

Научная статья

УДК 316.4.057.4, 621.313-57, 622-1/-9
DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-22-28

Завьялов Валерий Михайлович¹, Дубков Евгений Александрович¹,
Семькина 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

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА



Информация о статье

Поступила:

10 мая 2023 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 июня 2023 г.

Принята к печати:

27 июня 2023 г.

Опубликована:

11 июля 2023 г.

Ключевые слова:

система беспроводного заряда аккумуляторов, шахтный электротранспорт, взрывобезопасность, высокочастотное магнитное поле, компьютерное моделирование

Аннотация.

Системы беспроводной передачи энергии являются перспективными для заряда тяговых аккумуляторов шахтных электровозов, так как у них нет необходимости в контактном соединении аккумуляторов с зарядной станцией, что исключает возможность воспламенения взрывоопасной атмосферы от возможной искры при замыкании или размыкании контактов.

Результаты расчетов показали, что при габарите обменивающихся энергией катушек $3 \times 0,7$ м наилучшие энергетические характеристики получаются при намотке одного витка. На основании математического анализа было выявлено, что такой конструкции достаточно для передачи требуемой мощности в аккумуляторные батареи при напряжении источника, питающего зарядную станцию 380 В. При использовании полученной из математической модели силового канала беспроводной зарядной станции передаточной функции, отражающей отношение тока первичной цепи ко вторичной, были получены соотношения амплитуд токов и их фазовый сдвиг при работе на номинальную нагрузку при симметричном и смещенном расположениях катушек.

Полученные данные были использованы для компьютерного моделирования распределения индукции магнитного поля в области передачи энергии методом конечных элементов. Результаты моделирования показали, что для исключения нагрева посторонних металлических предметов выше опасных температур для температурного класса T1 достаточно сделать физический барьер вокруг проводников катушек радиусом 3 см.

В целом проведенные исследования подтвердили возможность применения систем беспроводной передачи энергии для заряда тяговых аккумуляторов шахтных электровозов в условиях, опасных по газу и пыли.

Для цитирования: Завьялов В.М., Дубков Е.А., Семькина И.Ю., Колодяжный В.В. Оценка возможности использования беспроводной зарядной станции для шахтного электровоза // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 3 (167). С. 22-28. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-22-28, EDN: CGKCED

Введение

Современное горное производство характеризуется высокой степенью механизации и автоматизации всех технологических процессов. Дальнейшее развитие этого процесса ведет к созданию безлюдной шахты [1, 2], что должно повысить безопасность и производительность горного производства. Одним из технологических процессов в шахтах является транспортировка грузов с помощью локомотивов [3, 4]. До недавнего времени наиболее

распространенными были дизельные локомотивы, но в последнее время, с увеличением удельной плотности энергии аккумуляторных батарей [5] начали внедряться электрические локомотивы с тяговыми аккумуляторными батареями [6, 7].

При эксплуатации таких локомотивов возникает необходимость заряда тяговых аккумуляторных батарей. Сейчас операция заряда аккумуляторов производится следующим образом. Локомотив транспортируется в зону с взрывобезопасной атмо-

сферой, с него снимается разряженная аккумуляторная батарея, и на ее место ставится предварительно заряженная аккумуляторная батарея, а снятая ставится на подзарядку. Данная технология, с одной стороны, снижает производительность данного технологического процесса, так как тратится время на транспортировку локомотива во взрывобезопасную зону и непосредственно на замену аккумуляторной батареи; с другой стороны, это препятствует полной автоматизации локомотивного транспорта в концепции безлюдной шахты.

Решением этой проблемы может стать внедрение для этих целей беспроводных зарядных станций [8, 9]. Это позволит подзарядать аккумуляторные батареи во взрывоопасной зоне, а оборудование такими зарядными станциями пунктов погрузки/разгрузки позволит заряжать аккумуляторные батареи в технологическом цикле, что в том числе позволит использовать аккумуляторные батареи с более низкой емкостью.

