

Система управления орбитальным электроприводом муфты пресса

БОГДАНОВ А.О., ЛИТВИНЕНКО А.М.

Рассмотрена система управления орбитальным электроприводом муфты пресса в качестве замены пневматических систем управления муфтой и тормозом. Особенность конструкции орбитального электропривода муфты пресса не позволяет использовать датчик скорости поворота вала ротора, поэтому предложен метод для косвенного определения скорости с использованием дополнительных датчиков. Другая особенность конструкции — значение индуктивности намагничивания, изменяющееся в зависимости от положения роторов относительно статора. С учетом этих особенностей рассмотрены система векторного управления, а также оптимальное управление током в зависимости от нагрузки на орбитальный электропривод.

Ключевые слова: орбитальный электропривод, муфта пресса, система управления, векторное управление

В кривошипных прессах широко применяются пневматические системы управления муфтой и тормозом, которые, однако, имеют небольшой КПД и ряд других недостатков. Это уменьшает потребительские возможности пресса, так как пневматические системы требуют дополнительных расходов на покупку системы с компрессором и ее обслуживание.

Авторами разработана система орбитального электропривода муфты пресса [1–3], способная полностью заменить пневматический привод. Орбитальный электропривод состоит из нескольких модулей (двух и более) и одного общего статора. Каждый модуль, работающий на свою пружину муфты, состоит из ротора, редуктора и выдвигного штока. Схема модуля показана на рис. 1 [1]. Конструкция ротора рассмотрена в [4], статор состоит из нескольких индукторов.

На тяговые и энергетические характеристики орбитального электропривода муфты пресса оказывает влияние форма его магнитопровода, магнитная цепь которого приводит к отклонению от синусоидальной формы распределения потока в ярме и индукции в воздушном зазоре.

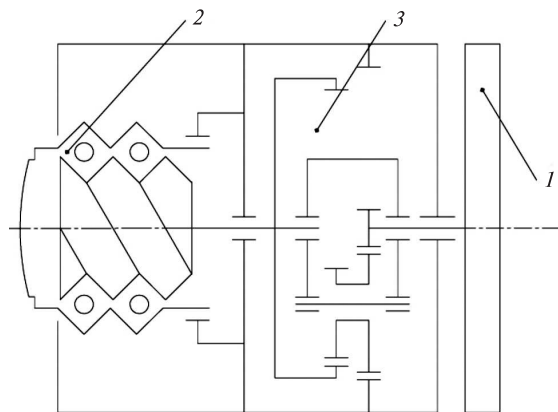


Рис. 1. Схема модуля: 1 — ротор; 2 — выдвигной шток; 3 — редуктор

В [5, 6] было выявлено, что для орбитального электропривода наиболее подходит векторное управление, при котором минимизация энергопотребления приносит ощутимый экономический эффект. Для того чтобы найти оптимальный способ управления, необходимо определить характер нагрузки на двигатель. На рис. 2 показана компоновка орбитального электропривода муфты пресса.

Работает муфта следующим образом: станина с закрепленными модулями 4 вращается вместе с маховиком и приводится в движение главным двигателем пресса после подачи напряжения на статоры 2 и 3, происходит вращение ротора 1 вокруг собственной оси. Ротаторы передают крутящий момент редукторам, которые преобразуют вращательное движение в поступательное. Штоки, встроенные в

