

Кирик В.В., д.т.н., с.н.с.,
Головий Л.П., магистр
Академии муниципального управления,
г. Киев

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Представлены результаты использования нечеткого логического контроллера при регулировании скорости вращения ротора магнитоэлектрического двигателя

Висвітлені результати використання нечіткого логічного контролера при регулюванні швидкості обертання ротора магнітоелектричного двигуна

The outcomes of usage of the fuzzy logic controller are represented at regulating revolution of magnetolectric drives. Is synthesized of the fuzzy logic controller for control PMSM

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

Бесконтактные магнитоэлектрические двигатели, 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 так же 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 микроконтроллеров. 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.

Нами разработана система управления бесконтактным магнитоэлектрическим двигателем с развиваемым 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 [1]. 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 представлена 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, формируемыми 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 T_m PMSM с дискретностью $T_s = 5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Формирование постоянного напряжения питания шестиключевого моста инвертора в диапазоне 0...24В 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*.

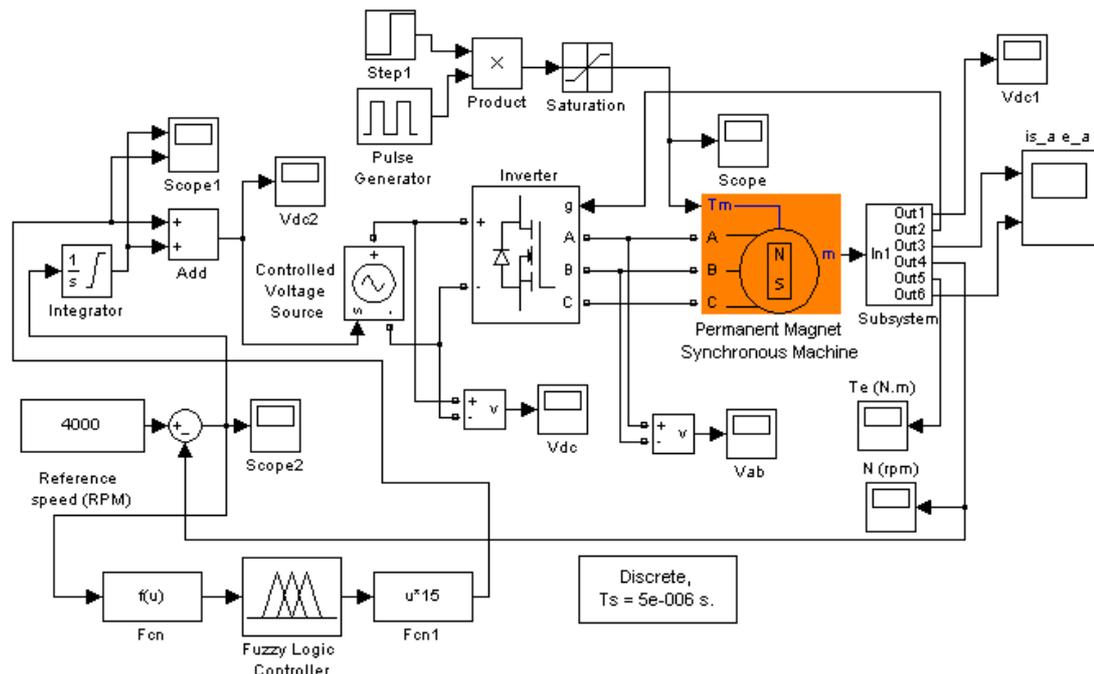


Рис.1

Сигнал рассогласования для контроллера и И-регулятора вырабатывается исходя из реального значения скорости вращения ротора и скорости вращения заданной блоком *Reference speed*.

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

В модель PMSM введены номинальное и максимальные 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 [1].

При имитации работы системы последовательно задавались два режима: разгон ротора до номинальной скорости вращения ротора при номинальном развиваемом моменте без внешней нагрузки в интервале 0,1с 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, то 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 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* [1].

