

УДК 681.5.033 + 681.587'57

КОМПЕНСАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОВЛИЯНИЯ МЕЖДУ КАНАЛАМИ В ИТЕРАЦИОННОМ ДВУХКАНАЛЬНОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ СТАНКА

А. А. Худяев, Л. В. Акимов, В. В. Поленок

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: vitaliy_polenok@inbox.ru

При создании итерационных многоканальных следящих электроприводов высокого качества необходимо обеспечить автономность настройки и функционирования их каналов управления. Для осуществления условий автономности каналов управления многоканальных дифференциальных электроприводов подачи станков могут быть применены компенсирующие перекрестные связи между каналами. Рассмотрены кинематическая схема и математическая модель движения двухканального дифференциального электропривода подачи, построенного по итерационному принципу. Построены и рассчитаны перекрестные связи, компенсирующие динамическое взаимовлияние между каналами по нагрузке (компенсаторы динамического взаимовлияния каналов) в таком двухканальном электроприводе с подчиненной настройкой. Применительно к электроприводе механизма подачи станка модели ИР800ПМФ4 получена структурно-алгоритмическая схема двухканальной системы управления привода, учитывающая подключение компенсаторов динамического взаимовлияния каналов. Приведены результаты сравнительного анализа показателей качества динамических и точностных характеристик предлагаемого двухканального и аналогичного одноканального привода подачи, применяемого на станках рассматриваемого типа. Методом компьютерного моделирования выполнена оценка эффективности применения компенсирующих перекрестных связей между каналами. Показана не только принципиальная необходимость, но и потенциальная эффективность применения компенсаторов динамического взаимовлияния каналов по нагрузке для повышения качества работы двухканальных дифференциальных электроприводов подачи как с оптимизированной (стандартной), так и с неоптимизированной (нестандартной) подчиненной настройкой каналов.

Ключевые слова: двухканальный дифференциальный электропривод, компенсирующие перекрестные связи, точность управления, динамические и точностные характеристики.

КОМПЕНСАЦІЯ ДИНАМІЧНОГО ВЗАЄМВПЛИВУ МІЖ КАНАЛАМИ В ІТЕРАЦІЙНОМУ ДВОКАНАЛЬНОМУ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ МЕХАНІЗМУ ПОДАЧІ ВЕРСТАТА

О. А. Худяев, Л. В. Акимов, В. В. Поленок

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна. E-mail: vitaliy_polenok@inbox.ru

При створенні ітераційних багатоканальних слідкуючих електроприводів високої якості необхідно забезпечити автономність налаштування й функціонування їх каналів керування. Для здійснення умов автономності каналів керування двоканальних диференціальних електроприводів подачі верстатів можуть бути застосовані компенсувальні перехресні зв'язки між каналами. Розглянуто кінематичну схему й математичну модель руху двоканального диференціального електроприводу подачі, побудованого за ітераційним принципом. Побудовані й розраховані перехресні зв'язки, які компенсують динамічний взаємовплив між каналами за навантаженням (компенсатори динамічного взаємовпливу каналів) у такому двоканальному електроприводі з підлеглим налаштуванням. Стосовно електроприводу механізму подачі верстата моделі ИР800ПМФ4 отримана структурно-алгоритмічна схема двоканальної системи керування приводу, яка враховує підключення компенсаторів динамічного взаємовпливу каналів. Наведено результати порівняльного аналізу показників якості динамічних й точностних характеристик запропонованого двоканального та аналогічного одноканального привода подачі, який застосовується на верстатах розглянутого типу. Методом комп'ютерного моделювання виконана оцінка ефективності застосування компенсувальних перехресних зв'язків між каналами. Показана не тільки принципова необхідність, але й потенційна ефективність застосування компенсаторів динамічного взаємовпливу каналів за навантаженням для підвищення якості роботи двоканальних диференціальних електроприводів подачі як з оптимізованим (стандартним), так і з неоптимізованим (нестандартним) підлеглим налаштуванням каналів.

Ключові слова: двоканальний диференціальний електропривод, компенсувальні перехресні зв'язки, точність керування, динамічні й точнісні характеристики.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Эффективным структурным способом повышения быстродействия и точности управления традиционных одноканальных электроприводов (ЭП) подачи металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и обрабатывающих центров, особенно в динамических режимах работы при сохранении требуемых силовых воздействий на инерционный рабо-

чий орган (РО) (прежде всего, рабочий стол с изделием), может служить применение многоканальных следящих приводов, построенных и функционирующих по итерационному [1–3] или близким к итерационному [4] принципам управления.

Известно [1], что многоканальные следящие приводы, построенные по итерационному принципу, из-за наличия общих элементов в приводном механиз-

ме (ПМ), как правило, представляют собой многосвязные (по объекту управления) электромеханические системы (ЭМС) с возможностью сепарации ЭП каналов управления. Многосвязность итерационных следящих приводов нарушает их свойство автономности по устойчивости [3], что значительно усложняет реализацию желаемых алгоритмов настройки каналов и обеспечение автономности регулирования координат. Поэтому при создании многоканальных ЭМС высокого качества необходимо обеспечить автономность настройки и функционирования их каналов управления.

В итерационных многоканальных следящих ЭП для развязки каналов управления, т.е. осуществления условий их автономности, могут быть применены компенсирующие перекрестные связи (КПС) между каналами. Компенсирующие перекрестные (или обратные) связи являются важнейшим средством обеспечения заданных динамических характеристик многосвязной ЭМС, а в некоторых случаях и ее устойчивости [5]. Кроме того, в многоканальных следящих приводах подачи при условии компенсации негативного динамического взаимовлияния каналов (ДВБК) по нагрузке может быть принята унифицированная и хорошо отработанная типовая (стандартная) настройка каналов управления, например, по принципу СПР [5, 6]. В этом случае во внешних контурах многоканальной ЭМС также обеспечивается автономность регулируемых координат при общей простоте синтеза, наладки и ограничения фазовых переменных в автономных каналах с подчиненным управлением. В результате в многоканальном приводе подачи с КПС восстанавливается удобство настройки регуляторов каждого внешнего контура СПР. Принципиальная возможность получения различных КПС между каналами управления обобщенной многосвязной ЭМС с подчиненным регулированием рассмотрена, например, в работе [7].

Вместе с тем в работе [8] показано, что при отсутствии возможности введения компенсирующих связей между каналами в двухканальном ЭП подачи станка может быть реализована упрощенная типовая настройка. При этом по принципу СПР предварительно настраиваются приводы взаимосвязанных каналов управления, условно принимаемых автономными. Окончательная настройка контуров положения отдельных взаимосвязанных через нагрузку приводов осуществляется в процессе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований двухканального следящего ЭП в целом. Результаты компьютерных исследований показали, что в таком квазиитерационном двухканальном ЭП (без применения КПС) в определенном диапазоне движений также может быть обеспечено повышенное качество управления подачей РО. В связи с этим естественно возникает вопрос не только об оценке эффективности применения компенсаторов ДВБК по нагрузке, но и вообще о принципиальной необ-

ходимости введения КПС в итерационные многоканальные ЭП подачи.

Одним из наиболее простых и надежных вариантов технической реализации итерационных следящих ЭП механизмов подач (МП) станков является многоканальный ЭП подачи РО на базе многодвигательного ПМ с суммирующими дифференциальными редукторами – механическими дифференциалами (МД) [1, 9]. Сегодня для итерационных двух- и трехканальных ЭП подачи с подчиненной настройкой каналов и МД в ПМ [8, 10] полностью не исследована эффективность возможных вариантов соответствующих структурных схем системы управления с компенсацией негативных перекрестных связей в объекте управления (ОУ). Не разработаны с учетом КПС математические и компьютерные модели для анализа таких многоканальных систем и выработки практических рекомендаций. В частности, отсутствует анализ эффективности двухканального следящего ЭП МП с суммирующим симметричным МД в ПМ и компенсаторами ДВБК по нагрузке в системе управления.

Целью работы является построение и расчет перекрестных связей, компенсирующих динамическое взаимовлияние между каналами по нагрузке (компенсаторов ДВБК), и оценка потенциальной эффективности их применения для повышения качества динамических и точностных характеристик итерационного двухканального ЭП МП с СПР-настройкой каналов и МД в ПМ применительно к подаче РО (рабочего стола с изделием) многоцелевого металлорежущего станка с ЧПУ повышенной точности типа «обрабатывающий центр ИР800ПМФ4» (масса станка 13 т).

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Предлагаемый двухканальный дифференциальный ЭП подачи, построенный по итерационному принципу, включает первый (основной) К-1 и второй (уточняющий) К-2 каналы управления по углу с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум (СО). Такой двухканальный электропривод при условии компенсации в нем ДВБК по нагрузке, обусловленного наличием общего МД в ПМ, может быть отнесен к классу собственно итерационных многоканальных систем автоматического управления (САУ) [3].

Варианты обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с суммирующим МД и учетом моментов сопротивления нагрузки $M_{c,1}$ и $M_{c,2}$, преобразованных к выходам разомкнутых контуров положения соответствующих каналов управления, показаны на рис. 1. Оба варианта структуры равноценны с точки зрения свойств рассматриваемой двухканальной системы. Вместе с тем при обязательном наличии в каждом из вариантов датчика положения РО $k_{ДПРО}$ структуры отличаются использованием в системе различных датчиков положения валов исполнительных двигателей (ИД) отдельных приво-

дов: $k_{П, \varphi_{Д1}}$ или $k_{П, \varphi_{Д2}}$. Дополнительно на рис. 1 обозначены: $C_{ПР}$ и $C_{х.в.}$ – коэффициенты передачи соответственно повышающего редуктора (ПР) и ходового винта (х.в.) шарико-винтовой пары (ШВП); $R_i^*(p)$ ($i=1,2$) – дифференциальные операторы разомкнутых контуров положения отдельных приводов с учетом соответствующих управляющих и исполнительных элементов и устройств; $R_{c, M_{c,i}}(p)$ и $E_{c,i}(p)$ ($i=1,2$) – дифференциальные операторы соответственно разомкнутых контуров скорости по моментам нагрузки $M_{c,i}$ ($i=1,2$) и ошибок контуров скорости отдельных приводов; $p \triangleq d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t .

