

Алгоритмы бездатчикового управления двухфазным вентильно-индукторным двигателем

Sensorless two-phase switched-reluctance drive control methods

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: вентильно-индукторный, двухфазный, система бездатчикового управления, наблюдатель.

Presented an experience of development of sensorless control system for two-phase switched reluctance motor. The original switching control structure providing operation of the drive in a wide range of speeds, including zero speed is offered. The results of testings are presented.

Key words: switched reluctance, two-phase SRM, TPSRM, SRD, sensorless control, observer.

Введение

Уже долгое время многими авторами [1-3] обосновывается перспективность применения вентильно-индукторного электродвижения в качестве альтернативы традиционному частотно-регулируемому асинхронному приводу. Однако применение данного, безусловно, перспективного типа привода сдерживают присущие ему недостатки, такие как сложность силового преобразователя и необходимость использования датчика положения ротора для коммутации фаз двигателя. Первый недостаток связан с отсутствием на рынке транзисторных сборок, разработанных специально для вентильно-индукторного двигателя с однополярным питанием, что привело к появлению двухфазных вентильно-индукторных машин [2, 4], позволяющих использовать стандартную элементную базу. Вторым недостатком частично устранен за счет применения наблюдателей потокосцепления фазы для бездатчиковой коммутации двигателя, но наблюдатели требуют настройки и не работают на малых скоростях вращения и при заторможенном роторе.

Статья посвящена разработке системы бездатчикового управления (БУ) двухфазным вентильно-индукторным двигателем с самовозбуждением (ВИДС) (классификация ВИДС по способу возбуждения представлена в [5]), в иностранной литературе известным как TPSRM (от Two Phase Switched Reluctance Motor) [1].

Основной особенностью предлагаемых алгоритмов является учет возможностей преобразователя частоты по определению всех необходимых

параметров для работы наблюдателя на этапе автоматической идентификации параметров. 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, устанавливаемых на центральных тепловых пунктах (ЦТП) города Москвы [4].

Конструкция двигателя

Геометрия магнитопровода исследуемого двухфазного ВИД СВ с трехзубцовым ротором, а также момент каждой из фаз двигателя в зависимости от электрического углового положения вала ротора изображена на рис.1. Вопросы проектирования машин такого типа освещены в [2-3]

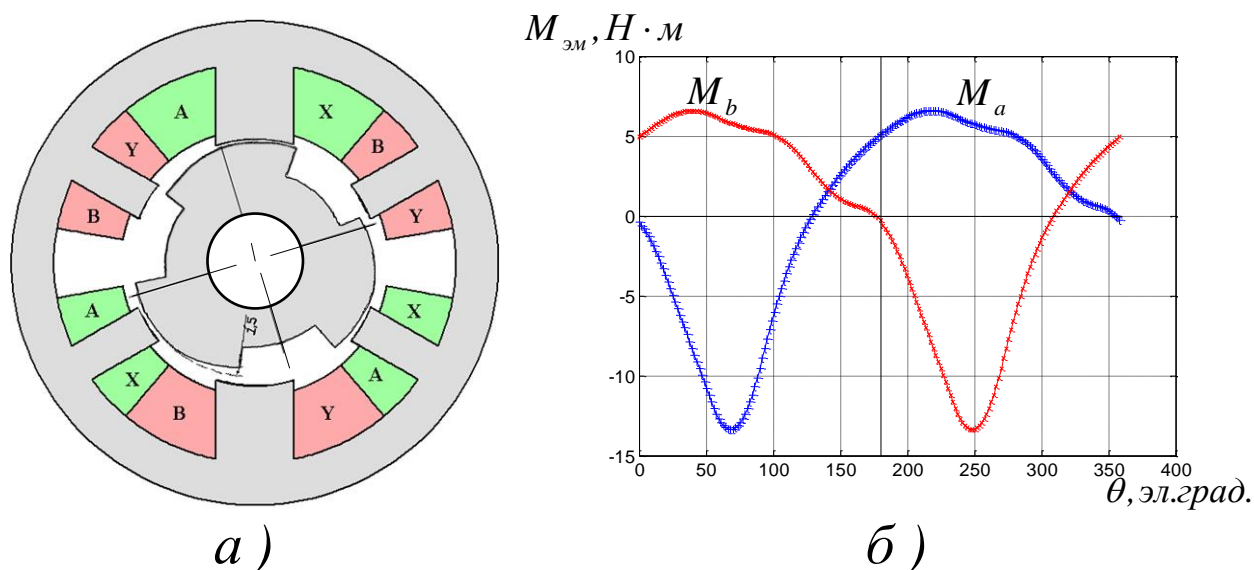


Рис.1.

- а) геометрия магнитопровода двухфазного вентильно-индукторного двигателя с трехзубцовым ротором;
- б) момент каждой из фаз двигателя в зависимости от электрического углового положения вала ротора ($I = 7.2 \text{ А}$, $\theta = 0 \text{ эл.град.}$ соответствует положению изображенному на рис.1.а).

Момент ВИД СВ не зависит от знака тока, а так как машина двухфазная, то для возможности пуска двигателя зубцы ротора имеют несимметричный скос – см. рис.1а. За счет наличия такого скоса зона положительного момента каждой из фаз превосходит 180 электрических градусов, то есть при любом положении вала ротора имеется возможность создать положительный момент – рис.1б, что и обеспечивает возможность пуска для любого положения вала ротора. Согласованное положение фазы А (точка устойчивого положения вала ротора при наличии тока в фазе А) изображена на рис.1а. Для моментной характеристики эта точка соответствует $\theta_{эл.} = 0^\circ$. (рис.1б).

Зависимость потокосцепления фазы А от тока фазы А и углового положения вала ротора имеет вид представленный на рис.2.

Как видно из рис.2, зависимость потокосцепления фазы существенно нелинейная, как от тока фазы (за счет эффекта насыщения железа магнитопровода), так и от положения ротора.

