

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ШАГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Соколов

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

DYNAMIC MODELS OF ELECTRIC STEP MOTORS

A.V. Sokolov

Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрены варианты получения упрощенных динамических моделей шагового электропривода (ШЭП), при составлении которых принят ряд допущений, позволяющих добиться их упрощения. Упрощенная динамическая модель позволяет учесть влияние линеаризации, особенности построения электронного коммутатора (ЭК) и воспользоваться каталожными данными шаговых электродвигателей (ШЭД).

Ключевые слова: динамические модели, разомкнутый и замкнутый шаговые приводы, безразмерные нормализованные параметры, предельная модель.

Variants of obtaining of simplified dynamic models of an electric step drive (ESD) are considered. This model allows to consider the influence of a linearization, features of construction of electronic switch and to use catalogued data of electric step motors (ESM).

Keywords: dynamic models, opened and closed step drives, dimensionless normalized parameters, limiting model.

Прогресс в силовой микроэлектронике и магнитных материалах повысил интерес к использованию в приборостроении дискретных электроприводов на основе ШЭД магнитоэлектрического, индукторного и гибридного типов [1].

Существенным их достоинством является возможность использования при различных способах управления, отличающихся уровнем и степенью информационного обеспечения процесса позиционирования.

Однако при этом наибольшие затруднения вызывает анализ собственных динамических свойств двигателя в силу существенной нелинейности дифференциальных уравнений, описывающих его поведение, а также из-за сильной зависимости параметров от выбранного способа управления.

Часто встает вопрос о пределах применимости той или иной динамической модели ШЭД, поскольку предложенные в [1] результаты моделирования, вообще говоря, выведены при жестких ограничениях на частоту управляющих импульсов. Необходимость учета динамических свойств двигателя вызывается тем, что он вместе с ЭК оказывает большое влияние на важнейшие качественные характеристики шагового электропривода (ШЭП), такие как быстродействие, точность, потребление электроэнергии и т. д.

При этом наиболее простым является способ пошагового управления, при котором информационное обеспечение процесса позиционирования осуществляется путем программного управления

электромагнитным полем ШЭД. Величина перемещения задается количеством импульсов управления, а скорость перемещения частотой следования этих импульсов в формате число-импульсного (унитарного) кода.

Частота импульсов определяется в зависимости от возможных режимов работы по универсальным динамическим характеристикам, полученным моделированием модифицированной системы уравнений Парка – Горева на ЭВМ «Analac-110» [1].

В достаточно общем виде система дифференциальных уравнений, описывающая поведение ШЭД, может быть в координатах d , q , Θ представлена для различных сочетаний 3 безразмерных параметров χ , δ , μ_H в виде

$$\begin{aligned} i_d &= \chi \frac{di_d}{d\tau} - \chi i_q \frac{d\Theta}{d\tau} = \cos(\gamma - \Theta); \\ i_q &= \chi \frac{di_q}{d\tau} + \chi i_d \frac{d\Theta}{d\tau} + \delta \frac{d\Theta}{d\tau} = \sin(\gamma - \Theta); \\ \frac{d^2\Theta}{d^2\tau} + \mu_H &= i_q. \end{aligned} \quad (1)$$

Система уравнений (1) записана в нормализованном виде, где i_d , i_q – токи по продольной и поперечной осям ШЭД; τ – безразмерное время.

Безразмерная нормализованная постоянная времени обмоток управления

$$\chi = \omega_0 T_0 = \omega_0 \frac{L_\phi}{R}, \quad (2)$$

где нормализующая частота ω_0 – собственная частота колебаний в режиме малых отклонений от положения равновесия,

$$\omega_0 = \sqrt{\bar{p} \frac{M_m}{J_\Sigma}}, \quad (3)$$

\bar{p} – число пар полюсов ШЭД, M_m – максимальный синхронизирующий момент электродвигателя, J_Σ – суммарный момент инерции ротора электродвигателя и приведенного момента инерции нагрузки, L_ϕ – индуктивность обмотки, R – суммарное активное сопротивление обмотки и форсировки.

