

## ВЫСОКОТОЧНЫЙ ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПОДЧИНЕННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛЯ МЕХАНИЗМА ПОДАЧИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Требования к точности и быстродействию следящих систем автоматического управления (САУ), как известно, противоречивы. Вместе с тем, повышение статической и, особенно, динамической точности следящих электроприводов (ЭП) механизмов подачи (МП) станков с ЧПУ при заданных пространственных перемещениях инерционных рабочих органов (РО) с требуемой скоростью является одной из актуальных задач, стоящих перед проектировщиками современных программно-управляемых ЭП МП металлообрабатывающих станков [1]. Возможные пути ее решения заключаются в разработке более сложных структур высокоточных систем управления и соответствующих этим структурам конструкций исполнительных устройств (ИУ) следящих приводов, позволяющих одновременно повысить как быстродействие, так и качество управления РО.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.** Для достижения желаемых динамических характеристик управления при сохранении требуемых силовых воздействий на объект от типового одноканального ЭП подачи РО тяжелого металлообрабатывающего станка часто требуются чрезмерно большие коэффициенты усиления и практически нереализуемые полосы воспроизводимых частот. Эффективным структурным способом повышения точности и быстродействия одноканальных инерционных ЭП МП может служить практическая реализация в приводе итерационного [2] или близких к итерационному принципов функционального взаимодействия нескольких автономных каналов управления, одновременно (или последовательно) уточняющих заданный закон движения общего РО. В таких ЭП подачи при условии компенсации негативного динамического взаимовлияния каналов (ДВВК) по нагрузке может быть использована широко применяемая типовая настройка каналов управления по принципу СПР [3]. Именно практическая реализация итерационного принципа при построении следящих и стабилизирующих САУ в других областях техники привела к появлению так называемых итерационных многоканальных ЭП повышенной точности различного назначения [4].

Сегодня для итерационных двух- и трехканальных ЭП МП полностью не исследована эффективность возможных вариантов соответствующих структурных схем системы управления, не разработаны с учетом ДВВК математические и компьютерные модели для их анализа и выработки практических рекомендаций. Как следствие, не выполнены исследования динамических и точностных характеристик многоканальных ЭП подачи с учетом соответствующих кинематических схем многодвигательных ИУ, реализующих итерационные алгоритмы взаимодействия каналов управления. В частности, отсутствует сравнительный анализ эффективности двух- и трехканальных следящих ЭП МП с суммирующими дифференциальными редукторами в механической передаче, а также с безредукторными МП типа «винт-гайка» с двумя степенями свободы.

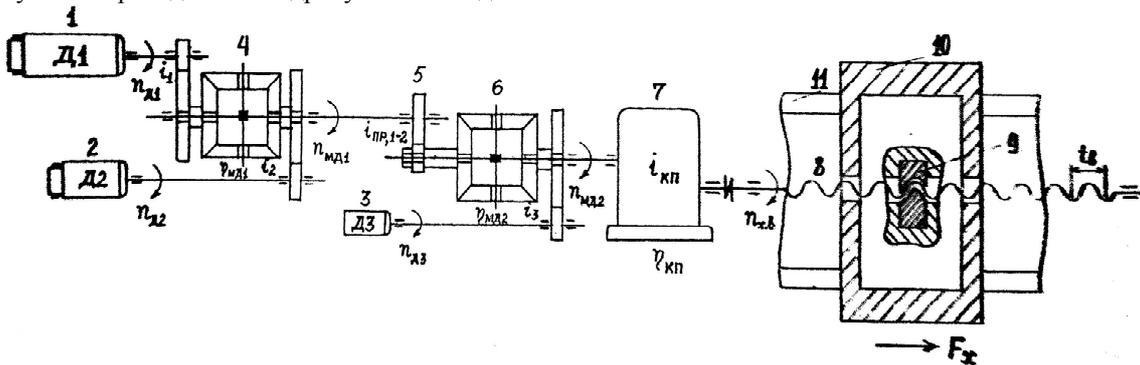
Целью работы является построение математической модели механической части и оценка потенциальной эффективности (с точки зрения повышения быстродействия и точности управления) энергосберегающего итерационного трехканального ЭП МП с типовой настройкой каналов и двумя механическими дифференциалами МД1 и МД2 в ИУ подачи РО для тяжелого многоцелевого станка с ЧПУ типа «горизонтальный обрабатывающий центр ИР1600МФ4» (масса свыше 88 т).

**МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Предлагаемый итерационный трехканальный следящий ЭП подачи включает первый (основной) К-1, второй (компенсирующий) К-2 и третий (точный) К-3 каналы управления по углу с соответствующими подчиненными контурами скорости, настроенными на симметричный оптимум. Такой трехканальный ЭП из-за наличия в нем ДВВК, обусловленного общими элементами в механической части, может быть отнесен к классу квазиитерационных многоканальных систем, поскольку основные свойства собственно итерационных систем управления [2] для него выполняются лишь частично.

Электроприводы основного К-1 и компенсирующего К-2 каналов могут быть построены на базе типовых ЭП подачи постоянного тока с силовыми частями соответственно типа ТПН-ДПТ и ШИП-ДПТ. Для этого могут быть использованы современные модификации широко известных комплектных ЭП «КЕМРОН» (или «ФАНУК») [1] и «ЭШИМ1». В качестве ИД Д1 основного и Д2 компенсирующего ЭП МП станка предлагается использовать высокомоментные ДПТ с постоянными магнитами типов ПБВ 160М ( $P_{ном,1} = 4 \text{ кВт}$ ) и ПБВ 112Л ( $P_{ном,2} = 1,1 \text{ кВт}$ ) соответственно. В третьем, точном канале К-3 предлагается применить типовой ЭП подачи постоянного тока небольшой мощности с системой управления типа ШИП-ДПТ. Например, современный комплектный ЭП постоянного тока «Модуль регулирования MR1» на базе высокомоментного маломощного ИД Д3 типа ДК1-5,2-100-АТ ( $P_{ном,3} = 0,55 \text{ кВт}$ ).

Поскольку номинальная мощность типового одноканального ЭП подачи фирмы «Геттис» (США), установленного на действующих обрабатывающих центрах данного типа, равна  $P_{ном,тип} = 6,8 \text{ кВт}$ , а суммарная мощность приводов трех каналов рассматриваемого ЭП составляет  $P_{\Sigma} = 5,65 \text{ кВт}$ , то предлагаемый итерационный трехканальный ЭП МП для обрабатывающего центра ИР1600МФ4 можно считать энергосберегающим.

Вариант кинематической схемы трехдвигательного дифференциального МП горизонтального обрабатывающего центра ИР1600МФ приведен на рис. 1. Принцип действия МП нетрудно уяснить из рассмотрения рисунка с учетом приведенных подрисуночных подписей.



1, 2, 3 – исполнительные двигатели (ИД) ЭП соответственно основного (базового) К-1, компенсирующего К-2 и точного К-3 каналов управления; 4 и 6 – симметричные конические механические дифференциалы МД1 и МД2; 5 – повышающий редуктор (ПР), соединяющий дифференциалы МД1 и МД2; 7 – коробка передач (КП) между дифференциалом МД2 и ходовым винтом; 8 – ходовой винт с шагом винта  $t_6$ ; 9 – ходовая гайка; 10 – рабочий орган станка (рабочая стойка с «магазином» инструментов и шпиндельной бабкой); 11 – направляющие скольжения салазок рабочей стойки

Рисунок 1 – Кинематическая схема трехдвигательного дифференциального механизма подачи горизонтального обрабатывающего центра ИР1600МФ

На рис. 2 приведена схема распределения моментов и усилий в установившемся рабочем режиме движения механизма подачи станка модели ИР1600МФ4, соответствующая варианту конструкции МП, представленному на рис. 1.

Математическая модель движения механической части итерационного трехканального дифференциального ЭП подачи, полученная на основании рис. 2 при  $i_1=3,239$ ,  $i_2=3,184$ ,  $i_3=3,072$  и  $i_{кп,1-2} = 0,5$ , имеет вид:

