

5. Ilyasov B.G., Degtyareva I.V., Makarova E.A., Kartasheva T.A. Intellectual'nye algoritmy prinjatija reshenij pri upravlenii investicionnym processom makroekonomicheskoy sistemy [Intelligent algorithms for decision making in the management of the investment process of macroeconomic system]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2011, vol. 6-2, no. 138, pp. 116-122.
6. Makarova E.A. Dinamicheskiye modeli funktsionirovaniya ekonomicheskikh agentov i ikh vzaimodeystviya v ramkakh vosproizvodstvennogo protsessa s uchetom zapasov kapitala [Dynamic models for economic agents operation and interaction under reproduction process adjusted for capital stocks] *Informacionnye tehnologii*, 2015, no. 2, pp. 164-176. doi: 10.18469/ikt.2015.13.2.09.
7. Makarova E.A. Formirovanie scenariy upravleniya povedeniem sektorov jekonomiki na osnove dinamicheskoy modeli makroekonomicheskogo krugoborota [Formation of scenarios managements of behaviour of sectors of economy on the basis of dynamic model macroeconomic circle]. *Vestnik UGATU*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 136-147.
8. Makarova E.A. Programmnyy kompleks dlya formirovaniya bazy eksperimentalnykh dannykh po rezultatam imitatsionnogo modelirovaniya [Software for forming base of experimental data based on simulation results]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*, 2009, no. 6, pp. 85-88.
9. Pavlovskij Ju.N., Belotelov N.V., Brodskij Ju.I. *Imitacionnoe modelirovanie* [Simulation modelling]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 240 p.
10. Demidova L.A., Kirakovskiy V.V., Pylkin A.N. *Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Decision-making under uncertainty]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2012. 288 p.
11. Kokhonen T. *Samoorganizuyushchiesya karty* [Self-organizing maps]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008. 655 p.
12. Kulaichev A.P. *Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh* [Methods and tools for complex data analysis]. Moscow, FORUM: INFRA-M Publ., 2013. 312 p.

Received 12.09.2016

УДК 62.523

РАЗРАБОТКА ВЕЙВЛЕТ-НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЛЕРА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Червяков Н.И., Колдаев А.И.

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ

E-mail: chervyakov@yandex.ru

В статье представлен вейвлет-нечеткий контроллер в системе векторного управления электромагнитным моментом трехфазного асинхронного двигателя, который удовлетворяет задаче регулирования скорости в замкнутой системе управления. Схема управления с вейвлет-нечетким контроллером исследована при различных динамических условиях эксплуатации. Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенного контроллера по сравнению с традиционным ПИ-контроллером.

Ключевые слова: дискретное вейвлет-преобразование, нечеткая логика, асинхронный двигатель, векторное управление, надежность

Введение

Асинхронные двигатели (АД) широко применяются в промышленности. Это обусловлено их высокой надежностью, простотой конструкции, относительно низкой стоимостью и невысокими требованиями к обслуживанию. Тем не менее асинхронные двигатели сложны из-за нелинейности их параметров. В частности, сопротивление ротора и следовательно постоянная времени ротора изменяются в зависимости от условий эксплуатации. Таким образом, повышение качества управления АД остается актуальной проблемой. Однако с развитием методов векторного

управления АД стали главными кандидатами для использования в приложениях с высокой производительностью [1]. Эффект развязки каналов потокосцепления и момента двигателя приводит к возможности независимого регулирования магнитного потока и электромагнитного момента, как при управлении двигателем постоянного тока с независимым возбуждением. Несмотря на свои преимущества, метод векторного управления имеет недостатки в виде чувствительности к изменениям параметров двигателя, таких как постоянная времени ротора и неточных измерений магнитного потока.

В задачах регулирования скорости двигателей в основном используются традиционные ПИ- и ПИД-контроллеры. Несмотря на их простоту, эти контроллеры очень чувствительны к шумам датчиков, изменению параметров двигателя, нагрузке, сигналам задания и другим факторам неопределенности. Кроме того, эффективность этих контроллеров меняется в зависимости от условий эксплуатации. Таким образом, параметры управления этих контроллеров не являются адаптивными. К тому же построение методов управления зависит от точности математической модели системы. Но зачастую построение точной математической модели системы затруднено из-за наличия неопределенных и случайных изменений параметров двигателя, таких как насыщение, колебания температуры и других возмущений.