Нормализованный коэффициент внутреннего демпфирования $\delta = 9,81 \cdot 10^5 M_m \omega_0 / \bar{p} I_y^2 R$, где I_y – ток управления.

Следует отметить, что система уравнений (1) применима к магнитоэлектрическим, индукторным и гибридным ШЭД [1].

Модель, соответствующая системе уравнений (1), может быть представлена в виде, приведенном на рис. 1 [2], где умножению во временной области соответствует интеграл свертки в комплексной плоскости. Нетрудно заметить, что достаточно строгий математический анализ системы уравнений (1) может быть выполнен лишь с использованием ЭВМ.

При формировании моделей ШЭД, которые с математической точки зрения оказываются не совсем корректными, учтем то обстоятельство, что при использовании ШЭД в замкнутом ШЭП, частоту импульсов управления выбирают таким образом, чтобы обеспечить устойчивую работу двигателя в разомкнутом состоянии. Кроме того, в высококачественных системах обычно частота импульсов управления выбирается таким образом, чтобы двигатель мог достаточно точно воспроизводить высокочастотную составляющую полезного входного сигнала. Это позволяет в качестве предельной частоты импульсов управления использовать частоту реверса с установившегося режима.

При сравнительно низких частотах управляющих импульсов приходится учитывать импульсный характер работы ШЭД. С увеличением частоты управляющих импульсов условия теоремы Котельникова выполняются все более строго. В этом случае можно без учета импульсного характера работы ШЭД описать его свойства лишь приведенной непрерывной частью. Отметим, что это допущение накладывает ограничения на спектр входного сигнала, т. е. необходимо, чтобы верхняя его частота была как минимум в 2 раза меньше частоты управляющих импульсов, подаваемых на ШЭД. В подавляющем большинстве ШЭП это условие выполняется. Нетрудно заметить, что в высокоточных системах это условие выполняется еще более жестко.

При указанных условиях динамическую модель ШЭД можно с достаточной для практики точностью упростить и привести к виду, представленному на рис. 2.

Эта схема получена при следующих допущениях:

1) считаем, что перемещение ротора состоит из перемещения с синхронной скоростью с наложенными на нее колебаниями;

2) при учете связей по токам (рис. 1) колебаниями скорости перемещения пренебрегаем.

При моделировании дифференциальных уравнений, описывающих работу ШЭД, использовалось динамическое запоминание значений угла поворота ротора и скорости перемещения предыдущего шага, которые применялись в качестве начальных условий для последующего шага. Это позволяет производить сравнительный анализ предложенных упрощенных схем с полной моделью ШЭД (рис. 1) на i -м шаге.

Моделирование показало, что после первых трех-четырёх шагов расхождения в угловом положении не превышают 20 %. Другим важным обстоятельством, позволяющим линеаризовывать модель ШЭД при пошаговом управлении, является относительная малость нормализованных постоянных времени χ у магнитоэлектрических двигателей (рис. 3).

На рис. 3 приведены зависимости величины нормализованной электромагнитной постоянной χ для различных типоразмеров ряда ШЭД типа ДШ-А и величин моментов инерции нагрузки. В тех случаях, когда в системе управления приняты меры по ускорению электромагнитных процессов нарастания и спада тока в обмотках управления, можно получить предельную модель двигателя, показанную на рис. 4.

