

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 622.6:629.423.32

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-3-11

Завьялов Валерий Михайлович¹, Дубков Евгений Александрович¹,
Семыкина Ирина Юрьевна^{1,2,*}, Колодяжный Виталий Владимирович¹

¹ Севастопольский государственный университет

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*E-mail: arinasemykina@gmail.com

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРЫ, ОПАСНОЙ ПО ГАЗУ И ПЫЛИ



Информация о статье

Поступила:

03 марта 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 апреля 2023 г.

Принята к печати:

27 апреля 2023 г.

Опубликована:

17 мая 2023 г.

Ключевые слова:

система беспроводного заряда аккумуляторов, шахтный электротранспорт, взрывобезопасность, высокочастотное магнитное поле, индукционный нагрев, температуропроводность, магнитная индукция.

Аннотация.

Системы беспроводного заряда аккумуляторов способны снизить эксплуатационные затраты и длительность процедуры заряда аккумуляторов шахтного электротранспорта. Внедрение таких систем предполагает оборудование специальных зарядных площадок, где генерируется высокочастотное переменное магнитное поле, с помощью которого передается энергия на приемное оборудование электровоза. При этом, если установленное на зарядной площадке и на электровозе оборудование можно оснастить средствами взрывозащиты, область электромагнитного взаимодействия будет располагаться непосредственно в атмосфере, опасной по газу и пыли, а значит, потенциально может являться источником взрыва. В данной статье производится оценка условий, при которых отсутствует риск такого взрыва.

В ходе анализа установлено, что в отсутствие посторонних предметов в области электромагнитного взаимодействия само высокочастотное переменное магнитное поле не является источником тепла, но при появлении там металлических предметов происходит их индукционный нагрев, величина которого определяется энергетическим балансом энергии магнитного поля, поглощаемой металлическим предметом, и рассеиваемой им тепловой энергией. Приведены зависимости, связывающие поглощаемую мощность магнитного поля с габаритными размерами металлического предмета и параметрами магнитного поля, а также рассеиваемую тепловую мощность с габаритными размерами и температуропроводностью этого предмета. Получены уравнения, позволяющие вычислить предельную магнитную индукцию, гарантирующую, что максимально возможная температура поверхности металлического тела не будет превышать максимально допустимой, а следовательно, вероятность взрыва отсутствует.

Для цитирования: Завьялов В.М., Дубков Е.А., Семыкина И.Ю., Колодяжный В.В. К вопросу оценки взрывобезопасности высокочастотного переменного магнитного поля в условиях атмосферы, опасной по газу и пыли // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 3-11. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-3-11, EDN: QOUJRO

Введение

Актуальным направлением развития современной промышленности является повсеместное внедрение новых технологий, обеспечивающих сниже-

ние экологической нагрузки. Важную роль в этом процессе играет повышение доли применяемого электротранспорта. Данная тенденция справедлива также и для предприятий подземной добычи полез-

ных ископаемых, где высокое распространение имеет электровозная откатка [1], а также наблюдается интенсивная замена дизельного подземного транспорта аккумуляторными машинами [2].

Следует отметить, что при невысокой дальности транспортировки или невысоких объемах откатки экономически целесообразно использование аккумуляторных, а не контактных электровозов [3], в то же время основные параметры контактных электровозов, такие как скорость движения, удельные тяговые усилия и удельная мощность, выше, чем у аккумуляторных, а эксплуатационные расходы ниже [4].

Одним из путей для снижения этого недостатка является применение новых технологий в области заряда аккумуляторов [5]. Поскольку сейчас процесс заряда в силу требований взрывобезопасности осуществляется на поверхности в специально оборудованных помещениях, снизить эксплуатационные затраты и длительность процедуры заряда аккумуляторов можно, применив систему беспроводного заряда аккумуляторов электровозов, которая не предусматривает проводного соединения аккумуляторов с питающей сетью, а значит, заведомо не требует их отключения для зарядки.

