

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОДАЧИ РАБОЧЕГО СТОЛА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ХОДОВОЙ ГАЙКОЙ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА ОСОБО ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. К электроприводам (ЭП) механизмов подачи (МП) металлорежущих станков с ЧПУ предъявляются все более возрастающие требования по быстродействию и точности управления инерционными рабочими органами (РО), прежде всего, рабочим столом с массивным изделием [1]. Для достижения желаемых характеристик от типового одноканального ЭП МП часто требуются чрезмерно большие коэффициенты усиления и практически нереализуемые полосы воспроизводимых частот. Эффективным средством повышения быстродействия и точности управления МП, особенно в динамических режимах, при сохранении требуемых силовых воздействий на объект управления может служить применение различных многоканальных следящих приводов, построенных и функционирующих по итерационному [2] или близким к итерационному [3] принципам. В таких приводах при условии компенсации динамического взаимовлияния каналов (ДВВК) может быть принята типовая настройка каналов управления [4]. Одним из возможных вариантов итерационных следящих ЭП МП является двухканальный ЭП подачи РО на базе двухдвигательного безредукторного МП типа «ходовой винт-гайка» с двумя степенями свободы.

Целью работы является построение математической модели механической части и оценка потенциальной эффективности (с точки зрения повышения быстродействия и точности управления) итерационного двухканального ЭП подачи РО с дополнительным управлением цилиндрической ходовой гайкой для многоцелевого металлорежущего станка особо высокой точности модели 24К60АФ4 (масса свыше 22 т).

МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ. Предлагаемый итерационный двухканальный ЭП МП с дополнительным управлением ЦХГ включает основной (базовый) К-1 и дополнительный (компенсирующий) К-2 каналы управления по углу с подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум (рис. 1). Основной канал К-1 используется для управления приводом ходового винта, а дополнительный канал К-2 – приводом ЦХГ МП типа «винт-гайка». Из-за наличия в данном ЭП электродинамического взаимовлияния каналов (ЭДВВК), обусловленного наличием общих элементов в механической передаче, такой двухканальный ЭП может быть отнесен к подклассу квазиитерационных многоканальных систем, поскольку основные свойства собственно итерационных систем управления для него выполняются лишь частично.

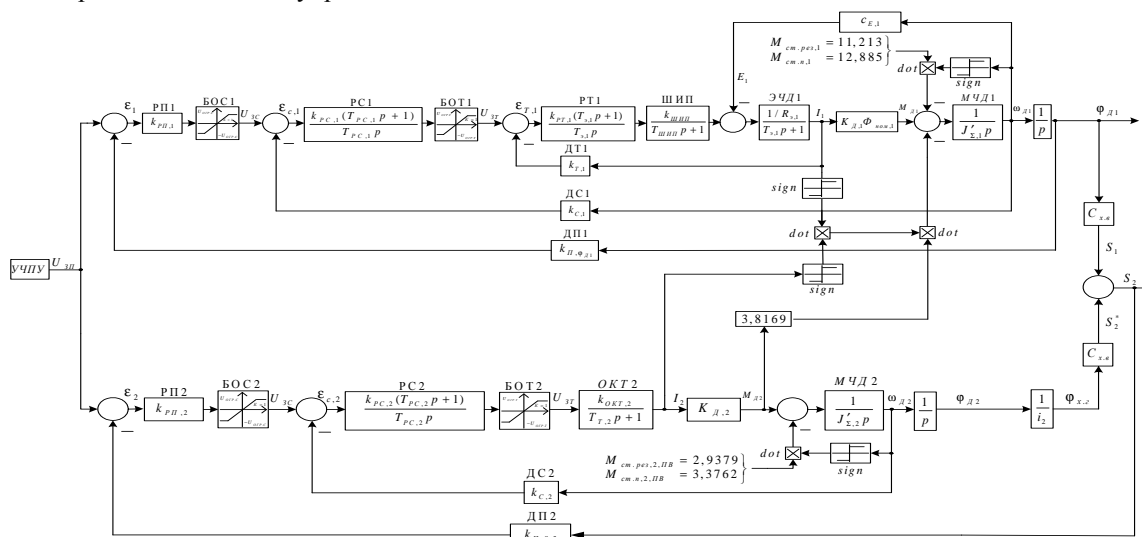


Рисунок 1 – Структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального следящего ЭП МП с дополнительным каналом К-2 управления ЦХГ для станка с ЧПУ модели 24К60АФ4