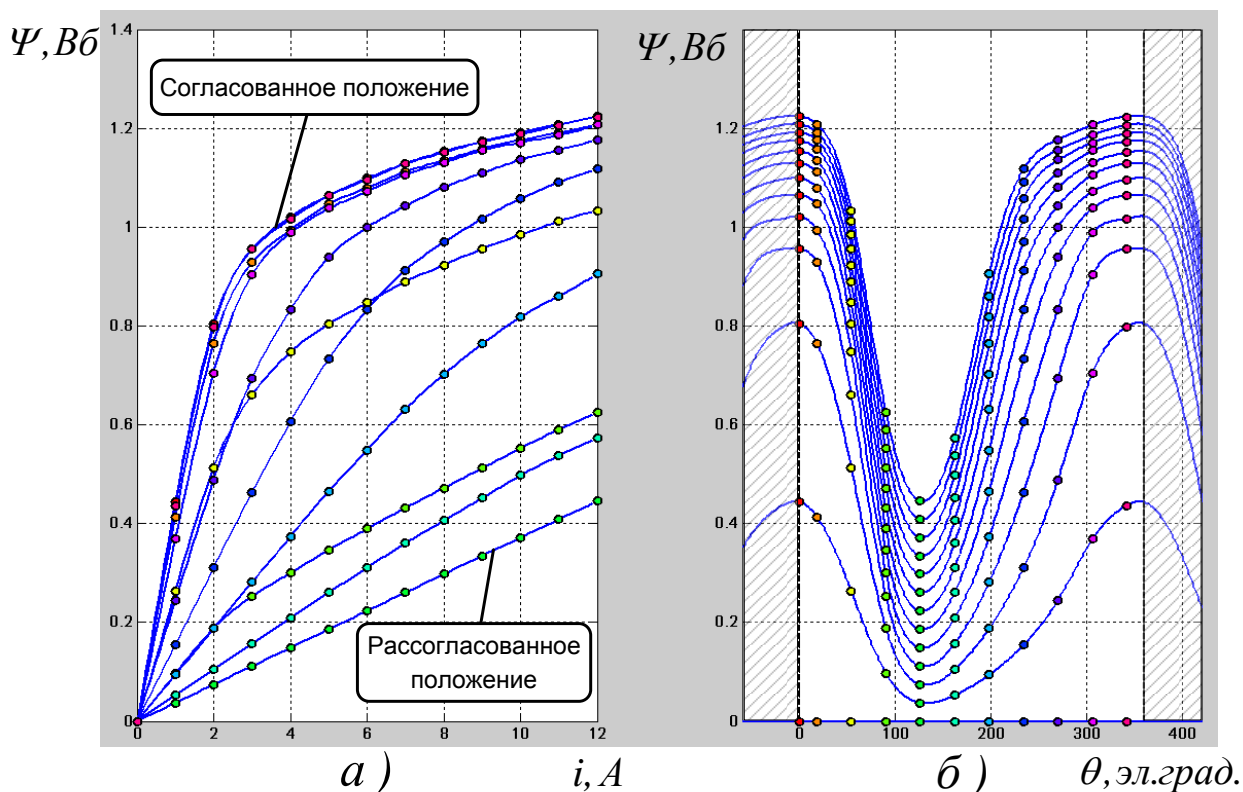


Рис. 2. Зависимость потокосцепления фазы А:
 а) зависимость потокосцепления фазы от тока фазы для различных угловых положений вала ротора;
 б) зависимость потокосцепления фазы от углового положения вала ротора для различных токов фазы.

Классическая система цифрового бездатчикового управления любым индукторным двигателем с самовозбуждением (SRM) основывается на предварительном теоретическом или экспериментальном определении подобной зависимости потокосцепления от тока и положения $\Psi(i, \theta)$ и последующего, в реальном времени, определения мгновенного значения потокосцепления фазы путем интегрирования уравнения:

$$\Psi = \int (U - i \cdot R) dt \quad (1).$$

Зная величину мгновенного тока и мгновенного потокосцепления, по зависимости $\Psi(i, \theta)$ оценивается мгновенное значение углового положения ротора машины и принимается решение о выполнении очередной коммутации фаз.

Однако данный способ трудно реализуем, в виду невозможности заложить в наблюдатель аналитическое выражение сложной поверхности

$\Psi(i, \theta)$ с достаточной для практики точностью. Эта функция меняется от двигателя к двигателю и зависит от ряда факторов: качества использованных материалов, качества изготовления пакетов статора и ротора, качества сборки машины, длины подводных проводов от ПЧ к двигателю и других.

Проведенная 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 вычислительную 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

Итак, построение наблюдателя на основе поверхности $\Psi(i, \theta)$ нереализуемо по причине невозможности снять целиком эту зависимость (поверхность) средствами самого ПЧ. Естественно, основным требованием к алгоритму наблюдателя является возможность его настройки наладчиком, или, что более предпочтительно, посредством процедуры автоматической настройки ПЧ. Поэтому, при построении наблюдателя целесообразно отталкиваться непосредственно от возможностей ПЧ по снятию параметров и зависимостей, необходимых для работы бездатчикового управления.

Как видно из рис.2б, для двухфазного двигателя существует всего 2 точки устойчивого равновесия вала ротора двигателя — точка согласованного положения фазы А (соответствует угловому положению в 360 электрических градусов) и точка согласованного положения фазы В (соответствует угловому положению в 180 электрических градусов). Эти точки будут соответствовать максимуму зависимости потокосцепления фазы от положения — см. рис.2б для фазы А двигателя, для фазы В — аналогично, со сдвигом 180 электрических градусов.

Первая идея состоит в том, чтобы определять зависимости потокосцеплений фаз А и В от токов фаз только в положениях устойчивого равновесия (соответствует согласованному положению) и использовать эти зависимости в наблюдателе. Тем самым на порядки уменьшается объем информации, который должен храниться в контроллере системы управления электропривода. Появляется возможность автоматизировать процесс получения этих зависимостей непосредственно при идентификации параметров двигателя, — при его первом включении.

