

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 31–41
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003>
UDC / УДК / ЭОЖ:
УДК 621.331:681.5

AUTOMATIC STRAY CURRENT MONITORING IN THE POWER SUPPLY CONTROL SYSTEM OF A DC RAILWAY SECTION: A COMPUTATIONAL ASSESSMENT

N.N. Alimbaev, A.O. Oralbekova*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz.

N.N. Alimbaev — Master's student, International University of Transport and Humanities, 32a Zhetysu-1 microdistrict, 050063, Almaty, Kazakhstan

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

A.O. Oralbekova — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, 32a Zhetysu-1 microdistrict, 050063, Almaty, Kazakhstan

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© N.N. Alimbaev, A.O. Oralbekova

Abstract. On DC-electrified railway sections, part of the traction current leaks from the running rails into the ground and causes electrocorrosion of buried metal structures, so the power supply control system of a section should monitor the condition of the track insulation. The aim of the study is to substantiate the set of measurements and the action rules of an automatic stray current monitoring system using a computational model. A two-layer rail–earth model with distributed parameters was used; the longitudinal rail resistance (15–20 mOhm/km) and the rail-to-earth resistance (from 100 to 0.4 Ohm·km) were taken from EN 50122-2 and published studies. The rail potential and leakage current were calculated for single-end and double-end feeding and feeding zones of 1–20 km, and a Monte Carlo simulation was used to test the automatic estimation of the rail-to-earth resistance from the difference of rail currents at two points with sensor errors of 0.1–1 %. For a train current of 1000 A and a 10 km zone, a decrease in the rail-to-earth resistance from 100 to 0.4 Ohm·km reduces the maximum rail potential only from 99.8 to 72.2 V, whereas the earth current grows from 2.5 to 409 A; hence the rail potential cannot serve as the main indicator of insulation degradation. An average leakage current of 2.5 A/km is reached at about 2.0 Ohm·km for a 2 km zone and about 9.8 Ohm·km for a 10 km zone; double-end feeding reduces the leakage current about fourfold. With 0.5 % sensor error, the current-difference estimate detects the limiting insulation state in a 10 km zone, while zones of about 2 km require more accurate sensors or averaging. A structure of the automatic monitoring loop is proposed. The results are computational and require verification by measurements on an operating section.

Keywords: stray current, automatic monitoring, DC traction power supply, rail-to-earth resistance, rail potential, electrocorrosion, telemechanics

For citation: Alimbaev N.N., Oralbekova A.O. (2026). Automatic Stray Current Monitoring in the Power Supply Control System of a DC Railway Section: A Computational Assessment // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 31–41. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (In Russ.).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.



ТҰРАҚТЫ ТОК ТЕМІР ЖОЛ УЧАСКЕСІНІҢ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУЫН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНДЕ АДАСҚАН ТОКТАРДЫ АВТОМАТТЫ БАҚЫЛАУ: ЕСЕПТІК БАҒАЛАУ

Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова*

Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz

Әлімбаев Н.Н. — магистрант, Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Жетісу-1 ш.а., 32а, 050063, Алматы, Қазақстан

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

Оралбекова А.О. — PhD докторы, қауымдастырылған профессор (доцент), Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Жетісу-1 ш.а., 32а, 050063, Алматы, Қазақстан

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О.

Аннотация. Тұрақты токпен электрлендірілген темір жол учаскелерінде тарту тогының бір бөлігі рельстерден жерге ағып, жерасты металл құрылыстарының электркоррозиясын тудырады, сондықтан учаскенің электрмен жабдықтауын автоматты басқару жүйесі жол оқшаулауының күйін бақылауы тиіс. Жұмыстың мақсаты – есептік модель негізінде адасқан токтарды автоматты бақылау жүйесінің өлшемдер құрамын және әрекет ету ережелерін негіздеу. Таралған параметрлері бар екі қабатты «рельстер – жер» моделі қолданылды; рельстердің бойлық кедергісі (15–20 мОм/км) және рельстер – жер өтпелі кедергісі (100-ден 0,4 Ом·км-ге дейін) EN 50122-2 нормалары мен жарияланған зерттеулер бойынша алынды. Ұзындығы 1–20 км қоректендіру аймақтары үшін бір жақты және екі жақты қоректендіру кезіндегі рельстер потенциалы мен ағып кету тогы есептелді, ал Монте-Карло әдісімен датчиктердің 0,1–1 % қателігі кезінде екі нүктедегі рельс токтарының айырмасы бойынша өтпелі кедергіні автоматты бағалау тексерілді. Поезд тогы 1000 А және аймақ ұзындығы 10 км болғанда өтпелі кедергі 100-ден 0,4 Ом·км-ге дейін азайғанда рельстердің ең үлкен потенциалы тек 99,8-ден 72,2 В-қа дейін төмендейді, ал жердегі ток 2,5-тен 409 А-ге дейін өседі; демек, рельстер потенциалы оқшаулаудың нашарлауының негізгі белгісі бола алмайды. 2,5 А/км орташа ағып кету тогына 2 км аймақ үшін шамамен 2,0 Ом·км, ал 10 км аймақ үшін шамамен 9,8 Ом·км өтпелі кедергіде жетеді; екі жақты қоректендіру ағып кету тогын шамамен төрт есе азайтады. Датчик қателігі 0,5 % болғанда ток айырмасы бойынша бағалау 10 км аймақта оқшаулаудың шекті күйін анықтайды, ал шамамен 2 км аймақтар үшін дәлірек датчиктерді немесе орташалауды қажет етеді. Автоматты бақылау контурының құрылымы ұсынылды. Нәтижелер есептеу арқылы алынған және жұмыс істеп тұрған учаскеде өлшеулермен тексеруді қажет етеді.

