

УДК 681.5.033 + 681.587'57

А. А. Худяев, канд. техн. наук,
В. В. Поленок

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ОСОБО ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Аннотация. Приведена упрощенная схема конструкции двухдвигательного безредукторного механизма подачи с вращающейся ходовой гайкой для итерационного двухканального электропривода подачи рабочего органа металлорежущего станка модели 24К60АФ4. Рассмотрены результаты компьютерного моделирования динамических и точностных характеристик, позволяющие оценить эффективность предлагаемого двухканального электропривода.

Ключевые слова: итерационный двухканальный электропривод, вращающаяся ходовая гайка, точность управления, динамические и точностные характеристики

А. Khudiyayev, PhD.,
V. Polenok

TWO-CHANNEL ELECTRIC DRIVE OF FEED MECHANISM FOR HIGH PRECISION METAL-CUTTING MACHINE TOOLS

Abstract. Simplified diagram of construction of two-motor feed mechanism without reducer with a rotating sliding nut for iterative two-channel electric drive of feed of working apparatus of metal-cutting machine tool of model 24K60AF4 is shown. The results of computer modeling of dynamic and accuracy characteristics, which allow to estimate the effectiveness of the proposed two-channel drive are considered.

Keywords: iterative two-channel electric drive, rotating sliding nut, accuracy control, dynamic and accuracy characteristics

О. А. Худяев, канд. техн. наук,
В. В. Поленок

ДВОКАНАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ ДЛЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ОСОБЛИВО ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ

Анотація. Наведено спрощену схему конструкції дводвигунного безредукторного механізму подачі із обертвовою ходовою гайкою для ітераційного двоканального електропривода подачі робочого органа металорізального верстату моделі 24К60АФ4. Розглянуті результати комп'ютерного моделювання динамічних й точностних характеристик, які дозволяють оцінити ефективність запропонованого двоканального електропривода.

Ключові слова: ітераційний двоканальний електропривод, обертвова ходова гайка, точність керування, динамічні й точностні характеристики

Постановка задачи. Сегодня наиболее востребованными электроприводами (ЭП) подачи инерционных рабочих органов (РО) станков и механизмов являются безредукторные (устанавливаемые непосредственно на ходовой винт) высокомоментные следящие ЭП постоянного тока с механизмами подачи (МП) на основе шарико-винтовой пары (ШВП) с одной степенью свободы. Эффективным структурным способом повышения быстродействия и точности управления такими ЭП подачи, особенно в сложных динамических режимах работы, при сохранении требуемых силовых воздействий на объект управления может служить применение различных многоканальных следящих приводов, построенных и функционирующих по итерационному [1, 2, 3] или близким к итерационному [4] принципам управления. В таких приводах при условии компенсации негативного динамического взаимовлияния каналов (ДВВК) по нагрузке может быть принята типовая настройка каналов управления по принципу СПР [5, 6]. Одним из возможных вариантов итерационных многоканальных

следящих ЭП МП может служить двухканальный ЭП подачи РО на базе двухдвигательного безредукторного МП с вращающейся ходовой гайкой (ВХГ), реализующей ШВП с двумя степенями свободы.

Целью работы является сравнительная оценка потенциальной эффективности применения (с точки зрения повышения быстродействия и точности управления) итерационного двухканального ЭП с подчиненной настройкой каналов управления и МП с ВХГ для подачи рабочего стола с изделием координатного металлорежущего станка особо высокой точности модели 24К60АФ4 (масса свыше 22 т).

Материал исследований. Предлагаемый итерационный двухканальный ЭП с ВХГ включает первый (основной) К-1 и второй (уточняющий) К-2 каналы управления по углу с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум. Основной канал К-1 используется для управления приводом вращения ходового винта, а уточняющий канал К-2 – приводом вращения ВХГ. В двухканальном ЭП с ВХГ из-за наличия в его механической передаче общей ШВП с двумя степенями свободы возникает динамическое взаимовлияние между каналами (ДВВК) по

нагрузке. Введение в систему управления двухканально-го ЭП блока компенсаторов $C_{12} - C_{21}$ обеспечивает автономность каналов управления.

