

ДАТЧИКИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Рассматриваются вопросы, связанные с построением датчиков тока и напряжения на основе эффекта Холла. На их основе разработан датчик электромагнитного момента для асинхронной машины. В статье приведены структурные схемы и выходные характеристики датчиков.

Датчики в электроприводе появились почти сразу же с появлением самого электропривода, и осуществляли вначале функции защиты. Например, токовое реле, включенное в силовую цепь, срабатывает при превышении определенного значения тока и отключает схему управления. В этом примере оно является датчиком некоторого максимального тока. Затем в системах релейно-контактного управления с помощью реле производились переключения резисторов при пуске и торможении двигателей. Контролировались при этом либо ток, либо напряжение, либо ЭДС двигателей. Большая точность измерений при этом не требовалась.

Начиная с 40-х годов в связи с повышением требований к точности регулирования, таких переменных, как ток, момент, скорость, положение, – появились так называемые замкнутые системы. В этих системах с помощью датчиков необходимо было измерять какой-либо контролируемый параметр и вычитать пропорциональный ему сигнал из сигнала задания. Полученный при этом сигнал ошибки использовался как управляющий и воздействовал на соответствующий регулятор.

До тех пор, пока в качестве регуляторов и преобразователей использовались магнитные и электромашинные усилители, в качестве датчиков непосредственно в силовых цепях электроприводов применялись шунты и резисторы, а функцию потенциальной развязки их с цепями управления осуществляли многочисленные обмотки управления.

К настоящему времени на смену электромашинным преобразователям пришли полупроводниковые, в которых все входные цепи обычно потенциально связаны. К таким входам подсоединять больше одного сигнала обратной связи из-за возможных ошибок опасно. Системы же приводов становятся все более и более сложными и требуют все большего количества обратных связей. Особенно это заметно в связи с тенденцией перехода в области регулируемого привода к приводам переменного тока. Поэтому в настоящее время

на датчики обратных связей все чаще возлагаются функции потенциальной развязки между узлами системы.

В связи со сказанным в последние годы широкое распространение получают датчики различных координат электроприводов, использующие в своем составе преобразователи Холла, способные исключить потенциальные связи между цепями. В нашей стране хорошо известны фирмы «Лем», «Твелем», институт электромеханики г. Истра, выпускающие эти устройства. В связи с небольшим количеством фирм на рынке, выпускающих эти изделия, научная информация о разработках ограничена, а цены на изделия очень высоки и продолжают увеличиваться. Доля датчиков в стоимости комплектов приводов становится соизмеримой со стоимостью силовых преобразователей и двигателей.

Поэтому на кафедре автоматизированного электропривода Оренбургского государственного университета начаты работы над датчиками основных физических координат, используемых в электроприводах постоянного и переменного тока, эксплуатирующих эффект Холла при измерении, например, тока, напряжения, потокосцепления и момента. Данная статья посвящена этим разработкам.

В основе датчиков тока лежит измерение индукции магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током, с помощью датчика Холла. В качестве элемента, регистрирующего магнитное поле, используется ферромагнитное кольцо с намотанными на него двумя обмотками – первичной и вторичной. Через первичную обмотку протекает ток силовой цепи. Для датчика тока она имеет один виток. Вторичная обмотка может иметь несколько тысяч витков. В кольце имеется поперечный разрез. В нем установлен датчик Холла, который измеряет поток в воздушном зазоре. Схематический вид датчика тока представлен на рисунке 1.

Работа датчика основана на принципе компенсации магнитного поля.

При протекании измеряемого тока по первичной обмотке возникает магнитный поток, который намаг-

ничивает сердечник. На появление потока реагирует датчик Холла, и на его выходе появляется сигнал, который усиливается и подается на катушку вторичной цепи таким образом, чтобы создаваемый ею поток был направлен на размагничивание сердечника. Величина тока устанавливается такой, чтобы суммарный поток в сердечнике был равен нулю, при этом ампер-витки вторичной обмотки равны ампер-виткам первичной обмотки. Выходное напряжение снимается с измерительного сопротивления $R_{изм}$. Форма выходного тока точно повторяет форму тока силовой цепи (первичной). Функциональная схема устройства представлена на рисунке 2.

Более подробно работу датчика тока можно пояснить, используя осциллограммы (рисунки 3-6).

