

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА

В.П.Войтенко, М.А.Хоменко

Черниговский государственный технологический университет

Украина, 14027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧГТУ, кафедра промышленной электроники

Тел. (0462) 94-01-34, E-mail: vvp@inel.stu.cn.ua

Г.В.Павлов

Украинский государственный морской технический университет

Украина, 54001, г. Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, УГМТУ, каф. компьютеризированн. систем управления

Тел./факс: (0512) 47-43-66

Annotation – the way of smooth change of the linear D.C. motor's supplying voltage during a digitizing step is considered. This way allows to simplify microprocessor control realization in the precise positioning system. It is a quasi-resonant converter that is used for the motor current stabilization. This decision raises the system dynamic characteristics.

Key words – positioning system, optimal control, quasi-resonant converter.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение высоких параметров электромеханических и электромехатронных систем, электротехнологических комплексов, электрофизических установок и систем автономного электропитания невозможно без широкого использования систем автоматического управления, содержащих оптимальные цифровые регуляторы. На рис. 1 представлена обобщенная структура такой системы, содержащая устройство задания (УЗ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифровой регулятор (ЦР), силовой преобразователь (СП) и объект управления (ОУ). Регулируемый параметр $x(t)$ по цепи обратной связи поступает на инвертирующий вход сумматора Σ , что позволяет сформировать сигнал рассогласования.

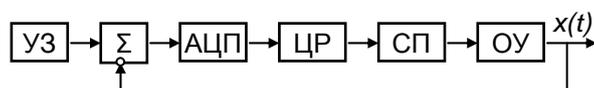


Рис. 1

В качестве регулирующего органа системы наиболее часто используются широтно-импульсные преобразователи. Однако в некоторых «быстрых» приложениях целесообразно применение квазирезонансного импульсного преобразователя (КРП), обладающего рядом преимуществ [1]. Так, для системы точного позиционирования очень важным представляется возможность получения в КРП высоких частот преобразования. Это позволяет существенно улучшить динамические характеристики системы (параметры переходного процесса), повысить качество (точность) регулирования, обеспечить электромагнитную совместимость. Особенно перспективным представляется использование КРП в системах электропривода с токовым управлением, где предъявляются повышенные требования к качеству переходного процесса тока обмоток.

Данная статья посвящена исследованию особенностей работы КРП в составе системы точного позиционирования, содержащей оптимальный цифровой регулятор.

СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Функциональная схема системы точного позиционирования представлена на рис. 2. В качестве СП здесь использован реверсивный квазирезонансный преобразователь (РКРП), с помощью которого производится формирование переменного напряжения $u(t)$ на обмотках линейного двигателя (ЛД), что обеспечивает возвратно-поступательное движение каретки, а также оптимальный процесс установления координаты (без перерегулирования за конечное и минимальное время).

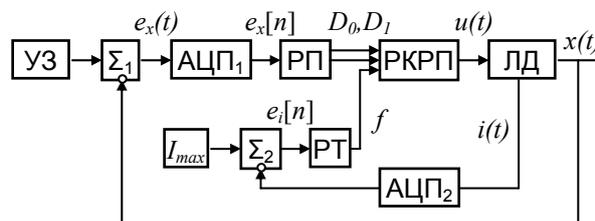


Рис. 2

АЦП₁ преобразует сигнал рассогласования по положению $e_x(t)$ в параллельный двоичный позиционный код ошибки $e_x[n]$, который является входным сигналом для регулятора положения (РП). Задача РП состоит в формировании сигналов направления для РКРП D_0, D_1 , длительность которых зависит от ошибки положения на нулевом шаге $e_x[0]$.

Важнейшей особенностью КРП, как известно, является управление уровнем выходного напряжения с помощью частоты преобразования. Сигнал задания частоты КРП f вырабатывается регулятором тока (РТ), который представляет собой подчиненный контур системы автоматического регулирования. Назначение РТ – поддержание тока обмоток ЛД $i(t)$ на уровне I_{max} , который соответствует максимально допустимому значению. За счет этого обеспечиваются наилучшие динамические характеристики системы в целом. Входным сигналом для РТ является двоичный позиционный код ошибки по току $e_i[n]$, полученный с помощью сумматора путем вычитания из I_{max} заданного кодом, сигнала обратной связи по току

обмоток ЛД $i(t)$, который оцифрован с помощью АЦП₂.