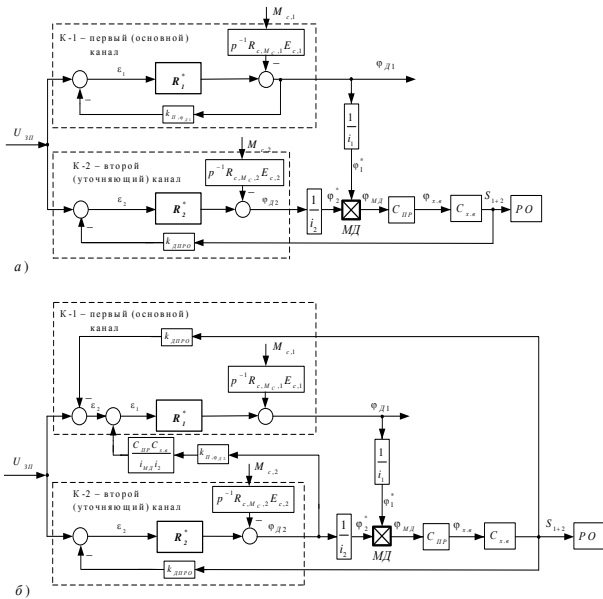


Рисунок 1 – Варианты обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с суммирующим МД:
а) первый вариант; б) второй вариант

Электроприводы основного К-1 и уточняющего К-2 каналов двухканального ЭП подачи могут быть построены на базе типовых транзисторных ЭП постоянного тока с силовыми частями типа ШИП–ДПТ. Для этого, например, могут быть использованы современные модификации широко известного глубокорегулируемого комплектного ЭП постоянного тока серии MR–DC. В качестве ИД Д1 основного и Д2 уточняющего приводов дифференциального МП станка предполагается использовать одинаковые высокомоментные ДПТ с постоянными магнитами серии 2ПБВ типа 2ПБВ 132S ($P_{ном,i} = 1,94$ кВт, $i = 1,2$). Как вариант, второй, уточняющий, канал К-2 может быть построен на базе привода переменного тока. Для этого возможно применение широкополосного ЭП переменного тока с частотно-токовым векторным управлением (типа ПЧТ–АД) серии Optidrive Plus 3GV на базе сопоста-

вимого по мощности АД с короткозамкнутым ротором типа АИР112МВ8 специального исполнения ($P_{ном,2} = 3$ кВт).

Сравнение производится с аналогичным по назначению одноканальным (автономным) тиристорным ЭП подачи типа ТПН–ДПТ фирмы «Геттис» (США), установленным на действующих станках данной модели. В одноканальном безредукторном ЭП подачи в качестве ИД может быть использован высокомоментный электродвигатель постоянного тока серии ПБВ типа ПБВ 112L ($P_{ном,авт} = 1,1$ кВт).

На рис. 2 приведена кинематическая схема двухканального дифференциального ЭП подачи РО для станка модели ИР800ПМФ4. Двухдвигательный ПМ построен на основе симметричного конического МД ($i_{МД} = 2$) с последующим ПР ($i_{ПР} = 0,5$), соединяющим выходной вал МД с ходовым винтом ШВП МП РО ($C_{х.в.} = 1,59155 \cdot 10^{-3}$ м/рад).

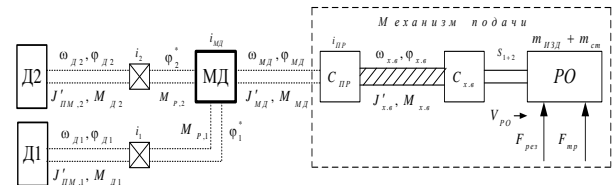


Рисунок 2 – Кинематическая схема двухканального дифференциального ЭП подачи РО (рабочего стола с изделием) для станка модели ИР800ПМФ4

Математическая модель движения двухканального дифференциального ЭП подачи в установившемся режиме механообработки, полученная на основании рис. 2 при допущении абсолютной жесткости механических звеньев кинематической цепи привода и при оптимальных значениях передаточных чисел $i_1 = i_2 = 1,044$ и $i_{ПР} = 0,5$, имеет вид:

$$S_{PO}(t) \equiv S_{1+2}(t) = C_{х.в.} \varphi_{х.в.}(t) = C_{х.в.} \frac{\varphi_{МД}(t)}{i_{ПР}} = \frac{t_6}{2\pi i_{ПР}} \varphi_{МД}(t); \quad (1)$$

$$\varphi_{МД}(t) = \frac{\varphi_1^*(t) \pm \varphi_2^*(t)}{i_{МД}} = \frac{\varphi_{Д1}(t)}{i_1 i_{МД}} \pm \frac{\varphi_{Д2}(t)}{i_2 i_{МД}} = \frac{\varphi_{Д1}(t)}{2i_1} \pm \frac{\varphi_{Д2}(t)}{2i_2}; \quad (2)$$

$$M_{Д1} - J_{\Sigma,1} p^2 \varphi_{Д1}(t) \mp \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2 \eta_{ч,p} \eta_{МД}} p^2 \varphi_{Д2}(t) - M_{c,1} = 0; \quad (3)$$

$$M_{Д2} - J_{\Sigma,2} p^2 \varphi_{Д2}(t) - \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2 \eta_{ч,p} \eta_{МД}} p^2 \varphi_{Д1}(t) - M_{c,2} = 0; \quad (4)$$

где

$$J_{\Sigma,1} = J'_{ПМ,1} + \frac{J'_{МД}}{4i_1^2 \eta_{ч,p} \eta_{МД}}; \quad J_{\Sigma,2} = J'_{ПМ,2} \pm \frac{J'_{МД}}{4i_2^2 \eta_{ч,p} \eta_{МД}}; \quad (5)$$

$$M_{c,1} = \frac{M'_{c,МД}}{2i_1 \eta_{ч,p} \eta_{МД}}; \quad M_{c,2} = \frac{M'_{c,МД}}{2i_2 \eta_{ч,p} \eta_{МД}}; \quad (6)$$

знаки «+» и «-» в правых частях уравнений (2) и (5), и знаки «-» и «+» в левой части уравнения (3) соответствуют согласному и встречному вращениям дви-

гателя Д2 по отношению к вращению двигателя Д1. Учет влияния ДВВК по нагрузке на движение приводов каналов математически определяется третьими слагаемыми в левых частях уравнений (3) и (4).

В уравнениях (1)–(6) и на рис. 2 обозначены: $J'_{ПМ,i}$ ($i=1,2$) и $J'_{МД}$ – моменты инерции ПМ, приведенные к валам соответствующих ИД и дифференциала МД; $J'_{ПМ,1} = J'_{ПМ,2} \approx 2,5346 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J'_{МД} \approx 1,39309 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M_{Дi}$ ($i=1,2$) и $M_{МД}$ – вращающие моменты, развиваемые на валах соответствующих ИД и на валу МД; $M'_{с,МД}$ – максимальный момент сопротивления нагрузки (в рабочем режиме механообработки), приведенный к валу МД; $M'_{с,МД} \approx 14,778 \text{ Н}\cdot\text{м}$; t_θ – шаг х.в., $t_\theta = 0,01 \text{ м}$; $\varphi_{Д1}$, $\varphi_{Д2}$, $\varphi_{МД}$ и $\varphi_{х.в}$ – углы поворота валов соответственно двигателей Д1, Д2, выходного вала МД и ходового винта ШВП, рад; $\eta_{ц,p}$ и $\eta_{МД}$ – КПД цилиндрического зубчатого редуктора и конического МД; $\eta_{ц,p} \approx 0,985$, $\eta_{МД} \approx 0,98$.

Упрощенные структурно-функциональные схемы двухканальной (итерационной) и сравниваемой одноканальной (автономной) систем управления электропривода МП РО станка приведены на рис. 3. На рисунке: РП1, РП2 и РП – П-регуляторы положения (П–РП) соответствующих контуров регулирования; ОКС1, ОКС2 и ОКС – оптимизированные контуры скорости соответствующих приводов; ДП1 и ДПРО – датчики положения вала двигателя Д1 и линейного перемещения РО; $J'_{ПМ,авт}$ – момент инерции безредукторного ПМ, приведенный к валу ИД Д одноканального ЭП, $J'_{ПМ,авт} = 0,06763 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Отметим, что структурно-функциональная схема двухканальной САУ ЭП МП соответствует первому варианту обобщенной структурной схемы системы управления итерационного двухканального ЭП МП с суммирующим МД (рис. 1,а).

Структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального дифференциального ЭП механизма подачи РО станка приведена на рис. 4. Схема представлена с учетом перекрестных связей ДВВК по нагрузке, определяемых математической моделью движения привода (3)–(6).

Построение и расчет КПС выполним согласно рис. 4. Операторы компенсаторов C_{ij} ($i, j=1,2; i \neq j$) перекрестных связей ОУ основного К-1 и уточняющего К-2 каналов управления двухканального дифференциального ЭП при условии пренебрежения обратными связями по ЭДС двигателей Д1 и Д2:

$$C_{ij}(p) = -K_{OV,ij}(p)K_{OV,j}(p) \frac{k_{m,j}W_{OKT,j}(p)}{k_{m,i}W_{OKT,i}(p)}, \quad (7)$$

$i, j=1,2 (i \neq j),$

где $K_{OV,ij}(p)$ – оператор направленной перекрестной связи между ОУ контуров скорости j -го (выход) и i -го (вход) каналов управления:

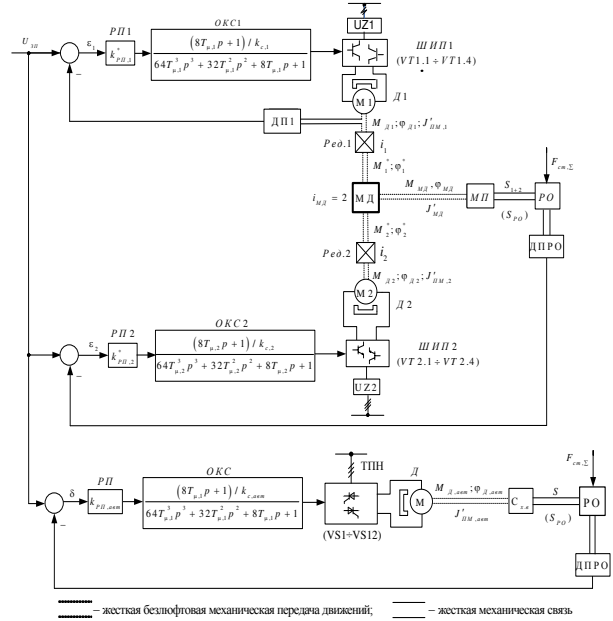


Рисунок 3 – Упрощенные структурно-функциональные схемы двухканальной (итерационной) и сравниваемой традиционной одноканальной (автономной) систем управления ЭП подачи РО станка

$$K_{OV,12}(p) = \mp \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2 \eta_{ц,p} \eta_{МД}} p;$$

$$K_{OV,21}(p) = - \frac{J'_{МД}}{4i_1 i_2 \eta_{ц,p} \eta_{МД}} p; \quad (8)$$

$K_{OV,j}(p)$ – оператор механической части ОУ в прямой цепи контура скорости j -го канала управления с учетом (5):

$$K_{OV,1}(p) = \frac{4i_1^2 \eta_{ц,p} \eta_{МД}}{(4i_1^2 J'_{ПМ,1} \eta_{ц,p} \eta_{МД} + J'_{МД}) p};$$

$$K_{OV,2}(p) = \frac{4i_2^2 \eta_{ц,p} \eta_{МД}}{(4i_2^2 J'_{ПМ,2} \eta_{ц,p} \eta_{МД} \pm J'_{МД}) p}; \quad (9)$$

