

УДК 621.313.17

А.Е.АНТОНОВ, докт.техн.наук, В.В.КИРИК, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

## Интеллектуальная система регулирования скорости вращения ротора бесконтактного магнитоэлектрического двигателя

*Представлены результаты использования нечеткого логического контроллера при регулировании оборотов магнитоэлектрических двигателей.*

*Наведено результати використання нечіткого логічного контролера при регулюванні обертів магнітоелектричних 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 беспазовых 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 короткие 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 развиваемым номинальным значением момента 0,06 Н·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. электродинамика. — 2008. — №3. — С. 52—55.

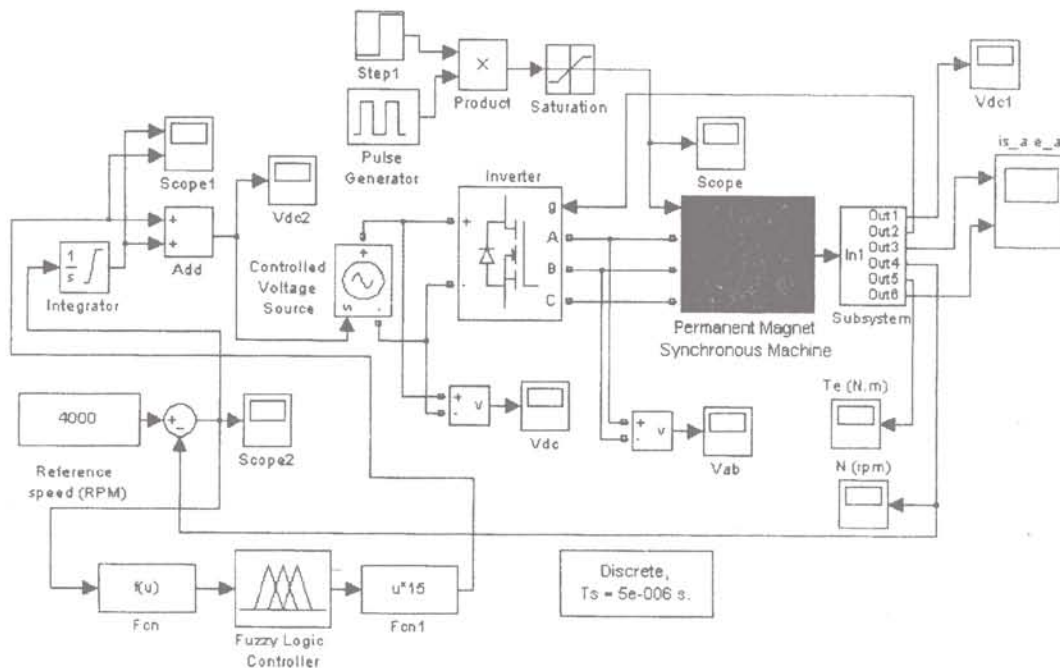


Рис. 1

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 Интегратора 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 беспазовых электрических машинах с высококоэрцитивными постоянными магнитами является их малая длительность и низкая инерционность двигателя, качественное управление непосредственно НЛК без нарушения устойчивости системы осуществлять 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  $p2$ , то  $U$  есть  $u2$ ;
- 2 — Если  $N$  есть  $p1$ , 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-

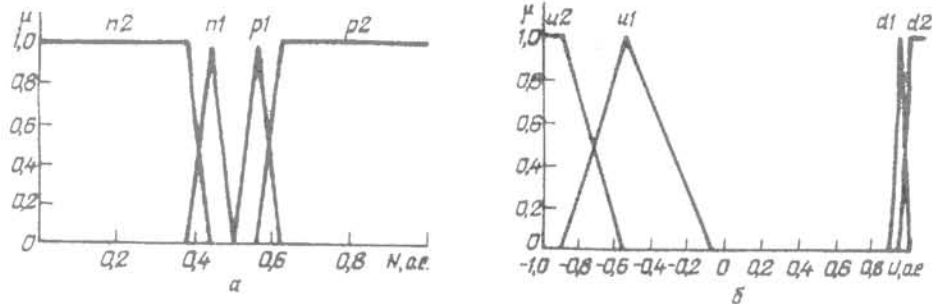


Рис. 2

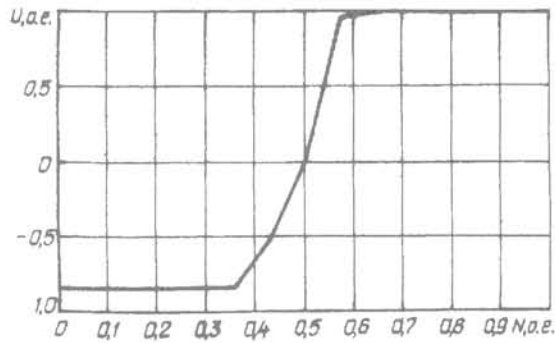


Рис. 3

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 номинального 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-

