

УДК 621.313.292

В.М. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАГОВОГО ПРИВОДА

Ульяновский государственный технический университет

Важными составляющими многих электротехнических комплексов являются электроприводы на основе шаговых двигателей. В области исследований шаговых двигателей одно из актуальных направлений связано с совершенствованием систем управления и изучением переходных процессов. В статье рассматриваются режимы работы шагового двигателя в разомкнутых и замкнутых по положению системам управления. Авторами выполнено сопоставление режимов работы шагового двигателя и бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ). Приведено математическое описание гибридного шагового двигателя, соответствующее работе синхронного двигателя без демпферной обмотки. Рассмотрена структура комбинированного регулирования скорости шагового двигателя, сочетающая шаговый режим работы с режимом работы БДПТ. В отличие от автокоммутируемого режима работы БДПТ, предлагаемая структура управления обеспечивает гарантированную отработку на низких частотах и реализацию тормозных режимов. Приведены результаты исследования работы шагового привода с регулированием напряжения в функции частоты. В заключении предложены рекомендации по реализации системы управления на базе микроконтроллера.

Ключевые слова: гибридный шаговый двигатель, законы частотного регулирования напряжения, математическая модель, режим БДПТ.

1. Введение

Электропривод на основе шагового двигателя (ШД) используется во многих технических системах, при этом важнейшее значение имеет не только сам шаговый двигатель, но и управляющая электроника. При исследовании шагового привода значительное внимание уделяют коммутационным процессам. Для повышения точности и плавности движения используют режим дробления шага. Известны методы оптимизации переходных процессов в обмотках двигателя за счет переключения напряжения с одного уровня на другой или введения дополнительного сопротивления. Заслуживает внимания принцип двухфазного управления, реализация которого осуществляется подачей на одну фазу положительного импульса напряжения, а на другую фазу, через некоторое время, отрицательного импульса напряжения [1]. Отметим, что при реализации двухфазного управления необходимо иметь в системе автоматического регулирования информацию об изменении механической нагрузки.

При разработке системы управления необходимо учитывать множество факторов, которые в силу специфики принципа работы и конструктивных особенностей двигателей требуют специальных исследований [2-4]. Вместе с тем, для изучения основных свойств работы шагового привода и его системы управления, как основу для технической реализации целесообразно использовать упрощенные математические модели.

Принцип работы обращенной машины постоянного тока основан на замене коллектора ротора коммутатором обмоток статора. В соответствии с данным принципом реализованы вентильные и шаговые двигатели, которые в свою очередь являются разновидностью синхронных машин переменного тока [5, 6]. Основное отличие вентильных двигателей с постоянными магнитами от гибридных шаговых двигателей заключается в наличии датчика положения ротора.

Если не принимать во внимание особенности систем управления, то вентильный двигатель можно рассматривать как автокоммутируемый шаговый двигатель. Режим автокоммутиации называют режимом бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ). Привод в режиме БДПТ позволяет исключить пропуск шага и увеличить быстродействие по сравнению с разомкнутым шаговым приводом. Двигатель ускоряется и замедляется в соответствии с соотношением развиваемого и нагрузочного моментов.

Основная проблема простейшего вентильного привода, коммутация обмоток которого производится в функции угла поворота ротора, обусловлена трудоемкостью регулирования и стабилизации скорости. При этом двигатель в режиме БДПТ разгоняется до предельной скорости, определяемой нагрузкой на валу двигателя. Таким образом, установившийся режим работы определяется только нагрузкой. В связи с этим возникает необходимость исследования режимов шагового привода в разомкнутых и замкнутых по положению системах управления.

