

ЗАДАЧИ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И ВАРИАНТ ИХ РЕШЕНИЯ

Опубликовано: Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – №1(6).

Панкратов В.В., Маслов М.О.

В статье обсуждаются "классические" задачи построения алгоритмов вычисления оценок неизмеряемых координат состояния для систем общепромышленного асинхронного электропривода с векторным управлением, а также актуальные проблемы синтеза алгоритмов предварительной и текущей идентификации существенно изменяющихся параметров асинхронного двигателя. Подробно рассмотрен один из вариантов реализации этих алгоритмов в классе адаптивных систем с задающей моделью и наблюдателями полного порядка.

ВВЕДЕНИЕ

Известные преимущества асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) – простота конструкции ротора, не содержащей скользящих контактов и постоянных магнитов, вследствие этого – технологичность, низкая цена и высокая надёжность, а также минимальная требовательность к обслуживанию – обусловили широкое распространение АД во всех без исключения отраслях промышленности, в коммунальном хозяйстве, системах вентилирования, спецтехнике. Однако до сих пор подавляющее большинство асинхронных электроприводов (АЭП) общепромышленных механизмов являются нерегулируемыми или оснащены малоэффективными как с энергетической, так и с технологической точки зрения системами управления. Между тем, в применении современных методов управления АЭП кроется огромный потенциал ресурсо- и энергосбережения, а также главный путь совершенствования их потребительских характеристик и характеристик тех механизмов, которые они приводят в действие.

При разработке любой системы автоматического управления, в частности АЭП, необходимо, прежде всего, составить математическую модель объекта управления проектируемой системы. И здесь сразу становится очевидна особенность АД, длительное время мешавшая построению на его базе высокоэффективных систем регулируемого электропривода и вызванная тем, что у асинхронного двигателя как индукционной электрической машины токи статора содержат в себе и намагничивающую составляющую – ток индуктора, отвечающий за магнитный поток, и моментобразующую составляющую, трансформируемую в ротор (якорь). Автономизировать (обособить) каналы воздействия на магнитный поток и электромагнитный момент АД, а вслед за ним – на другие координаты механического движения электропривода – скорость и положение, тем самым максимально раскрывая преимущества АЭП, позволяет принцип векторного управления [1]. На его основе становится возможным решение множества практически важных задач оптимизации АЭП: динамической, энергетической, многокритериальной. Современные высокопроизводительные микропроцессорные системы и полностью управляемые силовые полупроводниковые приборы позволяют реализовать законы векторного управления АД практически любой сложности, а также существенно снизить удельный вес управляющего устройства (преобразователя частоты) в суммарной стоимости электропривода. Поэтому в настоящее время АЭП с векторным управлением – наиболее успешно развивающаяся и применяемая система электропривода, которая с точек зрения и статических, и динамических показателей во многом превосходит электроприводы постоянного тока.

Одно из направлений развития АЭП и всех электроприводов переменного тока, которому в последнее время придаётся огромное значение, – так называемые бездатчиковые (sensorless) электроприводы. Под термином "бездатчиковые" здесь понимается отсутствие в системе любых датчиков, кроме тех, которые могут быть установлены внутри силового

преобразователя частоты (ПЧ), а именно: датчиков токов и напряжений статора двигателя, датчика напряжения звена постоянного тока ПЧ. Это значительно снижает стоимость и повышает надежность электропривода. Бездатчиковые алгоритмы векторного управления используются в тех электроприводах, в частности, в АЭП общепромышленных механизмов, которые не требуют предельного быстродействия, работают преимущественно в установившемся режиме и не обладают широкими диапазонами регулирования скорости (до 100:1). Применяются они и в подъемно-транспортных системах, но это предъявляет довольно жёсткие требования к перегрузочной способности электропривода и к динамике по быстродействию.

ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕМЕННЫХ

Отказ от датчиков переменных механического движения электропривода, соединение ПЧ (и системы управления) с двигателем только силовым кабелем при векторном управлении АД обуславливают необходимость косвенного определения ряда координат состояния. Это, прежде всего, частота вращения ротора и фаза ориентирующего (опорного) вектора – вектора потокосцеплений ротора – относительно неподвижного статора. Вычисление их оценок осуществляется на основе измеренных токов и напряжений статора двигателя с помощью специальных алгоритмов идентификации (идентификаторов).

Наибольшее распространение в практике АЭП получили замкнутые по выходной координате идентификаторы. В частности, это алгоритмы, построенные на основе адаптивных систем с задающей моделью (MRAS – model reference adaptive system [2]) или наблюдателей полного порядка (НПП) [3]. Кроме них, известны идентификаторы со структурой расширенных фильтров Калмана, алгебраические вычислители, анализаторы спектров паразитных гармоник и др., которые в данной работе не рассматриваются.

Идентификаторы типа MRAS содержат в своей структуре две различные модели, которые вычисляют две оценки одной и той же (в общем случае – векторной) координаты состояния, например вектора потокосцеплений ротора. Одна модель, не содержащая неопределённого параметра, является задающей, и вычисленная с её помощью переменная считается эталоном. Другая модель, зависящая от неопределённого параметра, является настраиваемой, причем её адаптация осуществляется путём изменения оценки неопределённой переменной, подлежащей идентификации. Считается, что истинное значение искомой переменной найдено, если выходные координаты задающей и адаптивной модели совпадают. Рассматриваемый ниже идентификатор частоты вращения (ИЧВР), построенный по методике MRAS, также содержит две модели: задающую модель цепи статора АД (МЦС) и настраиваемую модель цепи ротора (МЦР). Обе модели вычисляют оценку вектора потокосцеплений ротора АД. Настройка МЦР осуществляется изменением оценки частоты вращения ротора, входящей в её структуру. Оценку частоты вращения ротора формируют с помощью пропорционально-интегрального (ПИ-) регулятора, на вход которого подаётся векторное произведение двух оценок вектора потокосцеплений ротора, пропорциональное синусу угла между ними.

