

**ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
НЕЙРО-ФАЗЗИ РЕГУЛЯТОРОМ СКОРОСТИ И НЕЙРОСЕТЕВОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

А.А. ШИГАПОВ, Б.П. СМОЛЯКОВ

Казанский государственный энергетический университет

Рассматривается модифицированная система прямого управления моментом асинхронного двигателя (ПУМ АД) с применением нейросетевого блока идентификации параметров электропривода и нейро-фаззи регулятора скорости вращения ротора. Выявлены недостатки стандартной системы ПУМ АД и описан синтез нейросетевых элементов для модификации системы и устранения этих недостатков. Приведены результаты моделирования модифицированной системы ПУМ АД с нейросетевыми и нейро-фаззи компонентами.

Ключевые слова: прямое управление моментом, нейронные сети, фаззи логика.

Введение

Одной из наиболее актуальных задач в области электропривода является модификация существующих систем управления путем применения новых нетрадиционных методов и алгоритмов управления. Примером таких нетрадиционных методов является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) и фаззи логики. Данные средства управления имеют большой потенциал в повышении качественных характеристик системы управления электропривода. Система прямого управления моментом асинхронного двигателя (ПУМ АД) является одним из наиболее перспективных способов управления асинхронным двигателем. Однако недостатки системы, такие как пульсации электромагнитного момента, не могут быть в полной мере устранены существующими на данный момент средствами. В связи с этим поиск новых нетрадиционных методов и алгоритмов для устранения этих недостатков и дальнейшего повышения качественных характеристик системы является актуальной задачей в области электропривода. Несмотря на огромный потенциал, исчерпывающие исследования в области применения нетрадиционных методов управления в системе ПУМ до сих пор отсутствуют. Среди существующих можно выделить работу китайских исследователей [1], в которой описан синтез нейросетевого наблюдателя потокосцепления статора, изменяющегося в процессе работы электродвигателя из-за непостоянного текущего значения сопротивления. Другим примером применения ИНС в системе ПУМ является разработка, опубликованная в журнале *IJAREEIE* [2]. Ее авторы предлагают использовать ИНС в качестве идентификатора угла между потокосцеплениями статора и ротора, а также сектора, в котором на данный момент находится вектор потокосцепления статора. Вся эта информация необходима для выбора оптимальной комбинации ключей инвертора и для поддержания необходимых характеристик работы электропривода. В данной статье рассмотрена модифицированная система ПУМ АД с применением нейросетевой идентификации и нейро-фаззи регулятора скорости (НРС). Такая модификация системы ПУМ может стать промежуточным этапом к переходу на более сложные системы управления.

Система прямого управления моментом асинхронного двигателя

В основе принципа прямого управления моментом лежат два выражения: уравнение равновесия напряжений статорной цепи в неподвижной системе координат (1) и выражение для электромагнитного момента двигателя, записанного через потокосцепления статора и ротора в неподвижной системе координат (2):

$$\vec{U}_{sa-\beta} = R_s \vec{I}_{sa-\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{sa-\beta}, \quad (1)$$

$$M_d = \frac{3}{2} Z_p \frac{k_s}{\sigma L_r} (\psi_{sa} \psi_{r\beta} - \psi_{sa} \psi_{r\beta}). \quad (2)$$

Структурная схема системы ПУМ АД показана на рис. 1.

