

УДК: 621.314.232

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ
ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ
КАК ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ****В.Н. Аносов, В.М. Кавешников, Е.О. Орел***Новосибирский государственный технический университет*

В работе решается задача составления математического описания двухобмоточного однофазного трансформатора с воздушным зазором, используемого в транспортном средстве с бесконтактным подводом энергии от кабеля, заложенного в дорогу. Источник питания расположен под проезжей частью дороги, а приемник находится на борту транспортного средства. Бесконтактная передача энергии осуществляется по принципу трансформатора с воздушным зазором. В данной работе разрабатывается структурная схема трансформатора с воздушным зазором как элемента системы автоматического управления. В отличие от общеизвестного математического описания в статье учитывается, что материал магнитопровода, площадь сердечника в воздушном зазоре и величина воздушного зазора могут изменяться. Полученная структурная схема позволяет проводить анализ и синтез системы автоматического управления транспортным средством с учетом свойств бесконтактного источника питания, а также оптимизировать процессы в проектируемой системе.

Ключевые слова: транспортное средство, бесконтактный подвод энергии, трансформатор, воздушный зазор, структурная схема, анализ и синтез.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51

Постановка задачи

При повышении стоимости энергоресурсов и экологических требований к используемым транспортным средствам (ТС) ставится вопрос об использовании новых источников энергии. Напольные безрельсовые транспортные средства, рассматриваемые в работе, различаются между собой набором источников энергии в составе их энергетической установки. В настоящее время приобрели актуальность исследования автономных ТС с гибридными и комбинированными энергоустановками, посвященные поиску наилучших схемных и конструктивных решений, а также их алгоритмов управления.

Стремление создать более совершенные ТС привело к появлению иных технических решений, одним из которых является бесконтактный подвод энергии от заложенного в дорогу кабеля, к достоинствам которого относятся независимость от окружающей среды, необслуживаемость, возможность автоматического управления движением ТС без участия человека-оператора в контуре регулирования.

Силовые кабели не подвергаются износу благодаря отсутствию механической связи с токоприемником ТС, как при питании от контактной сети. Срок их службы определяется только сроком службы изоляции.

Пробег бесконтактного ТС не ограничен количеством запасенной энергии в отличие от аккумуляторных транспортных средств, где мощность, развиваемая тяговыми двигателями, уменьшается по мере разряда батареи. Много времени уходит на смену батарей и на их заряд. Эксплуатация предлагаемого в работе транспорта значительно проще, чем аккумуляторного, так как отпадает необходимость в уходе за аккумуляторными батареями, их смене и ремонте.

Использование указанных ТС экономически оправданно в условиях взрывоопасной окружающей среды.

Установка на борту ТС дополнительной легкой аккумуляторной батареи (АБ) позволит ему двигаться по дорогам, не оборудованным указанным источником энергии. АБ будет подзаряжаться, пока ТС находится в пределах системы питания. Это позволит рассматривать транспорт как единую систему, а не исследовать отдельные подсистемы [1, 2, 5].

Источник энергии таких ТС расположен под проезжей частью дороги, а приемник находится на электротранспорте (рис. 1).

Бесконтактная передача энергии осуществляется по принципу трансформатора с воздушным зазором (рис. 2). Силовой кабель с магнитопроводом, заложенный в дорожное полотно, являются первичной обмоткой, а обмотка, находящаяся на ТС – вторичной. Магнитное поле зависит от величины воздушного зазора, магнитное сопротивление которого на данном этапе исследований принято соизмеримым с сопротивлением сердечника, так как при движении ТС величина воздушного зазора может изменяться в поперечном и вертикальном направлении в достаточно широких пределах.