Исходный алгоритм работы наблюдателя углового положения ротора можно сформулировать следующим образом:

- имеются зависимости потокосцеплений фаз от токов фаз в согласованном положении ротора:

$$\Psi_a^{cozl.}(i_a) \equiv \Psi_a(i_a)|_{\theta = 360 \text{эл.град.}} \quad (2),$$

и

$$\Psi_b^{cozl.}(i_b) \equiv \Psi_b(i_b)|_{\theta = 180 \text{эл.град.}} \quad (3).$$

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

- Пусть в данный момент работает фаза А двигателя. В процессе работы фазы на интервале коммутации для нее рассчитывается потокосцепление на основе уравнения:

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

- Как только рассчитанное по формуле (4) потокосцепление фазы на данном периоде дискретизации станет равным потокосцеплению согласованного положения $\Psi_a(i_{a_k}) = \Psi_a^{cozl.}(i_{a_k})$, считается, что ротор двигателя достиг положения в 360 электрических градусов.
- При работе фазы В все аналогично, только равенство $\Psi_b(i_{b_k}) = \Psi_b^{cozl.}(i_{b_k})$ будет означать достижение ротором положения в 180 электрических градусов.

Таким образом, на одном электрическом периоде имеется две точки, которые будем называть точками синхронизации наблюдателя, соответствующие 180-и и 360-и электрическим градусам. Относительно этих двух точек синхронизации можно осуществлять программную экстраполяцию углового положения вала ротора для возможности качественного управления двигателем с учетом углов коммутации.

Описанный выше исходный алгоритм работы имел два существенных недостатка:

1. Как видно из формулы (4), 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. В случае накопления ошибки в отрицательную сторону (вычисленное потокосцепление ниже реального) рассчитываемое потокосцепление может не достичь значения, соответствующего согласованному положению. Так как далее, после точки согласованного положения, потокосцепление фазы начинает уменьшаться — см. рис.2б для углового положения соответствующего 360 электрическим градусам, 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.
2. Второй существенный недостаток алгоритма заключается в следующем. Точки синхронизации соответствуют согласованному положению ротора, т.е. 180-и и 360-и электрическим градусам. Каждая рабочая фаза обязательно должна пройти соответствующую точку синхронизации, после чего она может быть выключена. Таким образом, алгоритм накладывает ограничения на допустимые углы коммутации, а именно – угол опережения выключения фазы всегда должен быть нулевым (тогда фазы В и А будут выключаться при 180-и и 360-и электрических градусах соответственно), что существенно снижает эффективность работы машины на высоких скоростях.

Для устранения обоих недостатков одновременно алгоритм был доработан следующим образом: вводится дополнительный коэффициент, определяющий отношение потокосцепления фазы в точке синхронизации к потокосцеплению фазы в согласованном положении (коэффициент всегда меньше 1):

$$K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}} = 0 \div 1 \quad (5).$$

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

$$\Psi_{\text{текущ.}} \geq K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}} \cdot \Psi_{\text{согл.}} \quad (6)$$

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

$$\varepsilon_{\text{интегрирования}} < (1 - K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}}) \cdot \Psi_{\text{согл.}} \quad (7),$$

то есть ошибка интегрирования должна быть меньше чем запас, предоставляемый коэффициентом $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}}$. Модернизированный алгоритм,

лишен описанных выше недостатков – ошибка интегрирования не влияет на надежность определения точки синхронизации; при соответствующем выборе коэффициента $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}}$ у угла опережения выключения фазы имеется

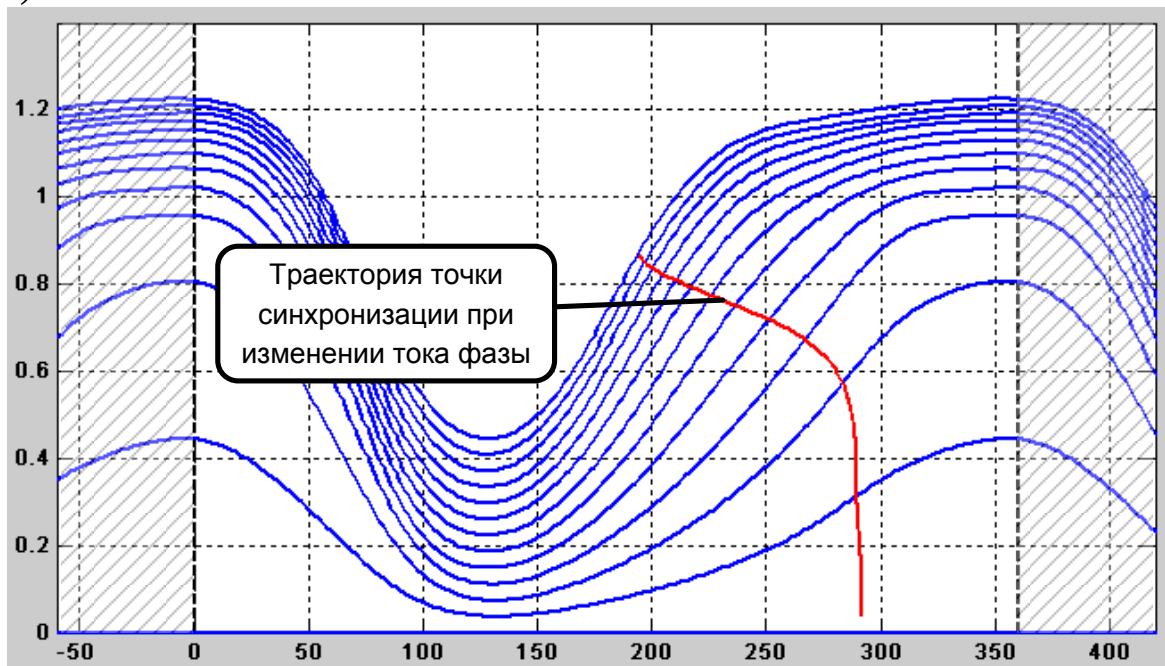
большой запас, т.е. точка синхронизации не мешает отрабатывать необходимые углы коммутации.

Однако, модернизированный алгоритм не только избавился от старых недостатков, но и привнес новый – точка синхронизации, определяемая коэффициентом $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}}$ оказывается не жестко привязанной к магнитной

структуре двигателя. Она может смещаться в сторону опережения или отставания в зависимости от уровня тока фазы, т.е. в зависимости от текущей нагрузки привода.

Этот эффект связан с изменением формы кривой потокосцепления в зависимости от углового положения вала ротора с изменением тока — проявляется эффект насыщения магнитопровода машины. Сказанное иллюстрирует рис.3, на котором показана траектория изменения места точки синхронизации наблюдателя при $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}} = 0.7$, для изменяющегося во всем диапазоне тока фазы двигателя.

