

УДК 681.5.033 + 681.587'57

МЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КОМБИНИРОВАННОГО ТРЕХКАНАЛЬНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОГО СТАНКА ОСОБО ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

А. А. Худяев

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: alexey@kpi.kharkov.ua

Рассмотрены кинематическая схема и математическая модель механической части, функциональная и структурная схемы системы управления комбинированного трехканального следящего электропривода подачи для тяжелого металлорежущего станка особо высокой точности модели 24К70АФ4. Приведены результаты компьютерного моделирования электродинамических и точностных характеристик, позволяющие оценить эффективность предлагаемого высокоточного электропривода.

Ключевые слова: трехканальный следящий электропривод, точность управления, динамические и точностные характеристики.

МЕХАНІКА ТА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА КОМБІНОВАНОГО ТРИКАНАЛЬНОГО СЛІДКУЮЧОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ ДЛЯ ВАЖКОГО ВЕРСТАТА ОСОБЛИВО ВИСОКОЇ ТОЧНОСТІ

О. А. Худяев

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: alexey@kpi.kharkov.ua

Розглянуто кінематичну схему та математичну модель механічної частини, функціональну і структурну схеми системи керування комбінованого триканального слідкуючого електропривода подачі для важкого металорізального верстата особливо високої точності моделі 24К70АФ4. Наведено результати комп'ютерного моделювання електродинамічних та точностних характеристик, які дозволяють оцінити ефективність високоточного електропривода, що пропонується.

Ключові слова: триканальний слідкуючий електропривод, точність керування, динамічні й точнісні характеристики.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. К электроприводам (ЭП) механизмов подач (МП) тяжелых металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и обрабатывающих центров предъявляются все более возрастающие требования по точности управления рабочим органом (РО), прежде всего, рабочим столом с массивным изделием [1]. Для достижения желаемых характеристик от одноканального ЭП часто требуются чрезмерно большие коэффициенты усиления и практически нереализуемые порядки астатизма. Эффективным средством повышения точности управления, 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 нему принципам. В таких приводах может быть принята типовая настройка каналов управления [3].

Целью работы является построение математической модели механической части и оценка потенциальной эффективности применения (с точки зрения повышения быстродействия и точности управления) комбинированного трехканального следящего ЭП подачи для тяжелого координатного многофункционального станка особо высокой точности модели 24К70АФ4 (масса свыше 32 т).

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Предлагаемый комбинированный трехканальный ЭП подачи включает в качестве разомкнутого контура управления следящий ЭП по скорости первого (основного) канала К-1 с ПИ-регулятором скорости и подчиненным контуром тока, настроенным на технический оптимум, а в качестве замкнутого контура управления – итерационный двухканальный

следящий ЭП по углу на базе второго (компенсирующего) К-2 и третьего (точного) К-3 каналов с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум (рис. 1). Такой комбинированный ЭП может быть отнесен к классу квазиитерационных многоканальных систем [2], поскольку основные свойства собственно итерационных систем управления для него выполняются лишь частично.

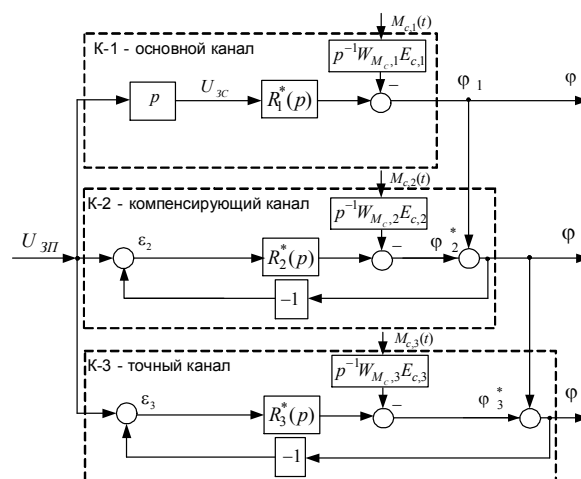


Рисунок 1 – Вариант упрощенной структурной схемы комбинированного трехканального следящего ЭП типа «скорость–угол» с учетом приведенных моментов сопротивления в каналах управления

На рис. 1 дополнительно обозначены: $U_{3П}$ и $U_{3С}$ – задающие воздействия по положению и скорости;

$M_{c,i}(t)$ ($i=1, 2, 3$) – моменты сопротивления, приведенные к выходам разомкнутых контуров положения соответствующих каналов управления ЭП; $R_i^*(p)$ ($i=1,2,3$) – дифференциальные операторы разомкнутых контуров положения отдельных приводов с учетом соответствующих управляющих и исполнительных элементов и устройств; $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t .

Электроприводы основного К-1 и компенсирующего К-2 каналов управления могут быть построены на базе типовых приводов подачи постоянного тока с соответствующими системами управления типа ТПН-ДПТ и ШИП-ДПТ. Для этого, как вариант, могут быть использованы современные модификации широко известных комплектных ЭП «КЕМРОН» и «ЭШИР-1» [1]. В качестве исполнительных двигателей (ИД) Д1 основного и Д2 компенсирующего приводов МП станка предполагается использовать высокомоментные ДПТ с постоянными магнитами типов ПБВ 132М ($P_{ном,1} = 2,2 \text{ кВт}$) и ПБВ 112L ($P_{ном,2} = 1,1 \text{ кВт}$) соответственно. В третьем, точном канале К-3 предлагается применить глубокорегулируемый асинхронный ЭП небольшой мощности с частотно-токовым управлением. Например, современный комплектный ЭП переменного тока «Размер 2М-5-21» на базе асинхронного электродвигателя Д3 типа АИР71А4 ($P_{ном,3} = 0,55 \text{ кВт}$).