Түйін сөздер: адасқан токтар, автоматты бақылау, тұрақты ток тарту электрмен жабдықтауы, рельстер – жер өтпелі кедергісі, рельстер потенциалы, электркоррозия, телемеханика

Дәйексөз үшін: Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О. (2026). Тұрақты ток темір жол учаскесінің электрмен жабдықтауын басқару жүйесінде адасқан токтарды автоматты бақылау: есептік бағалау // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 31–41 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ УЧАСТКА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА: РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА

Н.Н. Әлімбаев, А.О. Оралбекова*

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz.

Әлімбаев Н.Н. — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, мкр. Жетысу-1, 32а, 050063, Алматы, Казахстан

E-mail: alimbaev.nurbol@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-7240-525X>;

Оралбекова А.О. — доктор PhD, ассоциированный профессор (доцент), Международный транспортно-гуманитарный университет, мкр. Жетысу-1, 32а, 050063, Алматы, Казахстан.

E-mail: oralbekova.ayaulym@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4030-0740>.

© Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О.

Аннотация. На участках электрифицированной железной дороги постоянного тока часть тягового тока стекает с рельсов в землю и вызывает электрокоррозию подземных металлических сооружений, поэтому система автоматического управления электроснабжением участка должна контролировать состояние изоляции пути. Цель работы – обосновать состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на основе расчётной модели. Использована двухслойная модель «рельсы – земля» с распределёнными параметрами; продольное сопротивление рельсов (15–20 мОм/км) и переходное сопротивление рельсы – земля (от 100 до 0,4 Ом·км) приняты по нормам EN 50122-2 и опубликованным исследованиям. Рассчитаны потенциал рельсов и ток утечки при одностороннем и двустороннем питании для зон питания длиной 1–20 км, а методом Монте-Карло проверена автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов в рельсах в двух точках при погрешности датчиков 0,1–1 %. Расчёт для тока поезда 1000 А и зоны 10 км показал, что при уменьшении переходного сопротивления со 100 до 0,4 Ом·км наибольший потенциал рельсов снижается лишь с 99,8 до 72,2 В, тогда как ток в земле растёт с 2,5 до 409 А; следовательно, потенциал рельсов не может служить основным признаком ухудшения изоляции. Средний ток утечки 2,5 А/км достигается при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км для зоны 2 км и около 9,8 Ом·км для зоны 10 км; двустороннее питание снижает ток утечки примерно в четыре раза. При погрешности датчиков 0,5 % оценка по разности токов выявляет предельное состояние изоляции в зоне 10 км, а для зон около 2 км требует более точных датчиков или усреднения. Предложена структура контура автоматического контроля. Результаты получены расчётом и требуют проверки измерениями на действующем участке.

Ключевые слова: блуждающие токи, автоматический контроль, тяговое электроснабжение постоянного тока, переходное сопротивление рельсы – земля, потенциал рельсов, электрокоррозия, телемеханика

Для цитирования: Әлімбаев Н.Н., Оралбекова А.О. (2026). Автоматический контроль блуждающих токов в системе управления электроснабжением участка железной дороги постоянного тока: расчётная оценка // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 31–41. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.003> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

На электрифицированных железных дорогах постоянного тока, в метрополитенах, трамвае, а также на промышленном и карьерном электрическом транспорте ходовые рельсы служат обратным проводом тяговой сети. Рельсы уложены на шпалы и балласт и не изолированы от земли полностью, поэтому часть тягового тока возвращается к тяговой подстанции по земле. Этот ток называют блуждающим. Там, где он стекает с подземных металлических сооружений – трубопроводов, кабелей, арматуры фундаментов – в грунт, возникает электрокоррозия, а в самих рельсах и креплениях она проявляется в зоне стекания тока с рельсов (Cotton и др., 2005; Memon, Fromme, 2014). Одновременно ток в рельсах создаёт потенциал рельсов относительно земли, который ограничивается требованиями электробезопасности (Du и др., 2016).

Нормативный подход к защите от блуждающих токов основан на ограничении проводимости между путём и землёй и среднего тока утечки на единицу длины пути. Европейский стандарт EN 50122-2 задаёт для одного пути на открытом полотне проводимость не более 0,5 См/км, а для пути на сплошном основании – не более 2,5 См/км, и указывает, что средний ток утечки не более 2,5 мА/м на один путь не приводил к повреждениям в течение 25 лет (Vranešić и др., 2023; EN 50122-2, 2022). Однако изоляция пути со временем ухудшается из-за загрязнения балласта, увлажнения и повреждения изолирующих элементов креплений, и без постоянного контроля это ухудшение обнаруживается только по последствиям – по коррозии подземных сооружений.

