

\* \* \*

## Алгоритмы бездатчикового управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем

АЛЯМКИН Д.И.

*Представлен опыт создания системы бездатчикового управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем. Предложена оригинальная переключающаяся структура, обеспечивающая функционирование системы в широком диапазоне скоростей, в том числе на нулевой скорости. Приведены результаты испытаний, подтверждающие предлагаемые решения.*

**Ключевые слова:** электропривод, вентильно-индукторный двигатель, система управления, наблюдатель

Применение, безусловно, перспективного вентильно-индукторного электропривода [1–3] сдерживается из-за присущих ему недостатков, таких как сложность силового преобразователя и необходимость использования датчика положения ротора для коммутации фаз двигателя. Первый недостаток связан с отсутствием на рынке транзисторных сборок для вентильно-индукторного двигателя с однополярным питанием, что привело к появлению двухфазных вентильно-индукторных машин [2, 4], использующих стандартную элементную базу. Второй недостаток частично устранен за счет применения наблюдателей потокоцепления фазы для бездатчиковой коммутации двигателя, требующих, однако, настройки и не работающих на малых частотах вращения и при заторможенном роторе.

Статья посвящена разработке системы бездатчикового управления (БУ) двухфазным вентильно-индукторным двигателем с самовозбуждением (ВИД СВ) – классификация ВИД по способу возбуждения представлена в [5], в иностранной лите-

*Experience gained from construction of a system for sensorless control of a two-phase converter-fed inductor motor is presented. An original switching structure is proposed, using which the system can operate in a wide range of speeds, including zero speed. Test results confirming the validity of the proposed solution are presented.*

**Key words:** electric drive, converter-fed inductor motor, control system, observer

ратуре известным как TPSRM (Two Phase Switched Reluctance Motor) [1].

Основная особенность предлагаемых алгоритмов – учет возможностей преобразователя частоты по определению необходимых параметров для работы наблюдателя на этапе их автоматической идентификации. Такой подход при построении наблюдателя позволяет полностью исключить необходимость вмешательства человека в процесс настройки БУ, что существенно ускоряет и упрощает процесс ввода электропривода в эксплуатацию.

Работа выполнялась применительно к электроприводу рециркуляционных насосов горячего водоснабжения на центральных тепловых пунктах (ЦТП) Москвы [4].

**Конструкция двигателя.** Вопросы проектирования исследуемого двухфазного ВИД СВ с трехзубцовым ротором (рис. 1) освещены в [2–3].

Момент ВИД СВ не зависит от знака тока, а поскольку машина двухфазная, то для возможности пуска двигателя зубцы ротора имеют несиммет-

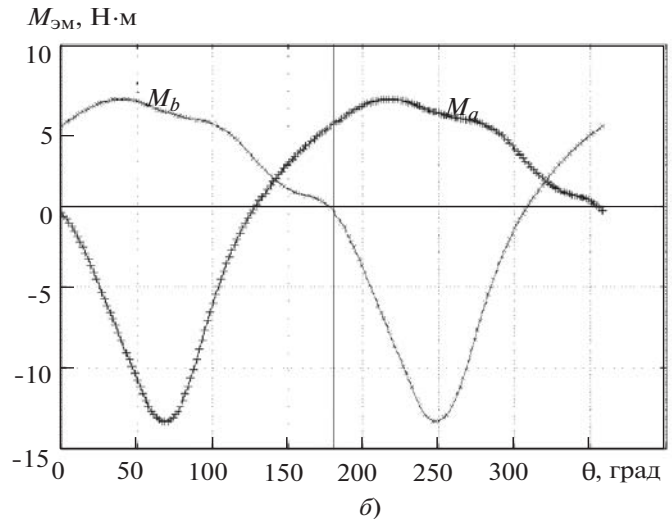
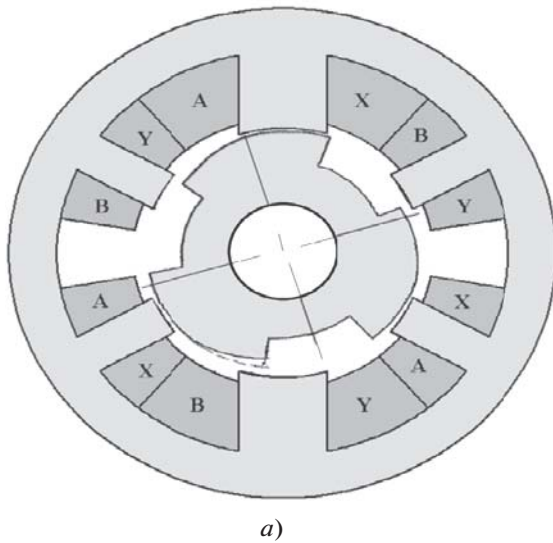


Рис. 1. К исследованию двухфазного вентильно-индукторного двигателя с трехзубцовым ротором: *a* – геометрия магнитопровода; *б* – момент каждой из фаз двигателя в зависимости от электрического углового положения вала ротора ( $I = 7,2$  А,  $\varphi = 0^\circ$  соответствует положению, изображенному на рис. 1, *a*)

ричный скос (см. рис. 1, *a*). За счет скоса зона положительного момента каждой из фаз превосходит  $180^\circ$ , т.е. при любом положении вала ротора имеется возможность создать положительный момент (рис. 1, *б*), что и обеспечивает пуск при любом положении вала ротора. Согласованное положение фазы *A* (точка устойчивого положения вала ротора при наличии тока в этой фазе) изображено на рис. 1, *a*; для моментной характеристики эта точка соответствует  $\varphi = 0^\circ$  (рис. 1, *б*).

