

## Реализация релейно-векторного принципа управления в асинхронном электроприводе при непосредственном измерении параметров магнитного поля

А.П. Шатков, асп.

Приведено описание реализации релейно-векторного принципа управления в асинхронном электроприводе при непосредственном измерении параметров магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором электродвигателя. Электропривод позволяет обеспечить высокое качество регулирования, надежность и инвариантность к возмущающему воздействию.

*Ключевые слова:* преобразователь частоты, асинхронный двигатель, непосредственное управление моментом, измерение магнитного поля, датчик Холла.

## Implementation of Relay-Vector Control Principle in Asynchronous Drive with Immediate Measurement of Magnetic Field Parameters

A.P. Shatkov, Post Graduate Student

The author suggests the description of the relay-vector control principle in asynchronous drive with immediate measurement of the magnetic field parameters in the air gap between stator and rotor of the induction motor. The electric drive provides high quality control, reliability and invariance to perturbation action.

*Key words:* frequency converter, induction motor, direct torque control, measurement of magnetic field, Hall sensor.

Момент на валу электрической машины (электродвигателя) образуется благодаря силе, действующей на роторные проводники с током со стороны магнитного поля, создаваемого статором. Следовательно, для точного задания момента в электроприводе требуется измерение величин тока (статора или ротора) и магнитного поля в зазоре машины. Однако в современных системах управления электроприводом характеристики магнитного поля в явном виде отсутствуют, а вычисляются лишь косвенными методами при известных параметрах электромагнитического преобразователя и измеряемых величинах токов и напряжений. В то же время следует учитывать, что значения некоторых параметров нестабильны во время работы электрической машины. Например, существенно могут «плавать» активные сопротивления статора и ротора при нагреве машины. В связи с этим актуальной является задача разработки высококачественной системы управления электроприводом, обеспечивающей стабильную работу независимо от условий эксплуатации.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя (АД) можно напрямую получить, измерив ток статора и магнитное поле в зазоре машины [4]. В векторной форме выражение для момента будет иметь вид

$$M_D = \frac{3}{2} p_n [\bar{I}_S \times \bar{\Psi}'_m], \quad (1)$$

где  $\bar{I}_S$  – вектор тока статора;  $\bar{\Psi}'_m$  – сопряженный вектор потокосцепления в воздушном зазоре;  $p_n$  – количество пар полюсов машины.

Вектор тока статора электрической машины традиционно измеряется с помощью датчиков тока, включенных в фазы двигателя. Потокосцепление в зазоре в современных электроприводах не измеряется, хотя существует прак-

тическая возможность получения информации о магнитном поле с помощью датчиков Холла.

На современном рынке имеется большое количество различных датчиков Холла с аналоговым выходом. Датчики Холла общего назначения покрывают диапазон измерения индукции 0,01–2 Тл. Также существует множество датчиков Холла специальной конструкции, наибольший интерес из которых представляют пленочные датчики [2]. Пленочные датчики Холла при подборе слюды соответствующего качества и дополнительной ее обработке можно получать толщиной до 50 мкм. Эластичность таких датчиков позволяет использовать их при стационарном закреплении (например, приклеивкой) в искривленных зазорах.

На рис. 1 показаны способы крепления датчиков магнитного поля на зубцах статора асинхронной машины. Надежный вариант крепления пленочного датчика изображен на рис. 1,а. Сам датчик крепится в торцевой части зубца, а его чувствительная пленка приклеивается на верхнюю поверхность. Таким образом, в воздушном зазоре между статором и ротором электродвигателя находится только пленочная часть датчика, а пластиковый корпус дифференциального усилителя сигнала с внешними выводами под пайку находится снаружи.

