

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

д.т.н. ¹Жарский В.В., ст.н.сотр. ²Луценко В.Е., асп. ¹Форутан М.М.,
³Шоломицкий В.Г., ³Дрогун Е.А.

¹УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск

²ТУ «Московский энергетический институт», Москва

³ОАО «КБТЭМ-ОМО»

Введение. Построение замкнутой системы управления помимо реализации канала обратной связи ставит другие задачи теории автоматического управления. К таким задачам относятся, прежде всего, синтез и реализация алгоритма управления (регулятора), назначение которого состоит в определении управляющего сигнала, подаваемого на усилитель мощности, на основании текущего значения ошибки позиционирования [1-3, 6].

Один из распространенных вариантов реализации обратной связи основан на использовании датчиков Холла. В этом случае на управляющую плату контроллера системы перемещений подается сигнал в формате HP/GL. Плата формирует задание на перемещение, которое поступает на вход сервоконтроллеров [4-5].

Сервоконтроллеры на основании сигналов датчиков и сигналов обратной связи формируют управляющее напряжение в диапазоне 0...10 В, которое подается на вход усилителя мощности.

Усилитель мощности, подключенный к исполнительному позиционеру, обладает встроенной обратной связью по току (стабилизатор тока), что позволяет управлять током в обмотках управления.

Аппаратная реализация обратной связи. Датчики обратной связи, конструктивно встроенные в двигатель (рис. 1), формируют сигнал обратной связи, который поступает на сервоконтроллер для формирования замкнутого управления.

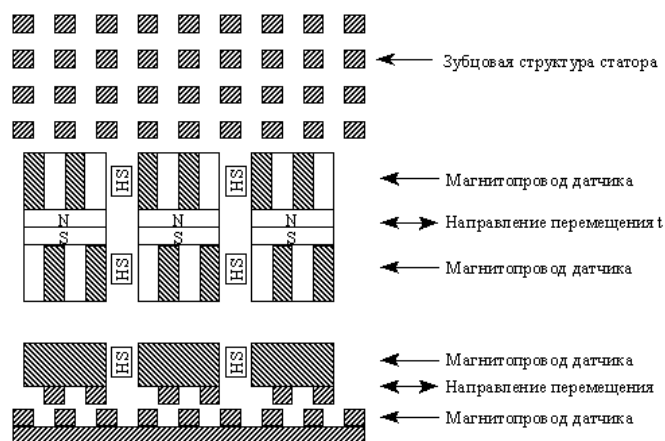


Рис. 1. Схема встраивания датчиков Холла в ЛШД

Базовая конструкция датчика положения содержит три составных П-образных магнитопровода, в каждую из которых последовательно включен постоянный магнит NS. Между магнитопроводами попарно располагаются датчики Холла HS (предварительно подобранные по соответствию токов смещения), при этом в магнитном отноше-

нии HS включаются в противофазе для компенсации постоянных составляющих магнитных потоков в сердечниках.

Такое конструктивное расположение датчиков Холла обеспечивает измерение только разности магнитных потенциалов в смежных магнитопроводах, исключив синфазные составляющие от динамического (в процессе движения) изменения магнитовоздушного зазора двигателя. В технологическом отношении такая конструкция не критична в отношении разности потоков постоянных магнитов NS в смежных магнитопроводах. На полюсах сердечников каждого магнитопровода сформированы зубцы. Разность координат расположения между одноименными зубцами (групповых координат) двух полюсов в П-образных магнитопроводах равна $(a \pm \frac{1}{2})\tau_z$.

Работа датчика. Рассмотрим работу предлагаемого датчика на примере использования его в планарном магнитоэлектрическом двигателе с совмещенными координатами. Планарный двигатель содержит ферромагнитный зубчатый статор и якорь. Статор выполнен в виде листа из ферромагнитного материала с пазами на верхней поверхности, заполненными немагнитным материалом. Пазы расположены по осям X, Y декартовой системы координат. При работе двигателя на его якоре закрепляют три датчика положения: два датчика, например, на ось X, и один – на ось Y (рис. 2).