При решении прикладных задач управления транспортным средством необходимо составить адекватное математическое описание (МО) объекта в удобной для

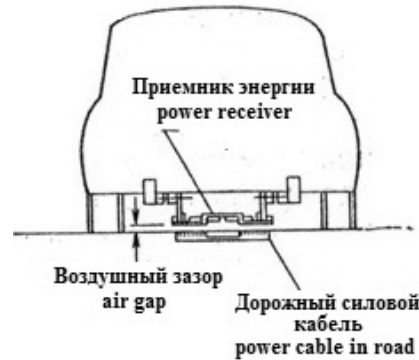


Рис. 1 – Схема работы транспортного средства с индуктивным подводом питания

Fig. 1 – Operation scheme of a vehicle with inductive power supply

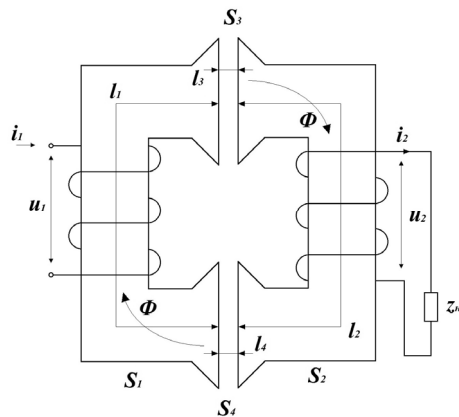


Рис. 2 – Трансформатор с воздушным зазором

Fig. 2 – An air-gap transformer

исследователя форме. Форма математического описания должна позволять применение известных методов, в частности методов ТАУ. С другой стороны, МО должно обеспечивать необходимую точность для оценки динамических свойств системы. Однако стремление к точности отражения физических процессов не должно приводить к излишнему усложнению МО при сохранении интересующих исследователя специфических свойств и особенностей конкретного исследуемого объекта. Использование структурных схем при математическом описании облегчит решение задачи синтеза системы тягового электропривода при создании или модернизации электротранспортного средства. В отечественной и зарубежной литературе практически не уделяется внимания структурному подходу при математическом описании исследуемых источников питания.

Целью данной работы является разработка структурной схемы источника бесконтактного подвода энергии к транспортному средству, учитывающую изменение внешних воздействий при разных режимах движения исследуемого ТС. Это МО должно удовлетворять критериям, обозначенным выше. Такая постановка вопроса в научно-технической литературе является новой с точки зрения решения задач управления ТС.

исследователя форме. Форма математического описания должна позволять применение известных методов, в частности методов ТАУ. С другой стороны, МО должно обеспечивать необходимую точность для оценки динамических свойств системы. Однако стремление к точности отражения физических процессов не должно приводить к излишнему усложнению МО при сохранении интересующих исследователя специфических свойств и особенностей конкретного исследуемого объекта. Использование структурных схем при математическом описании облегчит решение задачи синтеза системы тягового электропривода при создании или модернизации электротранспортного средства. В отечественной и зарубежной литературе практически не уделяется внимания структурному подходу при математическом описании исследуемых источников питания.

Структурная схема источника бесконтактного подвода энергии

Математическому описанию трансформаторов посвящено достаточно много работ. Так, в [3] решается задача составления схемы замещения как однофазных, так и многофазных трансформаторов. В [4] рассматривается методика определения магнитодвижущей силы неразветвленного магнитопровода с воздушным зазором. В [5] приведены результаты имитационного моделирования системы электропривода с бесконтактным подводом энергии без учета изменений зазора между источником энергии и транспортным средством.

В литературе уделяется недостаточное внимание математическому описанию трансформатора с воздушным зазором как элемента автоматической системы управления. В данной работе разрабатывается структурная схема источника бесконтактной передачи энергии с учетом естественных возмущающих воздействий.

Как известно [3, 4], однофазный двухобмоточный трансформатор описывается следующей системой уравнений в мгновенных значениях переменных:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 r_1, \\ u_2 &= \frac{d\psi_2}{dt} + i_2 r_2, \\ \sum_{i=1}^4 h_i l_i &= i_1 w_1 + i_2 w_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\psi_1, \psi_2, i_1, i_2, r_1, r_2, w_1, w_2$ – потокосцепления, токи, активные сопротивления и число витков первичной и вторичной обмотки трансформатора; h_i – напряженности магнитного поля; l_1, l_2 – длины средних линий магнитопровода; l_3, l_4 – длины магнитных силовых линий в воздушном зазоре.