$\Psi, Вб$



$\theta_{\text{эл}}, \text{эл.град.}$

Рис. 3 Зависимость точки синхронизации алгоритма бездатчикового управления при $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}} = 0.7$

Как видно из рисунка, точка синхронизации сильно меняет свое положение в зависимости от величины тока фазы — чем больше ток, тем сильнее точка синхронизации смещается в сторону опережения. Для рассматриваемого двигателя (ДВИ1.1У(6/3)) точка синхронизации смещается примерно на 100 электрических градусов 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 электрических градусов. На первый взгляд такой результат может казаться неприемлемым, однако, это не так.

Действительно, введение коэффициента $K_{\frac{\Psi_{\text{синхр.}}}{\Psi_{\text{согл.}}}}$ уменьшило точность определения углового положения вала ротора, но такой подход исключает (в определенном диапазоне изменения скорости, об этом см. 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 "плавания" 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 подстраивает углы опережения включения и опережения выключения тока фаз так, чтобы минимизировать уровень тока машины (в данной статье алгоритм не рассматривается). Это автоматически обеспечивает оптимальные «углы коммутации» (более точно угол включения и выключения), при которых вентильно-индукторный двигатель имеет наилучшие энергетические показатели – КПД и коэффициент мощности.

В результате фазы двигателя всегда (в статике) будут коммутироваться оптимально и совершенно не важно, 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 где-то на траектории, показанной на рис.3).

При введении в наблюдатель коэффициента запаса $K_{\frac{\psi_{снхр.}}{\psi_{сост.}}}$ и алгоритма автоматической подстройки углов коммутации, привод заработал устойчиво. Испытания алгоритма показали, что разработанный наблюдатель обеспечивает надежную и стабильную работу двигателя в диапазоне скоростей 300 ÷ 6000 об/мин (осциллограммы работы наблюдателя см. на рис.4). При этом, верхняя граница определяется допустимым пределом по подшипникам, а не наблюдателем, то есть 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.

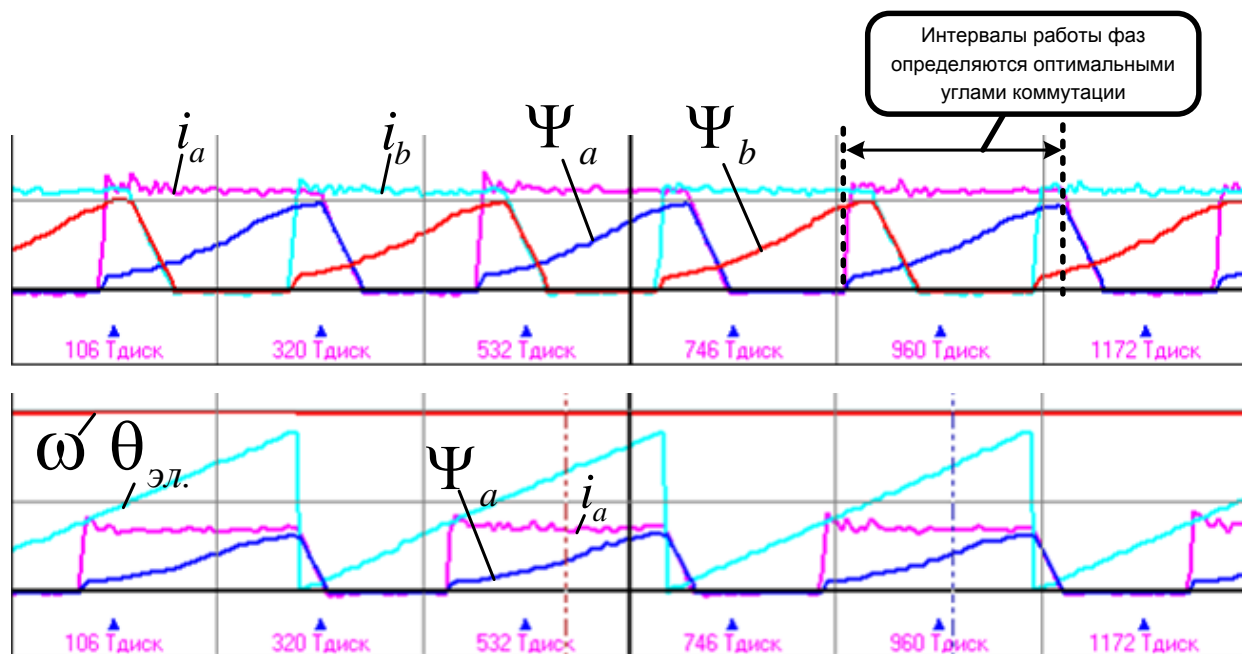


Рис.4. Осциллограмма работы алгоритма бездатчикового управления в зоне высоких скоростей

Поэтому, для диапазона низких скоростей был разработан специальный отдельный алгоритм вычисления углового положения вала ротора двигателя. Таким образом, предлагается двух-зонный алгоритм управления двухфазным ВИД СВ с автоматическим переключением из режима в режим 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 заключается в самом принципе вычисления потокосцепления. Как видно из выражения (1) потокосцепление вычисляется по принципу прямого интегрирования. В иностранной литературе интегрирование такого типа даже имеет специальный термин — "open loop integration", что в переводе можно интерпретировать 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, которая зачастую включает в себя операции прямого интегрирования [6-7]. Проблемой такого интегрирования является принципиально неустранимое накопление ошибки в процессе интегрирования — при малейшей неточности в параметрах подынтегрального выражения с течением времени ошибка будет накапливаться и при определенном значении периода интегрирования ошибка станет критической (соизмеримой с полезной информацией).

Для рассматриваемого в нашем случае наблюдателя ошибка становится существенной на скоростях ниже 300 об/мин, что связано с увеличением

интервала проводимости фазы по времени. В результате качество определения потокосцепления становится неприемлемым.

