

УДК 621.313.17

А.Е.АНТОНОВ, докт.техн.наук, В.В.КИРИК, докт.техн.наук (Ін-т електродинаміки НАН України, Київ)

Інтелектуальна система регулювання швидкості обертання ротора бесконтактного магнітоелектрического двигуна

Представлено результати використання нечіткого логічного контролера при регулюванні обертів магнітоелектрических двигунів.

Наведено результати використання нечіткого логічного контролера при регулюванні обертів магнітоелектрических двигунів.

Применение интеллектуальных систем управления на основе современной микропроцессорной техники становится все более актуальным при решении различных задач управления и регулирования, в том числе и в электроприводе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей.

Бесконтактные магнитоэлектрические двигатели (БМД), рабочий поток в которых возбуждается постоянными магнитами ротора, находят все более широкое применение в самых разнообразных областях техники. Это бортовые системы летательных аппаратов, автотранспорт, бытовая техника, электроинструмент, медицинская техника, станкостроение, робототехника.

Широкое распространение БМД и постепенное вытеснение ими коллекторных двигателей постоянного тока обусловлено достоинствами магнитоэлектрической схемы построения, для которой характерны отсутствие затрат энергии на возбуждение магнитного потока, отсутствие механического коллектора и связанных с ним потерь, а также повышенные габаритная мощность, надежность и долговечность. Отличительной особенностью переходных процессов в бесфазовых электрических машинах с высококоэрцитивными постоянными магнитами является их малая длительность. Поэтому важным звеном электропривода, построенного на базе БМД, является система управления, от своевременной реакции которой зависит эффективность взаимодействия статора с ротором и, в конечном счете, качество регулирования и КПД привода.

Использование современных программных пакетов визуального моделирования позволяет в краткие сроки синтезировать имитационные математические модели на основе нечеткой логики и практически реализовать интеллектуальное управление БМД на основе современных микроконтрол-

леров. Имитационные модели позволяют максимально приблизить синтез системы управления к реальным физическим объектам, на которых имитируются и проверяются различные режимы работы системы управления совместно с двигателем.

Авторами разработана система управления бесконтактным магнитоэлектрическим двигателем с развивающимся номинальным значением момента $0,06 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и номинальной частотой вращения ротора 4000 об/мин.

Синтезу нечеткого логического контроллера для управления БМД предшествовало создание имитационной модели системы управления на основе классического ПИ-регулятора*. Детальное исследование и анализ динамических режимов модели электропривода при однократном скачкообразном, периодическом ступенчатом и линейном увеличении момента нагрузки с разными скоростями его нарастания позволили обобщить поведение двигателя в разных режимах и создать экспертную базу знаний, которая легла в основу синтеза нечеткого логического контроллера (НЛК).

Блок-схема модели системы управления с нечетким логическим контроллером показана на рис. 1. Блок *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM) имитирует трехфазный синхронный электродвигатель с намагниченным двухполюсным ротором. Блок *Inverter* имитирует инвертор для создания трехфазного напряжения питания импульсной формы, которое формируется шестью MOSFET-Diode ключами, обеспечивающими подключение в шесть этапов каждой пары из трех фазовых обмоток двигателя к источнику регулируемого постоянного напряжения *Controlled Voltage Source*. Управление 120-градусной коммутацией транзисторов инвертора осуществляется сигналами, формируе-

© Антонов А.Е., Кирик В.В., 2009

*) Антонов А.Е., Кирик В.В. Имитационное моделирование бесконтактного двигателя магнитоэлектрического типа с трехфазной обмоткой // Техн. електродинаміка. — 2008. — №3. — С. 52—55.