Любой незначительный выходной сигнал датчика Холла усиливается микросхемой А до максимума. Во вторичной цепи создается поток, который регистрируется датчиком Холла. Датчик выдает отрицательный сигнал на вход усилителя, в результате чего напряжение микросхемы меняет свой знак. Таким образом, выходной сигнал микросхемы колеблется от минимума до максимума (рисунок 3). Частота колебаний определяется быстродействием микросхемы и равна примерно 100 кГц. Благодаря индуктивности катушки вторичной цепи и большой частоте колебаний сигнал с выхода операционного усилителя меняет форму и сильно ослабляется и на нагрузочном резисторе R_n принимает вид, показанный на рисунке 4. Очевидно, в описанном процессе осуществляется релейное регулирование тока, которое происходит тем точнее, чем выше частота переключений микросхемы и чем больше витков во вторичной обмотке. Амплитуда колебаний должна достигать значений порядка 0,1 В. При выходном напряжении около 5 В этой величиной можно пренебречь.

При наличии в первичной цепи постоянной составляющей тока положительного знака на выходе усилителя увеличивается ширина импульсов в положительной части осциллограммы (рисунок 5). При этом уровень сигнала на нагрузочном резисторе повышается (рисунок 6).

Если сигнал на входе отрицательный, то увеличивается ширина импульсов в отрицательной части осциллограммы напряжения.

Для датчика тока были сняты осциллограммы входного (измеряемого) тока и тока на выходе датчика. Осциллограммы измеряемого тока приведены на рисунке 7, выходного тока датчика – на рисунке 8. Исследовались выходные характеристики при различных сопротивлениях нагрузки. Они представлены на рисунке 9. Отклонения от линейности этих ха-

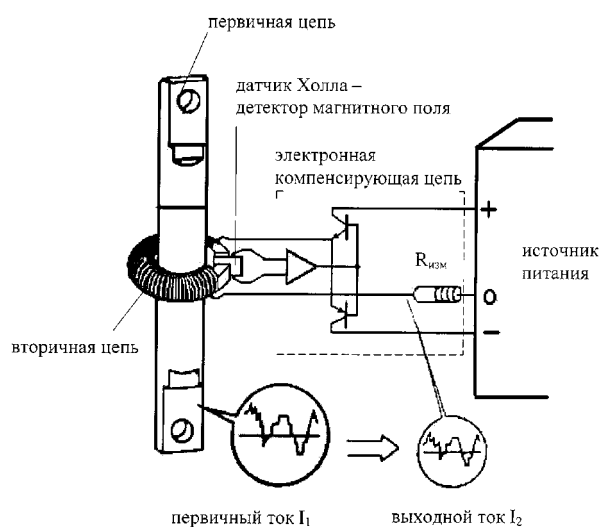


Рисунок 1

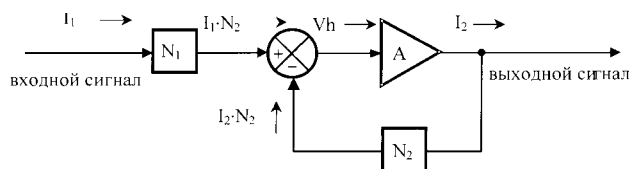


Рисунок 2

- I_1 – ток, который должен быть измерен (первичный);
- I_2 – выходной ток (вторичный);
- N_1 – число первичных витков;
- N_2 – число вторичных витков;
- V_h – сигнал ошибки, вырабатываемый датчиком Холла;
- A – коэффициент усиления усилителя.

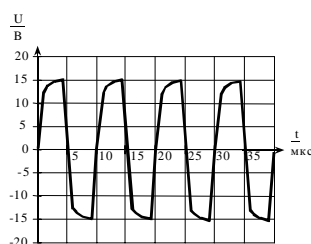


Рисунок 3

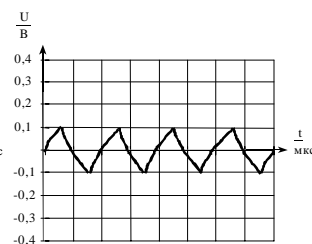


Рисунок 4

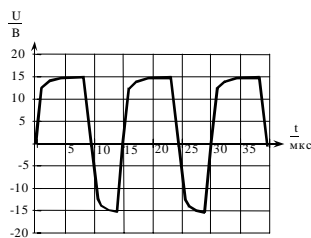


Рисунок 5

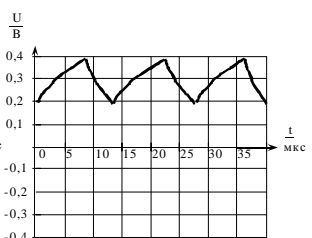


Рисунок 6

рактических в указанных на рисунке пределах составляют не более 4,5%.

Датчик напряжения работает по аналогичной схеме. Вся разница между датчиками тока и напряжения заключается в том, что первичных витков у датчика тока обычно один, а у датчика напряжения их число доходит до нескольких тысяч. Выходные характеристики датчика напряжения аналогичны.

