

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

В статье приведены преимущества существующих видов наземного электрического транспорта. Выявлены условия для обеспечения надежного, экономичного и экологичного токосъема электрического транспорта. Изложены результаты экспериментальных исследований негативных факторов, возникающих при токосъеме в реальных условиях эксплуатации эстакадного электрического транспорта. Рассмотрены методы, повышающие экологическую безопасность системы токосъема наземного электрического транспорта. Приведено описание приоритетных конструкций токоприемников, обладающих улучшенными экологическими характеристиками.

Ключевые слова: электрический транспорт, система токосъема, шинопровод, токоприемник, экологическая безопасность, негативные факторы при токосъеме, качество токосъема, защитный экран.

Введение. К городскому электрическому транспорту относятся следующие виды наземного транспорта: трамвай, троллейбус и монорельс (эстакадный транспорт). Однако перевозка пассажиров трамваями и троллейбусами не позволяет в полной мере обеспечить высокую скорость передвижения и объемы перевозок. Эстакадный электрический транспорт позволяет перевозить большое количество пассажиров со скоростью до 450 км/ч, он распространен во всем мире, так как не требует обособленной территории, может располагаться на опорах на расстоянии 4–6 м над землей, позволяя организовать дополнительный уровень транспортной развязки, тем самым разгрузив дороги, уменьшив пробки и снизив загрязнение окружающей среды.

Сроки строительства и стоимость сооружения эстакадной трассы значительно ниже по сравнению с метро. Влияние на экологию со стороны кузова эстакадного транспорта минимально, так как отсутствуют продукты сгорания топлива и шум в системе колесо-рельс. Основное воздействие на окружающую среду и население оказывает система токосъема, расположенная в экипажном пространстве, которая состоит из токоприемников электрического транспорта, взаимодействующих с шинопроводом.

Негативные факторы при токосъеме. При эксплуатации электрического транспорта возникают различные факторы, негативно воздействующие на окружающую среду: акустический шум, электромагнитные поля и излучения, ультрафиолетовые излучения при искрении, загрязнение продуктами износа устройств токосъема воздуха и почвы вдоль проходящей трассы.

Экологичность устройств токосъема наряду с надежностью и экономичностью является одним из составных элементов качества токосъема. Под надежностью токосъема понимается обеспечение передачи электроэнергии через скользящий контакт без отрывов и повреждений устройств токосъема, под экономичностью токосъема — надежная передача электроэнергии через скользящий контакт при минимальном износе контактирующих элементов [1].

Основой надежного, экономичного и экологичного токосъема является обеспечение надежного электромеханического контакта между контактными пластинами токоприемника и шинопровода. Нарушение контакта приводит к различным нежелательным явлениям. Кратковременные отрывы являются причиной усиленного электрического износа контактных пластин, появления помех радиочастотного диапазона, электромагнитных и ультрафиолетовых излучений при искрении в контакте, увеличении шума от искрения. Нарушения электрического контакта длительностью более 0,1 с, которые носят периодический характер, не только усиливают износ, но и могут быть причиной повреждения шинопровода. Длительность нарушений контакта в большинстве случаев может быть уменьшена повышением контактного нажатия, однако следствием этого будет усиление механического износа контактирующих элементов. Соответственно, чрезмерно большие значения контактного нажатия являются недопустимыми и могут привести к разрушению токоприемника. Необходимый диапазон изменения силы нажатия в контакте составляет от 30 до 80 Н, его определяют как из условий обеспечения минимального механического и элект-

трического износа шинпровода и токоёмных элементов токоприемника, так и из условий обеспечения безаварийности и экологичности токоёма.

Исследование вышеперечисленных негативных факторов — акустического шума, электромагнитных полей и излучений, УФ-излучений при искрении, продуктов износа устройств токоёма — проводится в целях повышения экологической безопасности системы токоёма электрического наземного транспорта и разработки мероприятий по защите природной среды [2].

В ОмГУПСе ведутся исследования по повышению экологической безопасности токоёма электрического транспорта путем снижения интенсивности воздействия негативных факторов на окружающую среду и человека. С этой целью на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа разработана и успешно реализована комплексная методика экспериментальных исследований, преследующих цель оценить параметры токоприемников электрического наземного транспорта при проведении измерений вдоль эстакадной трассы Московской монорельсовой дороги [1]. При проведении измерений используются измерительные приборы и датчики, внесенные в государственный реестр средств измерений РФ, соответствующие требованиям российских стандартов к методам инструментального контроля [3].