Следует отметить, что для использования беспроводной зарядной станции в шахте, опасной по взрыву газа и пыли, она должна обеспечивать взрывобезопасность во всех режимах работы. С одной стороны, взрывобезопасность будет обеспечиваться отсутствием открытых токоведущих контактов, так как энергия передается бесконтактным способом посредством переменного магнитного поля. С другой стороны, в пространстве между передающей и приемной катушками концентрируется переменное магнитное поле, и при попадании в его область посторонних предметов оно может нагреть их до взрывоопасной температуры.

Зависимости, позволяющие определить максимально возможный нагрев металлических предметов от величины индукции магнитного поля заданной частоты, приведены в [10]. В этой статье рассмотрим методику оценки безопасности использования беспроводной зарядной станции с конкретными параметрами и ее апробацию на примере электровоза шахтного аккумуляторного А-5,5-600-У5, выпускаемого Тульским заводом горношахтного оборудования [11].

Математическая модель системы беспроводной зарядной станции

В качестве исследуемой системы БПЭ будем рассматривать схему с S-S топологией (последовательной топологией) [12-14], приведенную на Рис. 1, так как она обеспечивает достаточно большой коэффициент передачи мощности и имеет малую чувствительность к изменениям взаимной индуктивности, что позволяет ослабить требования к точности позиционирования приемной и передающей катушек.

Для приведения данной системы к линейному виду, более удобному для анализа, заменим аккумуляторную батарею на эквивалентное сопротивление, которое рассчитывается как отношение

напряжения на клеммах аккумулятора к зарядному току. Математическую модель силового канала беспроводной зарядной станции представим системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{in} - u_{C_1} = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \\ u_{C_2} = -(L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + i_2 R_{2\Sigma}); \\ C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} = i_1; \\ C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} = i_2, \end{cases} \quad (1)$$

где u_{in} – входное напряжение; u_{C_1} , u_{C_2} – напряжения на конденсаторах соответственно в первичной и вторичной цепях; i_1 , i_2 – токи первичной и вторичной цепей; R_1 , R_2 , C_1 , C_2 – активные сопротивления и емкости первичной и вторичной цепей; L_1 , L_2 – индуктивности первичной и вторичной катушек; M – взаимная индуктивность; R_{load} – эквивалентное сопротивление аккумуляторной батареи; $R_{2\Sigma} = (R_2 + R_{load})$.

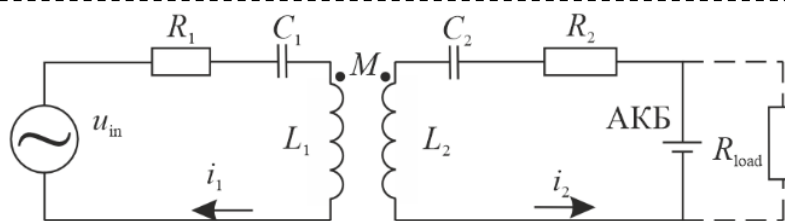


Рис. 1. Схема силового канала беспроводной зарядной станции с S-S топологией

Fig. 1. The equivalent circuit of the wireless charger with S-S topology

Учитывая, что для оценки величины индукции магнитного поля в окрестностях передающей и принимающей катушек необходимо и достаточно знать величины токов, протекающих по соответствующим катушкам, для дальнейшего анализа построим передаточную функцию как отношение тока нагрузки к току передающей катушки в преобразованиях Лапласа. Для этого в (1) заменим $d/dt \rightarrow p$, и после ряда преобразований получим:

$$W(p) = \frac{I_2(p)}{I_1(p)} = - \frac{p^2 C_2 M}{(p^2 C_2 L_2 + p C_2 R_2 + 1)}$$

Перейдя в частотную область, получим амплитудночастотную:

$$A(\omega) = \sqrt{\left(\frac{\omega^2 C_2 M (1 - \omega^2 C_2 L_2)}{(1 - \omega^2 C_2 L_2)^2 + (\omega C_2 R_2)^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega^3 C_2^2 M R_2}{(1 - \omega^2 C_2 L_2)^2 + (\omega C_2 R_2)^2} \right)^2} \quad (2)$$

и фазочастотную:

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega C_2 R_2}{1 - \omega^2 C_2 L_2} \quad (3)$$

характеристики.