В большинстве серийно выпускаемых двигателей возможно установить специализированные пленочные датчики Холла с толщиной пленки до 200 мкм. Датчики магнитного поля общепромышленного назначения в пластиковых корпусах оказываются слишком крупными, чтобы поместить их в зазор. Однако можно предложить альтернативные способы установки пластиковых датчиков. Один из таких способов изображен на рис. 1,б. В данном случае датчик устанавливается в специально выфре-

зерованную полость на зубце статора. Полость фрезеруется на глубину, равную толщине корпуса датчика Холла (1–2 мм). Датчик, как правило, приклеивается эпоксидной смолой. Так как величина магнитной индукции обратно пропорциональна величине воздушного зазора, то значения, снимаемые с датчика, будут меньше действительного значения рабочей магнитной индукции в зазоре. Поэтому сигнал с датчика необходимо умножить на поправочный коэффициент, равный отношению величин воздушного зазора в зоне датчика и рабочего зазора. При установке датчика Холла в выфрезерованную полость необходимо также учитывать искажение магнитного поля в зоне кромки, где утолщается воздушный зазор. Как известно, линии магнитной индукции выходят из материала с большой магнитной проницаемостью перпендикулярно поверхности. Поэтому если расположить датчик слишком близко к этой кромке, то линии магнитной индукции не будут пронизывать элемент Холла под прямым углом, что повлечет искажения показаний датчика.

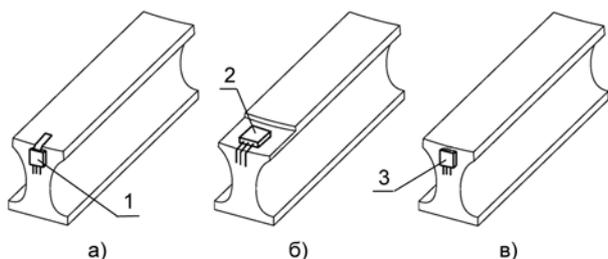


Рис. 1. Способы установки датчика на зубце статора: 1 – пленочный датчик; 2 – пластиковый датчик в специальной полости; 3 – пластиковый датчик в лобовой зоне

Другой вариант установки датчика Холла в двигателе показан на рис. 1, в. В этом случае датчик приклеивается к торцевой части зубца статора. К преимуществам такого способа установки датчика можно отнести простоту и надежность крепления, а также отсутствие паразитного влияния пазов ротора на сигнал магнитного поля. Однако существенным недостатком способа является сложность калибровки датчика, так как производится измерение поля рассеяния в лобовой зоне машины, а не рабочего магнитного поля в воздушном зазоре.

Датчики Холла позволяют осуществить точную фиксацию положения волны магнитного поля в зазоре машины относительно системы координат, неподвижной по отношению к статору. Сигналы, получаемые с датчиков, соответствуют значению магнитного поля в данный момент в месте установки датчиков. Для того чтобы получить текущие координаты вектора рабочего потокосцепления, необходимо расположить два датчика Холла на зубцах статора электрической машины.

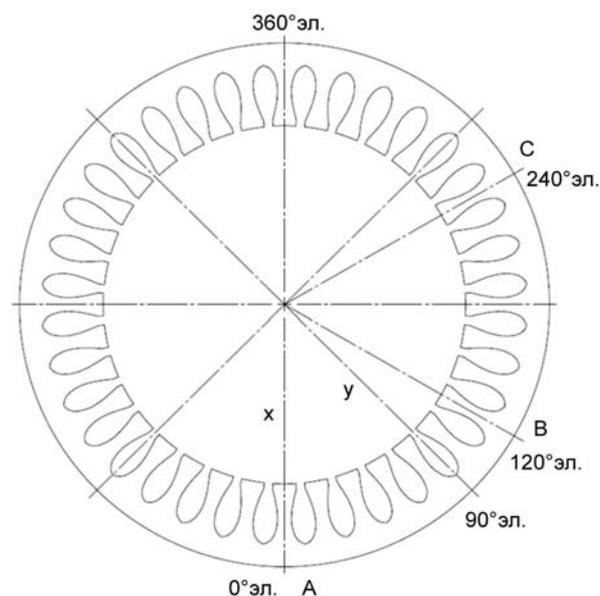


Рис. 2. Разрез статора асинхронного двигателя

В соответствии с выбором декартовой системы координат ( $x, y$ ), один из датчиков необходимо устанавливать на магнитной оси фазы А, совпадающей с осью  $x$  (рис. 2). Второй датчик теоретически необходимо установить на оси, сдвинутой по отношению к  $x$  на угол  $\pi/2$ , однако практически это осуществить трудно, так как магнитная ось фазы А совпадает с серединой зубца статора, а ось  $y$  обычно оказывается расположенной на раскрытии паза. Поэтому альтернативным вариантом [4] является установка второго датчика Холла на магнитной оси фазы В (фазовый сдвиг между напряжением датчиков  $2\pi/3$ ).

