

МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ, НЕ СВЯЗАННЫХ МЕХАНИЧЕСКИ

В статье приводится сравнительный анализ структур синхронизации движения электроприводов средней и высокой мощности. Производится сравнение структур синхронизации с точки зрения влияния на итоговую работу системы и аппаратных методов синхронизации с точки зрения применимости и максимального быстродействия. В основу математического аппарата положен принцип разделения движений каждого из электроприводов и представление его передаточной функции в матричной форме. Диапазоны регулирования и быстродействие различных типов систем сравниваются экспериментально путем оценки быстродействия передачи данных и оценки пульсаций скорости на низких оборотах.

Ключевые слова: синхронизация, электропривод переменного тока, система «ведомый—ведущий», система с перекрестными связями, согласование, обратные связи.

Введение. Качественный скачок в развитии возможностей силовых полупроводниковых преобразователей, единогласно отмеченный авторами в начале XXI века, привел к тому, что возможности электропривода значительно расширились. Это во многом связано с тем, что, несмотря на широкую стандартизацию устройств управления электроприводами, ряд современных преобразователей имеет свободно программируемые узлы, которые позволяют внести в свой состав индивидуальные настройки для конкретного типа электропривода.

Подобные обстоятельства не могли не повлечь расширения областей применения электрического привода в те области, где традиционно применялись другие типы приводов. С другой стороны, достоинства электрического привода: возможность передачи энергии без значительных потерь, высокие диапазоны регулирования скорости и положения, высокие возможности по автоматизации процессов повлекли за собой ответный рост, или корректировку требований со стороны технологического процесса.

Указанные тенденции требуют разработки алгоритмов управления электроприводами, которые ранее не применялись или экстраполяции уже известных алгоритмов управления на другие типы электроприводов. Внедрение подобных устройств в промышленности позволит получить современное автоматизированное производство даже в тех областях, где ранее этого невозможно было достичь.

Постановка задачи. Существует достаточно большое количество механизмов, технологические требования которых подразумевают согласованную работу нескольких несвязанных элементов. К та-

ким механизмам можно отнести рельсовые краны с двумя ведущими колесами, станочные электроприводы, электроприводы подвесных конвейеров. Подобные вопросы также возникают в более уникальных системах, например, приводы разводных мостов [1] и шлюзов. Несогласованность в работе подобного рода электроприводов приводит к тому, что двигатели могут иметь разные нагрузки, за счет чего один из двигателей может выйти из строя заранее.

Попытки согласования работы механически несвязанных систем методами электрического привода предпринимались довольно давно, так до сих пор на некоторых промышленных предприятиях используется система «электрический вал» [2], данная система широко описана в литературе и основана на идеи электрического соединения роторных цепей асинхронных машин, статорные обмотки которых подключены к сети (см. рис. 1). Эти машины в простейшем случае могут быть как основными рабочими, так и располагаться на валах основных рабочих машин. Последний названный факт и является основным недостатком подобной системы — применение регулируемого привода требует наличия дополнительной пары синхронизирующих элементов. Этот недостаток частично был исключен переходом с асинхронных двигателей на сельсины [3]. Тем не менее у подобной системы оставался недостаток конечной точности синхронизации обусловленной работой сельсинов на низких частотах вращения.

Появление цифровых систем электропривода, специально разработанных и ориентированных на решение задач управления и регулирования по-

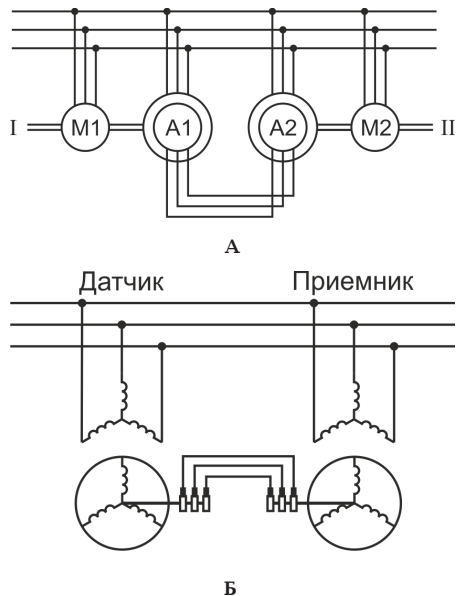


Рис. 1. Система «электрический вал»:
А — на основе асинхронных машин;
Б — на основе сельсинов

