

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЙ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

В данной статье приводятся результаты исследований, которые обосновали эффективность предложенной ранее авторами динамической положительной обратной связи по току статора в асинхронных электроприводах с частотным управлением. Проводимые в течение нескольких лет экспериментальные исследования показали, что такая связь обеспечивает практически полную компенсацию набросов нагрузки в статических режимах, а также минимальные динамические процессы парирования этих нагрузок (минимальное время переходного процесса и минимальное отклонение от установившегося значения). В ходе одного из обсуждений материалов этих исследований было высказано предположение о стабилизации электромагнитного потока в асинхронных электроприводах с такой связью. В данной статье методом математического моделирования получено подтверждение этой гипотезы. Моделирование убедительно показало, что в системе с положительной обратной связью по току статора при динамических набросах нагрузки роторные потокосцепления стабилизируются значительно точнее, чем при известных способах управления асинхронными электродвигателями на всех скоростях вращения привода. В статье также приводится моделирование аналогичных режимов при векторном и скалярном управлении. Моделирование, таким образом, подтвердило эффективность предложенной структурной коррекции, тогда как ранее эксперименты показали значительно лучшую динамику и энергетику привода с такой коррекцией (динамической положительной обратной связи по току статора).

Ключевые слова: асинхронный электропривод, математическое моделирование, векторное управление, скалярное управление, положительная обратная связь.

Введение. В последние годы группа инженеров Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) под руководством профессора кафедры автоматизированного электропривода Кодкина В. Л. проводит исследования динамики асинхронных электроприводов с частотным регулированием (АЭП ЧР). Целью работы является исследование проблем, связанных с применением асинхронных электроприводов, построенных на базе преобразователей частоты среднего технико-экономического

класса на промышленных и энергетических объектах. Приводы с преобразователями частоты данного класса имеют относительно низкую стоимость, что позволяет широко применять их на предприятиях различного уровня (включая предприятия малого бизнеса), с другой стороны, обладают широким функционалом, включающим все стандартные (достаточно хорошо отработанные и проверенные) алгоритмы управления (скалярное, векторное) для разомкнутых и замкнутых систем, что делает их

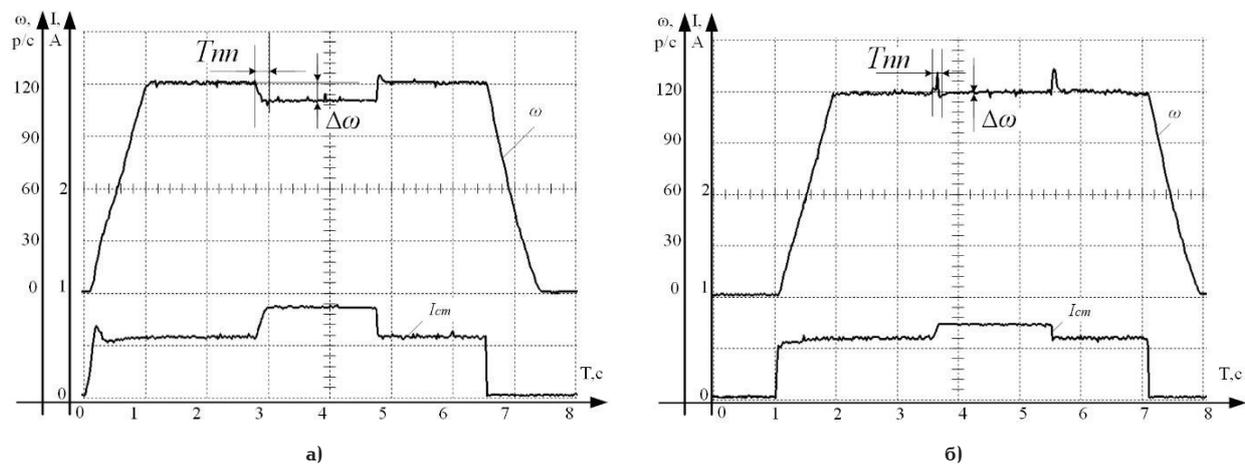


Рис. 1. Диаграммы скорости и тока статора при векторном управлении (а) при скалярном управлении с динамической положительной обратной связью ДООС+ (б)

универсальными с точки зрения применения в различных технических системах. Однако опыт эксплуатации таких приводов показывает, что далеко не всегда удается получить требуемые статические и динамические характеристики, используя только стандартные алгоритмы управления, заложенные в преобразователь частоты. Для улучшения характеристик приводов было предложено использование положительной обратной связи по току статора с дополнительным динамическим звеном, параметры которого адаптированы к частоте статорного напряжения (ДООС+).

