

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

<https://doi.org/10.17816/transsyst681997>

Труды III конференции с международным участием «Проблемы безопасности и эффективности технических систем», посвященной 205-й годовщине начала научно-педагогической деятельности Бенуа Поля Эмиля Клапейрона в Институте Корпуса инженеров путей сообщения

© **В.В. Никитин, А.Н. Горский**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА

Развитие высокоскоростного пассажирского сообщения связано с ростом мощности систем тягового электроснабжения и тягового электропривода подвижного состава, при этом увеличивается напряженность электрических и магнитных полей и их влияние на пассажиров, обслуживающий персонал, прочее оборудование, системы автоматики и связи. По этой причине оценка электромагнитной обстановки вблизи трасс высокоскоростного сообщения и внутри кузова подвижного состава в зонах размещения пассажиров, персонала и оборудования, а также задача обеспечения электромагнитной совместимости оборудования становятся актуальными проблемами, которые необходимо решать на этапе принятия технических решений и проектирования высокоскоростных транспортных систем.

В статье приведены значения предельно допустимых уровней электромагнитных полей, установленные отечественными и зарубежными нормативными документами, а также представлены значения напряженности электрических и магнитных полей систем тягового электроснабжения и бортового силового электрооборудования высокоскоростного подвижного состава железных дорог и магнитолевитационного транспорта, рассмотрены способы обеспечения электромагнитной безопасности и совместимости указанных систем и оборудования.

Ключевые слова: высокоскоростной подвижной состав; электромагнитные поля; предельно допустимые уровни; электромагнитная безопасность.

Как цитировать:

Никитин В.В., Горский А.Н. Электромагнитная безопасность высокоскоростного транспорта // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 169–185. doi: 10.17816/transsyst681997

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© V.V. Nikitin, A.N. Gorsky

Emperor Alexander I St.-Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)**ELECTROMAGNETIC FIELD SAFETY
OF HIGH-SPEED VEHICLES**

The development of high-speed passenger transportation is a result of increased capacity of traction power supply systems, traction electric drives of rolling stock, and the intensity of electric and magnetic fields and their influence on passengers, maintenance staff, other equipment, and automation and communication systems. In the premises, we shall solve urgent problems, i.e. assess the electromagnetic environment near high-speed railway routes and inside the rolling stock in areas, where passengers, staff, and equipment are located, and ensure electromagnetic compatibility of equipment, at the stage of engineering decision-making and designing high-speed networks.

The paper presents the maximum permissible levels of electromagnetic fields provided by national and foreign regulations and the intensity of electric and magnetic fields of traction power supply systems and on-board power supply equipment of high-speed railways and magnetic levitation transportation systems. In addition, it reviews electromagnetic safety and compatibility of these systems and equipment.

Keywords: high-speed rolling stock; electromagnetic fields; maximum permissible levels; electromagnetic safety.

To cite this paper:

Nikitin VV, Gorsky AN. Electromagnetic Field Safety of High-Speed Vehicles. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(2):169–185. doi: 10.17816/transsyst681997

ВВЕДЕНИЕ

Развитие скоростного и высокоскоростного железнодорожного и магнитолевитационного транспорта, рост спроса на пассажирские перевозки связаны с увеличением мощности подвижного состава и систем электроснабжения. В настоящее время мощности высокоскоростных электропоездов достигают уровня 10–20 МВт в зависимости от развиваемой скорости и составности поезда (Табл. 1). При питании однофазным переменным током напряжением 25 кВ – это соответствует токам системы тягового электроснабжения 500...1000 А. В звене постоянного тока систем тягового электропривода, где напряжение понижается до уровня порядка 2000 В, токи могут достигать 250...500 А, а в пусковых режимах и большего значения. Подводя итог вышесказанному следует отметить актуальность проблемы исследования электромагнитной обстановки вблизи линий высокоскоростного транспорта, внутри пассажирских салонов и в зонах размещения бортового оборудования высокоскоростного подвижного состава.