Поэтому системы автоматического управления электрическими сетями на участке железной дороги должны включать не только телеуправление тяговыми подстанциями и фидерами, но и автоматический контроль состояния обратной тяговой сети. Цифровая модернизация электросетевого хозяйства Казахстана, включая внедрение систем SCADA/EMS и автоматизированного учёта, рассматривается в работах, опубликованных в этом журнале (Pentao, 2026), как и компьютерная поддержка реагирования на чрезвычайные ситуации на железной дороге (Shalabayeva, 2025: 90–104). Вопрос о том, какие величины система автоматического контроля должна измерять на участке постоянного тока, чтобы своевременно обнаруживать рост утечки тока, и какие управляющие действия ей доступны, требует количественного ответа.

Системы телемеханики тяговых подстанций, как правило, измеряют токи фидеров и напряжения на шинах, а на отдельных участках дополнительно устанавливаются пункты измерения потенциала рельсов относительно земли. Возникает практический вопрос: достаточно ли этих измерений для контроля утечки тягового тока или на пути нужны дополнительные датчики тока в рельсах, и какой должна быть их точность. Ответ зависит от того, как распределяется ток между рельсами и землёй при разном состоянии изоляции пути, от длины зоны питания и от схемы питания. Его можно получить расчётом ещё до установки оборудования на участке, что позволяет заранее сформулировать требования к измерительной части системы автоматического управления.

Объект исследования – участок электрифицированной железной дороги постоянного тока с тяговой подстанцией и обратной тяговой сетью. Предмет исследования – зависимость потенциала рельсов и тока утечки от переходного сопротивления рельсы – земля, длины зоны питания и схемы питания, а также возможность автоматической оценки состояния изоляции пути по измерениям токов. Цель работы – обосновать состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на участке постоянного тока на основе расчётной модели с параметрами из нормативных документов и опубликованных исследований.

Задачи исследования: (1) описать расчётную модель участка с распределёнными параметрами рельсы – земля и определить её параметры по источникам; (2) рассчитать распределение потенциала рельсов и тока утечки при разном состоянии изоляции пути и разной длине зоны питания; (3) оценить, насколько потенциал рельсов и ток утечки чувствительны к ухудшению изоляции; (4) сравнить одностороннее и двустороннее питание по току утечки; (5) проверить на модели точность автоматической оценки переходного сопротивления по двум измерениям тока при разной погрешности датчиков и предложить структуру контура автоматического контроля. Все численные результаты статьи являются расчётными; натурные измерения на конкретном участке не проводились.

Механизм образования блуждающих токов и меры их ограничения в системах постоянного тока подробно описаны в литературе. Cotton и соавторы рассмотрели управление блуждающими токами в системах массового транспорта постоянного тока, в том числе выбор схемы заземления обратной сети (Cotton и др., 2005: 722–730). Memon и Fromme обобщили технические методы снижения коррозии от блуждающих токов: повышение сопротивления изоляции пути, системы сбора блуждающих токов, дренажные устройства и мониторинг (Memon, Fromme, 2014: 22–31). Vranešić и соавторы систематизировали требования к проектированию новых путей с позиций ограничения утечки, включая нормы EN 50122-2 и требования отдельных проектов к переходному сопротивлению путь – земля (Vranešić и др., 2023).

Для расчёта потенциала рельсов и тока утечки используются модели разной сложности. В обзоре Yang и соавторов выделены двухслойные модели рельсы – земля с распределёнными параметрами, многослойные модели с системой сбора блуждающих токов и подземными сооружениями, а также электромагнитные модели грунта (Yang и др., 2024: 189–199). Аналитическая модель с распределёнными параметрами применялась для оценки зоны коррозионного влияния на трубопроводы (Wang и др., 2019) и для расчёта удалённого влияния тока утечки вдоль линии (Rodriguez, Feito, 2013: 31–40). Модели с несколькими поездами и подстанциями позволяют объяснить аномальный рост потенциала рельсов (Du и др., 2016; Du и др., 2023), а упрощённая цепная модель с сосредоточенными параметрами была проверена экспериментально на действующей линии (Olivieri и др., 2025). Значения продольного сопротивления рельсов порядка 15–20 мОм/км приводятся в работе Sandidzadeh и Shafipour, где рассмотрено также влияние системы сбора блуждающих токов (Sandidzadeh, Shafipour, 2012).

Контроль блуждающих токов в эксплуатации строится на измерении потенциалов рельсов и сооружений, токов в рельсах и токов дренажа. Mariscotti рассмотрел характерные величины, которые должна измерять система мониторинга блуждающих токов, и подчеркнул, что измерения на пути следует дополнять измерениями на самих подземных сооружениях (Mariscotti, 2020). Peng и соавторы предложили метод онлайн-оценки блуждающего тока в метрополитене по данным непрерывного мониторинга с помощью эквивалентной схемы (Peng и др., 2020: 1482–1492).

