

Современные технологии управления двигателями переменного тока

в преобразователях частоты

ООО НПФ «Новые Промышленные Технологии».
Синхронные двигатели с постоянными магнитами

Рассмотрена система управления синхронным двигателем с постоянными магнитами на базе преобразователя частоты МПЧ-380 производства ООО «НПФ «Новые Промышленные Технологии».
Приведено сравнение характеристик электропривода при работе с датчиком положения ротора и без.

**Сергей Тягушев,
к. т. н.**

Sergey_ty@mail.ru

В настоящее время синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) широко используются во многих отраслях промышленности. Они характеризуются низкими омическими потерями, высокой перегрузочной способностью, надежностью и простотой конструкции. Основное применение СДПМ находят в прецизионных, моментных сервоприводах позиционирования по данным датчика углового положения или линейного перемещения. В подобных системах требуется быстродействующее регулирование электромагнитного момента в широком диапазоне частот вращения при сохранении высокой перегрузочной способности до пяти крат. Такие характеристики достигаются за счет регулирования величины моментобразующего тока при стабилизации на заданном уровне магнитного потока в зазоре машины. Для синхронного двигателя составляющая тока, образующая момент, может быть определена в ортогональной системе координат, вращающейся со скоростью ротора, поэтому в состав электропривода на базе СДПМ наряду с преобразователем частоты входит датчик углового положения ротора (ДПР), обычно реализованный как абсолютный энкодер на базе оптических или магнитных систем измерения углового положения, или вращающегося трансформатора типа резольвер, с дополнительными электронными системами возбуждения, демодуляции и оцифровки полезного сигнала положения. ДПР должен обеспечивать 12–16 разрядов точности определения углового положения при полосе пропускания не менее 1,5 кГц.

Поскольку данные от датчика передаются по высокоскоростным цифровым линиям связи (интерфейсы SSI и BSSI) или при помощи высокочастотного (2–12 кГц) аналогового сигнала, то применение ДПР усложняет электропривод и сужает область его возможного применения.

Однако для повышения энергоэффективности ведущие производители, в частности Siemens, VEM, WEG, сегодня предлагают в простых частотно-регулируемых приводах, таких как вентиляционное, насосное оборудование, электротранспорт и т. д., использовать СДПМ взамен асинхронных двигателей [1]. Энергоэффективность в данном случае достигается благодаря более высокой удельной мощности двигателя и более высокому КПД электропривода, особенно в режимах, когда нагрузка меньше номинальной, что позволяет отказаться, например, от дополнительного принудительного охлаждения двигателя. В таких системах применение датчика положения ротора является излишним как с технической, так и с экономической точки зрения. Поэтому современные системы электропривода реализуют бездатчиковое управление, где положение ротора косвенно наблюдается по измеренным токам статора.

В связи с этим к преобразователю частоты в составе электропривода с СДПМ предъявляются высокие требования. Необходимо не только регулировать частоту и амплитуду напряжения на выходе преобразователя по скалярному закону, но и реализовывать высокоскоростные, многоконтурные системы управления, наблюдатели координат состояния, об-



Рис. 1. Преобразователь МПЧ-380-7.5



Рис. 2. Комплексный синхронный электропривод ЭПС 3.0 на базе МПЧ-380

рабатывать датчик положения или скорости с различными интерфейсами, поддерживать скоростной информационный обмен с системой верхнего уровня [2].

Всем этим требованиям вполне отвечают системы электроприводов, построенные на базе микропроцессорных преобразователей частоты МПЧ-380 производства ООО «НПФ «Новые Промышленные Технологии». Компания предлагает линейку преобразователей для управления двигателями переменного тока в электроприводах специального назначения, в том числе для нужд оборонной промышленности, категория качества ВР в соответствии с НШПК.421214.001 ТУ (рис. 1, табл. 1). Преобразователи МПЧ-380 разработаны с применением отечественной компонентной базы. В силовой части используются современные IGBT-транзисторы 12- и 16-го класса напряжения, что позволяет МПЧ-380 эффективно функционировать как в электросетях 220 В/400 Гц, так и в общепромышленных сетях 380 В/50 Гц. Система управления преобразователем построена на базе современного 32-разрядного микроконтроллера 1986ВЕ91Т с ядром Cortex-M3 производства ППК «Миландр». Оригинальное программное обеспечение для микроконтроллера реализовано с применением специализированной математики с фиксированной точкой, что позволяет достичь высокой производительности вычислений при заданной точности. МПЧ-380 обладает набором современных интерфейсов — RS-422/RS-485 Modbus RTU, CAN. Для подключения датчика обратной связи предусмотрены гальванически развязанные интерфейсы SSI, квадратурного энкодера и резольвера. При

