Сетевой научный журнал «Ресурсы» https://resources.today
Russian Journal of Resources

2026, Том 13, № 3 / 2026, Vol. 13, Iss. 3 https://resources.today/issue-3-2026.html

URL статьи: https://resources.today/PDF/11ECOR326.pdf

DOI: 10.15862/11ECOR326 (https://doi.org/10.15862/11ECOR326)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Саъдуллозода, Ш. С. Электромагнитная нагруженность электромобиля на горном маршруте: системный анализ нормативных разрывов и расчёт маршрутных показателей по цифровой модели рельефа / Ш. С. Саъдуллозода, М. А. Абдулло, Х. Одиназода // Ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 3. — URL: https://resources.today/PDF/11ECOR326.pdf. DOI: 10.15862/11ECOR326.

For citation:
Sa'dullozoda Sh.S., Abdullo M.A., Odinazoda H. Electromagnetic exposure of an electric vehicle on a mountain route: a systems analysis of regulatory gaps and calculation of route-specific metrics using a digital elevation model. *Russian Journal of Resources*. 2026;13(3): 11ECOR326. Available at: https://resources.today/PDF/11ECOR326.pdf. DOI: 10.15862/11ECOR326. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 519.87:004.94:656.13-83:537.86(23)(575.3)

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло
Университет инноваций и цифровых технологий Таджикистана, Куляб, Республика Таджикистан
Доцент кафедры естественно-математических наук
Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан
Докторант
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: srsaidaliev@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5801-9140

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек
Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан
Доцент кафедры эксплуатация автомобильного транспорта
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6253-5946

Одиназода Хайдар
Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан
Профессор кафедры материаловедение, металлургические машины и оборудование
Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАНТ
E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8519-3408

Электромагнитная нагруженность электромобиля на горном маршруте: системный анализ нормативных разрывов и расчёт маршрутных показателей по цифровой модели рельефа

Аннотация. Магнитные поля в салонах электрифицированных автотранспортных средств (АТС) до сих пор измерялись в равнинных ездовых циклах. По этим данным электромобиль среди прочих типов АТС не выделяется: максимумы поля локализованы в зоне ног перед сиденьями, референсный уровень 200 мкТл для населения не достигается, доля от предела не превышает первых десятков процентов. Горный маршрут в опубликованных

измерительных кампаниях не представлен, хотя знак потока мощности меняется на нём на порядок чаще. Предмет работы составляет не сама экспозиция, а информационная процедура её предварительной оценки. Нормативная аргументация обзорной литературы сверена с первоисточниками. Расхождений три, и первое из них принципиально: экспозицию человека внутри транспортного средства не покрывает ни один из четырёх нормативных контуров. Удельный коэффициент поглощения SAR к полям тягового привода частотой 60–420 Гц неприменим: ниже 100 кГц базовым ограничением служит индуцированное в теле электрическое поле. Высоковольтная блокировка HVIL реализует требования ISO 6469-3 инженерными средствами. Из сглаженной модели переключения режимов «тяга — рекуперация» аналитически выведены два маршрутных показателя электромагнитной нагруженности, вычисляемые по цифровой модели рельефа до натурного эксперимента. Ширина зоны сглаживания на их значения не влияет; она задаёт длительность перехода через нуль мощности и ширину спектра переходного процесса. Предложены программа натурной проверки и два направления для национальных требований Республики Таджикистан.

Ключевые слова: системный анализ; электромагнитная нагруженность; электромобиль; цифровая модель рельефа; маршрутный показатель; ICNIRP 2010; рекуперативное торможение

Введение

Электрификация транспорта переносит предмет гигиенической оценки с выхлопа и шума на физические поля внутри салона. Ситуация специфична: пассажир находится в замкнутом металлическом объёме, рядом с силовой проводкой, тяговой машиной и вращающимися массами, причём длительность такой экспозиции для водителя измеряется часами ежедневно. Нормативная база по полям крайне низкой частоты (КНЧ) при этом формировалась задолго до массового появления тяговых батарей и ориентирована на стационарные источники. Отсюда и разрыв. Суждения о том, какая силовая установка создаёт большую магнитную экспозицию, строятся чаще на интуитивных допущениях о «большом токе», чем на синхронных измерениях в сопоставимых условиях.

Fukui и соавторы [1] синхронно измеряли магнитные поля в трёх типах транспортных средств. Наибольшую магнитную индукцию дал подключаемый гибрид, на втором месте оказался автомобиль с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), «чистый» электромобиль занял третье место. Один из самых устойчивых пиков спектра, 6–29 Гц, создаёт намагниченный стальной брекер шин. К тяговому приводу он отношения не имеет и присутствует в любом автомобиле независимо от типа силовой установки.

Публичная дискуссия тем не менее строится вокруг тезиса «электромобиль облучает сильнее», и эмпирика его не подтверждает. Федеральное ведомство по радиационной защите Германии (BfS) обследовало 14 моделей 2019–2021 гг.: 11 электромобилей, 2 гибрида и один автомобиль с ДВС. Все машины уложились в рекомендованные пределы. Максимумы поля пришлись на зону ног перед сиденьями; в области головы и туловища уровни оказались низкими [2].