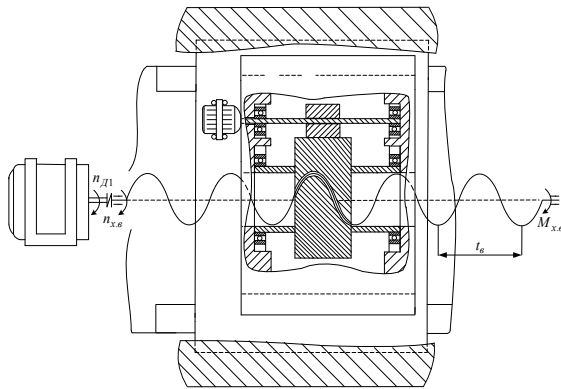


Рис. 1. Вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного МП с ВХГ для подачи РО станка модели 24К60АФ4

Электроприводы основного К-1 и уточняющего К-2 каналов двухканального привода, а также сравниваемого с ним традиционного одноканального (автономного) ЭП могут быть построены на базе современных комплектных транзисторных ЭП, использующих принцип широтно-импульсной модуляции.

Вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного МП с ВХГ для продольной подачи (ось X) РО станка модели 24К60АФ4 приведен на рис. 1.

Результаты исследований. Преимущества двухканального ЭП с ВХГ в быстродействии и точности особенно эффективно проявляются в зоне малых и, частично, средних перемещений РО станка: $0 < S_{PO} \leq 0,05$ мм. В этом диапазоне подачи чаще всего и требуется реализация особо высокой точности управления и позиционирования РО.

Так, двухканальный ЭП с ВХГ позволяет существенно повысить быстродействие (уменьшить время регулирования) подачи РО при отработке небольших заданий по положению (без ухудшения качества переходного процесса): в зоне особо малых перемещений ($0 < S_M \leq 0,04$ мкм) – более, чем в 3,8 раза; в зоне малых перемещений ($0,04$ мкм $< S_M \leq 0,4$ мкм) – более, чем в 2 раза; в зоне средних перемещений ($0,4$ мкм $< S_C \leq 20$ мкм) – более, чем в 1,5 раза (рис. 2). Установившаяся точность отработки двухканальным ЭП линейно нарастающего задающего воздействия на диапазоне подачи РО до $S_{PO} = 1,6$ м может быть повышена (по сравнению с традиционным одноканальным ЭП) более чем в 5,6 раза (рис. 3).

Повышение быстродействия двухканального ЭП с ВХГ обусловлено значительным расширением его полосы пропускания ω_n по сравнению с одноканальным ЭП. Предлагаемый ЭП обеспечивает расширение полосы воспроизводимых частот (по уровню 0,707) ω_n : в зоне малых перемещений ($0 < S_M \leq 0,4$ мкм) – более чем в 2,2 раза; в зоне средних перемещений ($0,4$ мкм $< S_C \leq 4$ мкм) – более чем в 2 раза (рис. 4).

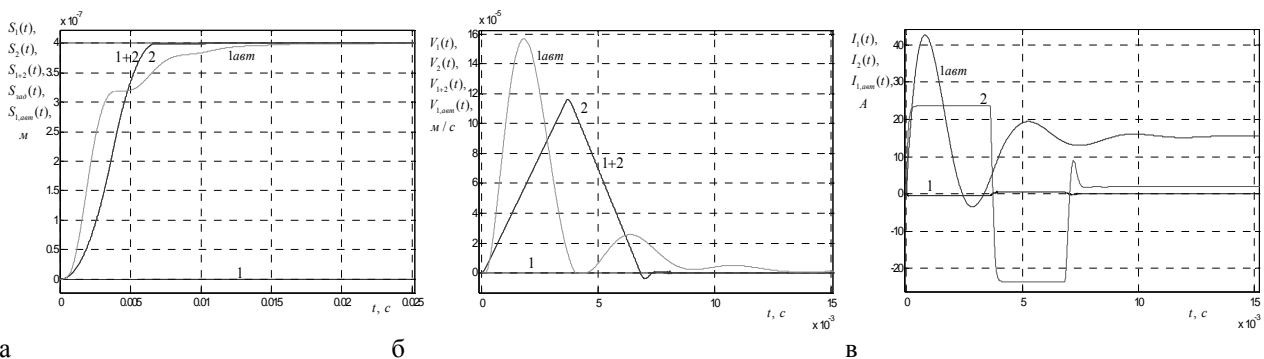


Рис. 2. Переходные процессы положения (а), скорости (б) и тока (в) двухканального ЭП с ВХГ (с компенсацией ДВБК по нагрузке) и традиционного одноканального (автономного) ЭП МП станка при отработке средних перемещений РО ($S_C = 0,4$ мкм) в режиме механообработки изделия