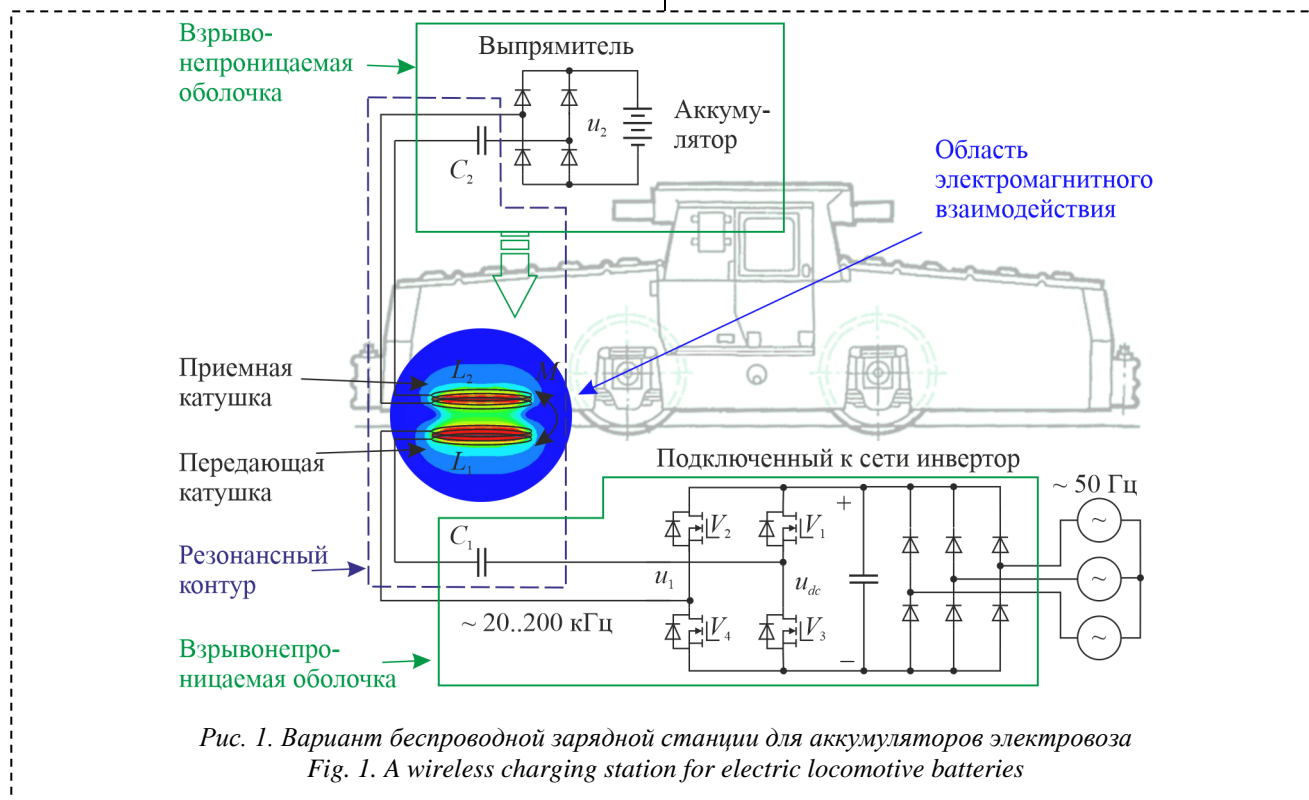
Следует отметить, что предложение использовать систему беспроводной передачи энергии для шахтного электротранспорта впервые было выдвинуто еще в 1995 году в работе [6], а в [4] отмечается, что подобные системы находят практическое применение в том числе в России, однако они предполагают беспроводную передачу энергии для непосредственного питания тяговых двигателей, а не для заряда аккумуляторов.

Системы беспроводного заряда аккумуляторов имеют в качестве основы физические принципы

индуктивной связи и магнитно-резонансной связи между двумя разнесенными в пространстве катушками [7, 8].

Типовой вариант системы беспроводного заряда [9] предполагает для осуществления заряда аккумулятора остановку электротранспорта на специальной зарядной площадке, оборудованной передающей катушкой, питаемой через индуктивно-емкостную цепь высокочастотным переменным током с помощью инвертора и генерирующей магнитное поле. На самом электротранспорте устанавливается приемная катушка, в которой под действием высокочастотного магнитного поля наводится напряжение, подаваемое через индуктивно-емкостную цепь и силовой преобразователь постоянного тока на нагрузку, тем самым реализуя беспроводную передачу энергии. Наиболее эффективно такая система функционирует, когда передающая и приемная катушки и индуктивно-емкостные цепи системы работают в резонансном режиме.

Поскольку рассматриваемая система предлагается для аккумуляторов электровозов (Рис. 1), что предполагает эксплуатацию в потенциально взрывоопасной атмосфере предприятий подземной добычи полезных ископаемых, все ее элементы должны быть оборудованы средствами взрывозащиты. Основное электрооборудование, а именно приемная цепь, включая аккумулятор, выпрямитель и элементы резонансного контура, и передающая цепь, включая инвертор и также элементы резонансного контура, могут быть помещены в корпуса с видом защиты «взрывонепроницаемая оболочка». Однако к приемной и передающей катушкам данный вид взрывозащиты не подходит, так как оболочка будет служить экраном, что снижает эффективность беспроводной передачи энергии практи-



чески до нуля [10], в то же время возможна взрывозащита катушек путем их заливки компаундом. Область электромагнитного взаимодействия между приемной и передающей катушками, тем не менее, будет располагаться непосредственно в атмосфере, опасной по газу и пыли, а значит, потенциально может являться источником, способным воспламенить взрывоопасную среду. Оценка условий, при которых отсутствует риск такого воспламенения, представляет собой предмет настоящего исследования.