Почему эта тема до сих пор актуальна? Дело в условиях, при которых получены эти уровни. И BfS, и Fukui, и более ранние измерительные кампании работали с ездовыми циклами равнинной сети. Горный маршрут отличается от равнинного по существу. На затяжном подъёме инвертор работает вблизи предельной мощности; на затяжном спуске тяговая цепь меняет направление потока энергии, и знак мощности меняется на порядок чаще. В ранее опубликованной работе автора по устойчивой модели круиз-контроля [3] на реальном горном профиле сила сопротивления меняет несколько раз, на сглаженном профиле того же участка — один раз. Частое переключений силовой электроники вместо одного создают другой электромагнитный режим, и считать его прежним с другим средним нельзя.

Отсюда вытекает постановка, лежащая в области системного анализа и обработки информации. Натурная измерительная кампания на горном маршруте дорога и организационно тяжела, поэтому ей должна предшествовать процедура отбора маршрутов, работающая на уже имеющихся данных. Цифровая модель рельефа доступна для всей транспортной сети республики; вопрос в том, какую величину из неё извлекать, чтобы получить ранжирование маршрутов по электромагнитной нагруженности привода.

Пожарный контур опасности имеет тот же вход, но здесь не рассматривается: ему нужны собственная статистическая база и отдельный показатель риска. Дальше речь идёт об электромагнитной стороне вопроса.

Цель работы — построить процедуру системного анализа электромагнитной нагруженности электрифицированного автомобильного транспорта на горных маршрутах, замкнутую на измеримые показатели и опирающуюся на первичные нормативные источники.

Задачи:

1. Разграничить области применения ISO 26262, ISO 6469, IEC 61851 и нормативов электромагнитной совместимости (ЭМС) и экспозиции, выявив непокрытые области.
2. Проверить нормативную привязку, принятую в обзорной литературе для полей тягового привода.
3. Построить матрицу системного анализа для электромагнитных факторов горной эксплуатации.
4. Вывести маршрутные показатели нагруженности из сглаженной модели переключения режимов и показать их вычислимость по цифровой модели рельефа.
5. Сформулировать программу натурной проверки и предложения для условий Республики Таджикистан.

1. Методы и материалы

Vassilev и соавторы [4] обследовали восемь электромобилей с разными типами двигателя и силовой электроники, добавив для сравнения три автомобиля с ДВС; полоса измерений доходила до 10 МГц. Результат количественно определён: вблизи накопителя и в зоне ног при трогании экспозиция достигала приблизительно 20 % референсных уровней ICNIRP 2010 для населения, тогда как на высоте головы переднего пассажира оставалась ниже 2 %. Автомобили с ДВС дали около 10 %, то есть той же порядковой величины.

Hareuveny и соавторы [5] в контролируемых условиях сопоставили десять моделей. Дизельные автомобили показали приблизительно 0,02 мкТл, бензиновые 0,04–0,05 мкТл, гибриды 0,06–0,09 мкТл. Распределение по местам различается принципиально: у автомобилей с ДВС поле выше на передних сиденьях, у гибридов — на задних, причём в заднем правом положении от 16 до 69 % отсчётов превышали 0,2 мкТл. Поле росло со скоростью движения. Авторы связывают основной вклад не с намагниченностью шин, а с токами, замыкающимися через металлический кузов; отметим, что использованные приборы отсекали частоты ниже 30 Гц, поэтому шинная компонента в их данных занижена.

Gryz, Karpowicz и Zradziński [6] разложили обстановку в электромобиле на три диапазона. Статическое поле в салоне не превышало приблизительно 0,10 мТл, вблизи установок постоянного тока доходило до 0,2 мТл, что пренебрежимо мало относительно предела 400 мТл для населения. Крайне низкочастотная составляющая измерялась медианными

значениями порядка единиц микротесла, вблизи электрооборудования до 30 мкТл, вблизи зарядных станций до 20 мкТл на расстоянии 10 см; преобладали частоты 50–300 Гц.

Радиочастотная составляющая, до единиц вольт на метр, формировалась преимущественно внешними источниками и абонентскими устройствами пассажиров. Каждая составляющая по отдельности укладывалась в пределы. Вопрос о длительной экспозиции профессиональных водителей авторы оставили открытым.

Недавнее пилотное исследование Shalamanova и соавторов [7] интересно не столько полученными уровнями, укладывающимися в руководства ICNIRP, сколько методической частью: авторы разрабатывали протокол измерений применительно к замкнутому объёму салона, отмечая отсутствие национальных процедур такого рода.

2. Результаты и обсуждение

Сведём наблюдения. Уровни внутри салона малы относительно референсных; наибольшие значения устойчиво приходятся на зону ног и на область над силовой проводкой; спектр содержит как зависящие от скорости, так и не зависящие от скорости компоненты; поле растёт с нагрузкой привода.

Ни одна из перечисленных кампаний, однако, не включала маршрут с многократной сменой знака потока мощности. Аддитивный частотный критерий ICNIRP во всех обследованных ТС даёт значение ниже единицы, но он вычислен для режимов, где переходные процессы редки.

В обзорной литературе закрепилась формула «нормативную основу безопасности электромобиля составляют ISO 26262, IEC 61851 и ISO 6469». При сверке с первоисточниками она оказывается неполной, и пробелы в ней закономерны.

ISO 26262:2018 (вторая редакция из 12 частей; первая редакция 2011 г. включала 10 частей, третья находится в разработке) регламентирует функциональную безопасность электрических и электронных систем серийных дорожных транспортных средств. В части 1 прямо сказано, что документ не рассматривает опасности, связанные с поражением электрическим током, пожаром, дымом, теплом, излучением, токсичностью, воспламеняемостью, реакционной способностью, коррозией и высвобождением энергии, за исключением случаев, когда они непосредственно вызваны неправильным поведением систем, связанных с безопасностью.[1] Значит, за штатное поведение системы управления накопителем (BMS, battery management system) стандарт отвечает, а излучение силового тракта в его область не входит.