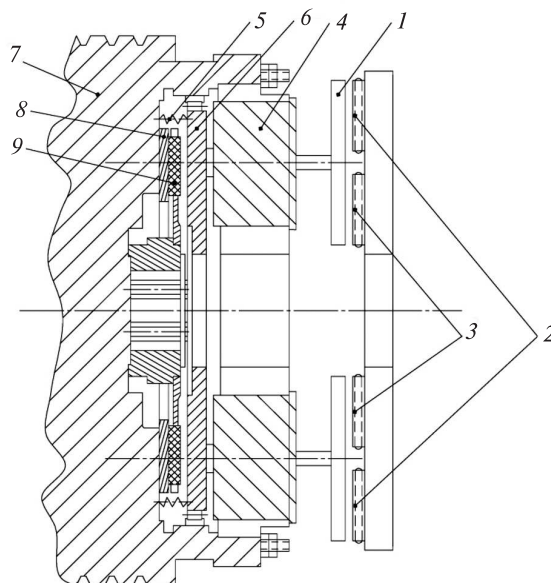


Рис. 2. Общая схема орбитального электропривода муфты пресса: 1 — ротор; 2 — обмотка внешнего кольцевого статора; 3 — обмотка внутреннего кольцевого статора; 4 — корпус модуля (см. рис. 1); 5 — пружина; 6 — нажимной диск; 7 — корпус муфты; 8 — опорный диск, который связан с маховиком; 9 — ведомый диск с фрикционными вставками

редукторы, нажимают на диск *б*, который, в свою очередь, зажимает опорный и ведомый диски, сжимая при этом и пружины *5*, и передают вращение на кривошипный вал пресса. После отключения напряжения на статорах *2* и *3* пружины *5* разжимаются и отводят нажимной диск в исходное положение. Следуя этому алгоритму работы, можно составить циклограмму работы муфты (рис. 3), согласно которой весь цикл работы муфты можно разбить на три участка *a*, *b*, *c*.

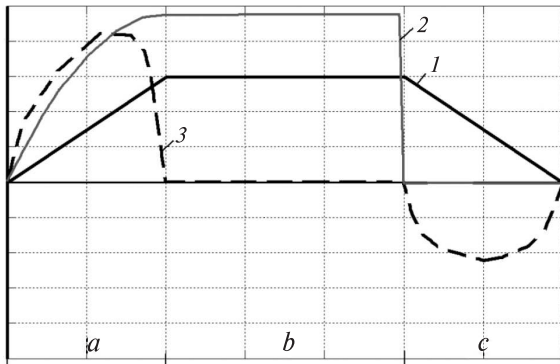


Рис. 3. Циклограмма работы муфты: 1 – ход муфты; 2 – момент вращения ротора; 3 – частота вращения ротора

На участке *a* подается напряжение на статоры, роторы достигают максимальной частоты вращения и максимального значения момента. Как только диски не придут в соприкосновение, частота вращения падает до нуля, а момент стремится к максимальному значению.

На участке *b* ход муфты остается неизменным, в это время происходит движение ползуна, напряжение на статоре все еще есть, и значение момента максимально, а скорость близка к нулю.

На участке *c* отключается напряжение на статоре, момент становится равным нулю, под действием пружин нажимной диск возвращается в исходное положение, сжимая штоки, и вращение ротора происходит в обратном направлении. Таким образом, управление муфтой происходит на двух участках *a* и *b*, причем основная нагрузка на участке *a* – это сжатие пружин, а на участке *b* – удержание дисков сжатыми.

Рассмотрим принцип векторного управления. Изменяемыми величинами являются токи статора i_a, i_b, i_c и частота вращения вала ω_r . В сбалансированной трехфазной цепи описание состояния с помощью трех величин избыточно, два значения всегда задают треть [7]. Поэтому значения токов i_a, i_b, i_c преобразуем в постоянные i_{sd}, i_{sq} с помощью формулы:

$$\begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s \\ -\sin \theta_s & \cos \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\theta_s(t) = \int_0^t \omega_s(\tau) d\tau$ – угловое положение вращающейся системы координат; ω_s – частота вращения системы координат.

Как видно из (1), для такого преобразования необходимо знать значение ω_s , которое зависит от измеренной частоты вращения вала ω_r и скольжения ω_{slip} ; она определяется из соотношений:

$$p = -\frac{p}{\tau_r} + \frac{i_{sd}}{\tau_r}; \quad \omega_{slip} = \frac{i_{sq}}{\tau_r p}, \quad (2)$$

где p – переменная состояния.