В последнее десятилетие интенсивно проводятся исследования в разработке и реализации нечетко-логических контроллеров (НЛК), нейросетевых контроллеров (НСК) и гибридных контроллеров для различных областей применения электропривода [2-3].

НЛК является самым простым из всех интеллектуальных контроллеров в системах управления скоростью асинхронного двигателя [3]. Тем не менее НЛК испытывают трудности в определении соответствующих законов управления и настройки параметров функций принадлежности в соответствии с изменениями, происходящими в системе. С другой стороны, НСК имеют возможность адаптироваться к изменениям в окружающей среде управления, используя входы и выходы системы. При этом не требуется точная модель системы. Но для синтеза НСК необходимо построение структуры управления, которая включает в себя выбор структуры нейронной

сети, весовых коэффициентов и функций активаций. Сложность выбранной структуры нейронной сети представляет собой компромисс между высокой надежностью управления и возможностью расчета алгоритма управления в режиме реального времени. Гибридные нейро-нечеткие контроллеры (ННК) сочетают в себе способность к обучению, присущую нейронным сетям, и высокую скорость вычислений, характерную для нечетких систем управления. Однако определение оптимальной нейросетевой структуры для асинхронных двигателей остается актуальной задачей.

Кроме того, наряду с применением интеллектуальных методов, таких как нейронные сети и нечеткая логика, существует новое направление в исследованиях по применению теории вейвлет-преобразований в построении систем управления электроприводов. В некоторых исследованиях эффективные результаты дает сочетание преимуществ вейвлет-преобразований и нейронных сетей [2; 4-5]. Тем не менее очень мало исследований посвящено сочетанию преимуществ вейвлет-преобразований и нечеткой логики для регулирования скорости асинхронных приводов.

В данной работе предлагается новый вейвлет-нечеткий контроллер для управления скоростью асинхронного электропривода. Предлагаемый контроллер может использоваться при управлении электродвигателем в условиях неопределенности и ограниченной информации о параметрах двигателя. Оценка эффективности разработанного контроллера проводилась в сравнении с ПИ-контроллером. Предложенная схема управления повышает надежность системы при перенапряжениях и уменьшает время переходных процессов.

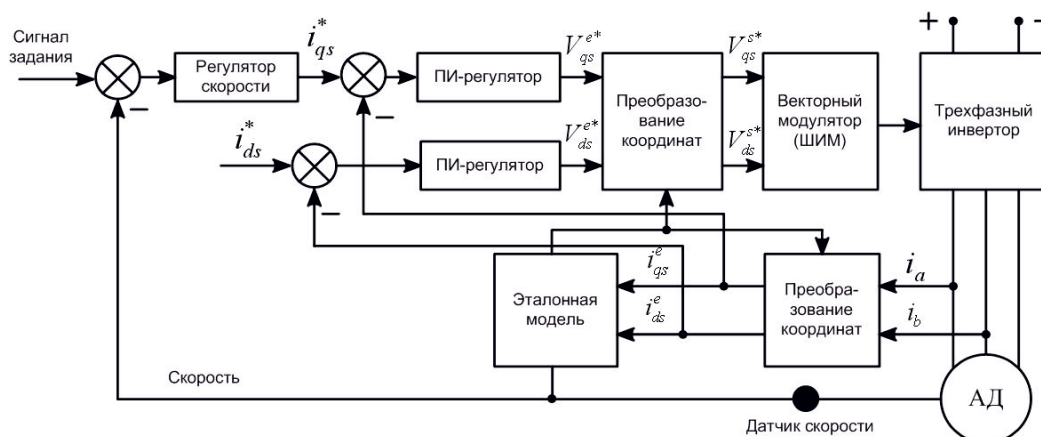


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем

Система векторного управления

На рис. 1 представлена структурная схема системы векторного управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором [1]. Сигнал задания скорости двигателя сравнивается с измеренной скоростью и формируется сигнал ошибки по скорости. Сигнал ошибки подается в качестве входа на регулятор скорости, который генерирует сигналы составляющих токов крутящего момента i_{qs}^* . Эти сигналы сравниваются с соответствующими составляющими тока, формируемыми в результате преобразования токов статора. Соответствующие сигналы ошибки поступают на ПИ-регуляторы, которые генерируют сигналы напряжения во вращающейся системе координат V_{ds}^* и V_{qs}^* . Эти сигналы напряжения используются для формирования соответствующих импульсов широтно-импульсного модулятора (ШИМ). Выходы ШИМ являются управляющими сигналами трехфазного инвертора.

Вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование является формой представления сигнала [6], которая не меняет информацию, несомую сигналом, а обеспечивает частотно-временное представление, локализирующее его частотные компоненты по временной шкале. Вейвлет-преобразование может иметь несколько уровней разложения – каждый такой уровень состоит из аппроксимирующей и детализирующей составляющих сигнала.

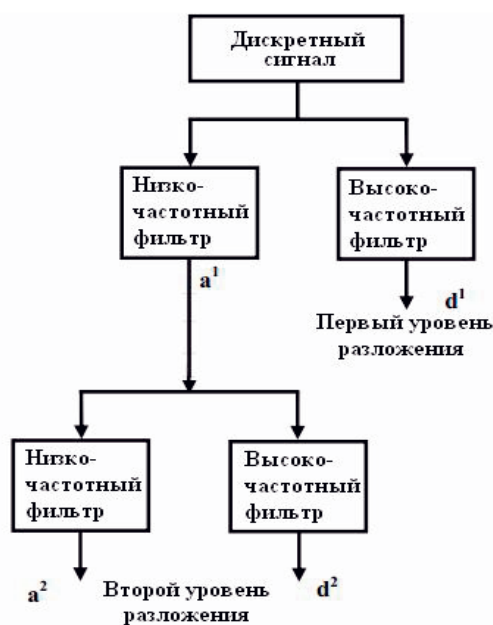


Рис. 2. Дерево дискретного вейвлет-разложения сигнала

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) реализуется каскадом низкочастотных и высокочастотных фильтров (см. рис.2). Выходной сигнал низкочастотного фильтра несет аппроксимирующую составляющую a^1 сигнала на первом уровне разложения. Выходной сигнал высокочастотного фильтра – детализирующий коэффициент d^1 сигнала на первом уровне разложения. Коэффициенты a^1 и d^1 представляются в виде [6]:

$$a^1[n] = \sum_{k=0}^{N-1} g[k]x[n-k]; \quad (1)$$

$$d^1[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k]x[n-k]. \quad (2)$$

Аппроксимирующие коэффициенты a^1 первого уровня разложения являются входным сигналом для следующей пары фильтров, которые формируют аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты второго уровня длиной $N/2$. Процесс фильтрации продолжается до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень разложения.

Регулирование скорости на основе вейвлет-преобразований

В процессе работы все физические системы подвергаются воздействию различных типов постороннего сигнала или шума. Поэтому при проектировании необходимо обеспечить нечувствительность системы к воздействию шума. На практике возмущения и сигналы задания находятся в низкочастотной части, в то время как шумы с датчиков сосредоточены в высокочастотной части сигналов. В этих условиях, контроллер на основе вейвлетов способен к эффективному разделению сигналов в различных частотных диапазонах.

ПИД-контроллер описывается уравнением:

$$u = k_p e + k_i \int e dt + k_d \frac{de}{dt}, \quad (3)$$

где k_p , k_i , k_d – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие; e – сигнал ошибки. С точки зрения информации, пропорциональная и интегральная составляющие несут низкочастотную информацию сигнала ошибки, которая соответствует статической характеристике контроллера, а дифференциальная составляющая охватывает высокочастотную часть сигнала ошибки, которая соответствует динамической характеристике контроллера.