II. Математическое описание шагового привода

Рассмотрим математическую модель работы гибридного шагового двигателя в пределах шага коммутации [7, 8]. В шаговом режиме работы изменение потокосцепления статора ψ_s на угол θ^* осуществляется за счет коммутации очередной обмотки (рис. 1). Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора, то вектор напряжения U_s опережает вектор потокосцепления статора ψ_s на угол $\pi/2$. В установившемся режиме вектор потокосцепления ротора ψ_r отстает на угол $\Delta\theta = \theta^* - \theta$, где θ_r – угол поворота ротора. Проекции модуля вектора напряжения на оси вращающейся системы координат ротора (d, q) определяются выражениями:

$$U_d = -U \cdot \sin(\theta_s - \theta_r); \quad (1)$$

$$U_q = U \cdot \cos(\theta_s - \theta_r). \quad (2)$$

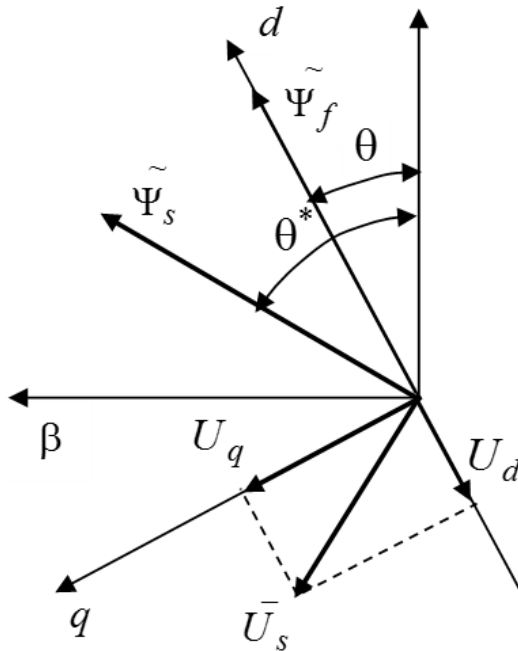


Рис.1. Векторная диаграмма шагового двигателя

Для двигателей с постоянными магнитами собственная индуктивность фазы и взаимоиндуктивность между фазами благодаря низкому значению магнитной проницаемости материала магнита мало зависит от углового положения ротора даже при явно полюсной конструкции. Поэтому можно принять их равными средним значениям. Можно пренебречь также наведением токов в теле ротора, так как материал магнита имеет высокое удельное сопротивление. Как уже было показано в работе 2010 г., уравнения электромагнитных процессов такой электрической машины могут быть записаны в виде:

$$U_d = R \cdot I_d + p \cdot \Psi_d - \omega_0 \cdot \Psi_q; \quad (3)$$

$$U_q = R \cdot I_q + p \cdot \Psi_q + \omega_0 \cdot \Psi_d; \quad (4)$$

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_f; \quad (5)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q, \quad (6)$$

где R – сопротивление фазы обмотки статора; L_d, L_q , – индуктивности обмоток статора по осям d, q ; $\omega_0 = p_n \cdot \omega$ – частота ЭДС вращения; p_n – число пар полюсов [6].

Электромагнитный момент для трехфазной машины через составляющие потокосцепления и тока статора:

$$M = (3/2) \cdot p_n \cdot (\Psi_d \cdot I_q - \Psi_q \cdot I_d). \quad (7)$$

Уравнение механики с учетом потерь может быть записано в виде

$$\omega = \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M - M_c - d \cdot \omega), \quad (8)$$

где d – коэффициент, учитывающий дополнительный момент демпфирования.

Разрешая уравнения (3) и (4) относительно токов и учитывая, что $p\Psi_f = 0$, получим

$$I_d = (U_d + \omega_0 \cdot \Psi_q) \cdot \frac{1/R}{T_d \cdot p + 1}; \quad (9)$$

$$I_q = (U - \omega_0 \cdot \Psi_d) \cdot \frac{1/R}{T_q \cdot p + 1}, \quad (10)$$

где $T_d = L_d / R$; $T_q = L_q / R$, – постоянные времени статорных обмоток, приведенные к осям d, q ротора.

Структурная схема шагового электропривода приведена на втором рисунке. Здесь к блокам структуры, описание которых соответствует исходным уравнениям (5-10), добавлен контур формирования угла коммутации, содержащий интегратор и квантователь информации по уровню ФП 2.