Акустический шум. Замеры шума вдоль трассы эстакадного транспорта проводилось шумомером SVAN-912, общая погрешность при измерении которым не превышает 0,7 дБ. Измерения проводились в соответствии с методиками и рекомендациями, изложенными в ГОСТ 23337–2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий» [4].

Нормы предельно допустимых уровней (ПДУ) шума для зон жилой застройки представлены в санитарных нормах СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки». Для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам, зданиям и учебным заведениям

эквивалентный уровень шума $L_{\text{экв}}$ не должен превышать 55 дБА с 7 до 23 ч, а максимальный уровень шума $L_{\text{макс}}$ не должен превышать 70 дБА [5].

Точки измерения шума были выбраны под эстакадой монорельсовой транспортной системы на расстояниях 3 и 5 м от скользящего контакта, в каждой точке были проведены восемь серий измерений уровней шума шумомером: эквивалентных уровней шума $L_{\text{экв}}$, дБА на заданном временном интервале, соответствующем времени прохождения состава вдоль точки измерений; максимальных уровней шума $L_{\text{макс}}$, дБА, то есть наибольших скорректированных уровней шума на заданном временном интервале, соответствующем времени прохождения состава вдоль точки измерений [6].

При выполнении экспериментальных исследований был измерен и учтен уровень фонового шума на трассе эстакадного транспорта, а также шум тяговых двигателей и вспомогательного оборудования подвижного состава, присутствующих в точках измерений. Устройства токоёма эстакадного транспорта являются основным передвижным источником высокочастотного шума, возникающего в процессе взаимодействия токоприемника с шинпроводом [7]. Характер шума, генерируемого при прохождении состава эстакадного транспорта, является прерывистым, то есть интервалы фонового шума от транспортных потоков сменяются интервалами повышенного уровня шума при прохождении состава вдоль точки, где установлен микрофон. В результате проведенных замеров получены результаты, приведенные в табл. 1 и 2.

При силе нажатия в контакте менее 35 Н зафиксирован рост числа отрывов токоприемника от шинпровода, сопровождающихся ударным шумом и шумом интенсивного дугообразования и искрения в воздушном зазоре. При силе нажатия свыше 45 Н зафиксировано появление характерного «визжащего» шума от трения в скользящем контакте. Из анализа полученных данных видно, что превышение допустимого эквивалентного уровня звука на расстоянии 3 м от источника шума составляет 7,6 дБА при нажатии 35 Н и 8,4 дБА при нажатии

Таблица 1

Результаты измерений эквивалентного уровня шума, генерируемого устройствами токоёма

Параметры	Уровни шума, дБА, на расстоянии от скользящего контакта до точки измерений		ПДУ эквивалентного шума $L_{\text{экв}}$, дБА
	3 м	5 м	
Сила нажатия 35 Н	62,64	59,53	55
Сила нажатия 45 Н	63,42	60,91	

Таблица 2

Результаты измерений максимального уровня шума, генерируемого устройствами токоёма

Параметры	Уровни шума, дБА, на расстоянии от скользящего контакта до точки измерений		ПДУ максимального шума $L_{\text{макс}}$, дБА
	3 м	5 м	
Сила нажатия 35 Н	73,23	71,74	70
Сила нажатия 45 Н	74,64	73,25	

Результаты измерений ЭМП, генерируемых в скользящем контакте

Параметры	Напряженность электрического поля, В/м, на расстоянии от скользящего контакта до точки измерений		Допустимый уровень ЭМП диапазона частот 30 МГц – 300 МГц
	3 м	5 м	
Сила нажатия 35 Н	2,24	1,41	ПДУ Е, В/м 3,0
Сила нажатия 45 Н	1,58	1,12	

Таблица 4

Результаты измерений ультрафиолетовых излучений, возникающих при токосъеме

Параметры	Плотность потока энергии, Вт/м ² , на расстоянии от скользящего контакта до точки измерений				Допустимые величины ультрафиолетового излучения	
	3 м		5 м		ПДУ для производства, ППЭ, Вт/м ²	ПДУ для населения, ППЭ, Вт/м ²
	УФ-А	УФ-В	УФ-А	УФ-В		
Сила нажатия 35 Н	0,053	0,047	0,026	0,022	10,00	0,01
Сила нажатия 45 Н	0,031	0,023	0,017	0,011		

45 Н. Уровень шума, генерируемого в зоне скользящего контакта, зависит от скорости движения состава, конфигурации криволинейных участков трассы, степени износа контактных элементов, силы нажатия в контакте, ударных взаимодействий токоприемников с шинопроводом, атмосферных воздействий (наличие влаги и пыли) и других факторов.

