

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВАЛ» ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕЧАТНОЙ МАШИНЫ

The algorithm of vector control of the two-impellent asynchronous electric drive of two-section printed machines is offered. Electric motors are not connected by the general mechanical shaft. Vector control is carried out in the polar system of coordinates rotating synchronously with a magnetic field. The control system is focused on a vector of a stream of stator. Control is made on the basis of the information on a current of a part of a direct current of the inverter. The control algorithm provides regulations of speed demanded a range and accuracy of positioning of shaft of press cylinders.

Введение. В современных печатных машинах широко используется многодвигательный электропривод переменного тока. Это связано с тем, что применение индивидуального электропривода для отдельных печатных секций значительно упрощает кинематические схемы машин, позволяет легко осуществить модульное построение сложного оборудования, значительно облегчает условия эксплуатации, повышает производительность и надежность машин. Однако отсутствие общего механического вала накладывает высокие требования к синхронности углового перемещения валов электродвигателей, не связанных механически. Такая совместная работа электроприводов, связанных только электрическими цепями, называется системой «Электрический вал». Пример подобной системы предлагается авторами в [1, 2].

1. Выбор способа управления электроприводом печатной машины. При рассмотрении требований, предъявляемых к многодвигательному электроприводу листовых печатных машин, можно отметить следующее:

- диапазон регулирования скорости должен составлять не менее 20;
- должна обеспечиваться высокая точность синхронизации по угловому положению валов электроприводов отдельных печатных секций.

Для выполнения данных требований необходимо применение векторного управления. Полная управляемость электропривода обеспечивается, если обеспечивается управление электромагнитным моментом двигателя. Можно получить уравнение момента в виде функции независимых проекций векторных величин

на координатные оси. И тогда управление Электромагнитным моментом сведется к управлению проекциями векторов. Отсюда и происходит название способа.

Электромагнитный момент может быть представлен в виде векторного произведения:

$$\vec{M} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot C \cdot (\vec{a} \times \vec{b}) \quad (1)$$

где p — число пар полюсов машины, а C — коэффициент, зависящий от выбора векторов a и b и определяющийся в соответствии с табл. 1. В табл. 1: Ψ_s, Ψ_r, Ψ_m — соответственно векторы потокосцепления статора, ротора и намагничивающего контура; I_s, I_r — векторы тока статора и ротора; L_s, L_r, L_m — индуктивность соответственно фазных обмоток статора, ротора и намагничивающего контура; $k_s = L_m/L_s$ и $k_r = L_m/L_r$ — соответственно, коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора; $\sigma = 1 - k_s k_r$ — коэффициент рассеяния; * — означает, что электромагнитный момент не может быть выражен через произведение основного потока и потоков статора и ротора [3]. В выражениях для момента физический смысл имеет только модуль вектора.

Для построения систем векторного управления асинхронным электродвигателем могут быть использованы любые пары векторов, с помощью которых можно представить электромагнитный момент обобщенной электрической машины. Однако наибольшее распространение получили системы, использующие для регулирования электромагнитного момента ток статора и потокосцепление ротора, и соответст

Таблица 1

Коэффициенты C уравнения электромагнитного момента

$a \backslash b$	Ψ_s	I_s	Ψ_r	I_r	Ψ_m
Ψ_s	0	1	$-k_s k_r / \sigma L_m$	$-k_s$	*
I_s	-1	0	$-k_r$	$-L_m$	-1
Ψ_r	$k_s k_r / \sigma L_m$	k_r	0	-1	*
I_r	k_s	L_m	1	0	1
Ψ_m	*	1	*	-1	0

вующее уравнение момента. Векторы тока статора и потокосцепления ротора вращаются в пространстве с угловой частотой $\omega_s = 2\pi f_s/p$. Поэтому для упрощения передаточных функций и системы управления используют систему координат, вращающейся в пространстве с синхронной частотой ω_s . А сам принцип векторного управления заключается в раздельном управлении магнитным потоком и моментом асинхронного электродвигателя с помощью проекций вектора тока на оси системы координат, ориентированной по направлению вектора магнитного потока ротора Ψ_r .

