

УДК 629.3.082

К ВОПРОСУ О БЕСПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Шатманов О.Т., Исманов Ю.Х., Айдаралиев Ж.К., Барпиев Б.Б.

*Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры
им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i_yusupjan@mail.ru*

Беспроводная зарядка электромобилей в режиме движения транспортного средства позволяет максимально увеличить длину пробега этого электромобиля. Однако часто, особенно в сложных дорожных условиях, важнейшим фактором длительности движения транспортного средства является оптимальная система подзарядки. То есть задача сводится к возможности управления режимом подзарядки зарядных станций непосредственно из электромобиля. В данной статье предлагается схема управления режимом подзарядки, в которой используется только информация, имеющаяся в транспортном средстве. Указанная схема позволяет оценить напряжение зарядки на стороне зарядной станции, используя характеристики напряжения, тока и мощности, выводимые на контрольные устройства электромобиля. Если говорить о широко используемых методах беспроводной зарядки электромобилей, то они основываются на регулировании характеристик зарядки электромобиля на стороне транспортного средства, как следствие необходимости подстройки к характеристикам наземной зарядной станции. Характеристики зарядки наземного устройства, в свою очередь должны подстраиваться под эталонные значения. Все это в конечном счете приводит к значительному усложнению наземных станций зарядки электромобилей. Предлагаемая схема позволяет проводить оценку напряжения на стороне зарядной станции, что позволяет исключить регулирование напряжения от зарядных станций. Наземные станции при этом значительно упрощаются.

Ключевые слова: электромобиль, беспроводная зарядка транспортных средств, регулирование напряжения, мощность зарядки, напряжение, ток

TO THE QUESTION OF A WIRELESS ENERGY TRANSMISSION SYSTEM FOR ELECTRIC CARS

Shatmanov O.T., Ismanov Yu.Kh., Aydaraliev Zh.K., Barpiev B.B.

*Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov,
Bishkek, e-mail: i_yusupjan@mail.ru*

Wireless charging of electric vehicles in vehicle driving mode allows you to maximize the mileage of this electric vehicle. However, often, especially in difficult road conditions, the most important factor in the duration of the vehicle is the optimal recharging system. That is, the task boils down to the ability to control the charging mode of charging stations directly from an electric vehicle. This article proposes a charging mode control scheme that uses only the information available in the vehicle. This scheme allows you to evaluate the charging voltage on the side of the charging station, using the characteristics of voltage, current and power output to the control devices of the electric vehicle. If we talk about the widely used methods of wireless charging of electric vehicles, they are based on regulating the charging characteristics of the electric vehicle on the vehicle side, as a consequence of the need to adjust to the characteristics of the ground charging station. The charging characteristics of the ground device, in turn, must be adjusted to the reference values. All this, ultimately, leads to a significant complication of ground-based charging stations for electric vehicles. The proposed circuit allows the assessment of voltage on the side of the charging station, which eliminates the regulation of voltage from the charging stations. Ground stations are greatly simplified.

Keywords: electric car, wireless charging of vehicles, voltage regulation, charging power, voltage, current

Электромобили (электромобили) имеют не только экологические преимущества, но также более широкие возможности контроля движения. Их электродвигатели обладают преимуществами более быстрого и точного отклика на крутящий момент по сравнению с двигателями внутреннего сгорания [1–3]. Тем не менее электромобили необходимо часто заряжать из-за их ограниченного пробега после зарядки. Поэтому важным моментом при эксплуатации электромобилей является наличие широкой сети зарядных устройств, подзарядка на которых должна максимально снизить нагрузку на пользователя [4–6].

Беспроводная передача энергии (БПЭ) может облегчить сложные операции зарядки посредством исключения использования проводки. В последние годы динамическая система БПЭ для электромобилей привлекает все большее внимание. Эта система позволит увеличить дальность пробега электромобилей после каждой зарядки и уменьшить размеры аккумуляторов электромобилей. Однако при применении электромобилей на неровных дорогах и на больших расстояниях важно максимально упростить наземные сооружения зарядки электромобилей. Кроме того, очень эффективная и стабильная подача энергии должна

быть достигнута независимо от изменения положения приемника, который оборудован в транспортном средстве. БПЭ посредством магнитно-резонансной связи может обеспечить высокоэффективную передачу на расстояния до двух десятков см и обладает устойчивостью к смещению передатчика и приемника. Эффективность передачи и мощность зарядки определяются не только параметрами передатчика и приемника, но и нагрузкой. Состояние нагрузки можно контролировать с помощью преобразователя постоянного тока на стороне электроавтомобиля. То есть возможно регулирование напряжения на стороне транспортного средства для максимизации эффективности [7–9]. Однако этот метод управления должен также регулировать напряжение на наземных устройствах зарядки, что приводит к их значительному усложнению. Поэтому желательно использовать метод управления, основанный на оценке напряжения только со стороны наземных устройств зарядки с использованием только информации об электроавтомобиле. Такой способ позволяет контролировать мощность зарядки независимо от напряжения на наземных устройствах зарядки, поэтому исключается необходимость его регулирования. В результате наземные объекты могут быть упрощены.