Идентификаторы, построенные по методике адаптивных наблюдателей полного порядка (АНПП), имеют несколько иную структуру [4]. В такой идентификатор входит полная (в рамках общепринятой системы допущений) математическая модель электромагнитных процессов АД, содержащая частоту вращения ротора как неопределённый параметр. На выходе АНПП получают оценку доступной для прямого измерения переменной и, сводя тем или иным образом её отклонение от непосредственно измеренного значения к нулю, идентифицируют неопределённый параметр. В бездатчиковых системах асинхронного электропривода нет другой альтернативы, кроме воспроизведения посредством адаптивного НПП оценки вектора токов статора – единственной векторной координаты состояния, которая может быть измерена на выходных клеммах ПЧ.

Таким образом, для синтеза алгоритма идентификации неизмеряемых координат необходимо решить следующие задачи.

1. Выбор типа идентификатора и определение его структуры.
2. Выбор методики сравнения координат состояния, на основе которого определяется неопределённая переменная. Как правило, сравниваются векторные величины, и поэтому существует масса способов вычисления ошибки. Например: векторное произведение, скалярное произведение разности векторов на один из них, разность модулей, разность фаз, разность отдельных проекций на выбранные оси координат и т.д. Необходимо выбрать методику, обладающую большей чувствительностью по отношению к интересующему параметру и охватывающую в идеале все режимы работы электропривода.
3. Выбор типа и расчёт параметров регулятора идентифицируемой величины.

При решении этих задач разработки сталкиваются с целым рядом трудностей.

- Нельзя построить модель механических процессов АЭП, так как отсутствует достаточно точная информация о суммарном моменте инерции вращающихся масс и, тем более, о моменте сопротивления нагрузки. Поэтому подавляющее большинство идентификаторов опираются только на математические модели электромагнитных процессов АД.
- Для идентификаторов неизмеряемых координат входными переменными являются токи и напряжения статора двигателя, по которым следует получить информацию о частоте вращения и ориентирующем векторе. Поэтому идентификаторы – это несколько видоизменённые модели АД, отличные от тех, которые уже стали привычными при моделировании асинхронных электроприводов. Для построения идентификаторов может потребоваться применение в их структуре идеальных звеньев дифференцирования и интеграторов, не охваченных обратной связью, которые практически не работоспособны. Чаще всего такие звенья заменяются в каком-то смысле эквивалентными, но при этом появляются дополнительные ограничения соответственно по быстродействию и по диапазону рабочих частот идентификатора и, следовательно, всего электропривода.
- Электрические параметры обмоток машины, которые как коэффициенты входят в структуру идентификаторов, существенно изменяются в процессе работы. Пренебрежение этим фактом ухудшает статические и динамические характеристики электропривода и может даже приводить к неустойчивости. Кроме того, изменения параметров влияют на настройки контуров регулирования АЭП, однако это влияние менее значительно.
- Быстродействие контуров регулирования координат, которые вычисляются посредством идентификаторов, должно быть ограничено с учётом быстродействия самих идентификаторов.

Из вышеперечисленных проблем, пожалуй, самыми существенными являются наличие нежелательных звеньев в структуре идентификаторов и интервальная неопределённость параметров схемы замещения АД. Как уже указывалось выше, плохо реализуемые звенья могут быть заменены эквивалентными при соответствующих ограничениях. Для подстройки же идентификаторов неизмеряемых координат к изменениям параметров АД применяются специальные алгоритмы идентификации существенно изменяющихся параметров двигателя. Прежде всего, определению подлежат: главная взаимная индуктивность, переходная индуктивность и активные сопротивления обмоток (или активное сопротивление статора и постоянная времени цепи ротора). Так как величина главной взаимной индуктивности изменяется в функции тока намагничивания, определённые сложности вызывает лишь нахождение данной зависимости ещё в процессе начальной самонастройки электропривода. Здесь же определяется и переходная индуктивность, которая в дальнейшем фиксируется. Активные сопротивления обмоток изменяются с тепловым состоянием двигателя и не зависят напрямую ни от одной электрической величины (эффект вытеснения при частотном и векторном регулировании АД практически не проявляется). Поэтому для их вычисления применяются более сложные алгоритмы, которые работают, как

правило, в усреднённо-установившихся режимах работы электропривода или в темпе "медленных" тепловых процессов и опираются на измеренные токи и напряжения статора. Для этого также с успехом применяются адаптивные наблюдатели полного порядка [4, 5].

В общем случае, алгоритмы идентификации параметров схемы замещения АД можно разделить на алгоритмы предварительной и текущей, активной и пассивной идентификации. Предварительная идентификация параметров осуществляется заранее, при настройке электропривода или на этапе его подготовки к работе и может включать в себя предварительное намагничивание АД постоянным током. Текущая идентификация осуществляется уже в процессе работы электропривода и по своей структуре более сложна, хотя при её выполнении определяется меньше параметров. Это объясняется, главным образом, тем, что часть параметров, а именно – переходная индуктивность и точки кривой намагничивания – уже определены в процессе предварительной идентификации и считаются неизменными. Кроме того, при работе электропривода управление осуществляется по двум каналам (тока и момента), и увязать с учётом функционирования регуляторов параметры переходных процессов с параметрами объекта управления намного сложнее.

Активная идентификация подразумевает применение специальных тестовых воздействий, пассивная – напротив, основывается только на измерениях рабочих процессов по электрическим переменным и оценках координат состояния, определённых с помощью идентификаторов. В задаче предварительной идентификации предпочтительней именно активные алгоритмы, так как с помощью специальных тестовых сигналов можно сфокусироваться именно на влиянии интересующего параметра, не боясь при этом нарушить ход технологического процесса. В ходе текущей идентификации использование тестовых сигналов, т.е. какое-либо вмешательство в ход технологического процесса нежелательно, хотя в последнее время в специальных публикациях это предлагается все чаще, естественно – в ущерб энергетическим и силовым характеристикам электропривода при прочих равных условиях.

