

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ КООРДИНАТ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДАЧ

Троцкий А. А., Лауниконис В. В., Ивченков Н. В.

Многодвигательная конфигурация электроприводов на сегодняшний день находит применение в текстильной промышленности, конвейерах, полиграфическом и станочном оборудовании. Применение нескольких двигателей на направляющих одной оси даёт выигрыш по массогабаритным показателям, но появляется проблема синхронизации скоростей и положений. Выполнен обзор существующих методов синхронизации механических координат двигателей в многодвигательных электроприводах и систем на их основе. Наибольшее распространение в современной промышленности имеют такие, как система «ведущий-ведомый», метод перекрёстных связей и система с «электронным» линейным валом. Рассмотрены основные особенности структурных схем и принципы регулирования выбранных систем синхронизации многодвигательных электроприводов. Для выбранных систем было проведено моделирование в пакете прикладных программ MATLAB Simulink и получены графики переходных процессов механических координат многодвигательного электропривода при стандартных воздействиях. В результате анализа переходных процессов сделаны выводы о качестве регулирования каждой системы. На основе полученных результатов выявлено, что система синхронизации «ведущий-ведомый», хоть и является самой простой в исполнении, обладает жесткостью, недостаточной для применения в высокоточных электроприводах подачи. Система, построенная по методу перекрёстных связей, является простой в реализации, но обладает ограниченной производительностью и не подходит в тех случаях, где относительный угол является основной координатой. В системе вводится блок перекрёстных связей, величина коэффициента которого значительно влияет на колебания в контурах момента и скорости. За счет наибольшего влияния момента инерции ведущего привода в исходной системе с «электронным» линейным валом и влияния его момента, предложенный метод проще всего практически реализуем.

Ключевые слова: моделирование, система автоматического регулирования, электропривод подачи, многодвигательный электропривод, синхронизация положения, система «ведущий-ведомый», метод перекрестных связей, «электронный» линейный вал, переходные процессы, металлорежущие станки, сравнительный анализ.

Багатодвигунна конфігурація електроприводів сьогодні застосовується в текстильній промисловості, конвеєрах, поліграфічному і верстатному обладнанні. Застосування декількох двигунів на напрямних одній осі дає вигоду за габаритними показниками, але з'являється проблема синхронізації швидкостей і положень. Виконано огляд існуючих методів синхронізації механічних координат двигунів в багатодвигунових електроприводах і систем на їх основі. Найбільшого поширення в сучасній промисловості мають такі, як система «ведучий-ведений», метод перехресних зв'язків і система з «електронним» лінійним валом. Розглянуто основні особливості структурних схем і принципи регулювання обраних систем синхронізації багатодвигунових електроприводів. Для обраних систем було проведено моделювання в пакеті прикладних програм MATLAB Simulink і отримані графіки перехідних процесів механічних координат багатодвигунного електроприводу при стандартних впливах. В результаті аналізу перехідних процесів зроблені висновки про якість регулювання кожної системи.

На основі отриманих результатів виявлено, що система синхронізації «ведучий-ведений», хоч і є найпростішою у виконанні, володіє жорсткістю, недостатньою для застосування в високоточних електроприводах подач. Система, побудована за методом перехресних зв'язків, є простий в реалізації, але має обмежену продуктивність і не підходить в тих випадках, де відносний кут є основною координатою. В системі вводиться блок перехресних зв'язків, величина коефіцієнта якого значно впливає на коливання в контурах моменту і швидкості. За рахунок найбільшого впливу моменту інерції ведучого приводу в вихідній системі з «електронним» лінійним валом і впливу його моменту, запропонований метод найпростіше практично реалізований.

Ключові слова: моделювання, система автоматичного регулювання, електропривод подач, багатодвигунний електропривод, синхронізація положення, система «ведучий-ведений», метод перехресних зв'язків, «електронний» лінійний вал, перехідні процеси, металорізальні верстати, порівняльний аналіз.