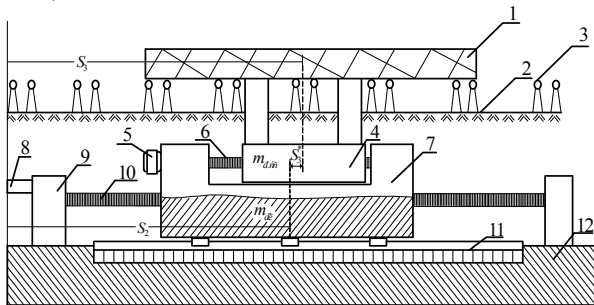


Рисунок 2 – Вариант упрощенной схемы конструкции трехдвигательного ИУ подачи рабочего стола для станка модели 24К70АФ4:

- 1 – рабочий стол с закрепляемым на нем изделием ($m_{изд.} \leq 6000 \text{ кг}$);
- 2 – направляющие движения рабочего стола;
- 3 – адаптивная автоматизированная система гидроразгрузки направляющих стола (предусмотрена конструкция станка модели 24К70АФ4);
- 4 – платформа (деталь скольжения) опоры рабочего стола;
- 5 – исполнительный двигатель точного ЭП;
- 6 – дополнительная передача типа «винт-гайка»;
- 7 – рабочая платформа (РП) (деталь скольжения) «штатного» механизма подачи;
- 8 – выходной вал механического дифференциала;
- 9 – повышающий редуктор, соединяющий вал МД с валом главного ходового винта;
- 10 – главная передача типа «винт-гайка»;
- 11 – направляющие (опоры скольжения) движения РП;
- 12 – станина станка

Вариант упрощенной схемы конструкции трехдвигательного исполнительного устройства (ИУ) подачи рабочего стола с изделием для станка модели 24К70АФ4 приведен на рис. 2. Такое устройство может быть построено на основе суммирующего

механического дифференциала (МД) с последующим повышающим редуктором (ПР) на его валу и модифицированным «штатным» МП РО по оси X, доработанным за счет применения дополнительной жесткой механической передачи типа «винт-гайка». Принцип действия ИУ нетрудно уяснить из рисунка с учетом приведенных подрисовочных подписей.

На рис. 3 приведена кинематическая схема механической части комбинированного трехканального следящего ЭП подачи рабочего стола станка, соответствующая варианту конструкции ИУ подачи, представленному на рис. 2.

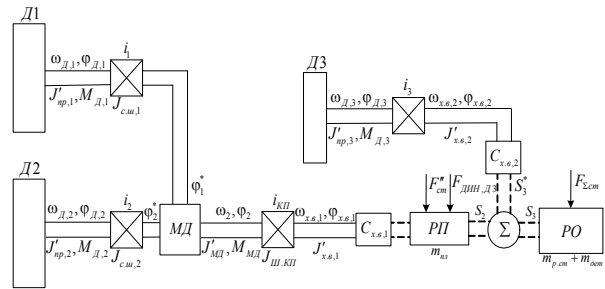


Рисунок 3 – Кинематическая схема механической части комбинированного трехканального следящего ЭП подачи рабочего стола металлорежущего станка

Математическая модель механической части комбинированного трехканального следящего ЭП подачи, полученная на основании рис. 3 при $i_3=1$ и $i_{кп} \equiv i_{пр} = 0,5$, имеет вид:

$$\begin{cases} S_3(t) = S_2(t) + S_3^*(t); \\ S_2(t) = -\frac{t_{e,1}}{2\pi i_{кп}} \phi_2(t), \quad S_3^*(t) = \frac{t_{e,2}}{2\pi} \phi_{Д,3}(t); \\ M_{Д,1}(t) - J_{\Sigma,1} p^2 \phi_{Д,1}(t) - \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2} p^2 \phi_{Д,2}(t) - M_{c,1}(t) = 0; \\ M_{Д,2}(t) - J_{\Sigma,2} p^2 \phi_{Д,2}(t) - \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2} p^2 \phi_{Д,1}(t) - M_{c,2}(t) = 0; \\ M_{Д,3}(t) - J'_{пр,3} p^2 \phi_{Д,3}(t) - M_{cm} = 0; \\ M_{МД}(t) - J'_{МД} p^2 \phi_2(t) - M_{дин,Д3}(t) - M''_{cm} = 0; \\ \phi_2(t) = \frac{\phi_1^*(t) + \phi_2^*(t)}{i_{МД}} = \frac{\phi_{Д,1}(t)}{i_1 i_{МД}} + \frac{\phi_{Д,2}(t)}{i_2 i_{МД}} = \frac{\phi_{Д,1}(t)}{2i_1} + \frac{\phi_{Д,2}(t)}{2i_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$J_{\Sigma,1} = J'_{пр,1} + \frac{J'_{МД}}{4i_1^2}; \quad J_{\Sigma,2} = J'_{пр,2} + \frac{J'_{МД}}{4i_2^2}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{c,1}(t) = \frac{1}{2i_1} [M_{дин,Д3}(t) + M'_{cm}]; \\ M_{c,2}(t) = \frac{1}{2i_2} [M_{дин,Д3}(t) + M'_{cm}]; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} M_{дин,Д3}(t) = \left(\frac{t_{e,1}}{2\pi \eta_{кп} \eta_e} + \frac{0,032 t_{e,1}}{3} + \frac{2,21 \cdot 10^{-7} k_n d_n}{3} \right) \times \\ \times \frac{F_{дин,Д3}(t)}{i_{кп}}; \\ F_{дин,Д3}(t) = 100 M_{Д,3}(t). \end{cases} \quad (4)$$