Такая обратная связь позволила добиться практически полной компенсации статических ошибок скорости при «набросах» нагрузки в широком диапазоне рабочих скоростей. Благодаря динамическому звену эта связь не нарушает устойчивости, в отличие от широко известных IR - и S -компенсаций, также токи статора при данном управлении оказались наименьшими в сравнении со скалярным и векторным управлением.

Поскольку уравнения асинхронного электропривода содержат много допущений и упрощений, «стоимость» которых сложно оценить, основной объем исследований заключался в моделировании и экспериментальных исследованиях, в ходе которых на разных скоростях вращения привода проводились «набросы» моментной нагрузки, регистрировались и анализировались процессы скорости и статорных токов. Эффективность асинхронного электропривода с динамической положительной обратной связью (ДООС+) во всех экспериментах и моделировании была лучшей. Даже системы с векторным управлением, в ряде режимов, уступали предложенным алгоритмам управления, в частности, на некоторых скоростях нарушалась устойчивость либо не удавалось скорректировать время переходных процессов. Данные исследования подробно описаны в ряде российских и зарубежных изданий [1, 2]. Пример таких экспериментов приведен на рис. 1. При набросе одной и той же нагрузки процесс восстановления скорости в приводе с ДООС+ значительно быстрее. Статической ошибки по скорости нет, а статорные токи в этом приводе меньше, чем в приводе с векторным управлением. Вместе с тем одних экспериментов для доказательства эффективности выбранных решений оказывается недостаточно, поскольку только понимание природы этой эффективности позволит

обоснованно применять предложенные решения на всех асинхронных электроприводах с преобразователями частоты среднего технико-экономического класса.

Постановка задачи. Исследованию частотно-регулируемых приводов с использованием пакета *Matlab / Simulink* посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых [3–8].

В этих работах исследуются динамические характеристики электроприводов [3–5]. Много работ посвящено повышению энергоэффективности преобразователей частоты [9, 10], при этом используемые в этих исследованиях модели асинхронных электродвигателей не отличаются от моделей двигателей, заложенных в системы векторного управления. Поэтому данные исследования не выявляют неточности векторного управления, которые обнаруживаются в экспериментах.

Важнейшее допущение векторного управления — неизменность потокосцепления ротора в динамических режимах, в связи с чем много работ посвящено созданию систем стабилизации потока. Чаще всего эти системы требуют дополнительных датчиков или принципиально нового программного обеспечения.

Реализовать такие электроприводы с преобразователями частоты рассматриваемого класса невозможно.

Неточности векторного управления, применяемого в данных преобразователях частоты (*Schneider electric, Danfoss, Vacon* ...), определяемые несовпадением моделей в системах управления и реальных электродвигателей практически никто не оспаривает [11–14, 6], несмотря на это, результаты экспериментов в приводе с ДООС+ вызвали сомнения среди коллег и экспертов. В основном эти сомнения объяснялись положениями «известно...», «приятно считать...», «всем известно...» и т.д.

Доклады на конференциях, как правило, по организационным причинам не позволяют разобраться в деталях исследований, и поэтому целый ряд выступлений, в том числе на конференциях в Челябинске, Москве, Сан-Диего, в Германии и Китае, не смогли убедить скептиков.

В связи с этим профессор Кодкин В. Л. предложил прочитать доклад в рамках традиционного семинара в университете ИТМО под руководством профессора Козярука А. Е. На семинаре ведущие ученые России в области электроприво-