ПРИМЕР СХЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Системы управления современными бездатчиковыми электроприводами в своей структуре содержат непосредственно алгоритм управления (регуляторы), идентификатор неизмеряемых координат состояния, алгоритм текущей идентификации существенно изменяющихся параметров и алгоритм предварительной идентификации параметров АД. Рассмотрим один из возможных вариантов реализации такого АЭП.

На функциональной схеме (рис. 1) электропривода можно выделить несколько следующих крупных блоков.

Силовая часть электропривода – это асинхронный двигатель и силовой преобразователь частоты (на базе автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения).

АУ – Алгоритм управления – внутренние контуры регулирования токов по продольной (d) и поперечной (q) осям, а также внешний по отношению к контуру тока по поперечной оси q , контур регулирования скорости. Все регуляторы пропорционально-интегральные.

ПК – Преобразователи координат, обеспечивающие перевод управляющих сигналов по напряжению статора из ориентированной по полю декартовой системы координат (d, q) в неподвижную ортогональную систему координат (α, β), и наоборот – сигналов датчиков тока из неподвижной системы координат в полеориентированную.

ИЧВР – Идентификатор частоты вращения ротора и ориентирующего вектора потокосцеплений ротора, построенный по методике адаптивных систем с задающей моделью. Структура идентификатора дополнена стабилизирующей добавкой, которая избавляет систему от недостатков, связанных с наличием разомкнутых интеграторов (нейтральной устойчивости).

ИАСС – Алгоритм текущей идентификации активного сопротивления статора, построенный на основе адаптивного наблюдателя полного порядка. Адаптация к изменению активного сопротивления ротора осуществляется по оценке активного сопротивления статора в соответствии с первой тепловой моделью электрической машины.

АПИ – Алгоритм активной предварительной идентификации параметров схемы замещения АД.

ЛУ – Логическое устройство. Его наличием условно показано наличие алгоритма, который согласует работу алгоритма предварительной идентификации с другими идентификаторами и основным алгоритмом управления. Так, при начальной настройке АЭП на преобразователь частоты подаётся задающий сигнал по напряжению статора специальной формы. Одновременно накладывается запрет на запуск электропривода до момента окончания предварительной идентификации параметров.

На рис. 1 также введены следующие обозначения: $\omega_{e,ref}$ – заданное значение частоты вращения ротора; $\Psi_{rm,ref}$ – уставка по модулю вектора потокосцеплений ротора; $U_{s,dq,ref}$ – заданный вектор напряжений статора в полеориентированной системе координат; $U_{s,\alpha\beta,ref}$ – заданный вектор напряжений статора в неподвижной системе координат; $I_{s,dq}$ – текущее значение вектора токов статора в полеориентированной системе координат; $I_{s,\alpha\beta}$ – текущее значение вектора токов статора в неподвижной системе координат; $\hat{\gamma}_\Psi$ – оценка фазы вектора потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат; $\hat{\omega}_e$ – оценка частоты вращения ротора; $\hat{X}_{RLT,0}$ – матрица-столбец начальных оценок параметров схемы замещения АД; \hat{X}_{RLT} – матрица-столбец текущих оценок параметров схемы замещения АД.