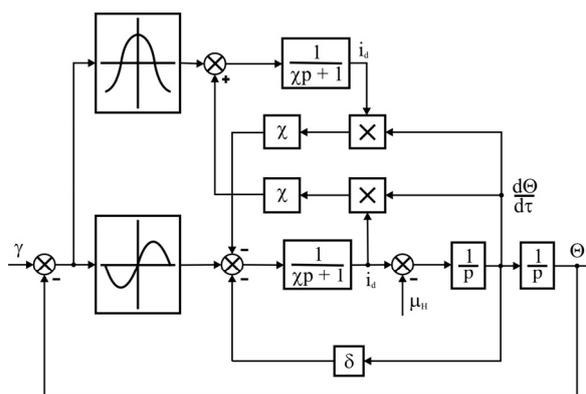


Рис. 1

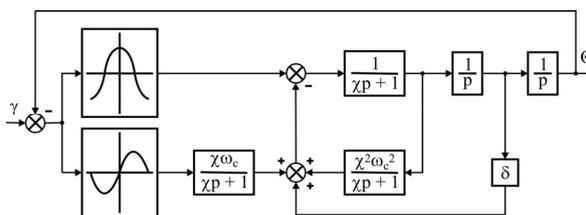


Рис. 2

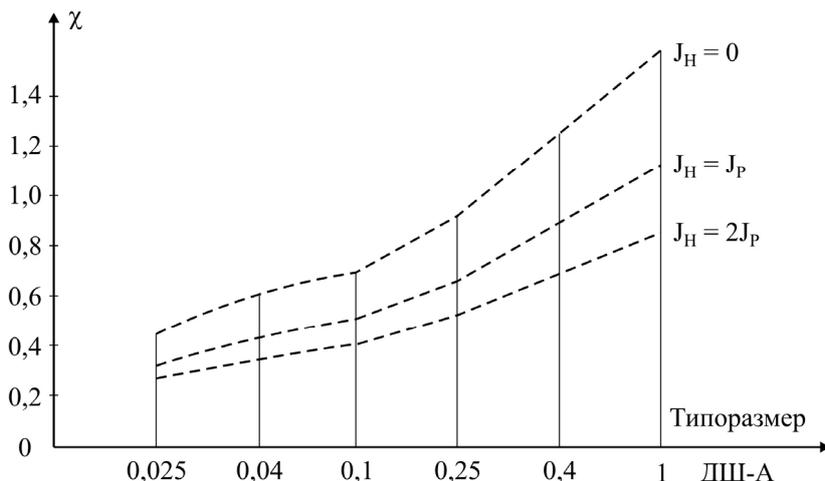


Рис. 3

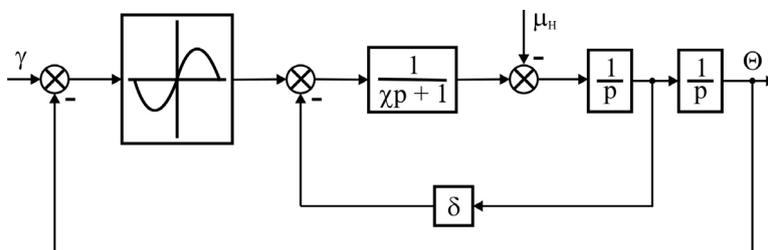


Рис. 4

Следует отметить, что при $0,1 < \chi < 0,4$ эта эквивалентная схема дает достаточно хорошее совпадение с универсальными динамическими характеристиками вплоть до относительных частот управления $f^* = 0,7-0,8$. Анализ эквивалентной структурной схемы, приведенной на рис. 4, также достаточно сложен и очевидно ее применение может быть оправдано при решении довольно ограниченного круга задач.

Применение находит динамическая модель, предложенная в [3], однако и в этом случае вопрос о пределах применимости этой структурной схемы остается открытым. Исследования [2] показывают, что при $\chi < 0,5$ эта эквивалентная схема достаточно груба при $f^* < 0,5$. Следует сказать, что при $\chi = 0,3-0,5$ эта эквивалентная структурная схема дает завышенный фазовый сдвиг в область отрицательных фазовых углов.

Рассмотрим качественную картину. Пусть двигатель имеет установившуюся скорость $\omega^* = \pi/2 f^*$. В конце i -го шага имеется динамическая ошибка, равная $\gamma - \theta = \alpha$. В этом случае при линеаризованной зависимости статического синхронизирующего момента будет введена энергия:

$$W_{\text{лин}} \sim \int_{\alpha}^{\pi/2+\alpha} f(\Theta) d\Theta \sim \frac{\pi^2}{8} + \frac{\alpha\pi}{2}. \quad (4)$$