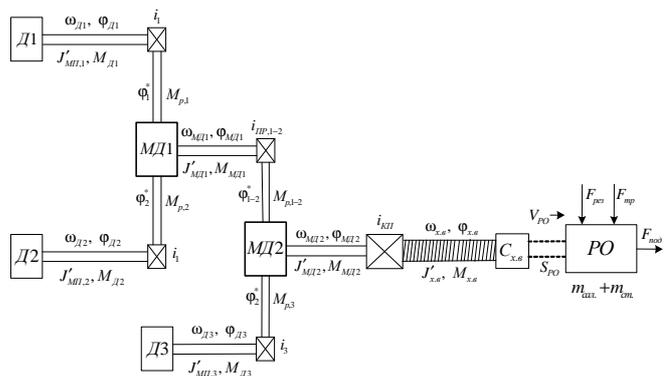


Рисунок 2 – Схема распределения моментов и усилий в установившемся рабочем режиме движения МП обрабатывающего центра ИР1600МФ4

$$\begin{cases} M_{Д1}(t) - J_{\Sigma,1} p^2 \varphi_{Д1}(t) \mp J_{МД1-МД2} p^2 \varphi_{Д2}(t) \mp \frac{J_{МД2,1-3}}{\eta_{МД} \eta_{ц.р}} p^2 \varphi_{Д3}(t) - M'_{c,1} = 0; \\ M_{Д2}(t) - J_{\Sigma,2} p^2 \varphi_{Д2}(t) - J_{МД1-МД2} p^2 \varphi_{Д1}(t) \mp \frac{J_{МД2,2-3}}{\eta_{МД} \eta_{ц.р}} p^2 \varphi_{Д3}(t) - M'_{c,2} = 0; \\ M_{Д3}(t) - J_{\Sigma,3} p^2 \varphi_{Д3}(t) - J_{МД2,1-3} p^2 \varphi_{Д1}(t) \mp J_{МД2,2-3} p^2 \varphi_{Д2}(t) - M'_{c,3} = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{PO} = S_3 = C_{x.6} \varphi_{x.6} = C_{x.6} \frac{\varphi_{МД2}}{i_{кп}} = \frac{t_6}{2\pi i_{кп}} \varphi_{МД2}; \quad (2)$$

$$\varphi_{МД2} = \frac{\varphi_{1-2}^* \pm \varphi_3^*}{i_{МД2}} = \frac{\varphi_{МД1}}{i_{ПР,1-2} i_{МД2}} \pm \frac{\varphi_{Д3}}{i_3 i_{МД2}} = \frac{\varphi_{МД1}}{2 \cdot 0,5} \pm \frac{\varphi_{Д3}}{2 i_3}; \quad \varphi_{МД1} = \frac{\varphi_1^* \pm \varphi_2^*}{i_{МД1}} = \frac{\varphi_{Д1}}{i_1 i_{МД1}} \pm \frac{\varphi_{Д2}}{i_2 i_{МД1}} = \frac{\varphi_{Д1}}{2 i_1} \pm \frac{\varphi_{Д2}}{2 i_2}, \quad (3)$$

где

$$J_{\Sigma,1} = J'_{МП,1} + \frac{J'_{МД1} \eta_{МД} \eta_{ц.р} + J'_{МД2}}{4 i_1^2 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2};$$

$$J_{\Sigma,2}^* = \begin{cases} J'_{МП,2} + \frac{J'_{МД1} \eta_{МД} \eta_{ц.р} + J'_{МД2}}{4i_2^2 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2} & \text{– при согласном вращении Д1 и Д2;} \\ J'_{МП,2} - \frac{J'_{МД1} \eta_{МД} \eta_{ц.р} + J'_{МД2}}{4i_2^2 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2} & \text{– при встречном вращении Д1 и Д2;} \end{cases}$$

$$J_{\Sigma,3}^* = \begin{cases} J'_{МП,3} + \frac{J'_{МД2}}{4i_3^2 \eta_{МД} \eta_{ц.р}} & \text{– при согласном вращении МД1 и Д3;} \\ J'_{МП,3} - \frac{J'_{МД2}}{4i_3^2 \eta_{МД} \eta_{ц.р}} & \text{– при встречном вращении МД1 и Д3;} \end{cases}$$

$$J_{МД1-МД2} = \frac{J'_{МД1} \eta_{МД} \eta_{ц.р} + J'_{МД2}}{4i_1 i_2^2 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2}; \quad J_{МД2,1-3} = \frac{J'_{МД2}}{4i_1 i_3 \eta_{МД} \eta_{ц.р}}; \quad J_{МД2,2-3} = \frac{J'_{МД2}}{4i_2 i_3 \eta_{МД} \eta_{ц.р}}; \quad (2)$$

$$M'_{c,1} = \frac{M'_c}{2i_1 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2}; \quad M'_{c,2} = \frac{M'_c}{2i_2 \eta_{МД}^2 \eta_{ц.р}^2}; \quad M'_{c,3} = \frac{M'_c}{2i_3 \eta_{МД} \eta_{ц.р}}; \quad (3)$$

$J'_{МД1}$  и  $J'_{МД2}$  – моменты инерции МП, приведенные к выходным валам соответственно дифференциалов МД1 и МД2,  $J'_{МД1} \approx 42,764 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $J'_{МД2} \approx 31,661 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $M'_c$  – приведенный статический момент сопротивления на выходном валу МД2,  $M'_c \approx 288,96 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования по времени  $t$ .