Nowadays the multi-motor electric drive configuration is implemented in the textile industry, conveyors, printing equipment and machine tools. Using several motors on the guides of one axis can lighten the structure; however, a challenge of synchronizing speed and position occurs. A review of existing mechanical coordinates synchronization techniques in multi-motor electric drives, and systems based on these techniques, has been made. The most commonly used in modern industry are: the Master-Slave configuration, the Cross-Coupling technique, and the Electronic Virtual Line-Shafting. The main features of structures and regulation principles of the selected multi-motor synchronization techniques have been reviewed. Simulation of the above-said systems has been performed in MATLAB Simulink. The mechanical coordinates' transient responses of a multi-motor drive with the standard perturbing factors were obtained. As a result of analysis of these transients, conclusions were made about the control quality of each system. Based on the obtained results, one might say the Master-Slave configuration, although the easiest to implement, has robustness insufficient for use in high-precision electric drives. The Cross-Couple technique, although simple, has limited performance and is not suitable in cases where the relative angle is the main coordinate. The value of the cross-coupling feedback gain significantly affects the magnitude of oscillations in the moment loop and the speed loop. Due to the highest moment of inertia influence of the master drive of the virtual line shaft and its torque reflection, the proposed method is easiest to implement.

Keywords: simulation, automatic control system, feed drive, multi-motor drive, position synchronization, Master-Slave configuration, Cross-Coupling technique, Electronic Virtual Line Shaft, transient responses, machine tools, comparative analysis.

Троший А. А.

магістр кафедри ЭСА ДГМА
troshiyalexander@gmail.com

Лауниконис В. В.

магістр кафедри ЭСА ДГМА
leon1011@gmail.com

Ивченков Н. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА
mykola_ivchenkov@ukr.net

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 681.587

Троший А. А., Лауниконис В. В., Ивченков Н. В.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ КООРДИНАТ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОДАЧ

Металлорежущие станки в настоящее время получили широкое применение. Такие станки, в зависимости от типа или назначения, выполняют широкий круг задач. Ключевым параметром, влияющим на качество готового изделия, является точность позиционирования инструмента. К основным задачам, возникающим при создании следящих электроприводов подач, относятся [1, 2]:

- обеспечение широкого диапазона скоростей слежения при малых значениях средне-квадратичных ошибок;
- обеспечение плавного движения рабочего органа по направляющим при малых скоростях слежения.

Для достижения указанных условий при построении систем управления в основном применяются безредукторные синхронные электроприводы с высокоточными датчиками положения с разрешающей способностью по углу менее сотых долей угловой секунды [1, 2].

Выигрыш по массогабаритным показателям можно получить, используя двигатели меньшей мощности на обеих направляющих оси. Однако при такой конструкции необходимо решить проблему синхронизации работы двигателей при сохранении высоких динамических качеств системы слежения, что и является основной целью данной работы.

Для определения методов синхронизации, подходящих для данной задачи, проведён анализ и сравнение таких методов управления многодвигательными приводами, как система «ведущий-ведомый» [3], метод перекрёстных связей [3, 4, 5] и система с «электронным» линейным валом [6, 7]. Приведенные методы являются промышленно применимыми. Типовыми многодвигательными системами являются различного рода наполнители, электронные коробки передач, роликовые конвейеры, летучие ножницы и т. п. [8].

Система «ведущий-ведомый». Конфигурация системы «ведущий-ведомый» изображена на рис. 1. Значение скорости ведущего привода является задающим для ведомых. В такой системе любые изменения нагрузки на ведущем приводе влияют на работу ведомых, но изменения нагрузки на любом из ведомых приводов никак не отражаются на работе остальных. Применение данной системы рекомендуется только там, где синхронизация скоростей и положений не является основной задачей, так как синхронная работа приводов во время динамических нагрузок не всегда возможна.

Метод перекрёстных связей. Метод был изначально предложен Кореном Й. для промышленных систем [5] и усовершенствован Томизукой М. [3], Джао Д. З. и другими [4]. Структура такого привода изображена на рис. 2. Основным отличием от первого метода является наличие дополнительного сигнала обратной связи по относительной разнице скоростей или угловых перемещений двух систем. Это позволяет учесть любые изменения нагрузок в системе, используя данный сигнал как относительный сигнал слежения, получаемый через корректирующие звенья K_1 , K_2 . В данном случае можно получить хорошую степень синхронизации механических координат.