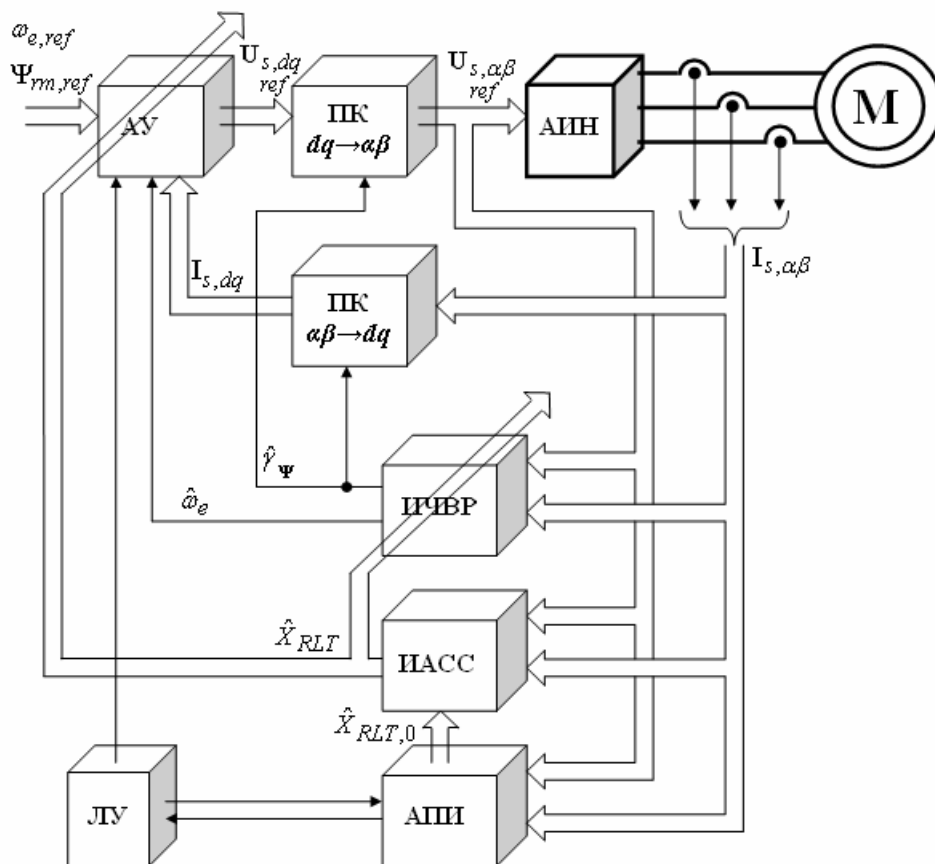


Рис. 1

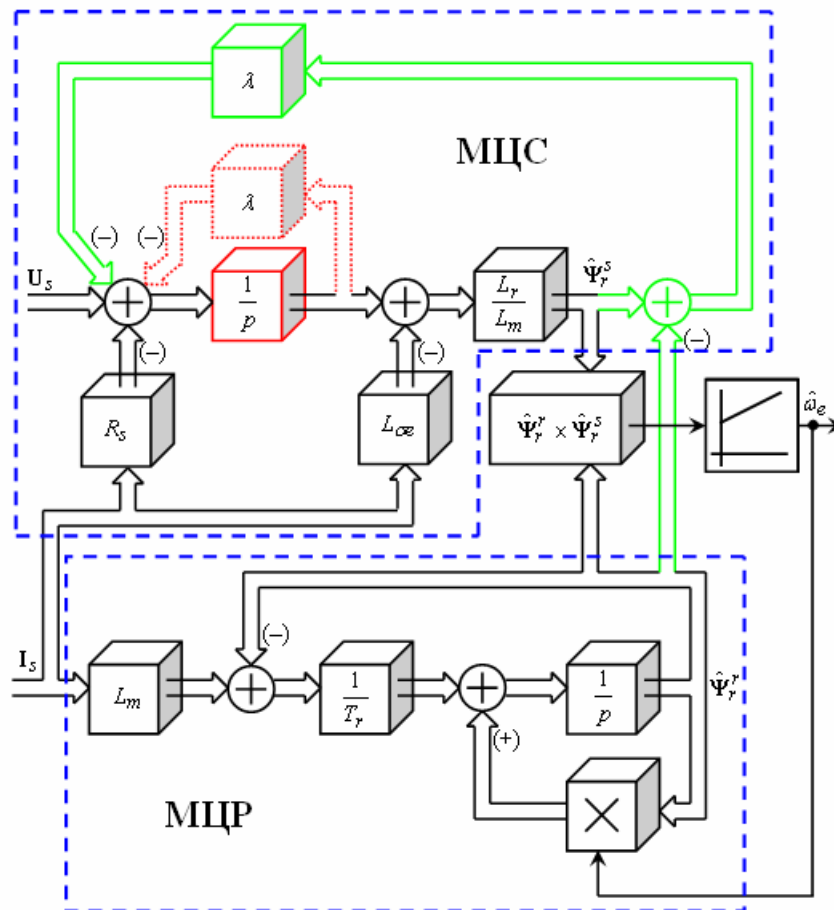


Рис. 2

ИДЕНТИФИКАТОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

Структурная схема ИЧВР представлена на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения: МЦС – модель цепи статора; МЦР – модель цепи ротора; λ – коэффициент стабилизирующей добавки; \mathbf{U}_s – вектор-столбец напряжений статора; \mathbf{I}_s – вектор-столбец токов статора; R_s – активное сопротивление статора; $L_{\sigma e}$ – переходная индуктивность АД; L_m – главная взаимная индуктивность АД; L_r – полная индуктивность цепи ротора; T_r – постоянная времени цепи ротора; $\hat{\Psi}_r^s$ – оценка вектора потокосцеплений ротора, вычисленная по МЦС; $\hat{\Psi}_r^r$ – оценка вектора потокосцеплений ротора, вычисленная по МЦР; $\hat{\Psi}_r^r \times \hat{\Psi}_r^s$ – векторное произведение; $\hat{\omega}_e$ – оценка электрической частоты вращения ротора.

В структуре МЦС красным цветом выделен разомкнутый интегратор, присутствие которого нежелательно, поскольку в реальной системе всегда есть смещение нулей датчиков, которое будет накапливаться в интеграторе, не охваченном обратной связью, и в итоге приведёт к его насыщению, что вызовет неработоспособность идентификатора в целом. Поэтому в работе [2], где была впервые предложена эта структура, предлагалось заменить интегратор апериодическим звеном (или, что то же самое, охватить его отрицательной обратной связью, как это показано на рис. 2 красной пунктирной линией). Параметры апериодического звена рассчитываются так, чтобы его ЛАЧХ в области рабочих частот АЭП совпадала с ЛАЧХ интегрирующего звена. Предпочтительней в качестве сигнала обратной связи использовать разность между оценками потокосцеплений ротора, вычисленными по МЦС и МЦР (показано зелёным цветом). Такой способ охвата интеграторов есть ничто иное,

как введение стабилизирующей добавки [3, 6] и имеет ряд преимуществ. Главным из них является дополнительная стабилизация идентификатора при отклонениях того или иного параметра АД, установленного в ИЧВР. В двигательном режиме работы стабилизирующая добавка существенно увеличивает запас устойчивости системы. Например, если один из параметров в МЦС отличается от реального значения, что неизбежно должно сказаться на оценке частоты вращения ротора, то стабилизирующая добавка уменьшает ошибку вычисления выходных переменных ИЧВР. Таким образом, она может существенно увеличить максимально допустимую ошибку в параметрах, при которой ИЧВР останется работоспособным. Это очень важно в динамических режимах, где не обеспечивается достоверная текущая идентификация параметров. Существует и критическое значение коэффициента стабилизирующей добавки, при превышении которого в двигательном режиме в ИЧВР возникают автоколебания, однако это значение может на несколько порядков превышать практически целесообразные и поэтому не накладывает существенных ограничений на величину λ . В генераторном режиме, напротив, стабилизирующая добавка только усиливает влияние ошибок в параметрах МЦС. Это накладывает серьёзные ограничения на её максимальное значение и ужесточает требования к точности определения параметров схемы замещения АД.

