

УДК 62-83-52:621.3.025.3

И.Ю. Семыкина, В.М. Завьялов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГОЛОВОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В современной промышленности существует большое количество технологий, требующих регулирования скорости перемещения механизмов. Эта задача, как правило, решается применением регулируемых электроприводов. В настоящее время перспективным являются частотно-регулируемые электроприводы на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД).

Несмотря на свои неоспоримые преимущества, с точки зрения теории управления, АД является очень сложным объектом. Этим объясняется существование большого многообразия систем управления, обеспечивающих регулирование его угловой скорости (в дальнейшем просто скорости). Вследствие этого, возникает необходимость сравнительного анализа этих систем и разработка рекомендаций по выбору системы управления

скоростью для электропривода конкретного механизма.

Для проведения сравнительного анализа было проведено компьютерное моделирование всех рассматриваемых систем управления. Моделирование проводилось в программной среде Delphi с использованием специально написанной программы "Motor System v2.1.1". Для проверки работоспособности систем управления при разных условиях, моделирование проводилось для следующих марок двигателей: 4AA50B2У3, мощностью 120 Вт; 4A80A4У3, мощностью 1,1 кВт; 4A225M4У3, мощностью 55 кВт и 4A315M4У3, мощностью 200 кВт.

Существующие системы регулирования скорости АД можно разделить на системы скалярного и векторного управления. К системам скалярного управления относятся преимущественно системы