Нормативные ограничения

Для оценки возможной опасности применения систем беспроводного заряда аккумуляторов на предприятиях подземной добычи полезных ископаемых выполнен анализ нормативных документов в области рудничного электрооборудования и средств взрывозащиты. Данный анализ показал, что наиболее критичные требования, относящиеся к влиянию высокочастотного переменного магнитного поля, создаваемого в области электромагнитного взаимодействия, содержатся в ГОСТ 31610.0–2019 «Взрывоопасные среды. Часть 0. Оборудование. Общие требования».

Так, переменное магнитное поле продуцирует нагрев вихревыми токами металлических элементов, располагающихся вблизи катушек, а согласно ГОСТ 31610.0–2019 максимальная температура поверхности оборудования должна быть не более 150°C для поверхностей, на которых возможно отложение угольной пыли в виде слоя и 450°C, если отложение угольной пыли в виде слоя является маловероятным. При этом чем меньше площадь нагреваемой поверхности, тем выше требуется ее температура, способная воспламенить взрывоопасную среду, в связи с чем ГОСТ 31610.0–2019 предлагает повышающие температурные коэффициенты в зависимости от площади вплоть до допустимых 950°C при площади менее 20 мм². Обеспечение данного требования решается конструктивными методами, например дополнительным оребрением наружных поверхностей, и не влияет на схемотехнические решения системы беспроводного заряда.

Кроме этого, ГОСТ 31610.0–2019 устанавливает пороговую мощность 6 Вт для источников радиочастотных излучений от 9 кГц до 60 ГГц для непрерывных и импульсных передач с длительностью импульса, превышающей время теплового иницирования 200 мкс, а для импульсных радиолокационных и других аналогичных передач значение пороговой энергии не должно превышать 1500 мкДж. С одной стороны, частотный диапазон описанного электромагнитного излучения включает диапазон частот переменного магнитного поля, создаваемого в области электромагнитного взаимодействия, а значит, электротехнические параметры системы беспроводного заряда аккумуляторов, определяющие энергию электромагнитного излучения, должны подбираться с учетом ограничений. С другой стороны, применяемые под землей промышленные приборы, генерирующие такое радиочастотное излучение, относятся к радиосвязи, а

следовательно, речь идет о передаче электромагнитного излучения радиочастотного диапазона на высокие расстояния, тогда как ширина области электромагнитного взаимодействия составляет порядка десяти сантиметров. И в данном случае по аналогии с площадью нагреваемой поверхности правомерной является гипотеза о допустимости передачи с помощью высокочастотного переменного магнитного поля энергии более высокой, чем указано в ГОСТ 31610.0–2019, при условии малой дальности передачи. Исходя из этой гипотезы, задачей данного исследования является оценка влияния параметров высокочастотного переменного магнитного поля системы беспроводного заряда аккумуляторов на взрывобезопасность в условиях атмосферы, опасной по газу и пыли.

Определение источника опасности

Вопросу тепловыделения систем беспроводного заряда аккумуляторов для наземного электротранспорта и их безопасности с учетом вероятности воспламенения таких систем посвящены многие исследования.

Например, в [11–13] выполнено моделирование температурных полей для систем беспроводного заряда, показавшее, что в нормальных условиях само высокочастотное переменное магнитное поле не является источником тепла в области электромагнитного взаимодействия, а воздух между катушками нагревается преимущественно от омических потерь в катушках в силу законов тепломассопереноса, при этом естественное движение атмосферы или принудительная подача воздуха существенно улучшают тепловые характеристики системы.

Омические потери в катушках являются лишь одной из составляющих потерь мощности в системах беспроводного заряда аккумуляторов наряду с коммутационными потерями и потерями на проводимость в силовых полупроводниковых ключах, диэлектрическими потерями в конденсаторах индуктивно-емкостного контура и др. При этом анализ отдельных экземпляров систем беспроводного заряда в диапазоне мощностей от 25 кВт и выше [14–21], соответствующих аккумуляторным батареям шахтного электротранспорта, показывает, что суммарные потери мощности систем не превышают 10% и имеют тенденцию к сокращению при уменьшении расстояния между катушками. Следовательно, тепло от источника столь малой мощности достаточно легко отвести, а значит, опасность воспламенения по этой причине не требует индивидуального рассмотрения.

Однако высокая вероятность воспламенения атмосферы, опасной по газу и пыли, от действия высокочастотного переменного магнитного поля в области электромагнитного взаимодействия появляется, если между катушками находятся металлические предметы. Причиной в таком случае будут индуцированные потери на вихревые токи, которые провоцируют значительное повышение температуры, поскольку удельная теплоемкость металлов, как правило, низкая [22, 23].