Электроприводы основного К-1 и дополнительного К-2 каналов могут быть построены на базе комплектных транзисторных ЭП соответственно: постоянного тока типа «ЭШИМ1» (с силовой частью ШИП-ДПТ) и переменного тока типа «Размер 2М-5-21» (с векторным частотно-токовым управлением). В качестве исполнительных двигателей (ИД) Д1 основного и Д2 дополнительного приводов МП предлагается использовать соответственно высокомоментный ДПТ с постоянными магнитами типа ПБВ132М ($P_{ном,1} = 2,2 \text{ кВт}$) и асинхронный двигатель (АД) с КЗ типа АИР71В6 ($P_{ном,2} = 0,55 \text{ кВт}$).

Вариант упрощенной схемы конструкции двухдвигательного безредукторного механизма продольной подачи рабочего стола (ось X) для станка модели 24К60АФ4 приведен на рис. 2. На рис. 2 изображено: 1 – станина станка; 2 – жестко закрепленный на станине высокомоментный ИД Д1 основного (базового) ЭП, соединенный с ходовым винтом (х.в.) через жесткую соединительную муфту (СМ) (привод х.в.); 3 – ходовой винт с шагом винта t_g (диаметр х.в. $d_{x.v.}=0,063$ м; $t_g=0,01$ м); 4 – ЦХГ, закрепленная в специальном механическом узле (СМУ) салазок (диаметр и ширина зубчатой части ходовой гайки: $d_{з.х.г.}=10,85$ см, $l_{з.х.г.}=3,5$ см); 5 – направляющие подачи салазок; 6 – салазки или опорная платформа (ОП) рабочего стола (масса ОП: $m_{ОП} = 700$ кг); 7 – рабочий стол с автоматизированной системой гидроразгрузки направляющих стола (гидроразгрузка предусмотрена конструкцией станка); 8 – жестко закрепленный на салазках ИД Д2 дополнительного (компенсирующего) ЭП ЦХГ (привод ЦХГ); 9 – жестко закрепленный на салазках узел СМУ (Д/Ш/В, мм: 420/180/200), предназначенный для суммирования перемещений РО, реализуемых отдельными приводами; 10 – зубчатая передача привода ЦХГ; 11 – зубчатая приводная шестерня на валу ИД Д2 (диаметр и ширина шестерни: $d_{ш.н.}=2,8$ см, $l_{ш.н.}=3,0$ см). Принцип действия МП нетрудно уяснить из рассмотрения рисунка с учетом приведенных пояснений.

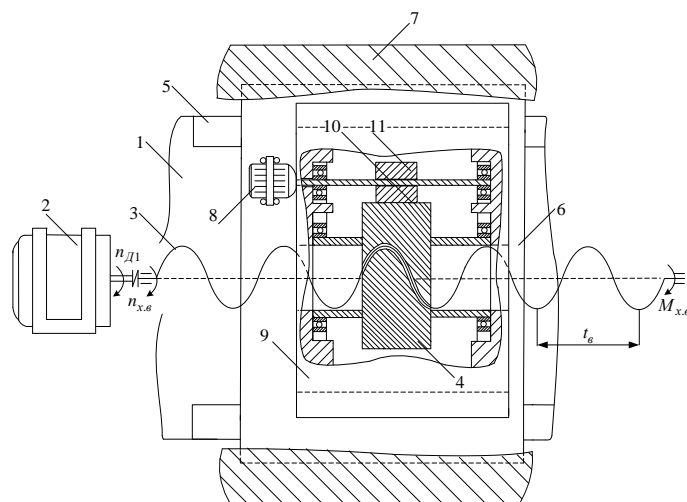


Рисунок 2 – Упрощенная схема конструкции двухдвигательного безредукторного механизма продольной подачи рабочего стола (ось X) для станка модели 24К60АФ4

На рис. 3 приведена кинематическая схема механической передачи моментов и усилий в двухканальном ЭП МП с дополнительным управлением ЦХГ, соответствующая варианту конструкции МП на рис. 2.