Шаг квантования угла равен $\sigma = 2\pi / k$, где k – число тактов системы управления. Это число состояний коммутатора на цикле его работы:

$$k = m \cdot N_1, \quad (11)$$

где m – число фаз; N_1 – число направлений тока в фазах ($N_1 = 1$ или 2) зависит от вида коммутации.

Изменение угла θ^* вектора потокосцепления статора определяется частотой ω^* , которая формируется задатчиком интенсивности. Электрический угол ротора θ связан с механическим углом его поворота θ_m следующим соотношением $\theta = p_n \cdot \theta_m$.

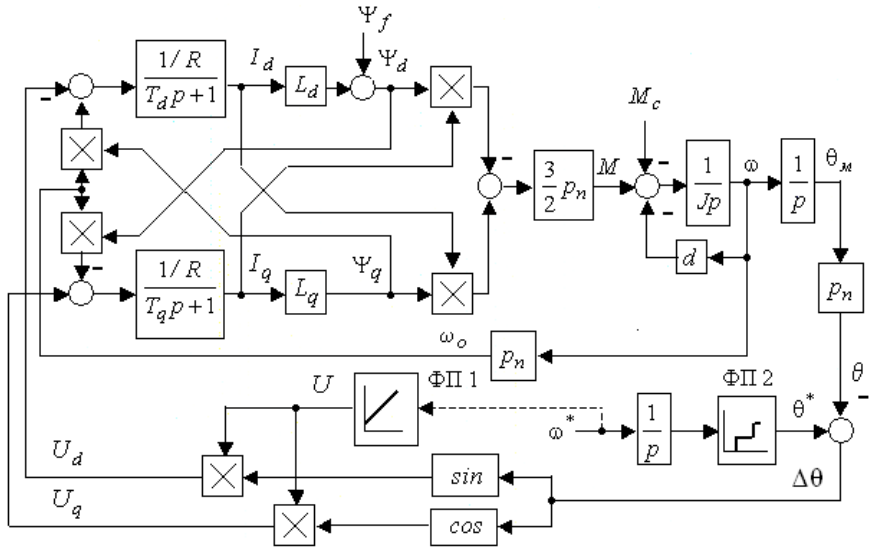


Рис. 2. Структурная схема шагового электропривода

Исследование математической модели шагового электропривода проводилось исходя из допущений принятых при выводе уравнений, соответствующих работе синхронного двигателя без демферной обмотки.

Установлено, что необходимо учитывать первичную ориентацию ротора относительно обмоток статора в момент запуска модели. Это достигается за счет задержки формирования задающего воздействия ω^* или вводом начального угла $-\pi/2$. При этом синусная и косинусная составляющие напряжения становятся взаимобратными и определяют начальную точку равновесия системы.

III. Результаты моделирования

Переходные процессы при равноускоренном пуске и неизменном напряжении представлены на рисунке 3. В качестве одного из основных параметров принято значение напряжения, которое не вызывает значи-

тельного перерегулирования тока в старт-стопных режимах работы ШД и на низких частотах коммутации обмоток.

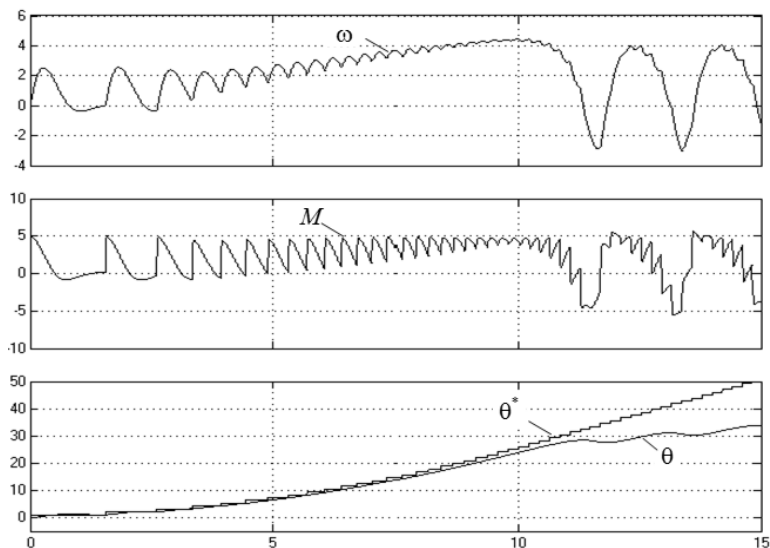


Рис. 3. Переходные процессы в шаговом электроприводе при равноускоренном пуске и неизменном напряжении