Серия ISO 6469 охватывает электробезопасность и накопитель. Часть 1 (2019) посвящена перезаряжаемой системе накопления энергии (RESS, rechargeable energy storage system), изменение Amd 1:2022 добавило раздел «Управление безопасностью теплового распространения».[2] Часть 2 (2022) касается эксплуатационной безопасности ТС.[3] Часть 3 (2021) нормирует электробезопасность: классы напряжения B1 ($60 < U \le 75$ В постоянного тока; $30 < U \le 50$ В переменного) и B2 ($75 < U \le 1500$ В постоянного; $50 < U \le 1000$ В переменного), сопротивление

[1] ISO 26262-1:2018. Road vehicles. Functional safety. Part 1: Vocabulary. — 2nd ed. — Geneva: ISO, 2018. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/68383.html.

[2] ISO 6469-1:2019. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS). — Geneva: ISO, 2019; Amendment 1:2022. Safety management of thermal propagation. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/68665.html.

[3] ISO 6469-2:2022. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 2: Vehicle operational safety. — Geneva: ISO, 2022. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/77317.html.

изоляции и защиту от поражения током.[4] Часть 4 (2015) описывает послеаварийную электробезопасность[5] и сейчас проходит пересмотр.

Серия IEC 61851 относится к зарядке. Часть 1 (2017) устанавливает общие требования, режимы зарядки и цепь управления Control Pilot.[6] Части 21-1 (2017) и 21-2 (2018) задают требования ЭМС к бортовому зарядному устройству и к внебортовым зарядным системам соответственно.[7]

Четвёртого контура в приведённой формуле нет вовсе. Это электромагнитная совместимость транспортного средства (Правила ООН № 10[8], стандарты серии CISPR, в том числе CISPR 25[9]) и отдельно от неё экспозиция человека полями: руководства ICNIRP 2010 для полосы 1 Гц — 100 кГц [8] и ICNIRP 2020 для 100 кГц — 300 ГГц [9]. Разграничение сведено в таблицу 1.

Первый и главный разрыв состоит в том, что за экспозицию человека внутри транспортного средства не отвечает ни один контур. Правила ООН № 10 нормируют помехоэмиссию и помехоустойчивость, то есть защищают технику от техники. Руководства ICNIRP устанавливают пределы воздействия на человека, но процедурой типового одобрения или испытаний АТС не являются, и между этими двумя документами остаётся методический пробел, который каждый изготовитель закрывает по-своему.

В русскоязычных публикациях и сетевых источниках по электромагнитной безопасности электромобилей встречается связка «поля тягового привода имеют частоту 60–420 Гц; норматив ICNIRP: удельный коэффициент поглощения (SAR, specific absorption rate) не более 0,08 Вт/кг для населения». Она внутренне противоречива.

SAR относится к дозиметрии радиочастотного диапазона, где определяющий эффект связан с нагревом тканей; руководство ICNIRP 2020 [8] применяет его в полосе 100 кГц — 300 ГГц. Для диапазона 1 Гц — 100 кГц действует отдельное руководство ICNIRP 2010 [9]. Базовым ограничением в нём служит индуцированное в теле электрическое поле Ei (В/м), потому что на этих частотах значимый эффект связан с возбуждением нервных клеток. Референсный уровень магнитной индукции для населения в полосе 25–400 Гц, включая 50/60 Гц, равен 200 мкТл, выше 400 Гц он убывает обратно пропорционально частоте ($8 \cdot 10^{-2}/f$ Тл).

---

[4] ISO 6469-3:2021. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 3: Electrical safety. — Geneva: ISO, 2021. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/72439.html.

[5] ISO 6469-4:2015. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 4: Post crash electrical safety. — Geneva: ISO, 2015. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/60584.html.

[6] IEC 61851-1:2017. Electric vehicle conductive charging system. Part 1: General requirements. — 3rd ed. — Geneva: IEC, 2017. — URL: https://webstore.iec.ch/publication/33644.

[7] IEC 61851-21-1:2017. Electric vehicle conductive charging system. Part 21-1: Electric vehicle on-board charger EMC requirements for conductive connection to AC/DC supply. — Geneva: IEC, 2017. — [Электронный ресурс]. URL: https://webstore.iec.ch/publication/32045.

IEC 61851-21-2:2018. Electric vehicle conductive charging system. Part 21-2: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply. EMC requirements for off-board electric vehicle charging systems. — Geneva: IEC, 2018. — [Электронный ресурс]. URL: https://webstore.iec.ch/publication/32046.

[8] UN Regulation No. 10: EMC Provisions — [Электронный ресурс]. URL: https://www.scribd.com/document/546923041/E-ECE-324-Add-9-Rev-6.

[9] CISPR 25:2021 Vehicles, boats and internal combustion engines — Radio disturbance characteristics — Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. — [Электронный ресурс]. URL: https://webstore.iec.ch/en/publication/64645.

Диапазон 60–420 Гц целиком лежит в области действия ICNIRP 2010. Сравнивать измеренные в салоне десятые доли микротеслы с «нормативом 0,08 Вт/кг» физически бессмысленно: у этих величин разная размерность, и взяты они из разных документов. Встречаются и ссылки на руководство ICNIRP 1998 г., хотя его низкочастотную часть заменила редакция 2010 г. В этой части ссылка на редакцию 1998 г. указывает на недействующий документ.