Однако, в [3, 4, 5] не раскрывается вопрос о возможности применения такой системы в приводах с более чем двумя двигателями. К тому же, коэффициенты усиления в обратной связи по ошибке должны быть достаточно большими для того, чтобы обеспечивать синхронную работу [8]. На практике же известно, что большой коэффициент усиливает шум и, как

следствие, биение момента. Данный метод рекомендуется для двухдвигательных систем электропривода, где требуется достаточно высокая точность синхронизации и низкая стоимость.

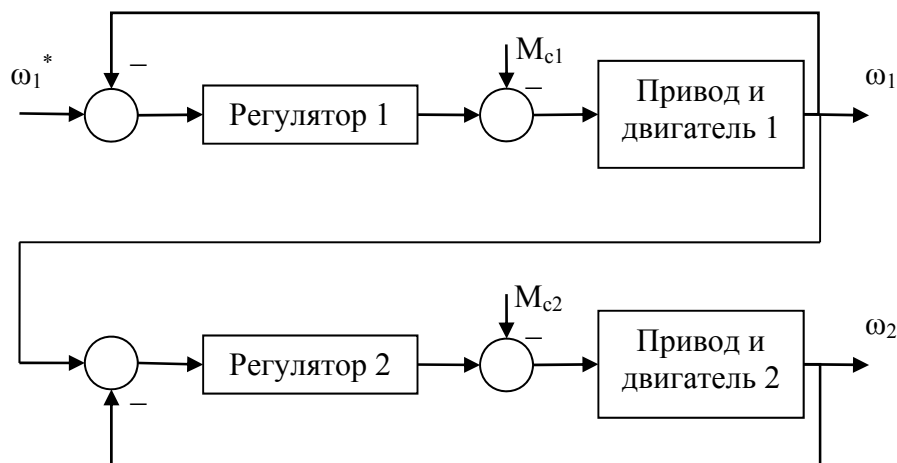


Рис. 1. Структура двухдвигательной системы «ведущий-ведомый»

Система с «электронным» линейным валом. Система с «электронным» линейным валом, изначально представленная Лоренцем Р. и Мейером А. [6] и усовершенствованная Валенцулой А. и Лоренцем Р. [7], представлена на рисунке 3. Авторы обеих топологий утверждают, что механический линейный вал может быть заменен несколькими приводами, синхронизированными электронно, где вал моделируется как простой электропривод с обратной связью по скорости (виртуальный линейный вал) [6].

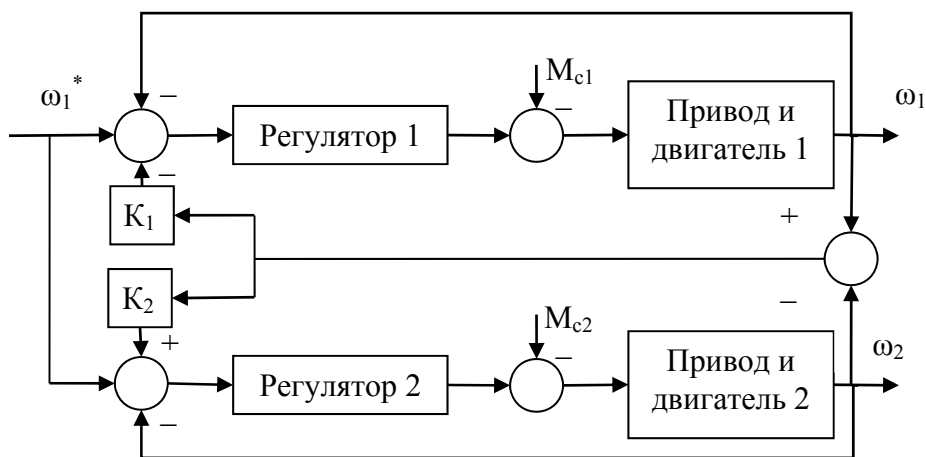


Рис. 2. Структура системы с перекрёстными связями

Обе системы обеспечивают хорошую скорость синхронизации во время пуска и в статических режимах, и компенсируют возмущающие воздействия на любом из двигателей. Однако отсутствие основного регулятора положения в прямом канале создает ошибку в сигнале по относительному положению между осями в динамических режимах, а также статическую ошибку между сигналом задания и положением каждой оси. Следовательно, данная схема может быть применена там, где относительная разность углов поворота не является основным ограничением.