Реальные токи статора электродвигателя протекают в неподвижных обмотках и соответствуют проекциям вектора тока на неподвижную систему фазных осей координат. Поэтому при векторном управлении асинхронным электроприводом необходимы координатные преобразования. Преобразование системы координат невозможно без информации о пространственном положении опорного вектора потокосцепления ротора в каждый момент времени. Эту информацию можно получить непосредственным измерением магнитного потока статора или рабочего потока с помощью датчиков, а затем вычислить поток ротора, или вычислить его по мгновенным значениям фазных напряжений и токов статора.

На практике измеряют фазные напряжения и токи статора, а по ним определяют остальные величины в соответствии с выражениями:

$$\bar{\Psi}_s = \int (\bar{U}_s - \bar{I}_s R_s) dt; \quad (2)$$

$$\bar{\Psi}_r = (\bar{\Psi}_s - \bar{I}_s \cdot \sigma \cdot L_s) \cdot \frac{L_r}{L_m}; \quad (3)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} I_{s\alpha}); \quad (4)$$

$$\omega = \omega_s - \frac{2 \cdot R_s \cdot M}{3 \cdot p \cdot |\bar{\Psi}_r|^2}, \quad (5)$$

где U_s — вектор напряжения статора; R_s — активное сопротивление фазных обмоток статора; $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ — соответственно проекции векторов потокосцепления и тока статора на оси α и β системы координат, неподвижной относительно статора; ω — скорость ротора.

Для корректной работы системы векторного управления требуется обратная связь по скорости вращения. Следует отметить, что система управления может выполнять свои функции только при условии, что параметры асинхронного электродвигателя, входящие в передаточные функции его звеньев соответствуют истинным значениям, в противном случае возникает рассогласование систем координат двигателя и

устройства управления, приводящее к потере работоспособности привода. Это обстоятельство создает значительные трудности при реализации систем векторного управления на практике, т. к. параметры электродвигателя изменяются в процессе работы. В особенности это относится к значениям активных сопротивлений фазных обмоток.

При построении системы управления, желательно, чтобы величины, представленные векторами в уравнении момента были наблюдаемы, т. е. чтобы их можно было непосредственно измерить и воздействовать на них при управлении моментом. У короткозамкнутого асинхронного электродвигателя есть только две такие величины — это напряжение и ток статора, и только ток статора может входить в уравнение момента. Тогда другой величиной может быть только ток ротора или какое-либо потокосцепление. Ток ротора принципиально ненаблюдаем, а устройства его идентификации по наблюдаемым параметрам сложны и ненадежны. Поэтому для выбора остаются три потокосцепления: статора, ротора и основное, т. е. магнитный поток в зазоре электродвигателя. Потокосцепление статора и рабочий поток можно непосредственно измерить и использовать этот сигнал в системе управления, что часто и делается при создании приводов высокого качества.

2. Полярное управление асинхронным взаимосвязанным электроприводом. В данной работе для управления взаимосвязанным двухдвигательным электроприводом печатной машины предлагается оригинальный алгоритм векторного управления, не требующий наличия обратной связи по скорости ротора. Для функционирования системы необходимо измерение мгновенных значений фазных напряжений и токов статоров, а также тока звена постоянного тока инверторов напряжения. Известно, что ток звена постоянного тока связан с амплитудой тока статора двигателя соотношением

$$I_d = I_{sm} \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

где I_d — ток звена постоянного тока, I_{sm} — амплитуда тока статора, φ — угол между векторами напряжения и тока статора.

Воспользуемся выражением для модуля электромагнитного момента в следующем виде:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot |\bar{\Psi}_s \times \bar{I}_s| \quad (7)$$

Выразим модуль векторного произведения через произведение модулей векторов

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{sm} \cdot I_{sm} \cdot \sin \gamma \quad (8)$$

где γ — угол между векторами потокосцепления и тока статора; Ψ_{sm} — амплитуда потокосцепления статора.