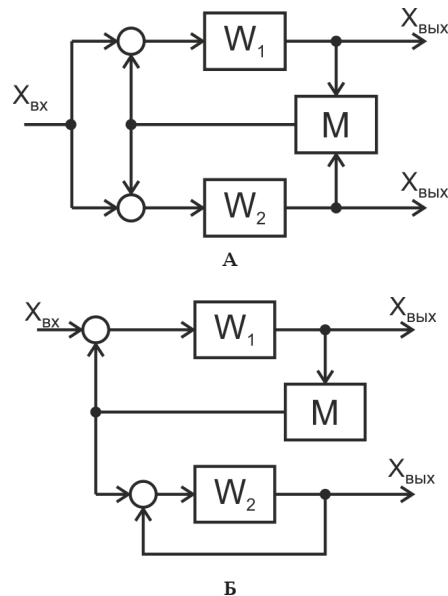


Рис. 2. Структурная схема методов синхронизации:
А — с перекрестными связями;
Б — система «ведомый–ведущий»

ложения электродвигателей (так называемых сервоприводов), исключило или почти минимизировало задачи цифровой синхронизации в станочных электроприводах. Специальная конструкция электродвигателей такого типа (низкий момент инерции, высокая частота тока статора, наличие встроенных высокоточных датчиков) позволяет решать весь спектр подобного рода задач. Однако существует один важный нюанс: если в станочном электроприводе используются двигатели малой мощности, то в других типах систем, названных выше, требуются двигатели существенно большей мощности. В настоящее время промышленное производство сервоприводов ограничивается в среднем диапазоне мощностей около 10кВт [4, с. 30–57; 5, с. 15]. Такой диапазон практически обоснован, но существует ряд электроприводов, в которых используются двигатели большей мощности, и требуется решить указанные задачи на общепромышленных двигателях.

В ряде публикаций показана применимость синхронизации к общепромышленным двигателям малой мощности [6]. Поэтому требуется оценить применимость существующих алгоритмов цифровой синхронизации для электроприводов вне зависимости от их мощности. Основная задача, решаемая авторами, — это поиск наиболее качественных структур синхронизации для электрических машин вне зависимости от мощности.

Сравнительный анализ алгоритмов согласования. На данном этапе важно оценить, насколько введение дополнительных обратных связей и появление новых алгоритмов расчета повлияет на возможности системы и не приведет ли это к ограничениям, которые могут быть определены даже во время разработки структурной схемы электропривода.

Наиболее простыми и общеприменимыми структурами согласования скоростей электроприводов можно указать системы с перекрестными связями и системы, построенные по принципу, «ведомый–ведущий» [7]. Принципиальным отличием между двумя структурами является то обстоятельство,

что в первом случае каждый из электроприводов осуществляет определение необходимых для согласованного движения координат, а во втором случае — определение осуществляется в одном из электроприводов, после чего на второй подается скорректированное задание или сигнал корректировки. Стоит также отметить, что в случае перекрестных связей корректировка координат электропривода будет иметь усредняющий характер, а в случае системы «ведомый–ведущий» — будет иметь в чистом виде корректирующий характер для ведомого электропривода. Структурные схемы описанных систем показаны на рис. 2. Рассмотрим подробнее каждую из структур. Для простоты будем считать, что электроприводы имеют одинаковый тип и выполняют схожие по траектории движения. Рассмотрим сначала систему с перекрестными связями.

На практике довольно часто перекрестные связи между идентичными каналами однотипных систем регулирования проявляются между выходными координатами идентичных звеньев. В том случае, если эти связи не обусловлены физическими свойствами объекта, а внедряются искусственно, однотипность перекрестных связей может обеспечиваться настройкой структуры управления. Одним из наиболее удобных методов математического описания систем с перекрестными связями является матричный метод [8]. Описанные выше синхронизирующие перекрестные связи между идентичными звеньями симметричных систем характеризуются матрицей коэффициентов передачи вида:

$$N = \frac{1}{n} \begin{vmatrix} n-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & n-1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & -1 & \dots & n-1 \end{vmatrix},$$

где n — количество обратных связей, другими словами, количество синхронизируемых электроприводов. Представление данных в матричной форме возможно, потому что, во-первых, компоненты

каждой из обратных связей являются переменными одной и той же физической природы, в нашем конкретном случае — это угловые скорости вращения и углы поворота валов. Во-вторых, однотипность систем подразумевает, что аппаратная реализация обратных связей одинакова, разница только в коэффициентах усиления.

