

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 622.6:629.423.32:62-533.7

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-3-12

Завьялов Валерий Михайлович^{1,2}, Семькина Ирина Юрьевна^{2,*},
Велиляев Амет-хан Станиславович¹, Дубков Евгений Александрович^{1,2},
Губарев Федор Александрович¹, Углова Марина Борисовна¹

¹ Севастопольский государственный университет

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: arinasemykina@gmail.com

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ СТАНЦИИ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРОВ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА



Информация о статье

Поступила:

05 декабря 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 марта 2025 г.

Принята к печати:

10 марта 2025 г.

Опубликована:

24 марта 2025 г.

Ключевые слова:

станция беспроводного заряда, шахтный электровоз, аккумулятор, система управления, частота, широтно-импульсная модуляция, компьютерное моделирование

Аннотация.

Все повышающиеся требования к безопасности и эффективности в горнодобывающей отрасли способствуют внедрению автоматизированных систем и переходу к безлюдным технологиям. Эта тенденция справедлива в том числе для локомотивной откатки с аккумуляторными шахтными электровозами, для заряда которых уже разработаны станции беспроводного заряда, допустимые для использования в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли. Станции беспроводного заряда аккумуляторов шахтного электровоза должны быть управляемыми. В статье приводится краткая классификация подходов, используемых при управлении беспроводной передачей энергии, обосновывается выбор управления по передающей стороне и проводится сравнение систем управления по отклонению тока нагрузки при управлении частотой и при управлении широтно-импульсной модуляцией. Для математического описания станции беспроводного заряда предлагается использовать эквивалентную схему замещения, идеализирующую высокочастотный инвертор и выпрямитель на выходе резонансного контура, а для исследования протекающих в ней процессов – динамическую модель в MatLab Simulink, детализированную до уровня силовых полупроводниковых преобразователей. По результатам моделирования отмечены критические недостатки рассмотренных вариантов и предложена комбинированная система управления, сочетающая управление частотой и управление широтно-импульсной модуляцией.

Для цитирования: Завьялов В.М., Семькина И.Ю., Велиляев А.С., Дубков Е.А., Губарев Ф.А., Углова М.Б. Система управления для станции беспроводного заряда аккумуляторов шахтного электровоза // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 1 (177). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-3-12, EDN: MBWIKW

Введение

Все повышающиеся требования к безопасности и производительности горного производства приводят к активному внедрению полностью автоматических технологий и в перспективе к созданию безлюдной шахты [1, 2]. Целесообразным подходом при этом является адаптация полностью авто-

матических технологий, используемых в других отраслях. В качестве варианта может выступать локомотивная откатка [3, 4], на которую могут быть перенесены беспилотные технологии, разработанные для городского рельсового транспорта [5].

Электрические локомотивы с тяговыми аккумуляторными батареями получают все большее распространение при подземной добыче полезных ископаемых [6, 7], а для заряда аккумуляторов шахтных электровозов могут использоваться станции беспроводного заряда [8, 9]. При этом в работах [10, 11] показано, что использование технологий беспроводного заряда в шахтах, опасных по взрыву газа и пыли, при условии изолирования проводника передающей и приемной катушки на требуемое расстояние является безопасным.

Следует отметить, что станция беспроводного заряда должна обеспечивать стабильно высокий уровень заряда аккумуляторов, поскольку он непосредственно влияет на работу систем автоматического управления тяговых электроприводов, обеспечивающих формирование требуемого тягового усилия, которое может существенно варьироваться в зависимости от профиля пути, коэффициента сцепления с рельсами и других факторов [12]. Это означает, что станция беспроводного заряда для аккумуляторов шахтного электровоза должна быть управляемой.

Способы управления беспроводной передачей энергии

В станциях беспроводного заряда стационарного типа возможно применение различных подходов к управлению беспроводной передачей энергии [13]. В зависимости от типа силовых полупроводниковых преобразователей управление может осуществляться по передающей цепи, используя высокочастотный инвертор; по приемной цепи, исполь-

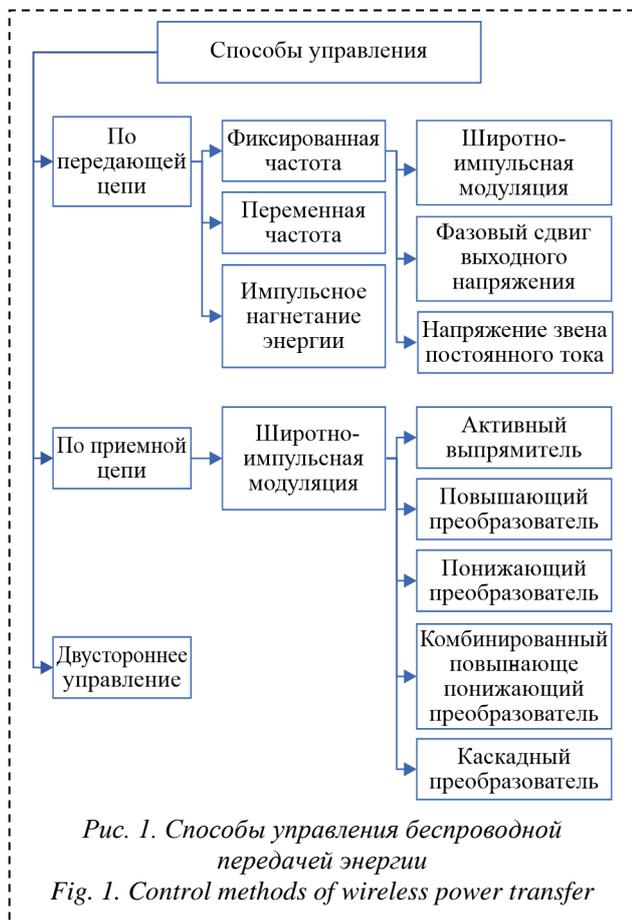


Рис. 1. Способы управления беспроводной передачей энергии

Fig. 1. Control methods of wireless power transfer

зуя выпрямитель или вспомогательные преобразователи в цепи аккумуляторной батареи; может быть реализовано двусторонним, т. е. с задействованием возможности схемотехнических решений и приемной и передающей цепи (Рис. 1).