$W_{OKT,j}(p)$, $W_{OKT,i}(p)$ и $k_{m,j}$, $k_{m,i}$ – операторы оптимизированных контуров тока и коэффициенты передачи ИД по моменту соответственно j -го и i -го каналов управления:

$$W_{OKT,1}(p) \approx \frac{1/k_{T,1}}{2T_{\mu,1}p + 1}; \quad W_{OKT,2}(p) \approx \frac{1/k_{T,2}}{2T_{\mu,2}p + 1}; \quad (10)$$

$$k_{m,j} = k_{m,i} = k_m = K_D \Phi_{ном} = 0,7621 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}} \quad (11)$$

при работе привода с АД Д2 в уточняющем канале К-2:

$$k_{m,2} = 1,639 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}.$$

Из (7) для операторов компенсаторов $C_{12}(p)$ и $C_{21}(p)$ с учетом (8)–(11) получаем

$$C_{12}(p) = \pm \left(k_1^\pm \frac{2T_{\mu,1}p + 1}{2T_{\mu,2}p + 1} \right) = \pm \left(\frac{k_1^\pm T_{\mu,1}p}{T_{\mu,2}p + 1} + \frac{k_1^\pm}{T_{\mu,2}p + 1} \right); \quad (12)$$

$$C_{21}(p) = k_2 \frac{2T_{\mu,2}p+1}{2T_{\mu,1}p+1} = \frac{k_2 T_{\mu,2} p}{T_{\mu,1} p + 1} + \frac{k_2}{T_{\mu,1} p + 1}, \quad (13)$$

где

$$k_1^{\pm} = \frac{k_{T,1} k_{M,2} i_2 J'_{MD}}{k_{T,2} k_{M,1} i_1 (4i_2^2 J'_{ПМ,2} \eta_{ц,р} \eta_{МД} \pm J'_{MD})}; \quad (14)$$

$$k_2 = \frac{k_{T,2} k_{M,1} i_1 J'_{MD}}{k_{T,1} k_{M,2} i_2 (4i_1^2 J'_{ПМ,1} \eta_{ц,р} \eta_{МД} + J'_{MD})}; \quad (15)$$

$$T_{\mu,1} = 2T_{\mu,1}, \quad T_{\mu,1} = T_{ШИП,1} = 8,333 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$T_{\mu,2} = 2T_{\mu,2}, \quad T_{\mu,2} = T_{ШИП,2} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$k_{T,1} = k_{T,2} = k_T = 0,02073 \text{ Ом};$$

при работе привода с АД Д2 в уточняющем канале К-2:

$$T_{\mu,2} = 2T_{\mu,2}, \quad T_{\mu,2} = T'_{ШИП,2} = 3,125 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$k_{T,2} = 0,1766 \text{ Ом};$$

знаки «+» и «-» в правой части уравнений (12) и в знаменателе соотношения (14), как и ранее, соответствуют согласному и встречному вращениям двигателей Д1 и Д2.

Перекрестные связи, компенсирующие негативное взаимовлияние каналов К-1 и К-2 по нагрузке и реализованные с помощью компенсаторов C_{12} и C_{21} с операторами вида (12)–(15), показаны на рис. 4 пунктирными линиями.

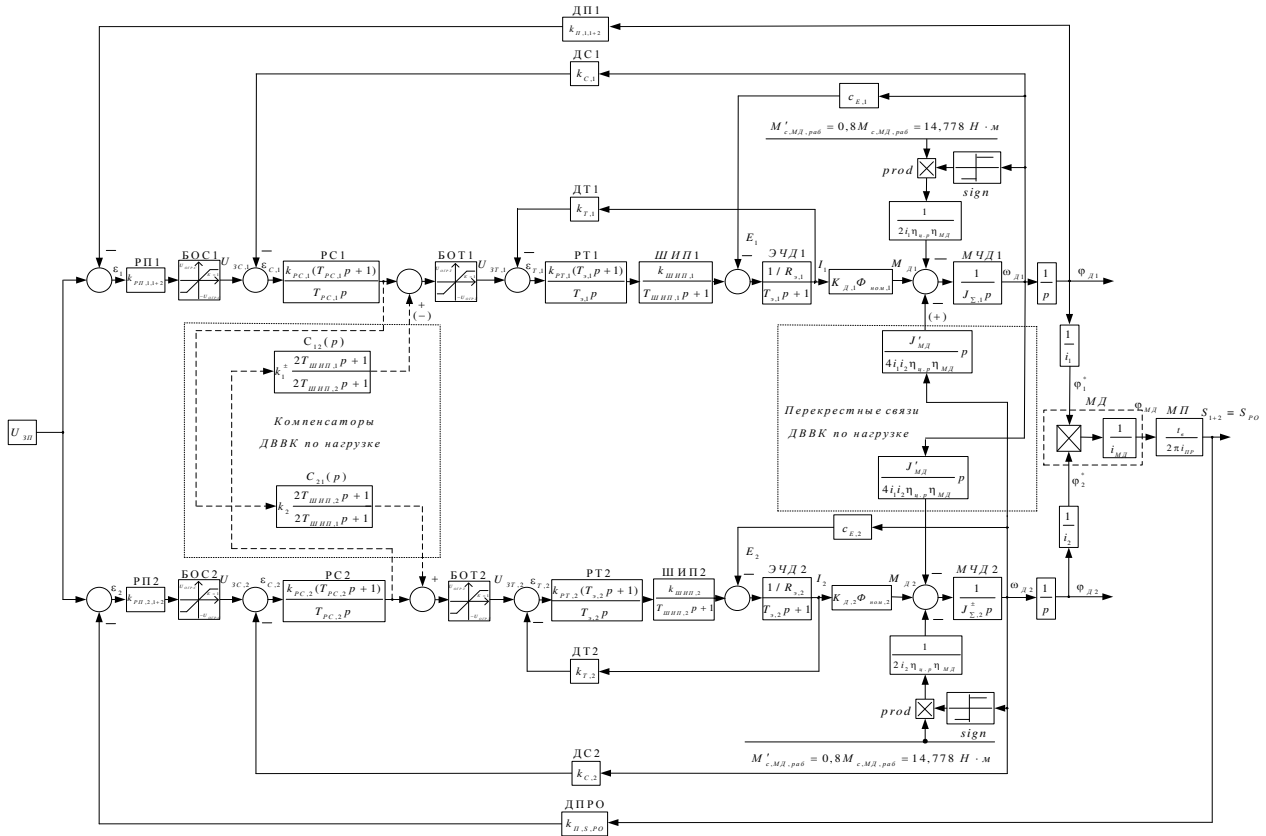


Рисунок 4 – Структурно-алгоритмическая схема итерационного двухканального дифференциального ЭП механизма подачи РО станка

Из соотношений (12) и (13) нетрудно видеть, что полученные КПС блока компенсаторов C_{ij} ($i, j=1,2; i \neq j$) представляют собой суммы реального дифференцирующего и аperiodического звеньев, содержащих соответствующую перекрестной связи реальную инерционность $1/(T_{\mu,i} p + 1)$ ($i=1,2$), и могут быть легко технически реализованы с помощью свободных ячеек электронных блоков системы УБСР–АИ.

Диаграммы компьютерных расчетов, полученные с учетом технических характеристик станка модели ИР800ПМФ4, приведены на рис. 5–10, где обозначены: цифрами «1» и «2» – графики характеристик приводов основного К-1 и уточняюще-

го К-2 каналов управления, работающих в итерационном режиме; цифрами «1+2» и «1авт» – аналогичные графики двухканального дифференциального ЭП и сравниваемого одноканального (автономного) ЭП. Во всех случаях моделировалась работа приводов в режиме механообработки изделия (перерегулирование по положению РО не допускается) при максимальной статической нагрузке привода. Результаты сравнительной оценки показателей качества характеристик приводов приведены в табл. 1–3, где обозначены: S_M^* , S_M , S_C и S_B – заданные подачи РО соответственно в зонах особо малых, малых, средних и больших перемещений МП станка.