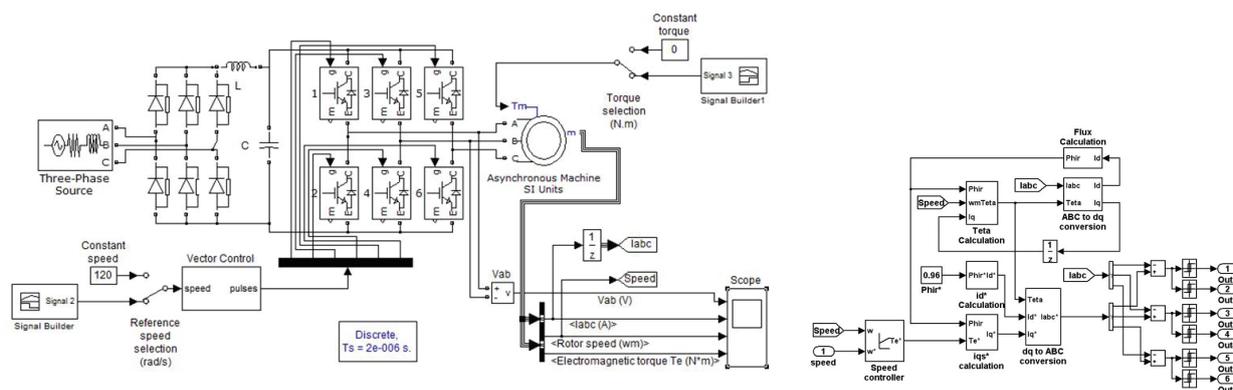


Рис. 2. Схема модели векторного управления и модуля «Vector control»

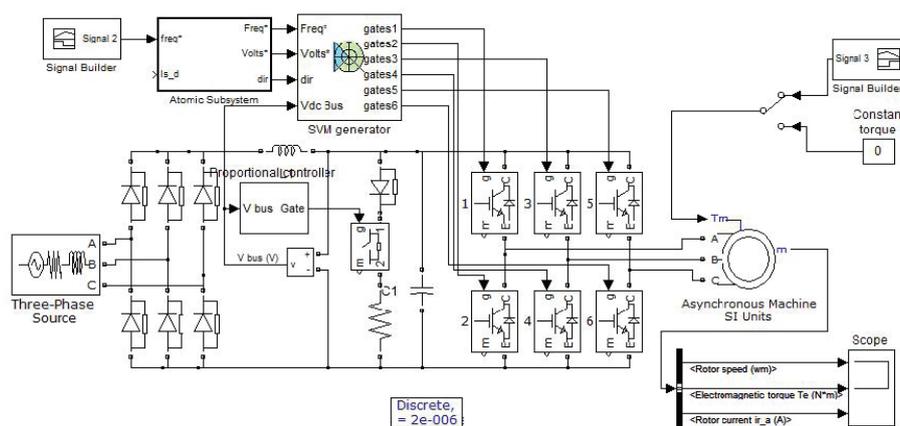


Рис. 3. Схема модели скалярного управления

да дали бы оценку исследованиям, проведенным в ЮУрГУ.

Организаторы семинара секции «Электро-механические системы и средства управления ими» университета ИТМО пошли навстречу ученым из Челябинска, и такой семинар состоялся 14.02. 2019 г.

В ходе обсуждения, которое проходило около двух часов, коллеги согласились с основными результатами исследований. Они уточнили, что сделанные выводы справедливы, в первую очередь, для бездатчикового векторного управления, которое применяется в большинстве преобразователей частоты среднего технико-экономического класса различных компаний (*Schneider Electric, Danfoss, Vacon* и т.д.), поэтому исследования имеют большой практический смысл.

Один из ведущих ученых в этой области, автор нескольких популярных книг и учебников по частотному управлению Усольцев А. А. высказал предположение, что значительные преимущества предложенной схемы коррекции связаны с тем, что «глубокая» положительная обратная связь, не вызывающая неустойчивость благодаря динамическому звену, обеспечивает глубокую стабилизацию магнитного потока сцепления ротора, которое играет главную роль в формировании вращающего момента асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Проверить это с помощью модели, по мнению А. А. Усольцева, совсем не сложно. Следует отметить, что такое предположение очень логично объясняет все результаты. Поэтому была

поставлена задача проведения сравнительного моделирования асинхронных электроприводов с различными системами управления, в ходе которого помимо скорости и тока двигателя контролируется еще его магнитный поток. Результаты их приведены в данной статье.

Решение. Моделирование в приложении *Simulink* программной среды *MATLAB*. Как и в предыдущих исследованиях авторов, для первого варианта АЭП ЧР была проведено моделирование с использованием стандартной модели ЭП на базе ПЧ и АД с векторным управлением [15–17, 7] (рис. 2). Автор модели — профессор Хоанг Ле-Хи (Hoang Le-Huy), профессор кафедры электротехники и вычислительной техники Лавальского университета (*Laval University*), провинция Квебек, Канада.