При вычислении ω_s используется постоянная времени ротора двигателя τ_r , которая должна быть измерена или оценена до запуска двигателя в векторном режиме.

Модель двигателя в пространстве состояний с ориентацией потокосцепления ротора φ_r по оси d описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_r &= -\frac{R_R}{L_M} \varphi_r + i_{sd} R_R; \\ \dot{i}_{sd} &= -\frac{\omega}{L_\sigma} \varphi_r - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sq} - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sq} - i_{sd} \omega_s + \frac{u_{sq}}{L_\sigma}; \\ \dot{i}_{sq} &= \frac{R_R}{L_\sigma L_M} \varphi_r - \frac{R_R}{L_\sigma} i_{sd} - \frac{R_s}{L_\sigma} i_{sd} + i_{sq} \omega_s + \frac{u_{sd}}{L_\sigma}; \\ \dot{\omega} &= p \frac{T_e - T_m}{J}, \end{aligned} \quad (3)$$

где i_{sd}, i_{sq} – токи статора в системе dq -координат; u_{sd}, u_{sq} – напряжения статора; ω – частота вращения вала двигателя; $T_e = p \varphi_r i_{sq}$ – электромагнитный момент.

Параметры двигателя задаются отдельно и имеют следующие обозначения: R_R – приведенное сопротивление ротора; R_s – сопротивление статора; L_σ – приведенная индуктивность статора; L_M – приведенная индуктивность намагничивания; p – число пар полюсов; J – момент инерции ротора.

Система dq -координат вращается с синхронной скоростью двигателя:

$$\omega_s = \omega + \frac{R_R i_{sd}}{\varphi_r}. \quad (4)$$

На рис. 4 изображена упрощенная структура векторного управления орбитальным электроприводом муфты пресса.

Стоит обратить внимание, что фактически при вычислении частоты вращения координат ω_s используется значение потокосцепления φ_r , которое обычно определяется из модели двигателя (3); в таких случаях важно знать значения R_R и L_M .

Особенность конструкции орбитального электропривода муфты пресса не позволяет использо-

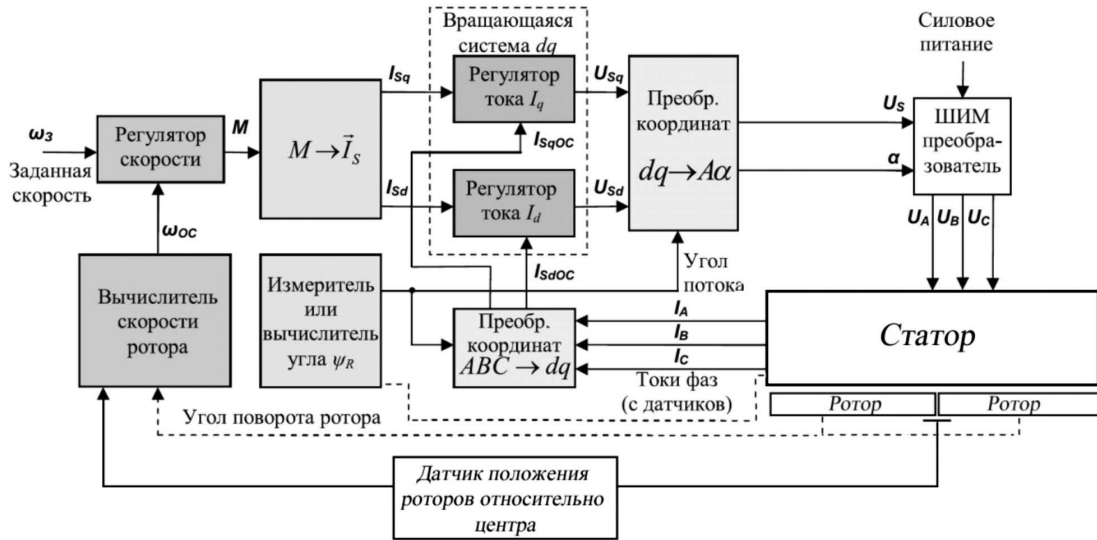


Рис. 4. Структура векторного управления

вать датчик угла поворота вала ротора, поэтому для вычисления этого угла используются косвенные методы на основе измеряемых токов. Для повышения точности вычислений в системе используются также датчики Холла, которые помогают определить магнитный поток ротора. Схематичное расположение датчиков Холла показано на рис. 5.