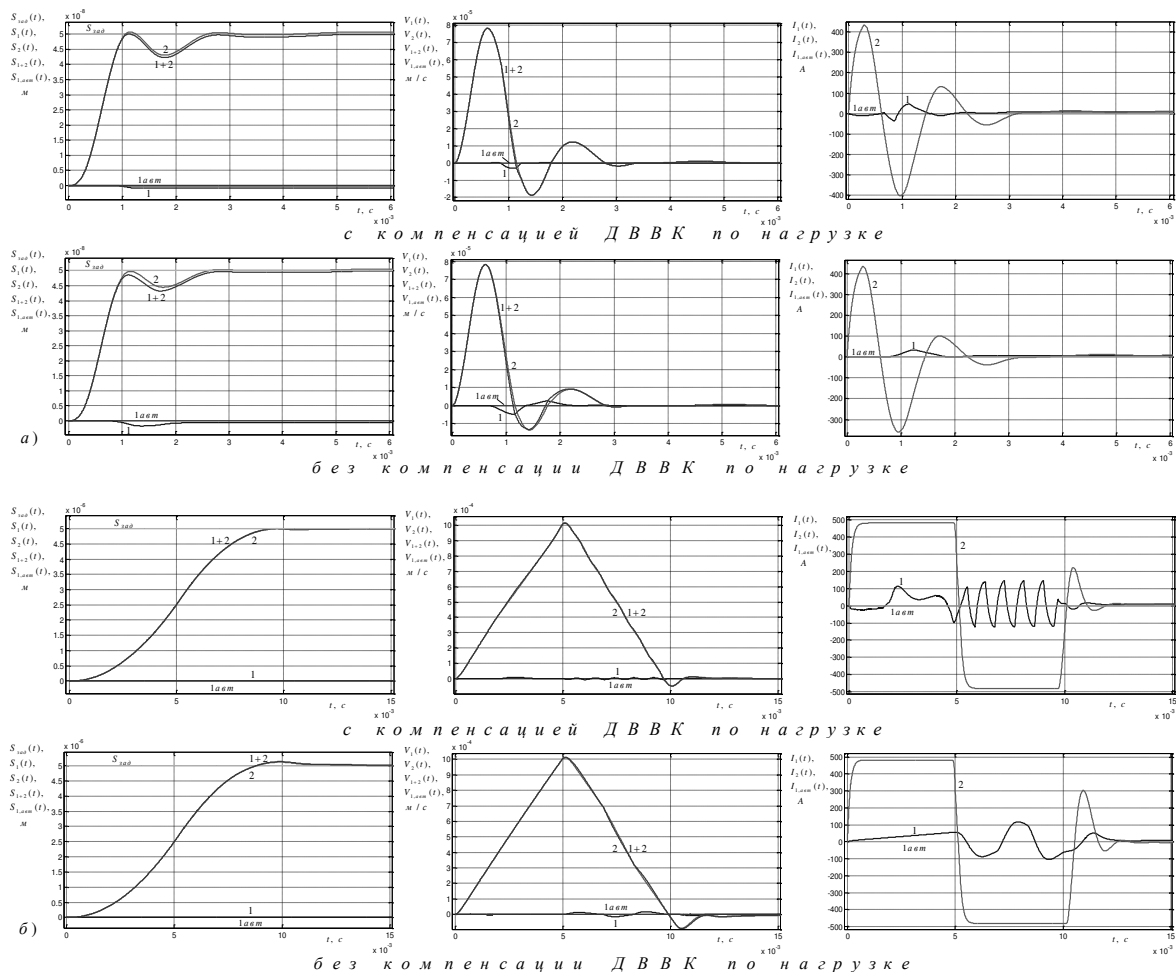


Рисунок 5 – Переходные процессы положения, линейной скорости и тока итерационного двухканального ЭП с силовой частью типа ШИП–ДПТ (с компенсацией и без компенсации ДВВК по нагрузке) и одноканального (автономного) тиристорного ЭП МП станка при отработке особо малых (а) и малых (б) перемещений РО:

а) $S_M^* = 0,05$ мкм; б) $S_M^* = 0,005$ мм

Двухканальный ЭП подачи с оптимизированной (стандартной) СПР-настройкой каналов. Теоретические и компьютерные исследования показали значительные потенциальные преимущества предлагаемого двухканального ЭП с силовой частью типа ШИП–ДПТ и оптимальной подчиненной настройкой каналов по сравнению с аналогичным одноканальным (автономным) ЭП подачи типа ТПН–ДПТ, традиционно применяемым на действующих станках рассматриваемого типа. При этом преимущества двухканального ЭП в быстродействии и точности управления имеют место как для привода с учетом, так и для привода без учета рассчитанных перекрестных связей КПС, компенсирующих ДВВК по нагрузке (рис. 4). Вместе с тем особенно эффективно и в полном соответствии с законами СПР-настройки каналов указанные преимущества проявляются в компенсированном (с учетом КПС) двухканальном ЭП при подачах РО в зоне малых и средних перемещений станка: $0 < S_{PO} \leq 2$ мм. Именно в этом диапазоне подачи станков чаще всего и требуется обеспечение повышенной точности управления и позиционирования РО.

На рис. 5 показаны графики переходных процессов (ПП) положения, скорости и тока двухканального дифференциального ЭП МП станка (с компенсацией и без компенсации ДВВК по нагрузке) при заданных подачах в зоне особо малых S_M^* (рис. 5,а) и малых S_M^* (рис. 5,б) перемещений РО, не доступных для отработки с помощью традиционного одноканального (автономного) ЭП подачи (кривые «лашт»). На рис. 6 представлены аналогичные графики, но уже при отработке двухканальным и одноканальным приводами заданных подач в диапазоне средних перемещений РО ($0,02 \text{ мм} \leq S_C \leq 2 \text{ мм}$).

Отметим, что отработка одноканальным ЭП скачкообразных управляющих воздействий без существенных искажений начального участка ПП по положению РО становится возможной, начиная только со ступенчатых сигналов амплитудой не менее $S_{зад} = 0,1-0,15$ мм (рис. 6,а,б). Этот недостаток тиристорного ЭП связан с ограниченными возможностями работы его контура тока в указанном диапазоне малых ступенчатых подач РО.

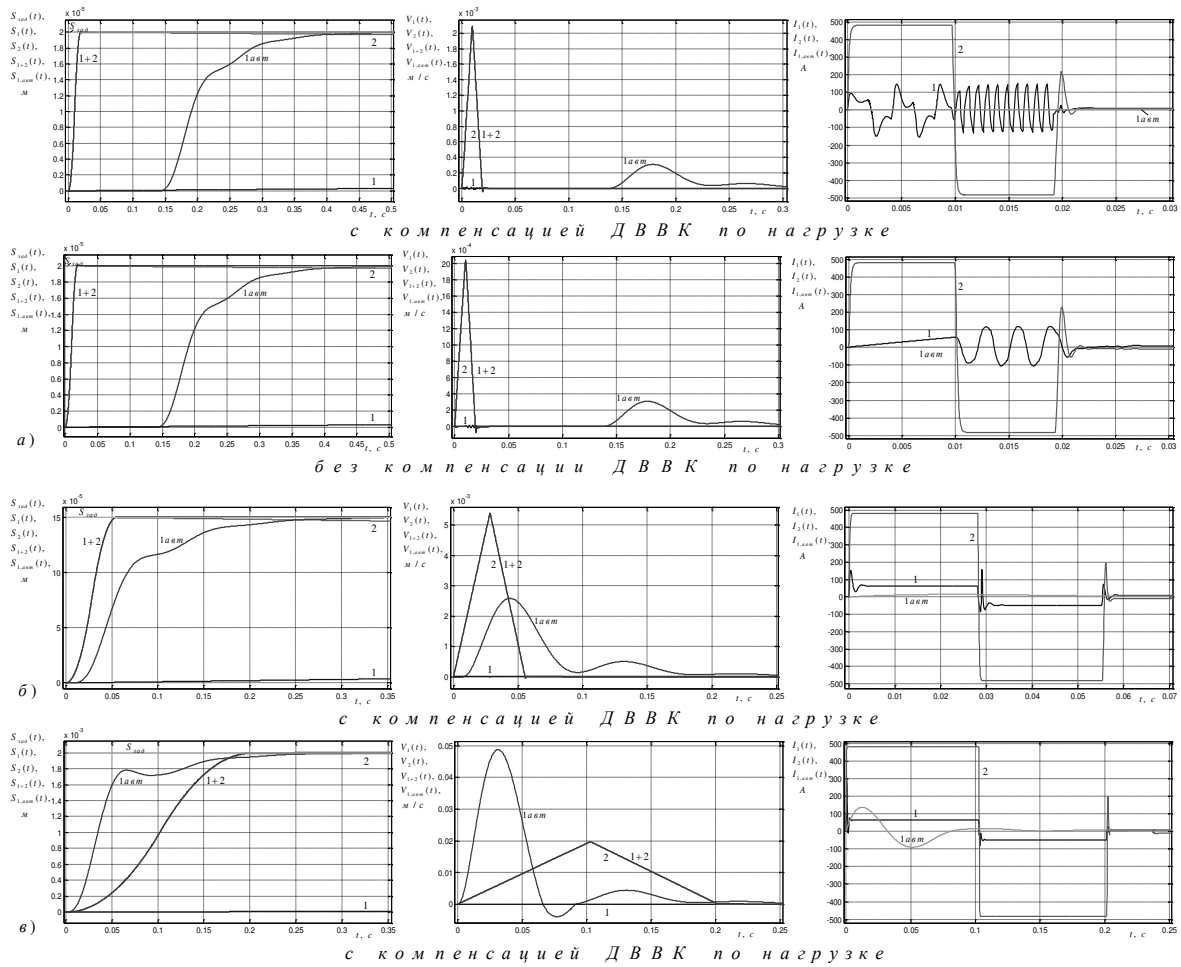


Рисунок 6 – Переходные процессы положения, линейной скорости и тока итерационного двухканального ЭП с силовой частью типа ШИП–ДПТ (с компенсацией и без компенсации ДВВК по нагрузке) и одноканального (автономного) тиристорного ЭП МП станка при отработке средних перемещений РО:

а) $S_C = 0,02$ мм; б) $S_C = 0,15$ мм; в) $S_C = 2$ мм

В табл. 1 и 2 для различных заданных перемещений РО приведены сравнительные значения показателей качества ПП соответственно по положению и току исследуемых приводов, причем для двухканального ЭП с различными типами силовой части уточняющего привода исследования проводились как с компенсацией, так и без компенсации ДВВК по нагрузке.

Из рис. 5, 6 и табл. 1 нетрудно видеть, что двухканальный ЭП позволяет без ухудшения качества ПП обеспечить значительное повышение быстродействия (уменьшение времени регулирования) при отработке небольших заданий по положению РО. Так, время регулирования по уровню $0,001U_{3П}$ компенсированного двухканального ЭП $t_{рег,1+2}$ в недостижимой для одноканального ЭП зоне особо малых перемещений (до $S_M^* = 0,05$ мкм) составляет не более чем $t_{рег,1+2} = 1,132 \cdot 10^{-3}$ с, а в зоне малых перемещений (до $S_M = 0,005$ мм) – не более чем $t_{рег,1+2} = 9,736 \cdot 10^{-3}$ с (рис. 5), что является показателем

высокого быстродействия для данного типа инерционных приводов. На нижней границе зоны средних перемещений ($S_C = 0,02$ мм) для компенсированного двухканального ЭП имеем: $t_{рег,1+2} = 1,88 \cdot 10^{-2}$ с, что более чем в 30 раз меньше времени регулирования аналогичного одноканального ЭП $t_{рег,авт} = 0,566$ с (рис. 6,а и табл. 1).