При выборе способа управления необходимо учитывать несколько факторов:

Обратные связи. Ввиду отсутствия проводных каналов связи передача информации о состоянии приемных цепей на передающую сторону может усложнить систему управления. В данной работе предполагаем, что на принимающей стороне организовано измерение регулируемой величины, а обратная связь организована беспроводным способом посредством информационного радиоканала.

Габариты. Установка дополнительного оборудования на шахтном электровозе может быть затруднительна с учетом конечного объема взрывозащищенного аккумуляторного отсека. Это ограничивает управление по приемной цепи.

В данной работе отдается предпочтение управлению по передающей цепи. Этот способ может быть реализован с фиксированной частотой резонансного контура, с переменной частотой и с импульсным нагнетанием энергии. Последний вариант предполагает использование нетрадиционной конструкции высокочастотного инвертора [14].

При управлении с переменной частотой скважность импульсов γ на выходе высокочастотного инвертора поддерживается постоянной на уровне 50%, а частота переключения изменяется для регулирования выходной мощности [15]. Однако, если рабочая частота сильно отличается от резонансной, возможно как значительное повышение выходного тока, так и чрезмерное снижение КПД всей системы η .

Для управления при фиксированной частоте используется широтно-импульсная модуляция, управление фазовым сдвигом напряжения на выходе высокочастотного инвертора [16] либо управление постоянным напряжением U_m в звене постоянного тока высокочастотного инвертора [17]. Широтно-импульсная модуляция среди этих способов является наиболее простым и распространенным.

Управление может осуществляться в разомкнутом режиме либо с применением разных типов обратных связей [18-20].

Анализ вариантов одноконтурных систем управления

В данной работе сравниваются два варианта управления по отклонению тока нагрузки от заданного значения: при управлении частотой и при управлении широтно-импульсной модуляцией.

Объект управления будем описывать с помощью эквивалентной схемы замещения станции беспроводного заряда (Рис. 2), где u_1 – напряжение на выходе высокочастотного инвертора; u_{C1} , u_{C2} – напряжения на конденсаторах соответственно в первичной и вторичной цепях; i_1 , i_2 – токи первичной и вторичной цепей, причем i_2 эквивалентен току нагрузки; R_1 , R_2 , C_1 , C_2 – активные сопротивления и емкости первичной и вторичной цепей; L_1 , L_2 – индуктивности первичной и вторичной ка-

тушек; M – взаимная индуктивность; R_{load} – эквивалентное сопротивление аккумуляторной батареи, которое рассчитывается как отношение номинального напряжения к зарядному току; C_3 – емкость

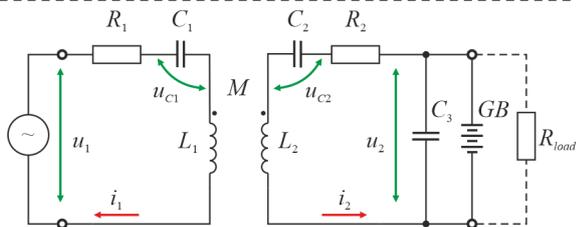


Рис. 2. Схема замещения объекта управления
Fig. 2. Equivalent circuit of the control object

выходного фильтра, включенного параллельно нагрузке и сглаживающего пульсации выпрямленного тока.

Работа объекта управления в частотной области определяется характеристиками, представленными на Рис. 3 на примере станции беспроводного заряда с параметрами, показанными в Таблице 1. Важно отметить, что максимум η не совпадает по частоте ни с первым, ни со вторым максимумом коэффициента передачи по току i_2/u_1 и находится между ни-

Таблица 1. Параметры станции беспроводного заряда

Table 1. The wireless charging station parameters

P , кВт	U_m , В	L_1, L_2 , мкГн	M , мкГн	R_1, R_2 , мОм	C_1, C_2 , мкФ	R_{load} , Ом	C_3 , мкФ
3,6	150	24	5,3	14,8	0,112	2,8	1000

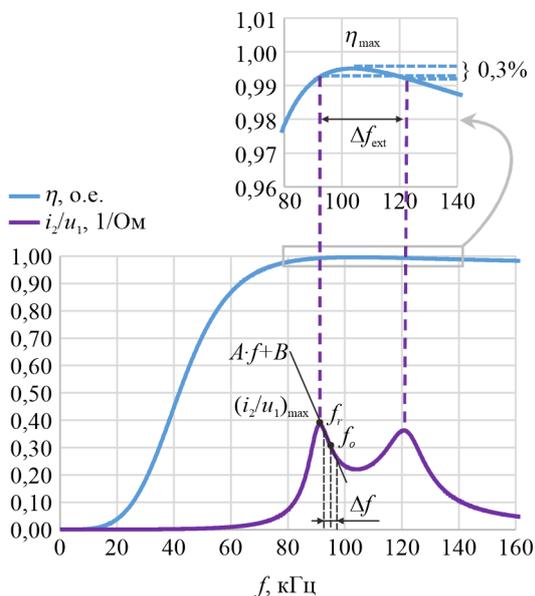


Рис. 3. Частотные характеристики объекта управления
Fig. 3. Frequency response for the control object

ми. При этом в диапазоне частот Δf_{ext} значение η изменяется до 0,3% от η_{max} . В то же время максимум η близок по частоте к минимуму i_2/u_1 .