Первая идея, которая была теоретически и экспериментально проверена для устранения описанной проблемы, следующая: раз проблемой накопления ошибки в интегрировании является увеличившееся время интервала проводимости фазы, то нужно его уменьшить. Как видим, решение описанной проблемы 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, и ток спадает до нуля (потокосцепление фазы также обнуляется, что естественно сбрасывает накопившуюся ошибку интегрирования). После полного спадания тока и обнуления потокосцепления, фаза вновь включается на заданный уровень тока, и начинается новый этап интегрирования для вычисления потокосцепления. При этом, на каждом коротком интервале работает тот же самый принцип определения положения на базе рассчитываемого потокосцепления, что и для алгоритма работы в зоне высоких скоростей.

Такой алгоритм коммутации фаз, уменьшающий ошибку интегрирования потокосцепления в соответствии с выбранным временем отрезка непрерывного тока, был реализован и показал свою работоспособность. Пример деления интервала проводимости на короткие отрезки изображен на рис.5. Однако, был выявлен существенный недостаток такого подхода – при наличии на валу двигателя нагрузки значение тока фазы увеличивалось, при этом уровень шума машины оказывался очень высоким, т.к. ток фазы постоянно сбрасывался в ноль и снова возрастал, что приводило к ощутимым пульсациям момента двигателя. По этой причине было решено отказаться от такого алгоритма.

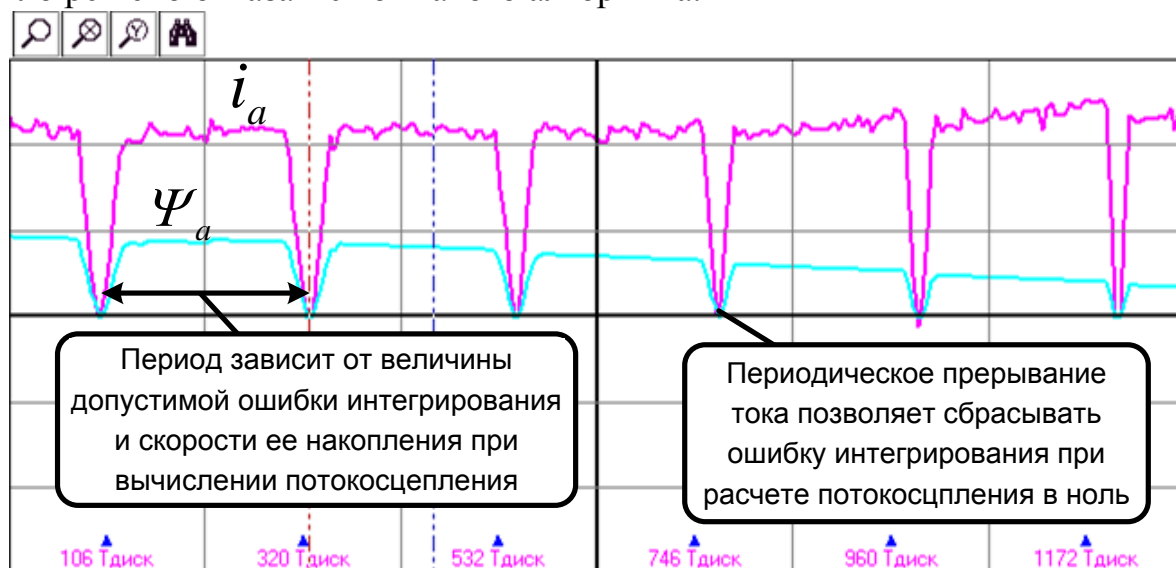


Рис.5. Пример деления интервала проводимости фазы на короткие отрезки для минимизации ошибки интегрирования при вычислении потокосцепления

Таким образом, способ ограниченного времени включения фазы для минимизации ошибки интегрирования вполне работоспособен, однако

применять такой алгоритм при больших уровнях тока нецелесообразно из-за высокого уровня шума двигателя.

Поэтому было предложено для определения углового положения вала ротора использовать отключенную в данный момент фазу двигателя. А при создании тока в отключенной фазе использовать принцип ограниченного времени включения, для минимизации ошибки интегрирования при вычислении потокосцепления. При этом уровень тока в нерабочей фазе нужно создавать настолько малым, насколько это возможно для исключения создания отрицательного момента и звуковых эффектов, но достаточным для корректного вычисления потокосцепления. Рабочая же фаза включается на весь интервал проводимости с постоянным током, определяемым уровнем нагрузки на валу двигателя, то есть алгоритм прерывания тока для нее не используется, что исключает звуковые эффекты при большом уровне тока.

Рассмотрим способы реализации предложенной идеи (см. рис.6). Будем считать, что в данный момент времени рабочей (создающей момент машины) фазой является фаза В, а угловое положение ротора соответствует нулю электрических градусов. Фаза А при этом будет использоваться для определения углового положения вала ротора. Очевидно, что каждая из фаз может быть рабочей в зоне, в которой фаза создает положительный момент.