Не менее важной, чем выбор величины коэффициента стабилизирующей добавки, задачей является расчёт параметров ПИ-регулятора MRAS, формирующего оценку частоты вращения ротора. К сожалению, общепринятой методики расчёта нет. Главная причина – в существенной нелинейности ИЧВР и наличии двух входных каналов (векторы токов и напряжений статора). Поэтому приходится принимать целый ряд допущений, основанных скорее на понимании физического смысла происходящих в ИЧВР процессов, чем на строгом математическом анализе. После этого можно получить структурную схему, позволяющую рассчитать параметры регулятора, которые в дальнейшем могут быть уточнены с помощью цифрового моделирования. Но и здесь есть свои нюансы. Классические регуляторы рассчитываются для систем, во-первых, использующих сигналы постоянного тока и, во-вторых, где на один регулятор подаётся ошибка от сравнения двух скалярных величин. Поэтому, подав на вход такого контура ступенчатый сигнал, мы сразу сможем оценить показатели качества переходного процесса. В нашем же случае входные сигналы ИЧВР это векторы, каждая компонента которых в установившемся режиме имеет синусоидальную форму, а в динамике, что нас и интересует, взаимная фазировка, частоты и амплитуды этих синусоид изменяются. На вход ПИ-регулятора подаётся сигнал, соответствующий векторному произведению двух векторов, который при правильном расчёте параметров регулятора становится сигналом постоянного тока. Отсюда становится ясна сложность анализа качества переходного процесса по оценке скорости. Объективно качество настройки регулятора MRAS можно характеризовать, в частности, динамикой скоростной ошибки по оценке частоты вращения при разгоне или торможении электропривода.

АЛГОРИТМ ТЕКУЩЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАТОРА

При синтезе алгоритмов текущей идентификации существенно изменяющихся параметров требуется решить те же задачи, что и при синтезе алгоритмов идентификации неизменяемых координат. Кроме того, необходимо учесть наличие погрешностей в оценках координат, возникающих именно вследствие возможных отклонений оценок параметров от истинных значений. Алгоритмы текущей идентификации переменных параметров не обязательно должны быть отдельной структурой, они могут и входить в состав алгоритма идентификации неизменяемых координат.

Алгоритмы идентификации переменных параметров целесообразно отключать на время переходных процессов в электроприводе (или делать их "медленными", полагая параметры квазистационарными), чтобы избежать влияния динамических ошибок в работе идентификаторов координат состояния. А поскольку бездатчиковые электроприводы

работают в основном в установившихся режимах, то такое ограничение можно считать незначительным.

Для адаптации ИЧВР к изменениям активного сопротивления статора может быть применён следующий алгоритм, основанный на идее адаптивного наблюдателя полного порядка. Впервые его структура была предложена в работах [4, 5]. Однако в первоначальном виде АНПП оказался неработоспособен в генераторных (тормозных) режимах работы электропривода. Впоследствии была опубликована статья [7], уже учитывающая генераторные режимы работы и вызвавшая дискуссию [8, 9]. Структура АНПП представлена на рис. 3. В ней можно выделить следующие основные блоки: НПП – непосредственно наблюдатель полного порядка; ФП – функциональный преобразователь.