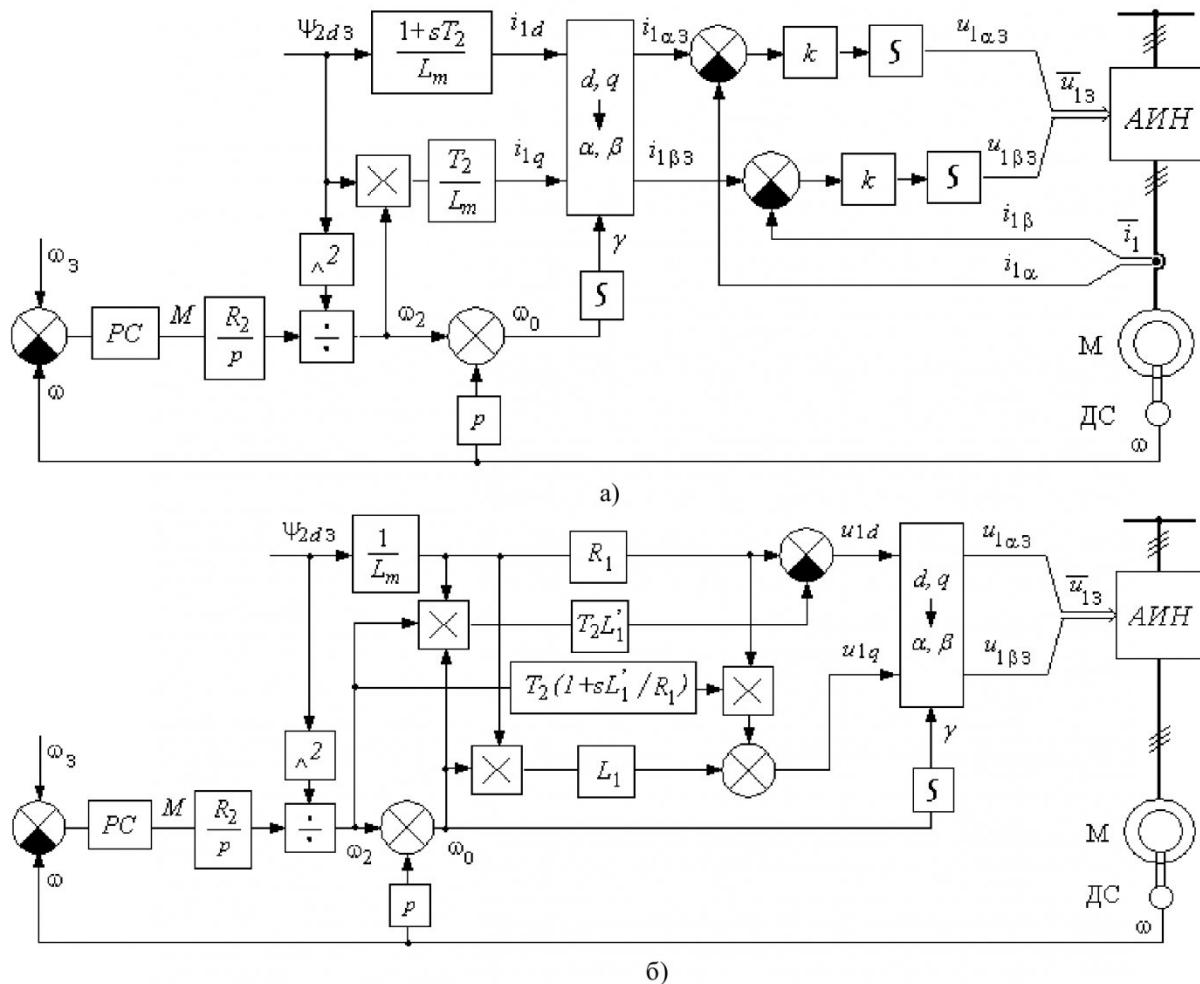


Рис. 1. Структурная схема системы векторного управления: а) с использованием токовой модели; б) с использованием модели АД, управляемого напряжением статора

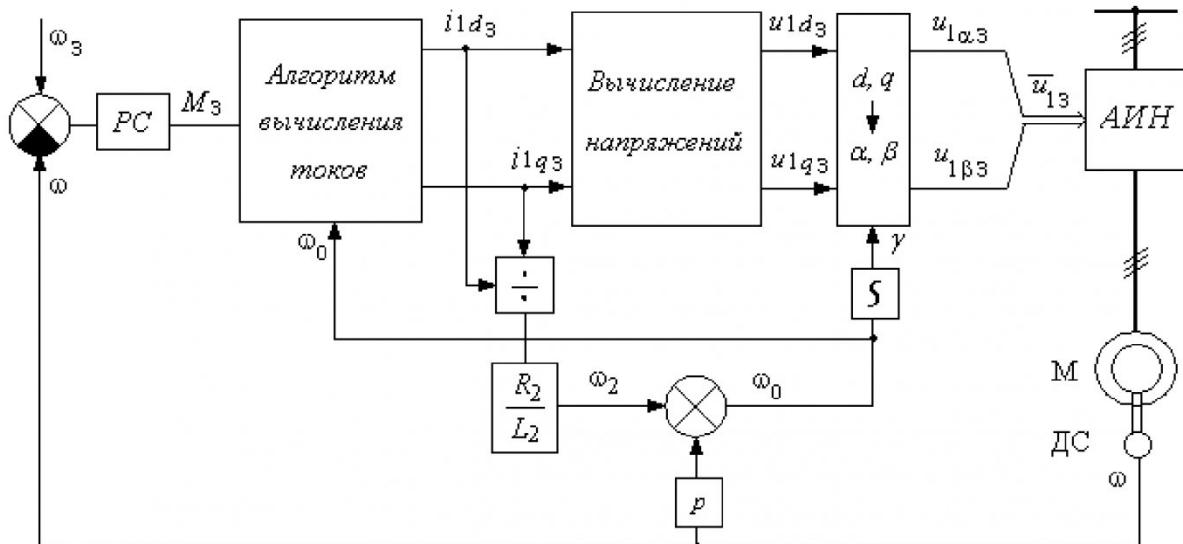


Рис. 2. Структурная схема системы быстродействующего полеориентированного управления

с законом управления $U/f=\text{const}$ и его модификации. Системы векторного управления – это класс систем, в которых формируется вектор управляющего воздействия (тока или напряжения).

По наличию датчика скорости, системы управления можно разделить на бездатчиковые системы и системы с датчиком скорости на валу двигателя. Многообразие различных методов косвенного управления скоростью АД появилось в несколько последних десятилетий. Их достоинства и ограничения описываются в доступной литературе [1].