Беспроводная передача энергии посредством магнитно-резонансной связи

В качестве эффективной системы зарядки предполагается использовать топологию последовательных схем БПЭ посредством магнитно-резонансной связи, эквивалентная схема которой показана на рис. 1.

Передатчик и приемник, удаленные друг от друга на расстояние порядка нескольких см (фиксация расстояния осуществ-

лялась интерферометрическими методами [10–12]), включают индуктивности L_1 , L_2 , последовательно-резонансные емкости C_1 , C_2 и внутренние сопротивления R_1 , R_2 . L_m – взаимная индуктивность между L_1 и L_2 . V_1 и I_1 – среднеквадратичные напряжение и ток на базовой стороне, в качестве которой берется наземная часть зарядной системы. V_2 и I_2 обозначают среднеквадратичные напряжение и ток на вторичной стороне, т.е. на стороне транспортного средства. R_L – сопротивление нагрузки. Передатчик и приемник подобраны так, чтобы удовлетворять уравнению, которое записывается следующим образом:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}, \quad (1)$$

где ω_0 – циклическая частота источника питания.

Отношения напряжений A_V и токов A_I между наземной стороной и транспортным средством описываются следующим образом:

$$A_V = j \frac{\omega_0 L_m R_L}{R_1 R_2 + R_1 R_L + (\omega_0 L_m)^2}, \quad (2)$$

$$A_I = j \frac{\omega_0 L_m}{R_2 + R_L}. \quad (3)$$

В этом случае эффективность передачи η можно записать следующим образом:

$$\eta = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_L}{(R_2 + R_L) \{R_1 R_2 + R_1 R_L + (\omega_0 L_m)^2\}}. \quad (4)$$

Величина нагрузки определяется соотношением

$$P = \frac{A_V^2}{R_L} V_1^2. \quad (5)$$

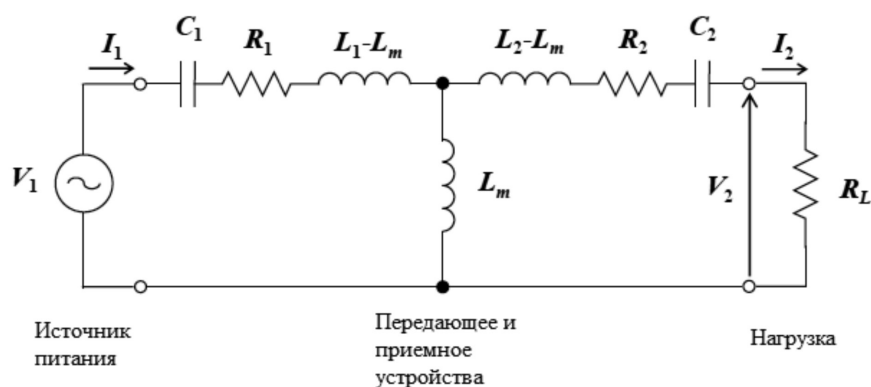


Рис. 1. Схема беспроводной передачи энергии через магнитно-резонансную связь

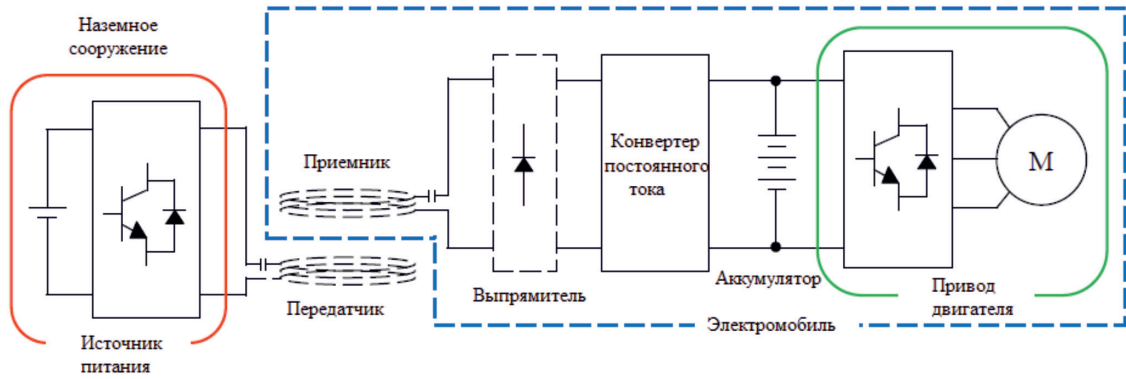


Рис. 2. Конфигурация системы управления мощностью на стороне транспортного средства