На рис. 3 приведена структурно-алгоритмическая схема итерационного трехканального дифференциального ЭП подачи с СПР-настройкой и учетом ДВВК. Схема представлена с использованием введенных выше и общепринятых обозначений.

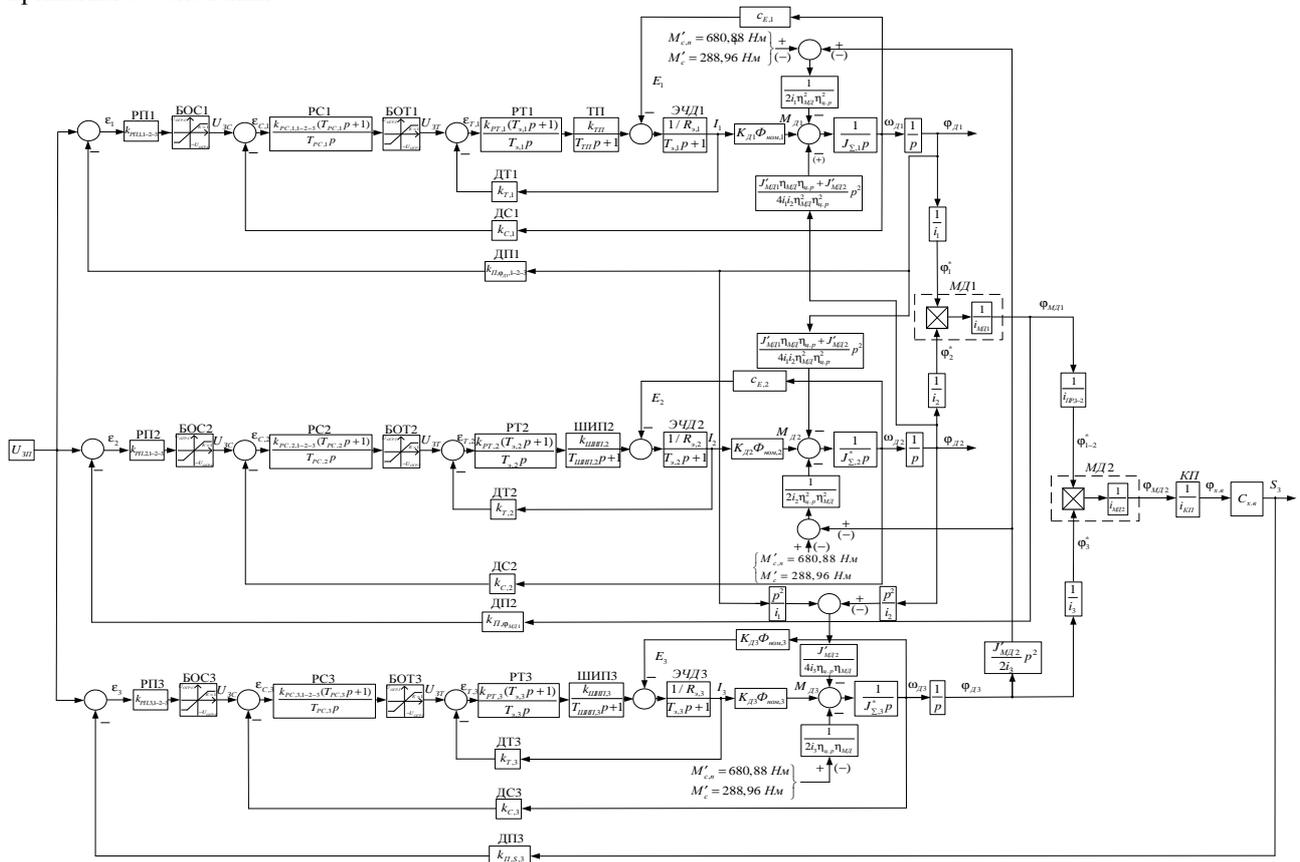


Рисунок 3 – Структурно-алгоритмическая схема итерационного трехканального дифференциального следящего ЭП МП с подчиненным регулированием для обрабатывающего центра ИР1600МФ4