Разомкнутое управление по закону $U/f=\text{const}$. Частотное управление по закону $U/f = \text{const}$ это один из вариантов регулирования скорости АД, исключающий насыщение магнитопровода [2]. Отсутствие замкнутого контура управления и приемлемые динамические характеристики делают приводы с управлением $U/f=\text{const}$ очень надежными. Эта система одинаково хорошо работает с двигателями разной мощности. В качестве основных недостатков этой системы можно выделить ошибку регулирования скорости, возникающую при отклонении нагрузки на валу двигателя от номинального значения, и существенное уменьшение перегрузочной способности при работе на низких скоростях.

Управление по закону $U/f=\text{const}$ с обратными связями. Улучшение динамических свойств электроприводов с управлением $U/f = \text{const}$ может быть достигнуто за счет введения в структуру системы управления обратных связей [1,4]. Недостатком этой системы является то, что оцененная скорость не равна заданной, следовательно, вызывает ошибку регулирования скорости. При малых значениях задания скорости наличие оценки препятствует пуску двигателя под нагрузкой, т.к. амплитуда формируемого напряжения мала, электро-

магнитный момент не превышает момент сопротивления, а оцененная скорость заведомо не равна нулю. К достоинствам системы замкнутого управления по закону $U/f=\text{const}$ с оценкой скорости относится в первую очередь отсутствие датчика скорости на валу двигателя при относительной простоте реализации системы.

Векторное управление с использованием токовой модели. Эта система является классической в группе систем полеориентированного управления скоростью АД [5,6]. В качестве опорного вектора здесь используется потокосцепление ротора. Управляя составляющими тока статора в полеориентированной системе координат i_{1d} и i_{1q} можно регулировать отдельно потокосцепление и электромагнитный момент АД. Структурная схема системы векторного управления с использованием токовой модели показана на рис. 1,а. Чтобы использовать инвертор напряжения, питающий двигатель в качестве источника тока, в структуру системы управления вводятся дополнительные обратные связи по току.

Следует отметить, что устройство управления рис. 1,а может выполнять свои функции только при условии, что параметры АД, входящие в передаточные функции его звеньев соответствуют истинным значениям. В противном случае потокосцепление и частота скольжения в АД и в устройстве управления будут отличаться друг от друга. Это обстоятельство создает значительные трудности при реализации систем векторного управления на практике, т.к. параметры двигателя изменяются в процессе работы. В особенности это относится к значениям активных сопротивлений АД.

К достоинствам системы векторного управления с использованием токовой модели относится высокая точность регулирования скорости при