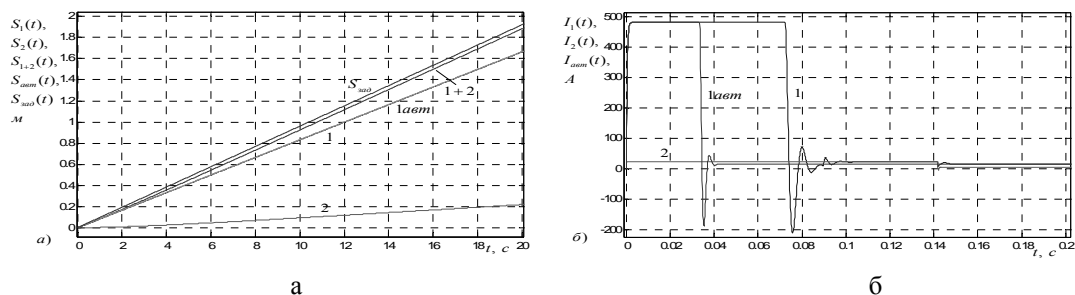


Рис. 3. Графики отработки линейно нарастающего задающего воздействия $U_{3П}(t) = 0,6t$ двухканальным ЭП с ВХГ и традиционным одноканальным (автономным) ЭП в режиме механообработки изделия: а – положения; б – тока

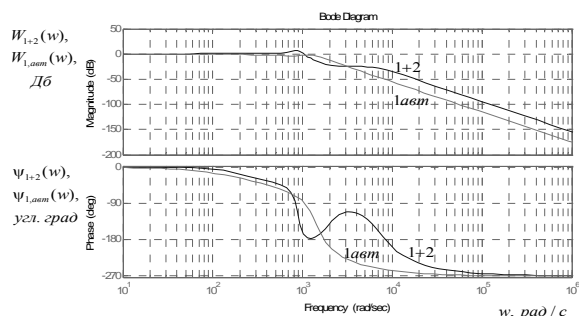


Рис. 4. Частотные характеристики двухканального ЭП с ВХГ и традиционного одноканального (автономного) ЭП МП в диапазоне подач РО $0,04 \text{ мкм} < S_{PO} \leq 1 \text{ мкм}$

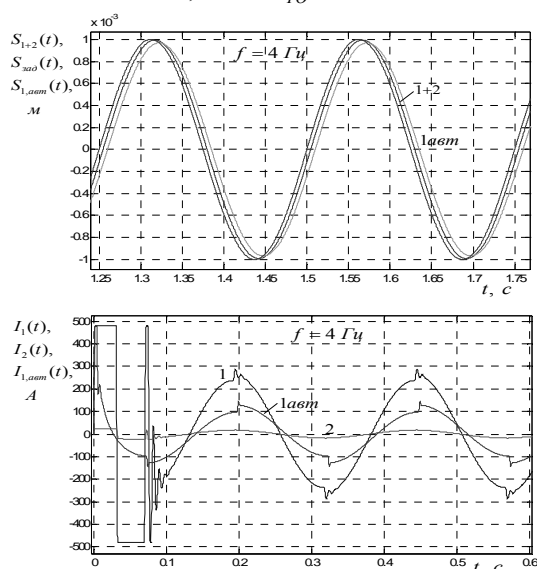


Рис. 5. Графики отработки синусоидального задающего воздействия $U_{3П}(t) = U_{3П, \max} \sin 2\pi ft$ ($f = 4 \text{ Гц}$) двухканальным ЭП с ВХГ и традиционным одноканальным (автономным) ЭП в зоне средних перемещений РО ($S_C = 1 \text{ мм}$) в установившемся режиме

В двухканальном ЭП с ВХГ существенно повышается качество отработки гармонических управляющих воздействий с относительно небольшой амплитудой (до $S_C = 0,02 \text{ мм}$) и частотой синусоиды до $f = 10 \text{ Гц}$. При этом обеспечивается уменьшение запаздывания по фазе синусоидального управляющего сигнала по сравнению с традиционным одноканальным ЭП: на первом участке зоны средних перемещений (до $S_C = 1 \text{ мкм}$) – более чем в 12 раз; в зоне средних перемещений (до $S_C = 4 \text{ мкм}$) – более, чем в 6 раз. На втором участке зоны средних перемещений РО ($1 \text{ мм} < S_C \leq 80 \text{ мм}$) уменьшение запаздывания по фазе в двухканальном ЭП наблюдается только при значительном снижении частоты управляющей синусоиды (рис. 5).