На рис. 4-7 цифрами обозначены: «1», «2», «3», «1-2\*», «1-2-3» и «1авт» – графики временных и частотных характеристик приводов соответственно первого (основного) К-1, второго (компенсирующего) К-2, третьего (точного) К-3 каналов управления (работающих в итерационном режиме), итерационного двухканального дифференциального ЭП (работающего в составе трехканального ЭП), итерационного трехканального дифференциального ЭП и типового одноканального ЭП МП в рабочих режимах максимальной нагрузки станка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Теоретические и компьютерные исследования показали значительные преимущества в быстродействии и точности управления РО предлагаемого энергосберегающего трехканального дифференциального ЭП МП по сравнению не только с типовым одноканальным тиристорным ЭП подачи,

установленным на действующих обрабатывающих центрах модели ИР1600МФ4, но также по сравнению с синтезированным аналогичным двухканальным дифференциальным ЭП подачи в составе трехканального ЭП МП. Однако, указанные преимущества энергосберегающего трехканального ЭП наиболее полно могут быть реализованы только в зоне малых и, частично, средних перемещений РО (до  $S_C = 3$  мм).

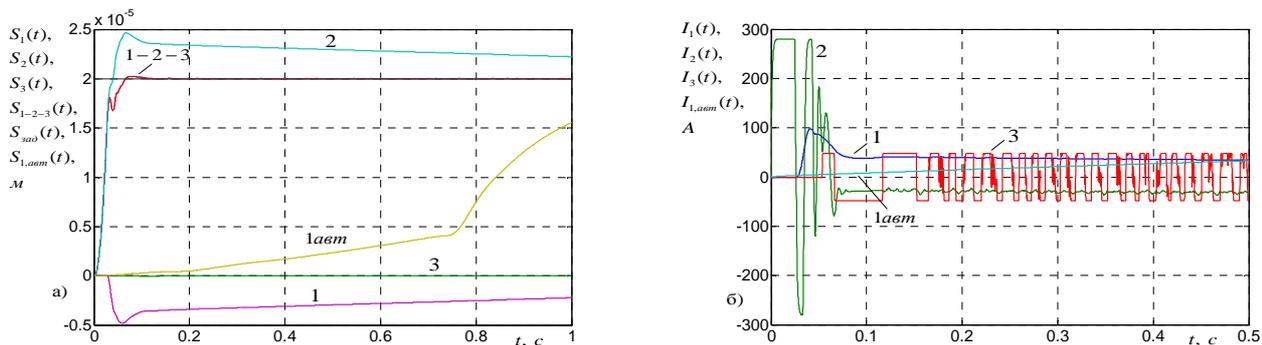


Рисунок 4 – Переходные процессы трехканального ЭП (без компенсации ДВБК) и одноканального (автономного) ЭП ( $k_{пр,авт} = 500$ ) при отработке средних перемещений ( $S_C = 20$  мкм): а – положения; б – тока

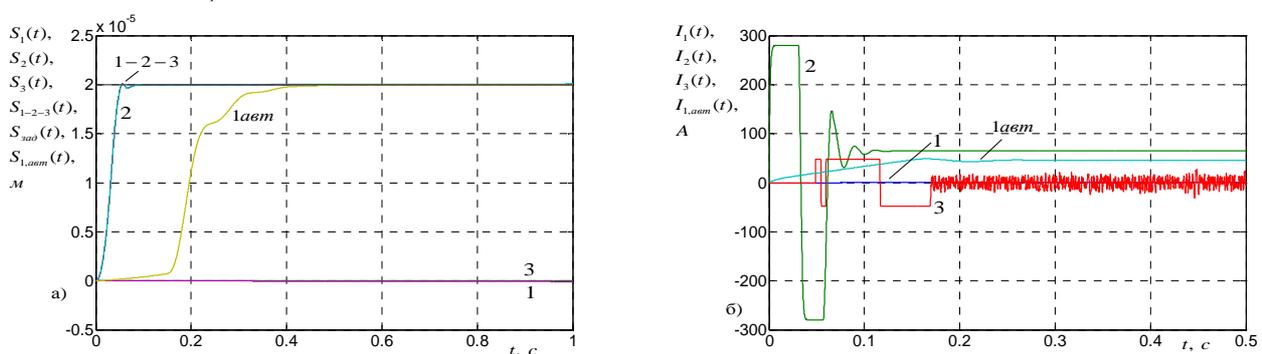


Рисунок 5 – Переходные процессы трехканального ЭП (с компенсацией ДВБК) и одноканального (автономного) ЭП ( $k_{пр,авт} = 2000$ ) при отработке средних перемещений ( $S_C = 20$  мкм): а – положения; б – тока