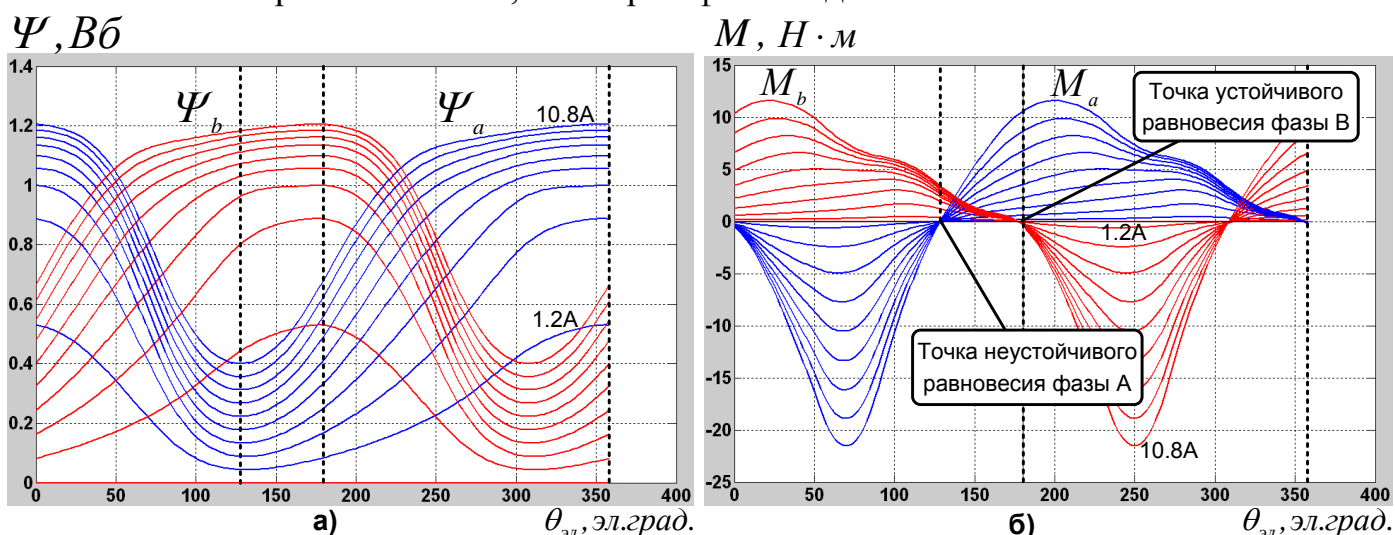


Рис.6. Семейство характеристик ДВИ1.1У(6/3) в зависимости от углового положения вала ротора:

- а) семейство зависимостей потокосцеплений фаз А и В для различных токов;**
б) семейство зависимостей моментов фаз А и В для различных токов.

Таким образом, для наших начальных условий, фаза В может быть рабочей вплоть до 180 электрических градусов (точка устойчивого равновесия для фазы В), фаза А же может стать рабочей не раньше, чем угол достигнет 130 электрических градусов (точка неустойчивого равновесия для фазы А).

Очевидно, что точка переключения с фазы В на А должна находиться между точкой неустойчивого равновесия фазы А и точкой устойчивого равновесия фазы В. В нашем случае одна фаза всегда используется для

определения углового положения вала ротора, а другая является рабочей (создающей момент машины) фазой, поэтому очевидно, что фазы не могут перекрываться, т.е. интервал проводимости фаз должен быть равен 180 электрическим градусам. Что же касается точки переключения с фазы В на А, то, с одной стороны, она не должна быть близко к точке неустойчивого равновесия фазы А, т.к. при небольшой погрешности в определении углового положения вала ротора имеется возможность включить фазу А в зоне, где ее момент еще отрицательный. При движении на низкой скорости это может привести к изменению направления движения вала ротора, что недопустимо. С другой стороны, точка переключения не должна располагаться близко к точке устойчивого равновесия фазы В, т.к. 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-и электрическим градусам.

Определившись с интервалом проводимости фаз и желательной точкой переключения фаз (точкой синхронизации), перейдем к рассмотрению 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-и электрических градусов (точка переключения). На данном интервале потокосцепление фазы А сначала уменьшается, достигая минимума в точке рассогласованного положения (соответствует точке неустойчивого равновесия), а затем потокосцепление начинает возрастать, что обеспечивает возможность получения положительного момента фазой.

Характерными точками в зависимости потокосцепления на данном интервале является точка минимума и точка, соответствующая согласованному положению фазы В. На основе этих двух точек можно реализовать определение желаемой точки переключения фаз, соответствующей середине зоны перекрытия. Однако отслеживать минимум и желаемую точку переключения целесообразно вовсе не по потокосцеплению. Это связано с тем, что величина потокосцепления зависит от уровня тока фазы. И даже если регулятору тока задана постоянная уставка на ток, на самом деле ток не постоянен, т.к. имеются пульсации – в момент включения ключей ток растет, в момент выключения спадает и т.д. Кроме того, в точке минимума потокосцепления индуктивность фазы минимальна и составляет для машин ДВИ1.1У(6/3) порядка 30 мГн (см. рис.7). Следует отметить, что для поддержания токов фаз двигателя используются релейные регуляторы тока с частотой дискретизации 40кГц (предельная частота коммутации ключей 20кГц).

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

$$\Delta i_{\max}^{\text{ДВИ1.1Y(6/3)}} = \frac{U_{dc} \cdot \Delta t}{L_{\min}^{\text{ДВИ1.1Y(6/3)}}} = \frac{540 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-3}} = 0.45 \text{ A} \quad (8),$$

что существенно. Другими словами, пульсаций в токе, а, соответственно, и вычисляемом потокосцеплении не избежать.

При наличии пульсаций в токе 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). В таких условиях, чтобы излишне не усложнять алгоритмы бездатчикового управления целесообразно перейти от измерения потокосцепления фазы к измерению индуктивности – см. рис.7.

Как видно из рисунка, почти на всем электрическом периоде 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 фазы, что очень удобно использовать в нашем случае, т.к. пульсации в токе фазы и вычисляемом потокосцеплении не важны – индуктивность фазы будет зависеть только от углового положения вала ротора, что создает необходимые условия для организации простой и качественной работы алгоритма наблюдателя.