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых серий высокоскоростного подвижного состава железнодорожного и магнитолевитационного транспорта [1–9]

Table 1. Main technical characteristics of some series of high-speed rolling stock for railway and magnetic levitation transport [1–9]

Серия подвижного состава	Скорость, км/ч	Число вагонов в составе	Система питания	Мощность, кВт
Sm6 Allegro	220	7	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	5 500
Talgo 250	250	8	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	4 800
ЭВС1, ЭВС2	250	10	25 кВ, 50 Гц / 3 кВ	8 000
CRH5	250	8	25 кВ, 50 Гц	5 500
Серия 700	285	16	25 кВ, 60 Гц	13 200
Серия 500	300	16	25 кВ, 60 Гц	18 200
TGV Atlantique	300	12	15 кВ, 16,7 Гц / 25 кВ, 50 Гц	8 800
Talgo 350	350	14	25 кВ, 50 Гц	8 000
ICE3	380	8	15 кВ, 16,7 Гц / 25 кВ, 50 Гц 1,5 кВ; 3 кВ	8 000
CRH380D	380	8	25 кВ, 50 Гц	10 000
Transrapid*	450	5	20 кВ; 1,5 кВ, 0...300 Гц	13 300
MLU-L0*	500	5	12,7 кВ, 0...500 Гц	13 600

Примечание: *) – подвижной состав на магнитном подвесе.

НОРМАТИВЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В настоящее время в различных странах действуют нормативные документы, которые определяют допустимые уровни напряженности электрических и магнитных полей. В Табл. 2 приведены предельные значения напряженности переменных электрических и магнитных полей, установленные международной комиссией по защите от неионизирующих излучений ICNIRP, для широкого частотного диапазона $1 \dots 10^6$ Гц в зависимости от локального или общего характера воздействия на организм человека. В Германии действует стандарт BImSchV26 (Табл. 3), устанавливающий допустимые значения напряженности электрического поля и магнитной индукции для постоянных и переменных полей частотой до 10 МГц.

В Российской Федерации приняты санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах», которые устанавливают требования к безопасным условиям воздействия

Таблица 2. Предельные нормативные значения напряженности электрических и магнитных полей частотного диапазона 1 Гц–10 МГц по стандарту ICNIRP [10]

Table 2. Maximum standard values of electric and magnetic field strength in the frequency range 1 Hz–10 MHz according to the ICNIRP standard [10]

Диапазон частот	Напряженность электрического поля, кВ/м	Напряженность магнитного поля, А/м	Индукция магнитного поля, Тл
<i>Локальное воздействие</i>			
1...8 Гц	20	$(1,63 \cdot 10^5)/f^2$	$0,2/f^2$
8...25 Гц	20	$(2 \cdot 10^4)/f$	$(2,5 \cdot 10^{-2})/f$
25...300 Гц	$500/f$	$8 \cdot 10^2$	$(1 \cdot 10^{-3})$
300 Гц...3 кГц	$500/f$	$(2,4 \cdot 10^5)/f$	$0,3/f$
3 кГц...10 МГц	0,17	80	$1 \cdot 10^{-4}$
<i>Общее воздействие</i>			
1...8 Гц	5	$(3,2 \cdot 10^4)/f^2$	$(4 \cdot 10^{-2})/f^2$
8...25 Гц	5	$(4 \cdot 10^3)/f$	$(5 \cdot 10^{-3})/f$
25...50 Гц	5	$1,6 \cdot 10^2$	$(2 \cdot 10^{-4})$
50...400 Гц	$(2,5 \cdot 10^2)/f$	$1,6 \cdot 10^2$	$(2 \cdot 10^{-4})$
400 Гц...3 кГц	$(2,5 \cdot 10^2)/f$	$(6,4 \cdot 10^4)/f$	$(8 \cdot 10^{-2})/f$
3 кГц...10 МГц	$8,3 \cdot 10^{-2}$	21	$(2,7 \cdot 10^{-5})$

Таблица 3. Предельные нормативные значения электрической напряженности и магнитной индукции внешних полей различных частот по стандарту BlmSchV26 (Германия) [11]

Table 3. Maximum standard values of electrical intensity and magnetic induction of external fields of different frequencies according to the BlmSchV26 standard (Germany) [11]

Частота, Гц	Напряженность электрического поля, кВ/м	Магнитная индукция, мкТл
0	—	500
1...8	5	$40\,000/f$
8...25	5	$5\,000/f$
25...50	5	200
50...400	$250/f$	200
$400...3\cdot 10^3$	$250/f$	$80\,000/f$
$3\cdot 10^3...10\cdot 10^6$	0,083	27

электростатического и магнитостатического полей, электромагнитных полей промышленной частоты, а также высокочастотных электромагнитных полей для лиц, профессионально связанных с воздействием данного фактора [12].

Для электростатических полей при продолжительности воздействия менее 1 часа установлен предельно допустимый уровень (ПДУ) $E_{\text{пду}}=60$ кВ/м, при более длительном воздействии ПДУ ниже и должен определяться в соответствии с [12]. При напряженности электростатического поля менее 20 кВ/м время пребывания персонала в таком поле не регламентируется.