Таким образом, область изменения рабочей частоты f должна лежать выше первого максимума коэффициента передачи по току i_2/u_1 в диапазоне Δf , соответствующем 70-90% от $(i_2/u_1)_{max}$, в пределах линейного участка, совпадающего с характери-

стикой $A \cdot f + B$, для обеспечения стабильной работы системы.

Исходя из описанных свойств станции беспроводного заряда, варианты структуры ее системы управления при управлении частотой и при управлении широтно-импульсной модуляцией показаны на Рис. 4. Беспроводная передача информации по радиоканалу учтена звеном чистого запаздывания в обратной связи.

При управлении частотой скважность устанавливается на опорном значении γ_0 , равном 50%, а частота f варьируется пропорционально-

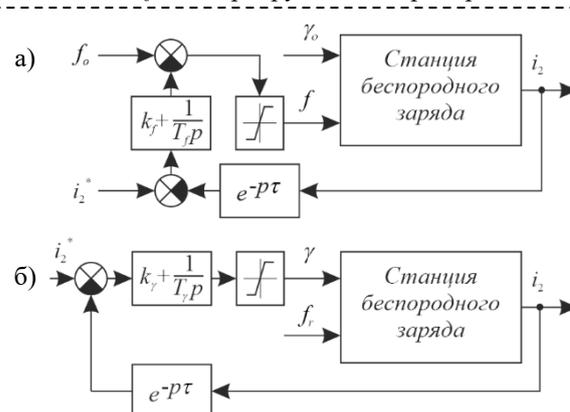


Рис. 4. Структура системы управления:
а) при управлении частотой;

б) при управлении широтно-импульсной модуляцией

Fig. 4. Block diagram of the control system:
a) under frequency control; b) under PWM-control

интегральным регулятором относительно опорной частоты f_0 , лежащей по центру диапазона Δf .

При управлении широтно-импульсной модуляцией скважность γ варьируется пропорционально-интегральным регулятором в границах от 0 до 100 %, а частота устанавливается равной f_r , соответствующей максимуму коэффициента передачи по току $(i_2/u_1)_{max}$.

Оба описанных варианта управления построены с использованием типовых линейных регуляторов, настройка которых стандартными методами возможна лишь для линейных объектов. Однако рассматриваемый объект управления можно считать линейным только принимая ряд допущений, идеализирующих в том числе высокочастотный инвертор и выпрямитель на выходе резонансного контура, тогда как управление и частотой, и скважностью осуществляется по нелинейному каналу. Данное противоречие можно разрешить с помощью линеаризации, а также принципа разделения процессов на быстрые и медленные [21].

Для резонансного контура $C_1-L_1-L_2-C_2$, посредством которого передается энергия, динамика процессов будет определяться рабочей частотой, значение которой варьируется в окрестностях 90 кГц (период порядка 10 мкс). Для выходного фильтра постоянная времени T будет определяться емкостью C_3 и эквивалентным сопротивлением R_{load} . Так, при использовании сглаживающего конденсатора емкостью 1000 мкФ и величиной эквивалент-

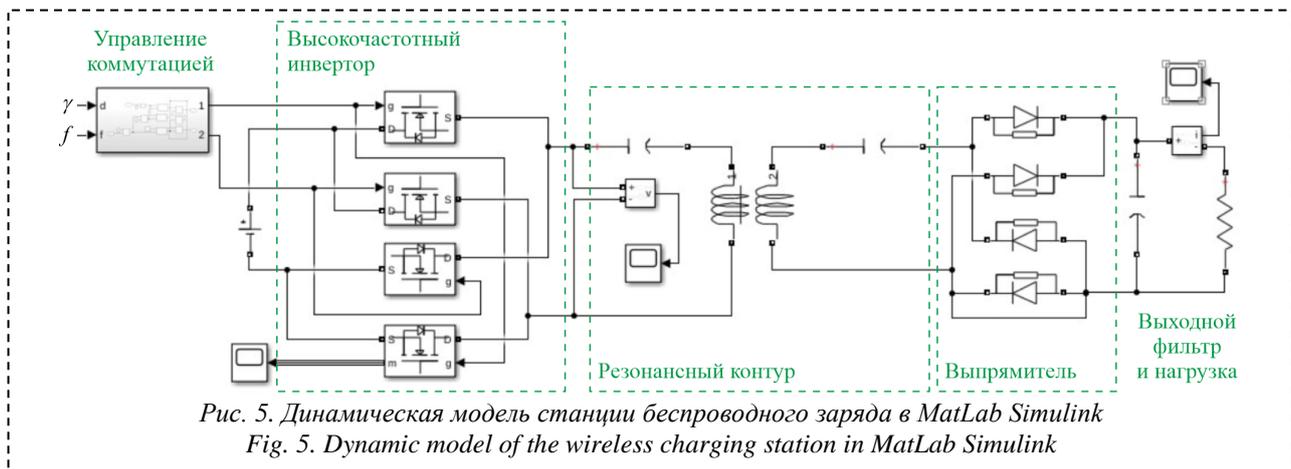


Рис. 5. Динамическая модель станции беспроводного заряда в MatLab Simulink
 Fig. 5. Dynamic model of the wireless charging station in MatLab Simulink