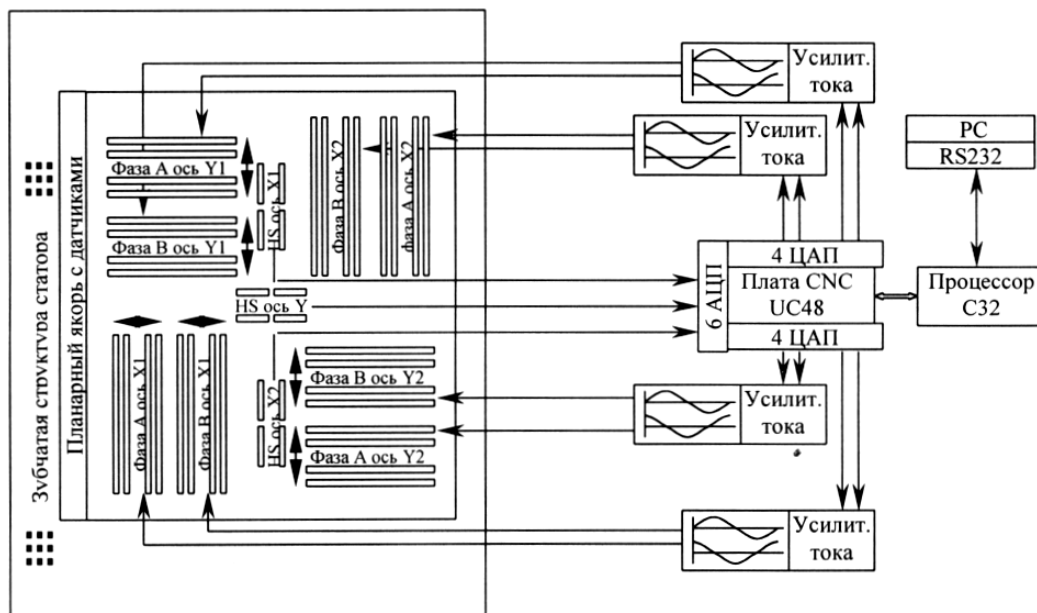


Рис. 2. Схема системы управления планарным ЛШД с датчиками Холла

Два датчика положения на одной из осей двигателя позволяют по разности их показаний легко установить факт разворота якоря и, следовательно, бороться посредством соответствующего алгоритма управления с этим нежелательным явлением. На практике датчики положения уже на этапе изготовления якоря двигателя конструктивно встраиваются в корпус якоря. Чтобы X-овый (Y-овый) датчик не чувствовал перемещения в ортогональном направлении, длина зубцов выбрана по величине близкой к целому числу периодов расположения зубцов. Рабочий зазор между якорем и статором обеспечивается воздушной подушкой (в общем случае – различными типами подшипников). Сила притяжения, создаваемая постоянными магнитами якоря, к статору при этом уравновешивается силой отталкивания, обусловленной давлением воздуха, и якорь «всплывает» над статором. Якорь перемещается вдоль статора за счет энергии электромагнитного взаимодействия тяговых электромагнитов якоря с зубцовой структурой статора.

Схема замещения. Рассмотрим схему замещения магнитной системы датчиков Холла, приведенную на рис. 3, и фазовую диаграмму, показанную на рис. 4.

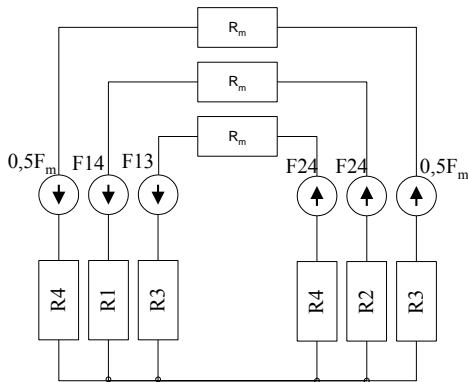


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи

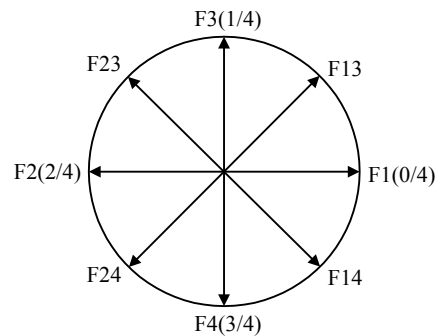


Рис. 4. Фазовая диаграмма

В первом приближении можно принять, что

$$R_1 = R_0 - R_m \cos\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right),$$

где R_1 – магнитное сопротивление воздушного зазора между статором и полюсом сердечника П-образного магнитопровода датчика, у которого зубцы расположены напротив зубцов статора двигателя; R_0 , R_m – соответственно постоянная составляющая и амплитуда первой гармоники магнитного сопротивления R_1 при перемещении якоря относительно статора; x – координата, вдоль которой перемещается датчик [7, 8].