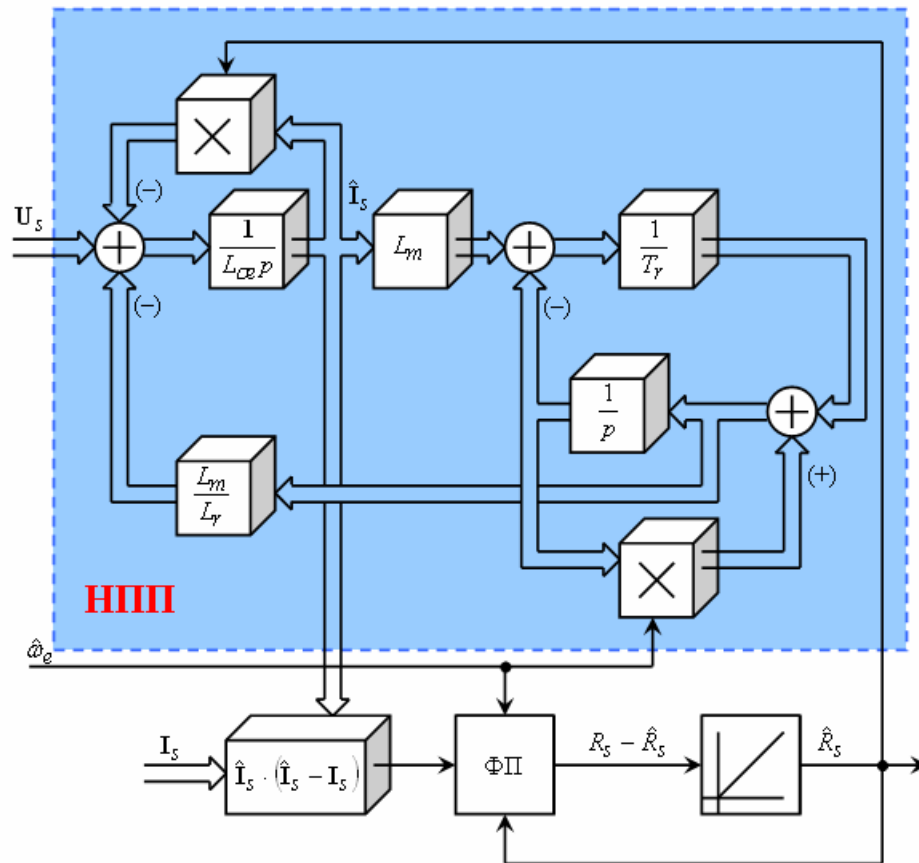


Рис. 3

На основании данных о векторе напряжений статора и оценки частоты вращения ротора НПП вычисляет оценку вектора токов статора. Затем определяется отклонение полученной оценки от измеренного вектора токов, которое в скалярном произведении с самой оценкой с помощью ФП преобразуется в разность между активным сопротивлением статора и его оценкой. ФП построен на зависимости, выведенной для установившегося режима работы, и используется для линеаризации контура адаптации АНПП. Согласно градиентному методу отклонение оценки сопротивления пропорционально необходимой скорости изменения настраиваемой величины, поэтому оно подаётся на интегральный (И-) регулятор, на выходе которого формируется непосредственно оценка активного сопротивления статора. Заметим, что максимально достижимая скорость процессов адаптации, определяемая коэффициентом передачи И-регулятора, в двигательных режимах работы электропривода более чем на порядок выше, чем в генераторных.

Кроме того, существует необходимость изменения знака коэффициента передачи И-регулятора при пересечении рабочей точкой электропривода некоторой линии переключения (ЛП), которая проходит во втором и четвёртом квадрантах плоскости механических

характеристик (на рис. 4 разделяет области 3 и 4). Наличие этой линии объясняется разными знаками производной модуля вектора токов статора по оценке активного сопротивления статора для установившегося режима НПП. Нахождению рабочей точки на ЛП соответствует режим, при котором угол между векторами токов и напряжений статора равен 90 градусов. В окрестности ЛП также существуют области (затемненные на рис. 4 области 2 и 3), где идентификатор может оказаться неработоспособным вследствие неблагоприятного взаимного влияния ошибок ИЧВР и ИАСС. В области 2 влияние подсистем идентификатора таково, что система, как правило, оказывается устойчивой. Выяснять же точные границы области неработоспособности системы внутри области 3 нецелесообразно, т.к. реально она будет более широкой из-за неизбежных погрешностей в определении остальных параметров схемы замещения АД, и "замораживать" текущее значение сопротивления придется "с запасом", отступая от ее теоретических границ. Величина этого "запаса" должна устанавливаться в каждом конкретном случае при настройке электропривода.

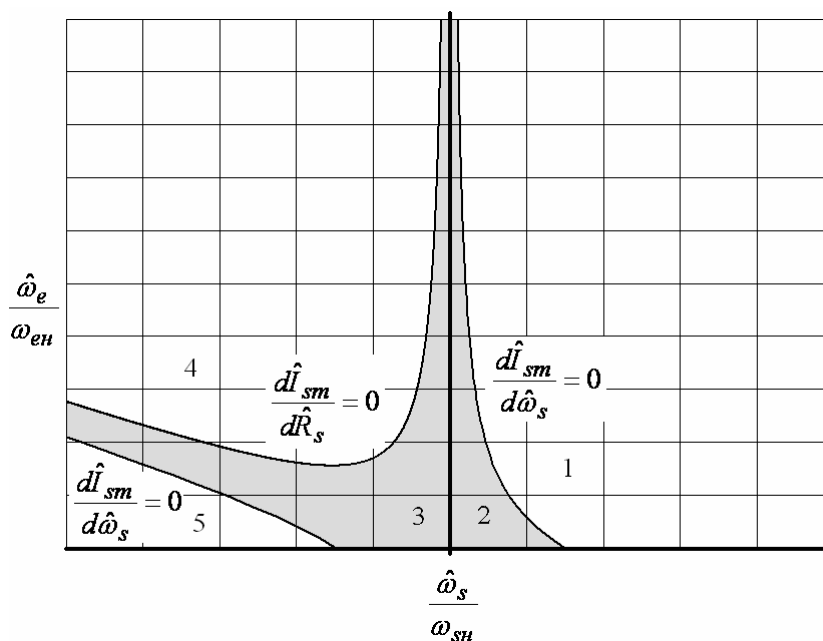


Рис. 4

Для иллюстрации процесса идентификации сопротивления на рис. 5 приведены графики переходных процессов по электрической частоте вращения и её оценке, активному сопротивлению статора и его оценке, полученные путем моделирования в MATLAB электропривода на базе двигателя 4A100L4У3 с номинальной мощностью 4 кВт. В момент времени $t=1$ с система запускается на частоту вращения, составляющую 10% от номинальной, одновременно имитируется экспоненциальный рост активного сопротивления статора от номинального до 1,5-кратного значения. С целью наглядности постоянная времени нагрева положена равной 1 секунде, что намного быстрее темпа реальных тепловых процессов. При $t=2$ с к двигателю прикладывается номинальный момент нагрузки, а при $t=3,5$ с включается алгоритм идентификации сопротивления.

В условиях рис. 5 алгоритм ИАСС обеспечивает монотонный процесс идентификации активного сопротивления статора с постоянной времени приблизительно 0,7с. Столь хорошую динамику самонастройки подсистемы "ИЧВР-ИАСС" удаётся получить не во всех режимах работы. Самое высокое быстродействие обеспечивается в двигательном режиме при номинальной частоте вращения с номинальной нагрузкой, а самое низкое — в генераторном режиме вблизи линии переключения. Наилучшего сочетания свойств идентификатора в различных режимах можно добиться, оптимизируя величину коэффициента при стабилизирующей добавке ИЧВР, который в ходе моделирования составлял 50 с^{-1} .