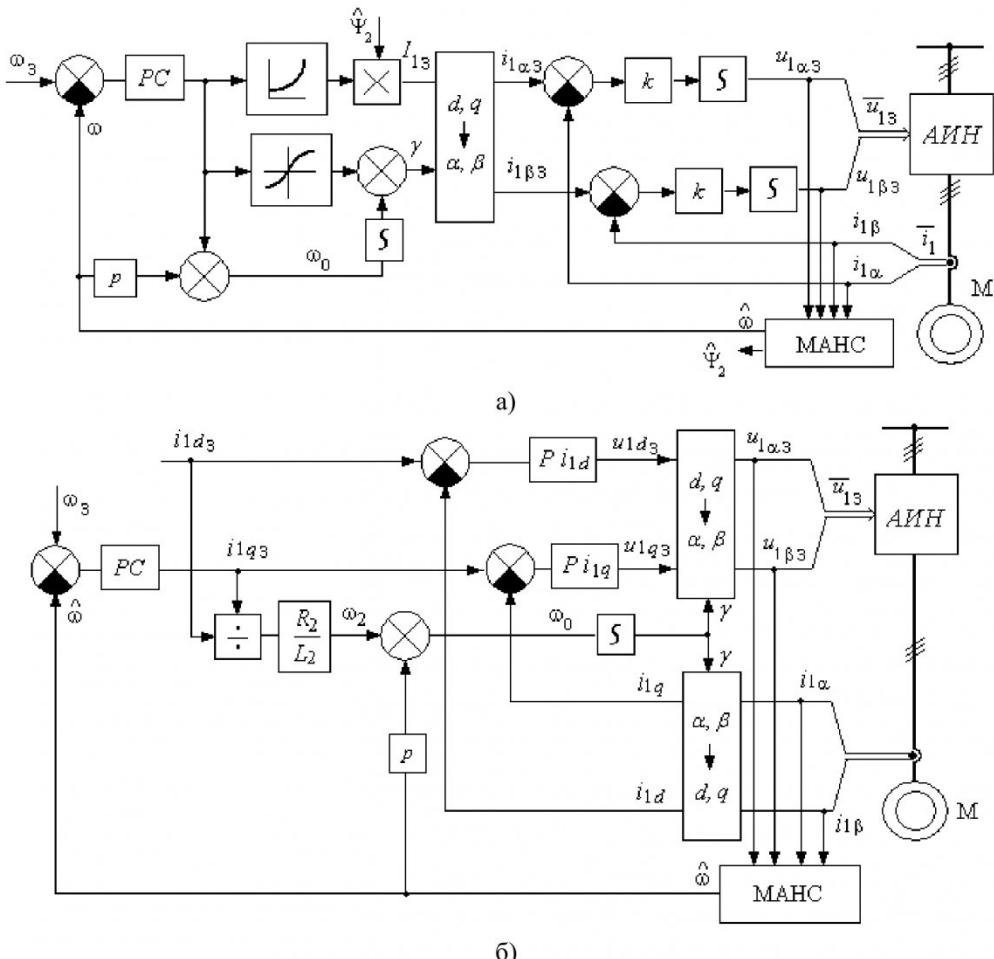


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования скорости с использованием МАНС: а) с оценкой скорости и потокосцепления и формированием тока; б) с оценкой скорости и формированием напряжения

любой нагрузке на валу двигателя и высокое быстродействие.

Векторное управление с использованием модели АД, управляемого напряжением статора. Система векторного управления скоростью, использующая модель АД, управляемого напряжением статора строится на основании модели АД, аналогично векторному управлению с токовой моделью [5,6]. Структурная схема этой системы приведена на рис. 1,б. Оно существенно сложнее, чем устройство на рис. 2,а. Кроме того, в нем использованы приближенные выражения, вносящие ошибку в динамических режимах.

К достоинствам этой системы векторного управления относится в первую очередь высокая точность регулирования скорости при любой нагрузке на валу двигателя. Так же необходимо отметить, что эта система ведет себя одинаково при работе с двигателями любой мощности.

Быстродействующее полеориентированное управление. Для повышения эффективности полеориентированного управления был предложен алгоритм быстродействующего управления скоростью АД [7]. Структурная схема этой системы

показана на рис. 2.

Главный недостаток этой системы заключается в необходимости правильного задания величины максимального тока с учетом ограничений, накладываемых автономным инвертором напряжения. При снижении этой величины, двигатель не запускается при наличии нагрузки на валу двигателя.

Полеориентированное управление с использованием модели адаптивной направляющей системы. В этой системе оценка скорости осуществляется на основе модели адаптивной направляющей системы (МАНС). В МАНС совместно решаются уравнения моделей статора и ротора двигателя. Обе модели рассматриваются в неподвижной системе координат. При решении обеих моделей вычисляется вектор потокосцепления ротора. По разнице между результатами решения оценивается скорость двигателя.

Структурная схема системы регулирования скорости, в которой данные о скорости ротора и потокосцеплении ротора получают с помощью МАНС [1,8], показана на рис. 3,а. Основным достоинством этой системы управления является то,

что в ней поддерживается точность ориентации создаваемого вектора тока статора, даже если величина постоянной времени ротора в модели будет отличаться от реальной постоянной времени двигателя. К недостаткам этой системы можно отнести то, что у нее высокая чувствительность к изменениям величины сопротивления статора.

МАНС может быть так же использована и в системе регулирования скорости АД, где необходимо оценивать только скорость [1,9]. Структурная схема такой системы управления показана на рис. 3,б. К достоинствам этой системы можно отнести меньшую колебательность в установившемся режиме вследствие использования автономного инвертора напряжения, а не тока.

Управление скоростью АД с непосредст-

венным управлением напряжением статора. Другой возможный способ полеориентированного бездатчикового управления скоростью АД - это непосредственное управление напряжением статора [1,3]. Напряжение статора определяется из статической модели АД и используется как основной задающий сигнал при управлении двигателем. Таким образом, учитывая, что рабочая точка механической характеристики формируется исходя из модели двигателя, такой способ работы системы управления может быть охарактеризован как саморегулирование. Структурная схема этой системы управления показана на рис. 4.