Электромагнитное поле. Появление электромагнитного поля (ЭМП) при токосъеме обусловлено различными причинами: фоновое электростатическое и постоянное магнитное поля формируются шинопроводами постоянного тока (600 В), а непостоянные высокочастотные ЭМП возникают при отрывах контактных элементов токоприемников от шинопровода и сопровождаются, как правило, дугообразованием и ультрафиолетовым излучением в зоне контакта. Кроме того, вдоль трассы эстакадного транспорта возникают непостоянные (изменяющиеся во времени и пространстве) электромагнитные поля от линейных асинхронных двигателей подвижного состава.

Измерение фоновых электромагнитных полей частотой 50 Гц, создаваемых ЛЭП, промышленными и бытовыми источниками вдоль трассы эстакадного транспорта, проводились следующими приборами: измерителем электрических полей ИЭП-05 с дипольной антенной и измерителем магнитных полей ИМП-05/1 с трехкоординатным сферическим датчиком (погрешность измерений которых составляет $\pm 20\%$). Измеренные значения фоновых электрических и магнитных полей частотой 50 Гц не превышают ПДУ для селитебных зон, равные 1 кВ/м и 10 мкТл соответственно [6].

Значение напряженности электростатического (постоянного) поля измерялось в интервалах между движениями составов эстакадного транспорта, для чего использовался универсальный измеритель напряженности электростатического поля СТ-01 (погрешность измерений которого составляет $\pm 15\%$). Измеренные значения напряженности постоянного

электрического поля во всех точках (на расстояниях от 3 до 5 м от скользящего контакта) не превышают ПДУ, равный 15 кВ/м [8].

Частотный спектр гармонических составляющих токов статора линейных асинхронных двигателей (аналогичных используемым на подвижном составе электрического транспорта), и генерируемых этими токами электромагнитных полей по данным работ [9], находится в диапазоне до 1 МГц, в то время как исследования в работе [1] показали, что электромагнитные излучения радиочастотного диапазона от системы токосъема эстакадного транспорта зафиксированы в диапазоне частот 30–300 МГц с максимумом на частоте 90 МГц.

Таким образом, частотные спектры электромагнитных полей линейных асинхронных двигателей и устройств токосъема электрического различны и не вносят дополнительных методических погрешностей в процесс измерений. Процедура измерений электромагнитных полей устройств токосъема, выбор точек измерений, обработка результатов производились в соответствии с указаниями [10].

Измерение электромагнитных полей радиочастотного диапазона (30–300 МГц) проводились измерителем ПЗ-41 с комплектом антенн-преобразователей. Результаты измерений электромагнитных полей, генерируемых в скользящем контакте, приведены в табл. 3.

Измеренные значения напряженности электромагнитного поля зависят от силы контактного нажатия, при этом во всех точках измерений они не превышают допустимый уровень электромагнитных излучений (ЭМИ), равный 3 В/м [6].

С увеличением расстояния от скользящего контакта до точки измерений напряженность электромагнитного поля снижается. Уровни ЭМП при токосъеме зависят также от коммутационных процессов, степени износа контактных элементов, погодных условий (появления обледенения, влаги), вызывающих интенсивное искрообразование, и других факторов.

Результаты измерения концентрации продуктов износа устройств токосъёма

Параметр	Концентрации загрязняющих веществ в воздухе, мкг/м ³					
	Меди (II) оксид	Меди (II) сульфат	Никеля оксид	Никеля сульфат	Двуокись кремния	Хром (VI)
Класс опасности	2	2	2	1	3	1
Величина ПДК среднесуточная	2	1	1	1	150	1,5
Сила нажатия 35 Н	1,6	1,9	0,017	0,020	0,011	0,014
Сила нажатия 45 Н	2,7	3,1	0,028	0,032	0,019	0,022

Ультрафиолетовое излучение при искрении. Нарушение плотности контакта между токоприемником и шинопроводом сопровождается искрением и ультрафиолетовым излучением, которое фиксируется датчиком радиометра «Аргус». Информация о количестве импульсов ультрафиолетовых излучений в режиме реального времени, характеризующая качество токосъёма, отображается устройством индикации числа импульсов. Измерение ультрафиолетового излучения при искрении в процессе токосъёма показало наличие в спектре волн не только УФ-А диапазона, но и УФ-В (табл. 4), что представляет собой опасность для окружающей среды в целом и населения [11].