При измерении магнитного поля машины мощность электродвигателя не имеет решающего значения. Дело в том, что в подавляющем большинстве электрических машин номинальное значение индукции в воздушном зазоре находится в пределах 0,6–1 Тл. Такой диапазон обуславливается характеристикой намагничивания электротехнической стали, применяемой при изготовлении электродвигателей. Максимальное значение индукции магнитного поля в зазоре ограничивается насыщением электротехнической стали и составляет около 2,3 Тл.

На базе лаборатории кафедры УВС Вологодского Государственного Технического Университета нами был проведен ряд экспериментов по измерению магнитного поля в воздушном зазоре промышленных электродвигателей типа АОЛ2-31-2У3 (3 кВт). В качестве первичных преобразователей применялись датчики SS49E фирмы Honeywell, расположенные на осях фаз А и В под углом 120°эл. (рис. 2).

В одном из двигателей был опробован вариант установки датчиков Холла, изображенный на рис. 1, б. Двигатель питался напрямую от трехфазной сети переменного тока. На рис. 3 представлены экспериментальные данные с датчиков, обработанные платой сбора данных

L-Card L-783. С помощью программного обеспечения L-Graph в режиме реального времени производилось преобразование сигналов из системы координат [A, B] в систему координат [x, y]. На рис. 3 отчетливо видно, что преобразованные сигналы с датчиков расходятся по фазе на  $90^\circ$ эл. Перенеся сигналы с датчиков на декартову систему координат, получим траекторию движения вектора индукции магнитного поля (рис. 4). Следует отметить, что траектория вектора несколько отклоняется от расчетной. Это связано с влиянием пазов ротора на магнитное поле [4].

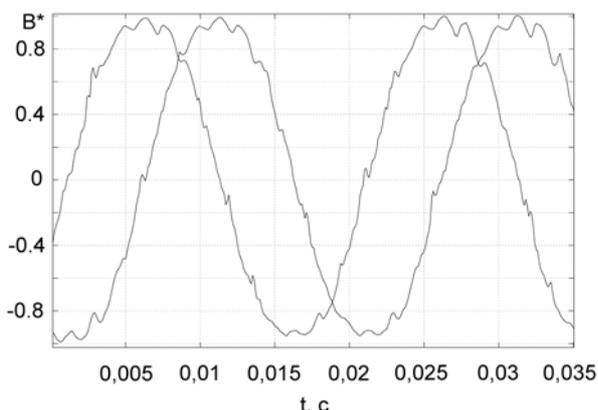


Рис. 3. Данные с датчиков магнитного поля, установленных на зубцах статора (система координат [x, y])

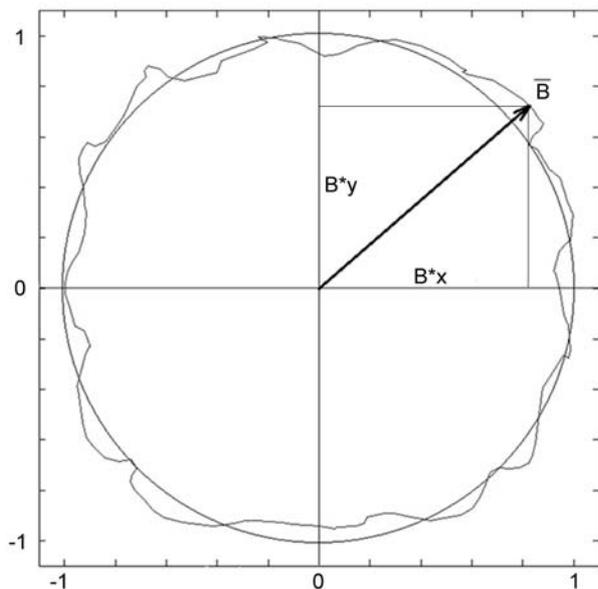


Рис. 4. Траектория вектора магнитной индукции в воздушном зазоре

Во втором двигателе датчики были установлены способом, изображенным на рис. 1,в. Эксперимент был повторен при тех же самых условиях. Отличие лишь в том, что в данном случае не производился переход из системы координат [A, B] в систему координат [x, y]. Данные с датчиков магнитного поля представлены на рис. 5.