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

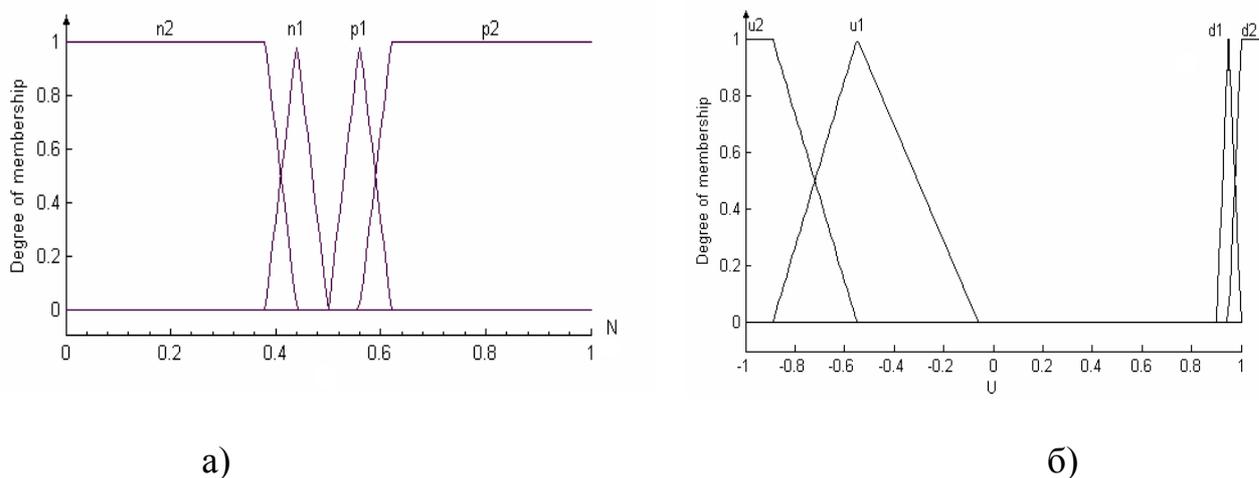


Рис.2

База знаний или нечеткой продукции для синтезированного нечеткого логического контроллера 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 представлена передаточная характеристика нечеткого логического контроллера. Из характеристики видно, что коэффициент передачи контроллера по положительному отклонению (снижению скорости вращения ротора) выше, чем по отрицательному отклонению (увеличению числа оборотов) при перерегулировании. Такая характеристика позволяет увеличить реакцию системы при нагруженном двигателе.

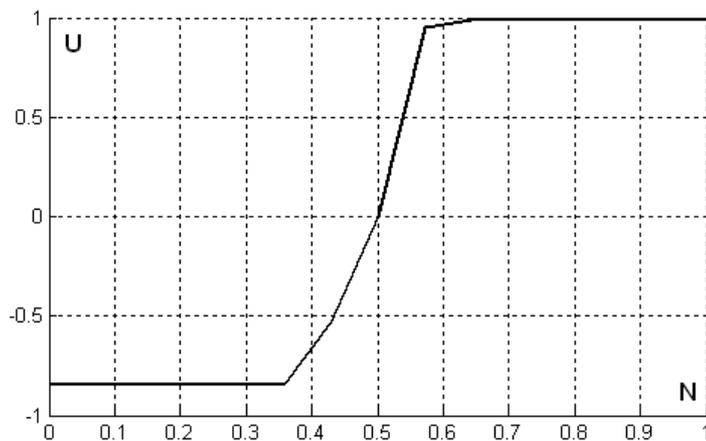


Рис.3

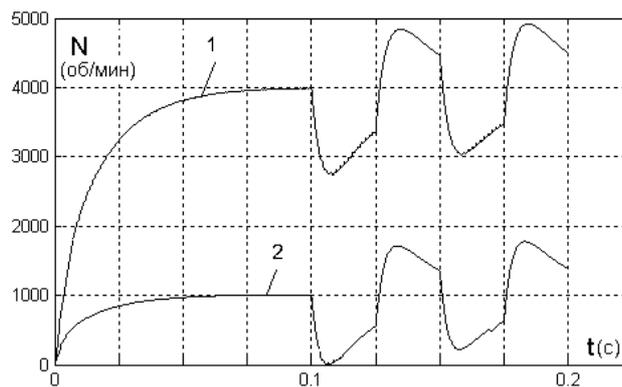
Применение нечеткого логического контроллера в системе управления бесконтактного магнитоэлектрического двигателя позволило качественно улучшить процесс управления. Основное внимание уделено анализу динамических режимов системы и определению основных качественных показателей работы двигателя. К таким показателям 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 [1].