Взаимное расположение векторов напряжения, тока и потокосцепления в пространстве в системе координат $u-v$, синхронно вращающейся с магнитным полем статора, представлено на рис. 1.

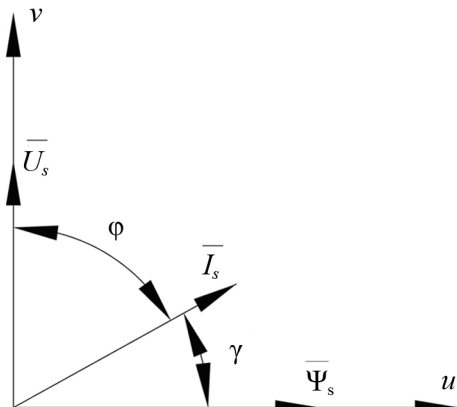


Рис. 1. Расположение векторов напряжения, тока и потокосцепления в пространстве

Из рисунка видно, что векторы напряжения и потокосцепления ортогональны. Таким образом, используя известные тригонометрические зависимости, получим:

$$\sin \gamma = \sin(90^\circ - \varphi) = \cos \varphi. \quad (9)$$

Из (6) следует, что

$$\cos \varphi = \frac{I_d}{I_{sm}}. \quad (10)$$

Подставив (9) в (8), получим выражение для электромагнитного момента с опорным вектором Ψ_s :

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{sm} \cdot I_{sm} \cdot \cos \varphi, \quad (11)$$

или с учетом (6):

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{sm} \cdot I_d, \quad (12)$$

Поскольку вектор потока статора Ψ_s вращается с синхронной скоростью ω_s одновременно с вектором напряжения, отставая при этом от последнего на угол 90° , а положение вектора напряжения является заданной величиной (однозначно определяется мгновенными значениями фазных напряжений статора), то определение координат опорного вектора не вызывает трудностей.

Воспользуемся вращающейся с синхронной скоростью системой координат, а одну из осей совместим с вектором потокосцепления статора. Таким образом, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону значения напряжения, тока и потокосцепления статора представят в виде постоянных величин. А совмещение оси координат с вектором потокосцепления статора позволяет управлять магнитным полем путем изменения амплитуды вектора потокос-

цепления статора. В итоге для управления моментом будем использовать составляющую $I_{sm} \cdot \cos \varphi = I_d$ в соответствии с (11) и (12).

Поскольку управление сводится к управлению модулями векторов тока и потокосцепления статора и их взаимным расположением, то имеет место полярное управление (векторное управление в полярных координатах).

Выразим модуль вектора потокосцепления через параметры электродвигателя, поддающиеся контролю без применения сложных датчиков и преобразователей. В синхронной системе координат при питании от источника напряжения с учетом того, что система ориентирована по вектору потокосцепления, амплитуда потокосцепления в насыщенной электрической машине определяется по выражению из [3]:

$$\Psi_{sm} = \frac{U_{sm}}{\omega_s}. \quad (13)$$

Причем в соответствии с результатами, приведенными в [4] выполнение данного выражения является условием безударного пуска.

3. Моделирование работы двухдвигательного взаимосвязанного электропривода.