В (1)–(4) введены следующие обозначения: S_3 – результирующее (суммарное) перемещение рабочего стола с изделием; S_3^* – уточняющее перемещение рабочего стола, реализуемое двигателем ДЗ; S_2 – перемещение РП МП; $\phi_{Д,1}, \phi_{Д,2}, \phi_{Д,3}$ и Φ_2 – углы поворота валов двигателей Д1, Д2, Д3 и выходного вала МД соответственно; $J'_{np,1}, J'_{np,2}, J'_{np,3}$ и $J'_{МД}$ – моменты инерции привода, приведенные к валам двигателей Д1, Д2, Д3 и выходному валу МД соответственно: $J'_{np,1} = 0,92013 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J'_{np,2} = 1,01533 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J'_{np,3} = 0,01985 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J'_{МД} = 2,304 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M_{Д,1}, M_{Д,2}, M_{Д,3}$ и $M_{МД}$ – вращающие моменты, развиваемые на валах двигателей Д1, Д2, Д3 и выходном валу МД соответственно; $M_{ст}$ и $M_{ст}''$ – максимальные статические моменты нагрузки, приведенные к валу двигателя Д3 и валу МД: $M_{ст} = 1,9972 \text{ Нм}$, $M_{ст}'' = 2,6124 \text{ Нм}$; $F_{дин,Д3}$ – реактивная сила, создаваемая двигателем Д3 на РП МП; $M_{дин,Д3}$ – динамический момент сопротивления, создаваемый двигателем Д3 на валу МД: $M_{дин,Д3} = 0,2188 \cdot 2 M_{Д,3} \text{ Нм}$; $t_{e,1}$ и $t_{e,2}$ – значения «шага винта» соответственно главной и дополнительной передаче типа «винт–гайка»: $t_{e,1} = 0,01 \text{ м}$, $t_{e,2} = 0,006 \text{ м}$; i_1 и i_2 – оптимальные передаточные отношения редукторов, соединяющих валы двигателей Д1 и Д2 с соответствующими солнечными шестернями МД: $i_1 = 1,812$, $i_2 = 1,596$.

Упрощенные структурно-функциональные схемы предлагаемого комбинированного трехканального и сравниваемого (аналогичного по назначению) типового одноканального следящих ЭП подачи для станка модели 24К70АФ4 показаны на рис. 4, где обозначены: РП2, РП3 и РП – П-регуляторы положения соответствующих контуров регулирования; ОКС1, ОКС2, ОКС3 и ОКС – оптимизированные контуры скорости соответствующих приводов; ДП2 и ДПРО – датчики положения РП и РО; $J'_{np,авт}$ – момент инерции привода, приведенный к валу ИД одноканального ЭП: $J'_{np,авт} = 0,2458 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

На рис. 5 приведена полная структурно-алгоритмическая схема комбинированного трехканального ЭП подачи с СПР-настройкой и учетом динамического взаимовлияния каналов. Схема представлена с использованием введенных выше и общепринятых обозначений.

Результаты сравнительного имитационного компьютерного моделирования электродинамических характеристик предлагаемого комбинированного трехканального и аналогичного по назначению типового одноканального следящих ЭП подачи для станка модели 24К70АФ4 приведены на рис. 6–11.

На рис. 6–11 обозначены: цифрами «1*», «2*» и «3*» – графики электродинамических характеристик приводов соответственно основного К-1, компенсирующего К-2 и точного К-3 каналов управления,

работающих в составе комбинированного трехканального ЭП; цифрами «2», «3» и «1авт» – графики характеристик соответственно комбинированного двухканального следящего ЭП с МД (каналы К-1 и К-2), настроенного на работу в составе комбинированного трехканального ЭП, комбинированного трехканального следящего ЭП в целом и типового одноканального (базового) ЭП, работающего в автономном режиме.

Полученные результаты теоретических и компьютерных исследований показали значительные преимущества комбинированного трёхканального следящего ЭП по сравнению с типовым одноканальным тиристорным ЭП подачи, устанавливаемым на металлорежущие станки особо высокой точности модели 24К70АФ4.