Таблица 1. Соответствие геометрических размеров нагреваемого тела граничным значениям параметра $PrGr$
Table 1. Correspondence of the heated object dimensions to the boundary values of $PrGr$

Температурный класс	Максимальная температура поверхности оборудования, °C	$l, \text{ м}$		
		$PrGr \leq 500$	$500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$	$PrGr \geq 2 \cdot 10^7$
T1	450	до 0.002574	от 0.002574 до 0.088044	от 0.088044
T2	300	до 0.002997	от 0.002997 до 0.10248	от 0.10248
T3	200	до 0.003523	от 0.003523 до 0.120482	от 0.120482
T4	135	до 0.004191	от 0.004191 до 0.143347	от 0.143347
T5	100	до 0.004885	от 0.004885 до 0.167075	от 0.167075
T6	85	до 0.005377	от 0.005377 до 0.18389	от 0.18389

Таблица 2. Уравнения для расчета предельной величины амплитудного значения магнитной индукции
Table 2. Calculating formula of the limiting amplitude value of magnetic induction for spherical and cubic object

Граничные значения	Форма тела, подвергающегося индукционному нагреву	
	Шар	Куб
$PrGr \leq 500$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\mu\tau}{\omega\pi l^3}} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu\tau}{\omega l^3}} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}}$
$500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\mu\tau}{\omega\pi l^3}} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu\tau}{\omega l^3}} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}}$
$PrGr \geq 2 \cdot 10^7$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{6\mu_0\mu\tau}{\omega\pi l^3}} A_3 \sqrt[3]{\tau}$	$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu\tau}{\omega l^3}} A_3 \sqrt[3]{\tau}$

Важно, что возможное при этом воспламенение носит тепловой характер, а температура нагрева в этом случае будет определяться энергетическим балансом, определяемым количеством поглощаемой предметом энергии магнитного поля и тепловой энергией, отдаваемой металлическим предметом в окружающую среду посредством тепломассопереноса. Для выявления условий такого баланса необходимо определить мощность высокочастотного магнитного поля, преобразовываемую в тепло, и тепловую мощность, передаваемую в окружающую среду.

Мощность магнитного поля, преобразовываемая в тепло

Механизм преобразования энергии высокочастотного переменного магнитного поля в металлическом предмете в тепловую энергию заключается в возникновении в толще металла вихревых токов, которые в свою очередь за счет джоулевых потерь выделяют тепло. Физика процессов протекания вихревых токов такова, что они пытаются препятствовать изменению магнитного поля внутри проводника. Таким образом, они снижают скорость изменения напряженности магнитного поля внутри проводника относительно напряженности магнитного поля за его пределами. Исходя из этих соображений, можно утверждать, что мощность, выделяемая в виде тепла в проводнике, не может превышать мощности магнитного поля, ограниченного объемом проводника, в котором протекают вихревые токи.

Плотность энергии магнитного поля w в некоторой точке пространства определяется выражением:

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu},$$

где H – напряженность магнитного поля; B – индукция магнитного поля; μ_0, μ – магнитная проницаемость вакуума и среды соответственно.

Энергия магнитного поля W_m , находящегося в некотором объеме пространства, будет определяться выражением:

$$W_m = \int_V w dv = \int_V \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} dv = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} dv,$$

а мощность этого магнитного поля P_m будет определяться скоростью ее изменения:

$$P_m = \frac{d}{dt} \left(\int_V \frac{B(t)^2}{2\mu_0 \mu} dv \right).$$

Примем, что источником магнитного поля является высокочастотный переменный ток, изменяющийся во времени синусоидально. В таком случае, учитывая, что ток и создаваемая им индукция магнитного поля – это величины однозначно связанные, индукция магнитного поля, созданная в каждой точке пространства, также будет иметь синусоидальный характер изменения:

$$B(t) = B_{\max} \sin(\omega t),$$

где B_{\max} – амплитудное значение индукции магнитного поля; ω – угловая частота.

В таком случае величина мощности магнитного поля будет определяться уравнением:

$$P_m = \left(\int_V \frac{B_{\max}^2}{\mu_0 \mu} dv \right) \omega \sin(2\omega t).$$

Таким образом, мощность магнитного поля, проходящего через объем V , будет изменяться по

синусоидальному закону с двойной частотой относительно частоты изменения индукции магнитного поля. Если принять распределение B равномерным по объему V , амплитудное значение мощности магнитного поля, преобразовываемой в тепло, будет определяться выражением:

$$P_m = \frac{\omega B_{\max}^2 V}{\mu_0 \mu}. \quad (1)$$

Тепловая мощность, передаваемая в окружающую среду

Нагрев металлического предмета высокочастотным переменным магнитным полем можно рассматривать как нагрев от внутреннего источника энергии. Учитывая, что теплопроводность металлов достаточно большая, будем считать, что потенциал теплового поля распределен по объему металлического предмета равномерно. Теплопередачу от металлического предмета в окружающую воздушную среду будем рассматривать при отсутствии принудительных потоков воздуха за счет естественной конвекции.

Тепловое равновесие по завершению тепловых переходных процессов будет определяться выражением:

$$P = \alpha \tau, \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; τ – превышение температуры металлического предмета над температурой окружающей среды.