Для исследования системы скалярного управления (рис. 3) была использована модель профессора Луиса Десанта (*Louis-A. Dessaint*) из Государственной инженерной школы (*École de technologie supérieure*) в Монреале (провинция Квебек, Канада) [18, 19].

Для повышения эффективности формирования электромагнитного момента в систему управления введена положительная обратная связь по действующему значению тока статора.

Моделировались процессы последовательного разгона до скоростей, соответствующих частотам питающего напряжения 10, 20, 30, 40, 50 Гц и набросы нагрузки на каждой из этих скоростей. Контролировались угловая скорость вала двигателя и действующие значения потока сцепления ротора

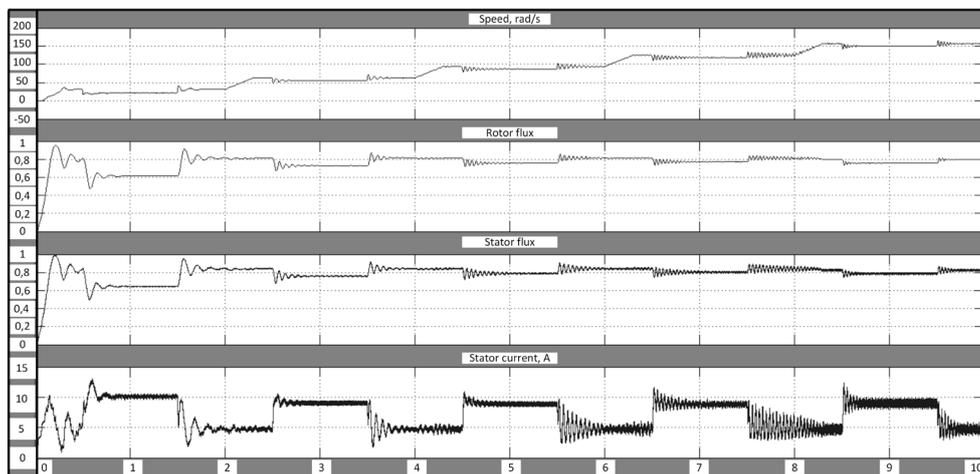


Рис. 4. Скалярное управление без ОС

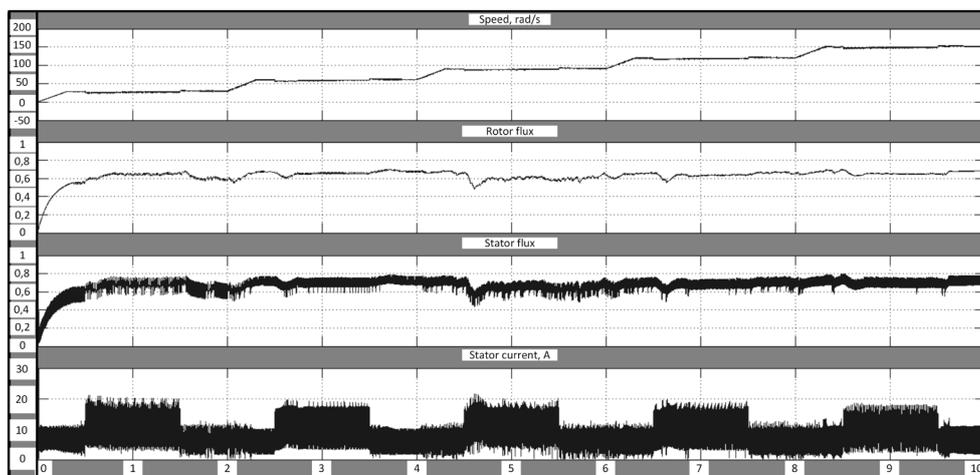


Рис. 5. Векторное управление с контуром скорости

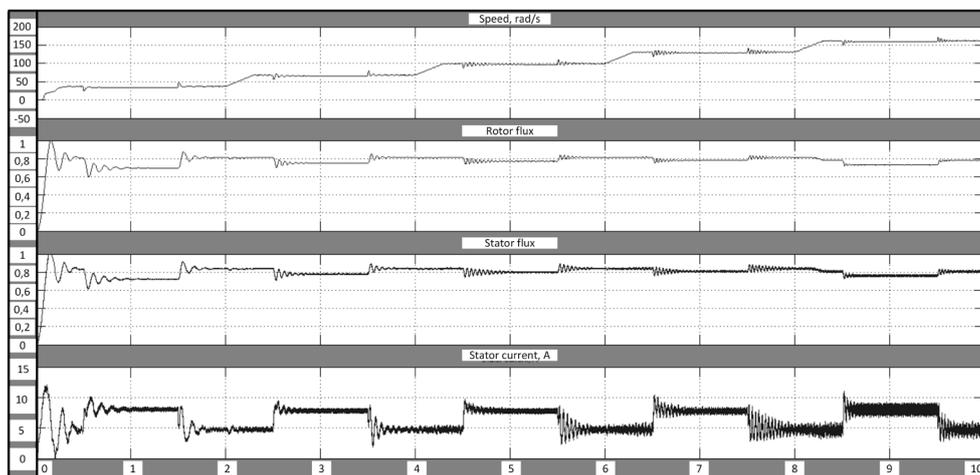


Рис. 6. Скалярное управление с ДОС+

и статора и ток статора. Действующие значения вычислялись по проекциям на оси d и q соответствующих сигналов, которые доступны для измерения в модели асинхронного электродвигателя. Последний сигнал необходим для оценки эффективности привода.

Моделировались разомкнутое скалярное управление (рис. 4), векторное одноконтурное управление с контуром скорости (без контура пото-