Так, помимо отсутствия статических ошибок, трёхканальный ЭП позволяет повысить быстродействие обработки небольших заданий по положению в статических режимах работы. Время регулирования (первого согласования) в зоне малых перемещений (до $S_M = 250 \text{ мкм}$) уменьшается не менее чем в шесть раз, а в зоне средних перемещений (до $S_C = 2 \text{ мм}$) – не менее чем в 4,8 раза. Такое уменьшение времени $t_{рег}$ наблюдается как в рабочих режимах механообработки при максимальной загрузке привода, так и в режимах позиционирования максимальной нагрузки. Вместе с тем, в зоне больших перемещений ($S_B \geq 5 \text{ мм}$) использовать комбинированный трёхканальный ЭП МП в статических режимах позиционирования нерационально из-за увеличения времени позиционирования РО по сравнению с одноканальным ЭП (рис. 6, 7).

Наибольший эффект повышения точности управления с помощью комбинированного трехканального следящего ЭП наблюдается в режимах механообработки изделия и, прежде всего, в динамических режимах работы привода. Так, кинетическая точность обработки линейной нарастающего сигнала $U_{зп}(t) = t$ может быть повышена более чем в 20 раз (рис. 8).

При сложных знакопеременных задающих воздействиях, например, $U_{зп}(t) = U_{max} \sin 2\pi f t$, точностные возможности трёхканальной системы проявляются в полной мере. При обработке синусоидальных полезных сигналов, действующих с частотой до $f = 2 \text{ Гц}$ в зоне малых перемещений (до $S_M = 250 \text{ мкм}$), уменьшения запаздываний по фазе (фазовые сдвиги) в трёхканальной системе составляют: по сравнению с базовым одноканальным ЭП – более чем в 173 раза; по сравнению с автономным комбинированным двухканальным ЭП – более чем в 11,8 раза. В зоне средних перемещений (до $S_C = 2 \text{ мм}$) при обработке аналогичных задающих воздействий, действующих с частотой до $f = 0,5 \text{ Гц}$, уменьшение фазового сдвига составляет: по сравнению с одноканальным ЭП – более чем в 86 раз; по сравнению с автономным комбинированным двухканальным ЭП – более чем в 9,4 раза. При этом в трёхканальном ЭП полностью отсутствуют ослабления управляющего сигнала по амплитуде (рис. 9, 10).

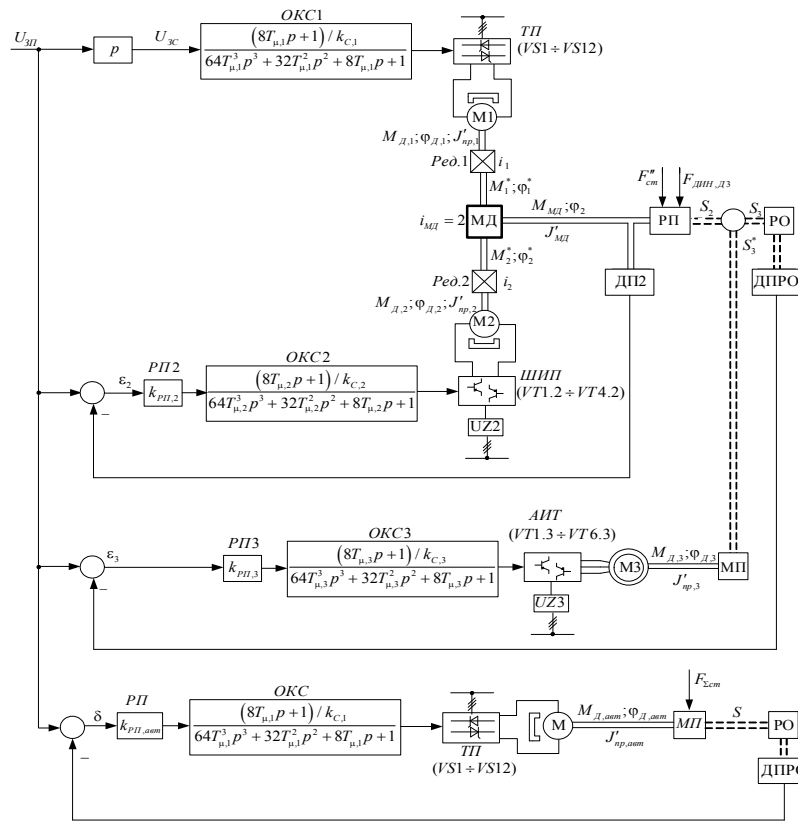


Рисунок 4 – Упрощенные структурно-функциональные схемы комбинированного трехканального и сравниваемого типового одноканального следящих ЭП подачи для станка модели 24K70AF4