В процессе разгона с увеличением частоты коммутации из-за инерционности двигателя отработка элементарного приращения угла осуществляется с возрастающим запаздыванием. При превышении запаздывания на угол $\pi/2$ происходит уменьшение момента, что в конечном итоге приводит к изменению его знака и колебательным процессам. Основной причиной, приводящей к срывам коммутационных процессов при увеличении частоты коммутации, можно считать недостаточный динамический момент, особенно при работе под нагрузкой.

При наличии датчика положения ротора можно контролировать угол нагрузки, и при превышении его допустимого значения задерживать очередную коммутацию обмоток статора. В этом случае схема задатчика интенсивности частоты коммутации обмоток (рис. 4), кроме задатчика скорости (ЗС) и следящего контура релейного типа, содержит дополнительные модули: схему формирования модуля (М), сравнения и коммутационный элемент (К).

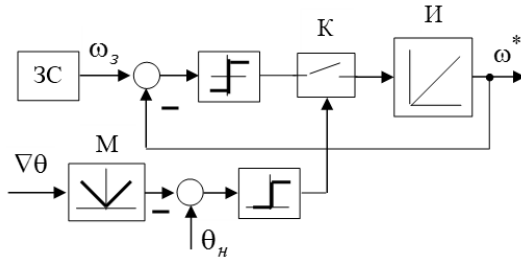


Рис. 4. Функциональная схема задатчика интенсивности частоты коммутации

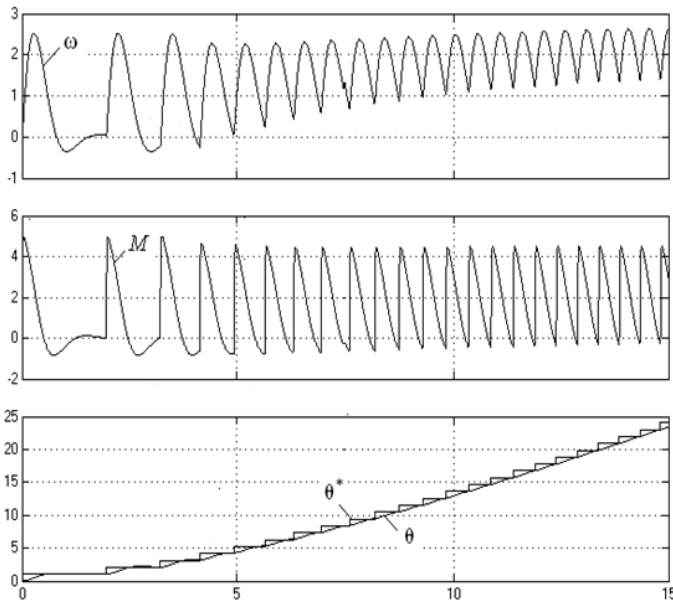


Рис. 5. Переходные процессы в шаговом электроприводе с задатчиком интенсивности частоты коммутации и контролем угла нагрузки

При превышении заданного угла нагрузки θ_H происходит размыкание входной цепи интегратора (И). Это приводит к снижению темпа изменения задающей частоты (рис. 5), и как следствие, к задержке формирования очередного шага коммутации. В отличие от ранее рассмотренных переходных процессов за счет ограничения частоты не наблюдается срыва коммутации. Частота ω^* на выходе задатчика не достигает заданного значения $\omega_з$. На исследуемом интервале времени при тех же параметрах число

отработанных шагов коммутации снизилось в два раза. В этом случае, как у БДПТ значение верхней частоты коммутации определяется моментом нагрузки. Однако, в отличие от него, гарантирована отработка на низких частотах и реализация тормозных режимов.