Из обзора следует, что модели расчёта и методы мониторинга развиты, но в рассмотренных работах не сопоставляется чувствительность разных измеряемых величин к ухудшению изоляции пути и не оценивается, при какой погрешности датчиков автоматическая система сможет надёжно отличать допустимое состояние изоляции от недопустимого. Именно этот вопрос определяет требования к системе автоматического контроля на участке. Гипотеза исследования: потенциал рельсов в точке подключения тяговой подстанции слабо зависит от переходного сопротивления рельсы – земля и поэтому не может служить основным признаком ухудшения изоляции, тогда как разность токов в рельсах в двух точках участка позволяет

автоматически оценивать переходное сопротивление при погрешности датчиков порядка долей процента.

Материалы и методы.

Расчётная модель. Рассматривается двухслойная модель «рельсы – земля» с распределёнными параметрами (Yang и др., 2024: 189–199). Поезд потребляет ток I_t на расстоянии L от тяговой подстанции; отрицательная шина подстанции соединена только с рельсами (незаземлённая обратная сеть). Обозначим R – продольное сопротивление рельсовой цепи, Ом/км; $R_{п-з}$ – переходное сопротивление рельсы – земля, Ом·км; $\alpha = \sqrt{R/R_{п-з}}$, 1/км. Тогда ток в земле (блуждающий ток) в точке x равен $i_z(x) = I_t \cdot [1 - \text{ch}(\alpha(x - L/2)) / \text{ch}(\alpha L/2)]$, а потенциал рельсов относительно удалённой земли $u(x) = I_t \cdot \sqrt{R \cdot R_{п-з}} \cdot \text{sh}(\alpha(x - L/2)) / \text{ch}(\alpha L/2)$. Наибольший ток в земле достигается в середине зоны питания: $I_z = I_t \cdot [1 - 1/\text{ch}(\alpha L/2)]$; он же равен суммарному току, стекающему с рельсов на участке, где $u > 0$. Средний ток утечки на единицу длины определяется как I_z/L . Модуль потенциала рельсов наибольший на концах зоны питания: $U_{\max} = I_t \cdot \sqrt{R \cdot R_{п-з}} \cdot \text{th}(\alpha L/2)$. При двустороннем питании и расположении поезда в середине между подстанциями каждая половина зоны рассчитывается как одностороннее питание с током $I_t/2$ и длиной $L/2$.

Таблица 1 — Параметры расчётной модели

Параметр	Значение	Обоснование
Продольное сопротивление рельсовой цепи R , Ом/км	0,015; 0,020	Диапазон 15–20 мОм/км (Sandidzadeh, Shafipour, 2012)
Переходное сопротивление рельсы – земля $R_{п-з}$, Ом·км	100; 30; 10	Проектные требования к пути: 100 Ом·км (метро Дубая), 30,5 Ом·км (Миннеаполис) (Vranešić и др., 2023)
	2; 0,4	Предельные значения EN 50122-2: 0,5 и 2,5 См/км на путь (Vranešić и др., 2023)
Длина зоны питания L , км	1–20	Параметрический диапазон
Ток поезда I_t , А	1000	Нормирующее значение; все токи и потенциалы пропорциональны I_t
Ориентир по среднему току утечки, А/км	2,5	2,5 мА/м на путь (Vranešić и др., 2023)
Допустимый длительный потенциал рельсов, В	120	Du и др., 2016
Погрешность датчиков тока (СКО), % от показания	0,1; 0,5; 1,0	Сценарии расчёта

Источник: составлено авторами по указанным работам.

Модель линейна по току поезда, поэтому все результаты приводятся для $I_t = 1000$ А и для другого тока пересчитываются пропорционально. Норма 2,5 мА/м относится к среднему по времени току утечки при эксплуатационной нагрузке, тогда как расчёт выполнен для постоянного тока 1000 А; поэтому сравнение с ней следует рассматривать как ориентир для выбора порогов, а не как проверку соответствия конкретного участка.

Чувствительность. Чтобы сравнить, насколько потенциал рельсов и ток утечки реагируют на ухудшение изоляции, рассчитаны логарифмические производные (эластичности) $d \ln U_{\max} / d \ln R_{п-з}$ и $d \ln I_z / d \ln R_{п-з}$. Эластичность, равная -1 , означает, что уменьшение переходного сопротивления в два раза удваивает величину; эластичность, близкая к нулю, – что величина практически не реагирует на изменение изоляции.

Автоматическая оценка переходного сопротивления. Предполагается, что система автоматического контроля измеряет ток фидера тяговой подстанции I_0 (при одностороннем питании он равен I_t) и ток в рельсах I_m в контрольной точке в середине зоны питания при известном положении поезда. Разность $\Delta I = I_0 - I_m$ равна току в земле в контрольной точке, а переходное сопротивление находится обращением выражения для I_z . Погрешности датчиков моделировались нормальным распределением с относительным среднеквадратическим отклонением 0,1; 0,5 и 1,0 % для каждого

датчика независимо, 20 000 испытаний на сочетание параметров (метод Монте-Карло, начальное значение генератора 0). Для каждого сочетания определялись 5-й, 50-й и 95-й процентиля оценки переходного сопротивления и доля испытаний, в которых оценка среднего тока утечки $\Delta I/L$ превышала 2,5 А/км (доля срабатываний сигнализации).