ного сопротивления 2,8 Ом T составит 2800 мкс, что на два порядка выше периода колебаний в резонансном контуре. В таком случае разделение процессов на быстрые и медленные правомерно, а

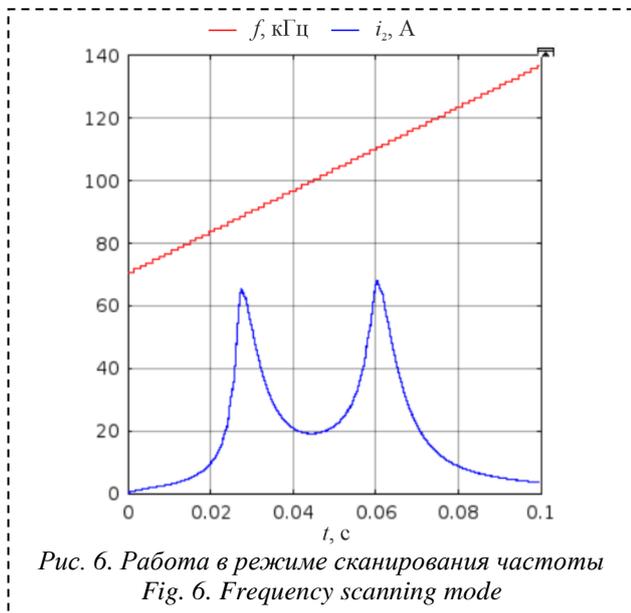


Рис. 6. Работа в режиме сканирования частоты
 Fig. 6. Frequency scanning mode

для настройки системы управления достаточно учитывать только динамические процессы в выходной цепи.

Для проверки сказанного проведем моделирование станции беспроводного заряда с помощью динамической модели в MatLab Simulink (Рис. 5), адекватность которой подтверждена в [10], в режиме сканирования частоты при постоянной скважности 50%. Полученный график переходного процесса тока i_2 (Рис. 6) соответствует по форме частотным характеристикам на Рис. 3 и не отражает динамики в масштабе десятков микросекунд, при том, что переходные процессы в резонансном контуре моделируются в полном объеме. Это подтверждает правомерность разделения процессов на быстрые и медленные и позволяет настроить пропорционально-интегральные регуляторы по критерию требуемого быстродействия.

Настройка регулятора при управлении частотой проводилась для линеаризованного объекта управления:

$$\frac{i_2}{f} = \frac{A \cdot \gamma_o U_m}{Tp + 1}, \quad (1)$$

передаточный коэффициент которого соответствует уравнению $A \cdot f + B$ при переходе от коэффициента передачи по току i_2/u_1 к регулируемой величине i_2 через опорную скважность γ_o и напряжение в звене постоянного тока высокочастотного инвертора U_m .

Полученная передаточная функция регулятора частоты:

$$W_f = \frac{4T}{A\gamma_o U_m t^*} + \frac{4}{A\gamma_o U_m t^* p} \quad (2)$$

где t^* – желаемая длительность переходного процесса, выбранная равной 0,01 с.

Настройка регулятора при управлении широтно-импульсной модуляцией так же проводилась для линеаризованного объекта управления. При этом прямоугольные двухполюсные импульсы напряжения, формируемого высокочастотным инвертором, раскладывались в ряд Фурье:

$$u_1(2\pi f_r t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\sin \frac{\gamma\pi}{2} \cos 2\pi f_r t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\gamma\pi}{2} \cos 3 \cdot 2\pi f_r t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\gamma\pi}{2} \cos 5 \cdot 2\pi f_r t + \dots \right), \quad (3)$$

где U_m – напряжение в звене постоянного тока высокочастотного инвертора.

Тогда при допущении, что основной вклад в беспроводную передачу энергии вносит первая гармоническая составляющая, а линеаризация проводится методом секущей по границам рабочего диапазона, объект управления описывается выражением:

$$\frac{i_2}{\gamma} = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} \frac{U_m R_{load}}{Tp + 1}, \quad (4)$$

а передаточная функция регулятора скважности:

$$W_f = \frac{\pi T}{U_m R_{load} t^*} + \frac{\pi}{U_m R_{load} t^* p}. \quad (5)$$

Результаты моделирования обоих вариантов систем управления приведены на Рис. 7. При моделировании предполагалось, что в случае неточного позиционирования электровоза относительно расцепного зарядного положения, т. е. при смещении приемной катушки относительно передающей ве-