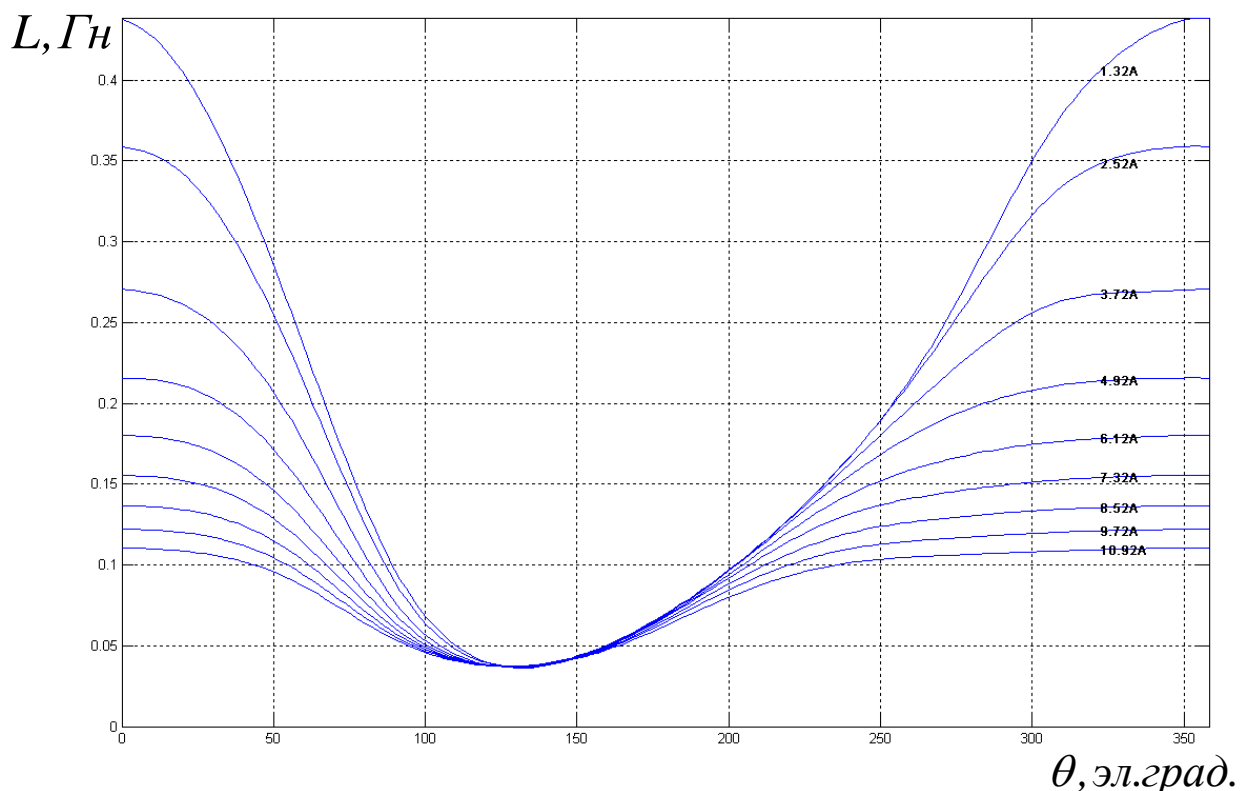


Рис.7. Зависимость индуктивности фазы А от углового положения вала ротора для различных токов фазы (ДВИ1.1Y(6/3))

Тогда алгоритм работы наблюдателя в зоне низких скоростей заключается в следующем:

- Для каждой из фаз двигателя, с помощью предпусковой идентификации параметров определяются следующие параметры:
 - L_{a_min} — минимальная индуктивность фазы А;
 - L_{b_min} — минимальная индуктивность фазы В;
 - $L_a^{согл.полож.В}$ — индуктивность фазы А в точке согласованного положения фазы В;
 - $L_b^{согл.полож.А}$ — индуктивность фазы В в точке согласованного положения фазы А.
- На основе определенных параметров вычисляются два коэффициента (см. рис.8):

$$○ K_{\frac{L_{a_синхр.}}{L_{a_min}}} = \frac{(L_a^{согл.полож.В} - L_{a_min}) \cdot 0.5 + L_{a_min}}{L_{a_min}} \quad (9) -$$

коэффициент отношения индуктивности фазы А в желаемой точке переключения (точке синхронизации) к минимальной индуктивности фазы А. Желаемая точка переключения находится примерно посередине между точкой неустойчивого равновесия фазы А и точкой устойчивого равновесия фазы В.

$$○ K_{\frac{L_{b_синхр.}}{L_{b_min}}} = \frac{(L_b^{согл.полож.А} - L_{b_min}) \cdot 0.5 + L_{b_min}}{L_{b_min}} \quad (10) -$$

коэффициент отношения индуктивности фазы В в желаемой точке переключения (точке синхронизации) к минимальной индуктивности фазы В. Желаемая точка переключения находится примерно посередине между точкой неустойчивого равновесия фазы В и точкой устойчивого равновесия фазы А.

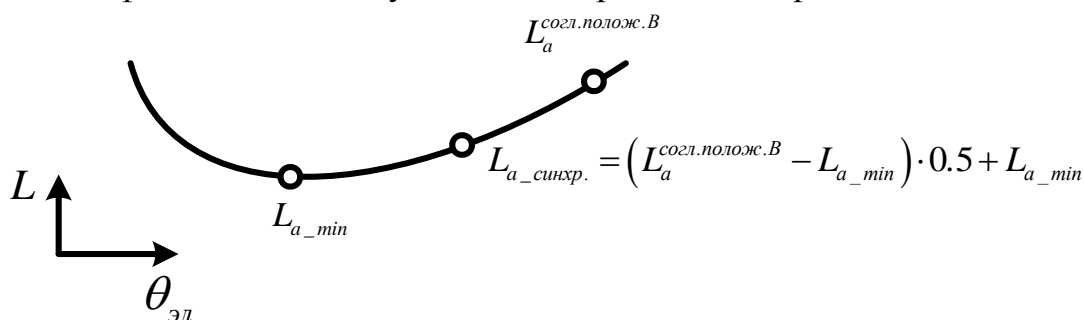


Рис.8. К определению точки синхронизации

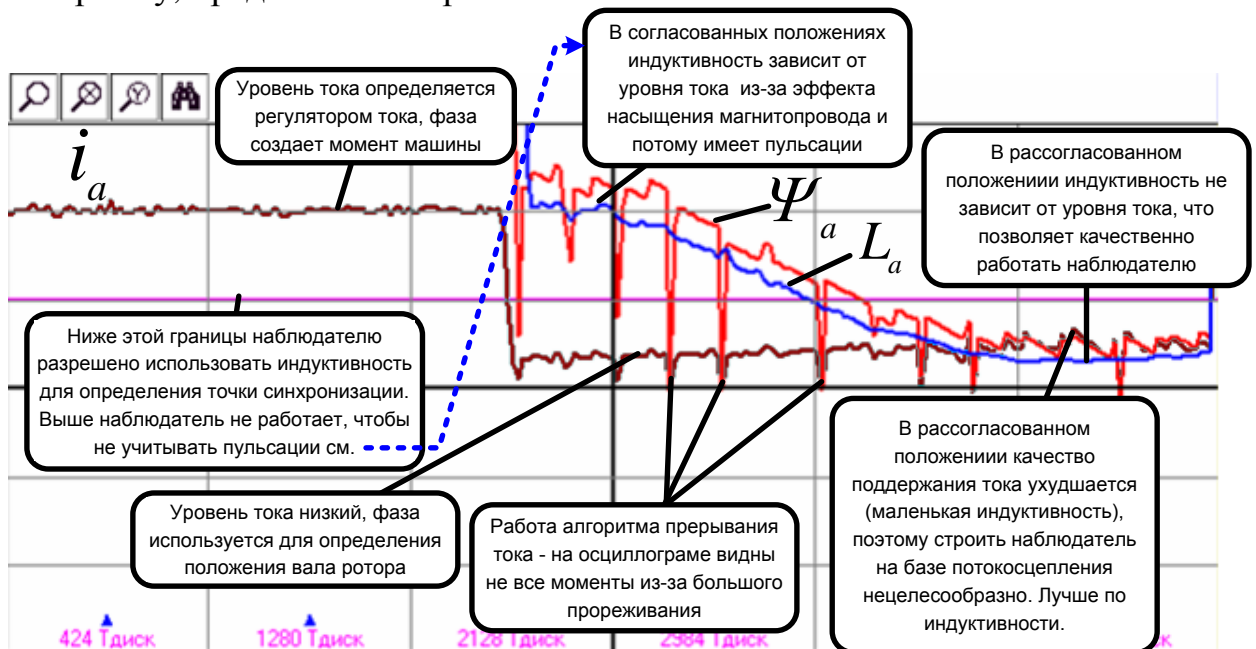
- В каждый момент времени одна фаза двигателя является рабочей фазой (создающей момент машины), по другой фазе определяется момент переключения фаз (точка синхронизации).
- В рабочей фазе ток постоянный и определяется выходом регулятора скорости.

