

Динамика блока электромагнитных ферропорошковых муфт

*А. А. Варенов, В.В. Максимов, О.В. Воркунов, О.Е. Куракина,
А.И. Хаертдинова*

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Аннотация: В статье предложена и конкретизирована инженерная математическая модель привода с использованием блока ферропорошковых муфт и в рамках эскизного проектирования проведено исследование его динамических свойств, в ходе которого получены переходные характеристики, позволяющие оценивать качественные показатели такого привода и наметить меры по их улучшению.

Ключевые слова: блок ферропорошковых муфт, динамические свойства блока, моделирование в программной среде MatLab, переходная характеристика, показатели качества переходного режима.

Представим две концентрические стальные детали с обращенными друг к другу плоскими поверхностями, между которыми имеется небольшой воздушный зазор. Одна деталь жестко связана с ведущим, другая с ведомым валом привода. Если пространство между плоскими поверхностями заполнить очень мелким ферромагнитным порошком, то при наличии магнитного поля в воздушном зазоре частицы порошка образуют механические цепочки-связки, которые создают силу сцепления одной детали с другой. В результате будет передаваться вращение от ведущего вала к ведомому. При снятии магнитного поля связки распадутся, механическая связь между ведущим и ведомым валом нарушится, и ведомая система перестанет вращаться. На таком принципе построены электромагнитные ферропорошковые муфты (ЭМФПМ) [1, 2].

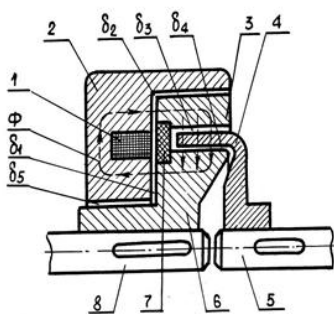


Рис. 1. Вариант электромагнитной порошковой муфты [1]

Вариант конструктивной схемы бесконтактной муфты представлен на рис.1 [1]. Обмотка 1 муфты вместе с магнитопроводом 2 установлена на корпусе и является неподвижной в пространстве. Поэтому для подведения тока к обмотке не нужны контактные кольца. С ведущим валом связана стальная деталь 6, которая с помощью кольца 7 из парамагнитного материала соединена механически с ферромагнитной деталью 3. Ротор 4 установлен на ведомом валу 5. Между неподвижным магнитопроводом 2 и деталями 3,6 и 7, связанными с ведущим валом, существуют небольшие зазоры δ_2 , δ_5 и δ_1 . Поэтому одна часть муфты имеет возможность свободно вращаться относительно другой.

Воздушные зазоры δ_3 и δ_4 заполнены ферромагнитным порошком. При отсутствии магнитного потока этот порошок не создает механической связи между ведущей и ведомой частями. Когда по обмотке 1 протекает ток, созданный им магнитный поток Φ , проходящий через воздушные зазоры δ_3 и δ_4 , превращает ферромагнитный порошок в «затвердевшее» состояние и ведущая часть оказывается сцепленной с ведомой. Электромагнитные ферропорошковые муфты обладают рядом преимуществ перед электромагнитными фрикционными муфтами: они имеют более высокий коэффициент управления, время срабатывания этих муфт примерно в 10 раз меньше времени срабатывания муфт трения, в ферропорошковых муфтах нет поверхностей трения, подверженных механическому износу и т.д. [3].

Преимущества ЭМФПМ по сравнению с управляемыми электродвигателями сводятся к следующему. Ведущие части муфт в совокупности с ротором приводного двигателя обладают большим моментом инерции, а ведомые части, наоборот, малоинерционны. Отсюда существенные преимущества исполнительных элементов с электромагнитными ферропорошковыми муфтами по сравнению с управляемыми электродвигателями [4]. Сравнительно большие массы

ведущих нереверсируемых частей дают возможность запастись кинетической энергией и использовать ее для ускорения процессов разгона и торможения, а, следовательно, и уменьшать в некоторых случаях мощность приводного электродвигателя. Малая инерционность ведомых частей при значительной величине передаваемого момента позволяет развивать в приводе с муфтами ускорения на порядок выше, чем в приводе с управляемыми электродвигателями. Это преимущество может быть реализовано при условии малого приведенного момента инерции нагрузки привода. Положительное качество электромагнитных муфт - то, что они являются устройствами, обеспечивающими большое усиление по мощности [5]. Например, для ферропорошковых муфт с выходной мощностью 50-400 Вт мощность управления составляет 1,5-5 Вт. Отсюда сравнительная простота схемы, малая масса и габариты и высокая надежность усилительно-преобразовательных устройств привода с муфтами.