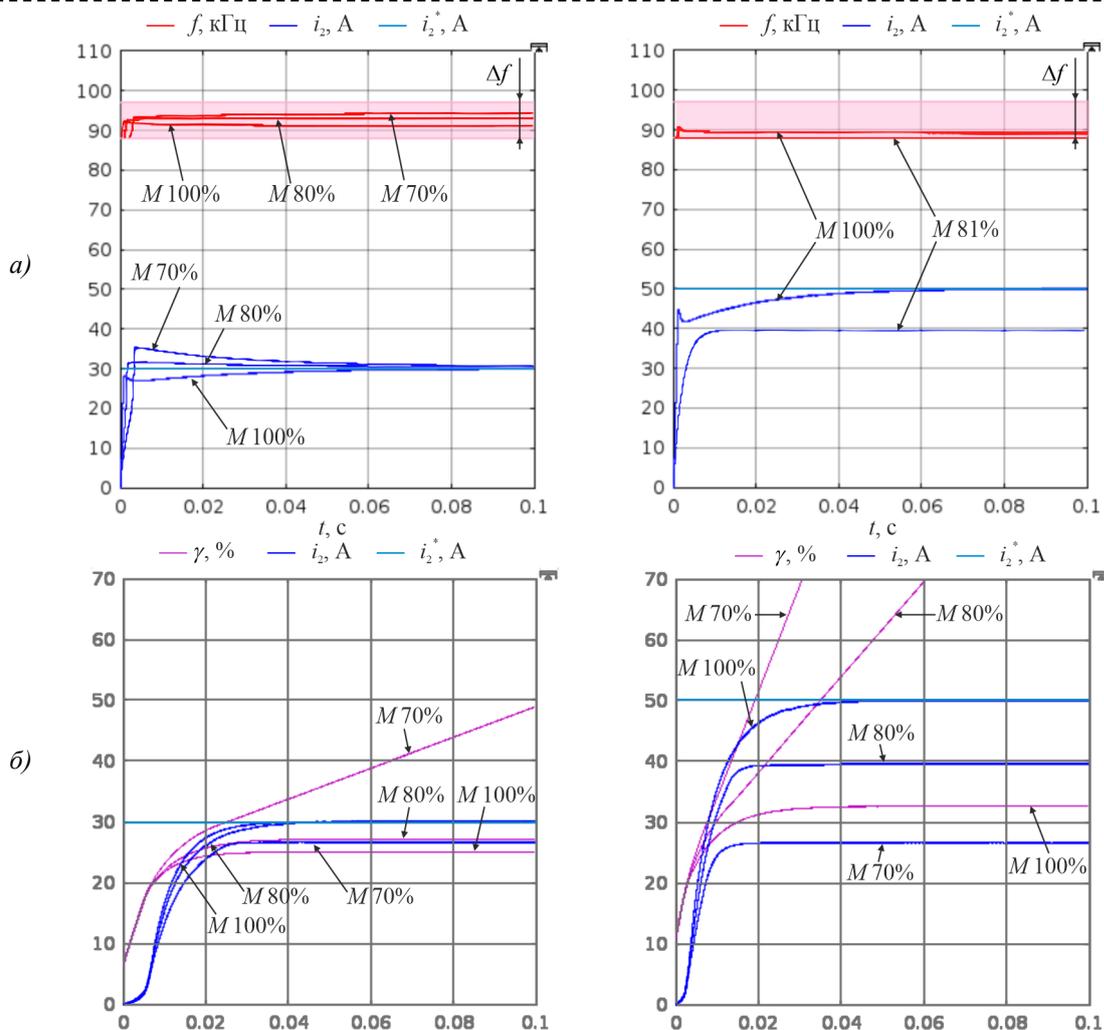


Рис. 7. Результаты моделирования: а) при управлении частотой; б) при управлении широтно-импульсной модуляцией
 Fig. 7. Simulation results: a) under frequency control; b) under PWM-control

личина взаимной индуктивности между катушками снизится относительно исходного значения. Обозначения вида M 100% на Рис. 7 показывают, при какой доле M от исходного значения, указанного в Таблице 1, проведен вычислительный эксперимент. Ступенчатый характер графиков $f(t)$ и $\gamma(t)$ обусловлен дискретизацией по времени управляющих сигналов на входе станции беспроводного заряда.

Следует отметить, что при исходных параметрах и заданном выходном токе i_2^* , близком к номинальному значению $i_{2н}$, равному 36 А, все рассмотренные варианты управления обеспечивают достаточно высокую точность i_2 . Но и увеличение i_2^* , и отклонение M от исходного значения провоцируют проявление нелинейных эффектов.

Так, при управлении частотой и $i_2^*=30$ А снижение M проявляется в повышении установившегося значения f , но даже при M менее 70% от исходного значения частота не достигает границ диапазона Δf , тогда как при $i_2^*=50$ А проявления граничного эффекта возникают уже при снижении M до 81%.

Аналогично при регулировании широтно-импульсной модуляцией и $i_2^*=30$ А снижение M проявляется в повышении установившегося значения γ , а при M менее 78% регулирующей способности широтно-импульсной модуляции оказывается

недостаточно для поддержания i_2 на заданном уровне. В случае $i_2^*=50$ А данный эффект проявляется уже при M менее 85%.

Основной причиной наблюдаемых эффектов является существенная нелинейность частотной характеристики коэффициента передачи по току i_2/u_1 , линеаризация которой допустима только в ограниченном диапазоне значений управляющих воздействий, при том, что изменение M провоцирует смещение границ Δf_{ext} . Следовательно, типовые линейные регуляторы заведомо неспособны обеспечить необходимое качество управления станцией беспроводного заряда аккумуляторов шахтного электровоза в реальных условиях, а система управления беспроводной передачей энергии должна либо иметь в своем составе нелинейные регуляторы, либо обладать свойствами адаптивности к изменению M .

Комбинированная система управления

Учитывая полученные результаты, предложена комбинированная система управления (Рис. 8) с переменной структурой, обеспечивающая адаптивность к изменению M .