Для постоянных магнитных полей (Табл. 4) нормирование осуществляется в зависимости от характера воздействия: общего (на все тело) и локального (кисти рук, предплечье).

Таблица 4. Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля на рабочих местах [12]

Table 4. Maximum permissible levels of constant magnetic field in workplaces [12]

Время воздействия, мин.	ПДУ магнитной индукции, мТл	
	Общее воздействие	Локальное воздействие
Менее 10	30	50
11–60	20	30
61–480	10	15

ПДУ электрических полей промышленной частоты 50 Гц для длительности пребывания персонала в течение всей смены установлен $E_{\text{ПДУ}}=5$ кВ/м. При больших напряженностях поля, но не превышающих $E=20$ кВ/м, время пребывания должно быть ограничено и определено в соответствии с требованиями [12]. При напряженности электрического поля промышленной частоты $20 < E < 25$ кВ/м допустимое время пребывания не должно превышать 10 минут.

Для переменных магнитных полей промышленной частоты в зависимости от характера воздействия и длительности пребывания установлены следующие ПДУ (Табл. 5) [12].

Таблица 5. ПДУ синусоидального магнитного поля промышленной частоты 50 Гц

Table 5. Maximum permissible level of a sinusoidal magnetic field with an industrial frequency of 50 Hz

Время пребывания*, ч	ПДУ магнитной индукции, мкТл, при характере воздействия	
	Общем	Локальном
Менее 1 ч	2000	8000
2	1000	4000
4	500	2000
8	100	1000

*) ПДУ внутри указанных временных интервалов определяется путем интерполяции.

ПДУ электромагнитных полей в частотном диапазоне 10–30 кГц нормируется отдельно по электрической и магнитной компонентам напряженности и составляет: при воздействии в течение всей смены $E_{\text{ПДУ}}=500$ В/м, $H_{\text{ПДУ}}=50$ А/м; при воздействии не более двух часов за смену – $E_{\text{ПДУ}}=1000$ В/м, $H_{\text{ПДУ}}=100$ А/м.

ПДУ электромагнитных полей частотного диапазона 30 кГц – 300 ГГц рассчитывается с использованием понятий энергетической экспозиции и плотности потока энергии.

На Рис. 1 представлены нормативные значения ПДУ магнитных полей, устанавливаемые стандартами ICNIRP, BlmSchV26 и СанПиН 2.2.4.3359-16.

Анализ нормативных документов показывает, что ПДУ магнитных полей, устанавливаемые стандартом BlmSchV26, полностью совпадают