Эта система управления скоростью АД обладает наиболее точной оценкой скорости, по сравнению с рассмотренными выше системами. Отли-

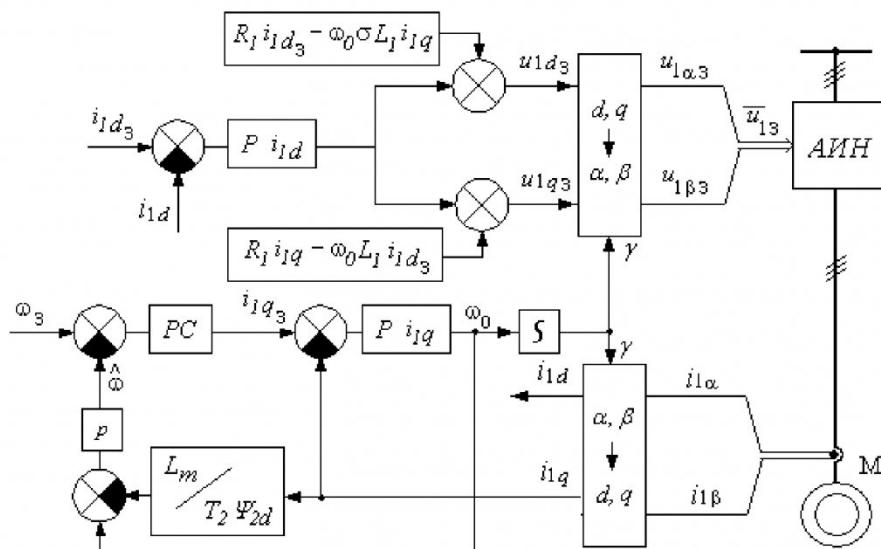


Рис. 4. Структурная схема полеориентированной системы управления скоростью АД с непосредственным управлением напряжением статора

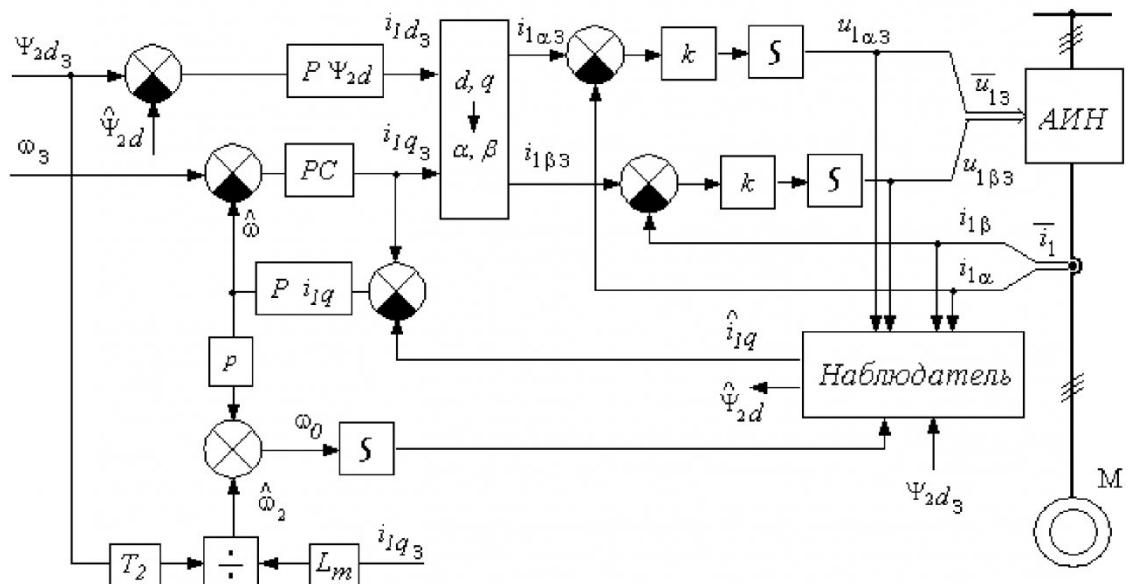


Рис. 5. Структурная схема полеориентированной системы управления скоростью АД при ориентации поля ротора с помощью модели статора