Немаловажным обстоятельством является и то, что в качестве приводного электродвигателя в приводе с муфтами могут быть применены наиболее простые, дешевые и надежные в работе неуправляемые двигатели, например, асинхронные с малым критическим скольжением [6].

При этом для получения реверсивного движения нагрузки применяют две муфты, присоединенные к приводному двигателю и выходному валу привода таким образом, что их ведомые части вращают нагрузку привода в противоположные стороны. Кинематическая схема блока порошковых муфт (БПМ) приведена на рис.2 [1].

Выходной вал приводного двигателя ДВ вращается с постоянной угловой скоростью и через редуктор с передаточным числом i_1 связан с ведущими частями муфт. Ведомые части муфт через понижающий редуктор с передаточным числом i_2 соединены с выходным валом БПМ. Вращение выходного вала в требуемом направлении достигается включением

соответствующей муфты путем приложения к ней управляющего напряжения $U_{M1(2)}$.

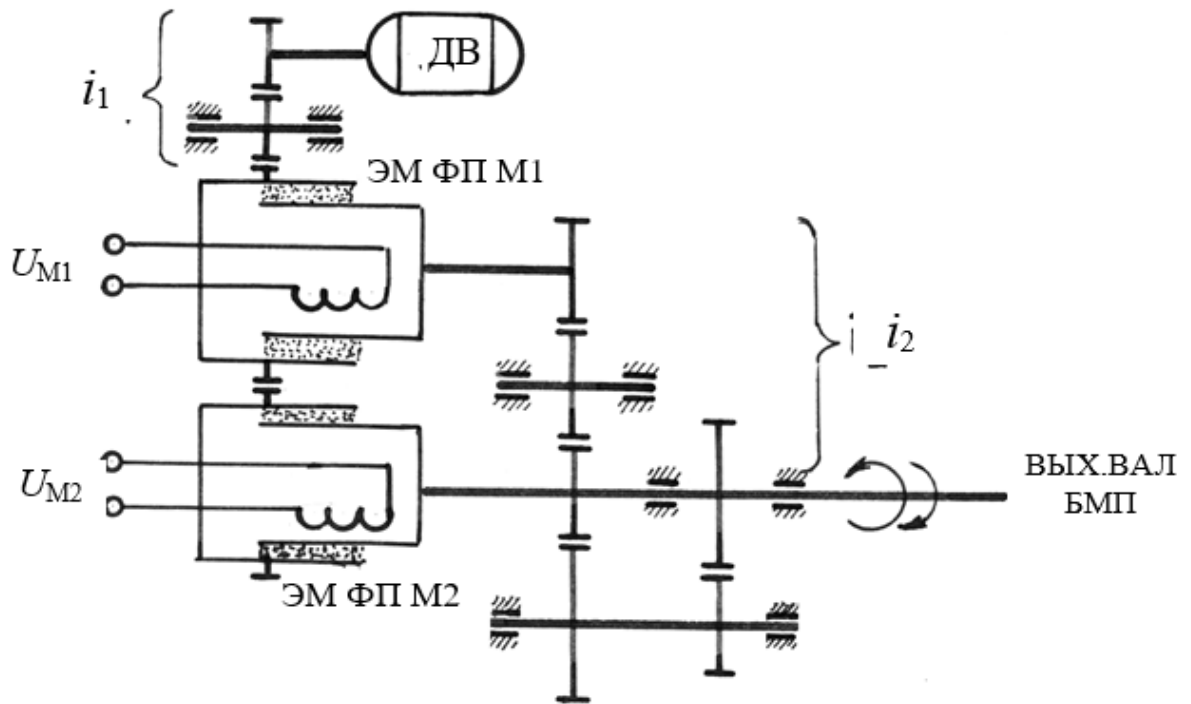


Рис.2. Электрокинематическая схема блока электромагнитных порошковых муфт [1]