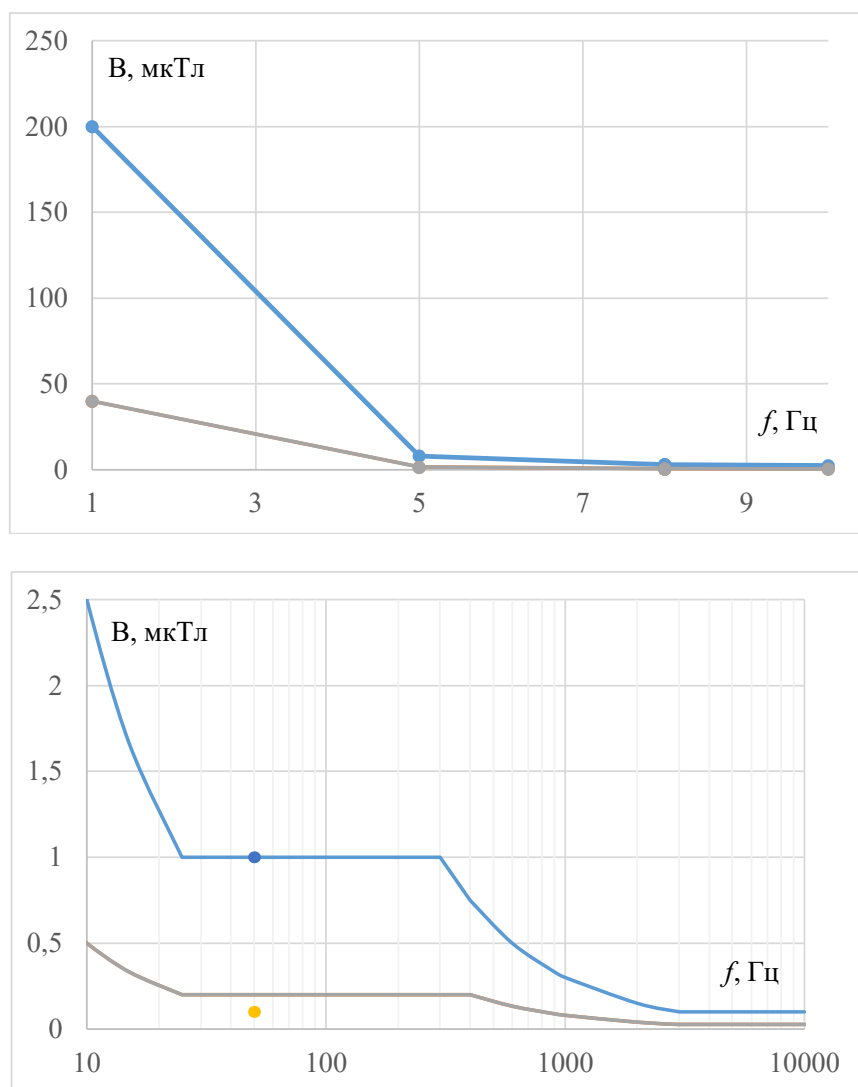


Рис. 1. ПДУ магнитных полей, устанавливаемых стандартами ICNIRP, BlmSchV26 в зависимости от частоты. Точки при частоте 50 Гц соответствуют ПДУ, установленным СанПиН 2.2.4.3359-16

Fig. 1. Maximum permissible levels of magnetic fields established by the ICNIRP, BlmSchV26 standards depending on frequency. The points at a frequency of 50 Hz correspond to the maximum permissible levels established by SanPiN 2.2.4.3359-16

с ПДУ, устанавливаемыми стандартом ICNIRP для общего характера воздействия. Требования СанПиН 2.2.4.3359-16 к магнитной индукции полей промышленной частоты соответствуют требованиям зарубежных стандартов в части локального воздействия; в части общего воздействия требования отечественного документа более строгие. Вместе с тем, СанПиН 2.2.4.3359-16 по сравнению с зарубежными стандартами BlmSchV26 допускает существенно более высокие значения постоянных

магнитных полей. Следует также отметить отличие подходов, принятых при разработке отечественных и зарубежных стандартов: в зарубежных стандартах нормируются ПДУ электрических и магнитных полей в зависимости от их частоты и характера воздействия (общее, локальное); в отечественном СанПиН 2.2.4.3359-16 ПДУ нормируется в зависимости от длительности пребывания в поле и характера воздействия (общее, локальное) для постоянных полей, полей промышленной частоты (50 Гц) и высокочастотных полей в диапазоне частот от 10 кГц и выше.

НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Исследования [11, 13] показали следующие уровни внешних полей контактной сети высокоскоростного наземного транспорта применительно к электропоезду ICE3 (платформа *Siemens Velaro*). При питании переменным током 25 кВ, 50 Гц на расстоянии 25 метров от контактного провода напряженность электрического поля составляет $E=1$ кВ/м (при допустимом значении 5 кВ/м). Для магнитного поля при токе 1700 А, что соответствует движению двух составов в режиме тяги на секции питания контактной сети при напряжении в контактном проводе 15 кВ, 16,7 Гц индукция составляет $B=13,6$ мкТл (при допустимом значении для этой частоты 300 мкТл). Пропорциональным пересчетом при условии инвариантности мощности можно получить значение магнитной индукции для напряжения 25 кВ, 50 Гц (при токе 1000 А) $B=8,2$ мкТл (при допустимом значении 200 мкТл).

Однако, наиболее интересны, вероятно, были бы данные, соответствующие существенно меньшему расстоянию от источника поля (контактного провода) до точки наблюдения по сравнению с данными, представленными в [11, 13]. Например, если точка наблюдения соответствует положению головы человека, стоящего на низкой платформе или пешеходном переходе, тогда для контактной сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц будем иметь такие значения: $E=5,9$ кВ/м (при допустимом значении 5 кВ/м); для тока в контактном проводе 1000 А магнитная индукция составит $B=47$ мкТл. Видно, что на таком расстоянии напряженность электрического поля может превышать нормативное значение. В том случае, если высокоскоростное движение осуществляется

на постоянном токе 3 кВ, магнитная индукция внешнего поля от системы тягового электроснабжения (ток в контактном проводе соответствует мощности 9000 кВт) на расстоянии 5 м от оси пути может достигать $B=500$ мкТл, что соответствует границе допустимых значений индукции постоянного магнитного поля. Следует заметить, что расчет проводился с учетом совместного влияния тока в контактном проводе и обратного тягового тока в рельсовых цепях. Наибольший вклад в уровень магнитной индукции в расчетных точках вносит не ток контактного провода, а обратный тяговый ток, замыкающийся по рельсовым цепям.