косцепления) (рис. 5) и скалярное управление с положительной обратной связью по действующему значению тока статора и динамическим звеном (ДОС+) (рис. 6). При моделировании процессов парирования нагрузок с «правильными» параметрами модели двигателя исследовались процессы в действующих значениях потокосцеплений, так как эти значения позволяют более точно определить изменения этих координат. Значения откло-

Значения отклонений потокосцеплений ротора и статора на холостом ходу и под нагрузкой для различных частот питающего напряжения

Алгоритм управления	Максимальные отклонения потокосцеплений ротора/статора				
	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц
Скалярное управление разомкнутое	-0,2/-0,2	-0,09/-0,11	-0,05/-0,05	-0,03/-0,03	-0,04/-0,03
Векторное управление с контуром скорости	0,06/0,1	-0,03/-0,04	-0,05/-0,06	-0,03/-0,03	-0,03/-0,03
Скалярное управление с ДОС+	-0,1/-0,1	-0,03/-0,03	-0,03/-0,03	-0,03/-0,03	-0,04/-0,02

Таблица 2

Значения токов статора под нагрузкой для различных частот питающего напряжения

Алгоритм управления	Ток статора под нагрузкой, А				
	10 Гц	20 Гц	30 Гц	40 Гц	50 Гц
Скалярное управление разомкнутое	10	8	7,5	7,5	9
Векторное управление с контуром скорости	14	13	12	13	13
Скалярное управление с ДОС+	8	7	7	7,5	8,5