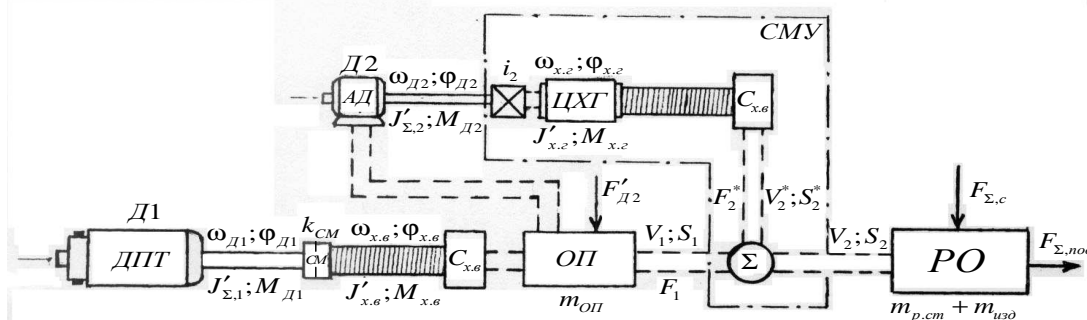


Рисунок 3 – Кинематическая схема механической передачи усилий двухканального следящего ЭП МП с дополнительным управлением ЦХГ для станка модели 24К60АФ4

Математическая модель установившегося рабочего движения механической части итерационного двухканального ЭП подачи рабочего стола, полученная на основании рис. 3 при условии абсолютной жесткости СМ и безлюфтовом управлении ЦХГ, имеет вид:

$$\begin{cases} M_{D1}(t) - J'_{\Sigma,1} p^2 \varphi_{D1}(t) \mp 3,8169 M_{D2}(t) - M_{c,1} = 0; \\ M_{D2}(t) - J'_{\Sigma,2} p^2 \varphi_{D2}(t) - M_{c,2} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$S_2(t) = S_1(t) \pm S_2^*(t) = \frac{t_g}{2\pi} \left[\varphi_{D1}(t) \pm \frac{\varphi_{D2}(t)}{i_2} \right], \quad (2)$$

где знаки «-» и «+» перед третьим слагаемым в первом уравнении соответствуют согласному и встречному направлениям движения токов якорей двигателей Д1 и Д2, а знаки «+» и «-» в третьем уравнении – согласному и встречному вращениям двигателей Д1 и Д2; $M_{D1}(t)$ и $M_{D2}(t)$ – электромагнитные моменты, создаваемые двигателями Д1 и Д2; $J'_{\Sigma,1}$, $J'_{\Sigma,2}$ и $M_{c,1}$, $M_{c,2}$ – суммарные моменты инерции и моменты статического сопротивления, приведенные к валам тех же двигателей, $J'_{\Sigma,1}=0,2261$ кг·м², $J'_{\Sigma,2}=0,2591$ кг·м², $M_{c,1}=11,213$ Н·м, $M_{c,2} = 2,9379$ Н·м;

Δ
 $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t .

На рис. 4-7 цифрами обозначены: «1», «2», «1-2», «1-2*» и «1авт» – графики временных и частотных характеристик приводов соответственно основного К-1 и дополнительного К-2 каналов управления (работающих в итерационном режиме), итерационного двухканального ЭП, итерационного двухканального ЭП (без компенсации ЭДВВК - для частотных характеристик) и одноканального (автономного) ЭП, работающих в режимах максимальной нагрузки станка.