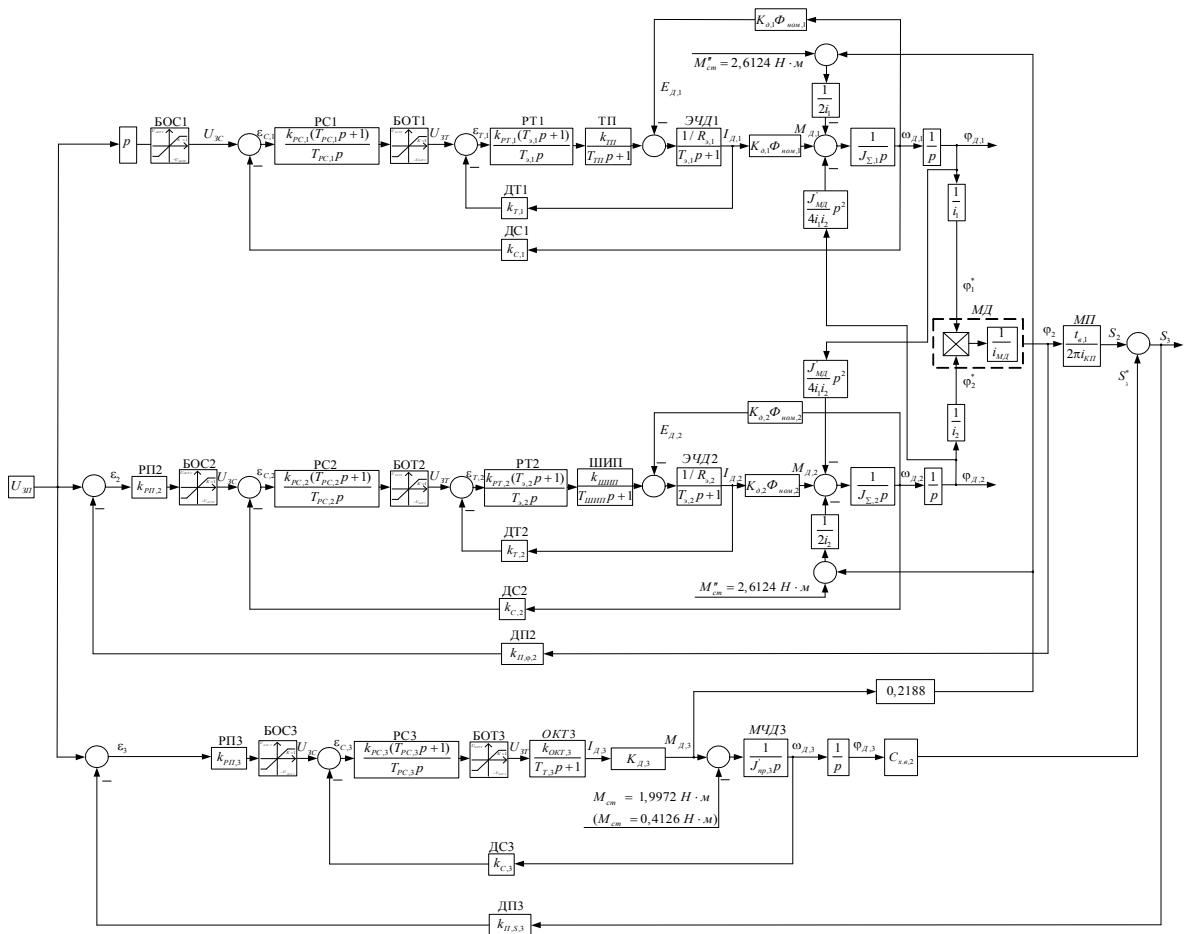


Рисунок 5 – Структурно-алгоритмическая схема комбинированного трехканального следящего ЭП подачи с СПР-настройкой и учетом динамического взаимовлияния каналов

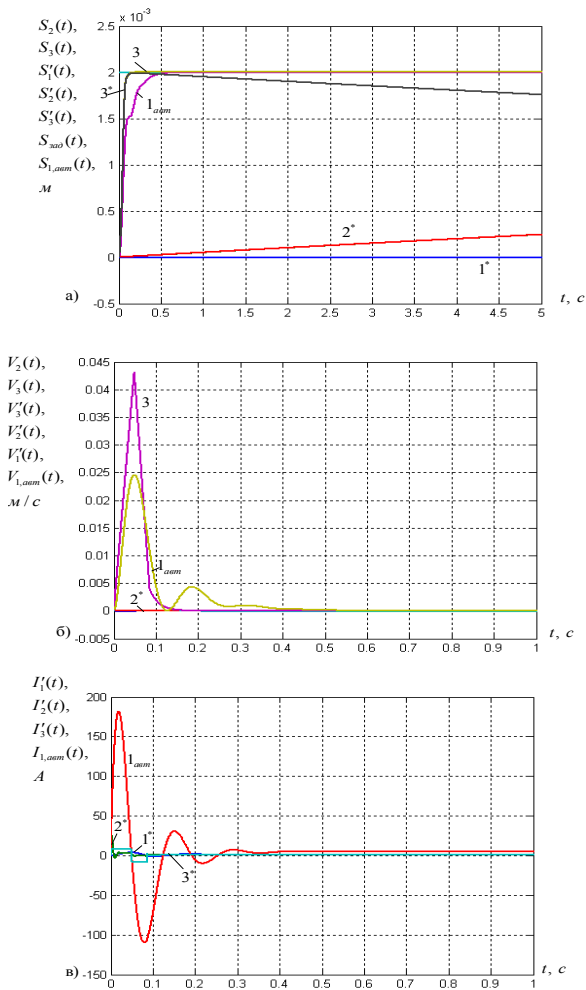


Рисунок 6 – Переходные процессы в трехканальном ЭП при отработке средних перемещений ($S_C=2\text{ мм}$) в рабочем режиме максимальной нагрузки: а) положение; б) – линейная скорость; в) ток