Динамические свойства блока порошковых муфт (БПМ) определяются системой дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned}
 T_э \frac{dI_M(t)}{dt} + I_M(t) &= \frac{1}{R_M} U_M(t); \\
 J'_н \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} &= M'(t) - M_н(t) \\
 M'(t) &= K'_M I_M(t),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где T – эквивалентная постоянная времени, приближенно учитывающая собственную инерционность муфт; R_M – активное сопротивление обмотки муфты; $J'_н = J_н + J_2 i_2^2$ – приведенное значение момента инерции ($J_н$ – момент инерции нагрузки; J_2 – момент инерции ведомых частей блока муфт); $K'_M = K_M i_2$ – приведенный к выходному валу блока коэффициент передачи по моменту; $U_M(t)$ – напряжение, приложенное

к обмотке муфты; $I_M(t)$ – ток, протекающий по обмотке; $\alpha(t)$ – угол поворота выходного вала БМП; $M'(t) = [M_1(t) - M_2(t)] \cdot i_2$ – передаваемый блоком муфт момент, приведенный к выходному валу БПМ; $M_1(t)$ и $M_2(t)$ – моменты, передаваемые вращающимися в противоположные стороны муфтами.

Первое уравнение системы (1) описывает электрическое равновесие в обмотке муфты, второе – уравнение механического равновесия на выходном валу БПМ, а третье – уравнение управления БПМ.

Динамические свойства БПМ можно оценить по переходной характеристике [3], представляющей собой график зависимости выходной величины БПМ от времени при постоянных внешних воздействиях. Из анализа системы уравнений (1) следует, что выходной величиной БПМ является угол поворота выходного вала $\alpha(t)$, а внешними воздействиями – управляющее воздействие $U_M(t)$ и возмущающее воздействие $M_H(t)$.

Переходную характеристику получим путем моделирования уравнений (1) на персональной ЭВМ в среде MatLab.

Для подготовки уравнений к моделированию запишем их в операторной форме:

$$(T_3 s + 1)I_M(s) = \frac{1}{R_M} U_M(s);$$

$$J'_H s^2 \alpha(s) = M'(s) - M_H(t);$$

$$M'(s) = K'_M I_M(s),$$

на основании чего получим три передаточные функции:

$$W_1(s) = \frac{I_M(s)}{U_M(s)} = \frac{1/R_M}{T_3 s + 1};$$

$$W_2(s) = \frac{\alpha(s)}{\Delta M(s)} = \frac{1}{J'_H s^2}; \quad (2)$$

$$W_3(s) = \frac{M'(s)}{I_M(s)} = K'_M.$$

Первая передаточная функция определяет динамические свойства электрической части муфты и обладает характеристиками инерционного звена. Передаточная функция $W_2(s)$ отражает динамику механической части БПМ и имеет характеристики двух последовательно соединенных звеньев. Третья передаточная функция показывает, что передаваемый блоком муфт момент линейно зависит от тока муфты.

Полученные передаточные функции позволяют построить структурную схему динамической модели БПМ, которая представляет собой условное графическое изображение, показывающее, из каких динамических звеньев она состоит, и каким образом они связаны между собой (рис.3)

Задавшись параметрами БПМ и постоянными значениями задающего и возмущающего M_H воздействий, можно провести моделирование на персональной ЭВМ в среде Matlab с целью получения переходных характеристик $\Omega(s)$ и $\alpha(s)$.

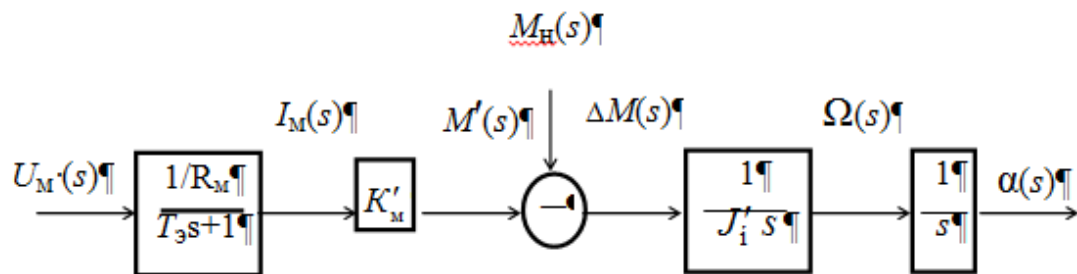


Рис. 3. Структурная схема динамической модели БПМ

Проведем это моделирование при следующих исходных данных:

$$\begin{aligned}
 R_M &= 1500 \text{ Ом}; & J'_i &= 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2; \\
 T_3 &= 0,023 \text{ с}; & M_H &= 1,8 \text{ Нм} = \text{const}; \\
 K'_M &= 2 \text{ нм/А}; & U_M &= 50 \text{ В} = \text{const}.
 \end{aligned}$$

Схема моделирования в среде MatLab имеет вид, приведенный на рис.4.