Таблица 1. Характеристики преобразователей МПЧ-380

Наименование параметра	Значение
Входное напряжение	380 В/50 Гц, 220 В/400 Гц
Номинальная мощность, кВт	0,75; 3; 5,5; 7,5; 11; 15; 30; 45; 60; 75; 100
Выходное напряжение, В	0-380
Выходная частота, Гц	0-500
Частота ШИМ, кГц	2-12
Интерфейс управления	RS-422/RS-485 Modbus RTU
Количество дискретных входов/выходов	8/8
Исполнение	IP55
Температурный диапазон, °С	-40...+55
Профиль управления синхронным двигателем	сервопривод
	векторное без датчика
Профиль управления асинхронным двигателем	скалярное
	прямое управление моментом
Тормозной прерыватель	Встроен
Фильтр ЭМС	Встроен

работе с резольвером возбуждение, демодуляция и оцифровка углового положения происходит при помощи современного преобразователя угол-код 1310НМ025 ППК «Миландр». Дополнительно к МПЧ-380 может быть подключен датчик положения, установленный на выходе редуктора приводного механизма, и организовано управление по положению технологического объекта (рис. 2).

МПЧ-380 обеспечивает управление моментом и скоростью СДПМ в векторном режиме с обратной связью по угловому положению ротора и без.

Векторная система управления синхронным двигателем построена по принципу трехконтурной системы автоматического управления с подчиненным регулированием (рис. 3). Входными данными для системы регуляторов являются проекции токов статора во вращающейся