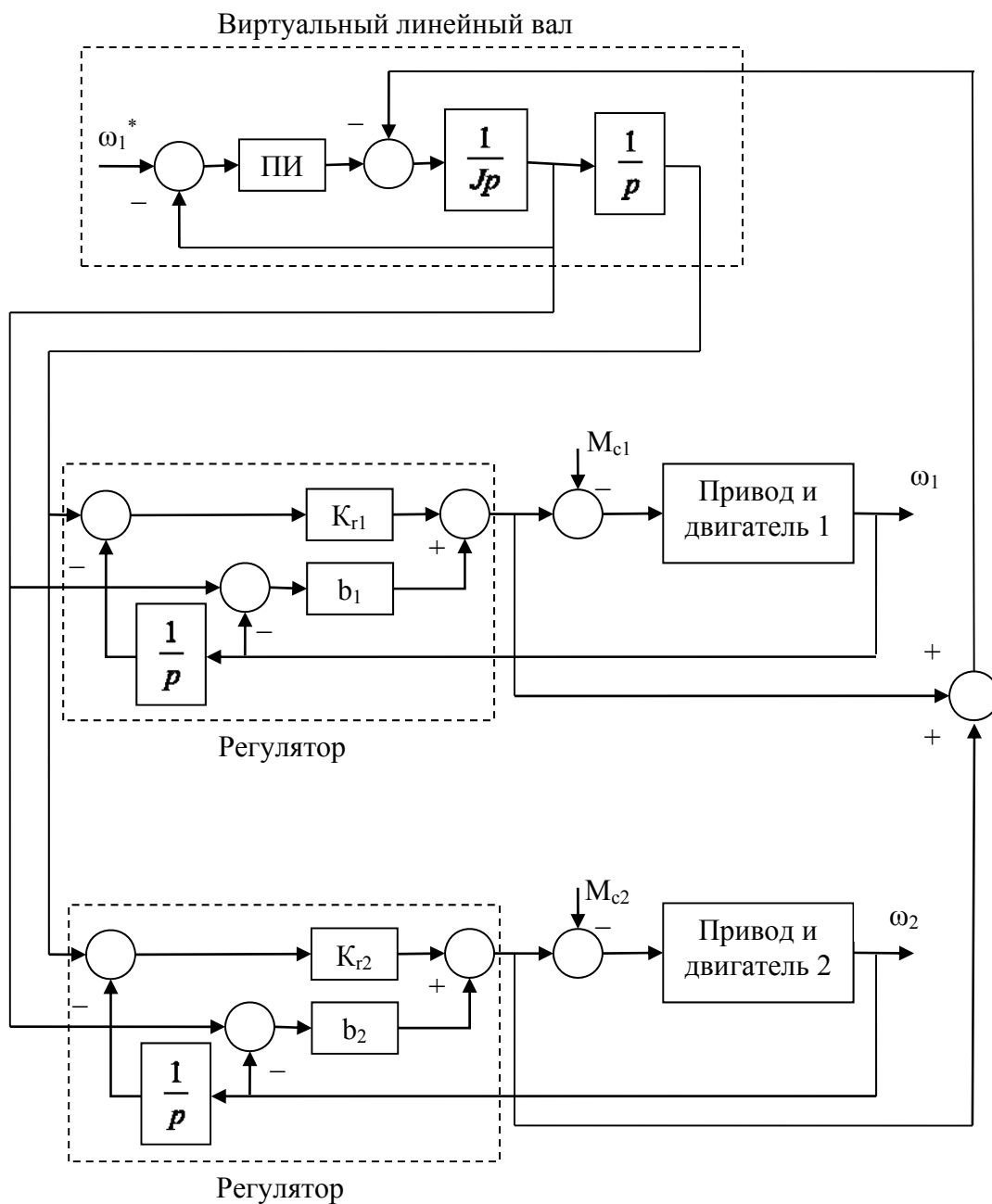


Рис. 3. Структура двухдвигательной системы с «электронным» линейным валом

Математическое моделирование и анализ переходных процессов. Математические модели систем синхронизации рассмотрены для двух асинхронных двигателей АИР56В2, паспортные данные которых представлены в таблице 1. В качестве регуляторов тока и скорости, а также регулятора в канале перекрёстных связей используется ПИД-регулятор:

$$W_{PID}(p) = K_P + K_I \frac{1}{p} + K_D \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}}, \quad (1)$$

где K_P , K_I , K_D – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно;

N – коэффициент фильтрации для дифференциальной части.