Для проверки справедливости выражений (11) и (12) было проведено моделирование работы рассматриваемого электропривода при пуске, в установившемся режиме и при оказании возмущающих воздействий в виде скачкообразных изменений момента статического сопротивления и частоты питающего напряжения. Результаты моделирования в виде графиков электромагнитного момента представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведены графики электромагнитного момента при пуске двигателя (время от 0 с до 0,2 с), его выходе на установившийся режим при величине момента статического сопротивления равной 75% от номинального крутящего момента электродвигателя (время от 0,2 с до 1,5 с), работа с номинальной нагрузкой (время от 1,5 с до 2,5 с) и работа при загрузке в 50% от номинальной (время от 2,5 с до 5,75 с). Причем на участке времени от 3,5 с до 4,75 с моделируется работа привода при скачкообразном снижении частоты до 40 Гц (что составляет 80% от ее номинального значения), а на участке времени от 4,75 с до 5,75 с моделируется работа привода при скачкообразном увеличении частоты до номинального значения 50 Гц. На рисунках приведены два графика электромагнитных моментов, первый из которых рассчитан по методике, приведенной в [1], а второй — по выражению (12). Как видно из рис. 2, значения электромагнитных моментов совпадают на протяжении всей работы электропривода при различных режимах за исключением начального момента при пуске двигателя, который представлен на рис. 3. На рис. 3 график 1 соответствует действительному значению электромагнит-