Зависимости потокосцепления фазы *A* представлены на рис. 2. Как видно, они существенно нелинейны (зависимость от тока фазы – за счет эффекта насыщения железа магнитопровода).

Классическая система цифрового бездатчикового управления любым индукторным двигателем с самовозбуждением (SRM) основывается на предварительном теоретическом или экспериментальном определении подобной зависимости и последую-

щем, в реальном времени, расчете мгновенного значения потокосцепления фазы путем интегрирования уравнения

$$\Psi = \int (U - iR) dt. \quad (1)$$

Зная мгновенные значения тока и потокосцепления, по зависимости  $\Psi(i, \varphi)$  можно оценить мгновенное значение углового положения ротора машины и принять решение о выполнении очередной коммутации фаз. Однако данный способ трудно реализуем ввиду невозможности с достаточной для практики точностью «заложить» в наблюдатель аналитическое выражение сложной поверхности  $\Psi(i, \varphi)$ . Эта функция меняется у разных двигателей и зависит от ряда факторов: качества использованных материалов, изготовления пакетов статора и ротора, сборки машины, а также длины подводящих проводов от ПЧ к двигателю и др.

Оценка возможности экспериментального получения данной зависимости средствами самого ПЧ в процессе идентификации параметров двигателя показывает, что это чрезвычайно сложная задача, требующая значительных ресурсов процессора по памяти и быстродействию и без принятия специальных мер не обеспечивающая нужной точности. Для управления двухфазными ВИД СВ автором предлагаются модифицированные комбинированные решения, которые, с одной стороны, позволяют обеспечить необходимую точность при измерении положения, с другой, – требуемое быстродействие в реальном времени, а с третьей, – адаптацию к параметрам конкретной машины.

**Принцип работы в зоне высоких скоростей.** Естественным требованием к алгоритму наблюдателя является возможность его настройки наладчиком

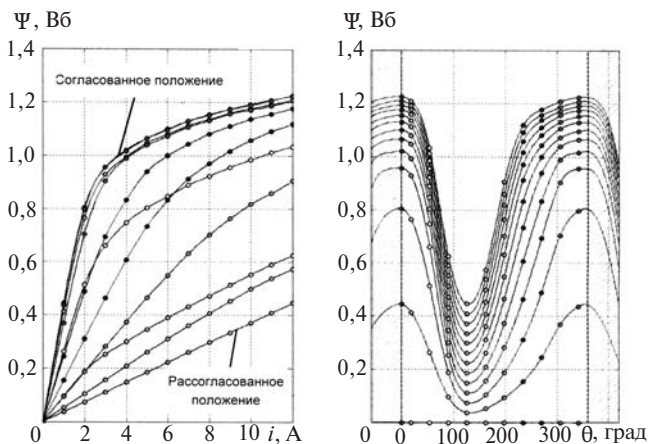


Рис. 2. Зависимости потокосцепления фазы *A*: *a* – от тока фазы для различных угловых положений вала ротора; *б* – от углового положения вала ротора для различных токов фазы

или, что предпочтительнее, посредством процедуры автоматической настройки ПЧ. Поэтому при построении наблюдателя целесообразно учитывать возможности ПЧ по определению параметров и зависимостей, необходимых для работы бездатчикового управления.

Как видно из рис. 2,б, для двухфазного двигателя существует всего две точки устойчивого равновесия вала ротора двигателя: точка согласованного положения фазы  $A$  (соответствует угловому положению в  $360^\circ$ ) и точка согласованного положения фазы  $B$  (соответствует угловому положению в  $180^\circ$ ). Обе точки будут соответствовать максимуму зависимости потокосцепления фазы от положения (см. рис. 2,б).

Идея состоит в том, чтобы определять зависимости потокосцеплений фаз  $A$  и  $B$  от токов фаз только в положениях устойчивого равновесия (согласованного положения) и использовать эти зависимости в наблюдателе. Тем самым значительно уменьшается объем информации, которая должна храниться в контроллере системы управления электропривода. Появляется возможность автоматизировать процесс получения этих зависимостей непосредственно при идентификации параметров двигателя – при его первом включении.