В начальном положении переключателей управление станцией беспроводного заряда осуществляется в разомкнутом режиме путем сканиро-

вания частоты начиная с опорного значения f_0 , задаваемого на уровне $0,9 f_r$, при постоянном опорном значении скажности γ_0 , равном 20%. Одновременно производится контроль измеренного тока нагрузки $i_2^{[t]}$ в сравнении со значением $i_2^{[t+T]}$, задержанным на время T . Таким образом обеспечивается поиск частоты f , соответствующей максимальному значению i_2 , и при снижении разницы между $i_2^{[t]}$ и $i_2^{[t+T]}$ до величины порогового значения Δi_2 , принятого 0,5% от $i_{2н}$, производится переключение положения переключателей, а f прекращает меняться. Тем самым система управления переводится в режим работы по отклонению при управлении широтно-импульсной модуляцией, отличающийся от схемы на Рис. 6, б) тем, что рабочая частота f гарантированно соответствует максимуму i_2 на частотной характеристике, обеспечивая при любом M максимально возможную регулируемую способ-

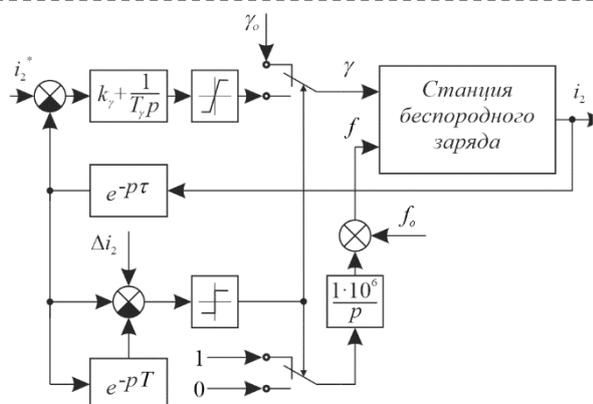


Рис. 8. Структура комбинированной системы управления

Fig. 8. Block diagram of the combined control system

ность.

Результаты моделирования предложенной комбинированной системы управления приведены на Рис. 9. Они показывают, что снижение M независимо от i_2^* провоцирует повышение установившихся значений f и γ , а также усиление фронта нарастания i_2 после переключения, при том, что точность регулирования остается неизменной. При этом для меньших значений i_2^* характерна меньшая изменчивость.

Таким образом, предложенная комбинированная система обеспечивает управление током нагрузки во всем рассматриваемом диапазоне его изменения, в том числе при снижении M . Однако следует отметить, что характер переходного процесса $i_2(t)$ заведомо немонотонный, а при некоторых условиях переключение структуры системы управления провоцирует дополнительную колебательность. Кроме того, выбранные значения f_0 , γ_0 и Δi_2 также влияют на показатели переходных процессов и нуждаются в дополнительной настройке, которую затруднительно выполнить аналитически.

Заключение

В рамках проведенного исследования выполнен анализ способов управления беспроводной передачей энергии, применимых для станции беспроводного заряда аккумуляторов шахтного электровоза.

На примере станции беспроводного заряда мощностью 3,6 кВт детально проанализированы свойства одноконтурных систем управления по отклонению тока нагрузки от заданного значения при управлении частотой и при управлении широтно-импульсной модуляцией. С помощью моделирования в MatLab Simulink установлена правомерность разделения протекающих процессов на быстрые и медленные, и по критерию требуемого быстродействия выполнена настройка пропорционально-интегральных регуляторов в составе рассматриваемых систем управления. Показано, что в случае неточного позиционирования электровоза относительно расчетного зарядного положения нелинейные свойства станции беспроводного заряда не позволяют системам управления с типовыми ли-

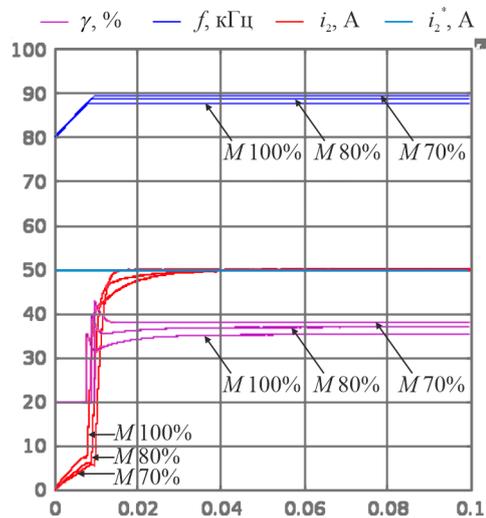
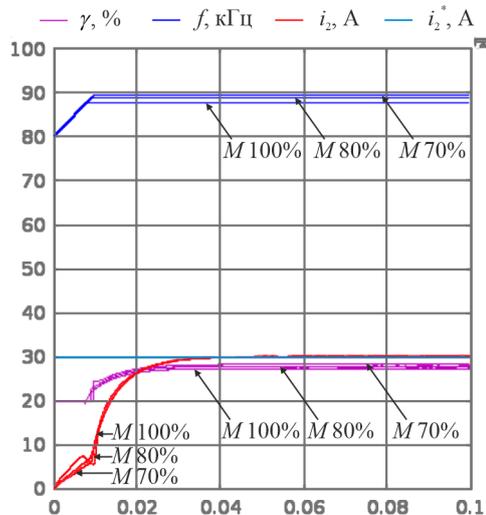


Рис. 9. Результаты моделирования комбинированной системы управления
Fig. 9. Simulation results under the combined control system

нейными регуляторами обеспечить необходимое качество управления.

Предложена комбинированная система управления с переменной структурой, адаптивная к изменениям взаимной индуктивности (неточному позиционированию на зарядной площадке) и обеспечивающая управление током нагрузки во всем

рассматриваемом диапазоне его изменения. В то же время ее настроечные параметры существенно влияют на показатели качества переходных процессов, а методы их выбора нуждаются в дополнительном исследовании.