Динамическое взаимовлияние каналов по нагрузке в двухканальном ЭП с ВХГ в целом незначительно влияет на качество его работы. Подключение блока компенсаторов $C_{12} - C_{21}$ повышает (по сравнению с его отсутствием) в среднем на 5÷15 % быстродействие переходных про-

цессов в приводе в зоне малых и, частично, средних перемещений РО ($0 < S_C \leq 0,1 \text{ мм}$). Кроме того, применение компенсаторов улучшает качество ПП в контурах тока каналов управления при отработке быстроизменяющихся задающих воздействий. В остальных диапазонах подачи РО ($1 \text{ мм} < S_B \leq 1600 \text{ мм}$) введение компенсирующих связей не является обязательно необходимым.

В целом в двухканальных следящих ЭП МП с ВХГ и типовой настройкой каналов может быть реализована точность управления, удовлетворяющая самым высоким требованиям к ЭП подачи РО координатных металлорежущих станков. Достижение максимально высокого значения точности управления МП станка существенно зависит от выбранной мощности исполнительного двигателя (ИД) и динамических возможностей привода второго (уточняющего) канала К-2. В предлагаемом двухканальном следящем ЭП МП с ВХГ достижение максимально возможной точности управления практически ограничивается только точными возможностями приводного механизма. В частности, качеством исполнения механических элементов и устройств: ШВП, ВХГ, поверхностей скольжения салазок рабочего стола, учетом влияния нелинейных сил трения и упругой системы станка на качество работы привода. Решающее значение имеет также разрешающая способность используемого цифрового датчика положения РО, которая должна быть не хуже сотых долей микрона.

Структура итерационного двухканального ЭП МП с ВХГ и типовой настройкой каналов управления сравнительно проста даже с учетом реализации дополнительных компенсирующих перекрестных связей между каналами, а его расчет и оптимизация не вызывают особых трудностей [7 – 10].

К недостаткам двухканальных следящих ЭП МП с ВХГ следует отнести необходимость наличия в них двух отдельных приводов с ИД требуемой мощности, специального высококачественного механического узла с ВХГ (для суммирования усилий и перемещений приводов отдельных каналов) и высокоточного (с разрешающей способностью до сотых долей микрона) датчика положения РО. Кроме того, разработка и эксплуатация таких двухканальных ЭП подачи металлорежущих станков требует высокой культуры производства.

Выводы. Полученные результаты теоретических и компьютерных исследований показали значительные потенциальные преимущества предлагаемого итерационного двухканального ЭП с ВХГ по сравнению с традиционными одноканальными ЭП подачи, устанавливаемыми на координатные металлорежущие станки рассматриваемого типа.

Применение итерационных двухканальных следящих ЭП МП с ВХГ целесообразно в тех случаях, когда от традиционного одноканального ЭП подачи станка требуются очень высокие быстродействие и динамическая точность отработки задающих воздействий при значительных инерционных нагрузках на выходе привода (основного канала К-1). Такие требования в полной мере соответствуют растущим требованиям к качеству работы МП РО современных программно-управляемых металлорежущих станков особо высокой точности.

Список использованной литературы

1. Кузнецов Б. И. Двухкорный линейный синхронный привод обрабатывающего центра / Б. И. Кузнецов, А. А. Худяев, И. М. Некрасов, В. И. Русаев // *Электротехника*. – 1993. – № 4. – С. 11 – 18.
2. Никольский А. А. Новые высокоточные электроприводы с пьезокompенсаторами для станков, механизмов и приборов / А. А. Никольский // *Электротехника*. – 1993. – № 1. – С. 27 – 31.
3. Худяев А. А. Электродинамика двухдвигательных линейных электроприводов механизмов подачи высокой точности / А. А. Худяев, А. В. Червоный // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 3 (79). – С. 209 – 213.
4. Худяев А. А. Механика и электродинамика комбинированного трехканального следящего электропривода подачи для тяжелого станка особо высокой точности / А. А. Худяев // *Электромеханические и энергосберегающие системы. Тематический выпуск*. – 2012. – Вып. 3/2012 (19). – С. 386 – 392.
5. Худяев А. А. Итерационное подчиненное управление следящими электроприводами / А. А. Худяев, Д. Г. Литвиненко // *Сб. научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»*. Тематический выпуск. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2011. – № 4. – С. 141 – 171.
6. Худяев А.А., Литвиненко Д.Г. Сравнительная оценка качества итерационных трехканальных следящих электроприводов с типовой настройкой // *Сб. науч. тр. «Вестник НТУ «ХПИ»*. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 186 – 191
7. Otto J., Killat U. and Van Duijsen P.J. (2002), Energy Based Model Synthesis for Electrical Actuators and Sensors, *PCIM, Conference proceedings IM, 2002*, Nürnberg, Germany.
8. Bauer P., and Van Duijsen P.J. (2005), Challenges and Advances in Simulation, *PESC 2005*, Brazil
9. Van Duijsen P.J., Bauer P., and Gospodaric D. Simulation Based Optimization of Electrical Drives, *PCIM 04*, Nürnberg, May 25-27, ISBN 3-928643-39-8, pp.922-927
10. Bauer P., Korondi P., and Van Duijsen P.J. (2003), Integrated Control and Circuit Simulation for a Motion Control System, *EPE 2003 Toulouse*, pp.2 –4.