Применение комбинированного трёхканального ЭП позволяет расширить полосу пропускаемых частот системы ω_{Π} не только по отношению к базовому одноканальному ЭП, но и по сравнению с оптимально настроенным на автономную работу комбинированным двухканальным ЭП с МД, входящим в структуру трёхканального ЭП. В зоне малых перемещений (до $S_M = 250\text{ мкм}$) полоса воспроизводимых частот ω_{Π} по уровню 0,707 достигает: для трёхканального ЭП $\omega_{\Pi,3} = 550\text{ рад/с}$ (87,5 Гц); для двухканального ЭП $\omega_{\Pi,2} = 50\text{ рад/с}$ (8 Гц); для типового (базового) одноканального ЭП $\omega_{\Pi,1} = 3,1\text{ рад/с}$ (0,5 Гц). В зоне средних перемещений (до $S_C = 2\text{ мм}$) соответственно имеем: $\omega_{\Pi,3} = 505\text{ рад/с}$ (80,4 Гц); $\omega_{\Pi,2} = 60\text{ рад/с}$ (9,5 Гц); $\omega_{\Pi,1} = 4,4\text{ рад/с}$ (0,7 Гц). Это обеспечивает расширение полосы пропускания трёхканального ЭП по сравнению с одноканальным ЭП не менее чем в 115 раз, а по сравнению с оптимальным двухканальным ЭП – не менее чем в 8,4 раза (рис. 11).

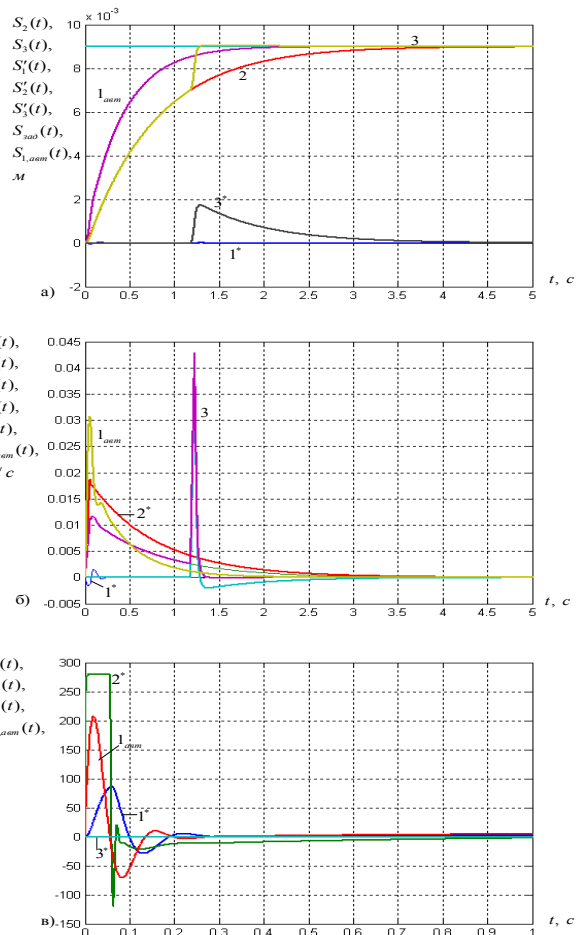


Рисунок 7 – Переходные процессы в трехканальном ЭП при отработке больших перемещений ($S_B=9\text{ мм}$) в рабочем режиме максимальной нагрузки: а) положение; б) линейная скорость; в) ток

В процессе моделирования установлено, что при отработке средних ($250\text{ мкм} < S_C < 5\text{ мм}$) и больших (от $S_B = 5\text{ мм}$) перемещений РО в режимах механообработки управление трехканальным ЭП должно осуществляться по специальному алгоритму: третий, точный канал К-3 должен подключаться в работу в моменты времени, когда ошибка отработки заданного положения РО двухканальным ЭП, входящим в состав системы, не превышает предельно допустимый диапазон отработки задающих воздействий каналом К-3 (в данном случае: $\pm 5\text{ см}$) (рис. 7).

К недостаткам комбинированных трехканальных следящих ЭП подачи для металлорежущих станков следует отнести необходимость наличия в них трех отдельных приводов требуемой мощности, одного высококачественного дифференциального редуктора и одного высокоточного (сотые доли микрона) датчика положения РО. Кроме того, разработка и эксплуатация таких многоканальных ЭП требует высокой культуры производства.