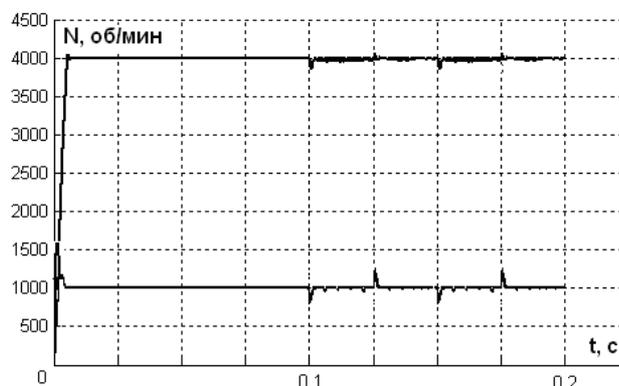
При периодическом ступенчатом изменении момента нагрузки от нулевого значения до номинального и обратно НЛК позволяет резко уменьшить провалы и всплески скорости вращения ротора во время изменения момента нагрузки, а также снизить их длительность.

На рис.4 представлены графики переходного процесса при пульсирующем характере нагрузки с частотой 20 Гц при скорости вращения ротора 4000 и 1000 об/мин для классического ПИ-регулятора (рис.4а) и для нечеткого логического контроллера с интегральным регулятором (рис.4б). Нетрудно заметить, что использование НЛК в системе управления двигателем существенно меняет картину переходных процессов при регулировании скорости вращения ротора в качественную сторону.

На рис.5 представлена кривая напряжения питания инвертора, то есть напряжения на выходе управляемого источника напряжения, при пульсирующем характере нагрузки с частотой 20 Гц 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. Частота колебаний сигнала управления изменяется в диапазоне от 3125 до 1500 Гц.



а)



б)

Рис.4

При использовании в управлении НЛК скорость линейного изменения момента нагрузки в пределах максимального его значения практически не отражается на регулировочной характеристике скорости вращения ротора двигателя, в то время как при классическом ПИ-регулировании наблюдается временное падение числа оборотов до некоторых установившихся значений, явно зависящих от скорости нарастания момента [1]. 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 номинальной скорости вращения ротора при пуске с 17,2 мс до 5,4 мс;
- уменьшить снижение скорости вращения 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 скорости вращения 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;

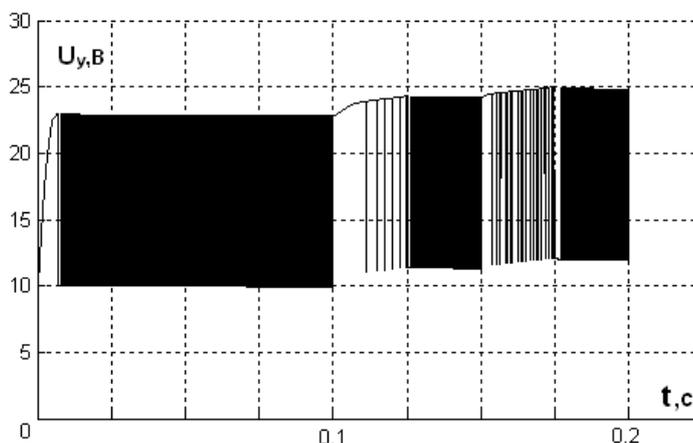


Рис.5

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.

Использованные источники информации:

1. Антонов А.Е., Кирик В.В. Имитационное моделирование бесконтактного двигателя магнитоэлектрического типа с трехфазной обмоткой // Техн. електродинаміка.-2008.- №3.- с.52-55.
2. Антонов А.Е., Кирик В.В., Головий Л.П. Регулирование оборотов бесконтактного электро-двигателя с постоянным магнитом ротора// Электропанорама.- 2008.-№6.-с.50-51

Рецензент: д.т.н. Гавриленко В.В.