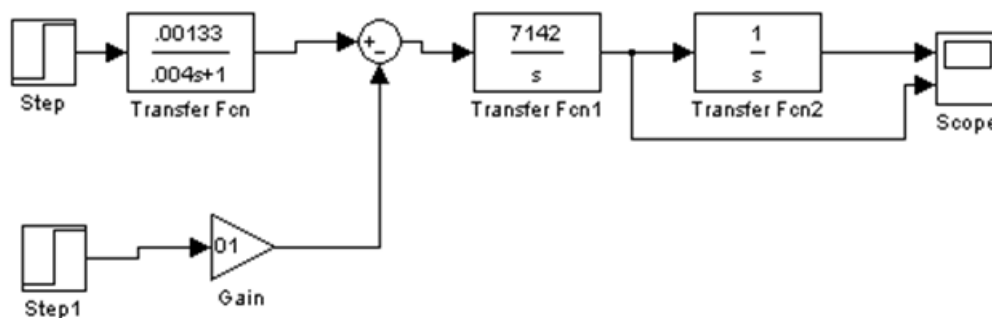


Рис. 4. Схема моделирования БПМ в среде MatLab

Переходные характеристики $\Omega(t)$ и $\alpha(t)$. при одновременном приложении заданных внешних воздействий приведены на рис.5. Анализ схемы моделирования и полученных результатов свидетельствует о структурной неустойчивости БПМ, т.к. угловая скорость $\Omega(t)$ возрастает неограниченно по линейному закону, а угол $\alpha(t)$ – по квадратичной зависимости.

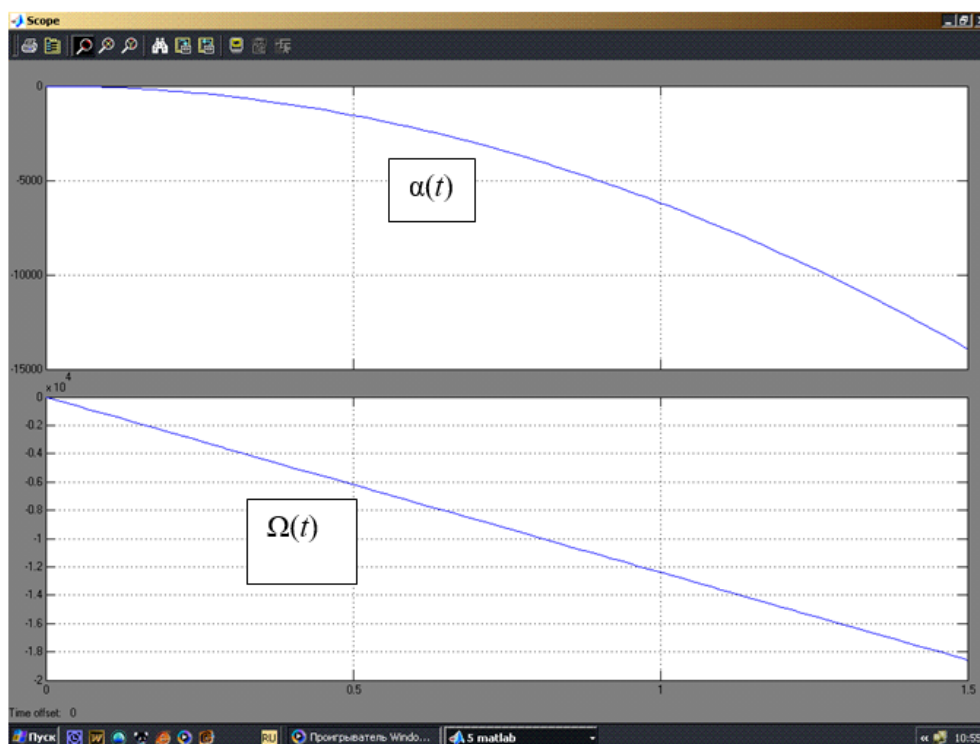


Рис.5. Результаты моделирования БПМ

С целью обеспечения устойчивости, электропривод с такими муфтами охватывают жесткой отрицательной обратной связью по угловой скорости