Вместе с тем уже на верхней границе зоны средних перемещений ($S_C = 2$ мм) двухканальный ЭП опережает соответствующий одноканальный ЭП только в 1,92 раза, а на нижней границе зоны больших перемещений ($S_B = 20$ мм) даже запаздывает по отношению к одноканальному приводу почти в два раза (рис. 6,в и табл. 1). Расчеты показали, что в двухканальном дифференциальном ЭП моменты инерции ПМ, приведенные к валам ИД основного К-1 и уточняющего К-2 приводов, увеличиваются более чем в 37 раз по сравнению с приведенным моментом инерции одноканального безредукторного ЭП (рис. 2, 3). В результате такое увеличение инерционности двухканального привода при значи-

Таблиця 1 – Показатели качества ПП по положению одноканального (автономного) тиристорного ЭП и предлагаемого итерационного двухканального дифференциального ЭП МП станка с различными типами силовой части уточняющего привода (с компенсацией и без компенсации ДВБК по нагрузке)

Вариант ЭП	Заданное перемещение РО	Время регулирования по уровню 0,1 % от $U_{3П}$: $t_{рег,авт}$ и $t_{рег,1+2}$, с	Уменьшение времени регулирования $t_{рег,1+2}$ в двухканальном ЭП, раз	Относительное увеличение длительности ПП $t_{рег,1+2}$ в некомпенсированном двухканальном ЭП, раз
Одноканальный ЭП	S_C (0,02 мм)	0,566	-	-
	S_C (0,15 мм)	0,427	-	-
	S_C (2 мм)	0,386	-	-
	S_B (20 мм)	0,430	-	-
Двухканальный ЭП (с силовыми частями приводов типа ШИП-ДПТ)	S_M^* (0,05 мкм)	$1,132 \cdot 10^{-3}$ (с комп.) $6,998 \cdot 10^{-3}$ (без комп.)	-	1 6,182
	S_M (0,005 мм)	$9,736 \cdot 10^{-3}$ (с комп.) $20 \cdot 10^{-3}$ (без комп.)	-	1 2,054
	S_C (0,02 мм)	$1,88 \cdot 10^{-2}$ (с комп.) $2,88 \cdot 10^{-2}$ (без комп.)	30,1 (с комп.) 19,7 (без комп.)	1 1,532
	S_C (0,15 мм)	$5,403 \cdot 10^{-2}$ (с комп.) $13,1 \cdot 10^{-2}$ (без комп.)	7,90 (с комп.) 3,26 (без комп.)	1 2,425
	S_C (2 мм)	0,2015 (с комп.) 0,2011 (без комп.)	1,92 (с комп.) 1,92 (без комп.)	1 0,998
	S_B (20 мм)	0,841 (с комп.) 0,841 (без комп.)	0,51 (с комп.) 0,51 (без комп.)	1 1
Двухканальный ЭП (с силовой частью типа ПЧТ-АД уточняющего привода)	S_M^* (0,05 мкм)	$1,823 \cdot 10^{-3}$ (с комп.) $4,991 \cdot 10^{-3}$ (без комп.)	-	1 2,738
	S_M (0,005 мм)	$1,91 \cdot 10^{-2}$ (с комп.) $4,94 \cdot 10^{-2}$ (без комп.)	-	1 2,586
	S_C (0,02 мм)	$3,82 \cdot 10^{-2}$ (с комп.) $7,27 \cdot 10^{-2}$ (без комп.)	14,8 (с комп.) 7,79 (без комп.)	1 1,903
	S_C (2 мм)	0,227 (с комп.) 0,227 (без комп.)	1,7 (с комп.) 1,7 (без комп.)	1 1
	S_B (20 мм)	2,91 (с комп.) 2,91 (без комп.)	0,148 (с комп.) 0,148 (без комп.)	1 1

тельных управляющих сигналах ($S_{зад} > 10$ мм) приводит к проигрышу в быстродействии по сравнению с одноканальным (автономным) ЭП.

Подключение или отсутствие КПС в системе управления двухканального привода в целом незначительно сказывается на характере и форме ПП в каналах управления с оптимальной подчиненной настройкой. Однако значения показателей качества ПП в некомпенсированном двухканальном ЭП существенно отличаются от их оптимальных значений в сторону ухудшения. Так, в двухканальном ЭП с силовой частью типа ШИП-ДПТ и без компенсации ДВБК по нагрузке в зоне особо малых и малых перемещений РО ($0 < S_{PO} \leq 0,005$ мм) время регулирования $t_{рег,1+2}$ возрастает в 2–6 раз по сравнению с аналогичным временем в компенсированном приводе (рис. 5,а и табл. 1). Кроме того, в некомпенсированном двухканальном ЭП появляются недопустимые для приводов подачи перерегулирования ПП по положению РО – в основном за счет изменения оптимальных настроек в уточняющем канале К-2 (рис. 5,б). В зоне средних перемещений РО

($0,02$ мм $\leq S_{PO} \leq 2$ мм) подключение блока компенсаторов $C_{12} - C_{21}$ уменьшает (по сравнению с его отсутствием) время регулирования ПП по положению в среднем на 50–150 % в зависимости от величины подачи РО (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что аналогичный характер влияния КПС на ПП по положению РО проявляется и в двухканальном приводе с силовой частью типа ПЧТ-АД уточняющего канала К-2. Однако результаты влияния компенсаторов ДВБК по нагрузке на показатели качества ПП по положению в таком приводе проявляются в меньшей степени из-за существенно больших ограничений по току в уточняющем канале с асинхронным приводом.

В указанном диапазоне перемещений РО ($0 < S_{PO} \leq 2$ мм) применение компенсаторов ДВБК по нагрузке заметно изменяет (по сравнению с их отсутствием) и характер ПП по току, особенно в менее широкополосном канале К-1 (табл. 2). Так, учет в системе компенсирующих связей КПС обеспечивает более эффективное перераспределение токов между каналами управления в сторону

Таблиця 2 – Показатели качества ПП по току в итерационном двухканальном дифференциальном ЭП МП станка с силовой частью типа ШИП-ДПТ (с компенсацией и без компенсации ДВВК по нагрузке)

Канал управления	Заданное перемещение РО	Абсолютная величина максимального перерегулирования ПП по току, А	Относительное изменение показателей максимального перерегулирования ПП по току в некомпенсированном двухканальном ЭП, раз (%)	
			величины	длительности
Основной (К-1)	S_M^* (0,05 мкм)	46,86 (с комп.) 33,26 (без комп.)	1 0,71 (-29 %)	
	S_M (0,005 мм)	148,0 (с комп.) 117,7 (без комп.)	1 0,795 (-20,5 %)	
	S_M (0,02 мм)	155,8 (с комп.) 120,5 (без комп.)	1 0,773 (-22,7 %)	
	S_M (0,15 мм)	153,1 (с комп.) 99,4 (без комп.)	1 0,649 (-35,1 %)	
	S_C (2 мм)	309,4 (с комп.) 249,0 (без комп.)	1 0,805 (-19,5 %)	
	S_B (20 мм)	477,3 (с комп.) 445,8 (без комп.)	1 0,934 (-6,6 %)	
Уточняющий (К-2)	S_M^* (0,05 мкм)	433,1 (с комп.) 433,9 (без комп.)	1 1,002 (+0,2 %)	
	S_M (0,005 мм)	482,4 (в теч. 0,00978 с) (с комп.) 482,4 (в теч. 0,0103 с) (без комп.)		1 1,053 (+5,3 %)
	S_C (0,02 мм)	482,4 (в теч. 0,0193 с) (с комп.) 482,4 (в теч. 0,0195 с) (без комп.)		1 1,01 (+1 %)
	S_C (0,15 мм)	482,4 (в теч. 0,0557 с) (с комп.) 482,4 (в теч. 0,0558 с) (без комп.)		1 1,002 (+0,2 %)
	S_C (2 мм)	482,4 (в теч. 0,2019 с) (с комп.) 482,4 (в теч. 0,2019 с) (без комп.)		1 1 (+0 %)

увеличения (до 35 %) доли основного канала К-1. При этом несколько разгружаются (до 5,3 %) ПП в контуре тока более широкополосного уточняющего канала К-2 (рис. 5,б; 6,а и табл. 2), что является положительным фактором подключения КПС. В диапазоне подачи РО: $20 \text{ мм} < S_{PO} \leq 1000 \text{ мм}$ введение КПС не является обязательно необходимым, т.к. практически не влияет на качество ПП в двухканальном дифференциальном ЭП с оптимизированной (стандартной) СПР-настройкой каналов.

В двухканальном дифференциальном ЭП подачи по сравнению с аналогичным одноканальным (автономным) ЭП типа ТПН-ДПТ может быть обеспечено более высокое качество воспроизведения синусоидальных управляющих воздействий $U_{3П}(t) = U_{3П, \max} \sin 2\pi ft$ с амплитудой до $S_{зад} = 20 \text{ мм}$ и соответствующей частотой синусоиды до $\hat{f} = 0,1 \text{ Гц}$. При уменьшении амплитуды $U_{3П, \max}$ частота, при которой обеспечивается повышенное качество воспроизведения синусоиды, может быть существенно повышена; например, при $S_{зад} = 0,15 \text{ мм}$ имеем: $\hat{f} \approx 4,5 \text{ Гц}$. При этом неискаженная и без значительного ослабления по амплитуде отработка синусоиды с помощью одноканального ЭП подачи становится возможной только при амплитудных значениях $U_{3П, \max}$, соответствующих величине подачи РО $S_{PO} \geq 0,5 \text{ мм}$, и для частот – до $f = 2 \text{ Гц}$.

На рис. 7 показаны характерные графики воспроизведения задающей синусоиды $U_{3П}(t)$ контурами положения и токов двухканального ЭП с силовой частью типа ШИП-ДПТ (с компенсацией и без компенсации ДВВК по нагрузке) и одноканального (автономного) ЭП МП станка в установившихся режимах работы. В табл. 3 приведены результаты сравнительной оценки соответствующих показателей качества отработки синусоидальных управляющих сигналов этими же приводами.

Из рис. 7 и табл. 3 несложно оценить высокие потенциальные возможности качественной отработки двухканальным дифференциальным ЭП подачи синусоидальных управляющих воздействий в зоне особо малых S_M^* (рис. 7,а,б) и малых S_M (рис. 7,в) перемещений РО. Видно, что полученное качество воспроизведения недостижимо для одноканальных тиристорных ЭП подачи. В зоне средних перемещений РО ($S_{PO} = 0,15 \text{ мм}$) при отработке двухканальным ЭП с силовой частью типа ШИП-ДПТ синусоиды частотой $f = 3,2 \text{ Гц}$ обеспечивается более чем 11-кратное уменьшение фазового сдвига управляющего сигнала по сравнению с одноканальным ЭП (рис. 7,г и табл. 3). Однако при воспроизведении в этой же зоне перемещений РО синусоиды частотой $f = 4,2 \text{ Гц}$ может быть обеспечено относительное уменьшение запаздывания по фазе уже только в 1,383 раза (рис. 7,д и табл. 3). Из табл. 3 также следует, что для двухканального