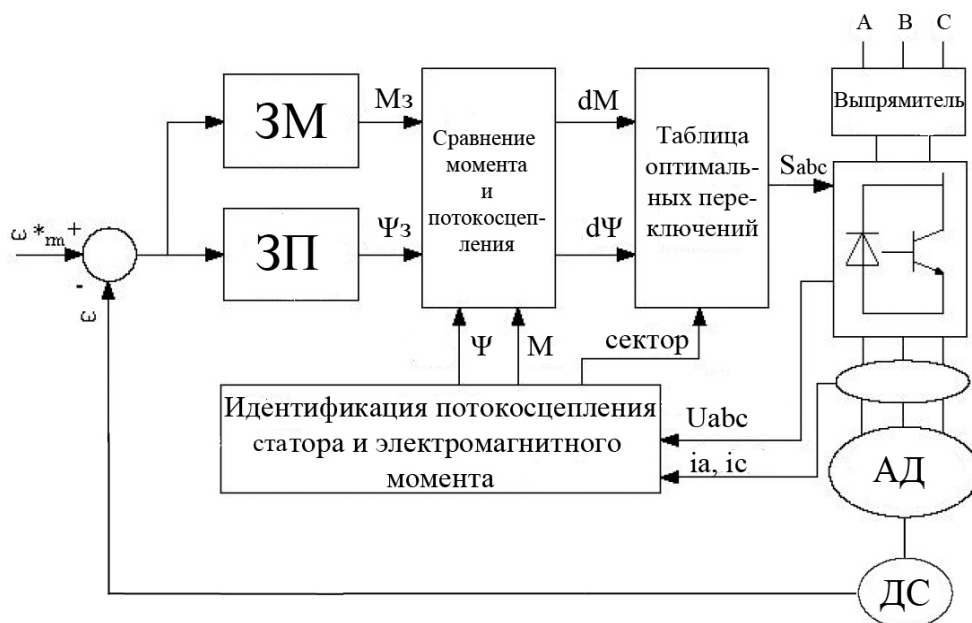


Рис. 1. Структурная схема системы ПУМ АД

Как и любой электропривод, данную структуру можно разделить на две части: силовую и информационную. Силовая часть включает в себя сеть, выпрямитель, автономный инвертор напряжения на *IGBT* транзисторах и асинхронный двигатель.

Информационная часть содержит: задатчики скорости, момента и потокосцепления, компараторы момента и потокосцепления, датчики скорости, токов и напряжения. Также к информационному каналу относится блок идентификации потокосцепления и электромагнитного момента.

Принцип действия данной системы: сигнал задатчика скорости ω_{rm} сравнивается с сигналом обратной связи ω , поступающим с датчика скорости. Далее разница этих сигналов поступает на задатчик момента и потокосцепления. Задающие сигналы момента и потокосцепления M_z и ψ_z попадают на соответствующие компараторы, где сравниваются с сигналами, поступившими с блока идентификации M и ψ . Выходной сигнал компаратора момента dM может принимать три значения: -1; 0; 1 – если величину нужно увеличить, держать на том же уровне или уменьшить, соответственно. Выходной сигнал компаратора потокосцепления статора $d\psi$ может принимать два значения: 0 или 1. Сигналы с компараторов, вместе с номером сектора нахождения вектора потокосцепления статора, попадают в таблицу оптимальных

переключений, где по этим трем сигналам выбирается необходимая комбинация ключей инвертора.

Результаты моделирования данной системы (рис. 2 сверху-вниз графики: тока фазы, скорости вращения ротора, электромагнитного момента, напряжения на выходе выпрямителя) показали, что система обеспечивает поддержание скорости на необходимом уровне, но обладает серьезным недостатком – большой пульсацией момента. Для устранения данных недостатков и повышения качественных характеристик системы была предложена модифицированная система ПУМ АД.

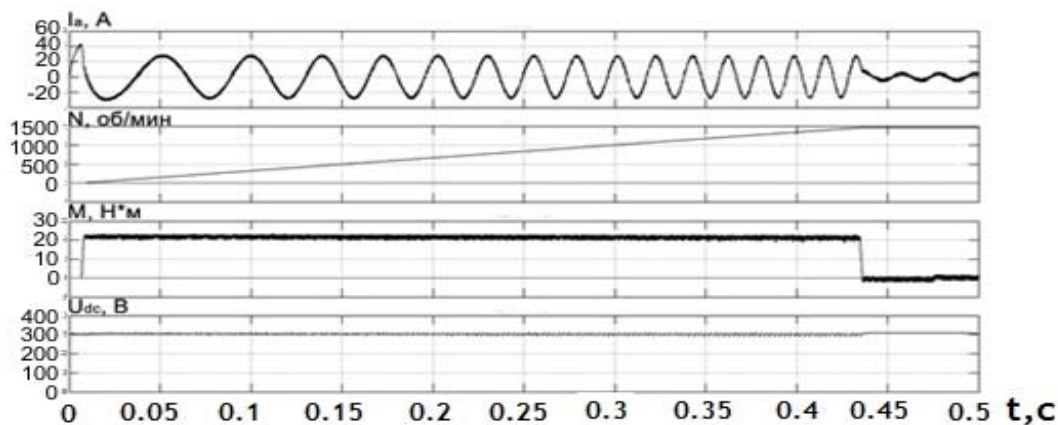


Рис. 2. Результаты моделирования системы ПУМ АД

Модифицированная система управления ПУМ АД

Главным отличием модифицированной системы ПУМ АД (рис. 3) является наличие нейросетевого блока идентификации (НБИ) параметров электропривода и нейро-фаззи регулятора скорости (НРС) вращения. Введение этих элементов в структуру ПУМ АД позволяет понизить влияние окружающей среды на работу системы управления (минимальное количество датчиков), повысить ее адаптивность и снизить пульсации электромагнитного момента.