Таблица 1

Паспортные данные двигателей АИР56В2

Механическая характеристика					P , кВт	U , В	J , кг·м ²	n , об/мин	$\cos\varphi$
m_n	m_m	m_k	$s_{ном}, \%$	$s_k, \%$					
2,0	1,5	2,2	7,5	51,0	0,25	220/380	0,00047	2720	0,78

Численные значения параметров регуляторов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры регуляторов

K_{pm}^n	K_{pm}^u	K_{pc}^n	K_{pc}^u	K_i^n	K_i^u	K_i^d
0,118	63,76	32,78	8194	0,00874	1,547	0,000012

На рис. 4 приведены результаты математического моделирования в среде MATLAB Simulink двухдвигательного электропривода с разными моментами нагрузки $M_{c1} \neq M_{c2}$ при системе синхронизации «ведущий-ведомый».

Исходя из графика ошибки синхронизации по скорости (Relative speed) на рис. 4 можно сделать вывод, что из-за отсутствия информации о координатах ведомого электропривода, изменения момента нагрузки на нем в динамических режимах приводят к рассогласованию скоростей. Это, как следствие, приводит к накоплению ошибки синхронизации по положению (Relative position) за время переходного процесса и её сохранения на установившемся уровне в статическом режиме.

На рис. 5 приведены результаты математического моделирования переходных процессов для двухдвигательного электропривода с разными моментами нагрузки $M_{c1} \neq M_{c2}$ и системой синхронизации с перекрестными связями. На рисунке представлены кривые моментов, скоростей, рассогласований скоростей и положений.

Из рисунка 5 видно, что статическая ошибка рассогласования по положению стремится к нулю за счет применения ПИД-регулятора в качестве блока перекрестных связей. На рисунке видно, что рассогласование скоростей минимально.

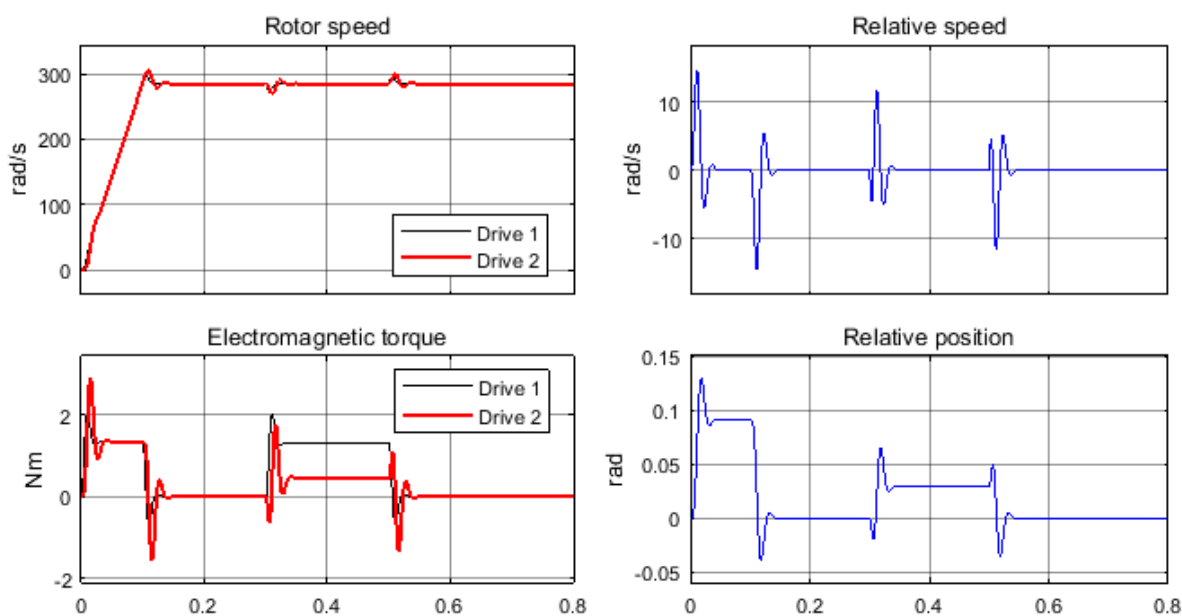


Рис. 4. Графики переходных процессов в системе синхронизации «ведущий-ведомый»