Потокосцепления обмоток делятся на две составляющие: по основному магнитному потоку ψ_μ и потоку рассеяния ψ_P .

$$\psi_1 = \psi_{1\mu} + \psi_{1P},$$

$$\psi_2 = \psi_{2\mu} + \psi_{2P}.$$

Первые определяются произведением числа витков обмоток на величину магнитного потока, а вторые – произведениями соответствующих токов на индуктивность рассеяния:

$$\psi_{1\mu} = w_1 \Phi, \quad \psi_{1P} = L_{1P} i_1,$$

$$\psi_{2\mu} = w_2 \Phi, \quad \psi_{2P} = L_{2P} i_2.$$

Левая часть третьего уравнения системы (1) может быть представлена в виде (см. рис. 2)

$$\sum_{i=1}^4 h_i l_i = h_1 l_1 + h_2 l_2 + h_3 l_3(\xi) + h_4 l_4(\xi), \quad (2)$$

где h_1, h_2 – напряженности магнитного поля в первом и втором участке магнитопровода; h_3, h_4 – напряженности магнитного поля в воздушных зазорах магнитной цепи; ξ – параметр, зависящий от расположения ТС, изменение которого в общем случае носит случайный характер.

Учитывая, что напряженность магнитного поля в воздушных зазорах одна и та же:

$$h_{34} = h_3 = h_4 ,$$

а величина воздушного зазора равна их сумме:

$$l_{34}(\xi) = l_3(\xi) + l_4(\xi) ,$$

уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^3 h_i l_i = h_1 l_1 + h_2 l_2 + h_{34} l_{34}(\xi) .$$

Функция $l_{34}(\xi)$ определяется геометрически величинами вертикального и поперечного смещения ТС в процессе движения и носит вероятностный характер.

Магнитный поток в неразветвленной магнитной цепи одинаков для любого поперечного сечения магнитопровода:

$$\Phi = b_1 S_1 = b_2 S_2 = b_3 S_3 = b_4 S_4 ,$$

где b_1, b_2 – значение магнитной индукции; S_1, S_2 – площади поперечного сечения магнитопровода; b_3, b_4 – значение магнитной индукции, S_3, S_4 – площади поперечного сечения воздушного зазора.

Для участков магнитной цепи 1 и 2 из ферромагнитного материала (см. рис. 2) значения магнитной индукции b_1 и b_2 связаны с напряженностью магнитного поля соотношениями:

$$b_1 = h_1 \mu_{01}(h) ,$$

$$b_2 = h_2 \mu_{02}(h) .$$

Магнитные свойства ферромагнитного сердечника представлены известными кривой намагничивания $b(h)$ и зависимостью $\mu_0(h)$.

В воздушных зазорах магнитная индукция b_{34} связана с напряженностью h_{34} простым соотношением

$$b_{34} = \mu_0 h_{34} .$$

В представленном выражении μ_0 – величина магнитной проницаемости в воздушном зазоре.

Учитывая, что

$$\Phi = bS ,$$

$$h = \frac{b}{\mu_0} ,$$

система уравнений (1) двухобмоточного трансформатора принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}
u_1 &= w_1 S_1 \frac{db_1}{dt} + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1, \\
u_2 &= w_2 S_2 \frac{db_2}{dt} + L_{p2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2, \\
F &= \frac{l_{34}(\xi)}{S_{34} \mu_0} b_{34} + \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{S_i \mu_{0i}} b_i = i_1 w_1 + i_2 w_2,
\end{aligned} \tag{3}$$

где F – намагничивающая сила.

Структурная схема двухобмоточного трансформатора с воздушным зазором в соответствии с уравнениями (3) может быть представлена в следующем виде (рис. 3).