Эффективность передачи и мощность нагрузки определяются параметрами катушки, резонансной частотой и сопротивлением нагрузки. Когда эффективность передачи максимальна, сопротивление нагрузки $R_{L\eta_{\max}}$ можно выразить следующим образом:

$$R_{L\eta_{\max}} = \sqrt{R_2 \left[\frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2 \right]}. \quad (6)$$

Мощность нагрузки максимальна, когда сопротивление нагрузки $R_{LP_{\max}}$ определяется следующим образом (см. формулу (5)):

$$R_{LP_{\max}} = \frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2. \quad (7)$$

Контроль напряжения на стороне электромобиля

Из рис. 1 видно, что эквивалентное сопротивление нагрузки увеличивается в ответ на увеличение вторичного напряжения (напряжение со стороны электромобиля).

Вторичное напряжение $V_{2\eta_{\max}}$, которое максимизирует эффективность передачи, описывается следующим образом:

$$V_{2\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1} \frac{\omega_0 L_m}{\sqrt{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} + \sqrt{R_1 R_2}}} V_1. \quad (8)$$

Чтобы достичь максимальной эффективности, система управления вторичным напряжением должна быть сконструирована таким образом, чтобы удовлетворить уравнению (8).

Управление мощностью также может быть достигнуто контролем вторичного напряжения [13–15]. Однако он эффективен только в том случае, если вторичное напря-

жение контролируется ниже максимального вторичного напряжения $V_{2\max}$, которое выражается следующим образом:

$$V_{2\max} = \frac{\omega_0 L_m}{R_1} V_1. \quad (9)$$

Затем эквивалентное сопротивление нагрузки стремится к бесконечности и отношение A_v напряжения становится насыщенным. Максимальная мощность получается, когда вторичное напряжение $V_{2P_{\max}}$ задано следующим образом:

$$V_{2P_{\max}} = \frac{\omega_0 L_m}{2R_1} V_1 = \frac{1}{2} V_{2\max}. \quad (10)$$

Для достижения требуемой мощности P^* , разработана система контроля вторичного напряжения. На рис. 2 показана конфигурация системы для управления мощностью на стороне транспортного средства. Преобразователь постоянного тока может управлять выходным напряжением выпрямителя. Как результат, можно также контролировать вторичное напряжение. Для эффективной передачи важно определить рабочий диапазон вторичного напряжения, который должен быть ниже $V_{2P_{\max}}$. В результате эталонное значение вторичного напряжения V_2^* может быть выражено следующим образом:

$$V_2^* = V_{2P_{\max}} - \sqrt{V_{2P_{\max}}^2 - \frac{\{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2\} P^*}{R_1}}. \quad (11)$$

V_2^* включает в себя информацию о первичном напряжении V_1 (от источника питания на земле). Однако нежелательно требовать связи между транспортным средством и наземным оборудованием и регулировать

первичное напряжение. Поэтому целью является метод оценки первичного напряжения с использованием только информации об автомобиле.

Принципиальная схема системы беспроводной системы передачи энергии показана на рис. 3. При использовании топологии последовательных схем вторичный ток можно считать синусоидальной волной, колебания которой происходят на резонансной частоте с фазой, сдвинутой на 90 градусов по отношению к первичному напряжению. Если предполагается, что диоды согласованы с вторичным током, то вторичное напряжение становится прямоугольной волной, которая имеет такую же амплитуду, что и напряжение $V_{\text{пт}}$ постоянного тока, и ту же фазу и резонансную частоту, что и вторичный ток. Следовательно, вектор вторичного напряжения определяется посредством разложения в ряд Фурье, и выражается следующим образом:

$$\vec{V}_2 = j \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{\text{пт}}. \quad (12)$$

На резонансной частоте уравнения для электрической цепи можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{V}_1 &= R_1 \vec{I}_1 + j\omega_0 L_m \vec{I}_2, \\ \vec{V}_2 &= j\omega_0 L_m \vec{I}_1 + R_2 \vec{I}_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Следовательно, векторы токов первичной и вторичной обмоток можно записать в следующем виде:

$$\vec{I}_1 = \frac{R_2 V_1 + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \omega_0 L_m V_{\text{пт}}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2}, \quad (14)$$

$$\vec{I}_2 = j \frac{\omega_0 L_m V_1 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{\text{пт}}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) средний ток $I_{\text{пт}}$ от выпрямителя к преобразователю постоянного тока выражается следующим образом:

$$I_{\text{пт}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega_0 L_m V_1 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{\text{пт}}}{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2}. \quad (16)$$

Если взаимная индуктивность не изменяется кардинально, первичное напряжение получается из оценочного уравнения, которое описывается следующим образом:

$$\hat{V} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} R_1 V_{\text{пт}} + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \{R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2\} I_{\text{пт}}}{\omega_0 L_m}. \quad (17)$$

То есть получено постоянное напряжение $V_{\text{пт}}$ для управления вторичным напряжением. Отсюда следует, что датчик тока необходим только как дополнительный датчик для измерения входящего тока $I_{\text{пт}}$.