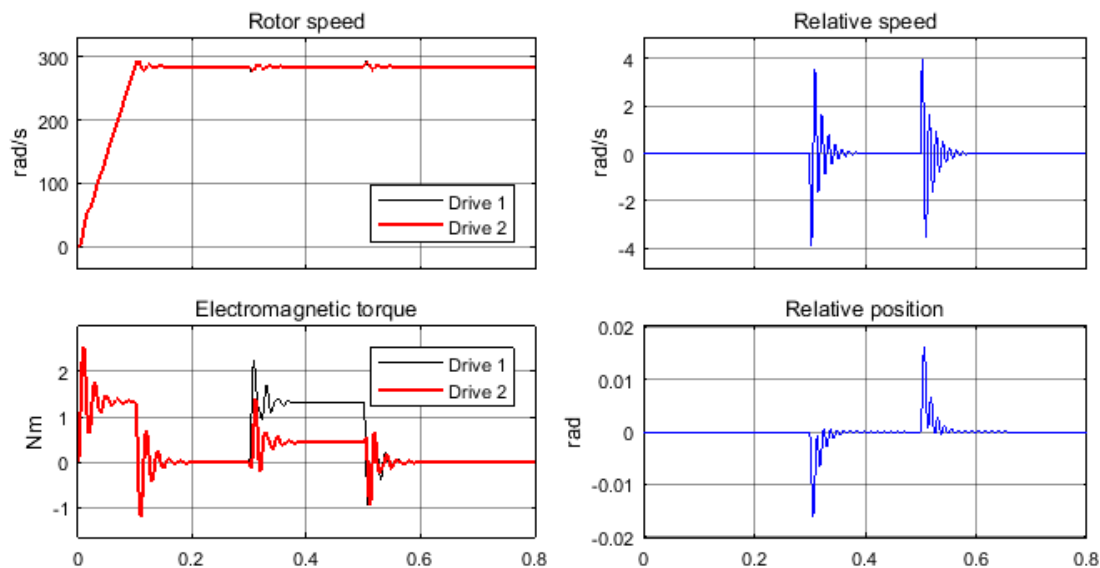


Рис. 5. Графики переходных процессов при системе синхронизации с перекрёстными связями

На рисунке 6 приведены результаты математического моделирования переходных процессов для двухдвигательного электропривода с разными моментами нагрузки $M_{c1} \neq M_{c2}$ и системой с «электронным» линейным валом. На рисунке представлены кривые моментов, скоростей, рассогласований скоростей и положений.

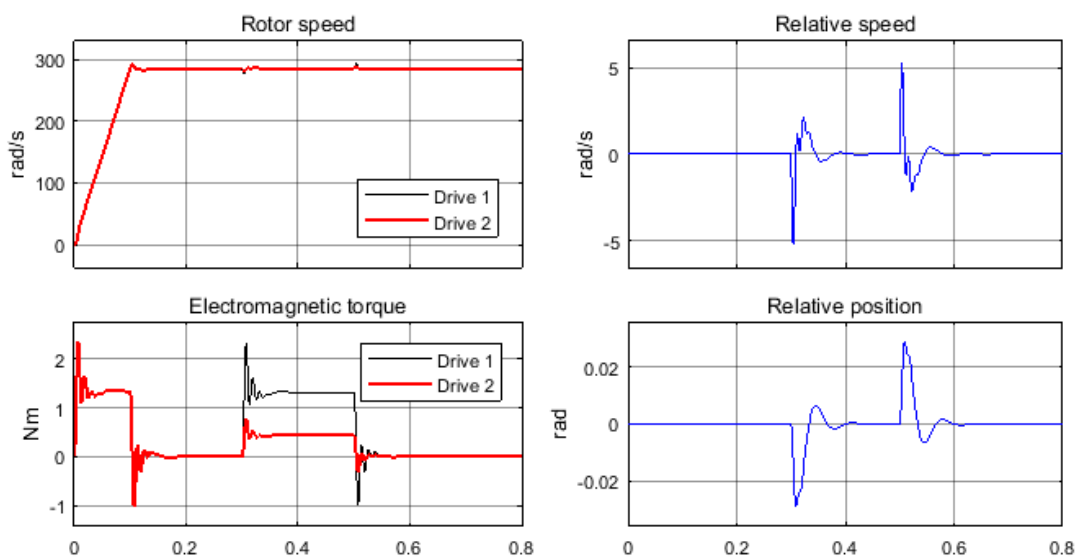


Рис. 6. Графики переходных процессов при системе синхронизации с «электронным» линейным валом

Из рисунка 6 видно, что применение системы с «электронным» линейным валом даёт результат при сохранении высокого запаса устойчивости системы.