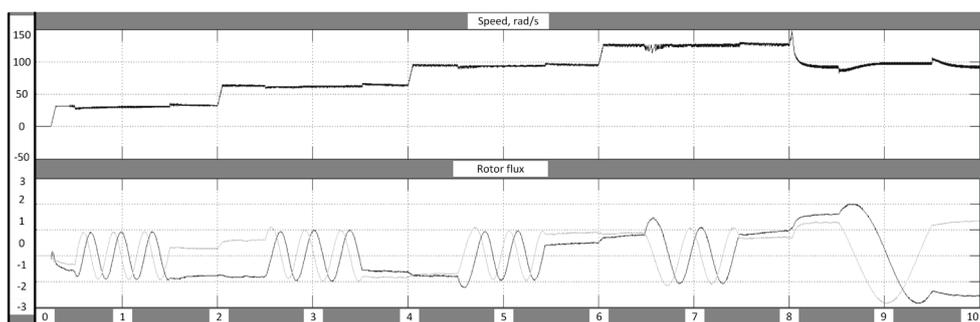


Рис. 7. Векторное управление с ошибкой по скорости 2 %

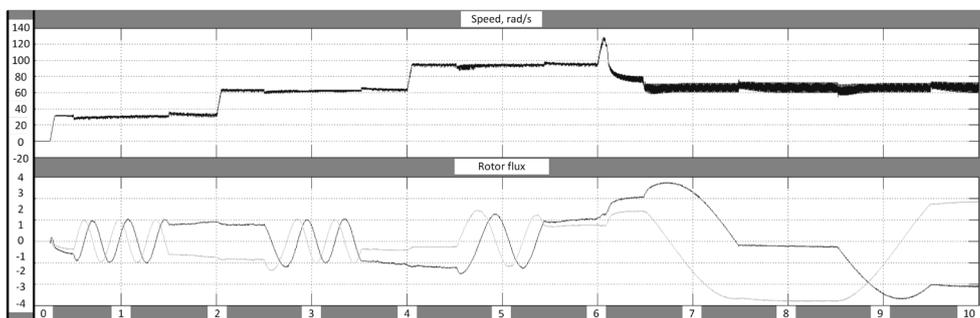
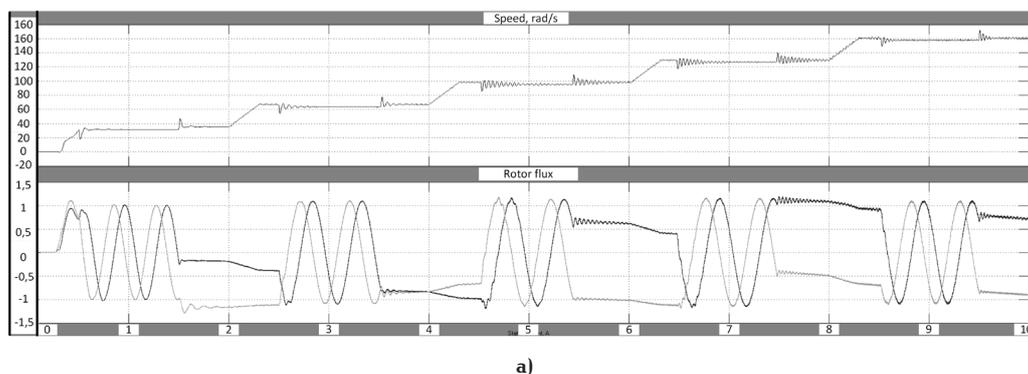


Рис. 8. Векторное управление с ошибкой по скорости 4 %

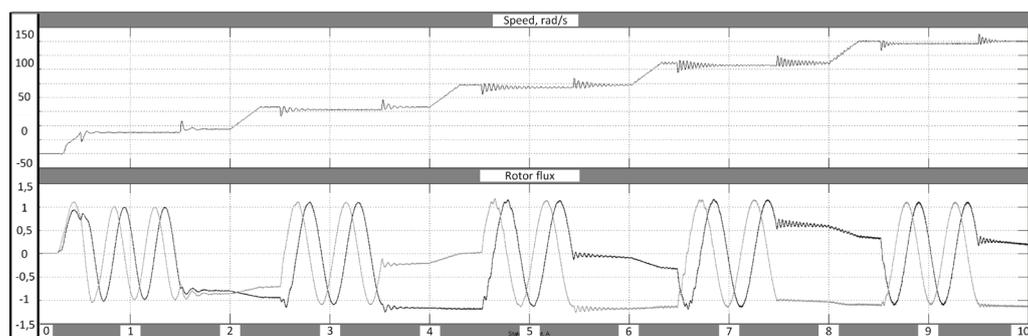
нений потокосцеплений ротора и статора на холостом ходу и под нагрузкой для различных частот питающего напряжения при различных алгоритмах управления приведены в табл. 1.

При скалярном управлении, с максимально возможным значением стандартной IR -компенсации, разброс потокосцеплений статора и ротора на низкой скорости (30 рад/с) находится в районе 0,2 В·с,

и снижается до 0,1 В·с при увеличении скорости до номинальной. При введении связи ДОС+ отклонения потока при разгонах и набросах нагрузки не превышают 0,1 В·с. При векторном управлении среднее значение отклонений потоков также составляет 0,1 В·с, однако при этом в потокосцеплении статора присутствует высокочастотная составляющая. Следует обратить внимание на токи



а)



б)

Рис. 9. Скалярное управление с ДОС+, при ошибке параметров звена обратной связи 5 %:
а) ошибка в коэффициенте передачи, б) ошибка постоянной времени

статора, которые при векторном управлении наибольшие, а при ДОС+ наименьшие (табл. 2). Таким образом, моделирование убедительно показало, что в электроприводе с ДОС+ стабилизация потокосцеплений практически на одном уровне с векторным управлением.