Сформулируем исходный алгоритм работы наблюдателя углового положения ротора. Имеются зависимости потокосцеплений фаз от токов фаз в согласованном положении ротора:

$$\Psi_a^{\text{согл}}(i_a) \circ \Psi_a(i_a) | \varphi = 360^\circ; \quad (2)$$

$$\Psi_b^{\text{согл}}(i_b) \circ \Psi_b(i_b) | \varphi = 180^\circ. \quad (3)$$

Для рассматриваемого двигателя они соответствуют зависимости согласованного положения вала ротора на рис. 2,а.

Пусть в данный момент работает фаза  $A$  двигателя, на интервале коммутации для нее рассчитывается потокосцепление

$$\Psi_a = \int (U_a - i_a R_a) dt. \quad (4)$$

Считается, что как только рассчитанное по (4) потокосцепление на данном периоде дискретизации станет равным потокосцеплению согласованного положения  $\Psi_a(i_{a_k}) = \Psi_a^{\text{согл}}(i_{a_k})$ , ротор двигателя достигнет положения в  $360^\circ$ .

При работе фазы  $B$  все аналогично, только равенство  $\Psi_b(i_{b_k}) = \Psi_b^{\text{согл}}(i_{b_k})$  будет означать достижение ротором положения в  $180^\circ$ .

Таким образом, на одном электрическом периоде имеются две точки, назовем их точками синхро-

низации наблюдателя, относительно которых можно осуществлять программную экстраполяцию углового положения вала ротора для возможности качественного управления двигателем с учетом углов коммутации.

Описанный выше исходный алгоритм работы имеет два существенных недостатка.

Во-первых, из (4) видим, что потокосцепление рассчитывается прямым интегрированием, следовательно, любая погрешность в подынтегральном выражении (ошибка в оценке напряжения  $U$ , тока  $i$  или сопротивления фазы  $R$ ) приводит к накоплению ошибки в вычислении потокосцепления на интервале коммутации фазы. Если ошибка накапливается «в отрицательную сторону», то рассчитанное потокосцепление может оказаться ниже реального и не достигнет значения, соответствующего согласованному положению. Так как далее, после точки согласованного положения, потокосцепление фазы начинает уменьшаться (см. рис. 2,б для углового положения в  $360^\circ$ ), то происходит пропуск точки синхронизации (соответствующая фаза двигателя при этом не коммутируется и остается в работе весь следующий электрический период). Данный эффект приводит к неустойчивой работе наблюдателя.

Во-вторых, точки синхронизации соответствуют согласованному положению ротора ( $180$  и  $360^\circ$ ). Каждая рабочая фаза обязательно должна пройти соответствующую точку синхронизации, после чего может быть отключена. Таким образом, алгоритм накладывает ограничения на допустимые углы коммутации, а именно, угол опережения выключения фазы всегда должен быть нулевым (тогда фазы  $B$  и  $A$  будут отключаться при  $180$  и  $360^\circ$  соответственно), что существенно снижает эффективность работы машины на высоких скоростях.

Для устранения обоих недостатков одновременно алгоритм был доработан введением дополнительного коэффициента, определяющего отношение значений потокосцепления фазы в точке синхронизации и в согласованном положении (коэффициент всегда меньше 1):

$$K = 0, 1. \quad (5)$$

При этом точка синхронизации оказывается на возрастающем участке зависимости потокосцепления фазы от тока, и ошибка интегрирования не приводит к пропуску точки синхронизации, так как даже при наличии ошибки поток все равно будет возрастать и условие

$$\Psi_{\text{тек}} \geq K \Psi^{\text{согл}} \quad (6)$$

всегда будет выполняться. Естественно, для этого необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\epsilon < (1 - K) \gamma^{\text{согл}}, \quad (7)$$

т.е. ошибка интегрирования  $\epsilon$  должна быть меньше, чем запас, предоставляемый коэффициентом  $K$ . Модернизированный алгоритм лишен описанных выше недостатков — ошибка интегрирования не влияет на надежность определения точки синхронизации; при соответствующем выборе коэффициента  $K$  угол опережения выключения фазы имеет большой запас, т.е. точка синхронизации не мешает обрабатывать необходимые углы коммутации.

Однако модернизированный алгоритм, избавившись от старых недостатков, привнес новый — точка синхронизации, определяемая коэффициентом  $K$ , может смещаться в сторону опережения или отставания в зависимости от уровня тока фазы, т.е. в зависимости от текущей нагрузки привода. Это связано с изменением формы кривой потокосцепления в зависимости от углового положения вала ротора с изменением тока, проявлением эффекта насыщения магнитопровода машины. Сказанное иллюстрирует рис. 3, на котором показана траектория изменения места точки синхронизации наблюдателя при  $K = 0,7$  для изменяющегося во всем диапазоне тока фазы двигателя.