Оптимизация параметров беспроводной зарядной станции применительно к электровозу А-5,5-600-У5

Проведем расчет токов катушек беспроводной зарядной станции, рассчитанной для электровоза шахтного аккумуляторного А-5,5-600-У5. Исходя из габаритов аккумуляторного отсека, предполагая, что приемная катушка будет закреплена на его боковой поверхности, примем прямоугольную форму катушки с габаритными размерами $3 \times 0,7$ м. Параметры резонансного контура и основные характеристики, полученные расчетным путем при расстоянии между передающей и принимающей катушками 10 см, приведены в Табл. 1. Рабочая частота резонансного контура была принята равной 90 кГц в соответствии с [15].

В качестве энергетических характеристик рассматривались КПД и коэффициент K_{i2} , который определяется как отношение тока нагрузки к величине входного напряжения инвертора [14]. Как можно увидеть, наилучшие характеристики по данным параметрам имеет пара катушек с одним витком, в связи с чем в дальнейших расчетах будем использовать ее параметры.

Таблица 1. Параметры и характеристики катушек резонансного контура

Table 1. The resonant circuit parameters

Кол-во витков	$L_1, L_2, \text{мкГн}$	$M, \text{мкГн}$	$R_1, R_2, \text{Ом}$	$C_1, C_2, \text{мкФ}$	КПД, %	K_{i2}
1	16.6	2.7	0,003	0,162	99,4	2
2	43,7	10.5	0,006	0,058	98,8	1.96
3	78.7	23.2	0,009	0.031	98,3	1.93

Исходя из характеристик тяговых аккумуляторов электровоза А-5,5-600-У5, примем ток заряда 260 А при напряжении 130 В, эквивалентное сопротивление нагрузки соответственно было принято 0,5 Ом.

На Рис. 2 приведены зависимости K_{i2} и КПД от угловой частоты. Максимум КПД достигается на локальном минимуме коэффициента K_{i2} , который в данной точке имеет значение 0,61. Для обеспечения работы с номинальным током заряда при питании первичных цепей от трехфазной сети 380 В должно выполняться условие $K_{i2} > 0,42$. Учитывая, что для угловой частоты, соответствующей максимальному КПД, это условие выполняется, будем рассматривать работу системы беспроводной передачи энергии в этой точке.

На Рис. 3 приведены амплитудночастотная и фазочастотная (АЧХ и ФЧХ) характеристики силового канала беспроводной зарядной станции для катушек с параметрами, соответствующими 1 витку, где в качестве выходного сигнала рассматривается i_2 , а входным сигналом выступает i_1 . Как видно из данного рисунка, превышение тока нагрузки над током первичной катушки составляет 3,75, таким образом, ток передающей катушки будет состав-

лять 69,4 А, при этом ток передающей обмотки отстает на 90° от тока принимающей катушки.

Следует отметить, что в процессе эксплуатации возможны отклонения в позиционировании принимающей катушки относительно передающей. Примем, что допустимое отклонение позиционирования электровоза при остановке у зарядной станции составляет 1 метр. При этом в резонансном контуре изменится лишь один параметр – взаимная индуктивность, величина которой при смещении катушек на 1 метр составит 1,64 мкГн.

Частотные характеристики для этого случая представлены на Рис. 4. Из полученных графиков видно, что частота, соответствующая максимальному КПД, практически не изменилась, K_{i2} , соответствующий максимуму КПД, увеличился до единицы, что обеспечивает возможность передачи в аккумуляторные батареи требуемой мощности, а фазовый сдвиг между токами сохраняется на уровне 90° .