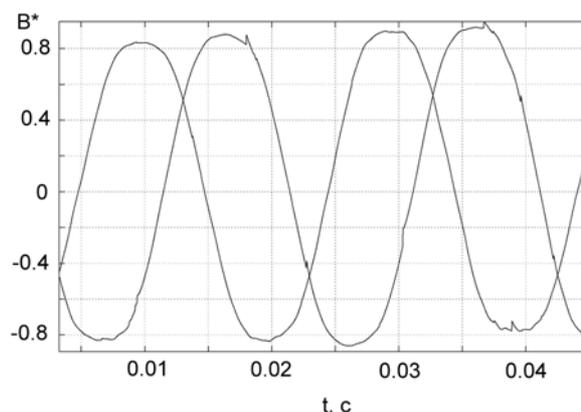


Рис. 5. Данные с датчиков магнитного поля, установленных в торцевой части зубцов статора (система координат [A, B])

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что сигналы с датчиков расходятся по фазе на угол  $120^\circ$ эл. Также легко заметить, что при установке датчиков Холла в торцевой части зубцов статора сводятся к минимуму пульсации от пазов ротора. Именно это преимущество, а также простота крепления датчиков обусловили выбор установки датчиков в торцевой части зубцов (рис. 1,в) при реализации электропривода с релейно-векторным управлением и измерением магнитного поля.

Канал измерения рабочего магнитного поля электрической машины является самым информативным в замкнутом электроприводе. В связи с этим актуальной является задача разработки системы управления электроприводом на основе измерения магнитного поля с использованием современных достижений в области электропривода.

На сегодняшний день одной из самых передовых систем управления в асинхронном электроприводе является непосредственное управление моментом (Direct Torque Control – DTC) [3]. Непосредственное управление моментом является продолжением и развитием векторного подхода к построению систем управления асинхронным двигателем. Задачей непосредственного управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента двигателя на управляющее воздействие. В отличие от векторного управления, где изменение момента производится путем воздействия на ток статора, который, таким образом, является управляемой величиной, в системе с непосредственным управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. Изменение потокосцепления достигается путем оптимального переключения ключей инвертора напряжения, от которого питается асинхронный двигатель.

Блок-схема предлагаемой системы управления электроприводом переменного тока с непосредственным разрывным управлением моментом на основе измерения магнитного поля машины представлена на рис. 6. Такой привод обрабатывает стопроцентный скачок зада-

ния момента за 1–2 мс, обеспечивает точное регулирование момента при низких частотах, включая и нулевую скорость. При использовании датчика скорости система управления дает достаточно высокую точность поддержания скорости, которая обуславливается принципом прямого управления моментом [3].

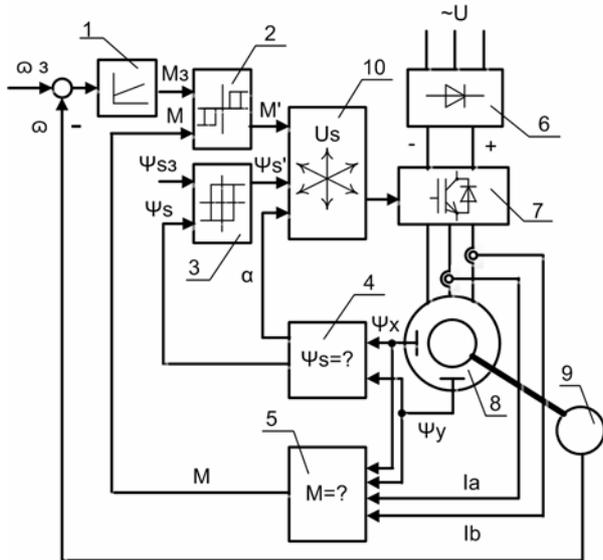


Рис. 6. Структурная схема электропривода с непосредственным управлением моментом на основе измерения магнитного поля машины: 1 – ПИ-регулятор; 2 – регулятор момента; 3 – регулятор потокосцепления статора; 4 – вычислитель потокосцепления статора; 5 – вычислитель момента; 6 – неуправляемый выпрямитель; 7 – автономный инвертор напряжения; 8 – асинхронная машина; 9 – датчик скорости; 10 – таблица оптимальных переключений ключей