Дискретное вейвлет-преобразование выполняет те же операции разложения сигнала на низкочастотные (аппроксимирующие) и высо-

кочастотные (детализирующие) коэффициенты разных уровней разложения. Эта особенность вейвлет-преобразования может быть использована при разработке вейвлет-контроллера. Сигнал управления вейвлет-контроллера рассчитывается по детализирующим и аппроксимирующим коэффициентам вейвлет-преобразования [7]:

$$u_w = k_{d^1} e_{d^1} + k_{d^2} e_{d^2} + \dots + k_{d^N} e_{d^N} + k_{a^N} e_{a^N}, \quad (4)$$

где $e_{d^1}; e_{d^2} \dots e_{d^N}$ соответствуют детализирующим компонентам сигнала ошибки; e_{a^N} – аппроксимирующие коэффициент сигнала ошибки. Коэффициенты усиления $k_{d^1}; k_{d^2} \dots k_{d^N}$ используются для настройки высокочастотных и среднечастотных компонент сигнала ошибки. Коэффициент k_{a^N} необходим для настройки низкочастотной составляющей сигнала ошибки.

Применительно к электроприводу сигналы задания и возмущений являются низкочастотными сигналами, а шумы датчиков – высокочастотными. Таким образом, коэффициенты, соответствующие низкочастотным компонентам сигнала ошибки, могут быть использованы для отработки возмущений и сигналов задания. Коэффициенты среднечастотного диапазона сигнала ошибки приносят в систему эффект демпфирования и могут быть использованы для улучшения переходной характеристики. Коэффициенты, соответствующие высокочастотным компонентам сигнала ошибки, могут быть ограничены минимальным значением для исключения влияния шума на систему.

Структура вейвлет-контроллера для управления скоростью АД представлена на рис. 3. С помощью дискретного вейвлет-преобразования сигнал ошибки разлагается до второго уровня. Разложенные сигналы перемножаются с соответствующими коэффициентами и, суммируясь вместе, формируют сигнал управления u_w :

$$u_w = k_{d^1} e_{d^1} + k_{d^2} e_{d^2} + k_{a^2} e_{a^2}. \quad (5)$$

Сигнал u_w используется как значение тока i_{qs}^* в векторном управлении асинхронным приводом. Коэффициент усиления k_{a^2} , соответствующий низкочастотной компоненте сигнала ошибки, может иметь большие значения для подавления возникающих возмущений и уменьшения времени переходного процесса. Коэффициент усиления k_{d^2} , представляющий среднечастотные компоненты сигнала ошибки, в течение установившегося режима работы АД для уменьшения статической ошибки должен иметь большое зна-

чение. Аналогично коэффициент усиления k_{d^1} , соответствующий высокочастотной компоненте сигнала ошибки, может использоваться во время переходного процесса для улучшения переходной характеристики и уменьшения перерегулирования системы привода, что дает возможность производить плавную регулировку скорости АД, а в течение установившегося режима может быть ограничен.

Структура и алгоритм работы вейвлет-нечеткого контроллера

Структура системы управления на основе предлагаемого вейвлет-нечеткого контроллера показана на рис.4. Она включает в себя блок нечеткой логики, блок дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) и эталонную модель [8]. Эталонная модель определяет желаемые динамические характеристики двигателя. Она выбирается по критерию максимальной производительности электропривода и с целью ограничения чрезмерного управляющего воздействия и перенапряжений. Для системы векторного управления асинхронным двигателем эталонная модель может быть аппроксимирована апериодическим звеном второго порядка:

$$W_{\text{АД}}(s) = \frac{a}{s^2 + bs + a}, \quad (6)$$

где значения a и b определяются параметрами асинхронного двигателя.

Измеренная скорость двигателя ω_r сравнивается с выходным значением эталонной модели ω'_r . Разница между этими значениями представляет собой сигнал ошибки e_ω . Далее сигнал ошибки e_ω поступает на блок нечеткой логики.

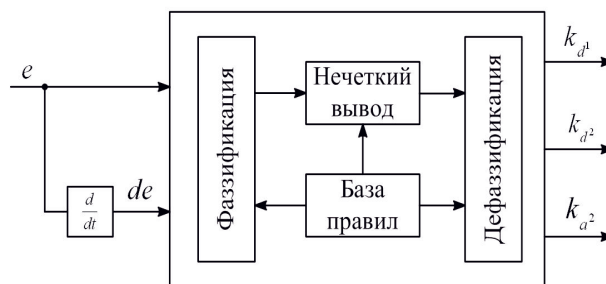


Рис. 5. Внутренняя структура нечетко-логической части контроллера

Структура нечетко-логической части контроллера показана на рис.5. Она состоит из блоков фаззификации, нечетких правил (база правил), нечеткого вывода и дефаззификации.