Коэффициент передачи по току при этом уменьшается до значения 2,25. Таким образом, величина тока первичной обмотки при максимальном отклонении катушек будет составлять 115,5 А.

Оценка безопасности использования беспроводной зарядной станции в шахтной атмосфере

Как отмечалось выше, хотя передача энергии в беспроводной зарядной станции осуществляется бесконтактным способом, что исключает взрывоопасное искрение на токоведущих частях, наличие переменного магнитного поля в воздушном проме-

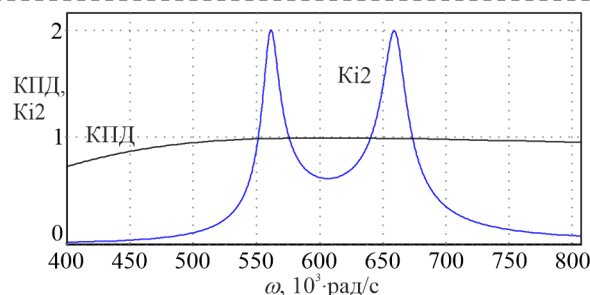


Рис. 2. Зависимости КПД и K_{i2} от угловой частоты
Fig. 2. Efficiency and K_{i2} in a frequency domain

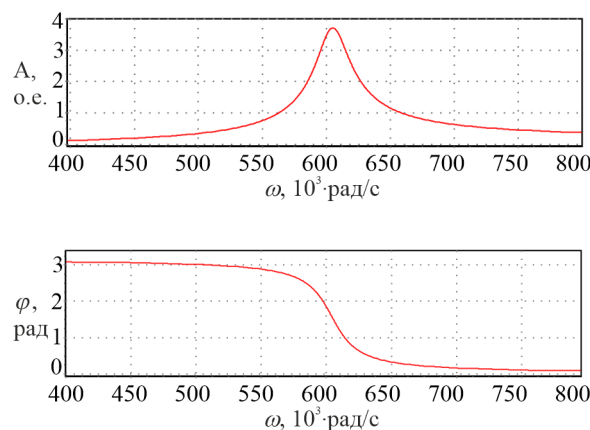


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ при нормальном соосном расположении катушек
Fig. 3. Bode plot of the wireless charger under coils alignment

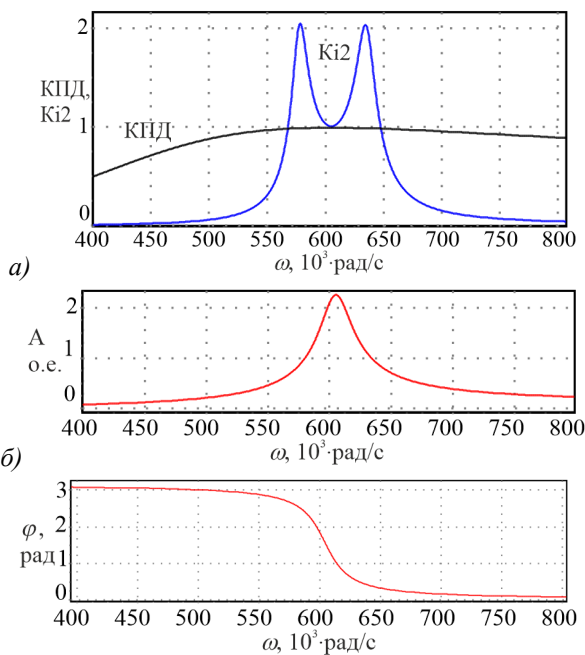


Рис. 4. Характеристики силового канала беспроводной зарядной станции при смещении катушек: а) КПД и K_{i2} от угловой частоты; б) АЧХ и ФЧХ

Fig. 4. The wireless charger parameters under coils misalignment: a) efficiency and K_{i2} in a frequency domain; b) Bode plot