Как видно из рисунка, точка синхронизации сильно меняет положение в зависимости от значения тока фазы — чем оно больше, тем сильнее точка синхронизации смещается в сторону опережения. Для рассматриваемого двигателя (ДВИ1.1У(6/3)) такое смещение составляет примерно  $100^\circ$  при изменении тока фазы в допустимом диапазоне (1, 12А). Это означает, что угол, определяемый наблюдателем и используемый в системе управления, может отличаться от реального углового положения вала ротора на  $100^\circ$ . На первый взгляд такой результат может казаться неприемлемым, однако это не так.

$\Psi, \text{ Вб}$

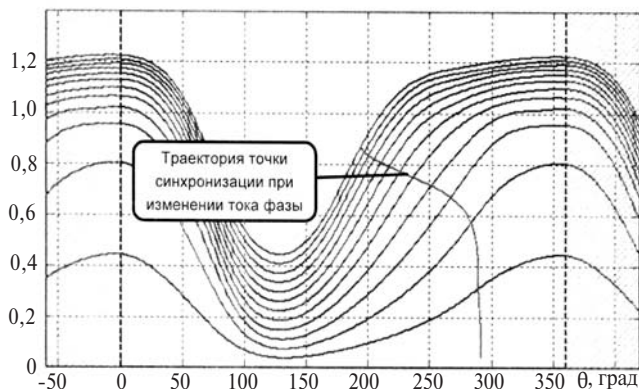


Рис. 3. Зависимость точки синхронизации алгоритма бездатчикового управления при  $K = 0,7$

Действительно, введение коэффициента  $K$  уменьшило точность определения углового положения вала ротора, но такой подход исключает (в определенном диапазоне изменения скорости — об этом ниже) возможность пропуска точки синхронизации из-за накапливающейся ошибки интегрирования. Он также позволяет углу опережения выключения фазы изменяться в необходимом диапазоне, так как точка синхронизации достаточно далеко удалена в сторону центра интервала нейтральной коммутации.

Для компенсации изменения положения точки синхронизации в зависимости от уровня тока был реализован дополнительный алгоритм автоматической подстройки углов коммутации в процессе работы привода. Компенсация происходит следующим образом. При любом положении точки синхронизации алгоритм автоматической подстройки углов коммутации так подстраивает углы опережения включения и выключения тока фаз, чтобы минимизировать уровень тока машины (в данной статье алгоритм не рассматривается). Это автоматически обеспечивает оптимальные «углы коммутации» (более точно — углы включения и выключения), при которых вентильно-индукторный двигатель имеет наилучшие энергетические показатели — КПД и  $\cos \phi$ .

В результате фазы двигателя всегда (в статике) будут коммутироваться оптимально и неважно, где фактически находится точка синхронизации; главное, чтобы она в принципе была (естественно, при постоянном уровне тока двигателя точка синхронизации не меняет своего положения и находится на траектории, показанной на рис. 3).

При введении в наблюдатель коэффициента запаса  $K$  и алгоритма автоматической подстройки углов коммутации привод заработал устойчиво. Испытания показали, что разработанный наблюдатель обеспечивает надежную и стабильную работу двигателя в диапазоне скорости 300, 6000 об/мин. При этом верхняя граница определяется допустимым пределом по подшипникам, а не наблюдателем, т.е. теоретически алгоритм работоспособен и при больших скоростях. Нижняя граница (300 об/мин) определяется зоной стабильной работы алгоритма наблюдателя. Ниже скорости 300 об/мин интервал коммутации фазы становится очень продолжительным по времени, что увеличивает накопленную ошибку интегрирования до критических значений, и алгоритм автокоммутации становится ненадежным. Поэтому для диапазона низких скоростей был разработан специальный отдельный алгоритм вычисления углового положения вала ротора двигателя. Таким образом, предлагается двухзонный алгоритм управления двухфазным ВИД СВ с авто-



матическим переключением режимов в функции текущей скорости привода.

**Принцип работы наблюдателя положения в зоне низких и нулевых скоростей.** Основная проблема недостаточной точности алгоритма на основе кривой потокосцепления фазы в функции тока и положения заложена в способе вычисления потокосцепления. Как видно из (1), потокосцепление вычисляется прямым интегрированием. В иностранной литературе интегрирование такого типа даже имеет специальный термин «open loop integration», что можно перевести как интегрирование без обратной связи. Данная проблема широко распространена в наблюдающих алгоритмах, особенно таких, как MRAC (model reference adaptive control), – наблюдателях, основой которых служит некая «эталонная» модель, зачастую включающая операции прямого интегрирования [6,7]. Проблема такого интегрирования – принципиально неустранимое накопление ошибки: при малейшей неточности параметров подынтегрального выражения с течением времени ошибка накапливается и при определенном значении периода интегрирования становится критической (соизмеримой с полезной информацией).

Для рассматриваемого наблюдателя ошибка становится существенной на скоростях ниже 300 об/мин, что связано с увеличением интервала проводимости фазы по времени. В результате точность определения потокосцепления становится неприемлемой.