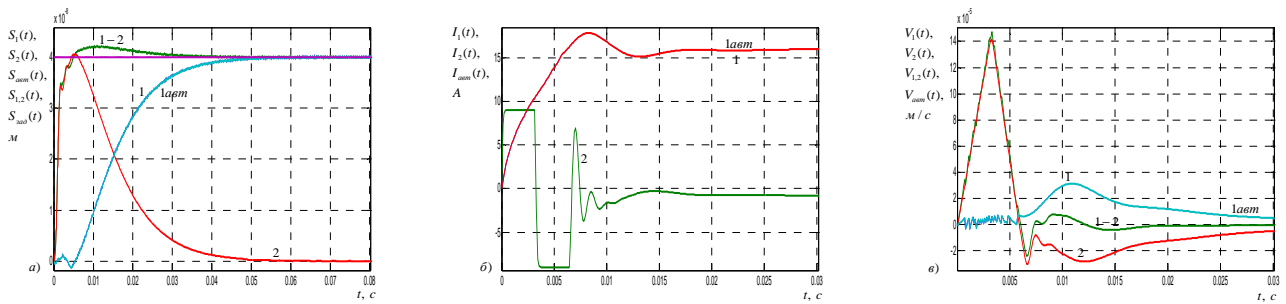


Рисунок 4 – Переходные процессы типового одноканального (автономного) ЭП и двухканального ЭП (с компенсацией ЭДВБК) при отработке особо малых перемещений ($S_M = 0,4 \text{ мкм}$) в рабочем режиме резания: а – положения; б – тока; в – линейной скорости

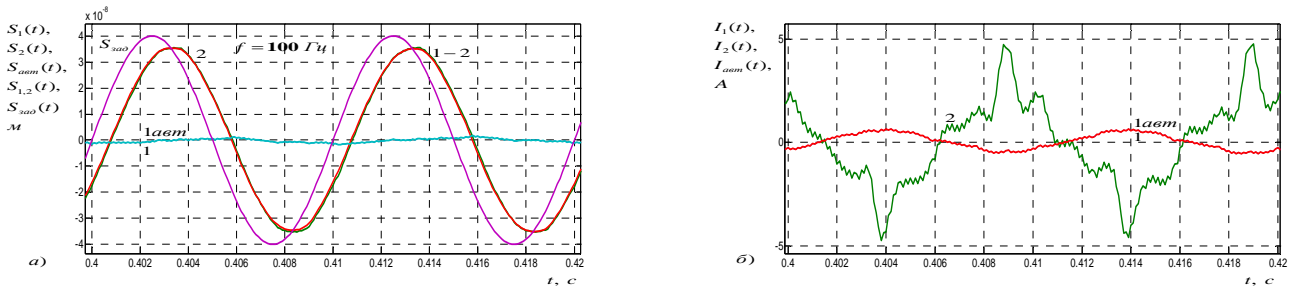


Рисунок 5 – Графики отработки задающего синусоидального сигнала $U_{zn}(t) = U_{zn,max} \sin 2\pi f t$ одноканальным (автономным) ЭП и двухканальным ЭП (с компенсацией ЭДВБК) при отработке особо малых перемещений ($S_M = 0,04 \text{ мкм}$) в установившемся режиме максимальной нагрузки: а – положения; б – тока