Найдем выражение для передаточных функций эквивалентных звеньев усредненного и относительного движений для случая охвата i -х идентичных звеньев прямыми синхронизирующими перекрестными связями. За основу возьмем представленный на рис. 2 общий вид двухканальной однотипной системы регулирования, на котором действуют прямые усредняющие перекрестные связи. В соответствии с определением усредняющей связи для структурной схемы можно написать следующее уравнение:

$$x_{i\text{ввых}} = W_i x_{i\text{квх}} + M \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{j\text{вх}},$$

где W_i — передаточная функция i -го звена в сепаратном канале; M — передаточная функция перекрестных связей. Это уравнение можно переписать следующим образом:

$$x_{i\text{кввх}} = \left(W_i + \frac{1}{n} M \right) x_{i\text{квх}} + \frac{1}{n} M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n x_{ijj}.$$

Последняя система уравнений описывает i -е звено однотипной системы регулирования с прямыми симметричными перекрестными связями, но с измененными передаточными функциями i -го звена в сепаратном канале (вместо W_i стало $W_i + \frac{1}{n} M$) и прямой перекрестной связи (вместо M стало $\frac{1}{n} M$). В целях упрощения анализа полученной системы полезно ввести понятия усредненного и относительного движения [8]. Относительному движению соответствуют разности координат идентичных звеньев и входных воздействий. Очевидно, что при системе из двух электроприводов относительное движение будет всего одно. Усредненному движению соответствуют средние значения координат идентичных звеньев и внешних воздействий (как задающих, так и возмущающих).

Найдем передаточные функции эквивалентных звеньев для усредненного движения:

$$W_{i-} = W_i + \frac{1}{n} M - \frac{1}{n} M = W_i;$$

для относительного движения:

$$W_{i+} = W_i + \frac{1}{n} M - \frac{n-1}{n} M = W_i + M.$$

Таким образом, усредняющие перекрестные связи не меняют характера усредненного движения, так как эквивалентная передаточная функция усредненного движения оказалась равной передаточной функции звена в сепаратном канале. Это позволяет сделать вывод, что в системе с перекрестными связями быстродействие будет определяться исключительно свойствами электропривода. Теперь рассмотрим систему «ведомый — ведущий». Матрица синхронизирующих связей будет выглядеть:

$$N = \frac{1}{n} \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & -1 \\ 1 & 1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}.$$

За основу также возьмем представленный на рис. 2 общий вид системы регулирования, на котором действует одна синхронизирующая обратная связь. Для простоты также будем считать ведомый и ведущий электроприводы одинаковыми. В соответствии с определением синхронизирующей связи для структурной схемы можно написать следующее уравнение:

$$x_{i\text{кввх}} = W_i x_{i\text{квх}} + M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (x_{i\text{квх}} - x_{j\text{вх}}),$$

где W_i — передаточная функция i -го звена в сепаратном канале; M — передаточная функция синхронизирующей связи. Это уравнение можно переписать следующим образом:

$$x_{i\text{кввх}} = [W_i + (n-1)M] x_{i\text{квх}} + M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n x_{j\text{вх}}.$$

Найдем передаточные функции эквивалентных звеньев для усредненного движения:

$$W_{i+} = [W_i + (n-1)M] - (n-1)M = W_i;$$

для относительного движения:

$$W_{i-} = [W_i + (n-1)M] + M = W_i + nM.$$

Получается тот же результат, что и в предыдущем случае: синхронизирующие связи не влияют на усредненное движение. По результатам сопоставления структур можно сделать вывод, что системы с перекрестными связями и одной синхронизирующей связью идентичны в плане влияния на быстродействие системы и их выбор может определяться в каждом конкретном случае аппаратными возможностями системы.

Также стоит отметить случай комбинированной работы двух систем. В этом случае в системе действуют как синхронизирующие, так и усредняющие связи. Тогда при оценке усредненного движения необходимо учитывать именно перекрестные усредняющие связи. В случае оценки относительного движения необходимо учитывать именно синхронизирующие связи.

Сравнительная экспериментальная оценка методов синхронизации. Электроприводы более высокой мощности в отличие от своих менее мощных аналогов отличаются в первую очередь ограниченными возможностями по быстродействию.