Первая идея решения указанной проблемы, проверенная теоретически и экспериментально, заключается в следующем: раз причиной накопления ошибки при интегрировании является увеличившееся время интервала проводимости фазы, то его нужно уменьшить. Как видим, решение получается довольно простым: интервал проводимости фазы разбивается на короткие по времени отрезки, за которые ошибка интегрирования не успевает достичь критических значений. После чего фаза выключается, ток падает до нуля, значение потокосцепления фазы также становится равным нулю, что, естественно, устраняет накопившуюся ошибку интегрирования. После этого фаза вновь включается на заданный уровень тока, и начинается новый этап интегрирования для вычисления потокосцепления. При этом на каждом коротком интервале определение положения на базе рассчитываемого потокосцепления происходит по тому же принципу, что и для алгоритма работы в зоне высоких скоростей.

Такой алгоритм коммутации фаз был реализован и показал свою работоспособность. Однако был выявлен существенный недостаток такого под-

хода: при нагрузке на валу двигателя значение тока фазы увеличивалось, при этом уровень шума машины оказывался очень высоким; постоянные скачки тока приводили к ощутимым пульсациям момента двигателя. По этой причине было решено отказаться от такого алгоритма. Следует при этом отметить, что способ ограниченного времени включения фазы для минимизации ошибки интегрирования вполне работоспособен, однако применять его при больших уровнях тока нецелесообразно из-за высокого уровня шума двигателя.

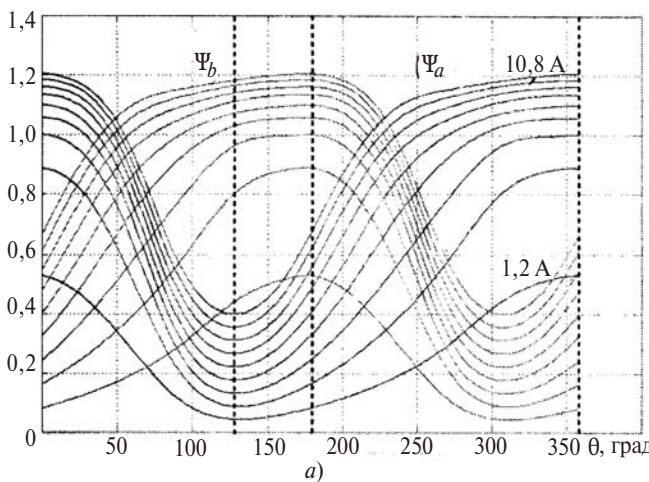
Было предложено для определения углового положения вала ротора использовать отключенную в данный момент фазу двигателя, а именно, использовать принцип ограниченного времени включения тока в этой фазе для минимизации ошибки интегрирования при вычислении потокосцепления. При этом уровень тока в нерабочей фазе должен быть настолько малым, чтобы исключить создание отрицательного момента и звуковых эффектов, но вместе с тем достаточным для корректного вычисления потокосцепления. Рабочая же фаза включается на весь интервал проводимости с постоянным значением тока, определяемым уровнем нагрузки на валу двигателя, т.е. алгоритм прерывания тока для нее не используется, что исключает возникновение звуковых эффектов при большом уровне тока.

Рассмотрим способы реализации предложенной идеи (рис. 4). Будем считать, что в данный момент времени рабочей (создающей момент) фазой является фаза *B*, а угловое положение ротора соответствует  $0^\circ$ . Фаза *A* при этом будет использоваться для определения углового положения вала ротора. Очевидно, каждая фаза может быть рабочей в зоне, в которой она создает положительный момент.

Таким образом, для наших начальных условий фаза *B* может быть рабочей вплоть до  $180^\circ$  (точка устойчивого равновесия для этой фазы), фаза *A* может стать рабочей не раньше, чем угол достигнет  $130^\circ$  (точка неустойчивого равновесия для этой фазы).

Очевидно, точка переключения с фазы *B* на *A* должна находиться между точками неустойчивого равновесия фазы *A* и устойчивого равновесия фазы *B*. В нашем случае одна фаза всегда используется для определения углового положения вала ротора, а другая является рабочей (создающей момент) фазой, поэтому, очевидно, фазы не могут перекрываться, т.е. интервал проводимости фаз должен быть равен  $180^\circ$ . Что же касается точки переключения с фазы *B* на *A*, то, с одной стороны, она не должна быть близка к точке неустойчивого равновесия фазы *A*, так как при небольшой погрешности в определении углового положения вала ротора появится возможность включить фазу *A* в зоне, в