$\Omega(t)$. Для реализации такой связи применяют тахогенератор, преобразующий угловую скорость выходного вала БПМ в напряжение $U_{ТГ}$, которое подается на усилитель электропривода со знаком, противоположным управляющему напряжению. Подробно этот вопрос изложен в ряде источников, например, в [9, 10]. Изложенные в статье положения могут быть использованы в ходе эскизного проектирования подобных устройств для конкретной нагрузки. При этом следует иметь в виду, что возможно резкое ухудшение динамических свойств при больших инерционных нагрузках.

Литература.

1. Петухов С.В., Кришьянис М.В., Чурбанов А.Л. Электропривод: Учебное пособие / Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2024. – 344 с.
 2. Матвеев С.В. Электрические системы автоматики и контроля судовых технических средств: Учебник / Саратов: Профобразование, 2022. – 377 с.
 3. Бочкарев И.В. Расчет параметров электромагнитной фрикционной муфты в переходных режимах работы / Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2014. – Т. 14, № 7. – С. 13-17.
 4. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т., Постнов А.А. Разработка микропроцессорной системы управления электроприводом, содержащим электромагнитную фрикционную муфту / Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2013. – Т. 13, № 7. – С. 118-122.
 5. Галбаев Ж.Т. Переходные процессы в массивном магнитопроводе электромагнитного привода фрикционных механизмов / Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 79-84.
 6. Меньшенин С.Е. Электрические машины переменного тока: Учебное пособие / Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 124 с.
-

7. Панкратьев Л.Д. Импульсные и релейные приводы с электромагнитными муфтами. М., Энергия, 1970. – 120 с.
8. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1985. 534 с.
9. Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф. Тахогенератор-акселерометр с улучшенными метрологическими характеристиками / Электричество. – 2011. – № 9. – С. 63-66.
10. Шишаков К.В. Модель электропривода при наличии пульсаций выходных характеристик / Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2006. – № 2(30). – С. 42-48.

References

1. Petuxov S.V., Krish`yanis M.V., Churbanov A.L. E`lektrivod: Uchebnoe posobie Stary`j Oskol [Electric drive: Textbook], 2024, 344 p.
2. Matveev S.V. E`lektricheskie sistemy` avtomatiki i kontrolya sudovy`x texnicheskix sredstv: Uchebnik [Electrical systems of automation and control of ship technical means: Textbook]. Saratov: Profobrazovanie, 2022, 377 p.
3. Bochkarev I.V. ` Vestnik Ky`rgy`zsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta, 2014. T. 14, № 7. pp. 13-17.
4. Bochkarev I.V., Galbaev Zh.T., Postnov A.A. Vestnik Ky`rgy`zsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta, 2013. T. 13, № 7. p. 118-122.
5. Galbaev Zh.T. Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta , 2009. T. 314, № 4. pp. 79-84.
6. Men`shenin S.E. E`lektricheskie mashiny` peremennogo toka: Uchebnoe posobie [Electric machines of alternating current: Textbook] Moskva Aj Pi Ar Media, 2023. 124 p.



7. Pankrat`ev L.D. Impul`sny`e i relejny`e privody` s e`lektromagnitny`mi muftami [Pulse and relay drives with electromagnetic clutches]. М., E`nergiya, 1970. 120 p.

8. Solodovnikov V.V., Plotnikov V.N., Yakovlev A.V. Osnovy` teorii i e`lementy` sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Fundamentals of Theory and Elements of Automatic Control Systems]. М. Mashinostroenie, 1985. 534 p.

9. Ismagilov F.R., Yangirov I.F. E`lektrichestvo. 2011. № 9. pp. 63-66.

10. Shishakov K.V. Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta, 2006. № 2(30). pp. 42-48.

Дата поступления: 23.08.2024

Дата публикации: 17.10.2024