Это обусловлено как большей массой вращающихся частей электрической машины, так и большими индуктивными сопротивлениями ее обмоток. Поэтому важно оценить, насколько методы аппаратной реализации связей между электроприводами соответствуют быстродействию самих электроприводов. Помимо этого, оценка быстродействия таких систем важна еще и с точки зрения возможности отработки импульсных сигналов с датчиков скорости и положения.

Современные аппаратные возможности электроприводов позволяют осуществить связь между

двумя приводными устройствами несколькими различными методами:

- передача аналогового корректирующего сигнала;
- передача цифрового корректирующего сигнала;
- передача сигналов по стандартному протоколу передачи данных.

Передача аналогового сигнала видится наиболее простым методом организации синхронизирующих и усредняющих обратных связей, однако современные полупроводниковые преобразователи построены на базе цифровых контроллеров и процессоров, поэтому при передаче аналоговый сигнал проходит двойное преобразование. При этом быстродействие системы в значительной мере снижается за счет ЦАП и АЦП [9, 10].

Применение цифровых сигналов для формирования синхронизирующих и усредняющих обратных связей более обосновано типом используемых в промышленности преобразователей и датчиков. При этом в структуре электропривода система регулирования становится полностью цифровой [11]. В таком случае быстродействие системы синхронизации будет определяться скоростью передачи данных и тактовой частотой цифровых устройств. Поэтому оценку быстродействия системы можно дать экспериментальным путем — оценив скорость прохождения одного цифрового импульса от источника до приемника, оценивая при этом обработку сигнала.

Как уже было отмечено выше, существует две возможности реализовать цифровую синхронизирующую связь без использования дополнительного оборудования: связать два цифровых выхода одного преобразователя с двумя цифровыми входами другого преобразователя или по стандартному протоколу, например стандарта RS-485, который довольно широко представлен в системах электропривода [12]. В первом случае система работает по принципу возникновения цифрового сигнала для уменьшения или увеличения выходной координаты электропривода. Во втором сигнал передается по асинхронному интерфейсу. Реализация подобных систем имеет идентичный характер во всем диапазоне мощностей эксплуатируемых электроприводов и ограничена по возможностям в первую очередь проблемами помехоустойчивости.

В качестве объекта экспериментального исследования использовались промышленные преобразователи, установленные в лаборатории электропривода ЮУрГУ. На первом этапе производилось определение собственного быстродействия преобразователя. Для этого на вход преобразователя подавался цифровой сигнал, который непосредственно преобразователем транслировался на его выход. При этом оценивалось время запаздывания сигнала (см. рис 3). В рамках экспериментального исследования были протестированы преобразователи Mentor MP фирмы Control Techniques и ACS880 фирмы ABB. В обоих случаях процесс прохождения сигнала занимал не более 0,1 мкс. Во втором случае оценка производилась для преобразователей Altivar 71 и Altivar Process 900 фирмы Schneider Electric, связанных по стандарту RS-485. В этом случае быстродействие системы при передаче пакета данных о сигнале обратной связи не превысило 10 мкс. Такого быстродействия хватит для обеспечения работы электропривода в диапазоне скоростей от 0 до 1000 об/мин с датчиком точностью до 5000 имп/об.

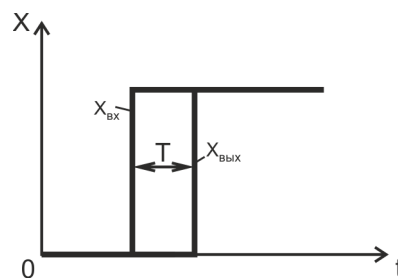
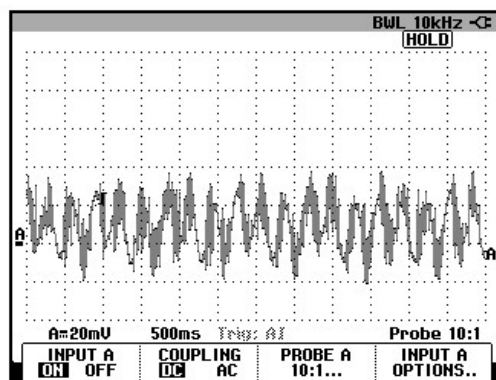
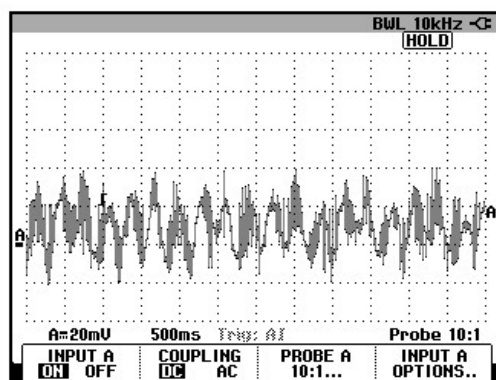