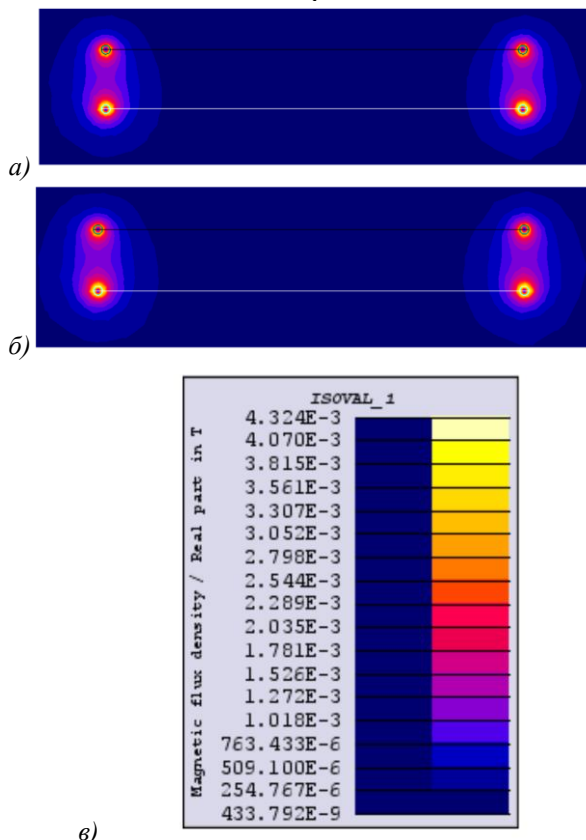


Рис. 5. Распределение индукции магнитного поля в окрестностях катушек: а) при нормальном соосном расположении; б) при смещении на 1 м; в) цветовая шкала магнитной индукции

Fig. 5. The magnetic field density in the vicinity of the coils: a) coils are aligned; b) coils misalignment is 1 m; c) color scale

жутке может способствовать индукционному нагреву посторонних металлических предметов. Методика оценки безопасности по тепловому нагреву беспроводной зарядной станции приведена в [10], где приведены зависимости предельных значений индукции магнитного поля от габаритных размеров посторонних предметов.

Для оценки величины индукции магнитного поля в окрестностях катушек рассматриваемой системы беспроводной зарядной станции была построена компьютерная модель катушек в среде программирования методом конечных элементов Altair Hyperwork, приложение Flux.

На Рис. 5 показаны результаты моделирования, которые проводились для нормального соосного и смещенного расположения катушек с учетом рассчитанных ранее токов и фазового сдвига между ними. Из результатов моделирования видно, что индукция магнитного поля концентрируется в непосредственной близости от проводников катушек. Ее предельное значение для посторонних предметов с габаритами, ограниченными расстоянием между катушками, которое составляет 10 см, и для температурного класса Т1 имеет значение 1,6 мТ [10]. Превышение данной величины ограничено расстоянием от проводников 2,5 см при симметричном позиционировании катушек и 3 см при взаимном смещении катушек на 1 метр.

Таким образом, чтобы гарантированно исключить перегрев металлических предметов, случайно попавших в зону передачи энергии, достаточно сделать барьер радиусом 3 см вокруг проводников, например, залив данное пространство компаундом.

Заключение

В рамках проведенного исследования выполнена оценка возможности применения беспроводной зарядной станции применительно к рудничным электровозам, работающим во взрывоопасной среде. На примере шахтного аккумуляторного электровоза А-5,5-600-У5 показано, что в заданном габарите возможна передача энергии мощностью 34 кВт в соответствии с электрическими характеристиками тяговых аккумуляторов. При этом проведена оценка взрывобезопасности по температурному классу Т1, для достижения которой достаточно сделать физический барьер вокруг проводников катушки радиусом 3 сантиметра.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glatko Y. S., Sultimov R. V., Bondar G. E., Buttaev S. T., Malykh M. N., Myaskov A. V. Robotics in the mining industry // Mining informational and analytical bulletin. 2022. №10-2. P. 147–155.
2. Тарасов П. И., Журавлев А. Г., Черепанов В. А., Разбицкий В. В. Варианты реализации

безлюдных технологий для горнопромышленного транспорта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2013. №1. С. 104–111.