Все устройства, показанные на рис. 6, реализуются микропроцессорными средствами. С учетом динамических характеристик звена регулирования момента регулятор скорости в общем случае должен синтезироваться как ПИД-регулятор, за счет чего достигается высокое быстродействие по контуру скорости и статическая точность регулирования.

Основной алгоритм работы системы – непосредственное управление моментом (DTC) [3]. В такой системе управления для повышения быстродействия используются гистерезисные регуляторы момента и модуля потокосцепления, в которых на каждом шаге вычислений сравниваются заданные значения с вычисленными, а полученные логические сигналы выдаются на блок выбора оптимального вектора напряжения. Разделение каналов регулирования скорости и потокосцепления достигается за счет выбора такого состояния инвертора, которое вызывает изменение как момента, так и потокосцепления в необходимом направлении. Таким образом, промежуточные контуры регулирования проекций тока статора в системе регулирования и широтно-импульсный модулятор в системе управления инвертором в данном случае отсутствуют. Основные характеристики системы DTC, позволяющие судить о ее высоком быстродействии, а также общие принципы

ее построения приведены в [1, 3]. Наиболее сложной задачей, затрудняющей разработку систем DTC, является получение текущих значений потокосцепления, момента и частоты вращения ротора при отсутствии датчиков на валу двигателя. В силу специфики данной системы традиционные методы вычисления параметров асинхронного двигателя в этом случае неприменимы.

Основной задачей при построении классического непосредственного управления моментом [3] является определение текущего значения вектора потокосцепления статора двигателя. Существующие методы определения потокосцепления статора основываются на интегрировании вектора электродвижущей силы (ЭДС) статора, т.е. разности векторов подаваемого на статор напряжения  $\bar{U}_S$  и вектора напряжения активных потерь в обмотке статора  $r_S \bar{I}_S$ . При этом датчиками в силовой части электропривода необходимо измерять текущие значения токов и напряжений фаз двигателя:

$$\bar{\Psi}_S = \int (\bar{U}_S - r_S \bar{I}_S) dt . \quad (2)$$

Однако при таком определении потокосцепления необходимо учитывать следующее:

- изменения при нагреве сопротивления обмоток статора;
- низкочастотный дрейф интегратора, не охваченного обратной связью [1].

Проблема, связанная с изменением сопротивления обмотки статора при нагреве, в современных асинхронных электроприводах решается корректировкой значения  $R_S$  в зависимости от температуры с применением достаточно сложной тепловой модели электродвигателя.

Отсутствие накапливающейся ошибки интегрирования при определении потокосцепления статора обеспечивается за счет применения фильтра низких частот в цепи интегратора. Но и при этом в области низких частот рассчитанное значение потокосцепления практически полностью перестает соответствовать действительному значению. В этом случае в области низких частот рассчитанное значение потокосцепления статора заменяют задающей величиной [1] или используют более сложные методы оценки потокосцепления.

Кардинальным решением двух этих проблем сразу является измерение магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором электродвигателя при помощи датчиков Холла. Таким образом, оценив вектор потокосцепления в воздушном зазоре  $\bar{\Psi}_m$ , измерив ток статора  $\bar{I}_S$  и зная стабильные параметры двигателя (индуктивность цепи статора  $L_S$  и взаимоиндуктивность цепей статора и ротора  $L_m$ ), текущее значение потокосцепления статора можно вычислить по уравнению [1]

$$\bar{\Psi}_S = \bar{\Psi}_m + \bar{\Psi}_{S\sigma} = \bar{\Psi}_m + (L_S - L_m)\bar{I}_S = \bar{\Psi}_m + L_{S\sigma}\bar{I}_S, \quad (3)$$

где  $\bar{\Psi}_{S\sigma}$  – потокосцепление рассеяния статора;  
 $L_{S\sigma}$  – индуктивность рассеяния статора.