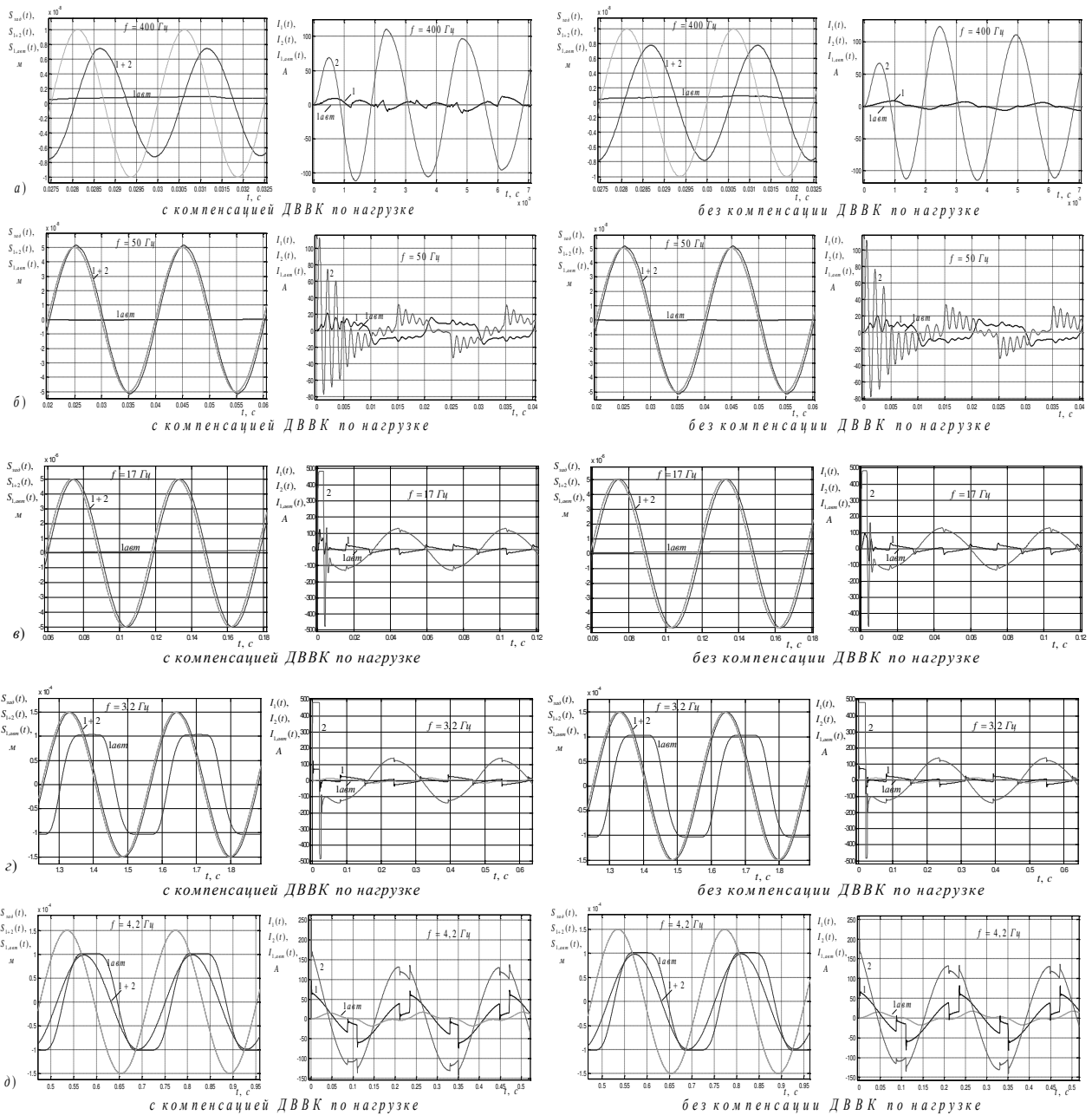


Рисунок 7 – Графики отработки синусоидального управляющего сигнала $U_{3П}(t) = U_{3П,\max} \sin 2\pi ft$

(в установившемся режиме) итерационным двухканальным ЭП с силовой частью типа ШИП–ДПТ (с компенсацией и без компенсации ДВБК по нагрузке) и одноканальным (автономным) ЭП МП станка в зоне особо малых (а, б), малых (в) и средних (г, д) перемещений РО: а) $S_M^* = 0,01$ мкм, $f = 400$ Гц; б) $S_M^* = 0,05$ мкм, $f = 50$ Гц; в) $S_M = 0,005$ мм, $f = 17$ Гц; г, д) $S_C = 0,15$ мм, $f = 3,2$ Гц, $4,2$ Гц

дифференциального ЭП с силовой частью типа ПЧТ–АД уточняющего привода аналогичные показатели сравнительного уменьшения запаздывания по фазе при $S_{PO} = 0,15$ мм значительно скромнее: соответственно в 1,35 и в 1,205 раза.

При отработке синусоидальных управляющих воздействий влияние ДВБК по нагрузке заметно проявляется на качестве работы двухканального ЭП только при амплитудах задающих синусоид в пределах до $S_{\text{зад}} \leq 0,02$ мм и для частот – до $f \approx 10\text{--}12$ Гц. В

диапазоне $0 < S_{\text{зад}} \leq 0,02$ мм подключение компенсирующих связей КПС в систему управления привода позволяет несколько уменьшить (до $-1,6\%$ по сравнению с отсутствием КПС) величину фазового сдвига управляющего синусоидального сигнала. Вместе с тем, амплитудное значение управляющей синусоиды при наличии или отсутствии КПС практически не изменяется. Более заметно отмеченное повышение качества управления проявляется в компенсированном двухканальном ЭП с силовой ча-

стью типа ШИП–ДПТ (табл. 3). Кроме того, в указанном диапазоне изменения амплитудных значений перемещений PO ($0 < S_{PO} \leq 0,02$ мм) применение компенсаторов ДВБК за счет обеспечения более эффективного перераспределения усилий между каналами управления двухканального ЭП несколько улучшает качество установившихся колебательных процессов в контуре тока уточняющего канала К-2

при обработке быстроизменяющихся задающих сигналов (процессы в контуре тока на рис. 7,а,б). В зоне средних и, частично, больших перемещений PO ($0,02$ мм $< S_{PO} \leq 20$ мм) введение компенсирующих связей КПС для гармонических режимов работы двухканального дифференциально-привода не дает заметного выигрыша в качестве.

Таблица 3 – Результаты сравнительной оценки показателей качества обработки синусоидальных управляющих сигналов $U_{ЭП}(t) = U_{ЭП,max} \sin 2\pi ft$ ($U_{ЭП,max} = \text{var}$; $f = \text{var}$) одноканальным (автономным) ЭП и итерационным двухканальным ЭП МП станка (с компенсацией и без компенсации ДВБК по нагрузке)

Вариант ЭП	Заданная амплитуда перемещения PO	Сравнительные показатели качества воспроизведения управляющего сигнала $U_{ЭП}(t) = U_{ЭП,max} \sin 2\pi ft$ ($f = \text{var}$)									
		Величина фазового сдвига управляющего сигнала, рад			Уменьшение запаздывания по фазе в двухканальном ЭП, раз			Ослабление амплитудного значения управляющего сигнала, %			
Одноканальный ЭП	S_M (0,15 мм)	1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц				1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	
		0,499	1,117	1,347				8,5	31,1	32,5	
	S_C (2 мм)	0,25 Гц	0,5 Гц	1 Гц				0,25 Гц	0,5 Гц	1 Гц	
		0,0418	0,0834	0,162				–	0,3	1,3	
Двухканальный ЭП (с силовой частью типа ШИП–ДПТ)	S_M^* (0,01 мкм)	100 Гц	200 Гц	400 Гц				100 Гц	200 Гц	400 Гц	
		0,2480 (с комп.)	0,5080 (с комп.)	1,3846 (с комп.)	-			–	7,97	22,8	
		0,2494 (без комп.)	0,5087 (без комп.)	1,3880 (без комп.)				–	8,24	22,3	
		50 Гц	100 Гц	180 Гц				50 Гц	100 Гц	180 Гц	
	S_M^* (0,05 мкм)	0,1197 (с комп.)	0,2482 (с комп.)	0,9709 (с комп.)	-			–	–	28,3	
		0,1216 (без комп.)	0,2477 (без комп.)	0,9733 (без комп.)				–	–	26,1	
	S_M (0,005 мм)	10 Гц	17 Гц	22 Гц				10 Гц	17 Гц	22 Гц	
		0,03439 (с комп.)	0,13875 (с комп.)	0,9107 (с комп.)	-			–	–	30,7	
	S_C (0,15 мм)	0,03437 (без комп.)	0,13886 (без комп.)	0,9107 (без комп.)				–	–	30,7	
		1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	
	Двухканальный ЭП (с силовой частью типа ПЧТ–АД уточняющего привода)	S_M^* (0,01 мкм)	0,004553 (с комп.)	0,10003 (с комп.)	0,9743 (с комп.)	110,1	11,17	1,383	–	–	34
			0,004553 (без комп.)	0,10003 (без комп.)	0,9743 (без комп.)	110,1	11,17	1,383	–	–	34
100 Гц			200 Гц	450 Гц	100 Гц	200 Гц	450 Гц	100 Гц	200 Гц	450 Гц	
0,179 (с комп.)			1,171 (с комп.)	1,696 (с комп.)	–	–	–	–	58	88,5	
S_M^* (0,05 мкм)		0,181 (без комп.)	1,171 (без комп.)	1,705 (без комп.)	–	–	–	–	58	88,6	
		50 Гц	100 Гц	180 Гц	50 Гц	100 Гц	180 Гц	50 Гц	100 Гц	180 Гц	
S_M (0,005 мм)		0,09503 (с комп.)	1,162 (с комп.)	1,618 (с комп.)	–	–	–	–	47	82	
		0,09503 (без комп.)	1,169 (без комп.)	1,638 (без комп.)	–	–	–	–	46	81	
S_M (0,005 мм)		10 Гц	17 Гц	22 Гц	10 Гц	17 Гц	22 Гц	10 Гц	17 Гц	22 Гц	
		0,6786 (с комп.)	0,9186 (с комп.)	1,0865 (с комп.)	–	–	–	–	33,4	50,9	
S_C (0,15 мм)		0,6786 (без комп.)	0,9186 (без комп.)	1,0865 (без комп.)	–	–	–	–	33,4	50,9	
		1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	1,5 Гц	3,2 Гц	4,2 Гц	
S_C (0,15 мм)	0,000026 (с комп.)	0,8272 (с комп.)	1,1182 (с комп.)	19192	1,35	1,205	–	29,4	54,7		
	0,000026 (без комп.)	0,8272 (без комп.)	1,1182 (без комп.)	19192	1,35	1,205	–	29,4	54,7		

Отметим, что подключение компенсаторов ДВБК по нагрузке отражается и на частотных характеристиках (ЧХ) двухканального дифференциального ЭП с оптимальной подчиненной настройкой каналов. Однако влияние компенсаторов ДВБК на ЧХ двухканальной системы можно считать существенным только для характеристик, соответствующих воспроизведению приводом задающих синусоид с относительно небольшой амплитудой – до $S_{зад} = 5$ мм. При этом наличие КПС в системе управления привода проявляется на ЧХ, в основном, только в области высоких частот, начиная со значений частот, приблизительно в 10–15 раз превышающих полосу пропускания двухканальной системы. Для компенсированного двухканального ЭП МП станка в указанном диапазоне частот наблюдается незначительное (до 10 %) относительное расширение АЧХ и ФЧХ системы.