В свою очередь, магнитные сопротивления воздушных зазоров для полюсов сердечников магнитопроводов, у которых зубцы сдвинуты по отношению к нулевому положению на $0,5\tau_z$; $0,25\tau_z$; $-0,25\tau_z$, будут, соответственно, равны

$$R_2 = R_0 + R_m \cos\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right); \quad R_3 = R_0 - R_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right); \quad R_4 = R_0 + R_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right). \quad (1)$$

Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , создаваемые постоянными магнитами датчика, равны:

$$\Phi_2 = \Phi_2 = \frac{F_M}{R_M + R_1 + R_2} = \frac{F_M}{R_M + R_0} = \Phi.$$

Тогда магнитодвижущая сила (МДС)

$$F_{12} = -F_{21} = \Phi(R_2 - R_1) = 2\Phi R_m \cos\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right). \quad (2)$$

Поскольку преобразователи Холла расположены между магнитными сопротивлениями R_1 и R_2 , то их информационные сигналы e_x прямо пропорциональны амплитудам МДС F_{12} , F_{21} и сдвинуты по фазе на 180° (рис. 4).

На практике из-за разброса технологических и конструктивных параметров датчика положения в выходном сигнале e_x помимо первой гармоники присутствуют небольшая постоянная составляющая, вторая гармоника одного знака. Для их устранения используется дифференциальное включение преобразователей Холла.

Следует обратить внимание на то, что по выражению (2) положение шагового двигателя таким датчиком можно определять, если априори известно, в каком квадранте единичного круга находишься. Однако этот недостаток легко устраняется использованием второго аналогичного датчика (рис. 1), сдвинутого по отношению к первому в направлении перемещения на четверть периода. Действительно, в этом случае, согласно формул (1), выходной сигнал второго датчика имеет вид

$$F_{43} = 2\Phi R_m \sin\left(\frac{2\pi x}{\tau_z}\right).$$

Таким образом, предлагаемый датчик позволяет сформировать два ортогональных сигнала, по которым однозначно определяется положение якоря шагового двигателя относительно зубцовой структуры статора.

Вычислительный алгоритм. Вычислительный алгоритм замкнутого управления на основе использования датчиков Холла и ПИД-регулятора следующий.

При поступлении команд на перемещение происходит предварительный расчет траектории движения с учетом заданной скорости и ускорения, строятся интерполяционные трапеции задания скорости, по которым в дальнейшем происходит обработка. На основании расчета приращения фазных токов подаются на ЦАП и далее, усиленные источниками тока, поступают в обмотки якоря двигателя. При этом при фазовом управлении дается приращение фазы управляющих токов по алгоритму:

$$\begin{aligned} T_1 &= V_M / A_M ; X_1 = X_B + V_M^2 / 2A_M ; \\ X_2 &= X_E - V_M^2 / 2A_M ; T_2 = T_1 + (X_2 - X_1) / V_M ; \\ X_B &< X_I < X_1 ? X_I = X_B + A_M T^2 / 2 ; \\ X_1 &< X_I < X_2 ? X_I = X_1 + V_M (T - T_1) ; \\ X_2 &< X_I < X_E ? X_I = X_2 + V_M (T - T_2) - A_M (T - T_2) / 2 , \end{aligned}$$

где X_B и X_E – начальные и конечные значения перемещения; X_I – расчетные значения положения в i -е интервалы времени; A_M и V_M – максимальные значения ускорения и скорости; T_I – дискретные интервалы времени.

Ток в фазах A и B рассчитывается по следующим формулам:

$$\begin{aligned} I_U &= \frac{I_M}{1 + K_3} \left(\sin \frac{2\pi X_I}{\tau_z} - K_3 \sin \frac{6\pi X_I}{\tau_z} \right); \\ I_V &= \frac{I_M}{1 + K_3} \left(\cos \frac{2\pi X_I}{\tau_z} + K_3 \cos \frac{6\pi X_I}{\tau_z} \right), \end{aligned}$$

где I_M – амплитудное значение фазного тока; τ_z – период зубцовой структуры; K_3 – коэффициент функциональной коррекции токового годографа.

При амплитудном управлении управляющим входным сигналом для интерполятора является разность между заданным положением и текущим значением положения, снимаемым с датчика положения. Интерполятор при этом интерполирует от начального значения X_B до конечного значения X_E с расчетным значением положения X_I по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} T_1 &= V_M / A_M ; X_1 = X_B + V_M^2 / 2A_M ; \\ X_2 &= X_E - V_M^2 / 2A_M ; T_2 = T_1 + (X_2 - X_1) / V_M ; \\ X_B &< X_I < X_1 ? X_I = X_B + A_M T^2 / 2 ; \\ X_1 &< X_I < X_2 ? X_I = X_1 + V_M (T - T_1) ; \\ X_2 &< X_I < X_E ? X_I = X_2 + V_M (T - T_2) - A_M (T - T_2) / 2 . \end{aligned}$$