Для условий профессионального воздействия (территория предприятия) уровни ультрафиолетового излучения, как УФ-А диапазона, так и УФ-В диапазона не превышают предельно допустимый уровень [12]. Для населения (непрофессиональное воздействие) ультрафиолетовое излучение УФ-А диапазона не превышает норму, но оказывает слепящее действие; ультрафиолетовое излучение УФ-В диапазона превышает предельно допустимое значение в несколько раз, что требует разработки мероприятий, направленных на снижение ультрафиолетового излучения при искрении, возникающего при токосъёме электрического транспорта.

Износ контактных элементов. Контроль концентрации продуктов износа устройств токосъёма в воздухе является актуальным вопросом, так как совершенствование устройств токосъёма неизбежно связано с появлением новых композитных материалов, в состав которых могут входить токсичные вещества. Необходимо оценить интенсивность, характер выноса продуктов износа из зоны скользящего контакта с последующим анализом их опасности для населения и природной среды. Из возможных сочетаний материалов контактных пар авторами исследованы продукты износа пары «Медь – БрНХ», характерной для эстакадного транспорта.

Превышение измеренных концентраций продуктов износа устройств токосъёма в воздухе над предельно допустимыми концентрациями (ПДК), согласно [13] зафиксировано для оксида меди (II) (в пересчете на медь) и для сульфата меди (II) (в пересчете на медь), при силе нажатия в контакте 35 Н превышение в 2,1–2,5 раза, а при силе нажатия в контакте 45 Н — в 3,3–4 раза (табл. 5).

Оксид меди (II) и сульфат меди (II) относятся к веществам 2-го класса опасности, то есть высоко опасным. Для никеля и никеля оксида (в пересчете на никель), хрома (VI), кремния (в пересчете на двуокись кремния, в составе неорганической

пыли) измеренные концентрации не превышают соответствующие ПДК при силе нажатия в контакте 35 Н и 45 Н. Все химические вещества, указанные в табл. 5, обладают однонаправленным резорбтивным действием на компоненты природной среды и организм человека, что усугубляет их отрицательное воздействие.

Анализ воздействия процесса токосъёма на окружающую среду показал наличие химического загрязнения воздуха, водных источников и почвы продуктами износа контактных элементов. Наиболее значимым фактором в общем химическом загрязнении среды обитания устройствами токосъёма эстакадного транспорта является повышенная концентрация в воздухе мелкодисперсных компонентов износа контактных элементов.

Повышение экологичности. Повышение экологической безопасности электрического транспорта может быть достигнуто снижением факторов негативного воздействия устройств токосъёма, для этого необходимо проектирование и эксплуатация оригинальных конструкций токосъёмных устройств, при которых обеспечивается более высокое качество токосъёма или разработка дополнительных устройств, ограничивающих негативное влияние при существующих токосъёмных устройствах. В соответствии с результатами исследований предложены приоритетные конструкции токоприемников, обладающие улучшенными экологическими характеристиками.

Для снижения негативного акустического воздействия необходимо обеспечить экранирование токоприемника звукопоглощающей отделкой внутренних поверхностей корпуса тележки эстакадного транспорта. Конструкция токоприемника, дополненная резиновыми звукопоглощающими элементами, расположенными на внешней заслонке и корпусе токоприемника, будет эффективно снижать акустические волны, возникающие при токосъёме, тем самым повышая качество токосъёма и снижая негативные экологические факторы [14]. Для снижения химического загрязнения окружающей среды продуктами износа контактирующих элементов токоприемника и шинопровода, необходимо на защитный экран, используемый для снижения шума, нанести вязкую смазку типа ЦИАТИМ, что позволит минимизировать их распространение в воздухе и почве вдоль трассы электрического эстакадного транспорта. К основным мерам, обеспечивающим снижение помех радиочастотного диапазона, интенсивности искрения при токосъёме и связанного с ним слепящего эффекта, относятся: установка тонких металлических пластин или

экранов, выполненных из металлической сетки, встроенных в конструкцию токоприемника, вблизи источника излучения, а также обеспечение необходимого уровня контактного нажатия [15].