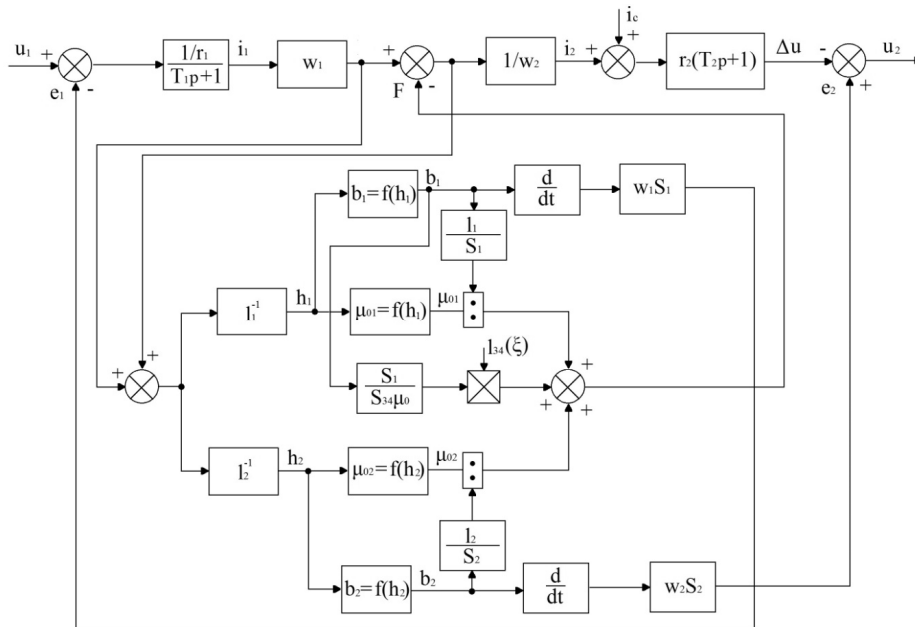


Рис. 3 – Структурная схема трансформатора с воздушным зазором

Fig. 3 – Structural diagram of an air-gap transformer

Как следует из рис. 3, источник питания является нелинейным объектом. В структурной схеме содержатся как несущественные, так и существенные нелинейные звенья типа «произведение/деление». В схеме имеются два возмущающих воздействия, одним из которых является ток нагрузки i_c , введение которого в полученную структуру не вызывает проблем. Второе возмущение реализует изменение величины воздушного зазора как в продольном, так и в вертикальном направлении, и учет его воздействия является проблемой. Изменение этого возмущающего воздействия может носить случайный характер, что должно учитываться при анализе и синтезе системы управления. Зависимость $l_{34}(\xi)$ аналитически определить не представляется возможным, так как параметр ξ зависит от состояния дорожного покрытия, скорости движения и других дорожных условий.

Это можно сделать экспериментальным путем, что требует больших затрат времени и средств, или методом структурного моделирования с использованием генератора случайных чисел с различными законами распределения. Эта задача выходит за рамки данной статьи и является предметом дальнейших исследований.

Коэффициенты отдельных звеньев структурной схемы определяются по каталожным данным при моделировании типового трансформатора или легко рассчитываются при проектировании нового источника питания.

В рассматриваемой структурной схеме авторами определены способ (мультипликативное звено) и точка ввода сигнала второго возмущающего воздействия $I_{34}(\xi)$. При этом возможно исследование реакции системы как на типовое воздействие (единичный скачок или синусоидальный сигнал), так и на случайный сигнал с неизвестными пока характеристиками.

Заключение

Полученная структурная схема может в дальнейшем служить адекватной основой для разработки системы автоматического управления тяговым электроприводом ТС с учетом статических и динамических свойств источника питания электропривода. Важнейшим ее свойством является возможность учета изменяющегося воздушного зазора между магнитопроводами подвижной и неподвижной части бесконтактной системы передачи энергии. Полученная структура позволит произвести математическое моделирование тягового электропривода специально-го транспортного средства с индуктивным подводом энергии в целом.

Задачи дальнейших исследований

1. Структурное моделирование источника питания в программной среде MATLAB-Simulink с различными видами нагрузки.
2. Изучение влияния величины воздушного зазора I_{34} и площадей S_3 и S_4 на потери энергии в нагрузке.
3. Анализ динамики системы тягового электропривода специального транспортного средства.
4. Разработка алгоритма управления транспортным средством с бесконтактным подводом энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uhlemeyer A. Project planning for systems with contact less energy and data transmission [Electronic resource] // Materials of seminars of Drive Academy, SEW Eurodrive, Bruchsal, Germany, 3–7 dec. 2007. – 2007. – 1 electron-optical disk (CD-ROM).
2. Мани Л. Транспорт, энергетика и будущее : пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 160 с.
3. Байков А.И. Математические модели трансформаторов при анализе силовой части электроприводов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 316–327.
4. Немцов М.В., Немцова М.Л. Электротехника и электроника. – М.: Академия, 2007. – 424 с.
5. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии / В.А. Герасимов, Г.Е. Кувшинов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 2 (16). – С. 24–32.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF A POWER SUPPLY SOURCE FOR CONTACTLESS ENERGY SUPPLY AS A CONTROL SYSTEM ELEMENT