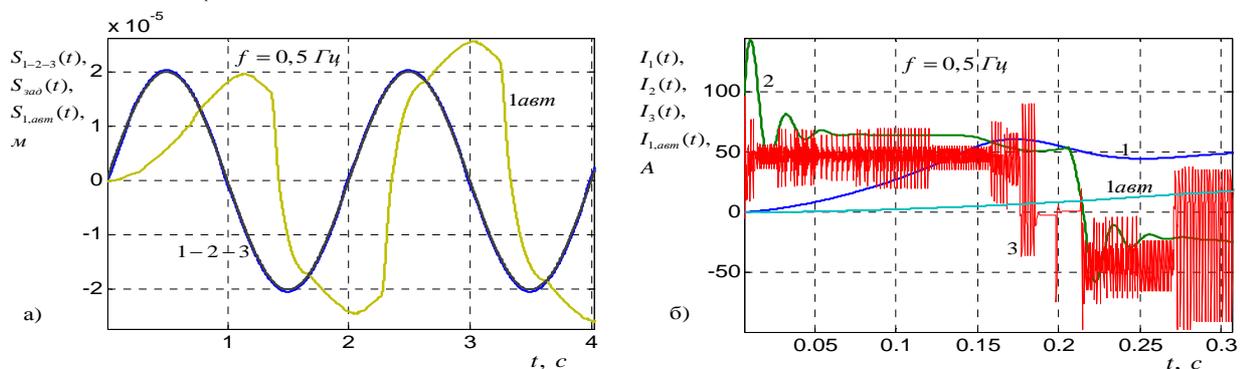


Рисунок 6 – Графики отработки синусоидальных задающих воздействий  $U_{зп}(t) = U_{зп,макс} \sin 2\pi ft$  одноканальным (автономным) ЭП и трехканальным ЭП (с компенсацией ДВБК) в зоне средних перемещений ( $S_C = 20$  мкм) в установившемся гармоническом режиме при максимальной нагрузке: а – положения; б – тока

Трехканальный ЭП позволяет существенно повысить быстродействие отработки небольших заданий в статических режимах работы. Так, время регулирования трехканального ЭП в сравнении с типовым одноканальным ЭП уменьшается в зоне малых перемещений (до  $S_M = 1$  мкм) в среднем более чем в 10 раз, а в зоне средних перемещений (до  $S_C = 50$  мкм) – более чем в 5 раз. Время регулирования трехканального ЭП в сравнении с автономным двухканальным ЭП уменьшается в зоне малых перемещений (до  $S_M = 1$  мкм) в среднем в 3-4 раза, а в зоне средних перемещений (до  $S_C = 50$  мкм) – примерно в 2 раза. Вместе с тем, в зоне средних и больших перемещений ( $S_C \geq 3$  мм) применение рассматриваемого энергосберегающего итерационного трехканального ЭП МП с двумя МД в статических режимах позиционирования не рационально.

При наиболее сложных синусоидальных задающих воздействиях вида  $U_{зп}(t) = U_{макс} \sin 2\pi ft$  точностные возможности трехканальной системы проявляются в наиболее полной мере. Так, при отработке синусоидальных

воздействий, действующих с частотой до  $f = 0,5 \text{ Гц}$  в зоне особо малых перемещений (до  $S_M = 4 \text{ мкм}$ ) уменьшения запаздывания по фазе (фазового сдвига) в трехканальном ЭП составляют: по сравнению с типовым одноканальным ЭП – более чем в  $6 \cdot 10^3$  раз; по сравнению с двухканальным ЭП – более чем в 140 раз. При этом аналогичный двухканальный ЭП обеспечивает уменьшение запаздывания по фазе по сравнению с типовым одноканальным ЭП только более чем в 18 раз. В зоне малых перемещений (до  $S_M = 20 \text{ мкм}$ ) эффективность трехканального ЭП из-за его высокой инерционности и предельно малой мощности ИД несколько снижается.