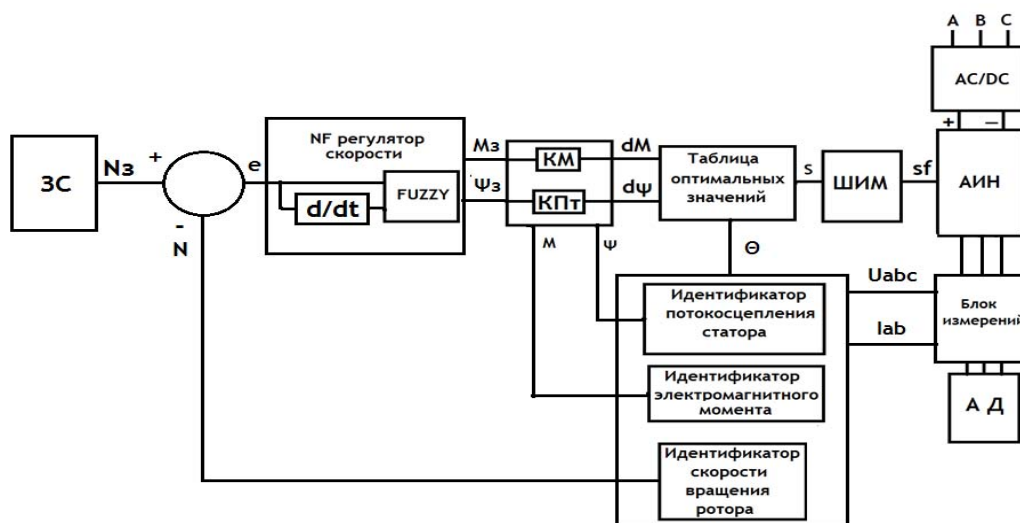


Рис. 3. Модифицированная система ПУМ АД

Как следует из названия НБИ, его задачей является определение параметров электропривода. Данный блок состоит из трех элементов: идентификаторов потокосцепления статора, электромагнитного момента и скорости вращения ротора. В качестве идентификаторов используются сети радиально-базисных функций (РБФ) с одним скрытым слоем нейронов. На вход ИНС идентификатора потокосцепления статора поступают как прямые, так и обратные значения тока и напряжения, а также задержанное на один шаг значение потокосцепления статора. Выходным является сигнал потокосцепления статора, который далее поступает на ИНС идентификатора скорости вращения ротора и компаратор потокосцепления КП. В случае ИНС идентификатора электромагнитного момента, кроме сигналов тока и напряжения, на него поступает задержанный на один шаг сигнал электромагнитного момента. Выходное значение также поступает на компаратор момента КМ и ИНС идентификатора скорости вращения ротора. Последний обладает наиболее сложной структурой, предполагающей 9 входных сигналов: прямые и обратные сигналы тока, напряжения, потокосцепления статора и электромагнитного момента, а также задержанный сигнал скорости вращения ротора.

Обучение ИНС идентификаторов осуществлялось в среде *Matlab* с использованием средств библиотеки *Neural Network Toolbox*. Для обучения каждого из элементов использовалось порядка миллиона наборов входных и соответствующих им выходных значений. Максимальное время обучения составило 35,5 часа – для идентификатора электромагнитного момента.

Точность идентификации на уровне математического моделирования составила: для ИНС идентификатора потокосцепления статора – 99,99%, для идентификатора скорости вращения – 100%, а для идентификатора момента – 99,97%. Снижение точности идентификации в случае с идентификатором момента происходит в результате значительной пульсации функции. Также результатом обучения идентификаторов стала значительная генерализация или обобщение данных – эта характеристика позволяет идентификатору не только определять выходные значения функции по величинам, отсутствующим в обучающей выборке, но и значительно повысить адаптивность системы, убирая шумы и снижая пульсации определяемого параметра.

Результаты моделирования системы ПУМ АД с нейросетевым блоком идентификации показаны на рис. 4. На рисунке изображена отсекаемая амплитуда пульсаций электромагнитного момента. Т.е. уменьшение амплитуды пульсаций электромагнитного момента, достигнутое за счет применения ИНС идентификатора. На основе полученного графика электромагнитного момента можно наблюдать, что амплитуда пульсации этой величины снижается на 50%. Такое снижение позволяет в значительной степени повысить точность регулирования и, соответственно, эффективность управления электроприводом.