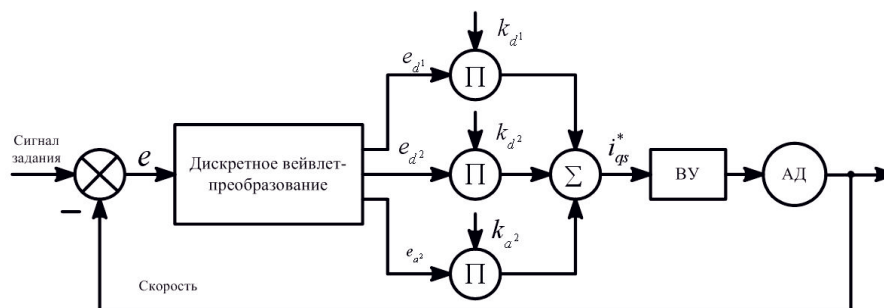


Рис. 3. Структура вейвлет-контроллера в системе векторного управления (ВУ) АД

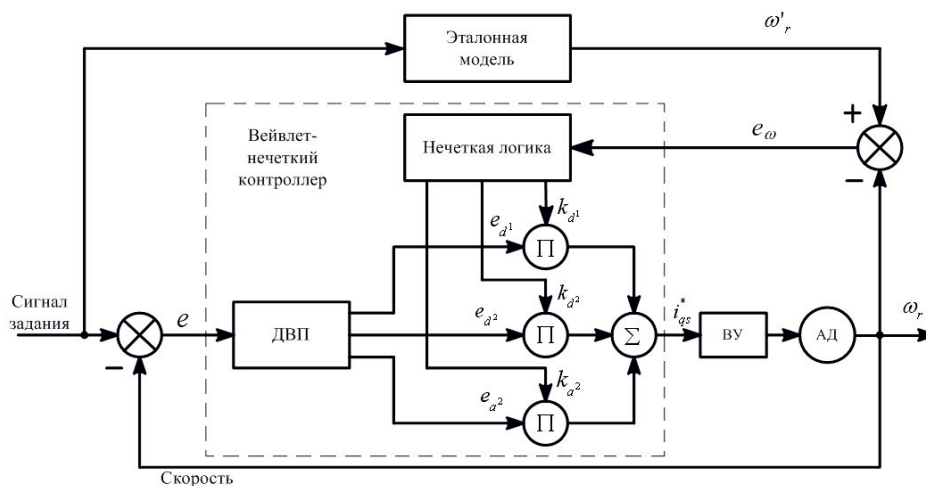


Рис. 4. Структура системы управления скоростью АД с вейвлет-нечетким контроллером

Фаззифицированные входные и выходные переменные, используя пять функций принадлежности, нормируются в диапазоне между +1 и -1. Для приведения нечеткого вывода к четкому значению используется метод центраида. Для нечеткого вывода, использующего пять функций принадлежности, требуется 25 правил.

Увеличение количества функций принадлежности до семи приводит к увеличению количества правил до 49. Однако это увеличивает затраты вычислительных ресурсов, но не приводит к значительному улучшению эффективности управления асинхронным приводом.

С другой стороны, при трех функциях принадлежности и 9 правилах вычисления производятся быстрее. Но по сравнению с системой с пятью функциями принадлежности и 25 правилами эффективность управления низкая с точки зрения перегулирования и увеличения времени переходного процесса.

При создании базы правил создается таблица лингвистических высказываний (см. таблицу 1), основанная на данных, полученных в ходе моделирования в различных условиях эксплуатации при изменении задающего сигнала, возмущени-

ях момента нагрузки, изменении сопротивления статора. В таблице 1 приняты следующие обозначения: $\pm Б$ – большая ошибка; $\pm М$ – малая ошибка; НП – назад постоянно; НС – назад снизить; Н – ноль; ВВ – вперед повысить; ВП – вперед постоянно.