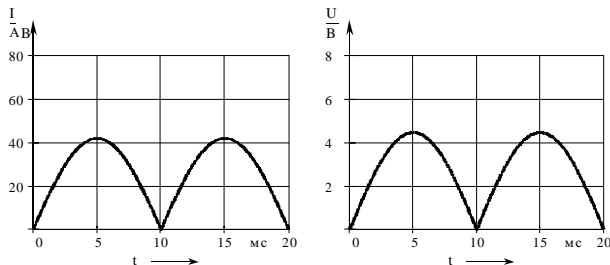
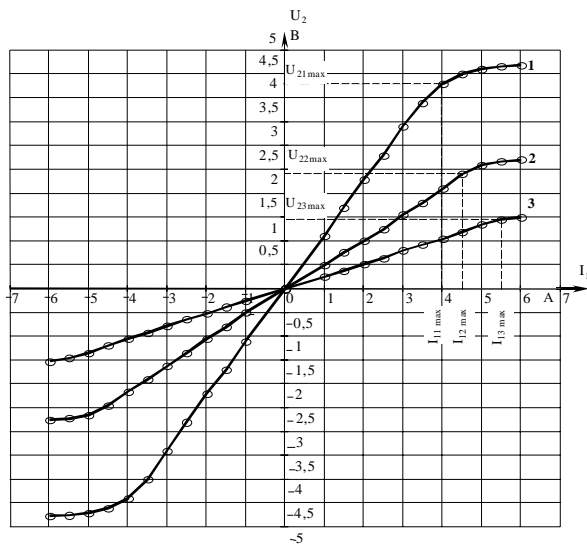


Рисунок 7

Рисунок 8



1- характеристика при $R_n = 62 \text{ Ом}$
2- характеристика при $R_n = 30 \text{ Ом}$
3- характеристика при $R_n = 15 \text{ Ом}$

Рисунок 9

Датчики тока и напряжения собираются из доступных компонентов. Общая стоимость материалов на один датчик составляет примерно 100 руб. Цена датчика при такой стоимости материалов не превысит 400 руб., в то время как подобные датчики упомянутых выше других фирм стоят не меньше 1000 руб.

На основе датчиков напряжения и тока разработано устройство для определения электромагнитного момента асинхронного двигателя.

Для двигателя постоянного тока момент можно рассчитать с достаточной точностью, зная ток, протекающий по якорю двигателя и конструктивный коэффициент k_F двигателя, который определяется по номинальным данным машины. Гораздо

сложнее дело обстоит с измерением момента двигателей переменного тока. У них нет такой однозначной зависимости между током и моментом.

Разработанное устройство позволяет измерять еще ряд величин, которые часто используются в системах управления – это токи, напряжения и потокосцепления по двум взаимно-ортогональным осям.

Работа устройства основана на математическом аппарате, который используется для описания обобщенной электрической машины.

Обобщенная электрическая машина является упрощенной моделью реальной машины. В реальной машине обмотки уложены в пазах статора и ротора, а это вызывает несинусоидальность МДС обмоток и неравномерность воздушного зазора. В обобщенной машине сосредоточенные в пазах проводники с током заменяются синусоидальными токовыми слоями, эквивалентными первым гармоникам МДС соответствующих реальных обмоток, а неравномерность зазора, обусловленная пазами, не учитывается.

Для того, чтобы пользоваться уравнениями обобщенной электрической машины, необходимо преобразовать переменные величины трехфазной машины (оси a, b, c) в переменные величины двухфазной модели (оси α, β). То есть необходимо представить величины X_a, X_b, X_c трехфазной системы координат в величины X_α и X_β двухфазной системы координат (рисунок 10). Формулы для преобразования описанные в [1] имеют вид:

$$\bar{X}_\alpha = \bar{X}_a - \frac{1}{2}\bar{X}_b - \frac{1}{2}\bar{X}_c; \quad (1)$$

$$\bar{X}_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{X}_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{X}_c, \quad (2)$$

Токи и напряжения трехфазной машины в симметричном режиме работы подчиняются условию:

$$\bar{X}_a + \bar{X}_b + \bar{X}_c = 0. \quad (3)$$

Поэтому достаточно знать значения двух величин X_a и X_b , чтобы вычислить третью:

$$\bar{X}_c = -\bar{X}_a - \bar{X}_b, \quad (4)$$

Таким образом, переменные двухфазной системы можно вычислить по формулам:

$$\bar{X}_\alpha = \bar{X}_a - \frac{1}{2}\bar{X}_b - \frac{1}{2}\left(-\bar{X}_a - \bar{X}_b\right) = \frac{3}{2}\bar{X}_a; \quad (5)$$

$$\bar{X}_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{X}_b - \frac{\sqrt{3}}{2}\left(-\bar{X}_a - \bar{X}_b\right) = \sqrt{3} \cdot \bar{X}_b + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{X}_a \quad (6)$$