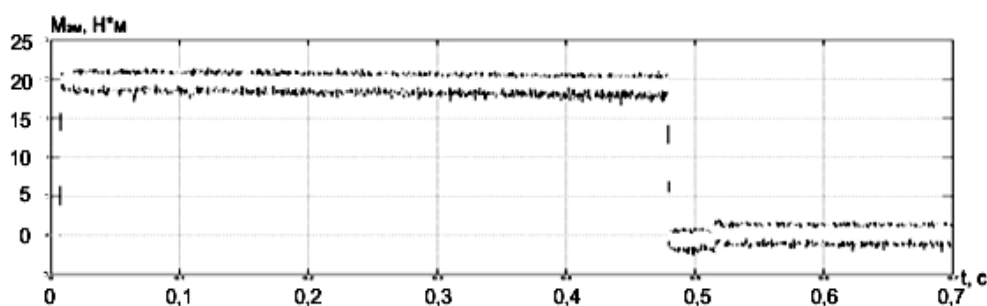


Рис. 4. Снижение амплитуды пульсаций электромагнитного момента

Нейро-фаззи регулятор скорости

Вторым дополнением модифицированной системы ПУМ АД является НРС. Он представляет собой ИНС, обученную на основе фаззи ПИ-регулятора скорости вращения ротора. Фаззи регулятор скорости является ПИ-регулятором с корректировкой пропорционального и интегрального коэффициентов во время работы. Как видно из рис. 3, на вход регулятора подается разница между задающим значением скорости и ее производная (скорость изменения разницы).

Работу данного регулятора можно разбить на три этапа: фаззификация, фаззи воздействие и дефаззификация.

На первом этапе входные величины масштабируются и им присваиваются лингвистические переменные. Для фаззи регулятора скорости в зависимости от разницы скоростей были приняты следующие лингвистические переменные:

NegativeBig (NB) – ошибка большая отрицательная;

NegativeMedium (NM) – ошибка средняя отрицательная;

NegativeSmall (NS) – ошибка малая отрицательная;

ZeroOrder (ZO) – отсутствие ошибки;

PositiveSmall (PS) – ошибка малая положительная;

PositiveMedium (PM) – ошибка средняя положительная;

PositiveBig (PB) – ошибка большая положительная.

Для скорости изменения разницы достаточна градация по трем степеням: отрицательная (*N*), положительная (*P*), неизменная (*ZO*).

Для этапа фаззи воздействия была составлена таблица правил, согласно которой для входных лингвистических переменных происходит соответствующий выбор выходных переменных.

Таблица

Правила выбора лингвистических переменных

dK_p/dK_i		de/dt		
		<i>N</i>	<i>ZO</i>	<i>P</i>
<i>e</i>	<i>NB</i>	<i>B/ZO</i>	<i>B/ZO</i>	<i>B/ZO</i>
	<i>NM</i>	<i>M/S</i>	<i>M/S</i>	<i>M/M</i>
	<i>NS</i>	<i>S/M</i>	<i>S/M</i>	<i>M/B</i>
	<i>ZO</i>	<i>M/B</i>	<i>B/B</i>	<i>B/B</i>
	<i>PS</i>	<i>S/M</i>	<i>S/M</i>	<i>M/B</i>
	<i>PM</i>	<i>M/S</i>	<i>M/S</i>	<i>M/M</i>
	<i>PB</i>	<i>B/ZO</i>	<i>B/ZO</i>	<i>B/ZO</i>

Таким образом, на третьем этапе работа происходит с выходными лингвистическими переменными. На этапе дефаззификации выходные лингвистические переменные преобразуются в числа по пользовательским функциям.

При этом итоговое вычисление значений коэффициентов Π и I происходит по методу Мамдани [3], по следующим формулам:

$$K_p = 5 + 0,8 \cdot (\Delta K_p - 2,5),$$

$$K_i = 0,0125 + 0,003 \cdot (\Delta K_i - 2,5),$$

где ΔK_p и ΔK_i – числа, получаемые после дефаззификации.

Для получения обучающей выборки данных для ИНС было проведено моделирование фаззи регулятора скорости в среде *Matlab Simulink* с использованием библиотеки *Fuzzy Logic Toolbox*.

Также стоит упомянуть, что коэффициенты масштабирования перед фаззификацией и дефаззификацией подбираются вручную. При этом от коэффициентов

на входе зависит чувствительность регулятора, а от выходных – устойчивость его работы.