Другим направлением дальнейшего исследования является синтез нелинейных регуляторов системы управления беспроводной передачей энергии, а также разработка методов самонастройки регуляторов в условиях изменения взаимной индуктивности с использованием методов идентификации параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Glatko Y. S., Sultimov R. V., Bondar G. E., Butaev S. T., Malykh M. N., Myaskov A. V. Robotics in the mining industry // Mining informational and analytical bulletin. 2022. № 10-2. Pp. 147–155.
- Li Jian, Kai Zhan. Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment // Engineering. 2018. Vol. 4. № 3. Pp. 381–391.
- 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.
- 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.
- Kaige Guo, Jin Zhou, Xiaoming Zhang, Di Sun, Zishuo Wang, Lixian Zhao. Analysis on Operational Safety and Efficiency of FAO System in Urban Rail Transit // Computers, Materials and Continua. 2023. Vol. 77. № 3. Pp. 3677–3696.
- 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, 2022. С. 198–204.
- 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.
- Sadeq Ali Qasem Mohammed, Jin-Woo Jung. A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 19572–19585.
- Cirimele V., Diana M., Freschi F., Mitolo M. Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. № 5. P. 4069–4079.
- Завьялов В. М., Семькина И. Ю., Дубков Е. А., Велиляев А. С. Система беспроводного заряда аккумуляторов для рудничного электровоза // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 428–442.
- 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.
- Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 114–121.
- Huynh P. S., Ronanki D., Vincent D., Williamson S. S. Overview and comparative assessment of single-phase power converter topologies of inductive wireless charging systems // Energies. 2020. Vol. 13. № 9. P. 2150.
- Wang Y., Dong L., Liao X., Ju X. [et al.] A pulse energy injection inverter for the switch-mode inductive power transfer system // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2017. Vol. 65. № 7. Pp. 2330–2340.
- Moghaddami M., Sundararajan A., Sarwat A.I. A power-frequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. Vol. 54. № 2. Pp. 1773–1783.
- Song K., Li Z., Du Z., Wei G., Zhu C. Design for constant output voltage and current controllability of primary side controlled wireless power transfer system // 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Chongqing, China, 2017. Pp. 1-6.
- Song K., Li Z., Du Z., Wei G. [et al.] Mistuning-tolerant and controllable power supply for roadway wireless power systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 32. № 9. Pp. 6689–6699.
- Xiao Y., Liu C. Direct load voltage control for electrolytic capacitorless wireless power transfer system without DC/DC converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Vol. 68. № 9. Pp. 8039–8048.
- Yeo T. D., Kwon D., Khang S. T., Yu J. W. Design of maximum efficiency tracking control scheme for closed-loop wireless power charging system employing series resonant tank // IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 32. № 1. Pp. 471–478.
- Baiyi L., Wei C., Chenjian H. Practical method for self-adaptive voltage stabilising of high-frequency wireless power transfer system // IET Power Electronics. 2020. Vol. 13. № 5. Pp. 936–941.
- Панкратов В. В., Нос О. В., Зима Е. А. Избранные разделы теории автоматического управления. Новосибирск : НГТУ, 2011. 222 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Завьялов Валерий Михайлович, заведующий кафедрой, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-9864>, e-mail: vmzavyalov@mail.sevsu.ru

Семыкина Ирина Юрьевна, старший научный сотрудник, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Велиляев Амет-хан Станиславович, аспирант, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3944-4042>, e-mail: asvelilyaev@mail.sevsu.ru

Дубков Евгений Александрович, старший преподаватель, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), научный сотрудник, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), к.т.н, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0065-8681>, e-mail: EADubkov@mail.sevsu.ru

Губарев Федор Александрович, профессор, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), д.т.н, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7499-6109>, e-mail: FAGubarev@mail.sevsu.ru

Углова Марина Борисовна, старший преподаватель, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9861-2828>, e-mail: mbuglova@mail.sevsu.ru

Заявленный вклад авторов:

Завьялов Валерий Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент.

Семыкина Ирина Юрьевна – концептуализация исследования, написание текста, выводы.

Велиляев Амет-хан Станиславович – сбор и анализ данных (моделирование).

Дубков Евгений Александрович – обзор соответствующей литературы.

Губарев Федор Александрович – сбор и анализ данных (передача данных по беспроводному каналу).

Углова Марина Борисовна – сбор и анализ данных (обработка графиков).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-3-12

Valery M. Zavyalov^{1,2}, **Irina Yu. Semykina**^{2,*}, **Amet-han S. Velilyaev**¹, **Evgeniy A. Dubkov**^{1,2}, **Fedor A. Gubarev**^{1,2}, **Marina B. Uglova**¹

¹ Sevastopol State University

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: arinasemykina@gmail.com

THE CONTROL SYSTEM OF A WIRELESS CHARGING STATION FOR MINE ELECTRIC LOCOMOTIVE BATTERIES



Article info

Received:

05 December 2024

Accepted for publication:

Abstract.