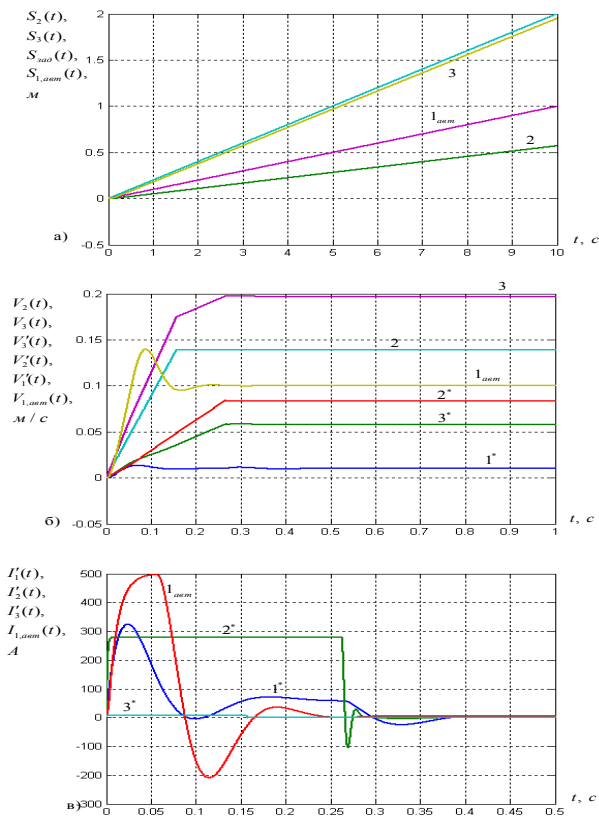


Рисунок 8 – Переходные процессы отработки линейно нарастающего входного сигнала $U_{вх}(t)=t$ трехканальным, двухканальным и базовым одноканальным ЭП в рабочем режиме максимальной нагрузки: а) положение; б) линейная скорость; в) ток

ВЫВОДЫ. 1. Теоретические и компьютерные исследования показали, что комбинированный трехканальный следящий ЭП подачи с типовой настройкой каналов управления для металлорежущих станков особо высокой точности модели 24K70АФ4 обладает новыми, кардинально улучшенными показателями качества управления подачей изделия по сравнению не только с традиционно применяемыми одноканальными тиристорными приводами, но и с аналогичным по назначению комбинированным двухканальным ЭП подачи. В таком ЭП может быть реализована точность управления, удовлетворяющая самым высоким техническим требованиям к станку.

2. При отсутствии существенных труднокомпенсируемых помех и возмущений в третьем, точном канале управления К-3 точность комбинированного трехканального ЭП подачи с МД и двумя жесткими механическими передачами типа «винт-гайка» ограничивается, в основном, только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, а также разрешающей способностью применяемого цифрового датчика перемещений РО, которая должна быть не хуже сотых долей микрона.

3. Структура комбинированного трехканального следящего ЭП подачи с типовой настройкой сравнительно проста даже при учете динамического взаимодействия каналов по нагрузке, а его расчет и оптимизация не вызывают особых трудностей.

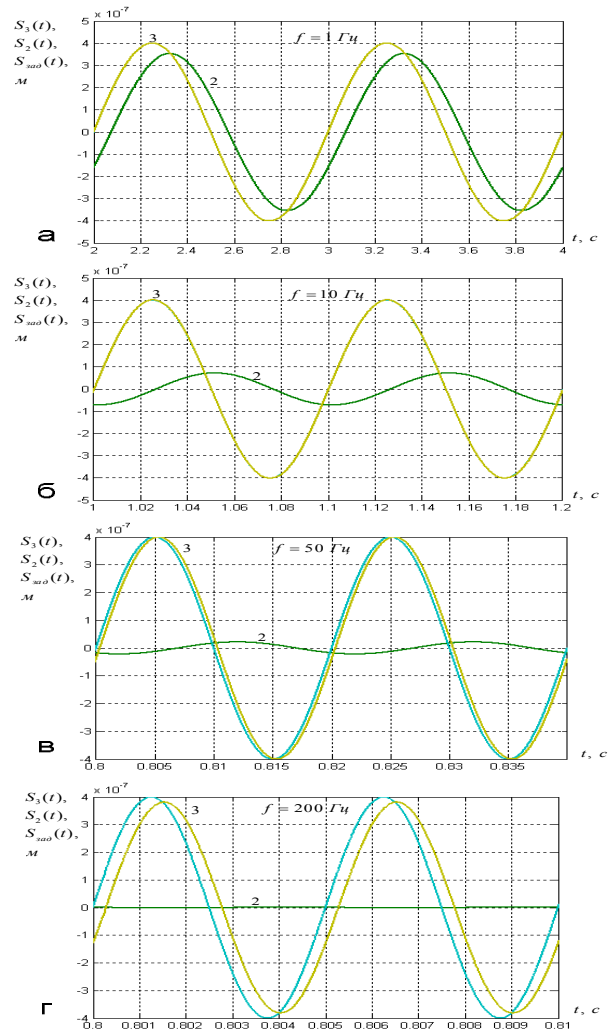


Рисунок 9 – Графики воспроизведения синусоидального сигнала $U_{шл} = U_{max} \sin 2\pi ft$ трехканальным ЭП при отработке особо малых перемещений ($S_M = 0,4$ мкм) в рабочем режиме максимальной нагрузки при: а) $f = 1$ Гц; б) $f = 10$ Гц; в) $f = 50$ Гц; г) $f = 200$ Гц

4. Комбинированные трехканальные следящие ЭП подачи не целесообразно применять для статических режимов позиционирования РО при отработке средних и больших перемещений.

В целом применение комбинированных трехканальных следящих ЭП МП целесообразно в тех случаях, когда требуются очень высокие быстродействие и динамическая точность воспроизведения задающих воздействий при значительных нагрузках на выходе одноканального следящего привода (первого, основного канала К-1) и высокой инерционности его элементов. Такие требования в полной мере соответствуют растущим требованиям к качеству работы МП современных программно-управляемых металлорежущих станков особо высокой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев А.М., Орлова Р.Т., Пальцев А.В. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.