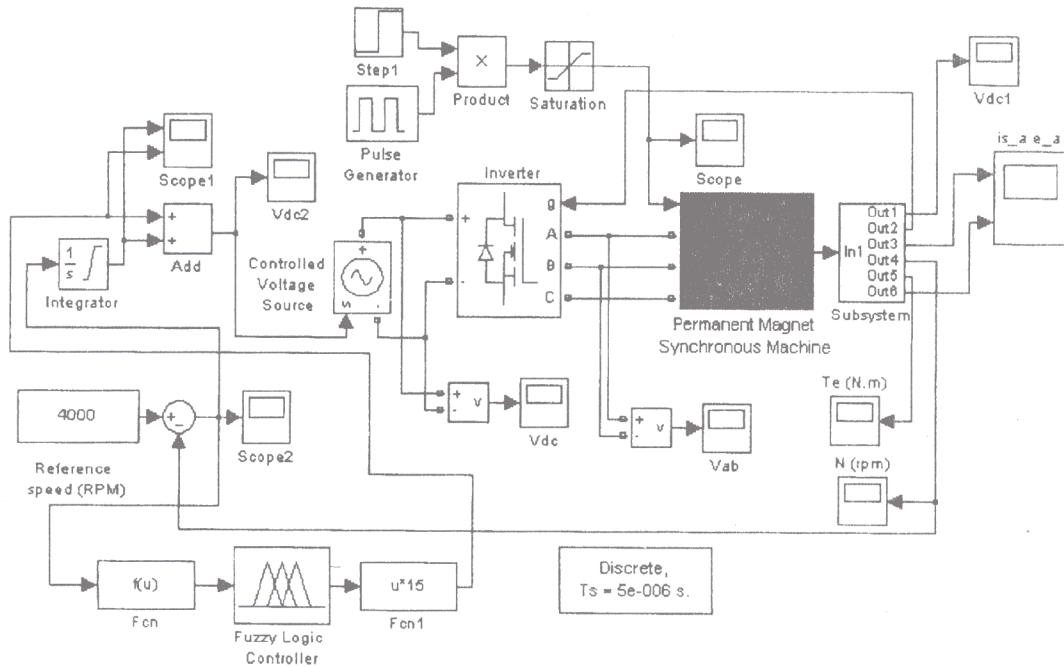


Рис. 1

мыми блоком *Subsystem* на основе напряжений трех датчиков Холла, регистрирующих магнитное поле ротора. Значение тока, протекающего через инвертор, определяется напряжением на выходе регулятора напряжения, ЭДС, активным сопротивлением и индуктивностью обмотки статора двигателя.

Момент внешней нагрузки электродвигателя имитируется блоками *Pulse generator*, *Step*, *Product* и *Saturation* на входе PMSM с дискретностью $T_s = 5 \cdot 10^{-6}$ с. Формирование постоянного напряжения питания шестиключевого моста инвертора в диапазоне 0...24 В выполняет блок *Controlled Voltage Source*, управление которым осуществляется с выхода блока *Add*. Этот блок суммирует сигналы управления нечеткого логического контроллера *Fuzzy Logic Controller* и классического интегрального регулятора *Integrator*.

Сигнал рассогласования для контроллера и И-регулятора вырабатывается, исходя из реального значения оборотов ротора и оборотов, заданных блоком *Reference speed*.

Функциональные блоки F_{cn} и F_{cn1} выполняют масштабирование соответственно входного и выходного сигналов НЛК.

В модель PMSM введены номинальное и максимальное значения развиваемого момента двигателя величиной соответственно 0,06 и 0,076 Н·м, номинальная частота вращения 4000 об/мин, а также осевой момент инерции ротора, коэффициент сухого и вязкого трения, электромеханическая и электромагнитная постоянные времени, величина потока возбуждения ротора, активное и индуктивное сопротивление обмотки статора, аналогичные принятым в упомянутой работе.

При имитации работы системы последовательно задавались два режима: разгон ротора до номиналь-

ных оборотов при номинальном развиваемом моменте без внешней нагрузки в интервале 0,1 с и последующая нагрузка двигателя внешним моментом.

В связи с тем, что существенной особенностью переходных процессов в бесконтактных электрических машинах с высококоэрцитивными постоянными магнитами является их малая длительность и низкая инерционность двигателя, качественное управление непосредственно НЛК без нарушения устойчивости системы осуществить довольно затруднительно. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшие показатели по управлению магнитоэлектрическим двигателем как количественного, так и качественного характера обеспечивает регулирующий элемент, состоящий из параллельно включенных нечеткого логического контроллера и интегрального регулятора.

Синтез нечеткого логического контроллера (НЛК) выполнен в лицензионном пакете *fuzzyTECH 5.71 Professional Edition*, исходя из экспертных знаний, полученных при моделировании магнитоэлектрического двигателя с классической системой ПИ-регулирования, выполненной в программном пакете *MATLAB 7.2*.

На рис. 2, а показано распределение функций принадлежности входной переменной N , а на рис. 2, б — распределение функций принадлежности выходной лингвистической переменной U нечеткого логического контроллера.