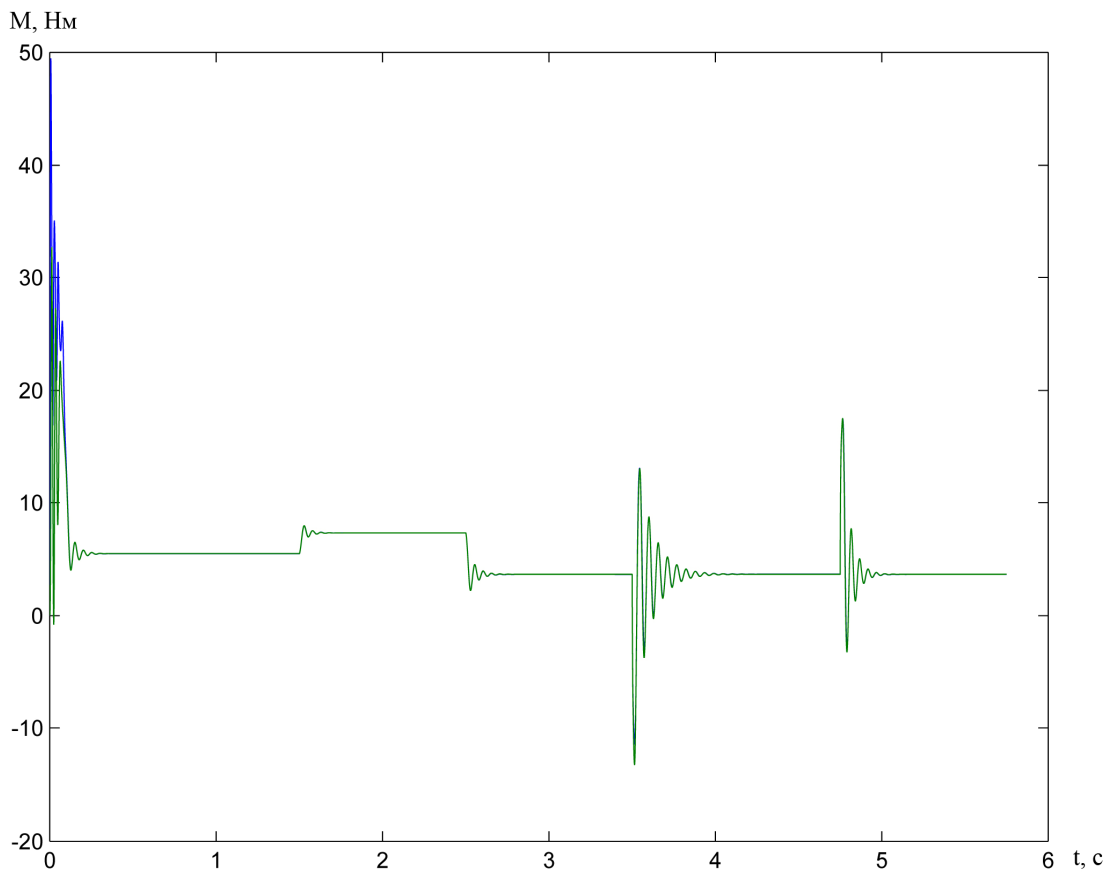


Рис. 2. График электромагнитного момента при различных режимах работы

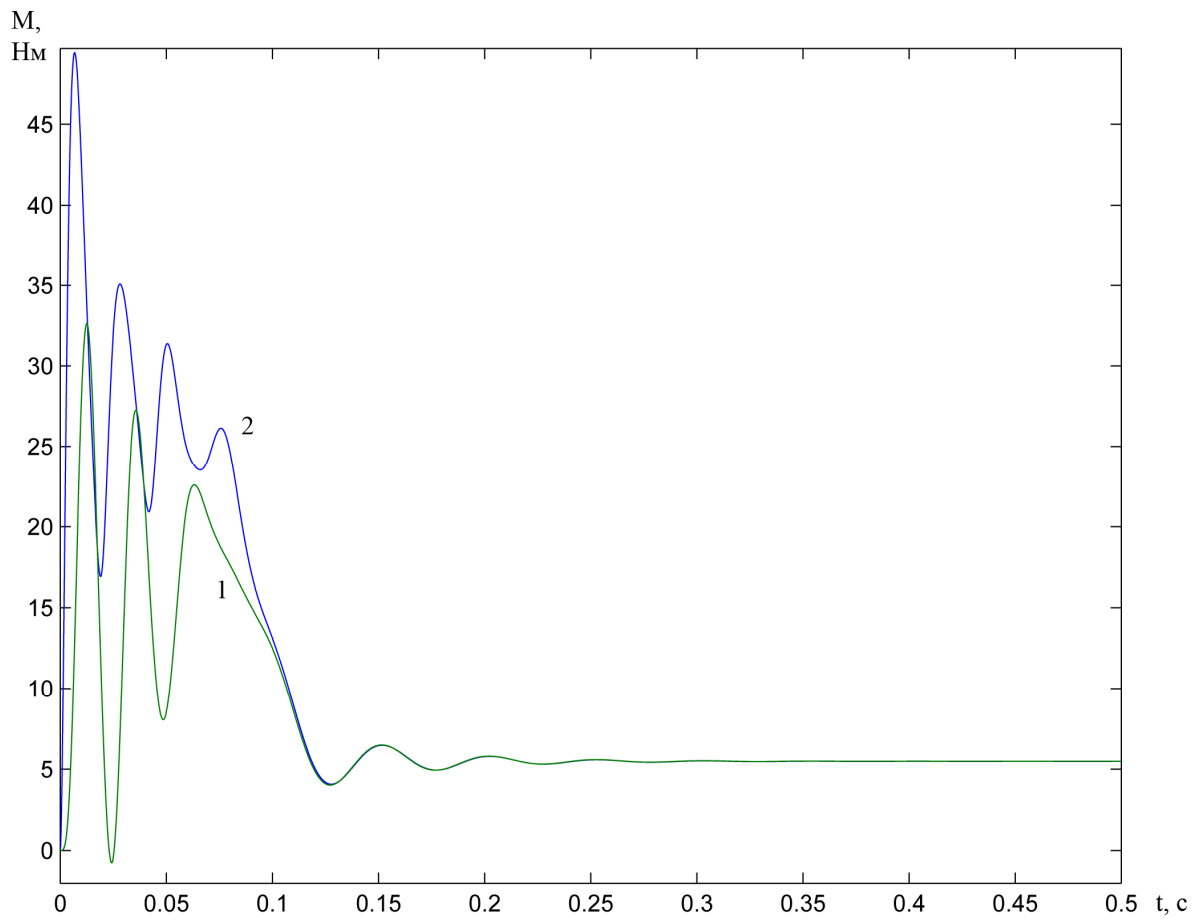


Рис. 3. Электромагнитный момент при пуске ненасыщенной и насыщенной машины

ного момента, а график 2 — электромагнитному моменту, рассчитанному по выражению (12). Неравенство моментов объясняется тем, что в начальный момент пуска двигатель не достигает насыщения и использование выражения (13) для определения амплитуды вектора потокосцепления статора неправомерно. Однако, поскольку между включением электродвигателей и пуском печатной машины на рабочий ход проходит значительное время, достаточное для достижения электродвигателем насыщенного состояния, подобное ограничение применения предлагаемого алгоритма управления является несущественным.