РЕГУЛЯТОР ПОЛОЖЕНИЯ

В [2] впервые был предложен способ питания линейного двигателя, базирующийся на формировании скачкообразно-линейных импульсов напряжения (СЛИ). Там же приведен алгоритм расчета шага регулирования h , который с учетом вышесказанного можно представить в следующем виде:

$$h = \sqrt{\frac{me_x [0]}{I_{max} k}}, \tag{1}$$

где m – масса подвижной части ЛД;
 k – коэффициент силы ЛД.

Использование (1) позволяет построить квазиоптимальную по быстродействию систему позиционирования, время установления в которой приближается к предельно малому значению, характерному для системы с время-импульсной модуляцией (ВИМ). В то же время, данный алгоритм легко реализуем на современных микроконтроллерах, являющихся типичной элементной базой систем управления. В отличие от (1), в системе с ВИМ при вычислении требуемой длительности шага регулирования h необходимо решать трансцендентное уравнение, что ставит под сомнение возможность практической реализации такой системы.

Функциональная схема РП, используемая для моделирования в пакете *Matlab*, представлена на рис. 3. Входная ошибка по положению err_x подается на устройства вычисления модуля **Abs** и определения знака **LB2**. Если модуль ошибки по положению не превышает зоны нечувствительности системы e_min , вырабатывается сигнал блокировки $\sim block$, устанавливающий выходные сигналы РП в нулевое состояние и, таким образом, отключающий КРП. Устройства вычисления длительности шагов регулирования **Выч.h0** и **Выч.h1** работают в соответствии с алгоритмом (1). Рассчитанные значения шагов сравниваются с линейно нарастающим сигналом с выхода генератора **Ramp** с помощью узлов сравнения **LB3** и **LB4**. В результате формируются логические сигналы $h0$ и $h1$, задающие длительность прямого и обратного протекания тока ЛД. Работу логического блока **LB5** можно представить с помощью табл. 1.

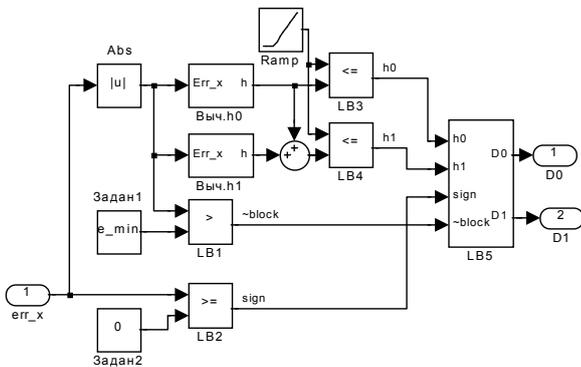


Рис. 3

Сигнал $D0$ разблокирует работу первой диагонали КРП, а сигнал $D1$ – второй. Таким образом, обеспечиваются условия для протекания тока обмоток ЛД либо в прямом, либо в обратном направлении. Прямое протекание обеспечивает разгон и позиционирование каретки «вперед», а обратное – динамическое торможение. При необходимости позиционирования «назад» сигнал $sign$ обеспечивает инверсию сигналов $D0$ и $D1$.

Таблица 1

| $\sim block$ | sign | h0 | h1 | D0 | D1 |
|--------------|------|----|----|----|----|
| 0 | x | x | x | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | x | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | x | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

x – безразличное состояние.

РЕВЕРСИВНЫЙ КРП И РЕГУЛЯТОР ТОКА

Функциональная схема реверсивного квазирезонансного преобразователя представлена на рис. 4.