Anosov V.N., Kaveshnikov V.M., Orel E.O.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The task of compiling a mathematical description of a two-winding single-phase transformer with an air gap used in a vehicle with a contactless power supply from a cable laid in the road is solved in the work. The power source is located under the carriageway of a road, and the receiver is on the board of a vehicle. Contactless energy transfer is carried out according to the principle of an air-gap transformer. A block schematic diagram of an air-gap transformer as an automatic control system element is developed in this work. In contrast to the well-known mathematical description, the article takes into account that a magnetic core material, a core area in an air gap and an air gap size are changeable. The resulting block schematic diagram allows analyzing and synthesizing the automatic control system of a vehicle taking into account properties of a contactless power source. It also helps to optimize processes in the projected system.

Keywords: vehicle, contactless power supply, transformer, air gap, block schematic diagram, analysis and synthesis.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51

REFERENCES

1. Uhlemeyer A. Project planning for systems with contactless energy and data transmission. *Materials of seminars of Drive Academy, SEW Eurodrive*, Bruchsal, Germany, 3–7 dec., 2007. 1 electron-optical disk CD–ROM.
2. Money L. Transportation energy and the future. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1984 (Russ. ed.: Mani L. Transport, energetika i budushchee. Moscow, Mir Publ., 1987. 160 p.).
3. Bayakov A.I. Matematicheskie modeli transformatorov pri analize silovoi chasti elektroprivodov [Mathematical models of transformers when analyzing power part of electric drives]. *Trudy Nizhnegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva – Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev*, 2013, no. 5 (102), pp. 316–327.
4. Nemtsov M.V., Nemtsova M.L. *Elektrotehnika i elektronika* [Electrical engineering and electronics]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 424 p.
5. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Issledovanie rezhimov raboty sistemy energoobespecheniya avtonomnogo podvodnogo apparata s beskontaktnoi peredachei energii [Study of power supply system operation modes of an autonomous underwater vehicle with contactless energy supply]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika – Underwater Investigations and Robotics*, 2013, no. 2 (16), pp. 24–32.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Аносов Владимир Николаевич – родился в 1946 году, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ЭАПУ, НГТУ. Область научных интересов: автоматизированный электропривод специальных транспортных средств. Опубликовано свыше 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: anosovvn@gmail.com).

Anosov Vladimir Nikolaevich (b. 1946) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, head of the electric drive and industrial plant automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automated electric drives of special vehicles. He is the author of more than 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: anosovvn@gmail.com).



Кавешников Владимир Михайлович – родился в 1946 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭАПУ, НГТУ. Область научных интересов: автоматизированный электропривод специальных транспортных средств. Опубликовано свыше 100 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: vldi@yandex.ru).

Kaveshnikov Vladimir Mikhailovich (b. 1946) – Candidate of Sciences PhD (Eng.), associate professor, assistant professor at the electric drive and industrial plant automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automated electric drives of special vehicles. He is the author of more than 100 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vldi@yandex.ru).



Орел Егор Олегович – родился в 1995 году, бакалавр, студент кафедры ЭАПУ, факультет мехатроники и автоматизации, НГТУ. Область научных интересов: мехатронные системы. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: eg.orel@ya.ru).

Orel Egor Olegovich (b. 1995) – a master student at the electric drive and industrial plant automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mechatronic systems. He is the author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: eg.orel@ya.ru).

*Статья поступила 05 февраля 2018 г.
Received February 05, 2018*

To references:

Anosov V.N., Kaveshnikov V.M., Orel E.O. Matematicheskoe opisanie istochnika pitaniya dlya beskontaktnogo podvoda energii kak elementa sistemy upravleniya [Mathematical description of a power supply source for contactless energy supply as a control system element]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp. 44–51. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-44-51.