Момент электродвигателя можно оценить по выражению (1) через векторное произведение вектора тока статора и сопряженного вектора потокосцепления в зазоре двигателя. В неподвижной системе координат  $[x, y]$  уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$M_D = \frac{3}{2} p_{\Pi} (I_{Sx} \Psi_{my} - I_{Sy} \Psi_{mx}), \quad (4)$$

где  $I_{Sx}, I_{Sy}$  – проекции вектора тока статора на оси координат  $x, y$ ;  $\Psi_{mx}, \Psi_{my}$  – проекции вектора потокосцепления в зазоре на оси координат  $x, y$ .

При измерении потокосцепления в зазоре машины с помощью двух датчиков магнитного поля, один из которых расположен на оси фазы А, а второй сдвинут относительно фазы А на  $90^\circ$  эл., составляющие  $\Psi_{mx}, \Psi_{my}$  пропорциональны соответствующим сигналам с датчиков. В случае расположения датчиков на осях фаз А и В под углом  $120^\circ$  эл. необходимо предварительно выполнить преобразование координат от  $[A, B]$  к  $[x, y]$ .

Для определения вектора тока статора также достаточно двух датчиков тока, расположенных в двух любых фазах статора электродвигателя. Тогда, согласно преобразованию Кларка [1], координаты вектора тока статора вычисляются по следующим формулам:

$$I_{Sx} = I_A;$$

$$I_{Sy} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_A + \frac{2}{\sqrt{3}} I_B, \quad (5)$$

где  $I_A, I_B$  – сигналы с датчиков тока, расположенных в фазах А и В соответственно.

Математическая модель электропривода с непосредственным управлением моментом и измерением рабочего магнитного поля в зазоре машины, разработанная в среде MATLAB & Simulink, дает возможность выполнить анализ характеристик привода в различных условиях. По аналогии с рис. 6 с помощью компонентов библиотеки SimPowerSystems была реализована структурная схема электропривода в Simulink. Модель электродвигателя представлена компонентом Asynchronous Machine, автономный инвертор напряжения представлен блоком IGBT Bridge.

В отличие от реального электропривода в модели присутствуют следующие допущения:

- электродвигатель представлен классической математической моделью на основе схемы замещения [1];
- снабберные конденсаторы инвертора обладают бесконечной емкостью;
- отсутствует падение напряжения на транзисторах и диодах инвертора;

- время включения ключа инвертора 1 мкс, время выключения 2 мкс;
- каналы измерения идеальные и не содержат помех;
- в канале измерения потокосцепления отсутствуют высокочастотные зубцовые помехи и низкочастотные помехи, связанные с обмоточными данными [4];
- изменение температуры двигателя сказывается только на активных сопротивлениях статора и ротора в соответствии со свойствами меди и алюминия;
- период дискретизации модели 10 мкс.

На рис. 7 изображены переходные процессы по электромагнитному моменту (М) и скорости (n) при набросе номинальной нагрузки (27 Н·м) на вал двигателя. Температура двигателя в данном случае составляет  $20^\circ\text{C}$ . Время реакции электропривода по моменту составляет 1,6 мс. При таком быстродействии в контуре момента скорость вала двигателя не успевает существенно измениться в течение переходного процесса. Максимальное отклонение скорости составляет 1 об/мин.

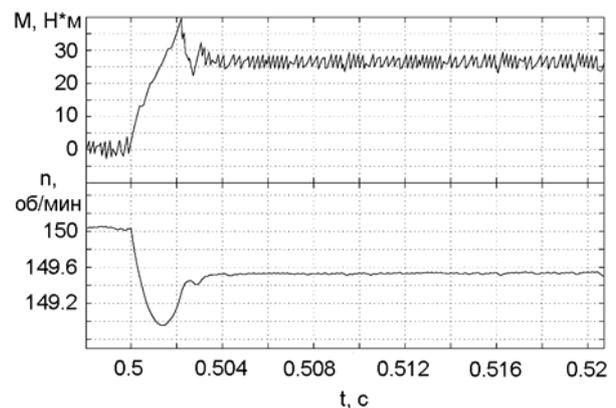


Рис. 7. Переходные процессы при температуре  $20^\circ\text{C}$

На рис. 8 представлены те же переходные процессы после нагрева двигателя до рабочей температуры  $70^\circ\text{C}$ . Характеристики привода с непосредственным измерением магнитного потока в целом остаются стабильными, в то время как при косвенном определении вектора  $\bar{\Psi}_S$  без применения специальных средств адаптации температурный дрейф параметров машины может привести к существенному ухудшению качества регулирования электропривода.