В реальной машине имеют место токи и напряжения, являющиеся проекциями на оси системы координат, неподвижной относительно статора. Поэтому, после того как будут рассчитаны необходимые амплитуда и положение вектора напряжения статора в синхронной системе координат, они должны быть преобразованы в неподвижную систему координат (амплитуда остается неизменной, определяется только требуемое положение вектора напряжения в пространстве). Затем при помощи пространственно-векторного модулирования (другое название — векторная ШИМ) данное задание обрабатывается индивидуальным инвертором напряжения каждого из электроприводов. Преобразования координат выполняются встроенным в инвертор микроконтроллером

4. Контроль величины активного сопротивления статорных обмоток. При работе электропривода его параметры, в частности активные сопротивления обмоток статора, изменяются. Для корректной работы системы управления необходимо точное значение параметров. Поэтому используются температурные датчики, на основании показаний которых вносятся коррективы в значения активных сопротивлений. Причем система управления наиболее чувствительна к изменениям сопротивления статорных обмоток [3]. Предлагаемый алгоритм управления позволяет корректировать значение активного сопротивления статора без применения дорогостоящих, встраиваемых в статор, температурных датчиков. Коррекция производится автоматически в зависимости от величины токов, поддающихся непосредственному измерению. Покажем эту зависимость.

Коэффициент мощности определяется как отношение активной мощности к полной и может быть представлен как отношение активного сопротивления к полному:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (14)$$

где P — активная мощность; S — полная мощность; R — активное сопротивление; X — реак-

тивное (в рассматриваемом случае — индуктивное) сопротивление.

Подставив (10) в (13), получим выражение, позволяющее определять текущее значение активного сопротивления статора по значениям тока звена постоянного тока и амплитуды тока статора:

$$R = X \cdot \frac{I_d}{\sqrt{I_{sm}^2 - I_d^2}}. \quad (15)$$

Однако для того, чтобы правомерно пользоваться выражением (15), необходимо чтобы двигатель был насыщен. Тогда индуктивное сопротивление статора будет определяться через номинальное значение индуктивности статорной обмотки и значение угловой частоты статора и будет являться лишь функцией угловой частоты. Данный вопрос решается просто, так как в управлении моментом опорный вектор потокосцепления поддерживается системой управления на заданном уровне, соответствующем насыщенному состоянию машины.

Заключение. Разработан алгоритм полярного управления двухдвигательным асинхронным электроприводом листовой печатной машины, обеспечивающий требуемый диапазон регулирования и точность углового положения валов печатных цилиндров, приводимых от индивидуальных асинхронных электроприводов. Для реализации алгоритма нет необходимости в создании обратных связей по скорости. Имеется возможность проводить автоматическую коррекцию изменений активного сопротивления статора в процессе работы электропривода без установки температурных датчиков на статорах электродвигателей.

Литература

1. Анкуда, Д. А. Моделирование динамики двухдвигательного электропривода печатной машины / Д. А. Анкуда // Труды БГТУ. Сер. IX Издательское дело и полиграфия. Выпуск XV. — 2007. — С. 37—41.
2. Способ управления взаимосвязанными электроприводами и устройство его реализации: пат. 9707 Респ. Беларусь, МПК7 Н 02Р 5/74 / В. П. Беляев, Д. А. Анкуда; заявитель Бел. гос. технологич. ун-т. — № а 20050602; заявл. 16.06.05; опубл. 30.08.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. — 2007. — № 4. — С. 170—171.
3. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А. А. Усольцев. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. — 94 с.
4. Структуры систем управления автоматизированным электроприводом / О. П. Ильин [и др.]; под ред. А. Л. Галкина. — Минск: Наука и техника, 1978. — 368 с.