Выводы

В качестве эффективной системы зарядки электромобиля предложена топология последовательных схем БПЭ посредством магнитно-резонансной связи.

Рассмотрена возможность управления со стороны транспортного средства для достижения требуемой мощности и предложен метод управления, основанный на оценке напряжения на наземных устройствах, использующий только информацию на стороне транспортного средства.

Для достижения требуемой мощности, разработана система контроля напряжения на стороне транспортного средства. Показано, что преобразователь постоянного тока может управлять выходным напряжением выпрямителя. Как результат, можно также контролировать напряжение на стороне транспортного средства.

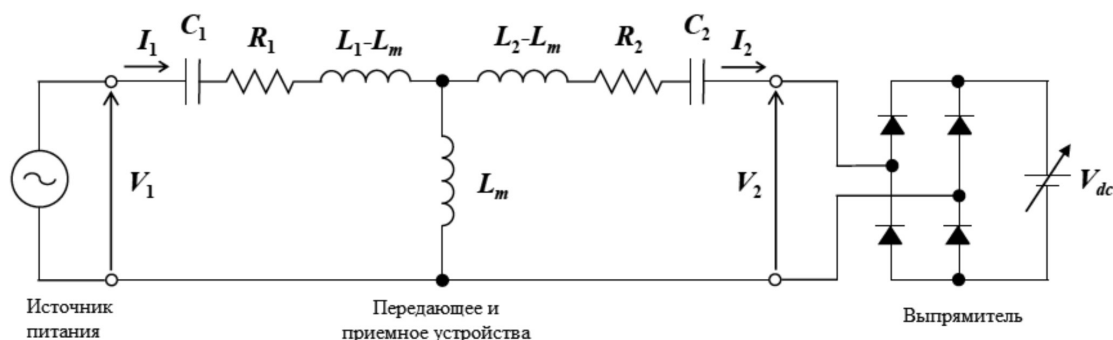


Рис. 3. Принципиальная схема беспроводной системы передачи энергии

Контроль вторичного напряжения позволяет осуществить контроль мощности источника питания, подключаемого к электромобилю, с целью выбора оптимального режима зарядки этого транспортного средства.

Список литературы

1. Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored «UOT electric March II». IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. vol. 51. no. 5. P. 954–962.
2. Yilmaz M., Buyukdegirmenci V.T., Krein P.T. General design requirements and analysis of roadbed inductive power transfer system for dynamic electric vehicle charging. Proc. of the 26th IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. 2012. P. 1–6.
3. Raabe S., Covic G.A. Practical design considerations for contactless power transfer quadrature pick-ups. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. vol. 60. no. 1. P. 400–409.
4. Throngnumchai K., Hanamura A., Naruse Y., Takeda K. Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles. Proc. of the 27th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition. 2013. P. 1–5.
5. Lee S., Choi B., Rim C.T. Dynamics characterization of the inductive power transfer system for online electric vehicles by Laplace phasor transform. IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. vol. 28. no. 12. P. 5902–5909.
6. Shin J., Shin S., Kim Y., Ahn S., Lee S., Jung G., Jeon S., Cho D. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. vol. 61. no. 3. P. 1179–1192.
7. Nagendra G.R., Chen L., Covic G.A., Boys J.T. Detection of EVs on IPT highways. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2014. vol. 2. no. 3. P. 584–597.
8. Lee K., Pantic Z., Lukic S.M. Reflexive field containment in dynamic inductive power transfer systems. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. vol. 29. no. 9. P. 4592–4602.
9. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography. Journal of Optics. 1994. vol. 25. no. 1. P. 3–8. DOI: 10.1088/0150-536X/25/1/001.
10. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer. Proceedings of SPIE. 2003. vol. 5144. P. 606–610. DOI: 10.1117/12.501342.
11. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer. Optical Engineering. 2018. vol. 57. no. 12. 124106. DOI: 10.1117/1.OE.57.12.124106.
12. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесчелюевой радужной голографии // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова . 2015. № 4 (40), С. 194–198.
13. Stielau O.H., Covic, G.A. Design of loosely coupled inductive power transfer systems. Proc. of the International Conference on Power Syst. Technol. 2000. P. 85–90.
14. Исманов Ю.Х., Кулмурзаев Н.М., Тургунбаев Н.А. Регистрирующие среды для голографии и радужная голография // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. 2014. № 1. С. 83–88.
15. Covic G.A., Boys J.T. Inductive Power Transfer. Proc. of the IEEE. 2013. vol. 101. no. 6. P. 1276–1289.