В [24] приводятся расчетные формулы определения α для сферы, цилиндра и плоской поверхности. При этом вид расчетной формулы зависит от произведения числа Прандтля Pr и числа Грасгофа Gr :

$$\alpha = A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}} \text{ при } PrGr \leq 500; \quad (3.1)$$

$$\alpha = A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}} \text{ при } 500 < PrGr < 2 \cdot 10^7; \quad (3.2)$$

$$\alpha = A_3 \sqrt[3]{\tau} \text{ при } PrGr \geq 2 \cdot 10^7, \quad (3.3)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты, зависящие от температуры воздуха; l – габаритный размер охлаждаемой поверхности. Значение l является диаметром для сферы или горизонтальной трубы, высотой плоской поверхности или вертикальной трубы, наименьшей длиной горизонтальной плоской поверхности.

Значение $PrGr$ также зависит от превышения температуры над окружающей средой и геометрических размеров поверхностей, через которую осуществляется теплопередача. В Табл. 1 для различных температурных классов взрывобезопасности по ГОСТ 31610.0–2019 приведены геометрические размеры нагреваемого тела, соответствующие граничным параметрам $PrGr$. При расчетах температура нагреваемого тела принималась равной максимальной температуре поверхности оборудования для соответствующего температурного класса, а температура окружающей среды – равной +40 °С.

Предельная индукция магнитного поля

Определение предельной величины амплитудного значения магнитной индукции, гарантирую-

щей, что максимально возможная температура поверхности тела, подвергающегося индукционному нагреву, не будет превышать максимально допустимой температуры, должно проводиться исходя из температурного класса взрывобезопасности, определяющего максимальную температуру поверхности оборудования, и из его геометрических размеров. Для расчета воспользуемся зависимостью, полученной путем подстановки (1) и (3) в (2):

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega V}} A_1 \sqrt[8]{\frac{\tau}{l^5}} \text{ при } PrGr \leq 500; \quad (4.1)$$

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega V}} A_2 \sqrt[4]{\frac{\tau}{l}} \text{ при } 500 < PrGr < 2 \cdot 10^7; \quad (4.2)$$

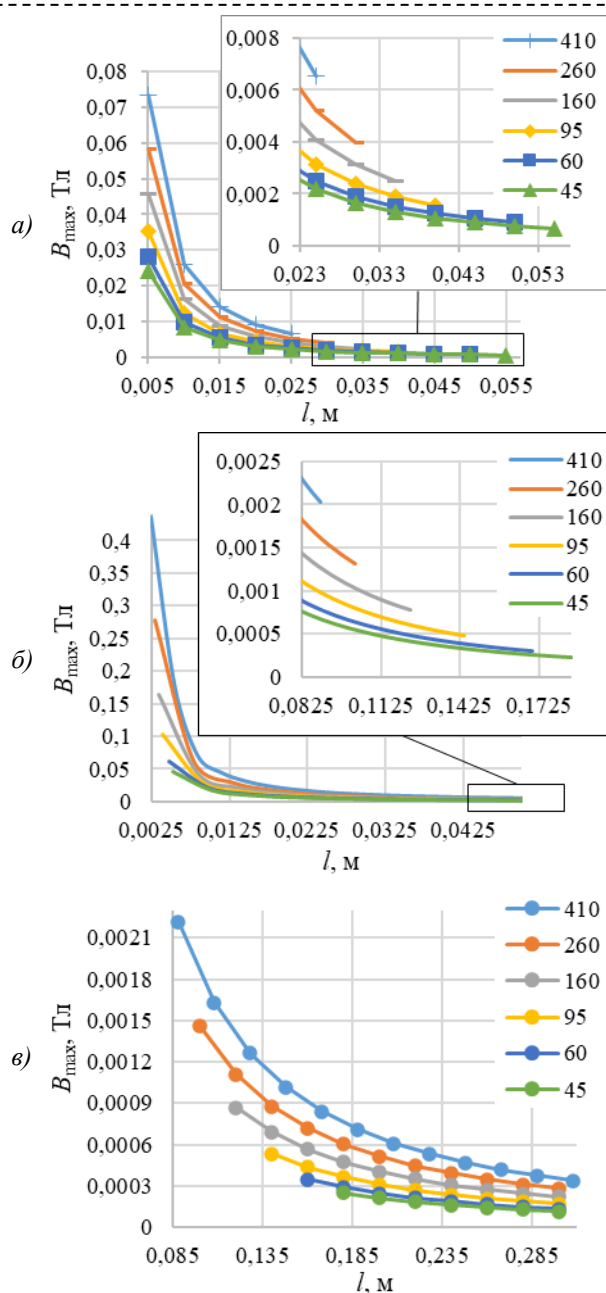


Рис. 2. Предельное амплитудное значение магнитной индукции для разных значений параметра $PrGr$: а) $PrGr \leq 500$; б) $500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$; в) $PrGr \geq 2 \cdot 10^7$
Fig. 2. Limiting magnetic induction for different $PrGr$: а) $PrGr \leq 500$; б) $500 < PrGr < 2 \cdot 10^7$; в) $PrGr \geq 2 \cdot 10^7$

$$B_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \tau}{\omega V}} A_3 \sqrt[3]{\tau} \text{ при } PrGr \geq 2 \cdot 10^7; \quad (4.3)$$