Таблица 1

Влияние неточности задания параметров на статическую точность управления

Влияние на точность управления, %	Изменяющийся параметр	Система управления						
		№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
R_1	$\pm 5\%$	-	-0,022 +0,024	-0,002 +0,002	разнос -0,012	разнос +0,056	+0,001 -0,0001	+0,245 -0,245
	$\pm 20\%$	-	-0,062 +0,153	-0,009 +0,013	разнос -0,019	разнос +0,242	разнос -0,007	+0,969 -1,006
R_2	$\pm 5\%$	+0,026 -0,025	+0,019 -0,024	-0,007 +0,008	+0,014 -0,012	+0,876 -0,737	+0,428 -0,422	-0,574 +0,574
	$\pm 20\%$	+0,069 -0,066	+0,071 -0,080	-0,024 +0,047	+0,041 -0,034	+3,344 -2,709	+1,71 -1,709	-2,296 +2,293
$L_{\sigma 1}$	$\pm 5\%$	-	-0,001 +0,002	+0,0011 -0,001	-0,105 +0,014	+0,047 -0,048	+0,032 -0,032	+0,008 -0,007
	$\pm 20\%$	-	-0,005 +0,007	+0,0015 -0,0014	разнос +0,049	+0,186 -0,193	0,127 -0,13	+0,034 -0,033
$L_{\sigma 2}$	$\pm 5\%$	-0,002 +0,0002	-0,002 +0,003	+0,001 -0,001	-0,078 +0,002	+0,014 -0,015	-0,0003 +0,0002	+0,021 -0,02
	$\pm 20\%$	-0,005 +0,004	-0,011 +0,013	+0,0013 -0,0013	разнос +0,003	+0,058 -0,076	-0,003 +0,002	+0,081 -0,082
L_m	$\pm 5\%$	-0,008 +0,009	+0,015 -0,016	+0,005 -0,004	+0,327 -0,364	-0,669 +0,882	+0,05 -0,04	+0,196 -0,218
	$\pm 20\%$	-0,027 +0,050	+0,053 -0,071	+0,021 -0,017	+1,186 -1,838	-3,577 +3,967	+0,243 -0,056	+0,677 -1,052

Таблица 2

Сравнительный анализ показателей качества работы систем регулирования скорости, составленный для двигателя 4A80A4У3

Показатель регулирования	Система управления								
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
Время переходного процесса по управлению, с ***	1,23*	0,24*	0,63	0,84	1,73	1,36*	1,43*	1,78	0,46*
Время переходного процесса по возмущению, с ***	0,42*	0,07*	0,72	0,98	1,51	0,58*	0,89*	1,14	0,49*
Статическая ошибка регулирования скорости, %	4,98	-6,80	0,04	0,11	0,06	3,99	3,62	0,03	20,4
Динамическая ошибка регулирования скорости, %	5,28	-7,13	3,83	10,2	10,6	6,35	15,9	2,34	22,4
Перерегулирование, %	0,23*	0,17*	1,03	0	10,2	13,1	4,22	9,18	8,85*
Диапазон регулирования	6:1	7:1	84:1	80:1	32:1	36:1	12:1	220:1	4:1
Максимальная амплитуда тока статора при пуске, А	6,82	15,7	31,4	22,4	17,9	13,2	25,1	25,1	13,5
Установившееся значение тока статора, А	4,26	4,55	4,21	5,92	6,59	4,9**	4,34	4,19	4,37
Максимальная амплитуда потокосцепления ротора при пуске, Вб	1,09	1,10	1,39	1,11	3,62	1,29	1,51	1,34	0,86
Установившееся значение потокосцепления ротора, Вб	1,08	1,09	0,87	0,45	1,70	1,2**	0,67	0,83	0,67
Статическая ошибка регулирования вспомогательной переменной, %	-	-	-8,13	43,4	-	-	0,53	0,01	16,6
Динамическая ошибка регулирования вспомогательной переменной, %	-	-	-7,25	43,4	-	-	-7,60	1,17	20,9

* Указанный параметр определялся относительно установившегося значения, а не заданного.