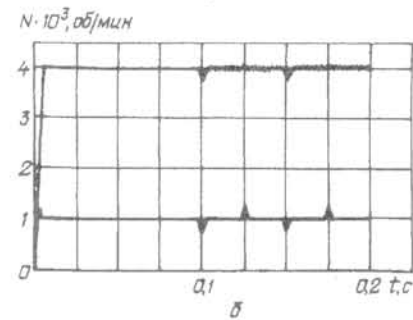
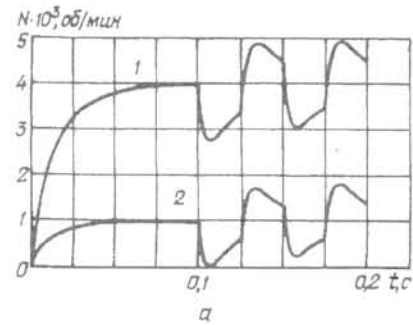


Рис. 4

ственно 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. Ча-

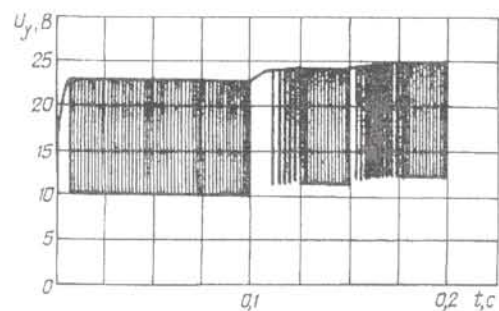


Рис. 5

стота коливань сигналу управління змінюється в діапазоні від 3125 до 1500 Гц.

При використанні в управлінні НЛК швидкість лінійного змінювання моменту навантаження до його максимального значення практично не відображається на регулювальної характеристиці оборотів двигача, в той час як при класическом ПИ-регулюванні спостерігається часовий падіння оборотів до деяких установившихся значень, явно залежаних від швидкості нарощання моменту. В випадку неперервного лінійного нарощання моменту навантаження час гальмування ротора до повної зупинки при використанні НЛК збільшується в 1,3 рази.

Дослідженнями встановлено, що застосування НЛК порівняно з класическим ПИ-регулюванням дозволяє:

- зменшити час розгону ротора до номінальних оборотів при пуску з 17,2 мс до 5,4 мс;
- зменшити зниження оборотів ротора при скачкообразном зрощанні моменту навантаження до рівня номінального з 800 до 140 об/хв при

одночасном зменшенні тривалості зниження з 30 до 2,5 мс;

- знизити збільшення оборотів ротора при скачкообразном зниженні моменту навантаження з рівня номінального до нульового з 800 до 47 об/хв при одночасном зменшенні тривалості вибура з 30 до 5,5 мс.

Таким чином, застосування нечіткого логіческого контролера в системі управління дозволяє практично усунути відхилення швидкості зворощання ротора при збуреннях моменту навантаження і збільшити надійність роботи магнітоелектрического двигача.

Необхідно також відзначити, що застосування нечіткого логіческого контролера в мікропроцесорних системах управління дозволяє при тих же апаратних затратах, що і при класическом управлінні, забезпечити більш якісне регулювання параметрів бесконтактних магнітоелектрических двигачей.

Надійшла 29.10.08

УДК 631.372

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

## Макромодельовання елементів системи електропривода на прикладі асинхронного двигача з діодним мостом у колі статора

*В статті описується процес побудови математичної макромоделі вентильного електропривода змінного струму за експериментальними значеннями перехідних характеристик при різних режимах його роботи.*

*В статті описується процес побудови математическої макромоделі вентильного електропривода 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-

пущень 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].

© Стахів П.Г., Селепіна Й.Р., 2009