Таблица 1

Разграничение нормативных контуров безопасности электрифицированного АТС

Контур	Основные документы	Что нормируется	Чего не покрывает
Функциональная безопасность электрических и электронных систем	ISO 26262:2018 (все части)[10]	Отказы и неправильное поведение систем; уровни полноты безопасности ASIL (automotive safety integrity level) от A до D	Пожар, поражение током, ЭМС, экспозицию вне связи с отказом
Электробезопасность и накопитель	ISO 6469-1:2019 + Amd 1:2022[11]; 2:2022[12]; 3:2021[13]; 4:2015[14]	Классы напряжения, сопротивление изоляции, защита от прямого и косвенного контакта, тепловое распространение, послеаварийное состояние	Совместимость с внешней средой по излучению; экспозицию человека полями
Зарядка	IEC 61851-1:2017[15]; 21-1:2017[16]; 21-2:2018[17]	Режимы зарядки, цепь управления, защиты, ЭМС зарядного тракта	Режимы движения; экспозицию в салоне при движении
ЭМС и экспозиция	Правила ООН № 10[18]; CISPR 25[19]; ICNIRP 2010 [8]; ICNIRP 2020 [9]	Излучаемые и кондуктивные помехи; референсные уровни воздействия на человека	Функциональные отказы; режим движения как переменную

Составлено авторами

Ошибочная нормативная привязка обесценивает вывод, даже если сам вывод верен. Измеренные уровни действительно многократно ниже пределов, но показать это можно только через референсный уровень (200 мкТл до 400 Гц, около 190 мкТл при 420 Гц) либо через расчёт Ei. SAR для этого не годится. Для профессионального воздействия ICNIRP 2010 устанавливает в полосе 25–300 Гц референсный уровень магнитной индукции 1 мТл.

В литературе высоковольтную блокировку (HVIL, high-voltage interlock loop) описывают как «требование стандарта». Строго говоря, это схемотехническое решение: последовательная низковольтная петля через разъёмы и крышки высоковольтных компонентов. Когда петля размыкается, система автоматически обесточивает высоковольтную шину. Нормативным

[10] ISO 26262-1:2018 — Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary.

[11] ISO 6469-1:2019. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS).

[12] ISO 6469-2:2022. Electrically propelled road vehicles. Safety specifications. Part 2: Vehicle operational safety // ISO.

[13] ISO/CD 6469-3 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications Part 3: Electrical safety // ISO.

[14] ISO/CD 6469-4 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications Part 4: Post crash electrical safety // ISO.

[15] IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system — Part 1: General requirements.

[16] IEC 61851-21-1:2017 Electric vehicle conductive charging system — Part 21-1 Electric vehicle on-board charger EMC requirements for conductive connection to AC/DC supply.

[17] IEC 61851-21-2:2018 Electric vehicle conductive charging system — Part 21-2: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply — EMC requirements for off board electric vehicle charging systems.

[18] UN Regulation No. 10: EMC Provisions.

[19] CISPR 25:2021 Vehicles, boats and internal combustion engines — Radio disturbance characteristics — Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers.

основанием служат требования ISO 6469-3 к защите от прямого контакта и к обесточиванию при доступе к токоведущим частям.[20] Сама аббревиатура HVIL, судя по доступной автору ознакомительной выдержке из ISO 6469-3:2021, в тексте стандарта не употребляется; перед публикацией этот вывод следует проверить по официальному экземпляру стандарта.

Для проектирования и экспертизы различие имеет практический смысл. Поскольку HVIL относится к схемотехническим решениям, допустимы и альтернативные реализации. При расследовании происшествия выяснять нужно, обеспечено ли обесточивание в нормированное время; наличие HVIL само по себе этого не доказывает.

Процедура анализа подчинена одному ограничению: каждая цепочка рассуждения замыкается на показатель безопасности, вычислимый по доступным данным. Киловатт-часы, коэффициент рекуперации и углеродный след допустимы как промежуточные величины, результатом они не считаются. Ограничение введено сознательно, поскольку в электромобильной тематике рассуждение легко смещается от безопасности к энергетике: энергетические величины проще измерить.

Таблица 2

Матрица системного анализа электромагнитных факторов горной эксплуатации

Фактор горной эксплуатации	Физический механизм	Контур регулирования	Показатель
Частая смена режимов «тяга — рекуперация» на переменном профиле	Знакопеременный ток через инвертор и ячейки; переключения силовых ключей: биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и полевых транзисторов (MOSFET)	ЭМС (Правила ООН № 10[21], CISPR 25[22]); экспозиция (ICNIRP 2010 [8])	Плотность знакопеременных переходов ν_{EM}; интегральная скорость Λ; магнитная индукция в зоне ног, мкТл
Работа инвертора вблизи предельной мощности на затяжном подъёме	Максимум токов и тепловыделения силовой электроники	ISO 26262[23] (деградация функции); ISO 6469-1[24]	Время до срабатывания токового и теплового ограничения; вероятность отказа функции тяги
Обслуживание и ремонт высоковольтной системы в удалённых автотранспортных предприятиях	Доступ к токоведущим частям класса напряжения B2	ISO 6469-3[25] (защита от прямого контакта, обесточивание)	Время обесточивания; сопротивление изоляции, Ом/В

Составлено авторами

Формально: пусть $F = f_1, \ldots, f_n$ — множество факторов горной эксплуатации, M — множество физических механизмов, N — множество нормативных контуров, S — множество показателей безопасности. Матрица системного анализа есть отображение

$$\Phi: F \to M \to N \times S, \quad (1)$$

причём требование замкнутости состоит в том, что для каждого f_i образ в S непуст. Фактор, не отображающийся ни в один показатель безопасности, из рассмотрения исключается, даже если энергетически он интересен. Такое построение согласуется с общей логикой структурирования

[20] ISO/CD 6469-3 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications Part 3: Electrical safety // ISO.