Скорость, при которой ЭДС вращения полностью уравнивает приложенное напряжение источника, является граничной для двигательного режима работы привода. Снижение пульсаций тока в обмотках смягчает периодические силовые воздействия на ротор. Дискретный характер вращения поля с увеличением частоты коммутации сглаживается, вырождаясь в пределе в непрерывное вращение поля. Дискретный электропривод утрачивает свои характерные особенности и его, в высокочастотной области, можно рассматривать как синхронный привод с управлением от статического преобразователя частоты.

Один из основных законов частотного регулирования основан на поддержании постоянства между напряжением и частотой. Разновидностью этого закона является закон с компенсацией падения напряжения на сопротивлении статорной цепи. Данный закон органически соответствует режимам работы шагового двигателя, в том числе и на низких частотах. Для реализации регулирования напряжения в структуру шагового электропривода (рис. 2) введены функциональный преобразователь ФП 1 и датчик интенсивности частоты коммутации.

Программное управление при отработке заданной траектории в общем случае предусматривает участки разгона, движения с постоянной скорости и торможения. На рисунке 6 представлены переходные процессы, соответствующие данным условиям движения и реакции на скачок нагрузки.

IV. Вывод

Таким образом, если оценивать элементарные системы без обратных связей по скорости и других дополнительных контуров управления, то структуры вентильного привода с принудительной коммутацией имеют определенные преимущества, как в отношении регулировочных свойств, так и реализации законов управления. Использование контура угла нагрузки позволяет совместить положительные свойства шагового и автокоммутируемого режимов работы вентильного двигателя. В этом случае контур контроля угла нагрузки не оказывает существенного влияния на характер движения. Для реализации данного контура может быть использован датчик положения с низким разрешением.

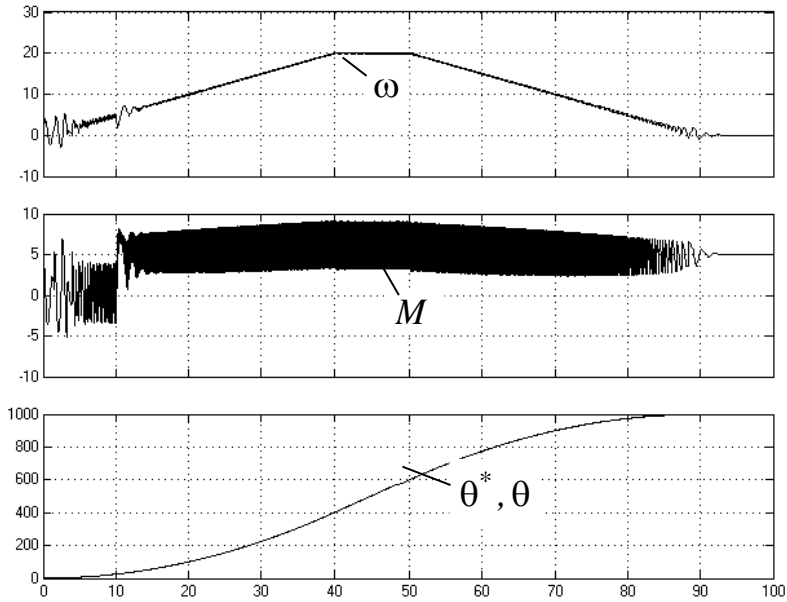


Рис. 6. Переходные процессы с регулированием напряжения при отработке заданной траектории и скачке нагрузки

Использование датчика темпа изменения частоты с одновременным регулированием напряжения позволяет расширить диапазон допустимых частот коммутации и обеспечить работу на верхних частотах с допустимыми нагрузками.