С учетом зависимости объема тела от его габаритных размеров в Табл. 2 приведены уравнения, определяющие максимально допустимую величину амплитудного значения магнитной индукции для подвергающихся индукционному нагреву предметов, имеющих форму шара и куба. Анализируя данные уравнения, можно сделать вывод, что при равных значениях геометрического размера l для предмета кубической формы предельная индукция магнитного поля будет меньше, чем для шарообразной.

Для наглядности на Рис. 2 показаны графики зависимостей предельного амплитудного значения магнитной индукции от габаритных размеров нагреваемого тела кубической формы. Семейства кривых, построенные для каждого интервала параметра $PrGr$, отражают различные по величине превышения температуры металлического предмета над температурой окружающей среды и выбраны исходя из максимальной температуры поверхности оборудования для различных температурных классов взрывобезопасности по ГОСТ 31610.0–2019 при температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$. Можно отметить, что увеличение параметра $PrGr$ для нагреваемого тела с конкретными габаритами приводит к снижению предельного амплитудного значения магнитной индукции. Та же тенденция наблюдается при увеличении габаритных размеров нагреваемого тела.

Зависимости, приведенные на Рис. 2, можно использовать для оценки безопасности применения системы беспроводного заряда аккумуляторов во взрывоопасной атмосфере. Если для конкретной системы беспроводного заряда при конкретных габаритных размерах нагреваемого тела индукция магнитного поля находится ниже линии на графике, то гарантированно за счет индукционного нагрева температура поверхности предмета не поднимется выше предельной температуры. Если же индукция магнитного поля будет выше указанной линии, опасность воспламенения атмосферы существует. В то же время это не является однозначным основанием для утверждения, что предмет нагреется выше предельной температуры. Данное обстоятельство обусловлено тем, что не вся мощность, проходящая через объем, занятый электропроводящим телом, будет им поглощена. Помимо этого, в уравнениях используется амплитудное значение мощности магнитного поля, в то же время при относительно больших габаритах тела его тепловая инерционность будет сглаживать процесс теплопередачи, в результате чего температура поверхности будет определяться среднеквадратичным значением мощности. Исходя из этого, каждый случай превышения предельной индукции магнитного поля для конкретной системы беспроводного заряда при конкретных габаритных размерах нагреваемого тела требует дополнительных исследований.

Заключение

В рамках проведенного исследования выполнена оценка условий, при которых для систем беспроводного заряда аккумуляторов шахтного электротранспорта отсутствует риск воспламенения атмосферы, опасной по газу и пыли. Полученные уравнения для предельной магнитной индукции могут использоваться при выборе схемотехнических решений системы беспроводного заряда или в ходе оптимизации параметров ее передающей и приемной катушек.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021-138/3)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walker S.C. Mine winding and transport. Elsevier, 1988. 546 p.
2. Jäderblom N. From diesel to battery power in underground mines: A pilot study of diesel free LHDs. Lulea University of Technology, 2017. 75 p.
3. Marinović N. Electrotechnology in Mining // Advances in Mining Science and Technology, Vol. 6, Elsevier Science Publishers B.V., 1990. 622 p.
4. Марков А. М. Автоматизированный электропривод современного шахтного электровоза // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Технические науки, 2017. № 5. С. 25–36.
5. I. Semykina, V. Zavyalov, E. Dubkov, and A. Veliliaev. On the possibility of wireless battery charging in a gaseous-and-dusty mine // The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium “Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology”. 19–21 Oct. 2021. Kemerovo, Russia. Vol. 303.
6. Klontz K. W. [et al.] Contactless power delivery system for mining applications // IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31. №. 1. P. 27–35
7. Abou Houran M., Yang X., Chen W. Magneticaly coupled resonance WPT: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and EMI diagnostics // Electronics. 2018. Vol. 7. No. 11. P. 296
8. Ahmad A., Alam M. S., Chabaan R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles // IEEE transactions on transportation electrification. 2017. Vol. 4. №. 1. P. 38–63.
9. Foote A., Onar O. C. A review of high-power wireless power transfer // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 2017. P. 234–240.
10. Semykina I. Y., Zavyalov V. M., Krylov V. N. Research of the laboratory prototype for the battery charging system based on wireless power transfer // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Novosibirsk. Novosibirsk State Technical University, IEEE Russia Siberia Section. 2020. P. 324–330
11. Moghaddami M., Sarwat A. Time-dependent multi-physics analysis of inductive power transfer systems // 2018 IEEE Transportation Electrification Con-

ference and Expo (ITEC). 13-15 June 2018. Long Beach, CA, USA. 2018. P. 130-134.