Уровни электромагнитных полей внутри кузова вагона рассчитать более сложно, т.к. они складываются из внешних полей многих источников, распределенных по длине секции высокоскоростного электропоезда, основными из которых являются элементы силового электрооборудования (тяговые трансформаторы, тяговые преобразователи, тяговые двигатели), и представляют собой суперпозицию как переменных полей изменяющихся частот, так и постоянных или пульсирующих полей [14–18].

В [11, 13] приведены следующие значения индукции внешних магнитных полей от различных элементов тягового электрооборудования высокоскоростного электропоезда ICE3 (Табл. 6).

Таблица 6. Максимальные значения индукции магнитного поля внутри кузова высокоскоростного электропоезда ICE3

Table 6. Maximum values of magnetic field induction inside the body of the high-speed electric train ICE3

Источник магнитного поля	Магнитная индукция, мкТл, на расстоянии, м, от источника поля			
	0,5	1,0	2,0	3,0
Тяговый преобразователь	405	198	100	60
Тяговый трансформатор	510	255	120	64
Тяговые двигатели	565	281	135	80

В работе [18] даны максимальные значения индукции постоянного магнитного поля, измеренные в различных точках внутри кузова пригородного моторвагонного подвижного состава в режиме остановки и движения (Табл. 7), а также зависимости магнитной индукции переменных полей частотного диапазона 5 Гц–20 кГц в контрольных точках.

Таблица 7. Максимальные значения магнитной индукции постоянного магнитного поля внутри кузова пригородного электропоезда

Table 7. Maximum values of magnetic induction of a constant magnetic field inside the body of a suburban electric train

Положение точки измерения	Максимальная магнитная индукция постоянного магнитного поля, мкТл		
	Высота точки измерения, м	Режим остановки	Режим движения
Кабина машиниста	0,9	220,1	237,4
	1,5	180,9	245,2
Пассажирский салон	0,9	266,6	280,1
	1,5	256,2	276,6

Результаты измерений, представленные в [11, 13, 15, 18], свидетельствуют о том, что уровни магнитных полей в пассажирском салоне и кабине машиниста железнодорожного подвижного состава не превышают установленных нормативных значений.

НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СИСТЕМ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

В настоящее время практическое распространение получили две характерные технологии магнитного подвеса экипажей высокоскоростного транспорта: электромагнитное подвешивание (ЭМП) и электродинамическое подвешивание (ЭДП). Первый вариант использует в системе подвеса и поперечной стабилизации экипажа традиционные «теплые» электромагниты со стальными сердечниками; в системе линейной тяги используются асинхронные (*Linimo*, Япония; *Ecobee*, Южная Корея, линии в Пекине и Чанше, Китай) или синхронные (*Transrapid*, Китай) линейные двигатели. При втором варианте используются сверхпроводниковые магниты с высокими намагничивающими силами, расположенные на экипаже, которые одновременно выполняют функции источника поля возбуждения в линейном синхронном двигателе и системе подвешивания и поперечной стабилизации (полигон *Yamanashi*, серия *L0*, Япония), взаимодействуя с «теплыми» катушками, размещенными на путевом полотне [19–21].

Системы ЭМП характеризуются малыми воздушными зазорами в электромагнитах подвешивания, поперечной стабилизации и линейной

тяги (порядка 8...12 мм) и наличием стальных сердечников, в результате чего поля рассеяния относительно невелики. Непосредственные замеры вдоль путевого полотна системы *Transrapid* показали весьма небольшие значения индукции внешнего магнитного поля в окружающем пространстве, представленные в Табл. 8 [22].

Таблица 8. Индукция внешнего магнитного поля в окружающем пространстве для магнитолевитационной системы *Transrapid*

Table 8. Induction of the external magnetic field in the surrounding space for the *Transrapid* magnetic levitation system

Частотный диапазон, Гц	Индукция внешнего магнитного поля, мкТл		
	На оси путевого полотна	На расстоянии 3-4 м от оси путевого полотна	На расстоянии 10 м от оси путевого полотна
5 Гц...50 кГц	8	9,7	2,2
5...45 Гц	7	8,5	1,5
50...300 Гц	6,9	3,8	1,8
305...2560 Гц	0,5	0,1	0,1

Замеры внешних полей в салоне магнитолевитационного экипажа *Transrapid* (Табл. 9) показали более высокие значения индукции, которые, впрочем, не превышают установленных нормативных значений во всем частотном диапазоне и существенно меньше, чем магнитные поля силового электрооборудования высокоскоростного электропоезда ICE3 [22].