[21] UN Regulation No. 10: EMC Provisions.

[22] CISPR 25:2021 Vehicles, boats and internal combustion engines — Radio disturbance characteristics — Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers.

[23] ISO 26262-1:2018 — Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary.

[24] ISO 6469-1:2019. Electrically propelled road vehicles — Safety specifications Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS) // ISO.

[25] ISO/CD 6469-3 Electrically propelled road vehicles — Safety specifications Part 3: Electrical safety // ISO.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

оценки риска, принятой в IEC 31010[26] и ISO 31000[27]: сначала идентификация факторов, затем связывание их с механизмами и критериями, и только потом количественная оценка.

Два первых фактора порождает режим движения, третий относится к организации технического обслуживания. Конструкция транспортного средства не задаёт ни одного из них. Отсюда следует вывод, существенный для дальнейшего.

Всем четырём нормативным контурам недостаёт одной переменной, и это режим движения; определяется он однозначно маршрутом и алгоритмом управления приводом. Значит, задача сводится к обработке маршрутных данных.

Расчётная часть опирается на модель продольной динамики электромобиля с круиз-контролем, разработанную и верифицированную ранее, с параметрами, типичными для современного электромобиля D-сегмента [10], а также на высотный профиль реального горного маршрута.

Результаты измерений магнитных полей приводятся по первичным публикациям, каждый раз с указанием условий измерения.

Матрица «фактор — механизм — контур — показатель» *(табл. 2).*

Сглаженная модель переключения режимов

Здесь пригодится аппарат, созданный для другой задачи. Условное переключение режимов «тяга — рекуперация», традиционно записываемое оператором if-then-else, заменено гладкой аналитической аппроксимацией на основе гиперболического тангенса. Введём функцию режима

$$\sigma(P_{req}) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \tanh\left(\frac{P_{req}}{\varepsilon}\right)\right], \tag{2}$$

где:

P_{req} — требуемая механическая мощность на колёсах;

$\varepsilon > 0$ — ширина зоны сглаживания, физически отвечающая сглаживанию, вносимому алгоритмом управления приводом. Мощность на клеммах накопителя:

$$P_{bat}(P_{req}) = \sigma(P_{req}) \cdot \frac{P_{req}}{\eta_{tr} \cdot \eta_m} + [1 - \sigma(P_{req})] \cdot P_{req} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{rec}, \tag{3}$$

где:

$\eta_{tr}, \eta_m, \eta_{rec}$ — коэффициенты полезного действия трансмиссии, двигателя и системы рекуперации соответственно. Обозначив a = $1/(\eta_{tr} \cdot \eta_m)$ и $b = \eta_{tr} \cdot \eta_{rec}$, получаем производную по требуемой мощности:

$$\frac{dP_{bat}}{dP_{req}} = \sigma \cdot a + (1 - \sigma) \cdot b + \sigma'(P_{req}) \cdot P_{req} \cdot (a - b), \tag{4}$$

$$\sigma'(P_{req}) = (1/2\varepsilon) \cdot sech^2(P_{req}/\varepsilon). \tag{5}$$

[26] IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques // ISO. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/72140.html.

[27] ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines // ISO. — [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/65694.html.

Свойства производной и роль ширины сглаживания

Удобно перейти к безразмерной переменной $x = P_{req}/\varepsilon$. Так как $\sigma'(P_{req}) \cdot P_{req} = (x/2) \cdot sech^2 x$, выражение (4) принимает вид

$$\frac{dP_{bat}}{dP_{req}} = b + (a-b) \cdot h(x),\ h(x) = ½ \cdot (1 + tanhx) + (x/2) \cdot sech^2 x. \quad (6)$$

Множитель $1/(2\varepsilon)$ из (5) в третьем слагаемом (4) полностью компенсируется множителем P_{req}. В точке смены знака ($x = 0$) это слагаемое равно нулю. По модулю оно не превышает приблизительно $0{,}224 \cdot (a-b)$ и достигает этого значения при $|x| \approx 0{,}77$, каково бы ни было ε. Функция $h(x)$ переходит от 0 при $x \to -\infty$ к 1 при $x \to +\infty$ немонотонно: её экстремумы лежат там, где $x \cdot tanhx = 1 (|x| \approx 1{,}20)$, и равны приблизительно −0,10 и 1,10. Поэтому производная dP_{bat}/dP_{req} заключена между $b - 0{,}1 \cdot (a-b)$ и $a + 0{,}1 \cdot (a-b)$ и от ширины зоны сглаживания не зависит. Выбросы на 10 % разности $a - b$ возникают из-за самой аппроксимации. От ε зависит только ширина полосы мощностей, порядка $\pm\varepsilon$, в которой происходит переход.