База знаний или нечеткой продукции для синтезированного НЛК составила всего четыре правила:

- 1 — Если N есть $n2$, то U есть $u2$;
- 2 — Если N есть $n1$, то U есть $u1$;
- 3 — Если N есть $p1$, то U есть $d1$;
- 4 — Если N есть $p2$, то U есть $d2$.

На рис. 3 показана передаточная характеристика нечеткого логического контроллера, из кото-

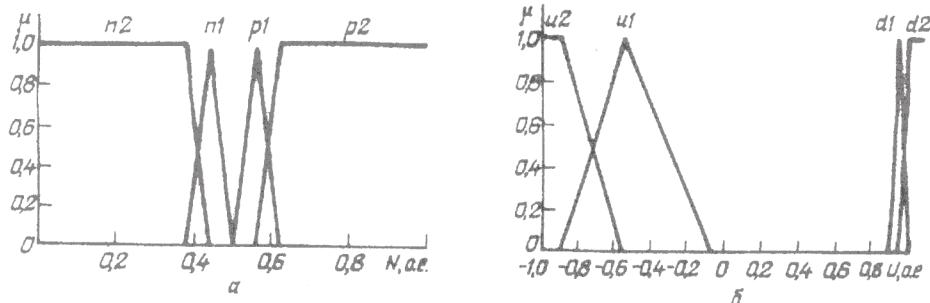


Рис. 2

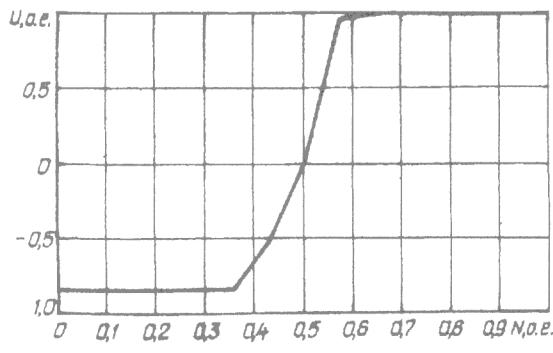


Рис. 3

рой видно, что коэффициент передачи контроллера по положительному отклонению (снижению оборотов) выше, чем по отрицательному (увеличению оборотов) при перерегулировании. Такая характеристика позволяет увеличить реакцию системы при нагруженном двигателе.

Применение нечеткого логического контроллера в системе управления БМД позволило качественно улучшить процесс управления. Основное внимание уделено анализу динамических режимов системы и определению основных качественных показателей работы двигателя, к которым относятся время переходного процесса и максимальное перерегулирование при однократном скачкообразном, периодическом ступенчатом и линейном увеличении момента нагрузки с разными скоростями его нарастания.

Как показали исследования, изменение характера возмущающего внешнего момента не вызывает существенного изменения кривой передаточной характеристики системы с нечетким контроллером в отличие от классического ПИ-регулирования.

При периодическом ступенчатом изменении момента нагрузки от нулевого значения до名义ального и обратно НЛК позволяет резко уменьшить провалы и всплески оборотов ротора во время изменения момента нагрузки, а также снизить их длительность.

На рис. 4 показаны графики переходного процесса при пульсирующем характере нагрузки с частотой 20 Гц при скорости вращения ротора 4000 и 1000 об/мин для классического ПИ-регулирования (рис. 4, а) и для нечеткого логического контроллера с интегральным регулятором (рис. 4, б). Нетрудно заметить, что использование НЛК суще-

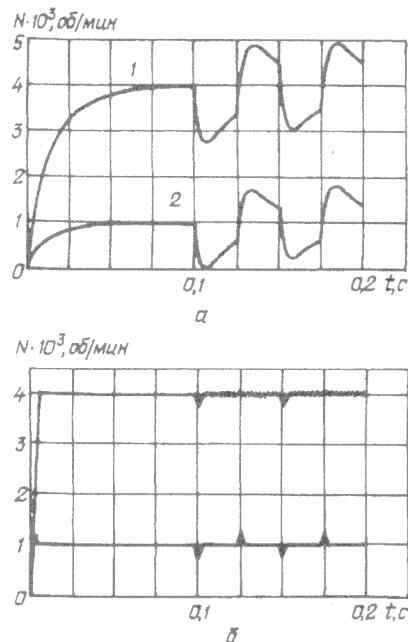


Рис. 4

ствительно меняет картину переходных процессов при регулировании оборотов вращения ротора.