Для снятия данных с датчиков Холла применяется датчик положения роторов относительно статора (или центра вращения). Так система управления распознает, когда ротор находится над датчиком. Таким образом, частота вращения ротора относительно статора определяется суммой частот вращения ротора по орбите и его собственной частотой вращения, что является особенностью орбитального электропривода.

Основной принцип векторного управления состоит в независимом регулировании квадратурного

тока i_{sq} и тока намагничивания двигателя i_{sd} . Ток i_{sd} определяет значение потокосцепления поля ротора и поддерживается постоянным, а ток i_{sq} всегда устанавливается на минимальном уровне так, чтобы обеспечить достаточное значение механического момента для поддержания заданной частоты вращения. За счет этого векторное управление обладает высокой энергетической эффективностью.

Условно будем пренебрегать динамикой регуляторов токов статора i_{sd} и i_{sq} , считая, что их быстрое действие значительно выше, чем динамика потокосцепления и скорости. Тогда в сокращенном виде модель двигателя примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_r &= -\frac{R_R}{L_M} \varphi_r + i_{sd} R_R; \\ \dot{\omega} &= p \frac{p \varphi_r i_{sq} - T_m}{J}. \end{aligned} \tag{5}$$

Пренебрегая динамикой регуляторов, входная мощность $P_{вх}$ может быть выражена суммой выходной механической мощности $P_{вых}$ и мощности потерь $P_{п}$:

$$\begin{aligned} P_{п} &= i_{sq}^2(t)(R_R + R_s) + i_{sd}^2 R_R; \\ P_{вых} &= \frac{\omega(t) T_e(t)}{p}; \\ P_{вх} &= P_{вых} + P_{п}. \end{aligned} \tag{6}$$

В установившемся режиме минимальное значение мощности потерь $P_{п}$ достигается при следующем токе намагничивания [7]:

$$i_{sd}^{opt}(T_m) = \sqrt{\frac{T_m}{L_M p}} \sqrt{\frac{R_R + R_s}{R_s}}, \tag{7}$$

который зависит от момента нагрузки на валу двигателя.

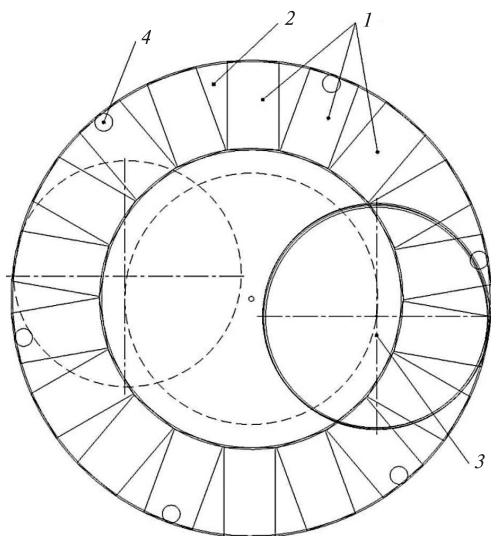


Рис. 5. Схема орбитального электропривода: 1 – катушки статора; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – датчики Холла

Из уравнения момента T_e находим:

$$i_{sq} = \frac{T_m}{L_M p i_{sd}}. \quad (8)$$

После вычисления оптимального значения квадратурного тока i_{sq}^{opt} и упрощения получаем:

$$\frac{i_{sq}^{opt}}{i_{sd}^{opt}} = \sqrt{\frac{R_s}{R_R + R_s}} = \gamma. \quad (9)$$

Таким образом, соотношение двух оптимальных токов зависит только от отношения сопротивлений двигателя.