Известным недостатком векторного управления является его чувствительность к вариациям параметров электродвигателя, точнее, к отклонениям их от параметров, заложенных в модель блока управления [8]. Особенно сказывается неточность в измерениях скорости вращения двигателя, которой невозможно избежать, особенно при сложных динамических процессах. Для исследования этих особенностей были смоделированы процессы в приводе с векторным управлением с ошибкой по скорости 2 и 4 % (рис. 7, 8). При моделировании процессов «с ошибками» в моделях выведены мгновенные значения скорости и потокосцеплений ротора, разложенные по осям d и q (рис. 7–9), которые позволяют наглядно увидеть нарушения в процессах управления в асинхронных электроприводах.

Результаты моделирования очень красноречивы. При введении в сигнал скорости ошибки в 2 % (рис. 7) векторное управление «разваливается» на скорости, соответствующей частоте статорного напряжения 40 Гц, а при ошибке 4 % — 30 Гц (рис. 8).

При ошибках в параметрах динамического звена до 5 % в системах с ДОС+ видимых изменений в процессах нет (рис. 9).

Как следует из всех проведенных экспериментов с моделями асинхронных электроприводов (рис. 1–9) и экспериментов, проведенных ранее, в асинхронных электроприводах с частотным управлением с динамической положительной связью по току статора при набросах нагрузки наблюдаются минимальные переходные процессы (минималь-

ное время переходного процесса и минимальное отклонение от установившегося значения), полная компенсация статических ошибок по скорости и при этом наименьшие статорные токи, чем при других известных способах управления. Необходимо отметить, что значительные статорные токи в асинхронных электроприводах — это очень серьезная проблема для приводов в транспорте и энергокомплексах, где нагрузки недетерминированы. Для эффективной эксплуатации этих приводов снижение статорных токов играет очень важную роль.

Таким образом, моделирование процессов с контролем потокосцепления полностью подтвердило предположение профессора А. А. Усольцева и объяснило причину существенных преимуществ предложенной коррекции «ДОС+» перед традиционными алгоритмами. А варианты реализации этой коррекции, без каких-либо изменений в схемах и алгоритмах стандартных преобразователей частоты, за счет программируемого логического контроллера, как это описано в работе [1], делает широкое применение предлагаемой коррекции доступным практически в любом электроприводе.

Вывод. Проведенное моделирование АЭП со скалярным управлением и положительной обратной связью по току статора показало, что такая коррекция позволяет стабилизировать потокосцепления ротора и статора в электрической машине и, за счет этого, обеспечивает более эффективное формирование электромагнитного момента при меньших статорных токах и меньшем абсолютном скольжении. В свою очередь, такая коррекция улучшает статические и динамические характеристики асинхронного электропривода с частотным управлением и дает возможность применения преобразователей частоты среднего технико-экономического

го класса в сложных промышленных механизмах с высокими требованиями к статическим и динамическим характеристикам привода.

Благодарность

Авторы выражают благодарность участникам семинара секции «Электромеханические системы и средства управления ими» Университета ИТМО за активную дискуссию по данной проблеме, а также А. А. Усольцеву, которого считают полноценным автором идеи сравнительного моделирования асинхронных электроприводов с различными системами управления.

