехи, учитывающего асимметрию в линии индуктивной связи, обусловленную геометрическим положением контактного рельса.

3. С помощью разработанного математического обеспечения был получен ряд характерных зависимостей, позволяющих обеспечить настройку параметров сумматора предложенного устройства компенсации помехи.

4. Определены рекомендуемые параметры размещения дополнительных катушек. Величину Δh рекомендуется принимать равной нулю, а величину Δl следует принимать максимально возможной с учетом габаритов используемой приемной катушки размещения основных приемных катушек и габарита подвижного состава.

Перспектива исследований в данной области заключается в формировании математической модели, учитывающей при компенсации помехи на входе поездных устройств АТДП величину асимметрии тяговых токов в рельсовой линии под приемными катушками.

Список источников

1. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. — М.: Транспорт, 1986. — 351 с.
2. Манаков А. Д. Асимметрия рельсовых цепей с реле ДСШ-2 / А. Д. Манаков, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — Т. 14. — № 2. — С. 280–297.
3. Баранов Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко и др. // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 35–40.
4. Pat. 5501416 (US). Method and apparatus for inductively receiving cab signaling on board a railway vehicle. Capan Ronald R. — 1996.
5. Pat. 5501417 (US). Noise cancellation in railway cab signal. Capan Ronald R. — 1996.
6. Кузьмин В. С. К вопросу о возникновении помех в канале индуктивной связи на метрополитене за счет асимметрии геометрического положения контактного рельса / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, Р. О. Рядчиков // Наука и техника транспорта. — 2022. — № 4. — С. 8–16.
7. Баранов Л. А. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, Р. О. Рядчиков // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 2. — С. 8–13.
8. Кабецкий А. Г. Метод оценки влияния гармоник тягового тока подвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на метрополитене / А. Г. Кабецкий // 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. — Санкт-Петербург, Петергоф: Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений), 2021. — С. 30–35.
9. Манаков А. Д. 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.
10. Яковенко М. С. Активное подавление гармоник во входном токе силового преобразователя электропривода компрессора / М. С. Яковенко, А. С. Анучин, Д. М. Шпак и др. // Электричество. — 2018. — № 12. — С. 41–46. — DOI: 10.24160/0013-5380-2018-12-41-46.
11. Патент № 2768302 Российская Федерация. Способ приема сигналов из линии индуктивной связи с компенсацией помехи от тягового тока и устройство для его осуществления: № 2021126736 заявл. 10.09.2021; опубл. 23.03.2022, Бюл. № 9 / А. К. Табунщиков, В. С. Кузьмин, Р. О. Рядчиков и др.

Дата поступления: 15.11.2024

Решение о публикации: 28.02.2025

Контактная информация:

РЯДЧИКОВ Руслан Олегович — аспирант;

ryadchikov.ro@yandex.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич — канд. техн. наук,

доц.; vs.kuzmin@bk.ru

Compensation of Electromagnetic Interference Arising Due to Inductive Coupling Asymmetry of the Metro Locomotive Signalling with Automatic Speed Control

R. O. Ryadchikov, V. S. Kuzmin

Russian University of Transport, 9, bld 9, GSP-4, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Ryadchikov R. O., Kuzmin V. S. Compensation of Electromagnetic Interference Arising Due to Inductive Coupling Asymmetry of the Metro Locomotive Signalling with Automatic Speed Control // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 160–170. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-160-170

Summary

Purpose: Failures in the operation of the Metro locomotive automatic signalling with automatic speed control lead to slowdowns and stops in the Metro tunnels and train schedule disruptions. The most common cause of such failures is interference in the inductive coupling channel between trackside devices and train equipment. The article formulates a compensation scheme for a previously developed receiver for compensating electromagnetic interference, with the inductance coupling asymmetry of automatic locomotive signalling taken into account. This is caused by the geometrical position of the contact rail. **Methods:** Based on the previously published paper that generally formulated a condition for interference compensation in an inductive coupling channel with the geometrical position asymmetry of the receiving coils and the contact rail, and the Biot-Savart-Laplace law, a new expression was obtained that takes into account the inclusion of additional receiving coils inductively connected to the contact rail. **Results:** A mathematical calculation defining the interference compensation condition has been put forward. A number of specific dependencies have been obtained for the coefficient of proportionality for adjusting the operating parameters of the interference compensation device and the EMF induced in the main and additional receiving coils of automatic locomotive signalling when changing their position geometry. **Practical significance:** The simulation allows determining the coefficient of proportionality characterizing the difference in the position geometry of the main and additional receiving coils. This coefficient value for the given coil position geometry is the basis for adjusting the proposed device operation in depot environment.