Стоит обратить внимание и на индуктивность намагничивания L_M . Если в обычном асинхронном двигателе она постоянна на линейном участке кривой намагничивания двигателя, а при насыщении магнитопровода двигателя уменьшается, то в орбитальном электроприводе ее значение еще и прямо пропорционально площади перекрытия ротора и статора:

$$L_M = \frac{L_M^* S_{\Pi}}{S_s}, \quad (10)$$

где L_M^* — индуктивность намагничивания при полном перекрытии; S_{Π} — площадь перекрытия ротором статор; S_s — площадь статора. Площадь перекрытия, в свою очередь, зависит от положения роторов относительно центра и определяется [8, 9]:

$$S_{\Pi} = R^2 (\beta^1 - \beta^0) + r(\beta^1 + \alpha^1 - \beta^0 - \alpha^0) + \frac{Rr}{2} \int_0^{2\pi} [(2R+r)\cos\alpha] dt, \quad (11)$$

при условии

$$\beta(0) = \beta^0; \alpha(0) = \alpha^0; \beta(2\pi) = \beta^1; \alpha(2\pi) = \alpha^1,$$

где R — радиус орбиты вращения роторов; r — радиус ротора; α — угол поворота ротора; β — угол положения ротора на орбите.

Таким образом, особенность орбитального привода заключается, во-первых, в определении частоты вращения ротора и, во-вторых, в зависимости индуктивности намагничивания от перекрытия. С учетом этих особенностей было проведено моделирование в среде MATLAB (рис. 6). Вычислялась мощность потерь по (6) для номинального и оптимального законов управления током.

Из всего этого можно сделать следующие выводы. Применение векторного управления к орбитальному электроприводе муфты пресса возможно, так как используется косвенное определение скорости ротора, необходимо применять датчики для определения магнитного потока, количество датчиков зависит от количества роторов, но чем больше, тем точнее определение состояния системы и соответственно меньше мощность потерь. Применение

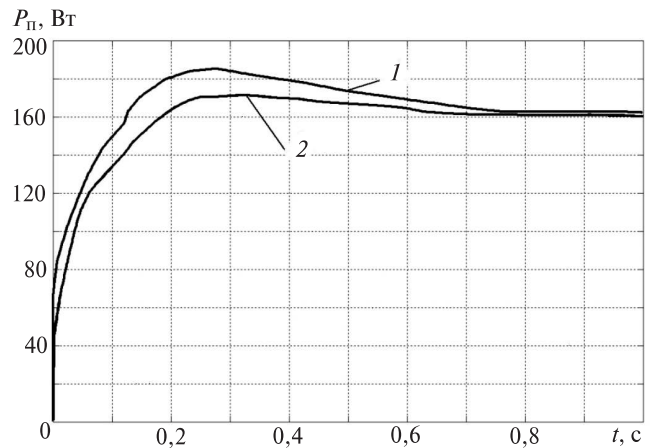


Рис. 6. Мощность потерь при увеличении нагрузки: 1 — для номинального закона управления током; 2 — для оптимального закона управления током