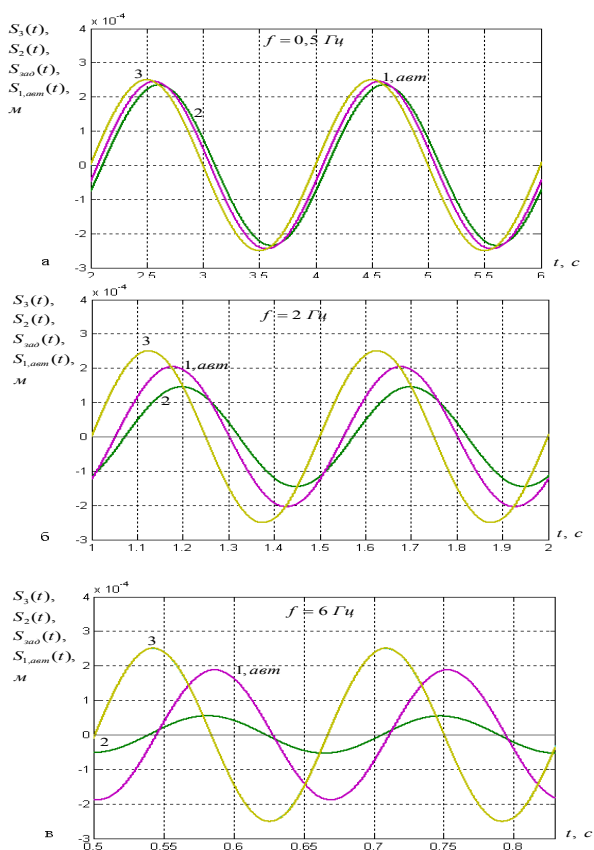


Рисунок 10 – Графики воспроизведения синусоидального сигнала $U_{\text{шт}} = U_{\text{макс}} \sin 2\pi ft$ трехканальным ЭП при отработке малых перемещений ($S_M = 250$ мкм) в рабочем режиме максимальной нагрузки при:
а) $f = 0,5$ Гц; б) $f = 2$ Гц; в) $f = 6$ Гц

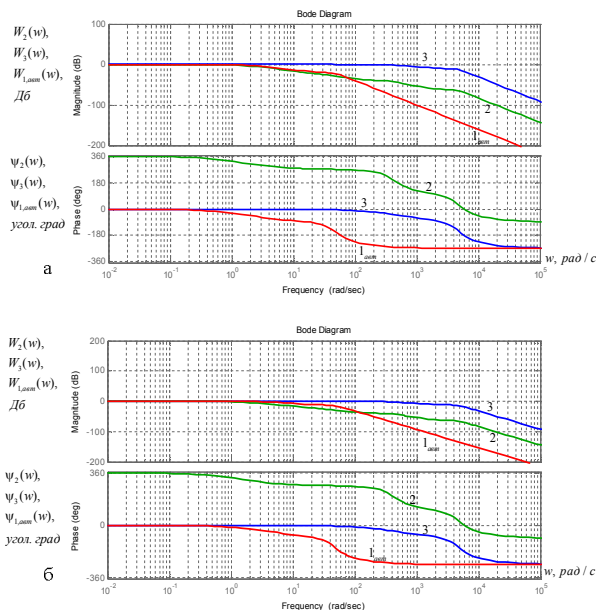


Рисунок 11 – Частотные характеристики трехканального, двухканального (в составе трехканального) и типового (базового) одноканального ЭП при отработке перемещений в рабочем режиме максимальной нагрузки: а) $S_M = 4$ мкм и б) $S_C = 2$ мм

2. Кузнецов Б., Худяев А., Богаенко И. и др. Многоканальные итерационные системы управления: учебное пособие. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 с.

3. 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.

MECHANICS AND ELECTRICAL DYNAMICS OF THE COMBINE THREE-CHANNEL SERVO DRIVE OF FEED FOR ESPECIALLY HIGH PRECISION HEAVY MACHINE TOOL

A. Khudyaev

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: alexey@kpi.kharkov.ua

The kinematical chart and mathematical model of mechanical part, corresponding functional and structural diagrams of the combine three-channel servodrive of feed for especially high precision heavy machine tool type 24K70AФ4 are considered. The results of computer simulation of corresponding dynamic and accuracy characteristics for estimation of efficiency such combine three-channel servosystem are given.

Key words: three-channel servodrive, accuracy of control, electrical dynamics and accuracy characteristics.

REFERENCES

1. Lebedev A.M., Orlova R.T., Paltzev A.M. *Servodrives of machine tools with NC*. – М.: Energoatomizdat, 1988. – 223 p. [in Russian]
2. Kuznetsov B., Khudyaev A., Bogayenko I. and oth. *Multichannel iterative type control systems: teaching aids for students in higher education*. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 p. [in Russian]

3. Khudyaev A., Litvinenko D. The comparative estimation of quality of the iterative type three-channel servodrives with standard tuning // *Bulletin of the NTU “KhPI”*. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2010. – № 28. – PP. 186–191. [in Russian]

Стаття надійшла 1.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Старостіним С.С.