Ψ, Вб



M, Н·м

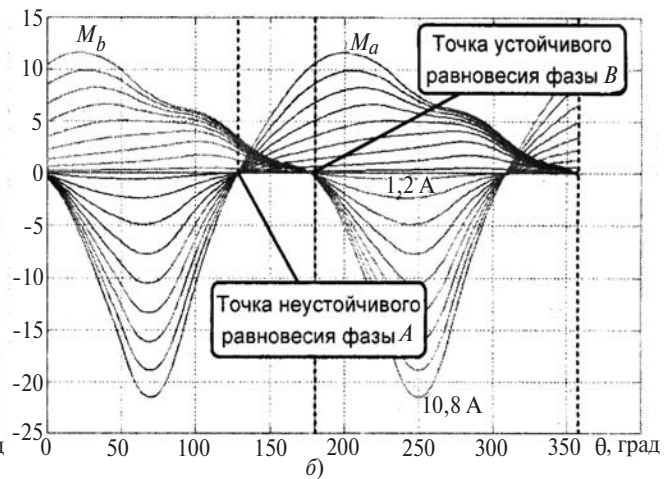


Рис. 4. Семейства характеристик двигателя ДВИ1.1У(6/3) в зависимости от углового положения вала ротора для различных токов: а – потокосцепления фаз А и В; б – моменты фаз А и В

которой ее момент еще отрицательный. При движении на низкой скорости это может привести к изменению направления вращения вала ротора, что недопустимо. С другой стороны, точка переключения не должна располагаться близко к точке устойчивого равновесия фазы В, так как согласно рисунку момент фазы В в зоне перекрытия фаз довольно низкий (существенно ниже фазы А). При наличии момента сопротивления на валу двигателя это может привести к остановке вала ротора еще до достижения им точки переключения, что также нежелательно. Таким образом, целесообразно момент переключения фаз располагать примерно в середине зоны перекрытия, что для перехода с фазы В на А примерно соответствует  $150^\circ$ .

Перейдем к выбору вариантов построения наблюдателя. Будем рассматривать все тот же случай, когда фаза В является рабочей, а по фазе А определяется угловое положение вала ротора (измерительная фаза). Этот случай соответствует диапазону изменения угла от 0 до примерно  $150^\circ$  (точка переключения). На данном интервале потокосцепление фазы А сначала уменьшается, достигая минимума в точке рассогласованного положения (соответствует точке неустойчивого равновесия), затем начинает возрастать, обеспечивая возможность создания положительного момента.

Характерными точками на данном интервале графиков потокосцепления является точка минимума и точка, соответствующая согласованному положению фазы В. Зная их расположение, можно определить желаемую точку переключения фаз, соответствующую середине зоны перекрытия. Однако отслеживать минимальную и желаемую точки переключения целесообразно вовсе не по потокосцеплению. Это связано с тем, что значение потокосцепления зависит от уровня тока фазы. И даже если

регулятору тока задана постоянная токовая уставка, на самом деле ток непостоянен: в момент включения ключей он растет, в момент выключения падает и т.д. Кроме того, в точке минимума потокосцепления индуктивность фазы минимальна и составляет для машин ДВИ1.1У(6/3) примерно 30 мГн (рис. 5). Следует отметить, что для поддержания тока фаз двигателя используются релейные регуляторы с частотой дискретизации 40 кГц (предельная частота коммутации ключей 20 кГц).

При таком значении индуктивности изменение тока за один период дискретизации релейных регуляторов тока 25 мкс (40 кГц) окажется весьма существенным:

$$Dj_{\max} = \frac{U_{dc} \Delta t}{L_{\min}} = \frac{540 \times 25 \times 10^{-6}}{30 \times 10^{-3}} = 0,45 \text{ А.} \quad (8)$$

Другими словами, пульсаций тока, а следовательно, и вычисляемого потокосцепления не избежать.

При наличии пульсаций тока для качественной работы алгоритма необходимо иметь зависимости минимального потокосцепления фазы от тока и потокосцепления фазы в точке согласованного положения другой фазы от тока первой (например, зависимость потокосцепления фазы А в точке согласованного положения фазы В от тока фазы А). Для того чтобы излишне не усложнять алгоритмы бездатчикового управления, целесообразно перейти от измерения потокосцепления фазы к измерению индуктивности (рис. 5).

Как видно из рисунка, индуктивность фазы сильно зависит от уровня тока машины, что связано с насыщением магнитопровода двигателя. Однако в зоне рассогласованного положения индуктивность фазы не зависит от уровня тока, что очень удобно использовать в нашем случае, так как

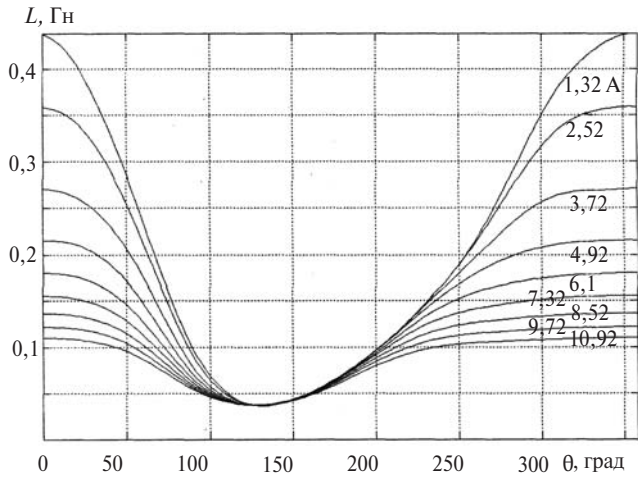


Рис. 5. Зависимость индуктивности фазы А от углового положения вала ротора для различных значений тока фазы (ДВИ1.1У(6/3))