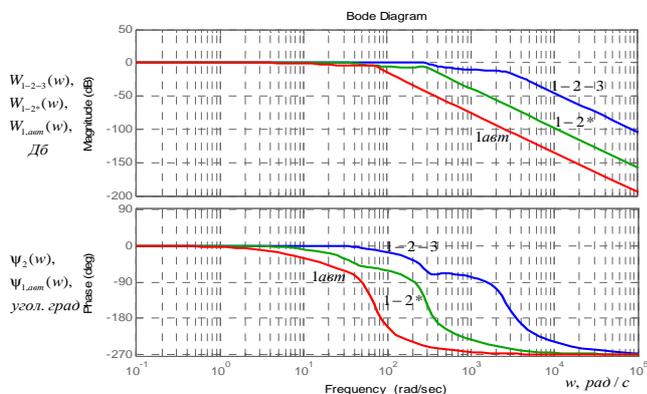


Рисунок 7 – Частотные характеристики трехканального ЭП и одноканального (автономного) ЭП при обработке малых перемещений ( $S_M = 0,1 \text{ мкм}$  и  $S_M = 4 \text{ мкм}$ ) в рабочем режиме максимальной нагрузки

$S_M < 20 \text{ мкм}$ ). В этом диапазоне работы ЭП ДВБК целесообразно компенсировать за счет введения специальных компенсаторов, т.е. синтезируемых внутренних перекрестных компенсирующих связей между каналами.

К недостаткам итерационных трехканальных дифференциальных ЭП МП металлорежущих станков следует отнести необходимость наличия в них трех отдельных ЭП требуемой мощности, двух (или, как минимум, одного) высококачественных МД и одного высокоточного (не хуже сотых долей микрона) датчика положения РО.

**ВЫВОДЫ. 1.** В итерационных трехканальных ЭП подачи РО может быть реализована точность управления, удовлетворяющая самым высоким техническим требованиям. Достижение максимально возможной точности управления практически ограничивается только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, а также разрешающей способностью используемого датчика положения РО.

**2.** Качество работы (быстродействие и точность) итерационных многоканальных ЭП подачи изделия существенно зависит от количества каналов управления, а также от правильно выбранной мощности ИД приводов уточняющих каналов: для любого уточняющего канала мощность ИД не должна быть меньше 25% мощности ИД основного (базового) ЭП.

**3.** Добавление к основному каналу К-1 второго, компенсирующего канала К-2 приводит к повышению точности работы одноканального (основного) ЭП на 1÷2 порядка; дополнительное введение третьего, точного канала К-3 – повышает точность двухканального привода уже только в несколько раз, и можно прогнозировать, что введение еще одного – четвертого уточняющего канала К-4, сможет повысить точность итерационного трехканального ЭП только на 30÷50%.

**4.** Структура итерационного трехканального ЭП МП с двумя дифференциалами МД1 и МД2 сравнительно проста даже с учетом ДВБК по нагрузке, а его расчет и оптимизация не вызывают особых трудностей.

В целом применение энергосберегающего итерационного трехканального ЭП МП целесообразно только в зоне малых и, частично, средних перемещений (до  $S_c = 3 \text{ мм}$ ), когда требуются очень высокие быстродействие и динамическая точность обработки малых задающих воздействий при значительных нагрузках на выходе типового одноканального привода подачи (основного канала К-1). Такие требования в полной мере соответствуют растущим требованиям к качеству работы МП современных обрабатывающих центров повышенной 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. Кузнецов Б.И. Многоканальные итерационные системы управления: Учебное пособие /Б.И. Кузнецов, А.А. Худяев, И.Н. Богаенко и др. – К.: НПК «КИА», 1998. – 224 с.
3. Худяев А.А. Итерационное подчиненное управление следящими электроприводами /А.А. Худяев, Д.Г. Литвиненко //Сб. науч. пр. «Вісник НТУ «ХП». Тематичн. випуск. – 2011. – № 4. – С. 141–171.
4. Худяев А.А. Обзор систем управления и исполнительных устройств электроприводов повышенной точности, построенных по итерационному принципу/А.А. Худяев, Д.А. Пшеничников //Сб. науч. пр. «Вісник НТУ «ХП». Тематичн. випуск. – 2013. – № 36 (1009) . – С. 177-180.