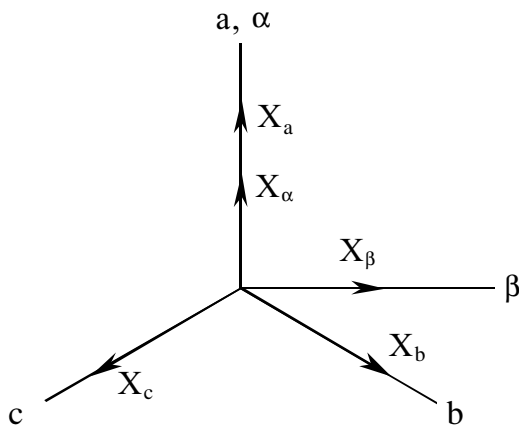


Рисунок 10

Применительно к реальным величинам (току и напряжению) уравнения примут вид:

$$\bar{i}_\alpha = \frac{3}{2} \bar{i}_a; \tag{7}$$

$$\bar{i}_\beta = \sqrt{3} \cdot \bar{i}_b + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{i}_a; \tag{8}$$

$$\bar{u}_\alpha = \frac{3}{2} \bar{u}_a; \tag{9}$$

$$\bar{u}_\beta = \sqrt{3} \cdot \bar{u}_b + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{u}_a. \tag{10}$$

Электромагнитный момент для обобщенной машины согласно [1] вычисляется по формуле:

$$M = p_n \cdot \left(\bar{\Psi}_\beta \cdot \bar{i}_\alpha - \bar{\Psi}_\alpha \cdot \bar{i}_\beta \right), \tag{11}$$

где p_n – число пар полюсов;
 Ψ – потокосцепление.

Потокасцепление для оси α может быть получено из уравнений электрического равновесия:

$$\bar{u}_\alpha = \bar{i}_\alpha \cdot R + \frac{d\bar{\Psi}_\alpha}{dt}; \tag{12}$$

в виде:

$$\bar{\Psi}_\alpha = \int_t \left(\bar{u}_\alpha - \bar{i}_\alpha \cdot R \right) dt, \tag{13}$$

где R – сопротивление фазы обмотки статора.

Аналогично для оси β :

$$\bar{\Psi}_\beta = \int_t \left(\bar{u}_\beta - \bar{i}_\beta \cdot R \right) dt. \tag{14}$$

Таким образом, чтобы вычислить электромагнитный момент двигателя, необходимо знать мгновенные значения двух фазных токов (i_a и i_b) и двух фазных напряжений (u_a и u_b).

Все приведенные соотношения реализуются в устройстве, структурная схема которого приведена на рисунке 12.

В качестве звена, выполняющего функции интегратора, используется апериодическое звено первого порядка, необходимое для того, чтобы исключить постоянную составляющую при интегрировании.

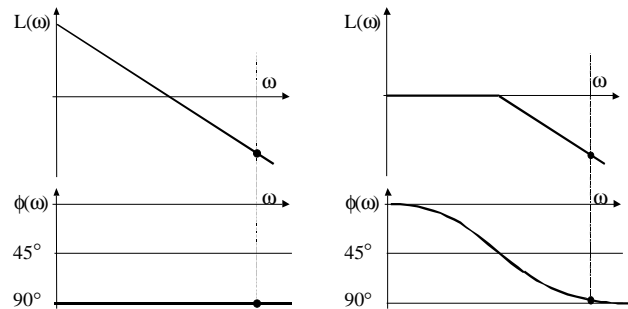


Рисунок 11

Как видно из рисунка 11, у интегрирующего звена на всем протяжении частот амплитудно-частотная характеристика имеет наклон минус 20 дБ/дек (децибел на декаду), а фаза равна минус 90°. Недостатком данной схемы является то, что при низких частотах (в т. ч. постоянный ток) происходит интегрирование входного сигнала, что приводит к постоянному увеличению выходного сигнала и к насыщению интегратора.

Для того, чтобы этого избежать, интегрирующее звено заменяется на апериодическое. Логарифмические характеристики апериодического звена показаны на рисунке 11. При этом в рабочем диапазоне частот амплитудно-частотная характеристика имеет наклон минус 20 дБ/дек, как у интегрирующего звена, а фаза близка к 90°. А в области низких частот звено работает как усилительное с коэффициентом усиления, равным единице.