Заключение. Исследования устройств токосъёма эстакадного транспорта показали, что акустический шум, электромагнитные излучения, ультрафиолетовые излучения и износ контактных элементов являются взаимосвязанными явлениями. Частота и интенсивность их проявления зависят от силы тока, скорости движения, силы нажатия в контакте, степени износа контактных элементов и шинопровода. Сила нажатия в контакте, сила тока, скорость движения изменяются в определенных пределах и регулируются в процессе эксплуатации. Для повышения экологической безопасности электрического транспорта и обеспечения высокого качества токосъёма необходимо снизить до предельно допустимых уровней факторы негативного воздействия устройств токосъёма на окружающую среду, проектировать и вводить в эксплуатацию модернизированные конструкции токоприемников, обладающие улучшенными экологическими характеристиками, контролировать и обеспечивать оптимальный уровень контактного нажатия.

Библиографический список

1. Сидоров О. А. Системы контактного токосъёма с жестким токопроводом: моногр. М.: Маршрут, 2006. 119 с. ISBN 5-89035-240-7.
2. Маркелова К. С. Учет экологических требований и стандартов при проектировании устройств токосъёма // Метрология, стандартизация и управление качеством: сб. тр. конф. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. С. 90–92. ISBN 978-5-8149-2013-3.
3. СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. Введ. 2017–01–01. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293753/4293753139.pdf> (дата обращения: 17.05.2019).
4. ГОСТ 23337–2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. Введ. 2015–07–01. М.: Стандартинформ, 2015. 17 с.
5. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Введ. 1996–10–31. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901703278> (дата обращения: 21.05.2019).
6. МСанПиН 001–96. Санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях (с изменениями от 21.12.1996 г.). URL: <https://legalacts.ru/doc/msanpin-001-96-sanitarnye-normy-dopustimyykh-urovnei-fizicheskikh/> (дата обращения: 03.06.2019).
7. Kholopov Y., Musatkina B., Denisova I. The comparative analysis of the noise characteristics of land rail transport and the efficiency of noise protection measures // *Akustika*. 2019. Vol. 32. P. 299–304.
8. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях (с изменениями на 27 декабря 2010 года). Введ. 2010–08–15. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902222351> (дата обращения: 03.06.2019).
9. Скляр А. В., Чижма С. Н. Спектральный метод оценки частоты пазовых гармоник асинхронного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2017. № 2. С. 21–26. DOI: 10.17213/0136-3360-2017-2-21-26.
10. ГОСТ Р 51317.6.3–2009 (МЭК 61000-6-3:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Нормы и методы испытаний. Введ. 2010–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.
11. Сидоров О. А., Маркелова К. С., Мусаткина Б. В. Методы экспериментального исследования искрения при токосъёме // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч.-техн. конф.* Омск: Изд-во ОмГУПС, 2019. С. 273–280.
12. ГОСТ 30804.6.4–2013 (IEC 61000-6-4:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.
13. ГН 2.1.6.3492–17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. Введ. 2018–01–18. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293740/4293740240.htm> (дата обращения: 04.06.2019).
14. Пат. 81920 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства // Сидоров О. А., Чертков И. Е., Дударева К. С., Мусаткина Б. В. № 2008145683/22; заявл. 19.11.08; опубл. 10.04.09. Бюл. № 10.
15. Пат. 88615 Российская Федерация, МПК В 60 L 5/00. Токоприемник транспортного средства // Сидоров О. А., Чертков И. Е., Маркелова К. С., Мусаткина Б. В. № 2009127022/22; заявл. 14.07.09; опубл. 20.11.09. Бюл. № 32.

МАРКЕЛОВА Ксения Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

SPIN-код: 8406-8918

Адрес для переписки: o-ksana83@mail.ru

СИДОРОВ Олег Алексеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Адрес для переписки: sidorovoa@omgups.ru

SPIN-код: 2364-5676

AuthorID (РИНЦ): 434966

ФИЛИПОВ Виктор Михайлович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

SPIN-код: 2697-0411

AuthorID (РИНЦ): 645623

AuthorID (SCOPUS): 56913171800

Адрес для переписки: fvm-omgups@mail.ru

Для цитирования

Маркелова К. С., Сидоров О. А., Филипов В. М. Повышение экологической безопасности системы токосъёма электрического наземного транспорта // *Омский научный вестник*. 2019. № 4 (166). С. 34–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-34-38.

Статья поступила в редакцию 01.07.2019 г.

© К. С. Маркелова, О. А. Сидоров, В. М. Филипов