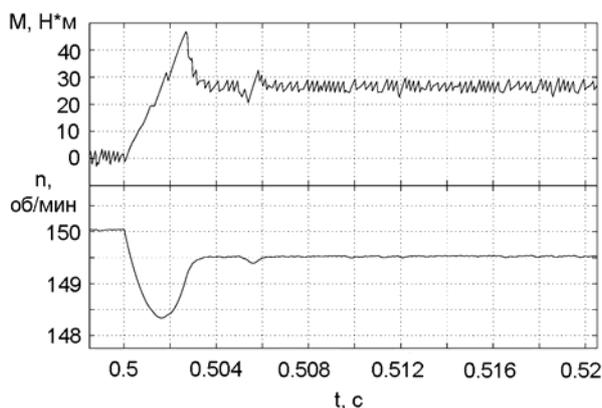


Рис. 8. Переходные процессы при температуре 70 °С

### Заключение

Благодаря использованию разрывного управления электромагнитным моментом и потокосцеплением, а также непосредственному измерению величины потокосцепления в зазоре и последующему простому вычислению моментобразующих векторов, разработанный электропривод имеет сравнительно простую структуру. Минимальное число выполняемых математических операций и отсутствие преобразования координат позволяют реализовывать полученную структуру системы управления даже в недорогих (low-cost) цифровых сигнальных процессорах.

Результаты моделирования показали, что система непосредственного управления моментом на основе измерения магнитного поля машины устойчива к колебаниям температуры электродвигателя в очень широком диапазоне, так как в вычислениях не используются параметры, подверженные температурному дрейфу. Следовательно, в таком электроприводе отпадает необходимость использования систем адаптации к изменению температуры двигателя, что также упрощает структуру привода по сравнению с современными аналогами.

При определении магнитного потока, а следовательно, и момента в системе управления отсутствует накапливающаяся ошибка интегрирования.

Непосредственное управление моментом обеспечивает сверхвысокую реакцию на управ-

ляющее и возмущающее воздействия. При моделировании было установлено, что электропривод оказывается не только инвариантным к колебаниям температуры, но и квазиинвариантным к возмущающему воздействию (моменту нагрузки). Так как переходные процессы по управлению электромагнитным моментом длятся не более 1–2 мс, то скорость электропривода не успевает существенно изменить свое значение. Следует отметить, что такие быстрые переходные процессы по электромагнитному моменту не вызывают каких бы то ни было перегрузок электрической машины.

Моделирование показало высокую эффективность системы управления приводом во всем диапазоне частот вращения магнитного поля, включая нулевую. Система оказывается работоспособной даже при значительной погрешности определения вектора потокосцепления в воздушном зазоре, что лишнее подтверждает надежность электропривода.

Малая зависимость рабочей индукции от мощности машины обуславливает еще одно преимущество электропривода с измерением магнитного поля. Для измерения индукции магнитного поля в пределах 0,6–1 Тл можно использовать один тип датчиков и применять их в приводах любой мощности.

Перечисленные достоинства разработанного привода способствуют внедрению его в транспорт и другие сферы промышленности, где электрооборудование должно сохранять свои высокие показатели качества даже при тяжелых условиях эксплуатации.

### Список литературы

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. – М.: Академия, 2006. – 267 с.
2. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магнито-резисторы: пер. с польск. В.И. Тихонова и К.Б. Макидонской / под ред. О.К. Хомерики. – М.: Энергия, 1971. – 352 с.
3. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: Санкт-Петербургская Электротехническая Компания, 2004. – 127 с.
4. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.

Шатков Александр Петрович,  
Вологодский государственный технический университет,  
аспирант кафедры управляющих и вычислительных систем,  
e-mail: a-shatkov@mail.ru