Keywords: Electromagnetic compatibility, asymmetry, Metro, safety device, contact rail, third-rail conductor, inductive coupling, automatic locomotive signalling with automatic speed control.

References

1. Makhmutov K. M. *Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na metropolitene* [Devices for interval control of train traffic on the subway]. Moscow: Transport Publ., 1986, 351 p. (In Russian)
2. Manakov A. D., Kabetskiy A. G., Troshin A. A. et al. Asimetriya rel'sovykh tsepey s rele DSSH-2 [Asymmetry of track circuits with the DSSH-2 relay]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proce-

dings of Petersburg Transport University]. 2017, vol. 14, Iss. 2, pp. 280–297. (In Russian)

3. Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Sidorenko V. G. Metod otsenki izmeneniya elektromagnitnoy obstanovki v mestakh funktsionirovaniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Method for assessing changes in the electromagnetic environment at the locations of interval control systems for train traffic]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2013, Iss. 3, pp. 35–40. (In Russian)

4. Pat. 5501416 (US). Method and apparatus for inductively receiving cab signaling on board a railway vehicle. Capan Ronald R. 1996.
5. Pat. 5501417 (US). Noise cancellation in railway cab signal. Capan Ronald R. 1996.
6. Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Ryadchikov R. O. K voprosu o vozniknovenii pomekh v kanale induktivnoy svyazi na metropolitene za schet asimetrii geometricheskogo polozheniya kontaktnogo rel'sa [On the issue of interference in the inductive communication channel on the subway due to the asymmetry of the geometric position of the contact rail]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2022, Iss. 4, pp. 8–16. (In Russian)
7. Baranov L. A., Tabunshchikov A. K., Ryadchikov R. O. Otsenka garmonicheskikh sostavlyayushchikh tyagovogo toka v Moskovskom metropolitene na osnove eksperimental'nykh zamerov [Evaluation of harmonic components of traction current in the Moscow Metro based on experimental measurements]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 2, pp. 8–13. (In Russian)
8. 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 influence of traction current harmonics of rolling stock with an asynchronous traction drive on the operation of railway automation and telemetry 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, Petergof, 18 maya 2021 goda* [Innovative Railway. The latest and promising systems for ensuring train traffic. Problems and solutions: collection of articles from the International scientific and theoretical conference, St. Petersburg, Peterhof, May 18, 2021]. St. Petersburg, Peterhof: Voennyi institut (zheleznodorozhnykh voysk i voennykh soobshcheniy) Publ., 2021, pp. 30–35. (In Russian)
9. Manakov A. D. et al. Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Standards of hazardous and disturbing influence of interference on ALS-ARS devices of the BARS system of the St. Petersburg metro]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2015, vol. 1, Iss. 1, pp. 28–39. (In Russian)
10. Yakovenko M. S., Anuchin A. S., Shpak D. M. et al. Aktivnoe podavlenie garmonik vo vkhodnom toke silovogo preobrazovatelya elektroprivoda kompressora [Active suppression of harmonics in the input current of the power converter of the compressor electric drive]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2018, Iss. 12, pp. 41–46. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-12-41-46. (In Russian)
11. Tabunshchikov A. K., Kuz'min V. S., Ryadchikov R. O. et al. *Sposob priema signalov iz linii induktivnoy svyazi s kompensatsiey pomekhi ot tyagovogo toka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for receiving signals from an inductive coupling line with compensation for traction current interference and a device for implementing it]. Patent RF, no. 2768302, 2022. (In Russian)

Received: November 15, 2024

Accepted: February 28, 2025

Author's information:

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

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