оптимального управления током в зависимости от нагрузки также снижает мощность потерь до 6%. В совокупности эти методы увеличивают коэффициент полезного действия, что приводит к увеличению полезной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2504475 (РФ). Привод муфты пресса/ А.М. Литвиненко, В.А. Крук, Г.В. Воскресенский. — БИ, 2014, № 2.
2. Патент № 2561493 (РФ). Муфта кривошипно-шатунного пресса/ А.М. Литвиненко, А.О. Богданов. — БИ, 2015, № 14.
3. Патент № 2557347 (РФ). Муфта кривошипно-шатунного пресса/ А.М. Литвиненко, А.Т. Крук, В.А. Крук, В.И. Соков, Г.В. Воскресенский, А.О. Богданов. — БИ, 2015, № 20.
4. Литвиненко А.М., Богданов А.О. Исследование роторного элемента орбитального привода муфты кривошипного пресса. — Электричество, 2014, № 8, с. 51–55
5. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Выбор системы управления орбитальным электроприводом муфты пресса. — Электричество, 2015, № 10, с. 63–66.
6. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Выбор системы частотного управления орбитальным электроприводом муфты пресса. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2015, № 4, с. 47–51.
7. Борисевич А.В. Энергосберегающее векторное управление асинхронными электродвигателями: обзор и состояния и новые результаты. — М.: ИНФРА-М, 2015, 104 с.
8. Литвиненко А.М. Симметричные орбитальные электро-механические системы с дисковым якорем. — Электротехника, 2001, № 4, с. 12–17.
9. Богданов А.О., Литвиненко А.М. Учет особенностей статора орбитального электропривода. — Энергия-XXI, 2015, № 2, с. 122–126.

[09.03.2016]

Авторы: **Богданов Анатолий Олегович** окончил факультет энергетики и систем управления Воронежского государственного технического университета (ВГТУ) в 2013 г. Аспирант ВГТУ.

Литвиненко Александр Михайлович окончил электромеханический факультет Воронежского политехнического института в 1973 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование орбитальных электромеханических систем». Профессор ВГТУ.

A Press Coupling Orbital Electric Drive Control System

BOGDANOV Anatolii Olegovich (*Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia*) – Ph. D. Student

LITVINENKO Aleksandr Mikhailovich (*VSTU, Voronezh, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

A press coupling orbital electric drive control system is considered as an alternative option to replace the coupling and brake pneumatic control systems. The specific feature inherent in the design of a press coupling orbital electric drive does not make it possible to use the rotor shaft rotation speed sensor, due to which a method for indirectly determining the rotation speed using additional sensors is proposed. Another specific design feature is that the system has a magnetization inductance the value of which varies depending on the rotor position with respect to the stator. In view of these features, a system of vector control, as well as optimal control of current as a function of load on the orbital electric drive are considered.

Key words: orbital electric drive, press coupling, control system, vector control

REFERENCES

1. **Patent RF No. 2504475.** *Privod mufty pressa* (Drive of coupling press)/A.M. Litvinenko, V.A. Kruk, V.G. Voskresenskii. Bulletin of inventions, 2014, No. 2.
2. **Patent RF No. 2561493.** *Mufta krivoshipno-shatunnogo pressa* (Coupling crank press)/A.M. Litvinenko, A.O. Bogdanov. Bulletin of inventions, 2015, No. 14.
3. **Patent RF No. 2557347.** *Mufta krivoshipno-shatunnogo pressa* (Coupling crank press)/A.M. Litvinenko, A.T. Kruk, A.V. Kruk, V.I. Sokov, G.V. Voskresenskii, A.O. Bogdanov. Bulletin of inventions, 2015, No. 20.
4. **Litvinenko A.M., Bogdanov A.O.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 51–55.
5. **Bogdanov A.O., Litvinenko A.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2015, No. 10, pp. 63–66.
6. **Bogdanov A.O., Litvinenko A.M.** *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya – in Russ. (Electrotechnical complexes and control systems)*, 2015, No. 4, pp. 47–51.
7. **Borisevich A.V.** *Energoberegayushcheye vektornoye upravleniye asinkhronnymi elektrodvigatelyami: obzor i sostoyaniya i novye rezul'taty* (Energy-efficient vector control of asynchronous electric motors: overview and state and new results). Moscow, Publ. «INFRA-M», 2015, No. 104 p.
8. **Litvinenko A.M.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2001, No. 4, pp. 12–17.
9. **Bogdanov A.O., Litvinenko A.M.** *Energiya-XXI – in Russ. (Energy-XXI)*, 2015, No. 2, pp. 122–126.