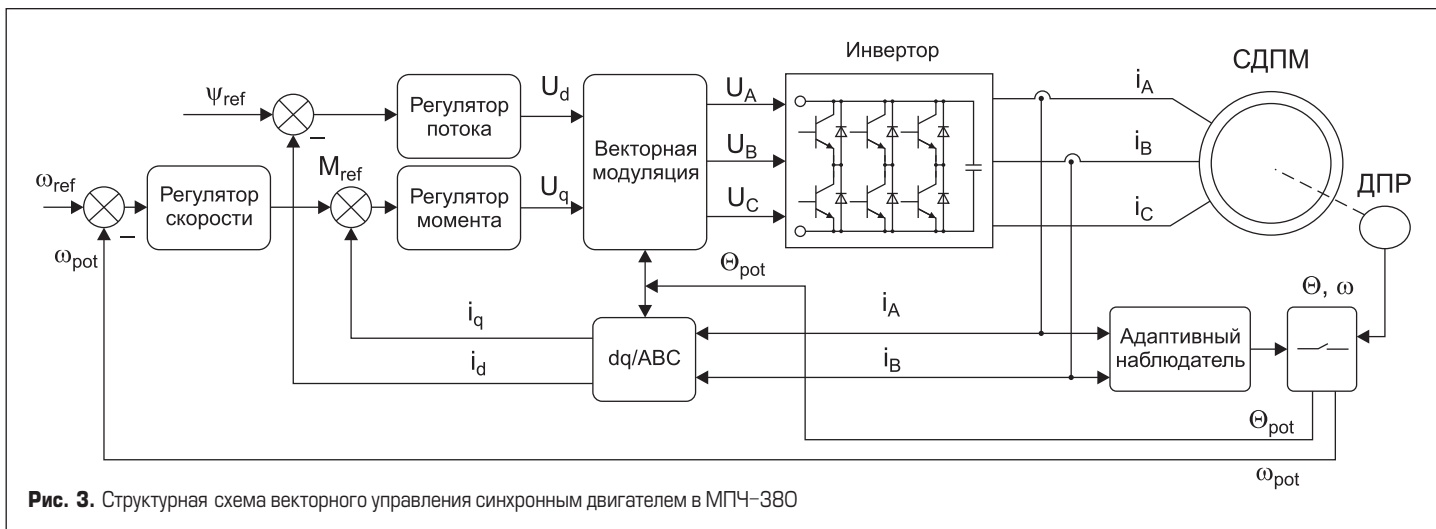


Рис. 3. Структурная схема векторного управления синхронным двигателем в МПЧ-380

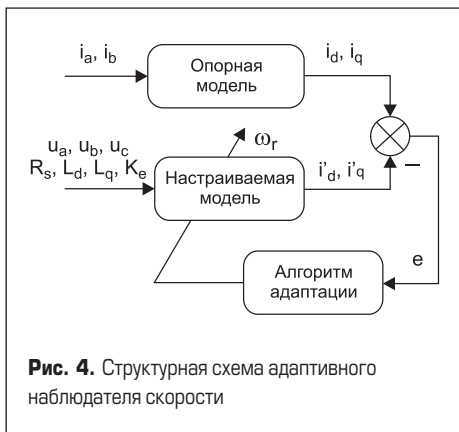


Рис. 4. Структурная схема адаптивного наблюдателя скорости

со скоростью ротора d - q -системе координат. Продольная составляющая тока i_d , обеспечивает постоянство магнитного потока, ее значение поддерживается на заданном уровне регулятором потока, в зависимости от режима работы электропривода. Поперечная проекция тока i_q пропорциональна моменту двигателя и управляется регулятором момента. Задание для регулятора момента может быть получено через последовательный интерфейс от системы управления верхнего уровня (СУВУ) или сформировано регулятором скорости. Скорость ротора косвенно вычисляется при обработке данных абсолютного энкодера следящим контуром. Это позволяет с высокой точностью оценить значение скорости ротора, сохранив одновременно широкий диапазон полосы пропускания регуляторов системы управления. Задание для регулятора скорости может быть получено от СУВУ или сформировано регулятором положения на основе данных датчика положения ротора двигателя или датчика углового положения технологического объекта.

Управляющие воздействия для IGBT-инвертора формируются в блоке пространственно-векторной модуляции. Алгоритм переключения силовых ключей выбирается исходя из текущего теплового режима преобразователя, частоты вращения и нагрузки на двигатель. Это позволяет снизить коммутационные потери в инверторе [3] при сохранении приемлемого уровня пульсаций момента двигателя.

В бездатчиковом режиме угловое положение ротора двигателя косвенно вычисляется на основе измеренных токов статора и выходного напряжения инвертора. Алгоритм вычисления реализован с помощью адаптивного MRAS-наблюдателя. В наблюдателе используется две

модели, разные по структуре, но вычисляющие одну и ту же переменную состояния (рис. 4). В качестве опорной модели используется сам управляемый двигатель [4]. В качестве настраиваемой модели предусмотрена модель синхронной машины в d - q -системе координат (1):

$$u_d = R_s i_d + L_d (di_d/dt) - \omega_r L_q i_q, \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q (di_q/dt) - \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_r.$$

Ошибка между d - q -проекциями тока статора i_d, i_q и вычисленными токами используется в алгоритме адаптации для вычисления угловой скорости (2):

$$\omega_r = \int k_i e dt + k_e, \quad (2)$$

$$e = i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \Psi_r (i_q - \hat{i}_d) / L_d,$$

где Ψ_r — потокосцепление ротора; L_d — индуктивность статора по оси d ; L_q — индуктивность статора по оси q ; R_s — сопротивление статора; ω_r — скорость ротора; k_i — интегральный коэффициент наблюдателя; k_e — коэффициент усиления наблюдателя.

Адаптивный наблюдатель обеспечивает устойчивую работу электропривода в двигательном и генераторном режиме, плавный пуск, реверс, перегрузочную способность и регулирование скорости в диапазоне 1:25. Система устойчиво функционирует при различных возмущающих воздействиях: изменение параметров двигателя вследствие нагрева, нелинейность выходного напряжения инвертора, пульсации тока и момента. Переход в бездатчиковый режим управления и обратно возможен «на лету», без остановки и перезапуска алгоритма управления. Это повышает надежность системы при отказе датчика положения ротора в сложных условиях эксплуатации.

Для старта в бездатчиковом режиме система управления не требует дополнительной информации о начальном положении ротора электродвигателя. Однако при сложных условиях пуска, таких как малое время разгона, повышенный статический момент сопротивления на валу, может быть задействован алгоритм предстартового теста положения [5]. Алгоритм предстартового теста основан на регистрации величины пульсации тока на выходе инвертора при прикладывании к обмоткам двигателя вектора напряжения заданной ве-

личины и длительности. Сам ротор во время теста неподвижен, его принудительное выравнивание не требуется.