Проведём сравнительный анализ показателей качества синхронизации скоростей и положений. Результаты приведены в таблице 3.

Для системы «ведущий-ведомый» уровень статической ошибки рассогласования положения может не соответствовать требованиям, предъявляемым к механизмам подачи современных металлорежущих станков, поэтому её применение не рекомендуется.

Таблица 3

Показатели качества					
Система	$\Delta\omega_{дин}$, рад/с	$\Delta\theta_{дин}$, рад	$\Delta\theta_{стат}$, рад	t_p , с	μ
«Ведущий-ведомый»	14,6	0,13	0,03	0,05	1
С перекрёстными связями	3,93	0,015	0	0,06	4
С «электронным» линейным валом	5,23	0,029	0	0,08	1

Система с перекрёстными связями обладает высокими показателями качества регулирования положения и скорости, однако имеет большую степень колебательности по сравнению с другими системами. Система с «электронным» линейным валом при схожих показателях качества с предыдущей обладает большим запасом устойчивости.

ВЫВОДЫ

Основываясь на результатах моделирования, для вышеприведённых топологий перечислим достоинства и недостатки:

- 1) система «ведущий-ведомый» является простейшей, но обладает малой жесткостью;
- 2) метод перекрёстных связей обеспечивает высокую скорость синхронизации и прост в реализации по сравнению с системой с «электронным» линейным валом, однако, обладает ограниченной производительностью, где относительный угол является основным;
- 3) из-за наибольшего влияния момента инерции ведущего привода в исходной системе с «электронным» линейным валом и влияния его момента, предложенный метод проще всего практически реализуем.

Исходя из анализа рассмотренных систем синхронизации движения можно сделать вывод о применимости систем с перекрёстными связями и с «электронным» линейным валом в многодвигательном электроприводе подачи металлорежущих станков и необходимости дальнейшего усовершенствования структур и алгоритмов их функционирования для обеспечения повышения степени синхронизации по положению как в статических, так и в динамических режимах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачев В. А. Анализ динамических свойств трехмассовых исполнительных осей с одним и двумя вращающимися моментами / Толмачев В. А., Никитина М. В., Сергеева М. Е. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 458–463.
2. Толмачев В. А. Синтез скоростной подсистемы двухдвигательного следящего электропривода телескопа с трехмассовым механизмом исполнительной оси / Толмачев В. А., Никитина М. В., Кононова М. Е. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 8. – С. 645–652.
3. Tomizuka, M. Synchronisation of two motion control axes under adaptive feedforward control / Tomizuka M., Hu J.-S., Chiu T. C., Kamano T. // Trans. ASME J. Dyn. Meas. Control. – 1992. – № 114. – P. 196–203.
4. Zhao D. Z. Speed synchronisation of multiple induction motors with adjacent cross-coupling control / D. Z. Zhao, C. W. Li, J. Ren // IET Control Theory Appl. – 2010. – Vol. 4, Iss. 1. – P. 119–128.
5. Koren Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems / Y. Koren // Trans. ASME J. Dyn. Meas. Control. – 1980. – № 102. – P. 265–272.
6. Anderson R. G. Web Machine Coordinated Motion Control via Electronic Line-Shafting / R. G. Anderson, R. Lorenz // IEEE, IAS Annual Tech. Conf. – 1999. – P. 300–306.
7. Valenzuela A. Electronic Line-Shaping Control for Paper Machine Drives / A. Valenzuela, R. Lorenz // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2001. – Vol. 37, No. 1. – P. 158–164.
8. Perez-Pinal F. J. Comparison of Multi-motor Synchronization Techniques / F. J. Perez-Pinal // IEEE Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2004. – P. 1670–1675.