Зависимость от ε проявляется во второй производной:

$$\frac{d^2 P_{bat}}{dP_{req}^2} = \frac{a-b}{\varepsilon^2} \cdot \operatorname{sech}^2 x \cdot (1 - x \cdot \tanh x), \quad (7)$$

Её максимум $(a-b)/\varepsilon$ приходится на точку смены знака мощности и обратно пропорционален ширине зоны сглаживания. При $\varepsilon \to 0$ кривая $P_{bat}(P_{req})$ превращается в ломаную с изломом в нуле, а вторая производная стремится к δ-функции с весом $a - b$.

Отсюда скорость изменения тягового тока:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{U_{bat}} \cdot \frac{dP_{bat}}{dP_{req}} \cdot \frac{dP_{req}}{dt} - \frac{P_{bat}}{U_{bat}^2} \cdot \frac{dU_{bat}}{dt}. \quad (8)$$

Вторым слагаемым при оценке переходных процессов можно пренебречь: напряжение накопителя меняется медленно по сравнению с мощностью. Пусть в момент t_k требуемая мощность проходит через нуль со скоростью $G_k = |dP_{req}/dt|$, а само прохождение близко к линейному. Тогда dI/dt меняется от $b \cdot G_k/U_{bat}$ до $a \cdot G_k/Ubat$ (или в обратном направлении) за характерное время $\tau\varepsilon, k$, и из (7) и (8) следует

$$\tau_{\varepsilon,k} = \frac{\varepsilon}{G_k}, \quad \max\left|\frac{d^2 I}{dt^2}\right| \approx \frac{(a-b) \cdot G_k^2}{\varepsilon \cdot U_{bat}}. \quad (9)$$

Скачок $\frac{dI}{dt}$, равный $(a-b) \cdot G_k/Ubat$, от алгоритма не зависит: его задают рельеф (через G_k) и КПД трактов. Алгоритм определяет длительность перехода, и для спектра это существенно. В момент перехода наклон тока ломается, поэтому спектральная плотность тока убывает примерно как $1/\omega^2$ до частот порядка $1/\tau_{\varepsilon,k}$. Выше она спадает экспоненциально, поскольку сглаживание на основе гиперболического тангенса аналитично. Если зону сглаживания сузить вдвое, полоса частот переходного процесса расширится вдвое, а размах тока останется прежним.

Попадает ли эта полоса в диапазон, существенный для оценки экспозиции, зависит от конкретных G_k и ε; устанавливать это нужно экспериментально. Ниже 25 Гц референсные уровни ICNIRP 2010 для населения повышаются с уменьшением частоты, так что медленные переходы оцениваются по менее жёстким уровням.

Два маршрутных показателя и их вычислимость по цифровой модели рельефа

Первый показатель, плотность знакопеременных переходов на 100 км:

$$\nu_{EM} = \frac{100}{L} \cdot \sum_{k=1}^{N} \mathbf{1}\,[\operatorname{sign} P_{bat}(s_k) \neq \operatorname{sign} P_{bat}(s_{k-1})], \tag{10}$$

где:

L — длина маршрута, км;

s_k — узлы дискретизации профиля. Второй показатель, интегральная скорость изменения тягового тока:

$$\Lambda = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left|\frac{dI}{dt}\right| dt, \quad [\text{A/c}]. \tag{11}$$

Величина ν_{EM} характеризует рельеф: сколько раз маршрут заставляет привод сменить знак. Показатель Λ описывает размах токовых переходов. Если зависимость $P_{bat}(P_{req})$ монотонна (по (6) это выполняется при $b > a/11$, то есть при любом практически значимом КПД рекуперации), Λ равен полной вариации тягового тока, отнесённой ко времени движения. Его определяют последовательность экстремумов требуемой мощности и КПД трактов; от ε он почти не зависит, если эти экстремумы лежат вне полосы $\pm\varepsilon$. Влияние алгоритма управления в два показателя не входит. Его описывает распределение длительностей переходов $\tau_{\varepsilon,k}$ по (9), вычисляемое в тех же узлах s_k.

Существенно то что, обе величины вычисляются по высотному профилю, продольному уклону и заданной скоростной характеристике, то есть по цифровой модели рельефа и паспорту дороги, без единого натурного выезда. Входными данными служат общедоступные наборы, на выходе получается ранжирование маршрутов сети. Тем самым дорогостоящая измерительная кампания переносится с произвольно выбранного участка на участки с максимальными значениями ν_{EM} и Λ. Именно эта процедура, а не сам результат измерений, составляет вклад работы в системный анализ эксплуатационной безопасности.

Размах токовых переходов на горном маршруте задают рельеф и КПД трактов; их длительность и ширину спектра определяет настройка алгоритма привода. Такие программные решения выпадают из поля зрения и изготовителя, и надзорного органа, поскольку не попадают ни в один существующий контур регулирования (табл. 1).

Программа экспериментальной проверки

Гипотезу можно проверить прямым экспериментом с бортовой синхронной регистрацией: (а) магнитной индукции в трёх точках салона (зона ног водителя, зона головы, зона заднего сиденья), (б) тока и напряжения тяговой цепи, (в) координат и высотного профиля. По записям рассчитываются ν_{EM}, Λ и длительности переходов $\tau_{\varepsilon,k}$; измеренная ширина спектра переходов сопоставляется с оценкой (9); спектр поля разделяется на скоростезависимые и скоростенезависимые компоненты по методике; оценивается аддитивный частотный критерий ICNIRP 2010. Точки размещения датчиков выбраны по результатам, где максимумы устойчиво приходились на зону ног и на область вблизи накопителя.

Эксперимент удобно совместить с натурным выездом по программе исследования тормозных режимов: нужны то же оснащённое транспортное средство и тот же маршрут. При ограниченном парке испытательного оборудования такое совмещение становится условием реализуемости обеих программ.