Таблица 1. Лингвистические высказывания

e	-Б	-М	Н	+Б	+М
-Б	НП	НП	НП	НС	Н
-М	НП	НП	НС	Н	ВВ
Н	НП	НС	Н	ВВ	ВП
+Б	НС	Н	ВВ	ВП	ВП
+М	Н	ВВ	ВП	ВП	ВП

Блок нечеткой логики работает на основе лингвистических правил по принципу ЕСЛИ – ТО:

$$\text{ЕСЛИ } \{e_r = \text{ноль И } de_r = \text{Ноль}\} \\ \text{ТО } \{k_{d1} = \text{ноль И } k_{d2} = \text{ноль И } k_{a2} = \text{ноль}\}. \quad (7)$$

Такой механизм формирования управляющего сигнала предложенным вейвлет-нечетким контроллером обеспечивает надежность управления скоростью асинхронного двигателя.

Таким образом, алгоритм функционирования предложенного вейвлет-нечеткого контроллера состоит в следующем. Сигнал ошибки по скорости, который вычисляется как разница между сигналом задания скорости и сигналом фактической (измеренной) скорости, подается на входы вейвлет-нечеткого контроллера по двум направлениям. В первом направлении сигнал ошибки подается на блок ДВП (см. рис. 4), где он разлагается на различные частотные компоненты с помощью вейвлет-преобразования. В другом направлении сигнал ошибки подается на блок нечеткой логики, где, согласно базе нечетких правил, генерируются коэффициенты усиления для соответствующих частотных составляющих, полученных при дискретном вейвлет-преобразовании. Коэффициенты усиления в сочетании с соответствующими вейвлет-компонентами формируют сигнал управления электромагнитный моментом асинхронного двигателя.

Результаты моделирования

Моделирование предложенного вейвлет-нечеткого контроллера в системе векторного управления асинхронным двигателем выполнялось с использованием MATLAB/Simulink. Для оценки эффективности предложенного вейвлет-нечеткого контроллера также проводилось моделирование системы векторного управления с ПИ-контроллером.

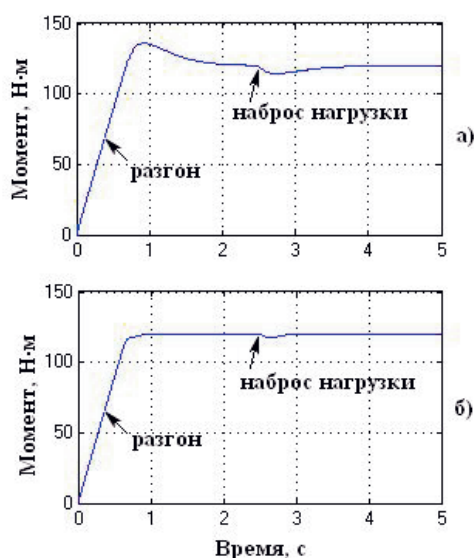


Рис. 6. Временная диаграмма скорости при разгоне двигателя и набросе нагрузки: а) с ПИ-контроллером; б) с вейвлет-нечетким контроллером

На рис. 6 показана диаграмма скорости асинхронного двигателя при пуске на холостом ходе (без нагрузки) и дальнейшем подключении нагрузки к валу двигателя. Двигатель разгоняется от нуля до заданной скорости 120 рад/с. В момент времени 2,5 с к двигателю прикладывается нагрузка 100 Н.м. Разгон АД до заданной скорости в системе с вейвлет-нечетким контроллером (см. рис. 6б) в отличие от системы с ПИ-контроллером (см. рис. 6а) осуществляется без перерегулирования. Установление заданной скорости достигается быстрее в системе с вейвлет-нечетким контроллером. При набросе нагрузки в системе управления с вейвлет-нечетким контроллером в сравнении ПИ-контроллером наблюдается некоторое снижение скорости двигателя. Вейвлет-нечеткий контроллер значительно быстрее, чем ПИ-контроллер, отрабатывает возмущения нагрузки и приводит систему к установившемуся значению скорости, а процесс отработки возмущения при этом более плавный.