Расчёты выполнены в Python 3.13 (NumPy); программный код и файлы результатов сохранены авторами и могут быть представлены по запросу редакции.

Результаты.

Распределение потенциала рельсов и тока в земле вдоль зоны питания длиной 10 км показано на рисунке 1. Потенциал рельсов отрицателен у тяговой подстанции и положителен у поезда, где ток стекает с рельсов в землю; именно там в анодной зоне находятся рельсы и скрепления, а подземные сооружения вблизи подстанции, наоборот, отдают ток обратно в рельсы и подвергаются электрокоррозии. При уменьшении переходного сопротивления со 100 до 0,4 Ом·км наибольший модуль потенциала рельсов снижается лишь с 99,8 до 72,2 В, тогда как ток в земле растёт с 2,49 до 409 А, то есть в 164 раз.

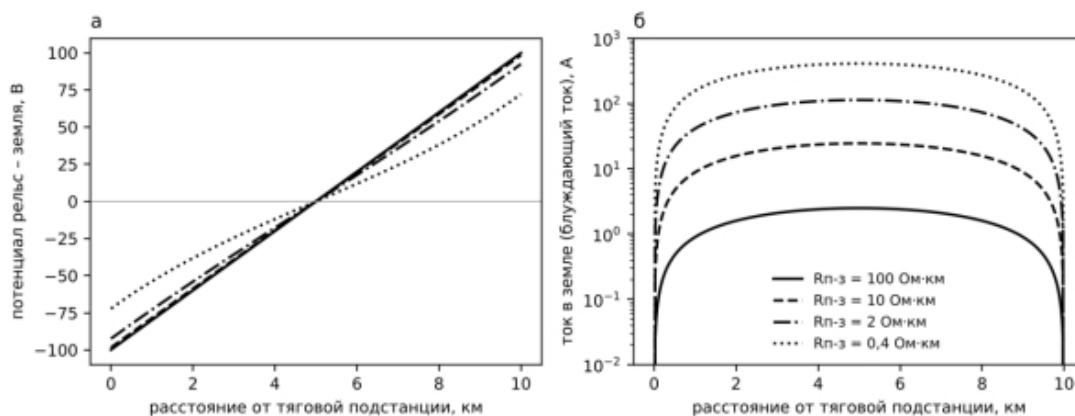


Рис. 1. Потенциал рельсов (а) и ток в земле (б) вдоль зоны питания длиной 10 км при одностороннем питании, $I_T = 1000$ А, $R = 0,02$ Ом/км

Источник: расчёт авторов.

Таблица 2 — Потенциал рельсов и ток утечки при одностороннем питании, $I_T = 1000$ А, $R = 0,02$ Ом/км

$R_{п-з}$, Ом·км	$L = 2$ км: U_{max} , В	$L = 2$ км: I_z , А	$L = 2$ км: I_z/L , А/км	$L = 10$ км: U_{max} , В	$L = 10$ км: I_z , А	$L = 10$ км: I_z/L , А/км
100	20,0	0,10	0,05	99,8	2,5	0,25
30	20,0	0,33	0,17	99,4	8,3	0,83
10	20,0	1,00	0,50	98,4	24,5	2,45
2	19,9	4,98	2,49	92,4	113,2	11,32
0,4	19,7	24,49	12,24	72,2	409,3	40,93

Источник: расчёт авторов. U_{max} – наибольший модуль потенциала рельсов; I_z – наибольший ток в земле; I_z/L – средний ток утечки на единицу длины.

Результаты для двух длин зоны питания приведены в таблице 2. При длине 2 км средний ток утечки достигает ориентира 2,5 А/км только при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км, то есть при значении, близком к пределу EN 50122-2 для открытого полотна (2 Ом·км). При длине 10 км тот же ориентир достигается уже при 9,8 Ом·км, а при 20 км – при 19,2 Ом·км; при сопротивлении рельсовой цепи 0,015 Ом/км соответствующее значение для 10 км составляет 7,3 Ом·км. Потенциал рельсов при этом определяется в основном падением напряжения в рельсах: при 1000 А и длине 10 км он составляет около 100 В и приближается к допустимому длительному значению 120 В (Du и др., 2016) независимо от состояния изоляции.

Чувствительность обеих величин к переходному сопротивлению различается на порядки. При длине зоны 10 км и $R_{п-з} = 30$ Ом·км эластичность потенциала рельсов

равна 0,0055, а тока утечки – -0,993; при $R_{п-з} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ – соответственно 0,075 и -0,905. Иначе говоря, двукратное ухудшение изоляции почти вдвое увеличивает ток утечки, но меняет потенциал рельсов в точке подключения подстанции менее чем на процент. Гипотеза о слабой зависимости потенциала рельсов от переходного сопротивления подтверждается расчётом.