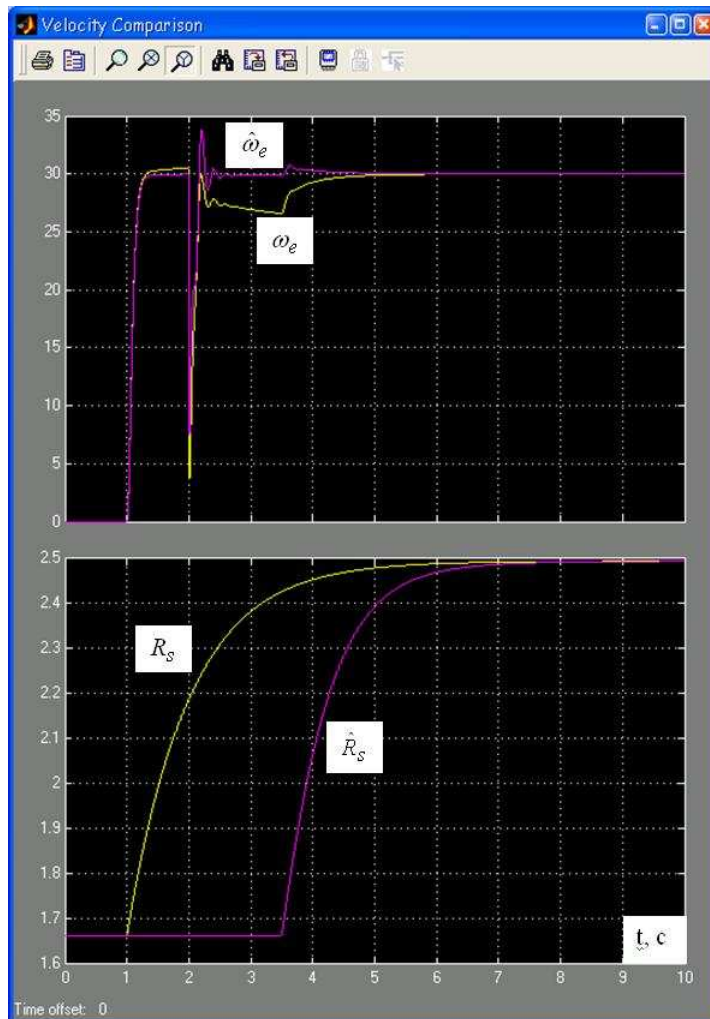


Рис. 5

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Функция предварительной идентификации параметров – очень важная составляющая алгоритмического обеспечения бездатчикового электропривода. Она выполняется при начальной настройке преобразователя частоты на двигатель и (опционально) при подготовке его к работе (каждой подаче питающего напряжения). В зависимости от ситуации, в ходе предварительной идентификации определяются оценки всех или заданной части параметров схемы замещения АД. Полученные оценки параметров используются в идентификаторах неизмеряемых координат и как начальные значения (приближения) оценок настраиваемых параметров.

Из классической теории электрических машин известен метод экспериментального определения параметров схемы замещения АД с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания. Он обеспечивает хорошую точность и широко применяется на практике. Однако для применения в составе бездатчиковой системы, где требуется автоматическое определение параметров, этот метод не подходит по следующим причинам. Во-первых, чтобы создать холостой ход, нужно разорвать кинематическую связь двигателя с механизмом. Во-вторых, для режима короткого замыкания требуется зафиксировать ротор, что также не всегда возможно. Поэтому нужен специальный алгоритм, обеспечивающий автоматическое определение параметров, не влияющий на ход технологического процесса и не требующий манипуляций с механизмом или применения дополнительных устройств. Таким образом, требуется синтезировать достаточно (для идентификации всех параметров) "богатое" тестовое воздействие, при котором бы в двигателе не наводилось вращающееся магнитное поле, но дополнительно учитывая следующее.

1. При отсутствии вращения ротора и вращающегося магнитного поля в статоре электрической машины не наводится ЭДС, которая составляет львиную долю номинального напряжения АД. Поэтому в режиме предварительной идентификации используются низкие уровни напряжений, что предъявляет высокие требования к точности системы управления ПЧ или датчикам напряжений фаз.
2. Если в бездатчиковом электроприводе не предполагается регулирование изменением магнитного потока, то на этапе предварительной идентификации нужно стремиться при определении индуктивностей все измерения производить вблизи номинального тока намагничивания. Если предполагается изменять магнитный поток машины, необходимо выполнять процедуру определения индуктивностей при разных значениях тока намагничивания. И в том, и в другом случае требуется нескольких повторений одной и той же процедуры.
3. Нужно учитывать характер выходного напряжения преобразователя и производить измерения тока в определённые моменты времени, синхронизированные с опорным сигналом ШИМ.
4. В цепи статора двигателя включено множество электрических элементов – начиная от силовых ключей инвертора, обладающих нелинейным сопротивлением, и заканчивая питающим двигатель кабелем, который характеризуется распределёнными активным и реактивными сопротивлениями.

При синтезе активного алгоритма предварительной идентификации следует учитывать, как тот или иной параметр схемы замещения АД влияет на форму и величину тока статора. Достаточно легко можно определить суммарное активное сопротивление статора, в которое входит также эквивалентное сопротивление силового преобразователя частоты. Это суммарное сопротивление используется в дальнейшем при настройке ИЧВР, а также как начальное значение сопротивления в алгоритме ИАСС. Кроме того, необходимо определить главную взаимную индуктивность, переходную индуктивность и постоянную времени цепи ротора. Если рассматривать влияние переходной индуктивности АД на характер изменения тока статора, то хорошо известно, что её влияние сказывается только на начальном этапе переходных процессов. Поэтому для определения переходной индуктивности достаточно измерять ток в самом начале переходного процесса при ступенчатом изменении напряжения. Измерения должны быть проведены за первые несколько периодов ШИМ.