пульсации тока фазы и вычисляемого потокосцепления не важны: индуктивность фазы будет зависеть только от углового положения вала ротора, что

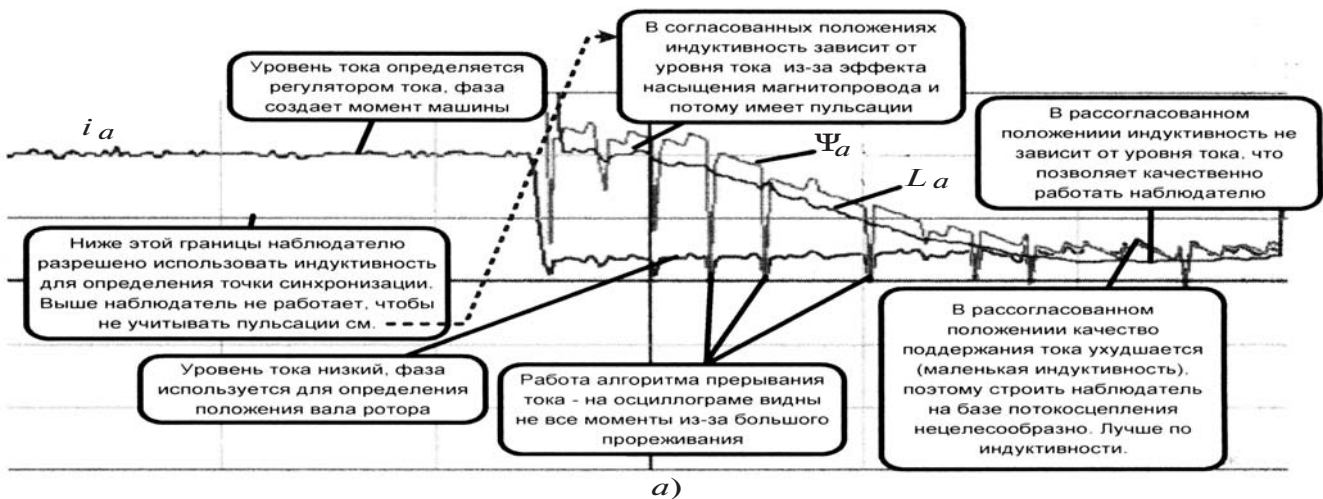
создает необходимые условия для простой и качественной работы алгоритма наблюдателя.

Алгоритм работы наблюдателя в зоне низких скоростей заключается в следующем:

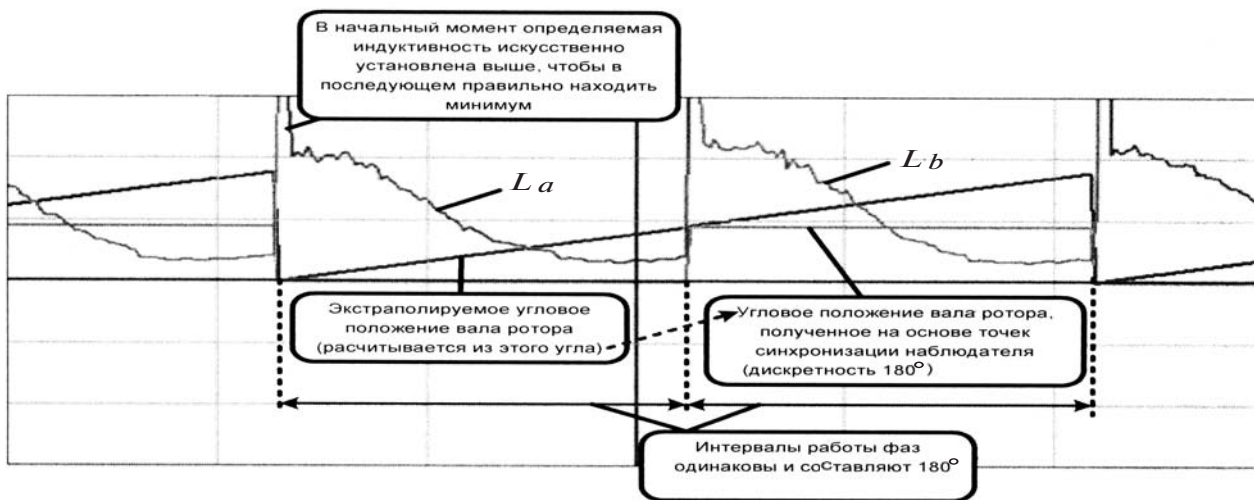
для каждой фазы двигателя с помощью предпусковой идентификации параметров определяются параметры:  $L_{amin}$  – минимальная индуктивность фазы А;  $L_{bmin}$  – минимальная индуктивность фазы В;  $L_a^{соглB}$  – индуктивность фазы А в точке согласованного положения фазы В;  $L_b^{соглA}$  – индуктивность фазы В в точке согласованного положения фазы А; по найденным параметрам вычисляются два коэффициента:

$$K_{L_{a\text{синхр}}/L_{amin}} = \frac{(L_a^{соглB} - L_{amin})0,5 + L_{amin}}{L_{amin}} \quad (9)$$