Получено 18.07.2014

References

1. Kuznetsov B.I., Khudyaev A.A., Nekrasov I.M., and Rusaev V.I. Dvukhyakorniy lineinyi sinkhronnyy privod obrabatyvayushchego tsentra [Two-Armature Linear Synchronous Drive of Machining Center], (1993), *Elektrotehnika*, No. 4, pp. 11 – 18 (In Russian).
2. Nikol'skii A.A. Novye vysokotochnye elektroprivody s p'ezokompensatorami dlya stankov, mekhanizmov i priborov [New High-Precision Electric Drives with Piezo-compensators for Machine Tools, Mechanisms and Devices], (1993), *Elektrotehnika*, No.1, pp. 27 – 31 (In Russian).
3. Khudyaev A.A. Elektrodinamika dvuhdvigatel'nykh lineinykh elektroprivodov mekhanizmov podach vysokoi tochnosti [Electrodynamics of Two-Motor Linear Electric Drives of Feed Mechanisms of High Precision], (2011),

Elektrotehnicheskie and Kompyuternye Systemy, No. 3 (79), pp. 209 – 213 (In Russian).

4. Khudyaev A.A. Mekhanika i elektrodinamika kombinirovannogo trekhkanal'nogo sledyashchego elektroprivoda podachi dlya tyazhelogo stanika osobo vysokoi tochnosti [Mechanics and Electrodynamics of the Combined Three-Channel Tracking Electric Drive of Feed for High Precision Heavy Machine Tool], (2012), *Elektromekhanicheskie i Energoberegayushchie Sistemy. Tematicheskii Vypusk*, Vol. 3/2012 (19), pp. 386 – 392 (In Russian).

5. Khudyaev A.A., and D.G. Litvinenko. Iteratsionnoe podchinennoe upravlenie sledyashchimi elektroprivodami [Iterative Subordinate Control of Tracking Drives], (2011), *Sb. Nauchnykh Trudov "Vestnik NTU "KhPI". Tematicheskii vypusk*, Kharkov, Ukraine, NTU "KhPI", No. 4, pp. 141 – 171 (In Russian).

6. Khudyaev A.A., and Litvinenko D.G. Sravnitel'naya otsenka kachestva iteratsionnykh trekhkanal'nykh sledyashchikh elektroprivodov s tipovoy nastroiko [Comparative Estimation of Quality of Iterative Three-Channel Tracking Electric Drives with Standard Tuning], (2010), *Sb. Nauchnykh Trudov "Vestnik NTU "KhPI". Tematicheskii vypusk*, Kharkov, Ukraine, NTU "KhPI", No. 28, pp. 186 – 191 (In Russian).

7. Otto J., Killat U., and Van Duijsen P.J., (2002), Energy Based Model Synthesis for Electrical Actuators and Sensors, *PCIM, Conference proceedings IM, 2002*, Nürnberg, Germany.

8. Bauer P., and Van Duijsen P.J. (2005), Challenges and Advances in Simulation, *PESC 2005*, Brazil

9. Van Duijsen P.J., Bauer P., and Gospodaric D. Simulation Based Optimization of Electrical Drives, *PCIM 04*, Nürnberg, May 25-27, ISBN 3-928643-39-8, pp.922-927

10. Bauer P., Korondi P., and Van Duijsen P.J. (2003), Integrated Control and Circuit Simulation for a Motion Control System, *EPE 2003 Toulouse*, pp.2 –4.



Худяев

Александр Андреевич, канд. техн. наук, доц., каф. автоматизированных электромеханических систем НТУ «ХПИ»
Тел.: (057) 71-97-318.
E-mail: alexey@kpi.kharkov.ua



Поленок

Виталий Викторович, аспирант каф. автоматизированных электромеханических систем НТУ «ХПИ».
Тел.: (057) 72-93-524.
E-mail: vitaliy Polenok@inbox.ru