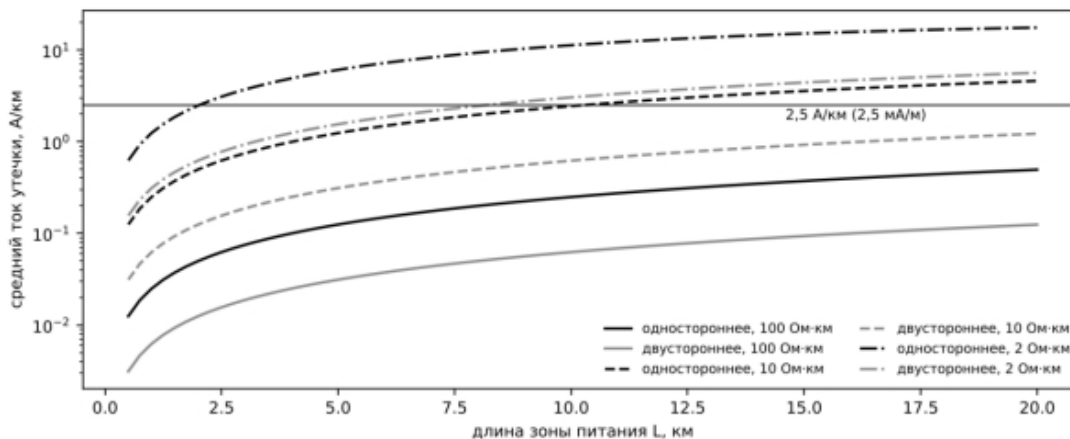


Рис. 2. Средний ток утечки в зависимости от длины зоны питания при одностороннем и двустороннем питании, $I_T = 1000 \text{ A}$, $R = 0,02 \text{ Ом/км}$

Источник: расчёт авторов.

Влияние длины зоны питания и схемы питания показано на рисунке 2. При высоком переходном сопротивлении ток утечки растёт приблизительно пропорционально квадрату длины зоны питания, а средний ток на единицу длины – пропорционально её длине. Двустороннее питание при расположении поезда в середине зоны уменьшает ток в земле в 4,0 раза, а наибольший потенциал рельсов – в 4,0 раза по сравнению с односторонним питанием той же зоны. Это количественно подтверждает известное преимущество двустороннего питания и делает перевод участка на двустороннее питание одним из управляющих действий системы автоматического контроля.

Таблица 3 — Автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов при погрешности каждого датчика 0,5 %

L, км	$R_{п-з}$, Ом·км	I_z , А	Оценка $R_{п-з}$: 5-й / 50-й / 95-й процентиль	Доля срабатываний, %
2	0,4	24,49	0,27 / 0,40 / 0,8	99,7
2	2	4,98	0,57 / 1,41 / 12,2	50,2
2	10	1,00	0,68 / 1,96 / 20,6	28,1
2	30	0,33	0,70 / 2,04 / 20,1	25,2
2	100	0,10	0,72 / 2,06 / 23,0	24,6
10	0,4	409,29	0,39 / 0,40 / 0,4	100,0
10	2	113,18	1,82 / 2,00 / 2,2	100,0
10	10	24,49	6,77 / 9,98 / 18,9	47,2
10	30	8,28	12,26 / 26,46 / 183,5	0,9
10	100	2,49	15,70 / 43,89 / 392,6	0,1

Источник: расчёт авторов (метод Монте-Карло, 20 000 испытаний). Доля срабатываний – доля испытаний, в которых оценка среднего тока утечки превысила 2,5 А/км.

Результаты проверки автоматической оценки переходного сопротивления приведены в таблице 3. Для обнаружения среднего тока утечки 2,5 А/км система должна различать разность токов $2,5 \cdot L \text{ A}$, то есть 25 А при длине зоны 10 км (2,5 % тока поезда 1000 А) и 5 А при длине 2 км (0,5 %). При длине 10 км и погрешности датчиков 0,5 % предельное по EN 50122-2 значение 2 Ом·км оценивается в интервале 1,82–2,22 Ом·км, сигнализация срабатывает во всех испытаниях, а при исправной изоляции 30 Ом·км и выше доля ложных срабатываний не превышает 0,9 %. Состояние 10 Ом·км лежит практически

на пороге (средний ток утечки 2,45 А/км), поэтому сигнализация срабатывает примерно в половине испытаний (47 %). При длине 2 км разность токов слишком мала: при исправной изоляции 30 Ом·км доля ложных срабатываний составляет 0,0 % при погрешности 0,1 %, 25,2 % при 0,5 % и 36,6 % при 1 %. Для коротких зон питания требуются более точные датчики или усреднение по многим интервалам.



Рис. 3. Контур автоматического контроля блуждающих токов на участке постоянного тока

Источник: разработано авторами.