Результаты сравнительного анализа параметров системы управления в двух режимах представлены в таблице 2. Испытания проводились на стенде, в состав которого входили два синхронных двигателя 6ДВМ215S производства ООО «ЧЭАЗ», тензометрическая муфта М40-150 для измерения скорости и момента, два МПЧ-380-7,5, система измерения электрической мощности и система сбора, анализа и визуализации данных. Параметры электродвигателя 6ДВМ215S приведены в таблице 3. Нагрузка на валу создавалась с помощью одного из преобразователей, который управлял двигателем по датчику положения ротора в генераторном режиме с ограничением момента. Генерируемая энергия рассеивалась на тормозном резисторе. Испытуемый МПЧ-380 функционировал в двигательном режиме с датчиком положения и без, при различных скоростях и моментах сопротивления на валу.

Из таблицы 2 видно, что система управления с датчиком положения ротора более точна и обладает высоким быстродействием. Ухудшение характеристик в бездатчиковом режиме из-за нелинейности выходного напряжения инвертора обуславливает снижение динамических характеристик электропривода в целом.

В настоящее время электропривод на базе МПЧ-380 применен в ряде электроприводов специального назначения в составе опорно-поворотных устройств антенных систем. Так, электропривод на базе МПЧ-380-7,5 и синхронного двигателя 6ДВМ215S успешно введен взамен устаревшего электропривода постоянного тока с двигателем ДИ22. Из-за требований резервирования, а также ограничений, связанных с выбором элементной базы, предъявляемых заказчиком, использование встроенного датчика положения ротора во всем диапазоне вращения было затруднено. В связи с этим принято решение использовать сигнал датчика ОС только на низких оборотах, менее 100 об/мин, в остальном диапазоне частот электропривод работает в бездатчиковом режиме. Система функционирует таким образом, что переход от одного режима к другому не оказывает влияния на динамику внешнего контура управления положением. Заданная точность поддержания скорости и динамические характеристики электропривода обеспечиваются во всем диапазоне частот.

Таблица 2. Сравнительные характеристики систем управления

Наименование параметра	Режим управления	
	С датчиком положения	Без датчика
Диапазон регулирования	1:1000	1:25
Динамический отклик по моменту, с	0,011	0,07
Задержка реакции по скорости, с	0,013	0,1
Установившееся отклонение по моменту, %	10	15
Точность поддержания скорости, %	0,1	1
Момент на минимальной скорости, %	150	30
Полоса пропускания контура момента, Гц	250	100
Полоса пропускания контура скорости, Гц	50	20

Таблица 3. Параметры двигателя 6ДВМ215S

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение
Номинальная мощность, Вт	P_H	7500
КПД, %	η	95,1
Номинальный момент, Нм	M	30
Частота вращения, об/мин	n	3000
Сопротивление статора, Ом	R_s	0,25
Индуктивность по оси d , мГн	L_d	1,1
Индуктивность по оси q , мГн	L_q	0,8
Магнитный поток ротора, Вб	K_e	0,17
Число пар полюсов	p	3
Инерция ротора, кг·м ²	J	0,01

Преобразователи МПЧ-380 обладают полным набором функций, свойственных современным ПЧ: управление электромагнитным тормозом, датчик интенсивности разгона и торможения, автоподхват скорости выбега, ПИ-регулятор технологического параметра, управление по дискретным и аналоговым сигналам, работа со всеми типами датчиков положения и скорости, вспомогательное программное обеспечение для настройки и контроля параметров. МПЧ-380 являются полноценной заменой импортных устройств и могут быть применены в системах специального назначения в составе электроприводов с синхронными и асинхронными двигателями любых производителей. Необходимо подчеркнуть, что преобразователи являются полностью отечественной разработкой, с применением 100% отечественных комплектующих, оригинальным программным обеспечением и в этом плане не имеют аналогов на российском рынке.

Литература

1. Bramerdorfer G., Cavagnino A., Vaschetto S. Cost-optimal machine designs fulfilling efficiency requirements: A comparison of IMs and PMSMs. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017.
2. Козярук А. Е., Рудаков В. В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. СПб: 2002.
3. An S.-L., Sun X.-D. Study on the Novel Generalized Discontinuous SVPWM Strategies for Three-Phase Voltage Source Inverters // IEEE Transactions on industrial informatics. 2013. Vol. 9. No. 2.
4. Piippo A., Hinkkanen M., Luomi J. Analysis of an Adaptive Observer for Sensorless Control of PMSM Drives. 32nd Annual Conference of Industrial Electronics Society, IECON 2005. 6–10 November 2005.
5. Chang Y.-C., Tzou Y.-Y. A New Sensorless Starting Method for Brushless DC Motors without Reversing Rotation. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007.