На основе выборки, полученной после моделирования фаззи регулятора, был обучен NF -регулятор, представляющий собой РБФ сеть с семью нейронами в скрытом слое и сигналами e и de/dt в качестве входных значений.

Для демонстрации преимуществ NF -регулятора по сравнению с обычным ПИ-регулятором было проведено моделирование системы ПУМ АД с данными регуляторами. Результаты моделирования показаны на рис. 5.

По данным результатам видно, что применение NF -регулятора не только позволяет ускорить переходный процесс, но также и уменьшить перерегулирование. Время, за которое ЭП выходит в установившийся режим при использовании обычного ПИ-регулятора, составляет 0,75с. При использовании NF -регулятора привод переходит в установившийся режим за 0,5 с, что в полтора раза быстрее.

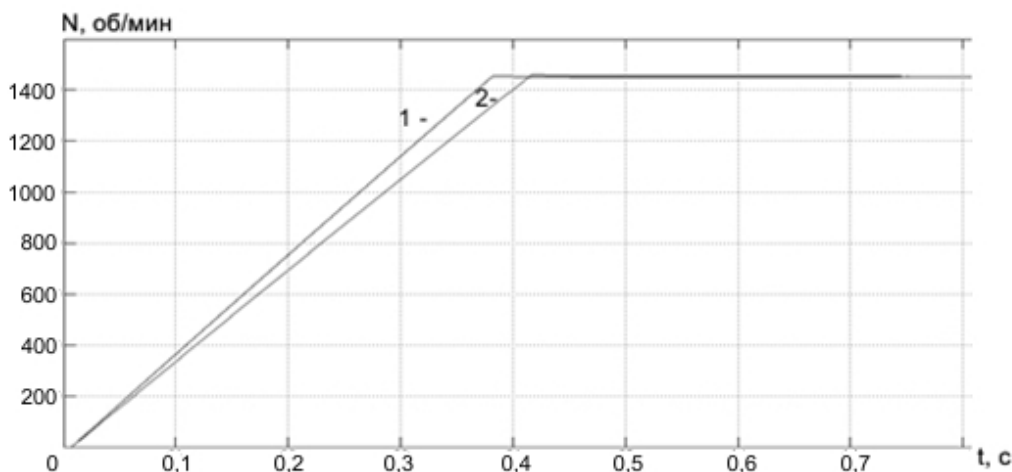


Рис. 5. Сравнение переходного процесса модифицированной и стандартной систем ПУМ АД

Выводы

Применение фаззи регулятора скорости вращения ротора позволяет повысить качество и скорость переходного процесса. В свою очередь, совмещение фаззи регулятора с ИНС позволяет повысить скорость работы самого регулятора, а также повысить его адаптивность за счет обобщения данных. Полученные результаты моделирования модифицированной системы ПУМ АД с применением НБИ и НРС позволяют утверждать, что данная система обладает рядом преимуществ: меньшей пульсацией электромагнитного момента, повышенной адаптивностью и высокой точностью идентификации параметров электропривода. Эти преимущества делают возможным применение данной системы в прецизионных электроприводах с переменными нагрузками и открывают пути для дальнейшего повышения качественных характеристик электроприводов и их систем управления.

Summary

We considered a modified system for a direct control of induction motor torque using a neural network unit for identification of electrical drive parameters. A number of disadvantages for the standard torque control system were identified. We described neural network element synthesis, in order to modify the system and overcome these

disadvantages. Our modeling results for the modified system with neural network and neural-fuzzy components are presented.

Keywords: Direct torque control, neural networks, fuzzy logic.

Литература

1. Wang Ping, Li Bin, Huang Ruixiang, Li Guidan. Diangong jishu xuebao Trans. China Electrotech. Soc. 2003. 18, № 2, P.5-8
2. Kusuma Gottapu1 ,YV Prashanth 2,P Mahesh3 , Y Sumith. Simulation of DTC IM Based on PI& Artificial Neural Network Technique. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 2, Issue 7, July 2013
3. Mamdani E.H. and Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // Int. J. Man-Mach. Stud. 1975. Vol. 7. P. 1-13.

Поступила в редакцию

25 декабря 2014 г.

Шигапов Айрат Альмирович – магистр кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (ПАЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(906)3267618. E-mail: new-about@yandex.ru.

Смоляков Борис Петрович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Приборостроение и автоматизированный электропривод» (ПАЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(987)4033729. E-mail: bsmolyakov@yandex.ru.