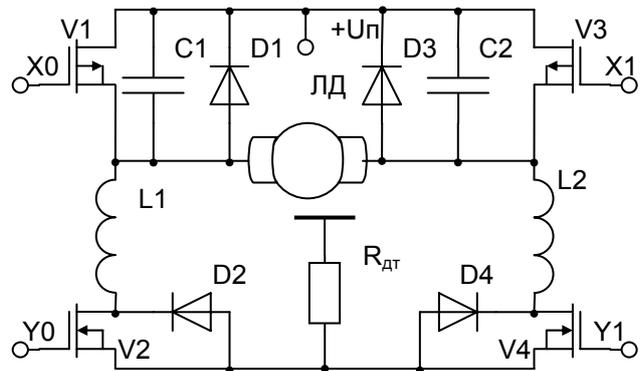


Рис. 4

Устройство содержит два ключа направления $V1$ и $V3$, которые разблокируют требуемую диагональ РКРП по сигналам $D0$ и $D1$ с выхода регулятора положения, подаваемым на управляющие входы $X0$, $X1$, соответственно. Линейный двигатель (ЛД) подключен к нижним (по схеме) выводам ключей направления. Квазирезонансный ключ первой диагонали КРП собран на элементах $V2$, $L1$, $C1$, $D2$, а второй диагонали – на элементах $V4$, $L2$, $C2$, $D4$. Резонансная частота РКРП определяется следующим соотношением:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L1C1}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L2C2}}. \tag{2}$$

Диоды $D2$ и $D4$ обеспечивают двухтактный режим работы квазирезонансных ключей. Резистор $R_{дт}$ служит датчиком сигнала обратной связи по току ЛД.

Управление квазирезонансными ключами производится сигналами с выхода регулятора тока. В соответствии с моделью ЛД [4] изображение тока обмоток можно представить в виде следующей функции от напряжения:

$$I(p) = \frac{T_m p}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1} \cdot \frac{U(p)}{R}, \quad (3)$$

где T_e – электрическая постоянная времени ЛД;

T_m – электромеханическая постоянная.

Переходный процесс, построенный по (3) для $T_e = 0,4$ мс; $T_m = 51,65$ мс, представлен на рис. 5.

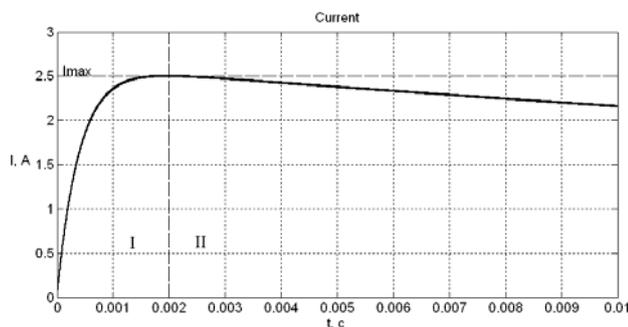


Рис. 5

Нарастание тока обмоток происходит по аperiodическому закону. После достижения величины I_{max} ток начинает спадать под действием противоЭДС двигателя. Реализация алгоритма (1) исходит из того, что форма тока обмоток приближена к прямоугольной. Отсюда следуют задачи, стоящие перед регулятором тока:

1) форсирование скорости нарастания тока ЛД на интервале I (рис. 5);

2) удержание тока на уровне I_{max} на участке II.

Скорость нарастания тока ограничена электрической постоянной времени ЛД. Время достижения I_{max} можно сократить только за счет повышения уровня питания КРИП U_{II} (рис.4). Дальнейшее возрастание рабочего напряжения ЛД, например, по линейному закону [4] позволит скомпенсировать спад тока на втором участке.

Упрощенная функциональная схема регулятора тока представлена на рис. 6. Устройство содержит умножитель (X), генератор линейно нарастающего кода (ГЛНК), сумматор (Σ), ограничитель частоты (ОЧ) и преобразователь кода в частоту (ПКЧ).

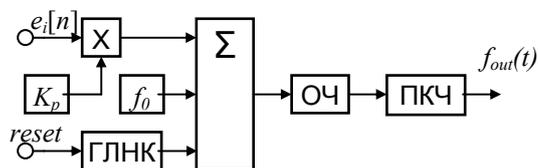


Рис. 6

С помощью умножителя формируется пропорциональная составляющая сигнала управления частотой КРИП путем умножения кода ошибки по току $e_i[n]$ на соответствующий коэффициент K_p . Вход $reset$ ГЛНК необходим для сброса нарастающего кода в нуль по фронту управляющих сигналов D0, D1. В сумматоре к коду, соответствующему номинальной частоте работы КРИП f_0 , добавляется линейно-нарастающий код, а также – пропорциональная составляющая. В результате формируется код текущей

частоты преобразования КРИП, который подвергается двустороннему ограничению, что гарантирует работу преобразователя в допустимых режимах. На выходе ПКЧ получаем сигнал f_{out} с постоянной длительностью импульса и частотой, соответствующей сформированному из токовой ошибки коду. Сигнал f_{out} управляет частотой переключения квазирезонансных ключей.