Двухканальный ЭП подачи с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-регуляторов скорости каналов. Подчиненные двукратно интегрирующие контуры скорости с ПИ-регуляторами (ПИ-РС) представляют собой условно устойчивые контуры регулирования. Любые необоснованные отклонения настройки их регуляторов от типовой (соответствующей настройке на СО) изменяют оптимальные соотношения между коэффициентами усиления пропорциональной и интегральной составляющих ПИ-РС, что может привести к уменьшению запасов устойчивости двухканальной системы. Отклонения от стандартной настройки подчиненных контуров скорости могут быть вызваны также ошибочным завышением уровня срабатывания блоков ограничения управляющих напряжений, подаваемых на подчиненные контуры тока.

В двухканальном дифференциальном ЭП подачи с возможной неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-РС обеспечение требуемого (без перерегулирования) характера ПП по положению РО становится возможным только при существенном изменении оптимальных типовых настроек коэффициентов усиления П-РП каналов управления (как правило, в сторону их ослабления). Осуществление такой перенастройки П-РП приближает каждый (или один) из каналов и, следовательно, двухканальную систему в целом к верхней или нижней границе устойчивости. При этом значительно повышается параметрическая чувствительность привода, в первую очередь, по параметрам более широкополосного уточняющего канала К-2, который, как правило, определяет динамику двухканального ЭП в целом. В результате, естественное влияние ДВБК по нагрузке может кардинально отражаться на его работе, вплоть до потери приводом устойчивости. В этом случае роль компенсирующих связей КПС значительно возрастает, т.к. их подключение в контур управления привода позволяет скорректировать настройку подчиненных контуров управления и сделать возможную неустойчивую работу системы устойчивой. Соответ-

ствующее положительное влияние компенсаторов ДВБК по нагрузке наглядно подтверждается сравнительными графиками временных характеристик двухканального привода МП станка, приведенными на рис. 8–10.

Результаты компьютерных исследований показали, что для рассматриваемого итерационного двухканального дифференциального ЭП подачи станка влияние указанной особенности возможной неоптимальной настройки ПИ-РС каналов наиболее заметно проявляется на качестве работы привода только при значительных уровнях управляющего сигнала по положению (при $S_{РО} > 0,3-0,4$ мкм).

На рис. 8 и 9 приведены графики, показывающие кардинальное влияние компенсаторов ДВБК по нагрузке на качество ПП двухканального дифференциального ЭП подачи с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-РС каналов при обработке скачкообразных задающих воздействий соответственно в зоне малых ($S_M = 0,005$ мм) и средних ($S_C = 0,15$ мм) перемещений РО. На рис. 10 показаны аналогичные сравнительные графики обработки задающей синусоиды контурами положения, скорости и тока двухканального привода подачи при пуске и в установившемся режиме работы ЭП в зоне малых синусоидальных подач РО.

Приведенные графики подтверждают положительное влияние КПС на качество работы двухканального дифференциального ЭП подачи с неоптимизированной (нестандартной) СПР-настройкой подчиненных контуров каналов.

Вместе с тем из сравнения соответствующих графиков временных характеристик, приведенных, например, на рис. 8 и 5,б, рис. 9 и 6,б и рис. 10 и 7,в, нетрудно видеть, что хотя в компенсированном двухканальном ЭП с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-РС и обеспечивается требуемый характер переходных и колебательных процессов по положению РО, однако качество обработки соответствующих задающих воздействий в нем существенно хуже, чем в аналогичном двухканальном ЭП с оптимальной (стандартной) подчиненной настройкой каналов. Так, например, в сравниваемом компенсированном двухканальном приводе с неоптимальной СПР-настройкой время регулирования ПП по положению $t_{рег,1+2}$ значительно увеличивается: при обработке малых перемещений РО ($S_{РО} = 0,005$ мм) – более чем в 14 раз (рис. 8 и 5,б), а при обработке средних перемещений РО ($S_{РО} = 0,15$ мм) – более чем в 60 раз (рис. 9 и 6,б).

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ. 1. Построены и рассчитаны перекрестные связи КПС, компенсирующие динамическое взаимовлияние между каналами по нагрузке (компенсаторы ДВБК по нагрузке) в итерационном

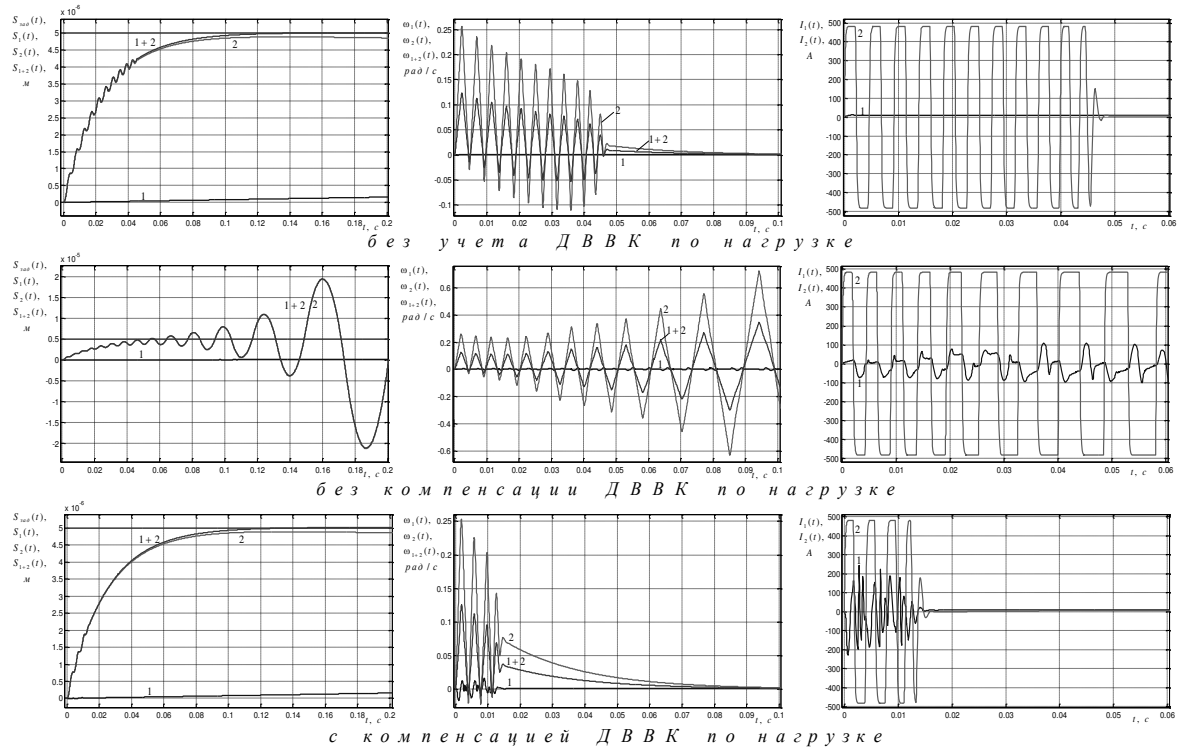


Рисунок 8 – Влияние компенсаторов ДВВК по нагрузке на качество ПП двухканального дифференциального ЭП подачи с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-регуляторов скорости каналов при отработке малых перемещений РО ($S_M = 0,005$ мм)

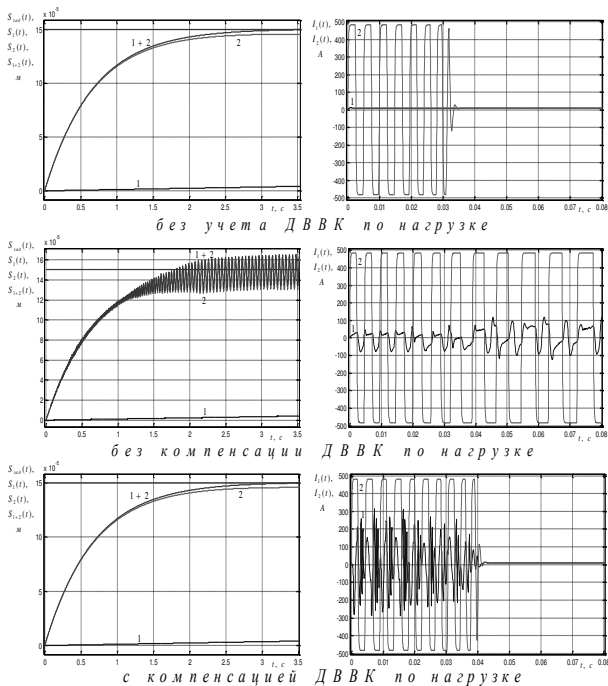


Рисунок 9 – Влияние компенсаторов ДВВК по нагрузке на качество ПП двухканального дифференциального ЭП подачи с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-РС каналов при отработке средних перемещений РО ($S_C = 0,15$ мм)

двухканальном дифференциальном ЭП МП станка. Получена соответствующая структурно-алгоритми-

ческая схема двухканального ЭП подачи, учитывающая подключение КПС.

2. Показана не только принципиальная необходимость, но и потенциальная эффективность применения компенсаторов ДВВК по нагрузке для повышения качества динамических и точностных характеристик итерационных двухканальных дифференциальных ЭП подачи с различными типами силовой части уточняющего привода и СПР-настройкой каналов управления.

Подключение компенсаторов ДВВК по нагрузке восстанавливает естественное свойство итерационных многоканальных систем автоматически распределять мощность между каналами управления для обеспечения более эффективного (качественного) управления по внешней (выходной) координате системы.

3. Показаны значительные потенциальные преимущества в быстродействии и точности управления предлагаемого двухканального дифференциального ЭП подачи с различными типами силовой части уточняющего привода и оптимальной подчиненной настройкой каналов по сравнению с аналогичным одноканальным безредукторным ЭП подачи типа ТПН–ДПТ, традиционно применяемым на станках рассматриваемого типа. Указанные преимущества проявляются в зоне малых и средних подач станка, где и требуется обеспечение повышенной точности управления и позиционирования РО.