3. Александров С. Н., Бережинский В. И., Будишевский В. А., Мельников С. А. Создание шахтных локомотивов для доставки грузов по путям с невыдержанным и завышенным профилем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S16. С. 215–229.

4. Зиборов К. А., Процив В. В., Шляхов Э. М. Опыт создания и построения семейства секционных шахтных локомотивов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2014. Т. 13, № 13. С. 69–76.

5. Барташевский С. Е., Барташевская Л. И. Обоснование выбора перспективных химических источников тока для шахтных электровозов // Молодой вчений. 2015. № 2-5(17). С. 8–12.

6. Рябко К. А., Сгибнев И. Ю. Сравнительный анализ электрической и дизельной тяги шахтного подземного вспомогательного транспорта // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (Транспромэк 2022). Труды научно-практической конференции, Воронеж, 25 ноября 2022 года. Воронеж, 2022. С. 198–204.

7. Лукиенко Л. В., Каменский М. Н. Повышение эффективности работы шахтных электровозов в наклонных выработках // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 130–139.

8. Klontz K. W., Divan D. M., Novotny D. W., Lorenz R. D. Contactless power delivery system for min-

ing applications. // IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, Vol. 31. No. 1, P. 27–35.

9. Wu H. H., Masquelier M. P. An overview of a 50kW inductive charging system for electric buses. // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, 2015, doi: 10.1109/ITEC.2015.7165747.

10. Завьялов В. М., Дубков Е. А., Семькина 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. С. 3–11.

11. Инновационный шахтный электровоз. URL: <https://tzgsho.ru/catalog/shakhtnyuy-transport/innovatsionnyy-shakhtnyuy-elektrovoz/> (дата обращения: 20.04.2023).

12. Wei Zhang, Chunting Chris Mi. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2016. Vol.65. № 6. P. 4768–4778.

13. Jay S., Zhang W., Mi C. C. Design Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review // in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2021. Vol. 9. № 5. P. 6196–6218.

14. Zavylov V. M., Semykina I. Y., Abeidulin S. A., Dubkov E. A., Veliliaev A. S. Criteria for Choosing of Resonant Circuit Parameters of Wireless Power Transfer Charging System // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2022. Vol. 18. № 1. P. 2236.

15. SAE International Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in // Electric Vehicles and Alignment Methodology (J2954_201904): SAE International: Warrendale, PA, USA. 23 April 2019.

© 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)

Семькина 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), e-mail: arinasemykina@gmail.com

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

Заявленный вклад авторов:

Завьялов В.М., Дубков Е.А., Семькина И.Ю., 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.

THE POSSIBILITY EVALUATION OF USING A WIRELESS CHARGING STATION FOR A MINE ELECTRIC LOCOMOTIVE



Article info

Received:

10 May 2023

Accepted for publication:

15 June 2023

Accepted:

27 June 2023

Published:

11 July 2023

Keywords: battery wireless charger, mining electric locomotive, explosion safety, high frequency magnetic field, simulation.

Abstract.

Wireless chargers based on inductive power transfer (IPT) are promising for charging batteries of mining electric locomotives as they don't require a wire connection between charger and battery, thus there is no possibility of a spark during connection or disconnection that might cause ignition and explosion.

The calculations for mining electric locomotives SDPM-13 showed that the best energy characteristics are obtained using IPT with the coils size of 3x0.7 m, when windings have one turn. The mathematical analysis proved that such a design is sufficient to transfer the required amount of power at a voltage of the power supply source of 380 V. The proposed approach uses the transfer function reflecting the ratio between the primary current and the secondary current that is obtained from the mathematical model describing the power transfer at the wireless charger. This transfer function helped to get the amplitude-frequency response and phase-frequency response under a rated load and both coils alignment and misalignment.