На рис. 7 (кривая 2) приведен результат моделирования пропорционального регулятора тока при отработке команды от регулятора положения на позиционирование «вперед». При расчете использовались параметры двигателя из [4], а $I_{max} = 2,5$ А; $f_p = 300$ кГц. Шаг квантования составляет 50 мкс, коэффициент усиления П-регулятора равен 341. Переходный процесс имеет более крутой фронт, чем на рис. 5, однако появляется незначительное переуправление, а также присутствует спад тока на втором участке. Отклонение тока от требуемого значения в режиме перемещения каретки не превышает $0,1$ А/2,5 А = 4 %, а скорость изменения ошибки составляет не более 4 %/90 мс = 0,044 %/с.

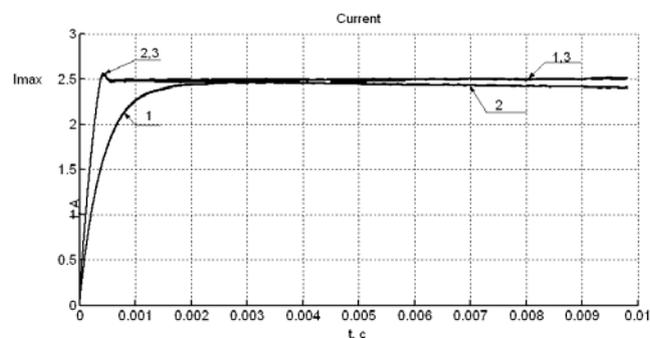


Рис. 7

Кривая 1 на рис. 7 иллюстрирует работу формирователя тока с генератором линейно нарастающего кода, но без пропорциональной составляющей ($K_p = 0$), т.е. – разомкнутый режим контура тока. В этом режиме наблюдается хорошее выравнивание тока на участке II, отсутствует переуправление, однако переходный процесс сильно затянут.

На рис. 7 (кривая 3) приведена временная диаграмма переходного процесса тока обмоток ЛД при работе всех устройств, входящих в структуру рис. 6. Фронт тока в данном случае имеет такую же крутизну, как и при работе с П-регулятором, неравномерность тока на втором участке аналогична регулятору с линейно нарастающим кодом, однако сохраняется небольшое переуправление. Дальнейшее улучшение качества переходного процесса возможно за счет использования более сложных структур регуляторов тока.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Модель реального объекта регулирования и КРИП в пространстве состояний [3] позволяет получить передаточную функцию оптимального цифрового регулятора положения. Классическая реализация такого регулятора на цифровых микросхемах не

удовлетворяет ряду требований. В качестве элементной базы практической системы управления выбран сигнальный микропроцессор *TMS320F243*. Алгоритм позиционирования с расчетом шага регулирования реализован программно в соответствии с (1). Токковый регулятор также программно реализует структуру рис. 6.

Временные диаграммы, описывающие процесс позиционирования каретки ЛД на координату $X_{зад} = 5 \text{ мм}$, приведены на рис. 8. Процесс позиционирования состоит из этапов разгона и торможения. В соответствии с алгоритмом токового