4. Особенно заметно преимущества в быстродействии проявляются в компенсированном (с уче-

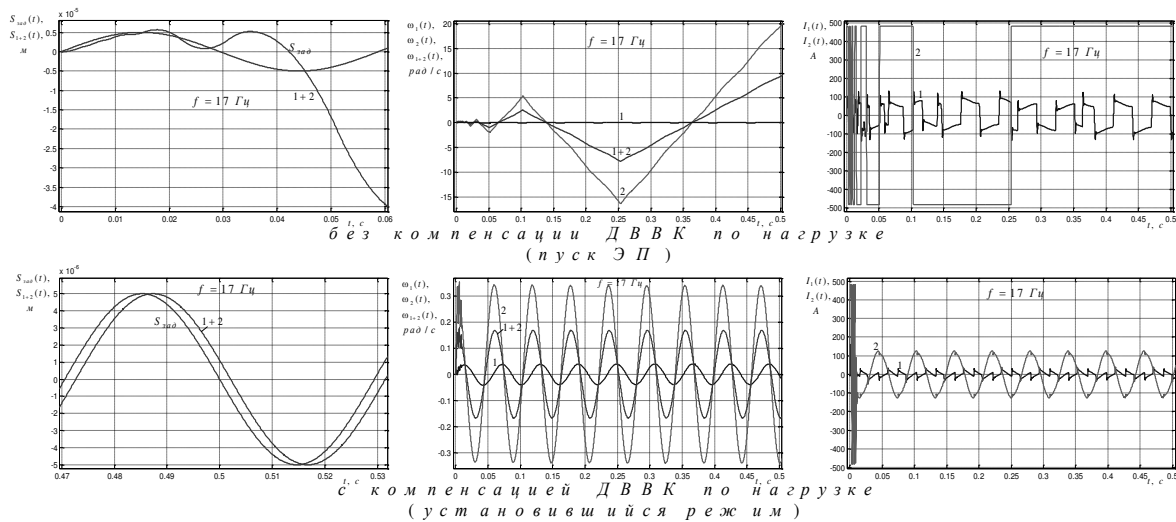


Рисунок 10 – Влияние компенсаторов ДВВК по нагрузке на качество отработки синусоидального управляющего сигнала $U_{3П}(t) = U_{3П,max} \sin 2\pi ft$ двухканальным дифференциальным ЭП подачи с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ-РС каналов при отработке малых перемещений РО: $S_M = 0,005$ мм, $f = 17$ Гц

том КПС) двухканальном ЭП подачи с силовой частью типа ШИП–ДПТ при отработке ступенчатых управляющих сигналов в зоне малых и средних перемещений РО: до $S_{PO} = 2$ мм. Подключение блока компенсаторов $C_{12} - C_{21}$ уменьшает (по сравнению с его отсутствием) время регулирования ПП двухканального привода подачи: в зоне особо малых и малых перемещений РО ($0 < S_{PO} \leq 0,005$ мм) в 2–6 раз; в зоне средних перемещений привода ($0,02 \text{ мм} \leq S_{PO} \leq 2 \text{ мм}$) – на 50–150 % в зависимости от величины подачи РО. В диапазоне ступенчатых подач РО: $20 \text{ мм} < S_{PO} \leq 1000 \text{ мм}$ введение КПС не является необходимым.

5. При отработке синусоидальных управляющих воздействий подключение КПС заметно проявляется на качестве работы двухканального ЭП подачи при воспроизведении синусоид с амплитудой в пределах до $S_{зад} \leq 0,02$ мм и соответствующей предельной частотой $f \approx 10 - 12$ Гц. Подключение КПС позволяет несколько уменьшить (до 1,6 % по сравнению с отсутствием КПС) величину фазового сдвига управляющего синусоидального сигнала в компенсированном приводе. В диапазоне изменения амплитуд синусоид ($0,02 \text{ мм} < S_{зад} \leq 20 \text{ мм}$) введение КПС для гармонических режимов работы двухканального привода не является необходимым.

6. Влияние компенсаторов ДВВК на частотные характеристики двухканального ЭП подачи можно считать существенным только для ЧХ, соответствующих воспроизведению приводом синусоид с амплитудой до $S_{зад} = 5$ мм. При этом для компенсированного двухканального ЭП МП станка наблюдается незначительное (до 10 %) относительное расширение АЧХ и ФЧХ системы в области высоких

частот (приблизительно на порядок превышающих полосу пропускания системы).

7. В двухканальных ЭП подачи с возможной неоптимизированной (нестандартной) СПР-настройкой подчиненных контуров каналов обеспечение требуемого (без перерегулирования) характера ПП по положению РО становится возможным только при существенном изменении оптимальных типовых настроек П–РП каналов управления.

Показано, что в двухканальном дифференциальном ЭП подачи станка с неоптимальной (нестандартной) настройкой ПИ–РС каналов запасы устойчивости значительно снижаются, а параметрическая чувствительность резко возрастает. При этом влияние ДВВК по нагрузке может кардинально отражаться на работе двухканального привода, вплоть до потери им устойчивости. Подключение компенсирующих связей КПС в контур управления привода позволяет скорректировать настройку подчиненных контуров управления и сделать неустойчивую работу системы устойчивой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Следящие приводы. В 2-х кн. / Под ред. Б.К. Чеданова. – М.: Энергия, 1976. – Кн. 1. – 480 с.
2. Кузнецов Б.И., Худяев А.А., Некрасов И.М., Русаев В.И. Двухъякорный линейный синхронный привод обрабатывающего центра // Электротехника (РФ). – 1993. – Вып. 4. – С. 11–18.
3. Кузнецов Б.И., Худяев А.А., Богаенко И.Н. и др. Многоканальные итерационные системы управления. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 с.
4. Худяев А.А. Механика и электродинамика комбинированного трехканального следящего электропривода подачи для тяжелого станка особо высокой точности // Электромеханические и энергосберегающие системы. Тематический выпуск. – 2012. – Вып. 3/2012 (19). – С. 386–392.

5. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

6. Худяев А.А., Литвиненко Д.Г. Итерационное подчиненное управление следящими электроприводами // Сб. научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск. – 2011. – Вып. 4. – С. 141–171.

7. Александров Е.Е., Костенко Ю.Т., Кузнецов Б.И. Оптимизация многоканальных систем управления. – Харьков: Основа, 1996. – 288 с.

8. Худяев А.А., Кунченко Т.Ю. Высокоточная квазиитерационная двухканальная электромеханическая система с механическим дифференциалом // Техническая электродинамика. – 2015. – Вып. 1. – С. 21–28.

9. Марголин Ш.М. Дифференциальный электропривод. – М.: Энергия, 1975. – 168 с.

10. Худяев А.А., Пшеничников Д.А., Поленок В.В. Высокоточный трехканальный дифференциальный электропривод с подчиненным регулированием для механизма подачи обрабатываемого центра // Сб. научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – Вып. 36 (1009). – С. 202–206.

COMPENSATION OF THE DYNAMIC INTERCONNECTION BETWEEN CHANNELS IN ITERATIVE TWO-CHANNEL DIFFERENTIAL ELECTRIC DRIVE OF MACHINE-TOOL FEED

A. Khudiyev, L. Akimov, V. Polenok

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

ul. Frunze, 21, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: vitaliy_polenok@inbox.ru

Construction of the high quality iterative multichannel servodrives needs to provide autonomy of control channels adjustment and operation. For realization of control channels autonomy conditions for the machine tools feed multichannel differential electric drives may be used compensating cross connections between channels. The kinematical diagram and mathematical model of movement for two-channel differential feeding electric drive, constructed by iterative principle are considered. Cross connections, compensating dynamic interconnection between channels by load (compensators of channels dynamic interconnection) in such two-channel electric drive with slave adjustment of channels are built and calculated. The block diagram of two-channel control system of drive including connection of channels dynamic interconnection compensators applying to electric drive of machine-tool feed model IP800ПМФ4 is obtained. The quality indexes comparative analysis results of dynamic and accuracy characteristics of proposed two-channel drive and similar one-channel feeding drive applied on the machine-tools such type are given. The estimation of compensating cross connections between channels applying effectiveness by computer simulation method is realized. A principle need as well as a potential effectiveness of applying of the channels dynamic interconnection compensators by load for improving of two-channel differential feeding electric drive operation quality with both optimized (standard) and a non-optimized (non-standard) slave adjustment of channels are shown.

Key words: two-channel differential electric drive, compensating cross connections, accuracy of control, dynamic and accuracy characteristics.

REFERENCES

1. Chemodanov, B.K. (1976), *Sledyashchie privody* [Servodrives], Energiya, Moscow. (in Russian)

2. Kuznetsov, B.I., Khudiyev, A.A., Nekrasov, I.M. and Rusayev, V.I. (1993), “Two-armature linear synchronous drive of machine tool centre”, *Elektrotehnika*, no. 4, pp. 11–18. (in Russian)

3. Kuznetsov, B.I., Khudiyev, A.A., Bogaenko I.N. and others (1998), *Mnogokanalnye iteratsionnye sistemy upravleniya* [Multichannel iterative control systems], NPK “KIA”, Kyiv, Ukraine. (in Russian)

4. Khudiyev, A.A. (2012), “Mechanics and electro-dynamics of the combined three-channel servodrive of feed for especially high precision heavy machine tool”, *Elektromekhanicheskiye i energosberegayushchiye sistemy. Tematicheskiy vypusk*, Vol. 3, no. 19, pp. 386–392. (in Russian)

5. Slezhanovskiy, O.V., Datskovskiy, L.Kh., Kuznetsov, I.S. and others (1983), *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov peremennogo toka s ventilnymi preobrazovatelayami* [Slave control systems of alternating current electric drives with valve converters], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)

6. Khudiyev, A.A. and Litvinenko, D.G. (2011), “Iterative slave control of servodrives”, *Sb. Nauchnykh Trudov “Vestnik NTU “KhPI”, Tematicheskii vypusk*, no. 4, pp. 141–171. (in Russian)

7. Aleksandrov, E.E., Kostenko, Yu.T. and Kuznetsov, B.I. (1996), *Optimizatsiya mnogokanalnykh sistem upravleniya* [Optimization of multichannel control systems], Osнова, Kharkiv. (in Russian)

8. Khudiyev, A.A. and Kunchenko, T.Yu. (2015), “High-precision kvazyiterative two-channel electromechanical system with mechanical differential”, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, no. 1, pp. 21–28. (in Russian)

9. Margolin, Sh.M. (1975), *Differentsialnyy elektroprivod* [Differential electric drive], Energiya, Moscow. (in Russian)

10. Khudiyev, A.A., Pshenichnikov, D.A. and Polenok, V.V. (2013), “High-precision three-channel differential electric drive with the slave control for feeding mechanism of machine tool centre”, *Sb. Nauchnykh Trudov “Vestnik NTU “KhPI”. Tematicheskiy vypusk*, no. 36, pp. 202–206. (in Russian)

Стаття надійшла 17.03.2015.