Библиографический список

1. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. The analysis of the quality of the frequency control of induction motor carried out on the basis of the processes in the rotor circuit // IOP Conf. Series. Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 944 (1). 012052. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012052.
2. Аникин А. С., Кодкин В. Л., Балденков А. А. Динамическая положительная связь в асинхронных электроприводах с частотным управлением // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дискуссия: материалы 8-й Междунар. науч. конф., Северный Чарльстон, Южная Каролина, США, 17–18 июня 2015. CreateSpace, 2015. С. 119–124. ISBN 978-1515019855.
3. Alekseev V. V., Emel'yanov A. P., Kozyaruk A. E. Analysis of The Dynamic Performance of a Variable-Frequency Induction Motor Drive Using Various Control Structures And Algorithms // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87, no. 4. P. 181–188. DOI: 10.3103/S1068371216040027.
4. Alekseev V. V., Kozyaruk A. E. Comparative Analysis of Models for Systems of an Automated Asynchronous Drive with Vector Control // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, no. 12. P. 702. DOI: 10.3103/S106837121312002X.
5. Yuhendri M., Ahyauardi A., Aswardi A. Direct Torque Control Strategy of PMSM Employing Ultra Sparse Matrix Converter // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2018. Vol. 9, no. 1. P. 64–72. DOI: 10.11591/ijpeds.v9n1.p64-72.
6. Алексеев В. В., Вершинин В. И., Васильев Б. Ю. Определение параметров векторов потокосцепления в электроприводах с векторным управлением // Записки Горного института. 2012. Т. 196. С. 222–225.
7. Квашнин В. О., Чередник Ю. Н. Построение математической модели асинхронного двигателя в синхронных осях с температурной компенсацией изменения потокосцепления ротора // Электротехнические и компьютерные системы. 2011. Т. 3 (79). P. 256–257.
8. Васильев Б. Ю., Коzyарук А. Е. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2013. Т. 13, № 2. С. 75–84.
9. Salama O., Tabyaoui A., Benchagra M. Control Methods on Three-phase Power Converters in Photovoltaic Systems // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2018. Vol. 9, no. 4. P. 1851–865. DOI: 10.11591/ijpeds.v9i4.pp1851-1865.
10. Zair M., Hazzab A. MRAS Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives Using Predictive Adaptation Mechanism // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2018. Vol. 9, no. 4. P. 1523–1533. DOI: 10.11591/ijpeds.v9n4.pp1523-1533.
11. Ещин Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. Кемерово: Изд-во Кузбасского гос. техн. ун-та, 2003. 247 с. ISBN 5-89070-324-2.

12. Исследования автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / под ред. В. А. Лифанова, С. Д. Левинтова. Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1990. 160 с.

13. Фигаро Б. И., Павлячик Л. Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.

14. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: ACADEMIA, 2006. 267 с.

15. Le-Huy H. Modeling and simulation of electrical drives using MATLAB/Simulink and Power System Blockset // IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2011. Vol. 3. DOI: 10.1109/IECON.2001.975530.

16. Perron M., Le-Huy H. Full Load Range Neural Network Efficiency Optimization of an Induction Motor with Vector Control using Discontinuous PWM // 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2006. Vol. 1. DOI: 10.1109/ISIE.2006.295586.

17. Le-Huy H., Sybille G. MATLAB/Simulink and PSpice as modelling tools for power systems and power electronics // 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. 2000. Vol. 2. 766–767. DOI: 10.1109/PESS.2000.867449.

18. Dessaint Louis-A., Champagne R. Real-time simulation of electric drives // Mathematics and Computers in Simulation. 2003. Vol. 63 (3-5). P. 173–181. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00065-X.

19. Dessaint Louis-A., Al-H. Kamal. Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems // Mathematics and Computers in Simulation. 2003. Vol. 63 (3-5). P. 135–143. DOI: 10.1016/S0378-4754(03)00170-8.

КОДКИН Владимир Львович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод» Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), г. Челябинск
SPIN-код: 1872-2435

ORCID: 0000-0003-4554-1153

AuthorID (SCOPUS): 56459057400

ResearcherID: Y-8281-2018

Адрес для переписки: kodkina2@mail.ru

АНИКИН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ, г. Челябинск
SPIN-код: 3449-0353

ORCID: 0000-0003-3203-4910

AuthorID (SCOPUS): 16512495400

ResearcherID: A-9929-2014

Адрес для переписки: anikinas@susu.ru

БАЛДЕНКОВ Александр Александрович, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод» ЮУрГУ, г. Челябинск; инженер ООО «КОСТЕС», г. Челябинск.

ORCID: 0000-0001-7751-5334

AuthorID (SCOPUS): 57200150858

Адрес для переписки: baloo@mail.ru

Хуан Чжи ЧЕН, студент Северо-Китайского энергетического университета, г. Баодин.

Для цитирования

Кодкин В. Л., Аникин А. С., Балденков А. А., Хуан Чжи Чен. Моделирование потокосцеплений асинхронного электродвигателя в динамических режимах. Сравнение эффективности различных алгоритмов управления // Омский научный вестник. 2019. № 6 (168). С. 27–33. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-168-27-33.

Статья поступила в редакцию 26.09.2019 г.

© В. Л. Кодкин, А. С. Аникин, А. А. Балденков, Хуан Чжи Чен