На основе расчётов предложена структура контура автоматического контроля (рисунок 3). Система получает от телемеханики тяговых подстанций токи фидеров, от измерительных пунктов на пути – токи в рельсах и потенциалы, от систем сигнализации и диспетчерского управления – положение поездов. За каждый интервал усреднения она вычисляет разность токов, средний ток утечки и оценку переходного сопротивления по модели, сравнивает их с порогами и формирует действия: сообщение диспетчеру электроснабжения, перевод зоны на двустороннее питание при возможности и заявку на проверку изоляции пути. Тренд переходного сопротивления по участкам сохраняется в архиве и используется для контроля после ремонта. Предложенная структура является проектным решением; её работоспособность проверена только на расчётной модели.

Обсуждение.

Полученные результаты согласуются с выводами работ о мониторинге блуждающих токов: измерения на пути необходимо дополнять измерениями, непосредственно связанными с утечкой тока (Mariscotti, 2020), а оценка блуждающего тока по данным непрерывного мониторинга возможна при наличии модели участка (Peng и др., 2020: 1482–1492). Новым в настоящей работе является количественное сопоставление чувствительности потенциала рельсов и тока утечки к ухудшению изоляции и оценка требований к точности датчиков для автоматической сигнализации. Расчёт показывает, что контроль только потенциала рельсов, часто применяемый для обеспечения электробезопасности, не позволяет обнаружить ухудшение изоляции пути, тогда как разность токов в рельсах реагирует на него почти пропорционально.

Практический вывод для проектирования систем автоматического управления электрическими сетями на участке состоит в следующем. Во-первых, измерительные пункты тока в рельсах должны располагаться внутри зон питания, а их погрешность должна быть существенно меньше отношения $2,5 \cdot L$ к расчётному току нагрузки. Во-вторых, для коротких зон питания (порядка 2 км) единичные измерения не позволяют надёжно отличить допустимое состояние изоляции от недопустимого, поэтому решения следует принимать по

усреднённым за длительный интервал оценкам. В-третьих, двустороннее питание снижает ток утечки примерно в четыре раза и потому может использоваться как оперативное управляющее действие до восстановления изоляции.

Ограничения исследования связаны с упрощениями модели. Рассматривается один поезд и одна зона питания; не учитываются несколько поездов, рекуперация, система сбора блуждающих токов, неоднородность грунта и подземные сооружения, которые учитываются в многослойных моделях (Yang и др., 2024: 189–199; Du и др., 2023). Переходное сопротивление принято одинаковым по всей длине зоны. Ток поезда принят постоянным, тогда как норма по среднему току утечки относится к среднему по времени значению. Погрешности датчиков заданы сценариями, а не паспортными данными конкретных приборов. Поэтому полученные пороги следует уточнять по измерениям на конкретном участке.

Заключение.

В работе на основе двухслойной модели «рельсы – земля» с распределёнными параметрами, параметры которой взяты из нормативных требований EN 50122-2 и опубликованных исследований, обоснован состав измерений и правила действий системы автоматического контроля блуждающих токов на участке электрифицированной железной дороги постоянного тока. Все численные результаты получены расчётом для тока поезда 1000 А и пропорциональны этому току.

Основные результаты. Во-первых, при уменьшении переходного сопротивления рельсы – земля со 100 до 0,4 Ом·км в зоне питания длиной 10 км наибольший потенциал рельсов изменяется лишь с 100 до 72 В, тогда как ток в земле растёт в 164 раз; эластичность потенциала рельсов по переходному сопротивлению не превышает 0,07 при $R_{п-з} \geq 2$ Ом·км, а эластичность тока утечки близка к –1. Следовательно, потенциал рельсов не может служить основным признаком ухудшения изоляции пути. Во-вторых, ориентир по среднему току утечки 2,5 А/км при одностороннем питании достигается при переходном сопротивлении около 2,0 Ом·км для зоны 2 км и около 9,8 Ом·км для зоны 10 км, то есть для длинных зон питания предельные значения EN 50122-2 для проводимости пути недостаточны при постоянной нагрузке такого уровня. В-третьих, двустороннее питание уменьшает ток в земле и наибольший потенциал рельсов примерно в 4 раза. В-четвёртых, автоматическая оценка переходного сопротивления по разности токов в двух точках зоны питания длиной 10 км при погрешности датчиков 0,5 % надёжно выявляет предельное состояние изоляции при доле ложных срабатываний не более 1 % для исправной изоляции, а для зон длиной около 2 км требует более точных датчиков или усреднения.

Научная новизна работы состоит в количественном сопоставлении чувствительности измеряемых величин к состоянию изоляции пути и в оценке требований к точности измерений для автоматической сигнализации о росте утечки тягового тока. Практическая значимость состоит в предложенной структуре контура автоматического контроля, включающей измерение токов в рельсах внутри зон питания, оценку переходного сопротивления по модели, пороги по среднему току утечки и управляющие действия – сообщение диспетчеру, перевод на двустороннее питание и заявку на ремонт изоляции. Эти требования могут быть учтены при модернизации систем телемеханики тяговых подстанций на участках постоянного тока, в том числе на промышленном и городском электрическом транспорте.