С помощью разработанного устройства были сняты экспериментальные динамические характеристики асинхронного двигателя при прямом пуске. Экспериментальные характеристики представлены на рисунке 13 и достаточно объективно характер изменения момента в этом процессе. Незначительные искажения кривой скорости обусловлены наличием зазора в соединительной муфте между тахогенератором и двигателем.

Все устройство представляет собой компактную электронную схему, собранную на доступной элементной базе. Цена устройства составляет около 1300 руб.

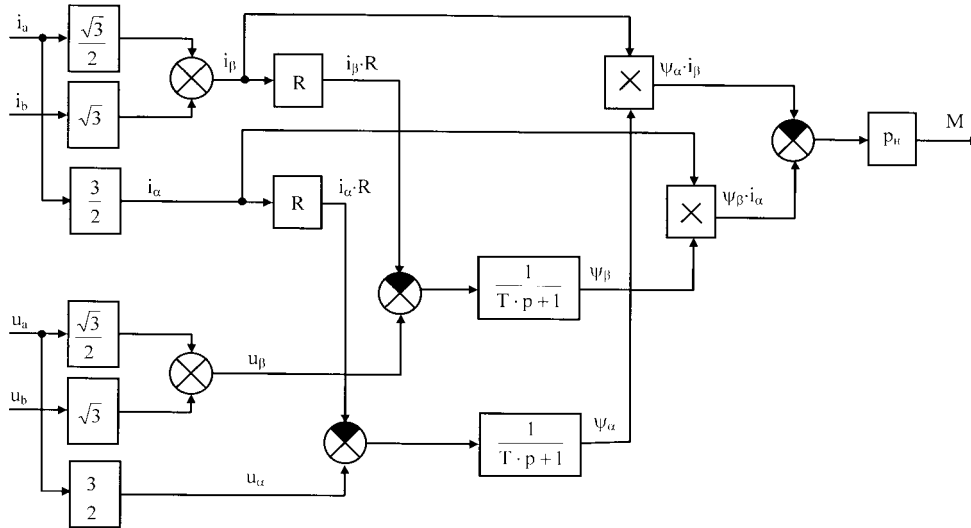


Рисунок 12

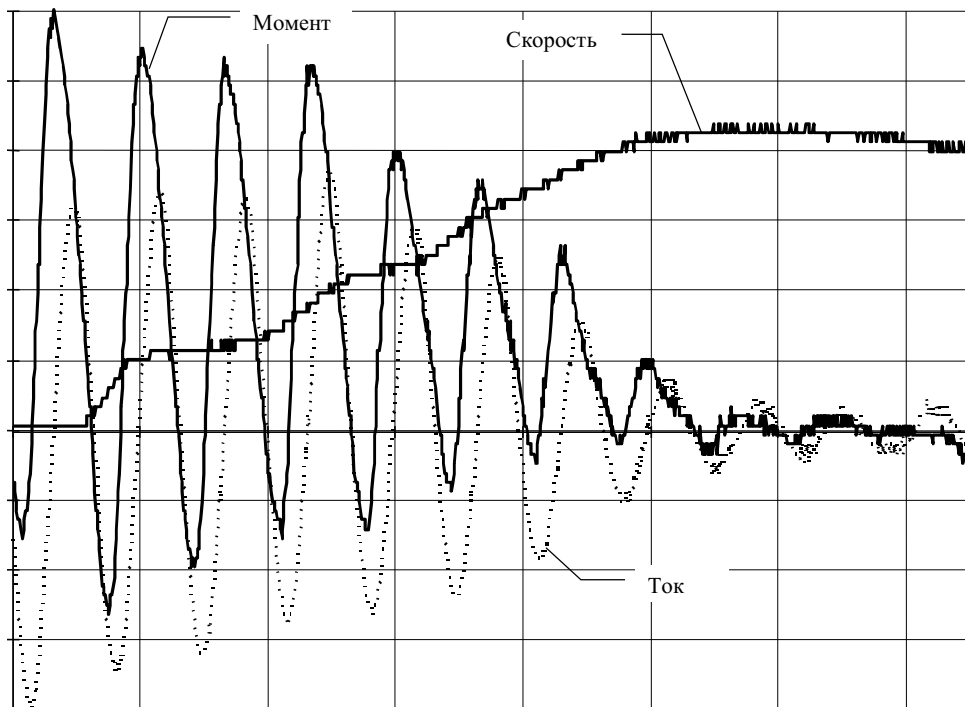


Рисунок 13

Список использованной литературы:

1. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998.