** Указано среднее значение параметра.

*** Указанный параметр определяется при достижении скоростью заданного значения с погрешностью 0,15%.

чие между реальной и оцененной скоростью имеет место только при переходных процессах, при этом точность оценки поддерживается при любой нагрузке на валу двигателя. Кроме того, эта система позволяет регулировать скорость в очень

широком диапазоне.

Полеориентированное управление скоростью АД с использованием модели статора. Еще одним вариантом полеориентированного бездатчикового регулирования скорости является систе-

ма, в которой ориентация поля базируется на модели статора [1,10]. Структурная схема такой системы показана на рис. 5. Наблюдатель, использующийся в этой системе, построен таким образом, чтобы компенсировать наличие высших гармоник в измеряемом токе статора.

Однако, несмотря на улучшение, вводимое в механизм оценки эта система бездатчикового управления, по результатам компьютерного моделирования обладает низкой точностью оценивания скорости.

Для сравнительного анализа всех вышеописанных систем регулирования скорости АД был выделен ряд показателей регулирования, отображающих точность, быстродействие, энергооптимальность управления и чувствительность системы к изменениям параметров двигателя. Значения показателей были получены в результате компьютерного моделирования работы этих систем. Сравнительный анализ числовых показателей для двигателя 4A80A4У3 представлен в табл. 1. и 2.

Анализ данных табл. 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что, если в проектируемой системе управления предусмотрен датчик скорости на валу двигателя, наиболее целесообразно применение системы векторного управления с использованием токовой модели. Эта система регулирования ско-

рости АД по сравнению с остальными обладает наибольшими быстродействием и точностью регулирования при большом диапазоне регулирования, а так же обеспечивает достаточно хорошие энергетические показатели регулирования (меньший, чем в других системах управления, установившийся ток статора, и низкое потокосцепление ротора).

Если же необходима система бездатчикового управления скоростью, предпочтительнее применять систему регулирования скорости с непосредственным управлением напряжением статора, т.к. эта система, при очень высокой точности регулирования скорости, обеспечивает очень хорошие энергетические показатели, т.е. низкую, по сравнению с большинством других бездатчиковых систем управление, установившуюся амплитуду тока статора и потокосцепления ротора. Кроме того, эта система обеспечивает очень широкий диапазон регулирования и мало критична к изменению большинства параметров двигателя.

Системы с законом управления $U/f=\text{const}$ рекомендуется использовать только в том случае, если требуется относительно небольшой диапазон регулирования и невысокие требования к точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Holtz*, Sensorless Control of Induction Motor Drives // Proceedings of the IEEE. Vol. 90, No. 8, Aug. 2002, pp. 1359 – 1394.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
3. A High Performance Speed Control Scheme for Induction Motor without Speed and Voltage Sensors / T. Okuyama, N. Fujimoto, T. Matsui, Y. Kubota // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver Co. 1986, pp. 106-111.
4. W. Lotzkat, "Industrial Low-Cost PWM Inverter Drives with Ride-Through Capability", Ph.-D. Thesis (in German), Wuppertal University, Germany, 1991.
5. http://www.ets.usolzev/posobie1/vect_upr.htm.
6. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999г. 66с.
7. J. H. Chang, B. K. Kim, Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of Induction Motors Under Field-Oriented Control // Proceedings of the IEEE. Vol. 44, No. 6, Dec. 1997, pp. 809 – 815.
8. C. Schauder, Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego Ca 1989, pp. 493-499.
9. A Simple Sensor-less Vector Control System for Variable Speed Induction Motor Drives / H. Zidan, S. Fujii, T. Hanamoto, T. Tsuji // T.IEE Japan, Vol. 120-D, No. 10, 2000, pp. 1165 – 1170.
10. T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka, Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 1, Jan/Feb. 1992, pp. 157-165.

□ Авторы статьи:

Семыкина

Завьялов

Ирина Юрьевна

Валерий Михайлович

- инженер кафедры электропривода
и автоматизации

- канд.техн.наук, доц. каф. электропривода и автоматизации