Соотнесём полученное с накопленным материалом. Измеренные в равнинных циклах уровни составляют от единиц до двадцати процентов референсных, и запас выглядит достаточным. Однако сам факт наличия запаса получен для режимов с редкими переходами, тогда как референсные уровни ICNIRP 2010 заданы для синусоидальных полей; для несинусоидальных руководство предписывает спектральное суммирование либо метод взвешенного пика. При высокой плотности переходных процессов на первый план выходит спектральное содержание поля, а оно, как показано в (10) и (11), зависит от формы переходов тягового тока и, следовательно, от настройки алгоритма привода.

Транспортную сеть Республики Таджикистан отличают преобладание горных участков, протяжённые тоннели на основных коридорах и растущий парк электрифицированных АТС при развивающейся зарядной инфраструктуре [11]. При таком сочетании изложенная постановка имеет прямое прикладное значение. Из анализа вытекают два направления.

1. Устранить пробел в нормировании экспозиции: ввести в национальные требования к допуску электрифицированных АТС ссылку на действующее руководство ICNIRP 2010 для диапазона $1Гц - 100кГц$ (референсный уровень для населения $200\ мкТл$ в полосе $25 - 400\ Гц$), отказаться от ссылок на SAR применительно к полям тягового привода и от ссылок на редакцию ICNIRP 1998 г.

2. Ввести маршрутную оценку: дополнить методику паспортизации горных маршрутов расчётом плотности знакопеременных переходов ν_{EM} по высотному профилю. Величина вычисляется по цифровой модели рельефа без натурного эксперимента и может служить классификационным признаком маршрута при планировании измерительных кампаний и при выборе маршрутов для электрифицированных перевозок.

Результаты раздела 5 имеют аналитический характер и натурными измерениями на горном маршруте пока не подтверждены; программа такой проверки изложена выше. Численные значения a и b приняты по параметрам модели и для транспортного средства иного класса изменятся. Вывод о ненормативном статусе аббревиатуры HVIL сделан по ознакомительной выдержке ISO 6469-3:2021 и требует сверки по официальному экземпляру. Наконец, привлечённые измерительные кампании выполнены на европейских, японских и израильских выборках транспортных средств; перенос их выводов на парк, эксплуатируемый в Республике Таджикистан, требует отдельного обоснования.

Заключение

1. Экспозицию человека внутри транспортного средства не нормирует ни один из четырёх рассмотренных нормативных контуров. Между Правилами ООН № 10, нормирующими помехоэмиссию и помехоустойчивость, и руководствами ICNIRP, устанавливающими пределы воздействия, остаётся методический пробел.

2. Величина SAR неприменима к диапазону 60–420 Гц: там действует руководство ICNIRP 2010 с референсным уровнем для населения 200 мкТл до 400 Гц. Ссылка на редакцию ICNIRP 1998 г. в низкочастотной части указывает на недействующий документ. Высоковольтная блокировка HVIL реализует требования ISO 6469-3 инженерными средствами и самостоятельным нормативным понятием не является.

3. Накопленные измерительные кампании дают уровни от единиц до двадцати процентов референсных, причём максимумы устойчиво локализованы в зоне ног и вблизи накопителя. Ни одна из них не охватывает маршрут с многократной сменой знака потока мощности.

4. Режим движения не выступает переменной ни в одном из рассмотренных документов; этим определяется содержание нерешённой задачи.

5. Предложена матрица системного анализа «фактор — механизм — контур регулирования — показатель безопасности» с обязательным замыканием каждого фактора на показатель.

6. Из сглаженной модели переключения режимов аналитически получены два маршрутных показателя электромагнитной нагруженности, ν_{EM} и Λ, вычислимые по цифровой модели рельефа до натурного эксперимента. Ширина зоны сглаживания не влияет ни на размах скорости изменения тока, ни на Λ; она определяет длительность перехода через нуль мощности и ширину спектра переходного процесса, и этим спектральным составом можно управлять настройкой алгоритма привода.

7. Сформулированы программа натурной проверки и два направления совершенствования национальных требований Республики Таджикистан.

Безопасность транспортного средства закладывается на заводе, а эксплуатация её только расходует. Допущение удобное, но для горного маршрута неполное. У электромобиля часть запаса устойчивости определяется тем, насколько плавно алгоритм управления переводит привод через нуль мощности, то есть строкой программного кода, а не узлом, который можно предъявить на стенде. Действующие процедуры омологации описывают агрегат и его измеряемые характеристики; поведение управляющей логики при знакопеременной нагрузке остаётся на периферии проверок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Magnetic Field Measurement of Various Types of Vehicles, Including Electric Vehicles / H. Fukui, N. Minami, M. Tanezaki [et al.] // Electronics. — 2025. — Vol. 14, No. 15. — P. 2936. — DOI 10.3390/electronics14152936. — EDN JELYZE.
2. Schmid, G. Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität = Определение уровней экспозиции электромагнитными полями в условиях электротранспорта / G. Schmid, R. Hirtl, P. Schneeweiß [и др.]; Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). — 2025. — URL: https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2025031250843 (дата обращения не указана). — URN: urn:nbn:de:0221-2025031250843.
3. Abdurahmonbek A.M. A NUMERICALLY STABLE CRUISE CONTROL MODEL FOR AN ELECTRIC VEHICLE ON A MOUNTAIN ROUTE BASED ON A SMOOTH APPROXIMATION OF TRACTION–REGENERATION MODE SWITCHING // Фуруги илм. Серия «Естественные и математические науки». — 2026. — Т. 10. — № 2. — С. 145–157. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/chislenno-ustoychivaya-model-kruiz-kontrolya-elektromobilya-na-gornom-marshrute-na-osnove-gladkoy-approksimatsii-pereklyucheniya?ysclid=mvtk7db01z328725037.
4. Vassilev A. et al. Magnetic field exposure assessment in electric vehicles // IEEE transactions on electromagnetic compatibility. — 2014. — Т. 57. — № 1. — С. 35–43. — DOI:10.1109/TEMC.2014.2359687 — URL: https://www.researchgate.net/publication/273392210_Magnetic_Field_Exposure_Assessment_in_Electric_Vehicles.
5. Hareuveny R. et al. Characterization of extremely low frequency magnetic fields from diesel, gasoline and hybrid cars under controlled conditions // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2015. — Т. 12. — № 2. — С. 1651–1666. — DOI: 10.3390/ijerph12021651.
6. Gryz, K. Complex Electromagnetic Issues Associated with the Use of Electric Vehicles in Urban Transportation / K. Gryz, J. Karpowicz, P. Zradziński // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 5. — P. 1719. — DOI 10.3390/s22051719. — EDN QVZJST.