Таблица 9. Максимальные значения индукции магнитного поля внутри пассажирского салона экипажа *Transrapid*

Table 9. Maximum values of magnetic field induction inside the passenger cabin of the *Transrapid* vehicle

Частотный диапазон	Индукция внешнего магнитного поля, мкТл			
	Уровень пола пассажирского салона	Уровень поверхности пассажирского кресла	Уровень головы сидящего пассажира	Уровень головы стоящего пассажира
5 Гц...45 Гц	8,8	3,9	3,2	2,5
50 Гц...300 Гц	23,0	13,8	7,5	4,9
305 Гц...50 кГц	25,0	14,0	7,5	5,0

Магнитолевитационные транспортные системы на ЭДП с использованием сверхпроводниковых магнитов, размещенных на экипаже (*L0 Series*, полигон *Yamanashi*, Япония), характеризуются воздушными зазорами в системе тяги и подвеса на порядок больше (около 100...150 мм), чем при ЭМП, но отличаются существенно более высокими намагничивающими токами и внешними магнитными полями. В табл. 10 представлены результаты замеров индукции магнитного поля в пассажирском салоне экипажа *L0* [23].

Результаты замеров индукции магнитного поля [23] и хорошо согласующиеся с ними результаты численного моделирования магнитных полей [24] показывают, что в некоторых точках внутри пассажирского салона вблизи тягово-левитационного модуля со сверхпроводящими катушками магнитная индукция может превышать предельно допустимые нормативные значения (500 мкТл для постоянного магнитного поля) даже при наличии ферромагнитных экранов.

Таблица 10. Индукция магнитного поля в пассажирском салоне магнитолевитационного экипажа *L0 Series*, полигон *Yamanashi*

Table 10. Magnetic field induction in the passenger compartment of the *L0 Series* magnetic levitation vehicle, *Yamanashi* testing ground

Точка измерения	Уровень по высоте	Магнитная индукция*, мкТл
По центральной оси ряда пассажирских кресел	1 м над уровнем пола	116/88
	Уровень пассажирского кресла	96/64
	0,1 м над уровнем пола	112/58
По центральной оси прохода в салоне	1,5 м над уровнем пола	90/89
	0,1 м над уровнем пола	105/83
Над тягово-левитационным модулем	1 м над уровнем пола	1656/429
	Уровень пассажирского кресла	2697/382
	0,1 м над уровнем пола	1764/1061

*) в числителе – без экранирования; в знаменателе с ферромагнитным экранированием пассажирского салона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования напряженности электрических и магнитных полей силового электрооборудования высокоскоростного железнодорожного

транспорта показывают, что в непосредственной близости от контактной сети (в зоне допустимого расположения пассажиров и персонала) напряженность электрического поля переменного тока и магнитная индукция контактной сети постоянного тока могут превышать допустимые значения. Внутри пассажирского салона высокоскоростного железнодорожного подвижного состава наиболее выражены магнитные поля, индукция которых с учетом экранирующего действия элементов конструкции кузова не превышает допустимые значения.

Уровни магнитных полей в пассажирском салоне магнитолевитационных экипажей с электромагнитным подвешиванием не превышают допустимых значений и оказываются сравнительно меньше, чем в пассажирском салоне высокоскоростного железнодорожного подвижного состава. В пассажирском салоне магнитолевитационных экипажей с электродинамическим подвешиванием на основе сверхпроводниковых магнитов уровень внешних магнитных полей в некоторых локальных зонах может превышать допустимые значения. Защитное действие ферромагнитных экранов в этих зонах оказывается малоэффективным, что требует разработки дополнительных мер защиты пассажиров и персонала.