12. Zhu C. et al. Thermal simulation and optimization study for magnetic coupler of static electric vehicle wireless power transfer systems // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE. 11-14 August 2019. Harbin, China. – P. 1-4.

13. Wen C. et al. Thermal Analysis of Coupled Resonant Coils for an Electric Vehicle Wireless Charging System // World Electric Vehicle Journal. 2022. Vol. 13. No. 8. P. 133.

14. Wu H. H., Masquelier M. P. An overview of a 50kW inductive charging system for electric buses // 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 14-17 June 2015. Dearborn, MI, USA. P. 1-4.

15. Bojarski M. et al. A 25 kW industrial prototype wireless electric vehicle charger // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 20-24 March 2016. Long Beach, CA, USA. P. 1756-1761.

16. Colussi J. et al. 100 kW Three-Phase Wireless Charger for EV: Experimental Validation Adopting Opposition Method // Energies. 2021. Vol. 14. No. 8. P. 2113.

17. Chen H. et al. Modular four-channel 50 kW WPT system with decoupled coil design for fast EV charging // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 136083-136093.

18. Shijo T. et al. EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for

rapid contactless charging of electric bus // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 18-22 September 2016. Milwaukee, WI, USA. P. 1-6.

19. Bosshard R., Kolar J. W. All-SiC 9.5 kW/dm³ on-board power electronics for 50 kW/85 kHz automotive IPT system // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016. Vol. 5. No. 1. P. 419-431.

20. Bosshard R., Kolar J. W. Multi-objective optimization of 50 kW/85 kHz IPT system for public transport // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016. Vol. 4. No. 4. P. 1370-1382.

21. Galigekere V. P. et al. Design and implementation of an optimized 100 kW stationary wireless charging system for EV battery recharging // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 23-27 September 2018. Portland, OR, USA. P. 3587-3592.

22. Niu S. et al. Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention // Applied Energy. 2020. Vol. 275. P. 115344.

23. Xiang L. et al. Foreign object detection in a wireless power transfer system using symmetrical coil sets // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 44622-44631.

24. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1958. 418 с.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Завьялов Валерий Михайлович, доктор техн. наук, доцент, Севастопольский государственный университет, (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)

Дубков Евгений Александрович, аспирант, Севастопольский государственный университет, (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)

Семыкина Ирина Юрьевна, доктор техн. наук, доцент, Севастопольский государственный университет, (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Колодяжный Виталий Владимирович, кандидат техн. наук, доцент, Севастопольский государственный университет, (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33)

Заявленный вклад авторов:

Завьялов В.М. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Дубков Е.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Семыкина И.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Колодяжный В.В. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Valery M. Zavyalov¹, Evgeniy A. Dubkov¹, Irina Yu. Semykina^{1,2,*}, Vitaliy V. Kolodyazhny¹¹Sevastopol State University²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*E-mail: arinasemykina@gmail.com

ON THE ISSUE OF IGNITION RISK EVALUATION FROM THE HIGH-FREQUENCY ALTERNATING MAGNETIC FIELD IN AN EXPLOSIVE GAS-AND-DUST ATMOSPHERE



Article info

Received:

03 March 2023

Accepted for publication:

15 April 2023

Accepted:

27 April 2023

Published:

17 May 2023

Keywords: wireless battery charging, mining electric vehicles, explosion safety, high-frequency magnetic field, induction heating, thermal diffusivity, magnetic induction.

Abstract.

Wireless battery chargers are able to reduce operating costs and the battery charging duration for mining electric vehicles. Implementing such systems requires special charging sites, where a high-frequency alternating magnetic field is generated to transmit energy into the mining electric vehicle battery. It should be noted, if the equipment installed on the charging site as well as on the mining electric vehicle can be protected by explosion proofing means, the area of electromagnetic interaction will be located directly in explosive gas-and-dust atmosphere being a potential ignition source. This article evaluates the conditions under which the ignition risk can be neglectable.

The analysis reveals that if there are no foreign objects in the area of electromagnetic interaction, the high-frequency magnetic field itself is not a heat source, but when a metal object appears there, it is inductively heated. The resulting temperature of the metal object is determined by the energy balance between the absorbed magnetic field energy and the dissipated thermal energy. The article gives the dependences that relate the absorbed magnetic field power with the field parameters and the overall dimensions of a metal object, as well as the dissipated thermal power with the object overall and thermal diffusivity. In the final part of the article, the equations are obtained that make it possible to calculate the limiting magnetic induction. If magnetic induction in the area of electromagnetic interaction is less than the limiting value, it guarantees that the maximum surface temperature of the metal object will not exceed the limiting temperature, and therefore there is no probability of an explosion.