7. Correction: Pilot study on electromagnetic fields generated by battery electric vehicles / Ts. Shalamanova, H. Petkova, M. Israel [et al.] // The European Physical Journal. Special Topics. — 2026. — DOI 10.1140/epjs/s11734-026-02230-0. — EDN WBDEFF.
8. Ziegelberger G. et al. Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) // Health physics. — 2020. — Т. 118. — № 5. — С. 483–524. — DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
9. Vecchia P. et al. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) // Health Physics. — 2010. — Т. 99. — № 6. — С. 818–836. — DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f8a8a8.
10. Ганова, А. С. Сравнительный анализ характеристик тяговых аккумуляторов для современных электромобилей / А. С. Ганова, Р. Н. Хмелев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 10. — С. 318–322. — EDN BSCHJI.
11. Абдулло, М. А. Технико-экономический анализ применения мобильных зарядных станций для электромобилей в условиях Республики Таджикистан / М. А. Абдулло // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2024. — № 5. — С. 51–63. — DOI 10.25198/2077-7175-2024-5-51. — EDN QQPHCZ.
12. Ильин, К. А. Эффективность различных типов зарядных станций: сравнительный анализ / К. А. Ильин, Б. И. Сафиуллин // Тинчуринские чтения — 2025 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей Международной молодежной научной конференции, Казань, 23–25 апреля 2025 года. — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. — С. 562–564. — EDN TBVREU.
13. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — Т. 23, № 5. — С. 100–114. — DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. — EDN YIGCHH.
14. Федотовский, О. Е. Разработка концепции экологичной зарядной станции для электромобилей / О. Е. Федотовский, С. В. Шелмаков // European Journal of Natural History. — 2022. — № 1. — С. 100–108. — EDN HZDJHJ.
15. Строченков, Г. О. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / Г. О. Строченков, Р. Т. Насибуллин // XI Международная научно-практическая заочная конференция "ЭТАП-2024", посвященная 220-летию КФУ, Набережные Челны, 14 ноября 2024 года. Том 1. — Набережные Челны: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2024. — С. 884–890. — EDN HHXRFR.

Sa'dullozoda Shahriyor Sadullo
University of Innovation and Digital Technologies of Tajikistan, Kulyab, Republic of Tajikistan
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: srsaidaliev@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5801-9140

Abdullo Mamadamon Abdurahmonbek
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6253-5946

Odinazoda Haydar
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: haydar.odinazoda@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8519-3408

Electromagnetic exposure of an electric vehicle on a mountain route: a systems analysis of regulatory gaps and calculation of route-specific metrics using a digital elevation model

Abstract. Magnetic fields inside electric vehicles have previously been measured primarily during driving cycles on flat terrain. Based on this data, electric vehicles do not stand out among other types of vehicles: field maxima are localized in the footwell area, the 200 μT reference level for the general public is not reached, and the exposure level remains well below the limit (accounting for only a small fraction of it). Mountain routes have not been represented in published measurement campaigns, even though the direction of power flow changes an order of magnitude more frequently on such terrain. The focus of this study is not the exposure itself, but the informational procedure for its preliminary assessment. The regulatory arguments found in the literature review were cross-checked against primary sources. Three discrepancies were identified, the first of which is fundamental: human exposure inside the vehicle is not covered by any of the four relevant regulatory frameworks. The Specific Absorption Rate (SAR) metric is inapplicable to traction drive fields in the 60–420 Hz range; below 100 kHz, the basic restriction is based on the electric field induced within the body. The High Voltage Interlock Loop (HVIL) system implements ISO 6469-3 requirements through engineering solutions. Based on a smoothed model of «traction-to-regeneration» mode switching, two route-specific electromagnetic exposure metrics were analytically derived; these can be calculated using a digital elevation model prior to conducting field tests. The width of the smoothing zone does not affect the values of these metrics; instead, it determines the duration of the power zero-crossing and the spectral width of the transient process. A field verification program and two recommendations for national standards in the Republic of Tajikistan are proposed.

Keywords: systems analysis; electromagnetic exposure; electric vehicle; digital elevation model; route-specific indicator; ICNIRP 2010; regenerative braking

Дата публикации: 29.10.2026