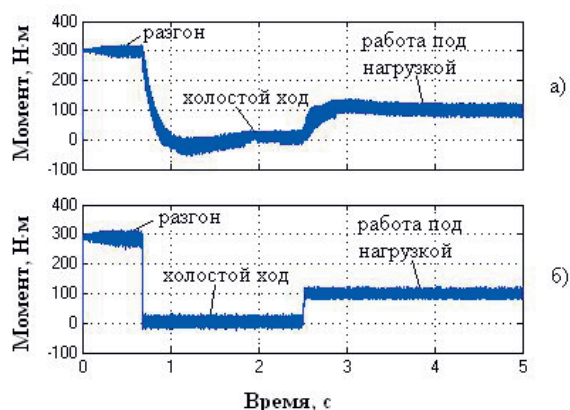


Рис. 7. Временная диаграмма момента двигателя: а) в системе с ПИ-контроллером; б) в системе с вейвлет-нечетким контроллером

На рис. 7 представлена диаграмма момента двигателя при управлении в системе с ПИ-контроллером (см. рис. 7а) и с вейвлет-нечетким контроллером (см. рис. 7б). В обоих случаях временную диаграмму можно разбить на три участка: на первом участке (разгон) наблюдается максимальный момент двигателя, что соответствует его ускорению; второй участок (холостой ход) характеризуется достижением двигателем заданной скорости; третий участок характеризуется подключением к валу двигателя нагрузки в 100 Н.м и выходом двигателя на рабочий режим. Сравнивая характеристики, можно видеть, что предложенный контроллер демонстрирует значительное улучшение времени переходного процесса при отработке возникшего возмущения.

Таким образом, представленный вейвлет-нечеткий контроллер превосходит традиционный ПИ-контроллер по показателям качества, таких как время переходного процесса, перерегулирование, отсутствие колебаний как при реакции на задающий сигнал, так и при отработке возмущений.

Выводы

В работе представлен вейвлет-нечеткий контроллер скорости, функционирующий в системе векторного управления асинхронного двигателя. Результаты моделирования показывают, что подход синтеза предлагаемого контроллера на основе вейвлет-преобразований и нечеткой логики является более эффективным по сравнению с традиционным ПИ-контроллером с точки зрения меньшего значения перерегулирования, более быстрого переходного процесса, невосприимчивости к шумам датчиков и плавного процесса регулирования. Возможные улучшения в структуре предлагаемого контроллера будут включать в себя использование меньшего числа составных элементов с целью уменьшения вычислительной нагрузки.

Литература

1. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Изд. ИГЭУ им. В.И. Ленина. Иваново, 2008. – 298 с.
2. Wai R.J., Chang J.M. Wavelet neural network control for induction motor drive using sliding mode design technique // IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 50, No. 4, 2003. – P. 733-748. doi: 10.1109/TIE.2003.814867
3. Колдаев А.И. Нечеткая логика в задаче векторного управления асинхронным электроприводом // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-23). Сб. трудов XXIII МНК, Саратов, СГТУ, 2010. – С. 30-33.
4. Wai R.J., Chang J.M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network // Electr. Power Syst. Research. Vol.61, No 1, 2002. – P. 67-76. doi: 10.1016/S0378-7796(01)00190-0
5. Yousef H.A., Elkhatab M.E., Sebakhy O.A. Wavelet network-based motion control of DC motors // Expert Systems with Applicat.: An Int. Jour., Vol. 37, No. 2, 2010. – P. 1522-1527. doi: 10.1016/j.eswa.2009.06.069
6. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999. – 204 с.
7. Bose B.K. Modern power Electronics and AC Drives, Pearson Education, 2002. – 711 p.
8. Masiala M., Vafakhah B., Salmon J., Andrew M.K. Fuzzy self-tuning speed control of an indirect field-oriented control induction motor drive // IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, No. 4, 2008. – P. 1732-1740. doi: 10.1109/TIA.2008.2006342

Получено 08.07.2016

Червяков Николай Иванович, д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий Кафедрой прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. (8-865) 235-48-61; E-mail: chervyakov@yandex.ru

Колдаев Александр Игоревич, к.т.н., доцент Кафедры информационных систем, электропривода и автоматики Невинномысского технологического института (филиала СКФУ). Тел. (8-928) 816-15-27. E-mail: ventilator83@yandex.ru

DESIGN OF WAVELET-FUZZY CONTROLLER OF VECTOR CONTROL SYSTEM FOR INDUCTION MOTOR

Chervyakov N.I., Koldaev A.I.