В случае, если статический синхронизирующий момент имеет синусоидальную зависимость, величина энергии будет пропорциональна:

$$W_{\text{син}} \sim \sin \alpha + \cos \alpha. \quad (5)$$

Будем полагать, что очередной управляющий импульс приходит с запаздыванием на время, необходимое для того, чтобы энергии, вводимые в динамическую систему при различных зависимостях статического синхронизирующего момента, были равны при условии, что ротор двигателя повернется на величину электрического шага двигателя, равного $\pi/2$,

$$W_{\text{лин}} = W_{\text{син}}. \quad (6)$$

Выполняя элементарные преобразования, получаем выражение для эквивалентного $\tau_{\text{Э}}$ времени запаздывания в виде

$$\tau_{\text{Э}} = 2 \frac{\pi\alpha + \pi^2/4 - 2(\sin \alpha + \cos \alpha)}{\pi^2 f^*}. \quad (7)$$

Зависимость величины эквивалентного запаздывания $\tau_{\text{Э}} = f(f^*)$ для различных значений угла α , обусловленного нелинейностью статического синхронизирующего момента, приведена на рис. 5.

Величина $\tau_{\text{Э}}$ (рис. 5) сравнительно не велика, что и позволяет использовать при исследовании ШЭП эквивалентную схему, приведенную на рис. 4.

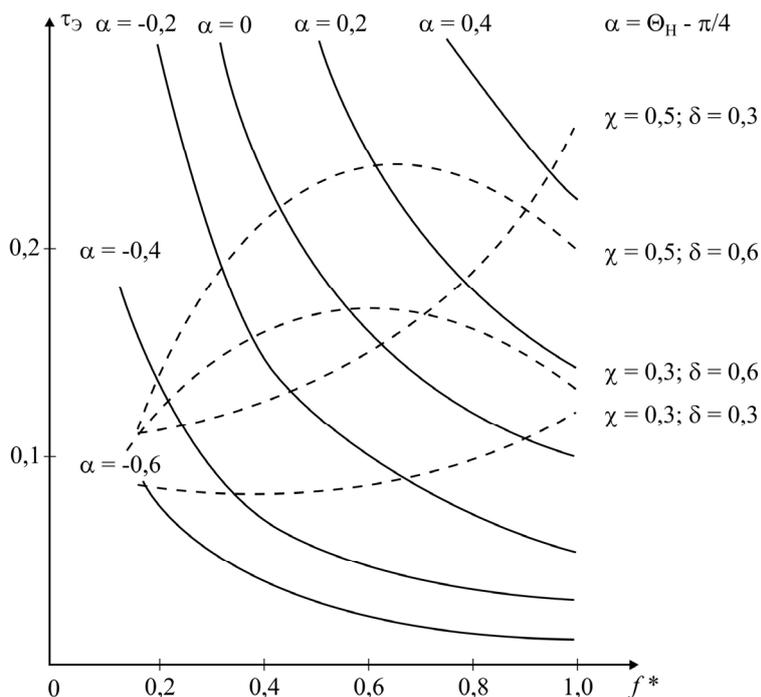


Рис. 5

Это, в свою очередь, позволяет упростить анализ и синтез электромехатронных преобразователей (ЭМТП) с переменной структурой. В процессе функционирования этого ЭМТП имеет место автоматическое изменение алгоритма коммутации ШЭД в зависимости от величины позиционной ошибки. При этом на последнем шаге происходит изменение величины коэффициента внутреннего демпфирования δ , величина которого зависит от алгоритма коммутации [2].

Интеллектуальные свойства замкнутого ЭМТП с ШЭД позволяют получить синергический эффект, проявляющийся в снижении погрешности позиционирования и повышении энергоэффективности ЭМТП.

Литература

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. Смирнов, Ю.С. Эквивалентные структурные схемы дискретных электромехатронных преобразователей / Ю.С. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15. – № 3 (262). – С. 81–86.
3. Дондик, Е.М. Эквивалентные схемы шагового двигателя в импульсных автоматических системах / Е.М. Дондик // Изв. вузов. Приборостроение. – Т. VIII. – № 3. – 1965.

Поступила в редакцию 04.03.2012 г.

Соколов Александр Васильевич – старший преподаватель кафедры автоматизации механосборочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. E-mail: iaexsok@gmail.com

Sokolov Alexander Vasilevich is a senior teacher of Mechanical Assembly Production Automation Department of South Ural State University. E-mail: iaexsok@gmail.com