На рис. 5 показана кривая напряжения питания инвертора, то есть напряжения на выходе управляемого источника напряжения, при пульсирующем с частотой 20 Гц характере нагрузки и скоростью вращения ротора 4000 об/мин. При изменении момента нагрузки система управления путем изменения частоты и скважности импульсов управления силовыми ключами источника управляемого напряжения устраняет отклонение скорости вращения ротора от заданного значения. Час-

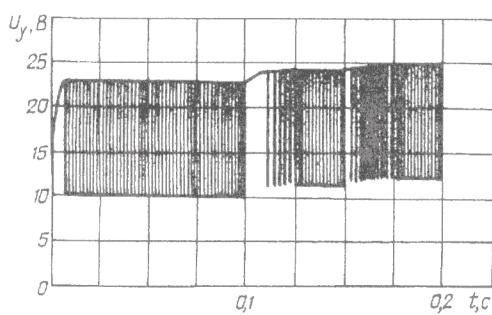


Рис. 5

стота колебаний сигнала управления изменяется в диапазоне от 3125 до 1500 Гц.

При использовании в управлении НЛК скорость линейного изменения момента нагрузки до его максимального значения практически не отражается на регулировочной характеристике оборотов двигателя, в то время как при классическом ПИ-регулировании наблюдается временное падение оборотов до некоторых установившихся значений, явно зависящих от скорости нарастания момента. В случае непрерывного линейного нарастания момента нагрузки время торможения ротора до полной остановки при использовании НЛК увеличивается в 1,3 раза.

Исследованиями установлено, что применение НЛК по сравнению с классическим ПИ-регулированием позволяет:

- уменьшить время разгона ротора до номинальных оборотов при пуске с 17,2 мс до 5,4 мс;
- уменьшить снижение оборотов ротора при скачкообразном возрастании момента нагрузки до уровня номинального с 800 до 140 об/мин при

одновременном уменьшении длительности снижения с 30 до 2,5 мс;

— снизить увеличение оборотов ротора при скачкообразном снижении момента нагрузки с уровня номинального до нулевого с 800 до 47 об/мин при одновременном уменьшении длительности выброса с 30 до 5,5 мс.

Таким образом, применение нечеткого логического контроллера в системе управления позволяет практически устранить девиацию скорости вращения ротора при возмущениях момента нагрузки и повысить устойчивость работы магнитоэлектрического двигателя.

Необходимо также отметить, что применение нечеткого логического контроллера в микропроцессорных системах управления позволяет при тех же аппаратных затратах, что и при классическом управлении, обеспечить более качественное регулирование параметров бесконтактных магнитоэлектрических двигателей.

Надійшла 29.10.08

УДК 631.372

П.Г.СТАХІВ, докт.техн.наук, Й.Р.СЕЛЕПІНА (Нац.ун-т "Львівська політехніка")

Макромоделювання елементів системи електропривода на прикладі асинхронного двигуна з діодним мостом у колі статора

В статті описується процес побудови математичної макромоделі вентильного електропривода змінного струму за експериментально-знятими значеннями переходних характеристик при різних режимах його роботи.

В статье описывается процесс построения математической макромодели вентильного электропривода переменного тока по экспериментально снятым значениям переходных характеристик при разных режимах его работы.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для дослідження компонент електромеханічних систем розроблено велику кількість методів математичного моделювання, кожен з яких характеризується ступенем складності побудови моделі та точністю отриманих результатів. Моделі, наприклад, у вигляді диференційних рівнянь в фазних чи інших координатах потребують врахування фізичних властивостей об'єктів і тому вимагають проведення великої кількості досліджень і експериментів для визначення внутрішніх параметрів системи [1]. Для спрощення таких моделей вводиться ряд при-

пушень і обмежень щодо опису фізичних процесів, що в деякій мірі впливає на їхню точність. Більш точні результати можна отримати за допомогою польових моделей. Однак ці моделі є надто складними і вимагають застосування складних процедур обробки даних при конкретній реалізації.

Застосування комп'ютерних засобів аналізу електромеханічних систем зумовило поширення дискретних макромоделей, що пов'язане з формою подання експериментальних вхідних даних, які звичайно є сукупністю дискретних значень певних змінних [2, 6].

© Стажів П.Г., Селепіна Й.Р., 2009