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia Federation

E-mail: chervyakov@yandex.ru

This work presents wavelet-fuzzy based controller for vector control of three-phase induction motor. We apply discrete wavelet transformation to decompose the error of motor speed mismatching over various frequency components. Transformed error coefficients together with scaling parameters are utilized for generating of motor control signal. Proposed controller satisfies to problem of speed regulation into closed looped control system. We performed researches the scheme of vector control with wavelet-fuzzy controller under various dynamic operation conditions. Results of comparison between operation of conventional proportional integral controller and developed wavelet-fuzzy controller are presented. Simulation results demonstrate efficiency of proposed wavelet-fuzzy controller.

Keywords: discrete wavelet transformation, fuzzy logic, induction motor, vector control, reliability

DOI: 10.18469/ikt.2016.14.3.10

Chervyakov Nikolay Ivanovich, North-Caucasus Federal University, 1 Pushkina str., Stavropol, 355029, Russian Federation; the Head of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, Doctor of Technical Science, Professor. Tel.: +78652354861. E-mail: k-fmf-primath@stavs.ru.

Koldaev Alexander Igorevich, Nevinnomyssk Institute of Technology, North-Caucasus Federal University, 1 Gagarin Street, Nevinnomyssk, 357100, Russian Federation; Assistant Professor of the Department of Information Systems, Electric Drive and Automatics. Tel. +79288161527. E-mail: ventilator83@yandex.ru.

References

1. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie e'lektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drive]. Ivanovo, IGE'U im. V.I. Lenina Publ., 2008. 298 p.
2. Wai R.J., Chang J.M. Wavelet neural network control for induction motor drive using sliding mode design technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2003, vol. 50, no. 4, pp. 733-748. doi: 10.1109/TIE.2003.814867
3. Koldaev A.I. Nechetkaya logika v zadache vektornogo upravleniya asinxronny'm e'lektroprivodom [Fuzzy logic in the problem of vector control of asynchronous electric drive]. *Matematicheskie metody'v tekhnike i tekhnologiyax (MMTT-23). Sb. trudov XXIII MNK*, Saratov, SGTU, 2010. – S. 30-33.
4. Wai R.J., Chang J.M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network. *Electr. Power Syst. Research*. 2002, vol. 61, no. 1, pp. 67-76. doi: 10.1016/S0378-7796(01)00190-0.
5. Yousef H.A., Elkhatib M.E., Sebakhy O.A. Wavelet network-based motion control of DC motors. *Expert Systems with Applicat.: An Int. Jour.*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 1522-1527. doi: 10.1016/j.eswa.2009.06.069
6. Vorob'ev V.I., Gribunin V.G. *Teoriya i praktika vejvlet-preobrazovaniya* [Theory and practice of wavelet transform]. St. Petersburg, VUS Publ., 1999. 204 p.
7. Bose B.K. *Modern power Electronics and AC Drives*, Pearson Education, 2002. 711 p.
8. Masiala M., Vafakhah B., Salmon J., Andrew M.K. Fuzzy self-tuning speed control of an indirect field-oriented control induction motor drive. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 1732-1740. doi: 10.1109/TIA.2008.2006342

Received 08.07.2016

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 621.397.2.037.372

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ SFN ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ

Карякин В.Л.¹, Карякин Д.В.², Морозова Л.А.¹

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

²Российское представительство Juniper Networks, Москва, РФ

E-mail: vl@karyakin.ru

В статье рассматриваются возможные варианты обеспечения работоспособности региональной сети SFN телерадиовещания. Анализируются преимущества и недостатки шведской программы «План PROGIRA®», основанной на дополнительной коррекции задержек излучения в передатчиках.

Ключевые слова: региональные сети SFN, телерадиовещание, время задержки излучения, работоспособность, интерференция, напряженность электрического поля, T2-MI поток, защитный интервал, BER, запас устойчивости

Введение

Работоспособность одночастотных сетей цифрового телерадиовещания SFN (Single Frequency Network) при наличии синхронизации передатчиков зависит от запаса устойчивости, определяе-

мого допустимым отклонением коэффициента битовых ошибок BER (Bit Error Rate) от порогового значения.

Брак в работе сети SFN и ее технические остан-