Контроллер движения с программной реализацией датчика частоты и ШИМ регулятора напряжения, в общем случае, должен включать алгоритмы интерполяции. Учитывая специфику шагового электропривода, при реализации алгоритмов интерполяции наиболее целесообразно использовать модифицированные методы оценочной функции. При реализации системы управления на базе микроконтроллера структура датчика рассмотренного типа с программной и аппаратной точки зрения не вызывает затруднений. Для организации процесса коммутации в этом случае можно использовать цифровые интеграторы, элементарные приращения которых формируются на фиксированных интервалах времени и определяются заданным значением скорости движения.

Библиографический список

- [1] Нейдорф Р.А., Солоха А.А. Задача квазиоптимального быстродействия управления шаговым двигателем // Математические методы в технике и технологиях: XVII междунар. научн. конф., Казань. Т.2. 2005.
- [2] Elksasy M.S.M., Hesham H.G. A New Technique for Controlling Hybrid Stepper Motor Through Modified PID Controller // International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS. № 2 (10), pp. 28-35, 2010.
- [3] Jijo P., Dominic M. A Novel Vector Control Strategy For Bipolar Stepper Motor // International Journal of Scientific & Engineering Research, № 5 (11), pp. 1133-1139, 2014.
- [4] Иванов В.М. Одноконтурный вентильный электропривод с векторной широтно-импульсной модуляцией // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 2. С. 77-85.
- [5] Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. Под общ. ред. М.Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971. – 624 с.
- [6] Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 328 с
- [7] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
- [8] Иванов В.М. Исследование динамики следящего электропривода с вентильным двигателем в режиме автокоммутации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 2. С. 110-115.

V.M. Ivanov

RESEARCH OF STEP DRIVE OPERATING MODES

Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia

Abstract. Important components of many electrical systems are electric drives based on stepper motors (SM). In the field of SM research, one of the current areas is associated with the improvement of control systems and the study of transients. The article discusses the operating modes of the SM in open – loop and closed – loop control systems. The authors have compared the operating modes of a SM and a brushless direct current motor (BLDC). A mathematical description of a hybrid stepper motor is given, which corresponds to the operation of a synchronous motor without a damper winding. The structure of the combined regulation of the speed of a SM, combining the step mode of operation with the BLDC operation, is considered. In contrast to the auto-commutation operation mode of the BLDC, the proposed control structure provides guaranteed performance at low frequencies and the implementation of brake modes. The results of the study of the stepper drive with the voltage regulation as a function of frequency are giv-

en. In conclusion, the recommendations for the implementation of a control system based on a microcontroller are proposed.

Keywords: BLDC mode, hybrid stepper motor, laws of frequency regulation of voltage, mathematical model.

References

- [1] R.A. Nejdorf and A.A. Soloha. The problem of quasioptimal speed control of a stepper motor// in proc. XVII Intern. Scient. Conf. Mathematical methods in engineering and technology, Kazan, Russia, 2005. T.2.
- [2] M.S.M. Elksasy and H.G. Hesham. A New Technique for Controlling Hybrid Stepper Motor Through Modified PID Controller // International Journal of Electrical & Computer Sciences IJECS-IJENS, vol. 10, no. 2, pp. 28-35, 2010.
- [3] Mr. Jijo Paul and Prof. Dominic Mathew. A Novel Vector Control Strategy For Bipolar Stepper Motor // International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 5, no. 11, pp. 1133-1139, 2014.
- [4] V.M. Ivanov. Single-Loop Valve Electric Drive with Vector Pulse Width Modulation // Russian Electromechanics, vol. 61, no. 2, pp. 77-85, 2018.
- [5] B.A. Ivobotenko, V.P. Rubcov, L.A. Sadovskij and V.K. Cacenkin, Discrete electric drive with stepper motors. ed. M.G. Chilikina. Moscow: Energija, 1971.
- [6] A.P. Balkovoj and V.K. Cacenkin, Precision electric drive with valve motors. Moscow: Publishing House MPEI, 2010.
- [7] G.G. Sokolovskij, AC drives with frequency regulation. Moscow: Publishing House Akademija, 2006.
- [8] V.M. Ivanov. Dynamics of the Servo Drive Brushless DC Motor in the Auto Switching Mode // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, vol. 17, no. 1, pp. 110-115, 2016.