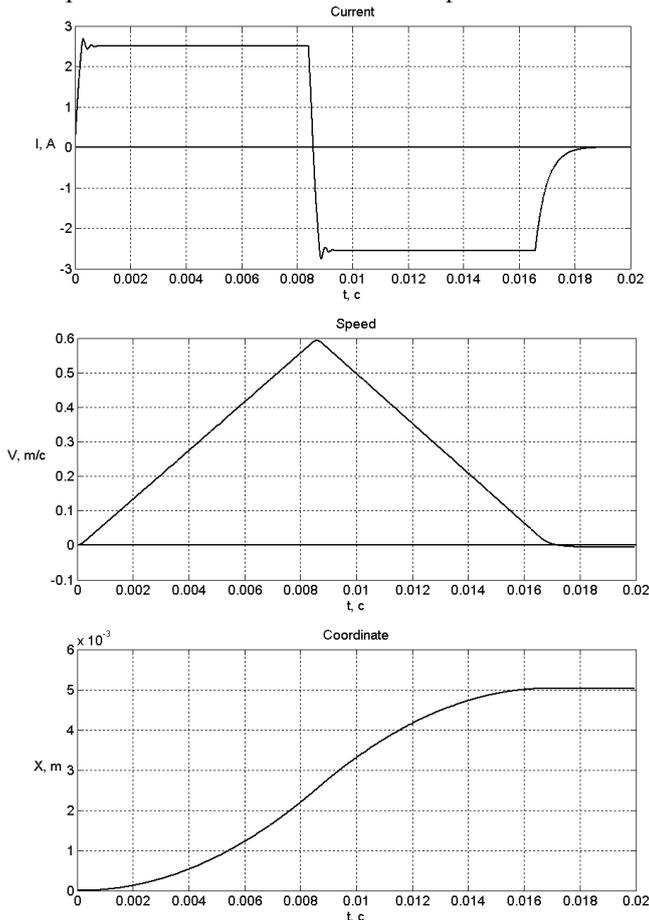


Рис. 8

управления время разгона равняется времени торможения. На этапе разгона ток обмоток ЛД поддерживается на уровне I_{max} , а скорость движения нарастает по линейному закону (равноускоренное движение). При этом координата изменяется от начального (условно – нулевого значения) до $X_{зад}/2$. На начальном участке разгона ($300...600 \text{ мкс}$) наблюдается нелинейность нарастания скорости, что связано с не мгновенным выходом тока на заданный уровень I_{max} . Этап торможения начинается с момента, когда координата превысит $X_{зад}/2$. Ток поддерживается на уровне $-I_{max}$, а скорость падает по линейному закону до нуля. При этом ускорение по модулю равно ускорению на участке разгона. В момент достижения нулевой скорости координата устанавливается на уровне $X_{зад}$, что свидетельствует о завершении процесса позиционирования. Как видно из рис. 8, в

реальной системе после завершения позиционирования каретка сохраняет незначительную остаточную скорость (около $-5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$), а значение координаты незначительно (примерно на 30 мкм) превышает $X_{зад}$. Остаточная скорость вызвана затягиванием фронта тока при выключении РКРП. Превышение заданного значения координаты обусловлено ошибкой стабилизации тока позиционирования. Для снижения перерегулирования по скорости необходимо при выключении РКРП обеспечить перепад напряжения $2E_n$, что вызовет форсированный спад тока. Перерегулирование по координате можно устранить, обеспечив более качественную стабилизацию тока.

Экспериментально произведен анализ возможности реализации время-импульсной модуляции выходного напряжения преобразователя с учетом минимизации затрат времени и перерегулирования по току. Рассмотрено оптимальное токовое управление с применением комбинированной модуляции выходного напряжения на каждом шаге дискретизации.

ВЫВОДЫ

1. Предложена функциональная схема системы точного позиционирования, содержащая реверсивный квазирезонансный преобразователь (КРП).

2. Разработана функциональная схема регулятора положения и квазиоптимальный алгоритм ее работы, позволяющие производить моделирование системы в среде *Matlab*.

3. Исследованы различные варианты реализации токового управления линейным двигателем постоянного тока с помощью КРП, обеспечивающие наилучшее качество переходного процесса.

4. Разработаны программы для сигнального микропроцессора, позволяющие осуществлять стабилизацию тока обмоток линейного двигателя в реальном времени процесса позиционирования.

[1] В.П.Войтенко. Цифровой регулятор квазирезонансного преобразователя на базе микроконтроллера// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ–2002, ч. 2. – С. 74 – 77.

[2] В.П.Войтенко. Формирование напряжения питания линейного двигателя в микропроцессорной системе точного позиционирования// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ–2000, ч. 2. – С. 52 – 55.

[3] В.П.Войтенко, Ю.А.Денисов. Определение векторов состояния в квазирезонансном импульсном преобразователе, переключаемом при нулевом напряжении// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. – Київ–2001, ч. 1. – С. 23 – 26.

[4] А.И.Денисов, В.П.Войтенко. Микропроцессорное управление импульсным преобразователем в системе точного позиционирования// Технічна електродинаміка, тем. випуск “Проблеми сучасної електротехніки”. – Київ–2000, ч. 4. – С. 34 – 37