The data obtained were used for computer simulation of the magnetic field density in the vicinity of the coils by the finite element method. The simulation results showed that in order to exclude the heating of foreign metal objects above the maximum surface temperature for equipment of the temperature class T1, it is sufficient to make a physical barrier around the coils wires with a radius of 3 cm.

In general, this research has confirmed the applicability of wireless chargers with IPT for batteries of mining electric locomotives in gaseous-and-dusty mines.

For citation: Zavyalov V.M., Dubkov E.A., Semykina I.Yu., Kolodyazhny V.V. The possibility evaluation of using a wireless charging station for a mine electric locomotive. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2023; 3(167):22-28 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-22-28, EDN: CGKCED

REFERENCES

- Glatko Y.S., Sultimov R.V., Bondar G.E., But-taev S.T., Malykh M.N., Myaskov A.V. Robotics in the mining industry. *Mining informational and analytical bulletin*. 2022; 10–2:147–155.
- Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Cherepanov V.A., Razbitsky V.V. Options of application of deserted mining technologies for mining transport. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 1:104–111.
- Aleksandrov S.N., Bereginiski V.I., Budishevskiy V.A., Melnikov S.A. Creation of mine locomotives for delivery of cargoes by the ways with the inconsistent and overrated profile. *Mining informational and analytical bulletin*. 2009; S16:215–229.
- Ziborov K.A., Protsiv V.V., Shliakhov E.M. Experience of designing and constructing a line of sectional mine locomotives. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2014. Vol. 13, No. 13. P. 69-76.
- Bartashevskiy S.Ye., Bartashevskaya L.I. Justification of choice perspective chemical current sources for mine electric locomotives. *A young scientist*. 2015; 2-5(17):8–12.
- Ryabko K.A., Sgibnev I.Yu. Comparative analysis of electric and diesel traction of underground mine auxiliary transport. *Actual problems and prospects for the development of transport, industry, and the economy of Russia*. Proceedings of the scientific and practical conference, Voronezh, November 25, 2022. Voronezh, 2022. P. 198–204.
- Lukienko L.V., Kamensky M.N. Increase an effectiveness of application mine electric locomotives in inclined mine workings. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*. 2019; 4:130–139.
- Klontz K.W., Divan D.M., Novotny D.W., Lorenz R.D. Contactless power delivery system for mining

applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995; 31(1):27–35.

9. Wu H.H., Masquelier M.P. An overview of a 50kW inductive charging system for electric buses. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*. 2015, doi: 10.1109/ITEC.2015.7165747.

10. 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. *The journal Mining Equipment and Electromechanics*. 2023; 2:3–11.

11. Innovative mining electric locomotive. URL: <https://tzgsho.ru/catalog/shakhtnyy-transport/innovatsionnyy-shakhtnyy-elektrovoz/> (accessed: 20.04.2023).

12. Wei Zhang, Chunting Chris Mi. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer

Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016; 65(6):4768–4778.

13. Jay S., Zhang W., Mi C.C. Design Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021; 9(5):6196–6218.

14. Zavylov V.M., Semykina I.Y., Abeidulin S.A., Dubkov E.A., Veliliaev A.S. Criteria for Choosing of Resonant Circuit Parameters of Wireless Power Transfer Charging System. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2022; 18(1):2236.

15. SAE International Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in. *Electric Vehicles and Alignment Methodology (J2954_201904)*. SAE International: Warrendale, PA, USA. 23 April 2019

© 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. in 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. in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, (299053, Russia, Sevastopol, Str. Universitetskaya 33), T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Str. Vesennaya 28), e-mail: arinasemykina@gmail.com

Vitaliy V. Kolodyazhny, C. Sc. in 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; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