Выражение для определения тока ПИД-регулятора имеет вид:

$$\begin{aligned} I_R(n) &= I_R(n-1) + [K_n + K_{np} + K_d][X_I(n) - X_F(n)] + \\ &+ [K_{np} + 2K_d][X_I(n-1) - X_F(n-1)] + K_d[X_I(n-2) - X_F(n-2)]. \end{aligned}$$

Токи фаз A, B рассчитываются следующим образом:

$$I_A = \frac{I_R}{1-K_3} \left(\sin \left(\frac{2\pi X_F}{\tau_z} + F(V) \right) + K_3 \sin \left(\frac{6\pi X_F}{\tau_z} + F(V) \right) \right);$$

$$I_B = \frac{I_R}{1-K_3} \left(\cos \left(\frac{2\pi X_F}{\tau_z} + F(V) \right) - K_3 \cos \left(\frac{6\pi X_F}{\tau_z} + F(V) \right) \right),$$

где K_3 – определяет амплитудное значение корректирующей функции; X_F – сигнал положения, получаемый с датчика; τ_z – период зубцовой структуры (1 мм); $F(V)$ – функция фазовой коррекции нейтрали коллектора в зависимости от скорости ($0 \dots \pi/2$); $V(n) = X_F(n)X_F(n-1)$ – функция скорости.

График позиционной ошибки замкнутой системы управления при использовании обратных связей на базе датчиков Холла и при значениях коэффициентов регулятора $K_{пр} = 100$, $K_{и} = 1$ и $K_{д} = 2000$ приведен на рис. 5.

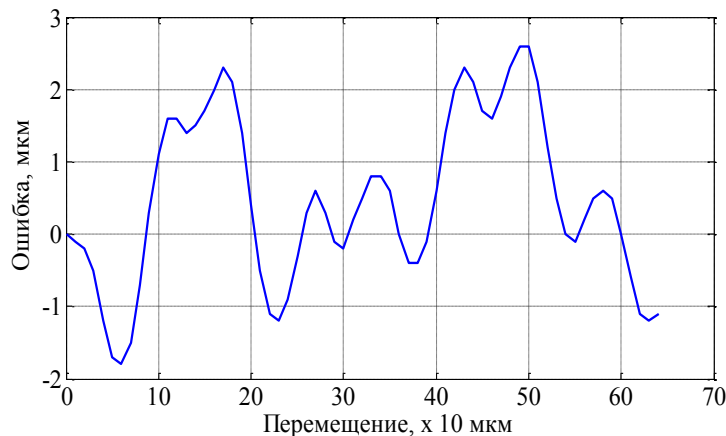


Рис. 5. График позиционной ошибки ЛШД в замкнутом режиме управления с датчиком Холла

Как видно из графика, применение датчиков Холла позволяет достичь точности перемещения в пределах ± 3 мкм для приводов на базе ЛШД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аваков, С.М. Автоматический контроль топологии планарных структур : моногр. / С.М. Аваков ; науч. ред. С.Е. Карпович. – Минск : ФУАинформ, 2007. – 168 с.
2. Аваков, С.М. Система перемещений для оптико-механического оборудования микроэлектроники / С.М. Аваков, В.В. Жарский, С.А. Русецкий // Доклады БГУИР. – 2007. – № 6. – С. 39–43.
3. Луценко, В.Е. Электропривод с шаговыми двигателями / В.Е. Луценко, В.П. Рубцов // Итоги науки и техники: Электропривод с шаговыми двигателями. – М. : ВИНТИ, 1978. – Т. 6. – С. 125.
4. Жарский, В.В. Измерительная система для реализации обратных связей в координатных позиционерах на линейных шаговых двигателях / В.В. Жарский // Вестник БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 66–70.
5. Карпович, С.Е. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, М.М. Форулан // Докл. БГУИР – Минск, 2016. – №. 3. – С 22–28.
6. Jarski, V. Modelling of planar linear motor for microelectronic equipment / V. Jarski // SPIE. – 2009. – Vol. 7377. – CID 7377 1A.

7. Zentner, J. *Zur optimalen Gestaltung von Parallelkinematikmaschinen mit Planarantrieben* / J. Zentner. – Illmenau : ISLE, 2006. – 123 s.
8. Vaughan, M. *Integrated piezoelectric linear motor for vehicle applications* / M. Vaughan, D.J. Leo // *ASME International Adaptive Structures Materials Systems Symposium*, New Orleans, LA, USA, Nov. 17–22, 2002.