Из результатов следуют требования к измерительной части системы автоматического управления электроснабжением участка. Измерения потенциала рельсов следует сохранить для контроля электробезопасности, но для контроля утечки тока их необходимо дополнить измерениями тока в рельсах внутри зон питания. Погрешность датчиков тока следует выбирать с учётом длины зоны питания: допустимая погрешность должна быть существенно меньше отношения $2,5 \cdot L$ к расчётному току нагрузки, то есть для зоны 10 км и тока 1000 А – меньше 2,5 %, а для зоны 2 км – меньше 0,5 %. Решение о

сигнализации для коротких зон следует принимать по оценкам, усреднённым за длительный интервал. Полученные численные значения порогов относятся к принятым в расчёте параметрам и подлежат уточнению по измерениям на конкретном участке: модель не учитывает несколько поездов, рекуперацию, неоднородность переходного сопротивления и подземные сооружения.

Направления дальнейших исследований: проверка модели и порогов по измерениям на действующем участке постоянного тока; учёт нескольких поездов, рекуперации и неоднородного переходного сопротивления; выбор интервала усреднения, при котором доля ложных срабатываний для коротких зон питания не превышает заданного уровня; включение в контур измерений потенциалов подземных сооружений относительно электродов сравнения; оценка экономического эффекта автоматического контроля в сравнении с периодическими ручными измерениями переходного сопротивления пути. Для проверки модели на участке достаточно данных телемеханики тяговых подстанций и временно установленных датчиков тока в рельсах.

REFERENCES

- Cotton I., Charalambous C., Aylott P., Ernst P. (2005). Stray Current Control in DC Mass Transit Systems // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 54, No. 2. — Pp. 722–730. <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.842462>
- Du G., Zhang D., Li G., Wang C., Liu J. (2016). Evaluation of Rail Potential Based on Power Distribution in DC Traction Power Systems // *Energies*. Vol. 9, No. 9. — Art. 729. <https://doi.org/10.3390/en9090729>
- Du G., Zheng Z., Li Q., Xu F., Zhang T., Zhang D., Zhang X., Huang W. (2023). Multi-state unified calculation model of rail potential and stray current in DC railway systems // *IET Electrical Systems in Transportation*. Vol. 13, No. 1. — Art. e12070. <https://doi.org/10.1049/els2.12070>
- EN 50122-2:2022. Railway applications — Fixed installations — Electrical safety, earthing and the return circuit — Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. — Brussels: CENELEC, 2022.
- Mariscotti A. (2020). Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification // *Sensors*. Vol. 20, No. 22. — Art. 6610. <https://doi.org/10.3390/s20226610>
- Memon S.A., Fromme P. (2014). Stray Current Corrosion and Mitigation: A synopsis of the technical methods used in dc transit systems // *IEEE Electrification Magazine*. Vol. 2, No. 3. — Pp. 22–31. <https://doi.org/10.1109/MELE.2014.2332366>
- Olivieri C., Di Leonardo L., de Paulis F., Orlandi A., Sbarra F., Camomilla M. (2025). Experimentally-Based Circuit Modeling Validation of a DC-Electrified Railway System for Rail Voltage and Stray-Current Evaluation // *Electronics*. Vol. 14, No. 22. — Art. 4541. <https://doi.org/10.3390/electronics14224541>
- Peng P., Zeng X., Leng Y., Yu K., Ni Y. (2020). A New On-line Monitoring Method for Stray Current of DC Metro System // *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 15, No. 10. — Pp. 1482–1492. <https://doi.org/10.1002/tee.23219>
- Pentao S. (2026). Kazakhstan's power system under geopolitical transformation: renewable energy potential, digital grid modernisation, and China–Kazakhstan cooperation within the Belt and Road Initiative // *Industrial Transport of Kazakhstan*. 2026. Vol. 22. — Pp. 34–46. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.003>
- Rodríguez J.V., Feito J.S. (2013). Calculation of remote effects of stray currents on rail voltages in DC railways systems // *IET Electrical Systems in Transportation*. Vol. 3, No. 2. — Pp. 31–40. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2012.0022>
- Sandizadeh M.A., Shafipour A. (2012). Controlling and Simulation of Stray Currents in DC Railway by Considering the Effects of Collection Mats // *Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway* / ed. X. Perpinya. — Rijeka: InTech, <https://doi.org/10.5772/35581>
- Shalabayeva M. (2025). Computer support for responding to railway emergencies // *Industrial Transport of Kazakhstan*. Vol. 22, No. 2(86). — Pp. 90–104. <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>
- Vranešić K., Bhagat S., Mariscotti A., Vail R. (2023). Measures and Prescriptions to Reduce Stray Current in the Design of New Track Corridors // *Energies*. Vol. 16, No. 17. — Art. 6252. <https://doi.org/10.3390/en16176252>
- Wang C., Li W., Wang Y., Xu S., Li K. (2019). Evaluation Model for the Scope of DC Interference Generated by Stray Currents in Light Rail Systems // *Energies*. Vol. 12, No. 4. — Art. 746. <https://doi.org/10.3390/en12040746>
- Yang X., Wang M., Zheng T.Q., Sun X. (2024). Modelling and Simulation of Stray Current in Urban Rail Transit — A Review // *Urban Rail Transit*. Vol. 10, No. 3. — Pp. 189–199. <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00227-3>