Насыщенность высокоскоростного подвижного состава железнодорожного и магнитолевитационного транспорта силовым и информационным электронным оборудованием обуславливает воздействие на пассажиров и персонал электромагнитных полей широкого частотного спектра. Учитывая последнее обстоятельство, необходимо совершенствование отечественной нормативной базы в части определения ПДУ не только для постоянных электрических и магнитных полей и полей промышленной частоты, но и полей в диапазоне частот 50 Гц–10 кГц. Действующими СанПиН 2.2.4.3359-16 для этого частотного диапазона ПДУ электромагнитных полей не установлены.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киселев И.П., Назаров О.Н. Развитие высокоскоростного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 6. С. 68-77.
2. Киселев И.П., Назаров О.Н. Развитие высокоскоростного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7 С. 65-77.
3. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире // Транспорт Российской Федерации. 2012. Т. 40-41, № 3-4. С. 61-65.
4. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире // Транспорт Российской Федерации 2012. Т.42, № 5. С. 44-51.
5. Зайцев А.А., Антонов Ю.Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
6. Hellinger R., Engel M., Nothhaft J. Propulsion System and Power Supply for Transrapid Commercial Lines [Internet] Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <http://www.maglev.ir>
7. Kaga S., Murai T., Nakamichi Y., et. al. Characteristics of LSM Drive at the Yamanashi Maglev Test Line // QR of RTRI. 1998. Vol. 39, N 2. P. 68-73.
8. Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023.
9. Ким К.К., Карпова И.М. К вопросу разработки систем подвеса на постоянных магнитах для транспортных систем // Инновационные транспортные системы и технологии. 2022. Т.8, № 4. С. 91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106
10. ICNIRP Guidlines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields. Health Physics 2010. Vol. 99, N 6. P. 818-836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
11. Kircher R., Palka R., Fritz E., et al. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems. Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. The International Maglev Board. October 2018. [Internet]. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.maglevboard.net>
12. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы СанПиН 2.2.4.3359-16. «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/>
13. Kircher R., Klühspies J., Palka R., et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems // Транспортные системы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 152-166. doi: 10.17816/transsyst201842152-166
14. Ким К.К., Карпова И.М. Электротехнические и тепловые расчеты с применением пакета ELCUT. Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта. В кн.: Межвузовский тематический сборник научных трудов. Омский государственный университет путей сообщения; под редакцией А. А. Кузнецова. Омск: ОмГУПС, 2011. С. 10-15.

15. Сергеевков Н.А., Горский А.Н., Васильев П.Ю. Экспериментальное исследование электромагнитных полей на электрическом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 2. С. 48-58. doi: 10.20295/2223-9987-2021-2-48-58
16. Аполлонский С.М., Горский А.Н., Никитин В.В. Проблемы электромагнитной безопасности в современных электроэнергетических системах железнодорожного транспорта // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 2. С. 43-47.
17. Pranay S, Perna S, Singh LP, Deswall SS. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling Stock // International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering. 2013. Vol. 2, N 1. P. 22-27.
18. John L., Dluzniewski A. Measurements of the Magnetic Fields Generated by Electronic Devices Installed on Railways Rolling Stock // Problemy Kolejnictwa. 2018. Vol. 62, N 181. P. 99-106. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: https://problemykolejnictwa.pl/images/PDF/181_3E.pdf
19. Lee Y.W., Kim Ki.C., Lee J. Review of Maglev Train Technologies // IEEE Trans. On Magn. 2006. Vol. 42, N 7. P. 1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
20. Tomita M. Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity // QR of RTRI. 2023. Vol. 64, N 1. P. 11-15. doi: 10.2219/rtriqr.64.1_11
21. Han H.-S., Kim D.-S. Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications. New York: Springer, 2016. doi: 10.1007/978-94-017-7524-3
22. Rausch C. ZEVrail, Glasers Annalen – Sonderheft Transrapid, 2003. [Internet]. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://www.zevrail.de>
23. Kircher R., Klühspies J., Fritz E., Witt M. Application Potential of Maglev Technology in Transport Systems. In: Proceedings of the 26th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Malmö, Sweden, 2024 Sept. 18-21. 2024. Vol. 2. P. 551-570.
24. Ватаев А.С., Дедова О.А., Никитин В.В. Эффективность ферромагнитного экранирования сверхпроводящих катушек высокоскоростных магнитолевитационных экипажей // Инновационные транспортные системы и технологии. 2023. Т. 9. № 2. С. 19-32. doi: 10.17816/transsyst20239219-32

REFERENCES

1. Kiselev IP, Nazarov ON. Development of high-speed rolling stock. *Railway Transport*. 2019;6:68-77; 2019;7:65-77. (In Russ).
2. Kiselev IP, Nazarov ON. Development of high-speed rolling stock. *Railway Transport*. 2019;7:65-77; 2019;7:65-77. (In Russ).
3. Kiselev IP. High-speed railway rolling stock and its development prospects. *Transport of the Russian Federation*. 2012;40-41(3-4):61-65. (In Russ).
4. Kiselev IP. High-speed railway rolling stock and its development prospects. *Transport of the Russian Federation*. 2012;42(5):44-51. (In Russ).
5. Zaitsev AA, Antonov YuF. *Magnetic levitation transport technology*. Gapanovich VA, editor. Moscow: FIZMATLIT; 2014. (In Russ).