Рис. 3. К описанию экспериментальных данных



A



B

Рис. 4. Вид оборотных пульсаций:
A — при номинальной нагрузке на валу;
B — на холостом ходу

На практике электроприводы высокой мощности работают с менее высокими скоростями [13], что позволяет увеличить количество импульсов датчика как минимум вдвое. Еще одним важным фактором, оказывающим существенное влияние на работу электропривода, особенно на низких скоростях, является качество сопряжения датчика скорости с валом. Как уже было сказано выше, для общепромышленных систем такие датчики не входят в состав агрегата и требуют аккуратного механического монтажа. В согласованных электроприводах такие явления могут привести к наложению пульсаций в ротивофазе, за счет чего может возникнуть значительное отклонение выходных координат [14]. В большинстве промышленных исполнений датчики комплектуются гибкой муфтой, которая должна частично спасать от этого недостатка. Для оценки оборотных пульсаций было также произведено экспериментальное исследование уровня пульсаций в электроприводе мощностью 5,5 кВт, на вал ко-

торого был установлен датчик разрядностью 4096 имп/об.

На рис. 4 показан вид оборотных пульсаций по сигналу, снятому с аналогового выхода преобразователя частоты, к которому был подключен описанный выше электропривод на холостом ходу и под номинальной нагрузкой. Влияние пульсаций особенно заметно на малых скоростях, поэтому электропривод работал со скоростью 7 об/мин. Выбор такого значения скорости обусловлен наиболее отчетливым характером пульсаций, достигнутым именно на этой скорости. По виду графиков видно, что нагрузка не влияет на вид оборотных пульсаций сигнала скорости. В обоих случаях максимальное амплитудное отклонение скорости равнялось 7,4 об/мин, минимальное — 6,6 об/мин. Итоговое максимальное рассогласование скорости может составить 0,8 об/мин.

Принимая во внимание специфику технологических процессов, рассматриваемых в данной статье, полученное отклонение скорости может оказать незначительное влияние на работу взаимосвязанных электроприводов в том случае, если электроприводы работают в качестве источника скорости. В случае работы электроприводов в качестве источника положения такое рассогласование может стать довольно критичным, особенно в случае низкооборотного двигателя с низким передаточным числом редуктора. Поэтому стоит заключить, что работа взаимосвязанных электроприводов требует более качественной установки датчиков скорости для получения более высокого качества работы системы на низких оборотах [15].

На основании экспериментального исследования можно заключить, что быстродействие цифровых обратных связей в значительной степени превосходит динамические свойства непрерывной части современных электроприводов как средней, так и высокой мощности. На основании этого можно сделать вывод, что внедрение специальных алгоритмов согласования, например [16], не снижает динамических возможностей систем, входящих в ее состав.

Выводы. Показано, что современные системы общепромышленного электропривода позволяют применять методы синхронизации движений электроприводов даже высокой мощности. В этом случае динамические и точностные возможности полученной системы практически идентичны (при учете конечного быстродействия обратных связей) свойствам сепаратных систем, входящих в ее состав.

Показано, что структуры с перекрестными и синхронизирующими (система «ведомый — ведущий») обратными связями не вносят дополнительной структурной инерционности в состав электропривода. Применение каждой из указанных систем определяется свойствами аппаратной реализации и может быть индивидуально в каждом конкретном случае.

Показано, что даже простейшие методы цифровой синхронизации электроприводов, такие как аппаратное соединение цифровых входов и выходов полупроводниковых преобразователей, управляющих электроприводами; применение стандарта RS-485 имеют быстродействие, в значительной степени превосходящее быстродействие электроприводов, что дает возможность рекомендовать их к применению в подобных системах.