Индуктивность статора может определяться, например, следующим образом. Сначала на статор подаётся постоянное напряжение, и измеряется ток статора в установившемся режиме. Затем проводится замер напряжения преобразователя при том же значении тока, но при условии, что ток и напряжение меняются от нуля по линейному закону. Разность полученных напряжений характеризует полную индуктивность статора. Следует отметить, что при таком определении индуктивности статора к преобразователю предъявляются очень высокие требования по воспроизведению заданного напряжения, так как диапазон изменения напряжения достаточно мал (единицы вольт), а время линейного нарастания напряжения в этом диапазоне достаточно велико (до нескольких секунд). Величину главной взаимной индуктивности можно рассчитать, зная переходную индуктивность и индуктивность статора.

Влияние постоянной времени цепи ротора на форму тока статора (при отсутствии скольжения вращающегося магнитного поля относительно ротора) проявляется только в переходных режимах. Есть несколько способов её определения. Например, по переходному процессу тока при ступенчатом изменении напряжения и известных переходной индуктивности, суммарном активном сопротивлении статора и, возможно, главной взаимной индуктивности. Кроме того, для определения постоянной времени ротора можно использовать настраиваемую модель АД в режиме намагничивания. При этом на вход модели и преобразователя подаётся пилообразный сигнал (напряжение). Сравнивая ток статора с его оценкой на выходе настраиваемой модели с помощью ПИ-регулятора, получаем оценку постоянной времени ротора. При таком способе идентификации может

понадобится проведение нескольких итераций, поскольку оптимальная в данном случае амплитуда и период пилообразного напряжения определяются искомой постоянной времени ротора.

Объединенная форма задающего сигнала по напряжению статора на этапе предварительной идентификации параметров может быть, например, такой, как показано на рис. 6 [10].

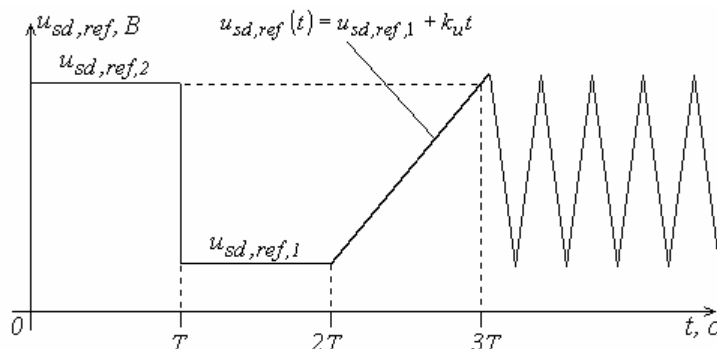


Рис. 6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электропривод, построенный в соответствии с рассмотренной структурой, работоспособен во всех четырёх квадрантах плоскости механических характеристик, но с некоторыми ограничениями по продолжительности генераторных режимов. Структура не лишена недостатков. Прежде всего, это наличие линии переключения и нерабочей области ИАСС, что существенно ограничивает диапазон частот в генераторном режиме, при которых может использоваться текущая идентификация активного сопротивления статора. Полностью устранить данный недостаток не представляется возможным без введения специальных тестовых воздействий или ослабления потока при низких скоростях. Можно только стремиться к более точному определению границы нерабочей области и полностью использовать область 5 (рис. 4). Другой существенный недостаток это низкая динамика процессов идентификации вблизи линии переключения. Бороться с ним следует поиском других методов сравнения вектора токов статора и его оценки. Ещё один недостаток – громоздкость структуры. Но структура довольно высокого (10-го) порядка имеет свои преимущества. Во-первых, каждый идентификатор это модель двигателя (МЦС, МЦР, НПП), которая заведомо устойчива. Во-вторых, наличие отдельных алгоритмов идентификации упрощает анализ режимов их работы и синтез параметров регуляторов, позволяет целенаправленно включать, отключать и "замораживать" составляющие алгоритма, в частности ИАСС.

Чтобы максимально использовать возможности предложенного алгоритма идентификации частоты вращения ротора, нужно более детально изучить влияние на его работу стабилизирующей добавки. Кроме того, необходимо стремиться улучшить работу алгоритма текущей идентификации активного сопротивления статора в генераторном режиме. Исследования показывают, что идентифицировать активное сопротивление статора в двигательном режиме удаётся и в рамках ИЧВР, внося в его структуру минимальные дополнения. Тогда описанный в статье алгоритм текущей идентификации сопротивления можно полностью оптимизировать для работы лишь в генераторном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift, 1971. Bd. 45, – Н. 10. – S. 757-760.

2. Schauder C. Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors Without Rotational Transducers / C. Schauder // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, September/October 1992, pp. 1054-1061.
3. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
4. Kubota H. DSP-based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor / H. Kubota, K. Matsuse, T. Nakano // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 5, March/April 1993, pp. 344-348.
5. Kubota H. Speed Sensorless Field-Oriented Control of Induction Motor with Rotor Resistance Adaptation / H. Kubota, K. Matsuse // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 5, September/October 1994, pp. 1219-1224.
6. Панкратов В.В. Метод синтеза алгоритмов текущей идентификации на основе адаптивных моделей // *Автоматизированные электромеханические системы / НГТУ – Новосибирск*, 1997. – С. 15-30.
7. Kubota H. Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer / H. Kubota, I. Sato, Y. Tomura, K. Matsuse // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 4, July/August 2002, pp. 1081-1086.
8. Depenbrock M. Discussion of “Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer” / M. Depenbrock, A. Steimel // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 1, January/February 2003, p. 19.
9. Kubota H. Closure to Discussion of “Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive With Adaptive Observer” / M. Depenbrock, A. Steimel // *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 1, January/February 2003, p. 20.
10. Маслов М.О., Панкратов В.В. Один алгоритм предварительной идентификации параметров для асинхронного электропривода с векторным управлением // *Труды XIII Международной конференции "Электроприводы переменного тока" (ЭППТ'05, 15 – 18 марта 2005 г., Екатеринбург, Россия)*. – Екатеринбург, 2005. – С. 99-102.