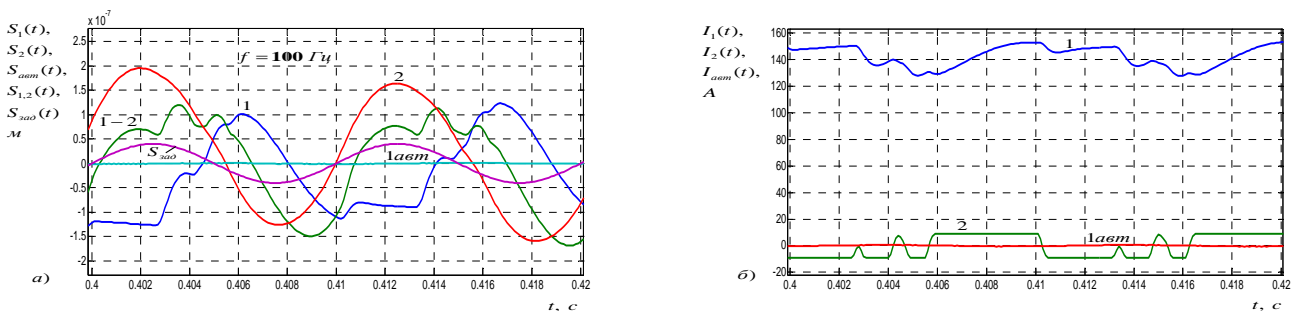


Рисунок 6 – Графики отработки задающего синусоидального сигнала $U_{zn}(t) = U_{zn,max} \sin 2\pi f t$ одноканальным (автономным) ЭП и двухканальным ЭП (без компенсации ЭДВБК) при отработке особо малых перемещений ($S_M = 0,04 \text{ мкм}$) в установившемся режиме максимальной нагрузки: а – положения; б – тока

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Теоретические и компьютерные исследования показали, что предлагаемый итерационный двухканальный следящий ЭП подачи РО с дополнительным управлением ходовой гайкой может быть не только практически реализован в МП типа «винт-гайка» современных металлорежущих станков, но и обладает новыми, кардинально улучшенными показателями качества по сравнению с типовыми одноканальными безредукторными ЭП подачи, традиционно устанавливаемыми на станки рассматриваемого типа. Вместе с тем, эти преимущества ярко проявляются только в зоне малых и, частично, средних перемещений, что обусловлено выбором при синтезе двухканального ЭП энергосберегающего дополнительного (компенсирующего) привода К-2 с предельно малой потребляемой мощностью.

Так, синтезированный двухканальный ЭП МП позволяет существенно повысить быстродействие (уменьшить время регулирования) отработки небольших заданий по положению в статических режимах: в зоне особо малых перемещений (до $S_M = 0,4 \text{ мкм}$) – более, чем в 13,7 раза (см. рис. 4); в зоне малых перемещений (до $S_M = 20 \text{ мкм}$) – более, чем в 2,6 раза; в зоне средних перемещений (до $S_C = 1 \text{ мм}$) – более, чем в 1,2 раза. Установившаяся кинетическая точность в таком ЭП может быть повышена более, чем в 3 раза. Двухканальный ЭП по сравнению с одноканальным ЭП обладает значительно большей полосой воспроизводимых частот (см. рис. 7). В таком ЭП обеспечивается расширение полосы пропускания: в зоне малых перемещений (до $S_M = 20 \text{ мкм}$) – в 2,2 раза ($\omega_{П,2} = 2,85 \text{ Гц}$; $\omega_{П,1} = 1,29 \text{ Гц}$); в зоне средних перемещений (до $S_C = 1 \text{ мм}$) – до 1,61 раза ($\omega_{П,2} = 2,08 \text{ Гц}$; $\omega_{П,1} = 1,29 \text{ Гц}$).

В двухканальном ЭП кардинально повышается качество отработки особо малых гармонических управляющих воздействий с частотой синусоиды до $f = 100 \text{ Гц}$ (см. рис. 5).