The increase in safety and efficiency requirements in the mining industry drives the implementation of automated systems and the transition to unmanned technologies. This trend is also true for locomotive haulage with battery-powered mine electric locomotives. Wireless charging stations have already been developed for their charging and safety has been confirmed for use in gaseous-and-dusty mines. Wireless charging stations for mine electric locomotive batteries must be controllable. The article provides a brief classification of control approaches used in wireless power transfer,

01 March 2025

Accepted:

10 March 2025

Published:

24 March 2025

Keywords: battery wireless charger, mining electric locomotive, battery, control system, frequency, pulse width modulation, computer simulation.

substantiates the choice of control on the transmitting side, and compares two closed loop control systems for load current: with frequency control and with pulse-width modulation control. It is proposed to use the equivalent circuit idealizing a high-frequency inverter and a rectifier at the output of the resonant circuit for the mathematical description of the wireless charging station, but for the processes study the dynamic model in MatLab Simulink detailed to the level of power semiconductor converters is used. Based on the modeling results, critical shortcomings of the considered options are noted and the control system is proposed combining frequency control and pulse-width modulation control.

For citation: Zavyalov V.M., Semykina I.Yu., Velilyaev A.S., Dubkov E.A., Gubarev F.A., Uglova M.B. The control system of a wireless charging station for mine electric locomotive batteries. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2025; 1(177):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-3-12, EDN: MBWIKW

REFERENCES

1. Glatko Y.S., Sultimov R.V., Bondar G.E., Butaev S.T., Malykh M.N., Myaskov A.V. Robotics in the mining industry. *Mining informational and analytical bulletin*. 2022; 10-2:147–155.
2. 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.
3. Aleksandrov S.N., Bereginitskiy 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.
4. 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; 13(13):69–76.
5. Kaige Guo, Jin Zhou, Xiaoming Zhang, Di Sun, Zishuo Wang, Lixian Zhao. Analysis on Operational Safety and Efficiency of FAO System in Urban Rail Transit. *Computers, Materials and Continua*. 2023; 77(3):3677–3696.
6. 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, 2022. Pp. 198–204.
7. Lukienko L.V., Kamensky M.N. Increase an effectiveness of application mine electric locomotives in inclined mine workings. *Izvestija Tula State University. Sciences of Earth*. 2019; 4:130–139.
8. Sadeq Ali Qasem Mohammed, Jin-Woo Jung. A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues. *IEEE Access*. 2021; 9:19572–19585.
9. Cirimele V., Diana M., Freschi F., Mitolo M. Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(5):4069–4079.
10. Zavyalov V.M., Semykina I.Yu., Dubkov E.A., Velilyaev A.S. The wireless charging system for mining electric locomotives. *Journal of Mining Institute*. 2023; 261:428–442.
11. 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. *The journal Mining Equipment and Electromechanics*. 2023; 3(167):22–28.
12. Borisov S.V., Koltunova E.A., Kladiev S.N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotive simulation model structure improvement. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247:114–121.
13. Huynh P.S., Ronanki D., Vincent D., Williamson S.S. Overview and comparative assessment of single-phase power converter topologies of inductive wireless charging systems. *Energies*. 2020; 13(9):2150.
14. Wang Y., Dong L., Liao X., Ju X. [et al.] A pulse energy injection inverter for the switch-mode inductive power transfer system. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2017; 65(7):2330–2340.
15. Moghaddami M., Sundararajan A., Sarwat A.I. A power-frequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 54(2):1773–1783.
16. Song K., Li Z., Du Z., Wei G., Zhu C. Design for constant output voltage and current controllability of primary side controlled wireless power transfer system. *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. Chongqing, China, 2017. Pp. 1–6.
17. Song K., Li Z., Du Z., Wei G. [et al.] Mistuning-tolerant and controllable power supply for roadway wireless power systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016; 32(9):6689–6699.
18. Xiao Y., Liu C. Direct load voltage control for electrolytic capacitorless wireless power transfer system without DC/DC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020; 68(9):8039–8048.
19. Yeo T.D., Kwon D., Khang S.T., Yu J.W. Design of maximum efficiency tracking control scheme

for closed-loop wireless power charging system employing series resonant tank. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016; 32(1): 471–478.

20. Baiyi L., Wei C., Chenjian H. Practical method for self-adaptive voltage stabilising of high-frequency

wireless power transfer system. *IET Power Electronics*. 2020; 13(5):936–941.

21. Pankratov V.V., Nos O.V., Zima E.A. Selected sections of automatic control theory. Novosibirsk: NSTU; 2011. 222 p.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Valery M. Zavyalov, Head of Department, Sevastopol State University (33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia), Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russia), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-9864>, e-mail: vmzavyalov@mail.sevsu.ru

Irina Yu. Semykina, senior researcher, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Amet-han S. Velilyaev, postgraduate student, Sevastopol State University (299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3944-4042>, e-mail: asvelilyaev@mail.sevsu.ru

Evgeniy A. Dubkov, senior lecturer, Sevastopol State University (299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33), researcher, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), C. Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0065-8681>, e-mail: EADubkov@mail.sevsu.ru

Fedor A. Gubarev, professor, Sevastopol State University (299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7499-6109>, e-mail: FAGubarev@mail.sevsu.ru

Marina B. Uglova, senior lecturer, Sevastopol State University (299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya str., 33), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9861-2828>, e-mail: mbuglova@mail.sevsu.ru

Contribution of the authors:

Valery M. Zavyalov – formulation of a research task, scientific management.

Irina Yu. Semykina – conceptualization of research, writing text, conclusions.

Amet-han S. Velilyaev – data collection and analysis (simulation).

Evgeniy A. Dubkov – review of relevant literature.

Fedor A. Gubarev – data collection and analysis (data transmission via a wireless channel).

Marina B. Uglova – data collection and analysis (graph processing).

Authors have read and approved the final manuscript.