6. Hellinger R, Engel M, Nothhaft J. Propulsion System and Power Supply for Transrapid Commercial Lines [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <http://www.maglev.ir>
7. Kaga S, Murai T, Nakamichi Y, et. al. Characteristics of LSM Drive at the Yamanashi Maglev Test Line. *QR of RTRI*. 1998;39(2):68-73.
8. Kim KK. *Magnetic suspension and superconductivity electric propulsion systems*. Moscow: IPR Media; 2023. (in Russ).
9. Kim KK, Karpova IM. On the Issue of the Development of Permanent Magnet Suspension Systems for Transport Systems. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):91-106. doi: 10.17816/transsyst20228491-106.
10. ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields. *Health Physics*. 2010;99(6):818-836. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
11. Kircher R, Palka R, Fritz E, et al. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems. Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board*. October 2018 [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.maglevboard.net>
12. Sanitary and epidemiological rules and regulations SanPiN 2.2.4.3359-16. "Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace". (In Russ). Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71362000/>
13. Kircher R, Klühspies J, Palka R, et al. Electromagnetic fields related to high speed transportation systems. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):152-166. (Russ., Engl.). doi: 10.17816/transsyst201842152-166
14. Kim KK, Karpova IM. *Electrical and thermal calculations using a software ELCUT*. Proceedings "Energosberegaushie tehnologii, control i upravlenie dla predpriatiy zheleznodorozhnogo transporta" Omsk: OmGUPS; 2011:10-15. (In Russ).
15. Sergeenkov NA, Gorskiy AN, Vasiliev PYu. Experimental studies of electromagnetic fields on electric rolling stock. *Bulletin of scientific research results*. 2021;2:48-58. (In Russ). doi: 10.20295/2223-9987-2021-2-48-58
16. Apollonsky SM, Gorsky AN, Nikitin VV. Problems of Electromagnetic Safety in Modern Electric Power Rail System. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2017;2:43-47. (In Russ).
17. Pranay S, Prerna S, Singh LP, Deswall SS. Mitigation of Electromagnetic Interference in Rolling Stock. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. 2013;2(1):22-27.
18. John L, Dluzniewski A. Measurements of the Magnetic Fields Generated by Electronic Devices Installed on Railways Rolling Stock. *Problemy Kolejnictwa*. 2018;62(181):99-106. Accessed: May 04, 2025. Available from: https://problemykolejnictwa.pl/images/PDF/181_3E.pdf
19. Lee YW, Kim KiC, Lee J. Review of Maglev Train Technologies. *IEEE Trans. On Magn*. 2006;42(7):1917-1925. doi: 10.1109/TMAG.2006.875842
20. Tomita M. Maglev Technology and Research Trends on Superconductivity. *QR of RTRI*. 2023;64(1):11-15. doi: 10.2219/rtriqr.64.1_11

21. Han H-S, Kim D-S. *Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications*. Springer. 2016. doi: 10.1007/978-94-017-7524-3
22. Rausch C. ZEVrail, Glasers Annalen – Sonderheft Transrapid, 2003. [Internet]. Accessed: May 04, 2025. Available from: <https://www.zevrail.de>
23. Kircher R, Klühspies J, Fritz E, Witt M. Application Potential of Maglev Technology in Transport Systems. Proceedings of the 26th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Malmö, Sweden, 2024 Sept. 18-21. 2024;2:551-570.
24. Vataev AS, Dedova OA, Nikitin VV. Efficiency of Ferromagnetic Shielding of Superconducting Coils of High-speed Maglev Crew. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(2):19-32. (Russ., Engl). doi: 10.17816/transsyst20239219-32

Сведения об авторах:

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Горский Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор;

eLibrary SPIN: 2519-1678, AuthorID: 915015;

E-mail: gorskyan38@mail.ru

Information about the authors:

Victor V. Nikitin, Dr. Sci. (Tech.), professor;

eLibrary SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Anatoly N. Gorsky, Dr. Sci. (Tech.), professor;

eLibrary SPIN: 2519-1678, AuthorID: 915015;

E-mail: gorskyan38@mail.ru