For citation: Zavyalov V.M., Dubkov E.A., Semykina I.Yu., Kolodyazhny V.V. On the issue of ignition risk evaluation from the high-frequency alternating magnetic field in an explosive gas-and-dust atmosphere. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 2(166):3-11 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-3-11, EDN: QOUJRO

REFERENCES

1. Walker S.C. Mine winding and transport. Elsevier, 1988. 546 p.
2. Jäderblom N. From diesel to battery power in underground mines: A pilot study of diesel free LHDs. Lulea University of Technology, 2017. 75 p.
3. Marinović N. Electrotechnology in Mining. *Advances in Mining Science and Technology*. Elsevier Science Publishers B.V. 1990; 6. 622 p.
4. Markov A.M. Automated electric drive of a modern mine electric locomotive. *Bulletin of Pskov State University. Series: Technical Sciences*. 2017; 5:25-36. (in Rus)
5. Semykina I., Zavyalov V., Dubkov E., Veliliaev A. On the possibility of wireless battery charging in a gaseous-and-dusty mine. *The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium "Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology"*. Kemerovo, Russia. 2021; 303

6. Klontz K. W. [et al.] Contactless power delivery system for mining applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995; 31(1):27-35

7. Abou Houran M., Yang X., Chen W. Magnetically coupled resonance WPT: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and EMI diagnostics. *Electronics*. 2018; 7(11):296.

8. Ahmad A., Alam M.S., Chabaan R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. *IEEE transactions on transportation electrification*. 2017; 4(1):38-63.

9. Foote A., Onar O.C. A review of high-power wireless power transfer. *2017 IEEE Transportation*

Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE. 2017. P. 234-240.

10. Semykina I.Y., Zavyalov V.M., Krylov V.N. Research of the laboratory prototype for the battery charging system based on wireless power transfer. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). Novosibirsk. Novosibirsk State Technical University. IEEE Russia Siberia Section. 2020. P. 324-330*

11. Moghaddami M., Sarwat A. Time-dependent multi-physics analysis of inductive power transfer systems. *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 13-15 June 2018. Long Beach, CA, USA. 2018. P. 130-134.*

12. Zhu C. [et al.] Thermal simulation and optimization study for magnetic coupler of static electric vehicle wireless power transfer systems. *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE. 11-14 August 2019. Harbin, China. P. 1-4.*

13. Wen C. [et al.] Thermal Analysis of Coupled Resonant Coils for an Electric Vehicle Wireless Charging System. *World Electric Vehicle Journal. 2022; 13(8):133.*

14. Wu H.H., Masquelier M.P. An overview of a 50kW inductive charging system for electric buses. *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 14-17 June 2015. Dearborn, MI, USA. P. 1-4.*

15. Bojarski M. [et al.] A 25 kW industrial prototype wireless electric vehicle charger. *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 20-24 March 2016. Long Beach, CA, USA. P. 1756-1761.*

16. Colussi J. [et al.] 100 kW Three-Phase Wireless Charger for EV: Experimental Validation Adopting Opposition Method. *Energies. 2021; 14(8):2113.*

17. Chen H. [et al.] Modular four-channel 50 kW WPT system with decoupled coil design for fast EV charging. *IEEE Access. 2021; 9:136083-136093.*

18. Shijo T. [et al.] EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for rapid contactless charging of electric bus. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 18-22 September 2016. Milwaukee, WI, USA. P. 1-6.*

19. Bosshard R., Kolar J.W. All-SiC 9.5 kW/dm³ on-board power electronics for 50 kW/85 kHz automotive IPT system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016; 5(1):419-431.*

20. Bosshard R., Kolar J.W. Multi-objective optimization of 50 kW/85 kHz IPT system for public transport. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016; 4(4):1370-1382.*

21. Galigekere V. P. [et al.] Design and implementation of an optimized 100 kW stationary wireless charging system for EV battery recharging. *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 23-27 September 2018. Portland, OR, USA. P. 3587-3592.*

22. Niu S. [et al.] Power loss analysis and thermal assessment on wireless electric vehicle charging technology: The over-temperature risk of ground assembly needs attention. *Applied Energy. 2020; 275:115344.*

23. Xiang L. [et al.] Foreign object detection in a wireless power transfer system using symmetrical coil sets. *IEEE Access. 2019; 7:44622-44631.*

24. Kutateladze S.S., Borishansky V.M. Handbook of heat transfer. State Energy Publishing House, 1958. 418 p. (in Rus)

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Valery M. Zavyalov, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33)

Evgeniy A. Dubkov, Postgraduate Student, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33)

Irina Yu. Semykina, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33), T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, 28 Vesennyya St., Kemerovo, Russia)

Vitaliy V. Kolodyazhny, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33)

Contribution of the authors:

Valery M. Zavyalov, Evgeniy A. Dubkov, Irina Yu. Semykina, Vitaliy V. Kolodyazhny – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