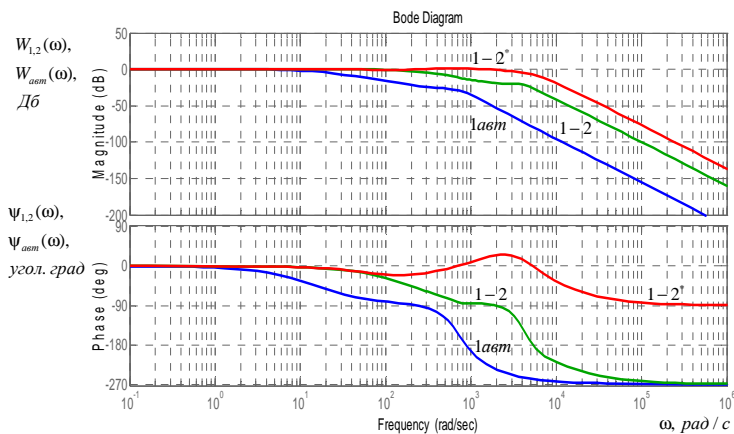


Рисунок 7 – Частотные характеристики одноканального (автономного) ЭП и двухканального ЭП (с компенсацией и без компенсации ЭДВБК) при отработке особо малых перемещений ($S_M = 0,04$ мкм) в режиме максимальной нагрузки

В таких динамических режимах обеспечивается уменьшение запаздывания по фазе синусоидального управляющего сигнала по сравнению с типовым одноканальным ЭП: в зоне малых перемещений (до $S_M = 20$ мкм) – более, чем 84 раза; в зоне средних перемещений (до $S_C = 20$ мм) – более, чем в 58 раз; в зоне средних перемещений (до $S_C = 10$ мм) – более, чем в 3 раза. При этом в двухканальном ЭП практически отсутствуют ослабления синусоидального управляющего сигнала по амплитуде.

Влияние ЭДВБК по моменту существенно сказывается на качестве работы двухканального ЭП только в зоне особых малых и малых перемещений РО – до $S_M = 20$ мкм (см. рис. 5, 6). Для компенсации ЭДВБК в систему управления необходимо вводить соответствующие внутренние компенсирующие перекрестные связи между каналами.

При отработке средних и больших перемещений МП станка управление каналами К-1 и К-2 итерационной двухканальной системы должно осуществляться последовательно: дополнительный (компенсирующий) канал К-2 должен подключаться в работу системы только в моменты времени, когда ошибки отработки задающих воздействий основным (базовым) каналом К-1 становятся сопоставимыми с величинами предельно допустимых (для заданных режимов работы) управляющих воздействий, подаваемых на уточняющий канал К-2.

К недостаткам двухканальных следящих ЭП МП с дополнительным управлением ЦХГ следует отнести необходимость наличия в них двух отдельных приводов с ИД требуемой мощности, специального высококачественного механического узла с ЦХГ (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 подобных ЭП МП станков с ЧПУ требует высокой культуры производства.

ВЫВОДЫ. С помощью двухканальных следящих ЭП МП с дополнительным управлением ЦХГ и типовой настройкой каналов в зоне особо малых и малых перемещений РО (до $S_M = 20$ мкм) может быть реализована точность управления, удовлетворяющая самым высоким требованиям к ЭП подачи металлорежущих станков. Достижение максимально высокого значения точности управления МП станка существенно зависит от выбранной мощности и динамических возможностей ИД дополнительного (компенсирующего) канала К-2. В предлагаемом двухканальном следящем ЭП МП достижение максимально возможной точности практически ограничивается только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, в частности, качеством исполнения СМУ в МП РО, а также разрешающей способностью используемого цифрового датчика положения РО, которая должна быть не хуже сотых долей микрона.

В целом применение итерационных двухканальных следящих ЭП подачи с дополнительным управлением ходовой гайкой МП типа «ходовой винт-гайка» 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ /А.М. Лебедев, Р.Т. Орлова, А.М. Пальцев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.
2. Худяев А.А. Электродинамика двухдвигательных линейных электроприводов механизмов подач высокой точности /А.А. Худяев, А.В. Червоный //Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №3(79). – С. 209–213.
3. Худяев А.А. Механика и электродинамика комбинированного трехканального следящего электропривода подачи для тачелого станка особо высокой точности /А.А. Худяев //Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичн. випуск. – 2012. – Вип. 3/2012(19). – С. 386–392.
4. Худяев А.А. Сравнительная оценка качества итерационных трехканальных следящих электроприводов с типовой настройкой /А.А. Худяев, Д.Г. Литвиненко // Сб. науч. тр. «Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 28. – С. 186–191.