Показано, что на работу взаимосвязанных электроприводов на низких скоростях вращения элект-

родвигателей оказывают значительное влияние оборотные пульсации датчика скорости. Поэтому для обеспечения качественной работы взаимосвязанных систем электропривода требуется более качественная установка датчиков скорости, нежели в общепромышленных системах. Также стоит отметить, что указанное требование распространяется на те системы, в которых электроприводы работают в качестве источника положения или же требуют позиционирования в рамках технологического процесса.

Библиографический список

1. Руководство по проектированию поворотных мостов / Мин-во транспорта и строительства СССР. Москва: Транспорт, 1990. 93 с.
2. Останин С. Ю. Управление электроприводом рабочих механизмов в режиме электрического синхронного вала машин по выпуску химических волокон и нитей // Естественные и технические науки. 2017. № 12 (114). С. 229–231.
3. Артемьев А. В., Воробьев В. В., Горшков А. А., Перечесов В. С. Цифровое устройство управления сельсинными указателями // Морские интеллектуальные технологии. 2015. № 3-1 (29). С. 163–167.
4. Synchronous and Asynchronous Servo Motors for SIMOVERT MASTERDRIVE. Catalog DA 65.3. Siemens, 2004. 224 p.
5. Сервопривод переменного тока высокого разрешения для сетевых коммуникационных приложений. Руководство пользователя. Delta Electronics. 2009. 350 с. URL: https://www.deltaelectronics.info/content/files/ASDA-AB_manual_rus.pdf (дата обращения: 07.07.2021).
6. Аксенов В. П. Программная взаимная синхронизация частоты вращения валов механически развязанных электродвигателей // Научный вестник ДГМА. 2017. № 3 (24Е). С. 71–77.
7. Усынин Ю. С., Григорьев М. А., Шишков А. Н., Бычков А. Е., Белоусов, Е. В. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. 2011. Вып. 16, № 34 (251). С. 21–27.
8. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического управления. Москва: Энергия, 1970. 288 с.
9. Бычков А. Е., Кашаев Д. И., Москов Т. Т. Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах // Вестник ЮУрГУ. 2011. Вып. 15. С. 62–66.
10. Григорьев М. А., Бычков А. Е., Белоусов Е. В. [и др.]. Силовые полупроводниковые преобразователи для питания синхронных реактивных электроприводов и обеспечение электробезопасности персонала, обслуживающего эти установки: моногр. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. 99 с.
11. W.P.M.H. Heemels. Asynchronous measurement and control: a case study on motor synchronization // Control Engineering Practice. 1999. Vol. 7. P. 1467–1482.
12. Slobodan N. Vukosavic. Digital Control of Electrical Drives. Springer Science & Business Media, 2007. 353 p.
13. Zheltov A. S., Bychkov A. E. Speed coordinated electric drives in the woodworking machines // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Proceedings. 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076318.
14. Рябов Г. Г. Исследование режимов заполнения шлюза с дополнительным переливом над опускаемым затвором // Журнал университета водных коммуникаций. 2011. № 4. С. 8–16.
15. Мерзляков Ю. В., Толмачев Г. Исследование влияния оборотных пульсаций напряжения тахогенератора на дополнительные потери мощности в электроприводе // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 106–111.

16. RS-485 for Digital Motor Control Applications, SSLA143. Application Report. Texas Instruments Incorporated. 2003. 14 p. URL: https://www.ti.com/lit/an/slla143/slla143.pdf?ts=1631808122658&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F (дата обращения: 10.08.2021).

БЫЧКОВ Антон Евгеньевич, кандидат технических наук, заместитель директора института по энергетическому направлению, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод».

SPIN-код 2577-0558

AuthorID (РИНЦ) 617123

AuthorID (SCOPUS): 43860904200

ResearcherID: T-5272-2019

Адрес для переписки: buchkova@susu.ru

ФУНК Татьяна Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод».

SPIN-код 5860-9461

AuthorID (РИНЦ) 640565

ORCID: 0000-0001-8930-1392

AuthorID (SCOPUS): 56458018000

ResearcherID: P-9766-2015

Адрес для переписки: kozinata@susu.ru

АЛЕКСАНДРОВ Андрей Валерьевич, магистрант кафедры «Автоматизированный электропривод».

Адрес для переписки: drew_alex20@mail.ru

Для цитирования

Бычков А. Е., Функ Т. А., Александров А. В. Методы синхронизации электроприводов, не связанных механически // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 56–61. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-56-61.

Статья поступила в редакцию 11.09.2021 г.

© А. Е. Бычков, Т. А. Функ, А. В. Александров