– отношение индуктивности фазы А в желаемой точке переключения (точке синхронизации) к минимальной индуктивности фазы А; желаемая точка



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы работы наблюдателя в диапазоне низких скоростей: а – работа наблюдателя в малом; б – в большом



переключения находится примерно посередине между точкой неустойчивого равновесия фазы  $A$  и точкой устойчивого равновесия фазы  $B$ ;

$$K_{L_{b\text{синхр}}/L_{b\text{min}}} = \frac{(L_b^{\text{согл}B} - L_{b\text{min}})0,5 + L_{b\text{min}}}{L_{b\text{min}}} \quad (10)$$

– отношение индуктивности фазы  $B$  в желаемой точке переключения (точке синхронизации) к минимальной индуктивности фазы  $B$ ; желаемая точка переключения находится примерно посередине между точкой неустойчивого равновесия фазы  $B$  и точкой устойчивого равновесия фазы  $A$ ;

в каждый момент времени одна фаза двигателя является рабочей фазой (создающей момент машины), по другой фазе определяется момент переключения фаз (точка синхронизации);

ток в рабочей фазе определяется значением на выходе регулятора скорости;

в нерабочей (измерительной) фазе ток мал, используется алгоритм прерывания тока для минимизации ошибки при вычислении потокосцепления фазы. По известным значениям тока и потокосцепления фазы в каждый момент времени определяется индуктивность фазы, в процессе работы измерительной фазы находится ее минимальное значение, после того как минимум индуктивности пройден, ожидается выполнение условия:

$$L_{\text{текущ}}^3 L_{\text{min}} K_{L_{\text{синхр}}/L_{\text{min}}} ; \quad (11)$$

момент выполнения условия (11) является очередной точкой синхронизации – меняется угловое положение вала ротора, происходит переключение фаз.

Пример работы наблюдателя, реализованного по предложенному алгоритму, представлен на рис. 6.

Система управления обязательно проходит процедуру пуска двигателя. Заключается она в следующем: значение тока одной из фаз двигателя должно гарантировать возврат ротора в точку согласованного положения, т.е. уже перед началом работы наблюдателя известно положение вала ротора, задана отправная точка. В последующем наблюдатель уже не теряет положение вала двигателя и позволяет корректно работать на низких и даже нулевых скоростях.

**Выводы.** 1. Разработанная система с переключаемой структурой управления позволяет исполь-

зовать различные алгоритмы управления для работы в зоне низких и высоких скоростей.

2. Разработка алгоритмов бездатчикового управления с учетом возможностей преобразователя частоты по автоматической идентификации параметров, необходимых для работы наблюдателя, позволила исключить необходимость продолжительной и сложной настройки алгоритмов БУ.

3. Система бездатчикового управления прошла полноценные испытания как в лабораторных условиях, так и в условиях ЦТП и подтвердила свою работоспособность. Она внедрена в программное обеспечение преобразователей частоты ВИП-АД (ООО «НПП Цикл+»), входящих в состав станции группового управления СГУ ГВС-2.2(ВИП) (ООО «Энергосбережение») для рециркуляционных насосов горячего водоснабжения мощностью 2,2 кВт. По состоянию на март 2011 г. в промышленную эксплуатацию на ЦТП Москвы внедрены 97 комплектных электроприводов с бездатчиковой системой управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Krishnan R.** Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications. – CRC Press, 2001.
2. **Krishnan R. Seok-Gyu Oh.** Two Phase SRM With Flux Reversal Free Stator: Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification. – IEEE, 2006.
3. **Cheewoo Lee, Jaehyuck Kim, Keunsoo Ha, Krishnan R., Seok-Gyu Oh.** Design and Development of Low-Cost and High-Efficiency Variable-Speed Drive System with Switched Reluctance Motor. – IEEE, 2007.
4. **Алямкин Д.И., Бычкова Е.В., Крылов Ю.А. и др.** Двухфазный вентильно-индукторный электропривод насосов горячего водоснабжения. – Труды XII Международн. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Алушта (Крым), 2008.
5. **Жарков А.А.** Разработка и исследование вентильно-индукторного электропривода с независимым возбуждением и микроконтроллерным управлением: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2007.
6. **Schauder C.** Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers. – IEEE, 1992.
7. **Park C.-W., Kwon W.-H.** Simple and robust speed sensorless vector control of induction motor using stator current based MRAC. – Electric Power Systems Research, 2004, №71.

[15.05.11]

*Автор: Алямкин Дмитрий Иванович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 2007 г. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, сотрудник ООО «НПФ Вектор» (инженер-программист).*