- В нерабочей (измерительной) фазе создается малый уровень тока и используется алгоритм прерывания тока для минимизации ошибки при вычислении потокосцепления фазы. На основе тока фазы и вычисленного потокосцепления фазы в каждый момент времени определяется индуктивность фазы. В процессе работы измерительной фазы ищется минимальное значение индуктивности. После того как минимум индуктивности пройден, ожидается выполнение условия:

$$L_{текущ.} \geq L_{min} \cdot K \cdot \frac{L_{сизкр.}}{L_{min}} \quad (11).$$

Момент выполнения условия (11) является очередной точкой синхронизации — обновляется угловое положение вала ротора, происходит переключение фаз.

Пример работы наблюдателя, реализованного по предложенному алгоритму, представлен на рис.9.



а)



б)

Рис.9. Осциллограммы работы наблюдателя в диапазоне низких скоростей:

- а) работа наблюдателя в малом;**
б) работа наблюдателя в большом.

Для обеспечения правильной инициализации при запуске двигателя система управления обязательно проходит процедуру пуска двигателя. Заключается она в следующем: при пуске двигателя одна из фаз двигателя ставится под ток, гарантированно обеспечивающий возврат ротора в точку согласованного положения. Таким образом, уже перед началом работы наблюдателя известно в каком положении находится вал ротора. Это позволяет правильно инициализировать наблюдатель — задать ему отправную точку. В последующем наблюдатель уже не теряет положение вала двигателя и позволяет корректно работать на низких и даже нулевых скоростях.

Результаты

1. Разработанная система является системой с переключаемой структурой управления — используются различные алгоритмы управления для работы в зоне низких и высоких скоростей:
 - 1.1. Алгоритм работы на низких и нулевых скоростях, основанный на наблюдении индуктивности нерабочей фазы, обеспечивает качественное бездатчиковое управление двигателем с интервалом проводимости фаз в 180 электрических градусов. Наблюдатель устойчиво работает вплоть до нулевых скоростей, что обеспечено специальным алгоритмом прерывания измерительного тока для минимизации погрешности прямого интегрирования потокосцепления фазы. Реализованный алгоритм обеспечивает

бездатчиковое управление в диапазоне 0÷700 об/мин (верхняя граница обусловлена тем, что коммутация фаз с интервалом проводимости в 180 электрических градусов и нулевыми углами коммутации становится нецелесообразной).

- 1.2. Алгоритм работы на высоких скоростях, основанный на наблюдении потокосцепления рабочей фазы, обеспечивает качественное бездатчиковое управление двигателем с оптимальными углами коммутации фаз двигателя. Возможность управления с оптимальными углами коммутации обусловлена применением специального алгоритма, сдвигающего точку синхронизации наблюдателя к центру интервала проводимости, а также применением алгоритма автоматического поиска оптимальных углов коммутации. Реализованный алгоритм обеспечивает бездатчиковое управление в диапазоне 300÷6000 об/мин (верхняя граница обусловлена ограничением по подшипникам).
- 1.3. Переключение между алгоритмом низких и высоких скоростей осуществляется с гистерезисом для исключения возможности дребезга алгоритмов — переход из алгоритма низких скоростей в алгоритм высоких скоростей осуществляется при 500 об/мин. Переход из алгоритма высоких скоростей в алгоритм низких скоростей осуществляется при 300 об/мин.
2. Разработка алгоритмов бездатчикового управления с учетом возможностей преобразователя частоты по автоматической идентификации параметров, необходимых для работы наблюдателя, позволила полностью снять с наладчика необходимость в продолжительной и сложной настройке алгоритмов БУ.
3. Разработанная система бездатчикового управления прошла полноценные испытания, как в лабораторных условиях, так и в условиях ЦТП и подтвердила свою работоспособность. Система БУ 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 2.2кВт. По состоянию на март 2011 года, в промышленную эксплуатацию на ЦТП города Москвы внедрено 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. Сорокин А.В., Фисенко В.Г.** Двухфазный вентильно-индукторный электропривод насосов горячего водоснабжения. – Труды XII-Международной конференции Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты, г.Алушта – 2008г.,
5. **Жарков А.А.** Разработка и исследование вентильно-индукторного электропривода с независимым возбуждением и микроконтроллерным управлением: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: 2007.
6. **C. Schauder** Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers, IEEE, 1992.
7. **C. –W. Park, W. –H. Kwon** Simple and robust speed sensorless vector control of induction motor using stator current based MRAC, Electric Power Systems Research №71, 2004.

[15.05.2011]

Автор: Алямкин Дмитрий Иванович окончил в 2007 г.кафедру АЭП МЭИ(ТУ). Аспирант кафедры. С 2005 г. сотрудник ООО "НПФ Вектор" (инженер-программист).

Тел.: +7-495-362-7151

e-mail: aliamkin@rambler.ru